

Untersuchungen zur Minderung der Partikelemissionen
durch Elektroabscheider bei verschiedenen Abgasbedingungen
von Biomassekleinfeuerungen

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Julia Goy

aus Sindelfingen

Hauptberichter: Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Baumbach
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Oktober 2023

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart

2024

Abstract

Particle separators are used to reduce particle emissions as a secondary measure in small-scale biomass furnaces. Among other things, electrostatic precipitation technology is used for this purpose. However, many interrelationships are still unclear in the interaction with combustion exhaust gases. This concerns especially the influence of the flue gas conditions on the separation behavior of the electrostatic precipitators. The present work is intended to clarify this by means of experimental investigations in order to extend the state of knowledge and to improve emission reduction in small-scale biomass furnaces by means of electrostatic precipitators.

First, the fundamentals of the energetic utilization of woody fuels in small-scale furnaces for heat supply in households are summarized. This describes the general conditions in which the electrostatic precipitators are used. After that, the technical basics for emission reduction by electrostatic precipitators are described.

Subsequently, the methodological principles and the state of knowledge for the investigation and evaluation of separators in small-scale biomass furnaces are explained.

To lead up to the main part, selected individual aspects for the use of separators in combustion flue gases in small-scale furnaces are considered in the preliminary investigations. This includes calculations on the influence of design parameters on the theoretical separation efficiency based on the Deutsch equation, a short study on the influence of different separation surfaces on the flow in an electrostatic precipitator by means of flow modeling, and an investigation on the influence of the heating temperature on the formation and regeneration of soot layers on a high-voltage insulator by means of combustion tests in furnace flue gases.

The main part of the work is represented by the experimental investigations of various selected influences when using different combinations of separators and firing systems. The main measurement parameter is the total dust concentration in raw gas and clean gas, where the raw gas concentration is the main evaluation parameter for the emission behavior of the furnace. The main evaluation variable for emission reduction by the separator is the degree of separation. Particle contents and particle size distributions are determined.

Automatically and manually fed firing systems are used and various separators. The influence of combustion quality is investigated on a pellet stove with a two-stage compact electrostatic precipitator prototype. The influence of fuel type is investigated on a wood chip boiler with the same electric separator. The influence on the operating mode of a manually fed furnace is considered on a stove with a flue-based electrostatic precipitator. The influence of the combustion phase is investigated on a stove with a two-stage stand electrostatic precipitator.

Kurzfassung

Partikelabscheider dienen der Minderung von Partikelemissionen als Sekundärmaßnahmen bei Biomassekleinfeuerungen. Dafür wird unter anderem die Technologie der elektrostatischen Abscheidung eingesetzt. Im Zusammenspiel mit Feuerungsabgasen sind jedoch viele Zusammenhänge noch unklar. Dies betrifft vor allem den Einfluss der Abgasbedingungen auf das Abscheideverhalten der Elektroabscheider. Dies soll durch die vorliegende Arbeit mittels experimenteller Untersuchungen aufgearbeitet werden, um den Kenntnisstand zu erweitern und die Emissionsminderung bei Biomassekleinfeuerungen durch Elektroabscheider zu verbessern.

Zuerst werden die Grundlagen zur energetischen Nutzung von holzartigen Brennstoffen in Kleinfeuerungen zur Wärmebereitstellung in Haushalten zusammengefasst. Dadurch werden die Rahmenbedingungen beschrieben, bei denen die Elektroabscheider eingesetzt werden. Danach werden die technischen Grundlagen für die Emissionsminderung durch Elektroabscheider beschrieben.

Anschließend werden die methodischen Grundlagen und der Kenntnisstand zur Untersuchung und Bewertung von Abscheidern bei Biomassekleinfeuerungen erläutert.

Zur Hinführung an den Hauptteil werden in den Voruntersuchungen ausgewählte einzelne Aspekte für den Einsatz von Abscheidern in Feuerungsabgasen bei Kleinfeuerungen betrachtet. Dies beinhaltet Berechnungen zum Einfluss der Auslegungsparameter auf den theoretischen Abscheidegrad auf Basis der Deutsch-Gleichung, eine Kurzstudie zum Einfluss verschiedener Abscheideflächen auf die Strömung in einem Elektroabscheider mittels Strömungsmodellierung und eine Untersuchung zum Einfluss der Heiztemperatur auf die Entstehung und Reageration von Rußschichten an einem Hochspannungsisolator mittels Verbrennungsversuchen in Feuerungsabgasen.

Den Hauptteil der Arbeit stellen die experimentellen Untersuchungen von verschiedenen ausgewählten Einflüssen beim Einsatz von unterschiedlichen Kombinationen von Abscheidern und Feuerungen dar. Die Hauptmessgröße stellt die Gesamtstaubkonzentration in Rohgas und Reingas dar, wobei die Rohgaskonzentration die hauptsächliche Bewertungsgröße für das Emissionsverhalten der Feuerung darstellt. Hauptsächliche Bewertungsgröße für die Emissionsminderung durch den Abscheider ist der Abscheidegrad. Auszugsweise werden Partikelinhaltsstoffe und Korngrößenverteilungen bestimmt.

Es kommen automatisch und manuell beschickte Feuerungen zum Einsatz und verschiedene Abscheider. Der Einfluss der Verbrennungsqualität wird an einem Pelletofen mit zweistufigem Kompakt-Elektroabscheider-Prototyp untersucht. Der Einfluss der Brennstoffart wird an einem Hackgutkessel mit gleichem Elektroabscheider untersucht. Der Einfluss zur Betriebsweise einer manuell beschickten Feuerung wird an einem Kaminofen mit mündungsbasiertem Elektroabscheider betrachtet. Der Einfluss der Verbrennungsphase wird an einem Kaminofen mit zweistufigem Stand-Elektroabscheider untersucht.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	HINTERGRUND ZUR ENERGETISCHEN NUTZUNG VON HOLZBRENNSTOFFEN IN KLEINFEUERUNGEN UND ZUR MINDERUNG VON PARTIKELEMISSIONEN	1
1.2	MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG	3
1.3	VORGEHENSWEISE	5
2	BIOMASSEBETRIEBENE KLEINFEUERUNGEN UND IHR EMISSIONSVERHALTEN	7
2.1	BRENNSTOFFE FÜR KLEINFEUERUNGEN	7
2.1.1	<i>Klassifizierung von biogenen Festbrennstoffen nach Herkunft</i>	9
2.1.2	<i>Verwendungsformen und Brennstoffarten für Kleinfeuerungen</i>	9
2.1.3	<i>Chemisch-stoffliche Eigenschaften</i>	10
2.2	GRUNDLAGEN ZUR VERBRENNUNG VON BIOGENEN FESTBRENNSTOFFEN	16
2.2.1	<i>Produkte aus der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen</i>	18
2.3	FEUERUNGSANLAGEN IM GELTUNGSBEREICH DER 1.BIMSchV	19
2.4	UNTERTEILUNG VON KLEINFEUERUNGEN	21
2.4.1	<i>Unterteilung nach Beheizungszweck</i>	21
2.4.2	<i>Technische Unterteilung nach Beschickung und Brennstoffart</i>	22
2.5	ENTSTEHUNG VON PARTIKELEMISSIONEN IN FEUERUNGEN	22
2.5.1	<i>Partikelbildung</i>	22
2.5.2	<i>Zusammenfassung zu Partikelemissionen</i>	24
2.6	CHARAKTERISIERUNG VON PARTIKELEMISSIONEN AUS BIOMASSEKLEINFEUERUNGEN	24
3	TECHNISCHE GRUNDLAGEN ZU ELEKTROABSCHIEDERN FÜR DIE EMISSIONSMINDERUNG BEI KLEINFEUERUNGEN	26
3.1	PRINZIP UND FUNKTIONSWEISE VON ELEKTROABSCHIEDERN	26
3.1.1	<i>Prinzip der elektrostatischen Partikelabscheidung</i>	26
3.1.2	<i>Klassischer Prozess der elektrostatischen Partikelabscheidung</i>	27
3.1.3	<i>Klassische Bauformen von Elektroabscheidern zur Entstaubung</i>	28
3.1.4	<i>Beschreibung der Ionisation für die Ladung der Partikel</i>	28
3.1.5	<i>Beschreibung der Niederschlagsflächen</i>	29
3.1.6	<i>Abscheidegrad als Bewertungsgröße</i>	30
3.1.7	<i>Klassische Auslegung auf Basis der Deutsch-Gleichung</i>	30
3.2	ELEKTROABSCHIEDER IM EINSATZGEBIET KLEINFEUERUNGEN	31
3.2.1	<i>Einsatz von Sekundärmaßnahmen an Kleinfeuerungen</i>	31
3.2.2	<i>Vorgaben in der 1.BImSchV (2010) für Einrichtungen zur Reduzierung der Staubemissionen</i>	32
3.2.3	<i>Stand der Technik von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen</i>	33
3.2.4	<i>Eignungsfeststellung durch Bauartzulassung</i>	35
3.3	TECHNOLOGIEÜBERSICHT UND CHARAKTERISIERUNG VON ELEKTROABSCHIEDERN FÜR KLEINFEUERUNGEN	35
3.3.1	<i>Übersicht zum Aufbau von Abscheidern für Kleinfeuerungen</i>	35
3.3.2	<i>Bauformen</i>	36
3.3.3	<i>Einbauorte</i>	38
3.3.4	<i>Übersicht zu Abscheidern für Kleinfeuerungen</i>	38
3.4	SCHWIERIGKEITEN UND HINDERNISSE DER TECHNOLOGIE IM EINSATZGEBIET	39
3.4.1	<i>Partikelagglomerate und Flocken</i>	40
3.4.2	<i>Reinigung und Entfernung des abgeschiedenen Staubes</i>	40
3.4.3	<i>Spannungsüberschläge</i>	40
4	METHODISCHE GRUNDLAGEN FÜR DIE EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG VON PARTIKELABSCHIEDERN AN BIOMASSEKLEINFEUERUNGEN	41
4.1	EINFLUSSGRÖßEN AUF DIE PARTIKELABSCHIEDUNG AUS FEUERUNGSABGASEN	41
4.2	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG VON ABSCHIEDERN AN FEUERUNGEN MITTELS EMISSIONSUNTERSUCHUNGEN	43
4.2.1	<i>Untersuchungen in Feuerungsabgasen</i>	43

4.2.2	<i>Messverfahren und Probenahme bei Emissionsuntersuchungen</i>	44
4.2.3	<i>Versuchsbedingungen bei Emissionsuntersuchungen</i>	44
4.3	POTENZIELLE MESSGRÖßEN ZUR CHARAKTERISIERUNG BEI EMISSIONSUNTERSUCHUNGEN	48
4.3.1	<i>Übersicht zu Messgrößen für Emissionsuntersuchungen</i>	48
4.3.2	<i>Charakterisierung von Partikelemissionen im Abgas</i>	51
4.3.3	<i>Charakterisierung von Partikelemissionsproben durch Laboranalysen</i>	56
4.4	STANDARDISIERTE PRÜFVERFAHREN FÜR PARTIKELABSCHIEDER.....	59
4.4.1	<i>Prüfverfahren und Messvorschriften</i>	59
4.4.2	<i>Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit (DIN SPEC 33999)</i>	59
4.4.3	<i>Vorgaben aus der Zertifizierung „Blauer Engel“ für Staubabscheider</i>	65
4.5	STAND DER FORSCHUNG ZUR EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNG VON PARTIKELABSCHIEDERN	66
4.6	HERAUSFORDERUNGEN BEI DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNG VON PARTIKELABSCHIEDERN	69
4.6.1	<i>Messtechnische Herausforderungen</i>	69
4.6.2	<i>Temperaturabhängigkeit des festen Partikelzustandes</i>	69
4.6.1	<i>Partikelagglomerate</i>	70
4.6.2	<i>Isokinetik bei der Probenahme zur Staubmessung</i>	71
4.6.3	<i>Erfassung von Staubablagerungen im Probenahmesystem der Staubmessung durch Spülung der Staubsonde</i>	71
4.7	UNTERSUCHUNG VON EMISSIONSVERHALTEN UND ABSCHIEDEVERHALTEN	71
4.7.1	<i>Untersuchung und Bewertung des Emissionsverhaltens von Feuerungen</i>	72
4.7.2	<i>Untersuchung und Bewertung des Abscheideverhaltens von Partikelabscheidern</i>	73
4.8	VERSUCHSPLANUNG FÜR DIE EIGENEN UNTERSUCHUNGEN.....	74
5	VORUNTERSUCHUNGEN ZU AUSGEWÄHLTEN ASPEKTEN UND EINFLUSSFAKTOREN IM ANWENDUNGSBEREICH	77
5.1	PARAMETERANALYSEN ZU EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN THEORETISCHEN ABSCHIEDEGRAD BEI ELEKTROABSCHIEDERN AUF BASIS DER DEUTSCH-GLEICHUNG	77
5.1.1	<i>Zum Einfluss von Design-Parametern auf den theoretischen Abscheidegrad bei klassischen Bauformen von Elektroabscheidern</i>	77
5.1.2	<i>Parameteranalyse über Einflussgrößen auf den theoretischen Abscheidegrad unabhängig von der Bauform der Abscheidefläche</i>	82
5.1.3	<i>Vergleichende Berechnungen zu verschiedenen Prototypen von Abscheideflächen</i>	85
5.2	KURZSTUDIE MITTELS NUMERISCHER STRÖMUNGSMODELLIERUNG ZUM EINFLUSS DES DESIGNS DER ABSCHIEDEFLÄCHE AUF DEREN ANSTRÖMUNG	87
5.3	VERBRENNUNGSVERSUCHE ZU ENTSTEHUNG UND REGENERATION VON RUßSCHICHTEN AN EINEM HOCHSPANNUNGSISOLATOR.....	92
5.3.1	<i>Hintergrund zum Versuchszweck</i>	92
5.3.2	<i>Versuchsbeschreibung</i>	93
5.3.3	<i>Ergebnisse</i>	94
5.3.4	<i>Fazit zu den untersuchten Ablagerungen und ihrer Regenerationsfähigkeit</i>	96
5.4	EINFLUSS DER TEMPERATUR AUF DIE STROM-SPANNUNGS-KENNLINIE BEI EINEM ELEKTROABSCHIEDER	97
5.5	ANDERE ASPEKTE UND FRAGESTELLUNGEN	98
6	EMISSIONSUNTERSUCHUNGEN AN AUTOMATISCH BESCHICKTEN FEUERUNGEN MIT ZWEISTUFIGEM ELEKTROABSCHIEDER.....	99
6.1	VERSUCHSBESCHREIBUNG	99
6.1.1	<i>Gegenstand für die Untersuchungen</i>	99
6.1.2	<i>Prüfaufbau</i>	99
6.1.3	<i>Versuchsdurchführung und Mess-Strategie</i>	100
6.1.4	<i>Messgrößen und Messverfahren</i>	102
6.1.5	<i>Verwendete Geräte und Brennstoffe</i>	104
6.1.6	<i>Einfluss auf die Partikelemissionen der Feuerungen als Partikelquelle</i>	106
6.2	UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER VERBRENNUNGSQUALITÄT AN EINEM PELLETOFEN MIT ELEKTROABSCHIEDER ...	107
6.2.1	<i>Charakterisierung der Feuerungsparameter</i>	107
6.2.1	<i>Ergebnisse zum allgemeinen Emissionsverhalten am Pelletofen</i>	109

6.2.2	Zusammenhang zwischen Partikelemissionen und Verbrennungsqualität.....	113
6.2.3	Ergebnisse zum Abscheideverhalten beim Einsatz am Pelletofen.....	114
6.2.4	Charakterisierung des Abscheiders.....	119
6.2.5	Ergebnisse der Kohlenstoffanalysen repräsentativer Partikelproben.....	124
6.2.6	Ergebnisse zur Korngrößenverteilung.....	127
6.3	UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER BRENNSTOFFART AN EINER HACKGUTFEUERUNG MIT ELEKTROABSCHIEDER.....	130
6.3.1	Ergebnisse zu Feuerungsparametern und allgemeinem Emissionsverhalten.....	130
6.3.2	Ergebnisse zum Gesamtstaub und dem Abscheideverhalten.....	130
6.3.3	Ergebnisse zur Korngrößenverteilung und Größenklassen.....	132
6.3.4	Ergebnisse zur Partikelzusammensetzung repräsentativer Planfilterproben.....	141
7	EMISSIONSUNTERSUCHUNGEN AN MANUELL BESCHICKTEN EINZELRAUMFEUERSTÄTTEN MIT ELEKTROABSCHIEDERN UNTERSCHIEDLICHER BAUART.....	145
7.1	EINFLUSS DES OFENBETRIEBS AN EINEM KAMINOFEN MIT MÜNDUNGSBASIERTEM RÖHRENELEKTROABSCHIEDER.....	145
7.1.1	Versuchsbeschreibung.....	145
7.1.2	Abbrandverhalten.....	150
7.1.3	Ergebnisse zum Emissionsverhalten am Kaminofen unter dem Einfluss der Betriebsweise.....	151
7.1.4	Ergebnisse zu Partikelemissionen und dem Abscheideverhalten.....	155
7.1.5	Beispielhafte Auswertung der eigenen Versuchsergebnisse nach dem Bewertungsverfahren der DIN SPEC 33999 (2014).....	161
7.2	EINFLUSS DER VERBRENNUNGSPHASE AN EINEM KAMINOFEN MIT ZWEISTUFIGEM ELEKTROABSCHIEDER MIT AUTOMATISCHER ABREINIGUNG.....	167
7.2.1	Versuchsbeschreibung.....	167
7.2.2	Ergebnisse zum Abbrandverlauf.....	168
7.2.3	Ergebnisse zum Einfluss der Verbrennungsphase auf das Emissionsverhalten.....	168
7.2.4	Ergebnisse zum Einfluss der Verbrennungsphase auf das Abscheideverhalten.....	170
7.2.5	Ergebnisse zu Abscheider-Kenngrößen.....	175
8	DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	177
8.1	DISKUSSION DER EINZELNEN UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE.....	177
8.1.1	Diskussion zum Einfluss der Verbrennungsqualität auf die Abscheidung.....	177
8.1.2	Diskussion zum Einfluss der Brennstoffart auf die Abscheidung.....	177
8.1.3	Diskussion zum Einfluss der Betriebsweise auf die Abscheidung.....	178
8.1.4	Diskussion zum Einfluss der Verbrennungsphase.....	179
8.2	ZUSAMMENFÜHRUNG DER EINZELNEN UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE.....	179
8.2.1	Übersicht zu den Versuchsergebnissen zu Emissionsverhalten und Abscheideverhalten.....	179
8.2.2	Schlussfolgerungen zur Bauform von Abscheidern aus den Untersuchungen.....	182
8.3	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR MESSTECHNISCHEN UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG VON ELEKTROABSCHIEDERN BEI BIOMASSEKLEINFEUERUNGEN.....	182
8.3.1	Staubmessung mit Partikelagglomeraten bei Elektroabscheidern.....	182
8.3.2	Emissionsmessungen an Elektroabscheidern mit Spülluft.....	183
8.3.3	Emissionsmessungen bei mündungsbasierten Abscheidern.....	183
8.3.4	Fazit zur Anwendung des Auswerteverfahrens nach DIN SPEC 33999 (2014).....	184
8.3.5	Schlussfolgerungen für eine messtechnische Bewertung von Elektroabscheidern.....	184
8.3.6	Schlussfolgerungen zum Einfluss der Beschickungsart von Feuerungen.....	185
8.4	AKTUELLE UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN.....	186
9	ZUSAMMENFASSUNG.....	187
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	191
	ANHANG A – GRUNDLAGEN ZU FEUERUNGEN UND ABSCHIEDERN.....	197
	ANHANG B – VORUNTERSUCHUNGEN AUSGEWÄHLTER EINZELASPEKTE.....	201
	ANHANG C – UNTERSUCHUNGEN AN AUTOMATISCH BESCHICKTEN FEUERUNGEN.....	205
	ANHANG D – UNTERSUCHUNGEN AN MANUELL BESCHICKTEN FEUERUNGEN.....	212

Formelzeichen

A	Niederschlagsfläche
$C_xH_yO_z$	Allgemeine Summenformel für Biomasse-Polymere
C_nH_m	Allgemeine Summenformel für Kohlenwasserstoffe
η	Abscheidegrad
λ	Verbrennungsluftverhältnis Lambda (Luftverhältnis)
C_{Roh}	Rohgasstaubgehalt
C_{Rein}	Reingasstaubgehalt
L	Plattenlänge eines Plattenelektroabscheiders oder Rohrlänge eines Rohrelektroabscheiders
b	Gassenbreite (Plattenabstand) eines Plattenelektroabscheiders
r	Rohrradius eines Rohrelektroabscheiders
v	Gasgeschwindigkeit
\dot{V}	Gasvolumenstrom
W_{th}	theoretische Wanderungsgeschwindigkeit

Abkürzungen

CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
O ₂	Sauerstoff
H ₂ O	Wasser
OGC	Organisch gebundene flüchtige Kohlenwasserstoffe
TC	Total Carbon, Gehalt an Gesamtkohlenstoff
TOC, OC	Total Organic Carbon, Gehalt an organischem Kohlenstoff
TEC	Total Elemental Carbon, Gehalt an elementarem Kohlenstoff
TIC	Total Inorganic Carbon, Gehalt an anorganischem Kohlenstoff

1 Einleitung

1.1 Hintergrund zur energetischen Nutzung von Holzbrennstoffen in Kleinf Feuerungen und zur Minderung von Partikelemissionen

Für die Wärmebereitstellung in Haushalten wird Holz als Brennstoff in verschiedenen Verarbeitungsformen und in verschiedenen Feuerungsarten eingesetzt. Aufgrund ihrer Leistungsklasse werden sie häufig als Kleinf Feuerungen und unter Verwendung biomasseartiger Brennstoffe wie Holz auch als Biomassekleinf Feuerungen bezeichnet. Als einfachste Form der Holzbrennstoffe wird stückiges Holz in manuell beschickten Feuerungen verbrannt. Diese Art der energetischen Nutzung von Holz in häuslichen Feuerungen ist weit verbreitet und überwiegend historisch bedingt.

Grundsätzlich können häusliche Feuerungen nach zwei Merkmalen unterschieden werden. Die eine Unterscheidung erfolgt anhand regulatorischer Aspekte, hier werden Feuerungen entweder der Gruppe der Einzelraumfeuerungen oder den Zentralheizungen zugeordnet. Sie unterliegen jeweils anderen gesetzlichen und normativen Vorgaben. Die meist technisch einfacheren Einzelraumfeuerungen dienen überwiegend der Beheizung des Aufstellraumes, bei dem es sich meistens um einen Wohnraum handelt. Dagegen handelt es sich bei der anderen Gruppe um die meist größeren und technisch aufwändigeren zentralen Feuerungen. Sie befinden sich üblicherweise in einem Nebenraum oder Keller und verteilen mittels wassergeführtem Heizkreis die gewonnene Wärmeenergie in die Wohnräume des Hauses.

Die andere Unterscheidung erfolgt nach feuerungstechnischen Gesichtspunkten in manuell beschickte und automatisch beschickte Feuerungsanlagen. Sie unterscheiden sich in der Regel grundlegend durch die Form des verwendeten Brennstoffes. Dies erfordert zwei grundlegend andere Feuerungskonzepte. Manuell beschickte Anlagen – wie Kaminöfen und Scheitholzkessel – sind für stückige Brennstoffe wie Scheitholz oder Briketts konzipiert. Automatisch beschickte Anlagen – wie Pelletöfen oder Hackgutkessel – benötigen einen förderfähigen Brennstoff wie Holzpellets oder Holzhackschnitzel. Sie sind im Vergleich zu den manuell beschickten Feuerungen deutlich weiter automatisiert, so dass sie für den Betreiber eine deutliche Komfortsteigerung bedeuten. Durch den höheren Automatisierungsgrad und den homogenen Brennstoff kann eine bessere Verbrennungsqualität als bei manuell beschickten Anlagen erreicht werden.

Aus der Historie heraus bedingt sich bis heute die Dominanz von manuell beschickten Kleinf Feuerungen. Im Vergleich dazu ist der Anteil an automatisch beschickten Anlagen deutlich geringer, ihr Anteil nimmt jedoch stetig zu.

Im Zuge der Wärmewende sollen vermehrt erneuerbaren Energien zur Erreichung der Klimaneutralität eingesetzt werden. Holz stellt hierbei als nachwachsender Rohstoff eine wesentliche Säule dar. Vor allem in der aktuellen und zukünftigen Wärmebereitstellung in Haushalten spielt Holz in Form von Holzbrennstoffen eine wichtige Rolle. Obwohl Holz als Brennstoff als klimaneutral eingestuft wird, bleibt seine energetische Nutzung in Form der Verbrennung jedoch nicht ohne klima- und umweltrelevante Folgen.

Aufgrund der Inhomogenität und Stückigkeit von naturbelassenem Stückholz läuft dessen Verbrennung nicht ideal ab. Brennstoff und zugeführte Verbrennungsluft lassen kaum eine optimale Vermischung zu, es kommt zu starken lokalen Gradienten und inhomogenen Verteilungen der Brennstoff/Luft-Reaktionen und Temperaturen. Bedingt durch diese

Schwierigkeiten treten sowohl räumlich als auch zeitlich große Schwankungen der Bedingungen und damit auch der Verbrennungsqualität auf, die zu hohen Schadstoffemissionen führen können. Dies betrifft sowohl gasförmige Schadstoffe wie Kohlenmonoxid als auch flüssige oder feste Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffverbindungen und Feinstaub.

Vor allem Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungen sind politisch in den Blick geraten und als einer von mehreren Faktoren identifiziert worden, die für eine Erhöhung der Immissionswerte von Feinstaub bis hin zu Grenzwertüberschreitungen verantwortlich gemacht werden. Vor allem ihre Toxizität aufgrund ihrer Inhaltsstoffe kombiniert mit ihren Partikelgrößen werden als gesundheitskritisch eingestuft. Dies liegt an enthaltenen Verbindungen wie Ruß oder aromatischen und nicht-aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen aber auch an mitgetragenen Spurenelementen oder Schwermetallen. Vor allem aufgrund ihrer geringen Größe gelangen bestimmte Fraktionen des Feinstaubes weit bis in menschliche Lungen.

Durch einen verstärkten Immissionsschutz zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt als Lebensbasis sind die Anforderungen an Feuerungsanlagen über die Jahre immer weiter gestiegen. Durch ihre weite Verbreitung und Anwendung sind auch Kleinf Feuerungen in den Blick geraten, um die Emissionslast flächendeckend zu verringern.

Erste Wahl bei der Emissionsminderung sind stets primäre Maßnahmen, die direkt am Verbrennungsprozess ansetzen, um bereits die Entstehung von Schadstoffen zu verhindern. Dieses Vorgehen ist jedoch nur für neue Geräte und Entwicklungen anwendbar.

Sollen Emissionen bestehender Anlagen oder Technologien vermindert werden oder sind primäre Maßnahmen ausgeschöpft, besteht die Möglichkeit einer sekundären Emissionsminderung. Hier werden die bereits entstandenen Schadstoffemissionen aus dem Abgasstrom abgetrennt oder in eine weniger schadhafte Verbindung umgewandelt. Hierbei kann es sich um Katalysatoren, Partikelfilter oder andere Technologien handeln, je nach Art und Konzentration des betroffenen Schadstoffes und den vorliegenden regulatorischen, technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

An diesen Hintergrund knüpft die vorliegende Arbeit an und beschäftigt sich umfassend mit einer bestimmten Art der Sekundärmaßnahme. Sie untersucht die Technologie der elektrostatischen Abscheidung und fördert deren Weiterentwicklung. Damit soll die Reduzierung von Partikelemissionen im Anwendungsbereich der Biomassekleinf Feuerungen mithilfe von elektrostatischen Abscheidern unterstützt werden.

1.2 Motivation und Zielstellung

Elektroabscheider können als sekundäre Maßnahme zur Minderung von Partikelemissionen bei Kleinf Feuerungen als Beitrag zum Immissionsschutz wie oben beschrieben eingesetzt werden. Bei ihrem Einsatz in der Anwendung an Kleinf Feuerungen bestehen zwei wesentliche Anforderungen, die beide im Konflikt zueinander stehen. Diese Anforderungen bestehen einerseits aus der Bewältigung der Vielfältigkeit an Einsatzbedingungen, andererseits aus der Forderung zur Einhaltung der Verhältnismäßigkeit des technischen Aufwands.

Als Forderung die Vielfältigkeit an Einsatzbedingungen beim Einsatz von Abscheider an Biomassekleinf Feuerungen möglichst gut zu bewältigen, ist grundsätzlich ein hoher technischer Aufwand als positiv zu bewerten. Verschiedene Feuerungsarten, Brennstoffe, Bedienungsarten und Nutzungsverhalten verursachen sehr unterschiedliche Abgasbedingungen und eine hohe Bandbreite an Partikelemissionen, was sowohl ihre Menge als auch ihre Zusammensetzung angeht. Um bei diesen vielfältigen Einsatzbedingungen trotzdem eine dauerhaft hohe Emissionsminderung zu erreichen, ist ein gewisser technischer Aufwand für die Sekundärmaßnahmen im Sinne einer Abgasreinigung notwendig. Zu beachten sind dabei außerdem die für die unterschiedlichen Feuerungsarten geltenden regulatorischen Vorgaben, die sich auch auf die Sekundärmaßnahmen auswirken (1.BImSchV, 2010). Dieser Forderung der Vielfältigkeit an Einsatzbedingungen kann mit technisch möglichst hochwertigen Abscheidern am stabilsten erreicht werden.

Als Forderung zur Einhaltung der Verhältnismäßigkeit einer Abgasreinigung gegenüber der Emissionsquelle ist beim Einsatz von Abscheidern an Biomassekleinf Feuerungen grundsätzlich ein niedriger technischer Aufwand als positiv zu bewerten. Muss in die Abgasreinigung mehr investiert werden als in die Feuerung selbst, ist dies wenig sinnvoll. Vor allem bei der Verwendung einer manuell beschickten Feuerung auf Basis einfacher Feuerungstechnik ist schnell die Grenze zur Verhältnismäßigkeit erreicht. Dieser Forderung nach der Verhältnismäßigkeit kann am ehesten Rechnung getragen werden mit Abscheidern, die nur den maximal nötigen technischen Aufwand umsetzen.

Es lässt sich schlussfolgern, dass es zwar technisch möglich ist die gesamte Bandbreite an Emissionsbedingungen der Feuerungen abzudecken, der dazu notwendige apparative Aufwand jedoch nicht im Verhältnis zum Einsatzgebiet steht. Zur Lösung des Zielkonflikts der beiden Anforderungen ist ein Kompromiss notwendig. Für unterschiedliche Rahmenbedingungen und Konstellationen kann die Abwägung der beiden Anforderungen durchaus unterschiedlich ausfallen. Eine einfache technische Lösung mit einer mittleren Emissionsminderung kann für die immissionsschutzrechtlichen Vorgaben ausreichend und damit genauso zielführend sein wie eine aufwändigere Lösung in einem anderen Fall, die dafür eine höhere und stabilere Emissionsminderung aufweist.

Um die Eignung und Leistungsfähigkeit von Abscheidern für die verschiedenen Einsatzbedingungen und Voraussetzungen zu beurteilen, ist es notwendig die verschiedenen Abscheider repräsentativ und vergleichbar zu bewerten. Die Vergleichbarkeit der verschiedenen Konzepte und Geräte stellt jedoch eine Schwierigkeit dar.

Das liegt daran, dass einerseits bisher keine bewährten Prüfmethode, Beurteilungsverfahren oder Bewertungskriterien für den Einsatzbereich vorliegen. In dem

vergleichsweise neuen Anwendungsfeld der Sekundärmaßnahmen bei Kleinf Feuerungen werden erst in den letzten Jahren standardisierte Verfahren mit definierten Bedingungen zu deren Bewertung und Prüfung erarbeitet. Regulatorische Vorschriften wie technische Regeln existieren teilweise nur im Vorstadium oder im Entwurf und es bestehen bisher noch keine umfassenden Erfahrungen damit.

Andererseits liegt die schwierige Vergleichbarkeit daran, dass viele verschiedenartige Abscheiderbauformen entwickelt wurden, die grundsätzlich schwer zu vergleichen sind. Für den Einsatz an Kleinf Feuerungen werden in vielen Fällen bekannte Technologien aus anderen Anwendungsbereichen herunterskaliert oder adaptiert, was oft zu technisch aufwändigen Konzepten und Bauformen der Abscheider führt. Ebenso entstehen Hybridformen oder neu konzipierte Bauformen, bei denen jedoch wenig Betriebserfahrungen vorhanden sind. So entsteht ein Bündel an technischen Konzepten und Geräten, das oft nur schwer miteinander vergleichbar ist.

Hinzu kommt der Umstand, dass für die verschiedenartigen Abscheider unterschiedliche und teils unbekannte Abhängigkeiten zu den Abgasbedingungen von Feuerungen bestehen. In der Folge hat dies Auswirkungen auf eine Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit. Werden bei einer Bewertung die Bedingungen, Abläufe oder Kriterien einseitig gewählt, kann dies dazu führen, dass das Bewertungsergebnis verzerrt wird und nicht das reale Verhalten im Einsatz wiedergibt. Zweck einer Bewertung sollte jedoch sein, den realen Beitrag der Abscheider zur Emissionsminderung als repräsentatives Ergebnis zu erlangen.

Diese Umstände – Vielfältige Einsatzbedingungen und Wahrung der Verhältnismäßigkeit im Konflikt bei zusätzlich schwieriger Vergleichbarkeit – erfordern eine genauere Betrachtung der Zusammenhänge im Verbund von Feuerungen und Abscheidern. Hieraus folgert die Zielstellung der vorliegenden Arbeit und deren Inhalt.

Ziel der Arbeit ist eine umfassende Untersuchung der Einflussfaktoren und Abhängigkeiten für eine Erweiterung der Wissensbasis für den Einsatz von Abscheidern bei Biomassekleinf Feuerungen.

Es soll Kenntnis erlangt werden, welche Faktoren die Partikelabscheider beim Einsatz in Feuerungsabgasen am meisten beeinflussen und inwiefern ihr Abscheideverhalten vom Emissionsverhalten der Feuerungen abhängt. Dabei soll ebenso betrachtet werden, welche auftretenden Effekte oder bestimmte Bedingungen sich positiv oder negativ auf die Abscheidung auswirken und ob ein Zusammenhang zur Bauform des Abscheiders gefunden werden kann.

1.3 Vorgehensweise

Der vorliegende Abschnitt beschreibt, auf welche Art und Weise das Ziel der Wissenserweiterung zu den Zusammenhängen zwischen Emissionsverhalten und Abscheideverhalten erreicht werden sollen (siehe Abbildung 1.1). Um aufzuzeigen, welche Aspekte bei der Erfüllung der Aufgabe der Emissionsminderung und damit für das Voranbringen der Technologie der elektrostatischen Abscheidung im Einsatzgebiet besonders wichtig sind, sollen verschiedene Abscheider und ihre technischen Konzepte unter verschiedenen Emissionsbedingungen experimentell untersucht und verschiedene Einflussfaktoren analysiert werden.

Nach einer kurzen Einführung in das Themengebiet werden die notwendigen technischen Grundlagen für den Anwendungsbereich der Biomassekleinfeuerungen und die Technologie Elektroabscheider als Sekundärmaßnahme für die Emissionsminderung gegeben. Es werden die verschiedenen Feuerungsarten und Brennstoffe charakterisiert und die regulatorischen Rahmenbedingungen erläutert. Nach einer Zusammenfassung zur Biomasseverbrennung werden die Grundlagen für das Emissionsverhalten und die Entstehung von Schadstoffemissionen beschrieben.

Danach werden Prinzip und Funktionsweise von Elektroabscheidern zur Emissionsminderung erläutert und im Besonderen auf das Zusammenspiel im Verbund mit Kleinfeuerungen eingegangen. Dieser Teil schließt mit der Problembeschreibung zur Technologie der Elektroabscheider im Anwendungsgebiet der Biomassekleinfeuerungen.

Im Abschnitt der methodischen Grundlagen werden Kenntnissstand zu Prüfverfahren und alle notwendigen Aspekte für die Untersuchung von Elektroabscheidern beschrieben. Es werden verschiedene Messgrößen und Randbedingungen diskutiert. Es wird darauf eingegangen, wie das Emissionsverhalten der verwendeten Feuerungen und das Abscheideverhalten der verwendeten Elektroabscheider untersucht werden.

In den Voruntersuchungen werden ausgewählte Einzelaspekte betrachtet. Dies beinhaltet einerseits theoretische Berechnungen auf Basis der Deutsch-Gleichung zur Veranschaulichung von Einflussgrößen bei der Konzeptionierung und der Dimensionierung von Elektroabscheidern. Andererseits beinhaltet es die Durchführung einer Strömungsmodellierung zum Vergleich verschiedener Abscheideflächen und auch Versuche zur Entstehung von Rußschichten an einem Hochspannungsisolator.

Die experimentellen Untersuchungen stellen den Hauptteil der Arbeit dar. Sie beschäftigen sich mit der Untersuchung des Abscheideverhaltens von Elektroabscheidern bei verschiedenen Abgasbedingungen. Verschiedenen Feuerungen werden als Emissionsquelle für Partikelemissionen mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt.

An automatisch beschickten Feuerungen werden der Einfluss der Verbrennungsqualität und der Einfluss der Brennstoffart auf die Emissionsbedingungen und das Abscheideverhalten betrachtet. An manuell beschickten Feuerungen werden der Einfluss der Betriebsweise und der Einfluss der Abbrandphase auf die Emissionsbedingungen und das Abscheideverhalten untersucht.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen diskutiert. Die Ergebnisse zur Untersuchung der verschiedenen Einflüsse werden zusammengeführt und Schlussfolgerungen gezogen. Die verwendeten Messgrößen und Bewertungsgrößen werden diskutiert und Schlussfolgerungen für deren Verwendung gegeben.

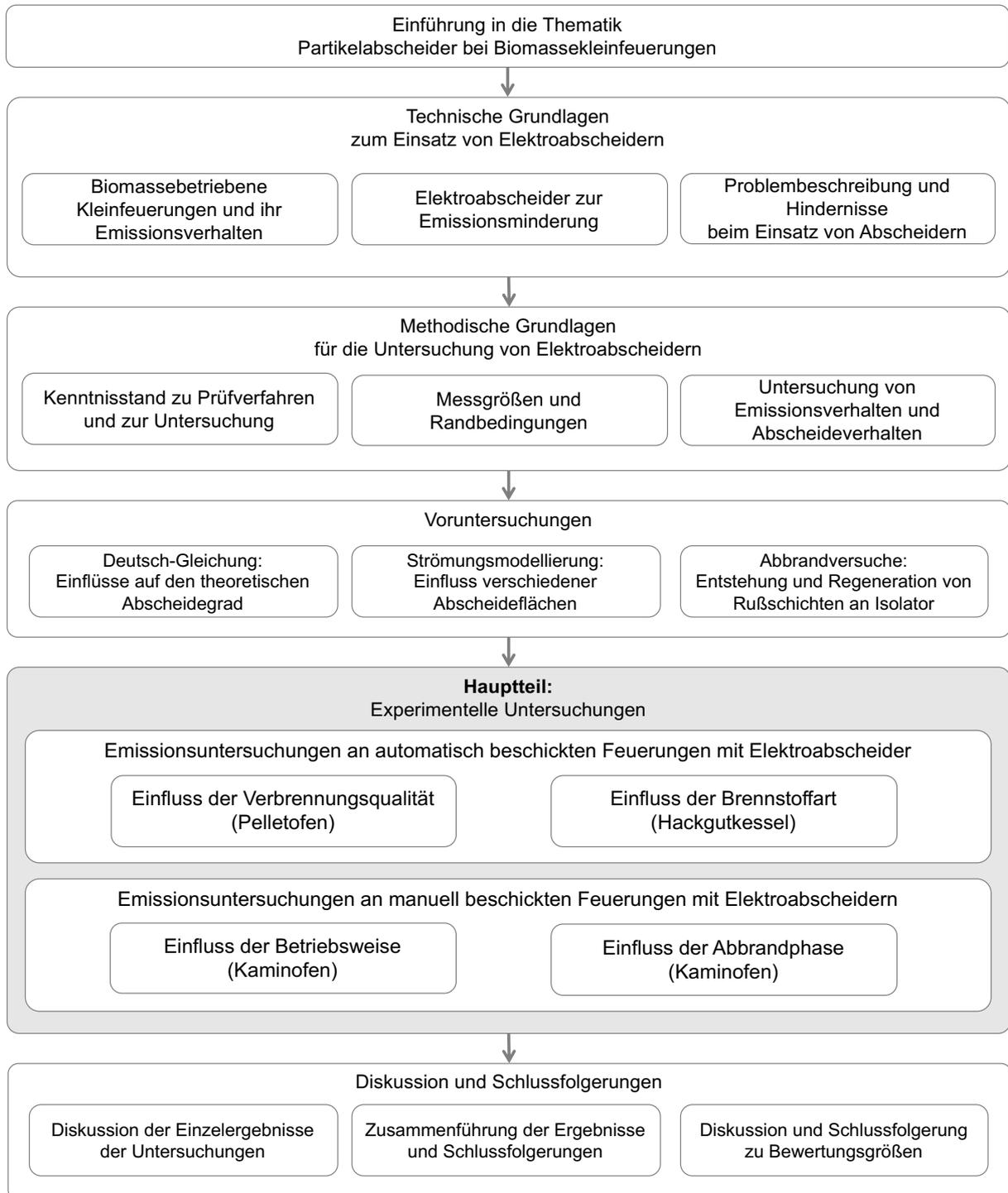


Abbildung 1.1: Vorgehensweise, Struktur und thematische Gliederung der Arbeit

2 Biomassebetriebene Kleinfeuerungen und ihr Emissionsverhalten

2.1 Brennstoffe für Kleinfeuerungen

Holzbrennstoffe werden weltweit seit jeher zur Erzeugung von Wärme in Haushalten eingesetzt. Obwohl heute eine Vielzahl weiterer Brennstoffe zur Verfügung stehen, hat der Einsatz von holzartiger Biomasse nicht an Bedeutung verloren – sondern ist im Zuge von Energiewende und Rohstoff-Konkurrenz vor allem vor dem Hintergrund einer klimaneutralen, dezentralen und regionalen Wärmeerzeugung in Haushalten noch wichtiger geworden.

Bei allen Vorteilen der Holzbrennstoffe neigen jedoch vor allem die zur Wärmeerzeugung in Haushalten eingesetzten Feuerungen im kleinen Leistungsbereich, also Einzelraumfeuerstätten oder Zentralheizungen, zu überproportional hohen Emissionen von Luftschadstoffen. Dies kann vor allem lokal eine hohe Belastung der Luftqualität bedeuten und führt zu einem Spannungsfeld zwischen klimaneutralem Energieträger einerseits und den Anforderungen an die Luftqualität andererseits.

Welchen technischen und rechtlichen Hintergrund und welche qualitätsrelevanten Eigenschaften diese Feuerungen und ihre Brennstoffe haben, wird in den nachfolgenden Abschnitten zusammenfassend beschrieben.

Für die energetische Nutzung von biogenen Festbrennstoffen für die Wärmebereitstellung in privaten Haushalten kommen hauptsächlich holzartige Brennstoffe in der Form von Scheitholz, Hackschnitzeln und Holzpellets zum Einsatz. Sie werden überwiegend in Kleinfeuerungsanlagen wie Kaminöfen und Pelletheizungen eingesetzt. (FNR, 2013).

Sie können entweder nach ihrer Herkunft oder ihren Eigenschaften eingeteilt werden.

Eine Einführung über die energetische Nutzung von Biobrennstoffen gibt beispielsweise der „Leitfaden feste Biobrennstoffe“ (FNR, 2014), wobei dieser sich auf die mittleren und größeren Feuerungsanlagen im Leistungsbereich > 100 kW fokussiert.

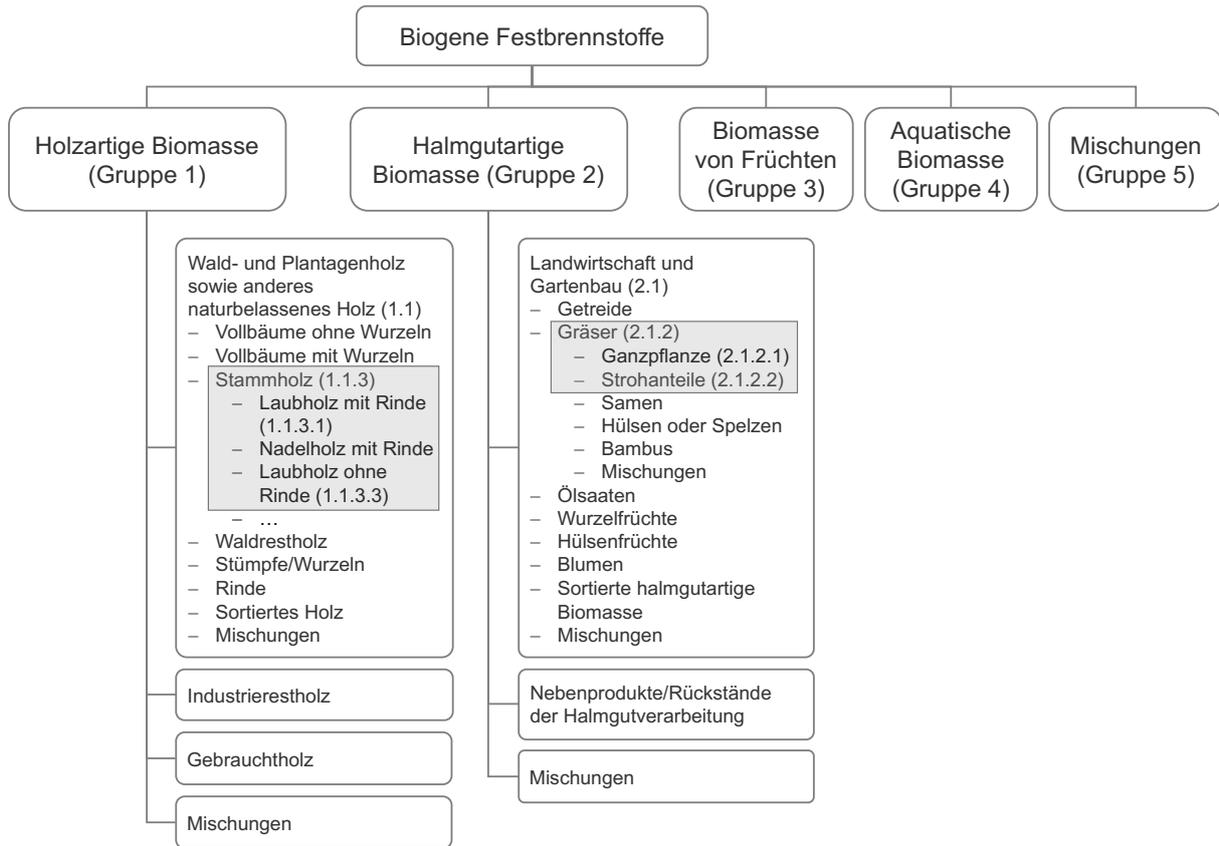


Abbildung 2.1: Klassifizierung von biogenen Festbrennstoffen, eigene Grafik nach (DIN EN ISO 17225-1, 2014) und (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 583f)

Eine Klassifizierung der Brennstoffe erfolgt nach ihrer Herkunft und entsprechenden Herkunftsmerkmalen in Gruppen. Eine Vielzahl von unterschiedlichen Normen und Regelungen gibt Verfahren für die Einteilung von Brennstoffen, Charakterisierung von Eigenschaften oder Bestimmung von Kenngrößen vor, die in Abschnitt 2.1.1 im Überblick dargestellt werden.

In Kleinf Feuerungen wird nur ein Teil der Brennstoffe eingesetzt, wobei es sich überwiegend um Holzbrennstoffe in unterschiedlicher Verarbeitungsform handelt. Welche hier typischerweise zur Anwendung kommen wird in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Neben der Herkunft werden Brennstoffe nach ihren qualitätsrelevanten Eigenschaften beurteilt. Diese lassen sich je nach betrachteten Aspekten zu chemisch-stofflichen, brennstofftechnischen oder physikalisch-mechanischen Eigenschaften zuordnen. Da diese Eigenschaften teils einen wesentlichen Einfluss auf die Verwendung der Brennstoffe, die Vorgänge bei ihrer Verbrennung und vor allem auch das Emissionsverhalten dabei haben können, werden die relevanten Grundlagen dazu in den nachfolgenden Abschnitten entsprechend behandelt und normative Grundlagen dazu im Anhang A gegeben.

2.1.1 Klassifizierung von biogenen Festbrennstoffen nach Herkunft

Geregelt wird die Einteilung von biogenen Festbrennstoffen nach Herkunftsmerkmalen durch die DIN EN ISO 17225-1:2014: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1 (DIN EN ISO 17225-1, 2014).

Eine detaillierte Übersicht über die Einteilung und Eigenschaften von holzartigen, halmgutartigen und anderen Brennstoffen gibt die Literatur (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 583f).

In der Abbildung 2.1 ist die Einordnung der hier verwendeten Brennstoffgruppen im Gesamtkontext der biogenen Festbrennstoffe dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird nur ein kleiner Teil der gesamten Biomasse betrachtet, nämlich der Bereich von holz- und halmgutartigen Festbrennstoffen für die energetische Nutzung in Kleinfeuerungsanlagen. Daher werden hier nur die Eigenschaften der entsprechenden Biomasse-Gruppen 1 und 2 weiterbetrachtet und für alle weitergehenden Aspekte auf die genannte Literatur verwiesen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden überwiegend Brennstoffe aus naturbelassenem Holz betrachtet. Dies entspricht der obigen Einteilung nach der Gruppe der holzartigen Biomasse (Gruppe 1) mit der Untergruppe 1.1, und hiervon vor allem das Stammholz als Laubholz mit oder ohne Rinde (Untergruppen 1.1.3.1 und 1.1.3.3). Repräsentativ für einen Brennstoff aus der Gruppe 2 kommen im Rahmen der Arbeit Pellets aus Heu zum Einsatz, diese sind der Gruppe der halmgutartigen Biomasse (Gruppe 2) und der Untergruppe der Gräser (2.1.2) zugeordnet.

2.1.2 Verwendungsformen und Brennstoffarten für Kleinfeuerungen

Wie schon beschrieben dominieren bisher die holzartigen Brennstoffe in der Nutzung für die Wärmebereitstellung in Haushalten. Den größten Anteil stellt hier die Nutzung von naturbelassenem Holz in Form von stückigem Scheitholz, in zerkleinerter Form als Holz hackschnitzel und in verarbeiteter und gepresster Form als Holzpellets dar.

Durch die generelle Verknappung von Rohstoffen durch Nutzungskonkurrenz in vielen Bereichen für nachwachsende Rohstoffe wie Holz werden zunehmend mehr und mehr Abfall- und Restströme auch für die Nutzung als Brennstoff in Biomassefeuerungen verwendet. Bedingt durch deren Zusammensetzung und andere Inhaltsstoffe, weisen sie einen höheren Aschegehalt auf oder neigen durch ein niedrigeres Ascheschmelzverhalten zur Schlackebildung im Brennraum und generell zu höheren Emissionen. Dadurch sind diese Brennstoffe niedrigerer Qualitäten anlagentechnisch schwieriger zu handhaben und werden daher eher in Feuerungsanlagen mittlerer und größerer Feuerungsleistung eingesetzt und weniger in Kleinfeuerungen für private Haushalte.

2.1.2.1 Stückholz

Bei Stückholz handelt es sich in der Regel um aus Stammholz gespaltene Scheite aus verschiedenen Baumarten. Am gängigsten für die Nutzung in privaten Haushalten ist Buchenholz, üblicherweise mit Rinde. Die gängigsten Längen orientieren sich historisch an den verschiedenen Feuerraumgrößen von Kaminöfen, offenen Kaminen und Scheitholzkesseln. Dicke und Ausprägung der Holzscheite können sehr stark variieren und hängen von der Verarbeitung des jeweiligen Händlers oder Bearbeiters ab,

dementsprechend stark variiert auch das Gewicht der einzelnen Scheite. Auch die Beschaffenheit der Scheite, der Rindenanteil oder der Feuchtegehalt sind starken Variationen unterworfen. Eingesetzt werden sie in manuell beschickten Feuerungen, sowohl in Einzelraumfeuerungen als auch in Zentralheizungen. Normungsgrundlage für ihre Eigenschaften ist die DIN EN ISO 17225-5:2021-11.

2.1.2.2 Holzhackschnitzel

Holzhackschnitzel bestehen in der Regel aus zerkleinertem, naturbelassenem Holz in unterschiedlichen Qualitäten. Sowohl Stückigkeit als auch Rindenanteil, Feinanteil oder Feuchtegehalt können stark variieren. Verwendet werden sie üblicherweise in automatisch beschickten Hackgutkesseln als Zentralheizungen. Regelungen hierzu enthält die DIN EN ISO 17225-4:2021-06.

2.1.2.3 Holzpellets

Genormte Holzpellets stellen die höchste Qualitätsstufe bei holzartigen Brennstoffen dar (DIN EN ISO 17225-2:2021-09). Sie werden in der Regel aus naturbelassenem Holz industriell hergestellt und unterliegen einer geringeren Variationsbreite als die anderen holzartigen Brennstoffe. Sie werden in automatisch beschickten Feuerungen eingesetzt und können sowohl in Einzelraumfeuerungen als auch in Zentralheizungen verwendet werden.

2.1.3 Chemisch-stoffliche Eigenschaften

Über die Charakterisierung von Brennstoffen nach ihren chemisch-stofflichen Eigenschaften lassen sich viele notwendige Informationen über Ihre Qualität und Verwendung ableiten. Ihre Elementarzusammensetzung lässt Rückschlüsse über ihre Herkunft genauso abschätzen wie ihr Verhalten bei der Verbrennung, mögliche Emissionen oder eine Neigung zu Verschlackung in der Feuerungsanlage.

Manche der Elemente unterscheiden sich wenig zwischen den verschiedenen Biomassearten, andere hingegen sehr stark. In den nachfolgenden Abschnitten werden die verschiedenen Elemente und ihre Auswirkungen vor allem bei der Nutzung in Kleinfeuerungen und für das Emissionsverhalten dieser Brennstoffe beschrieben.

2.1.3.1 Elementare Zusammensetzung von biogenen Festbrennstoffen

Ausführliche Grundlagen zu den chemisch-stofflichen Eigenschaften von Brennstoffen aus pflanzlicher Biomasse gibt (Kaltschmitt, et al., 2016).

Bezüglich ihrer Inhaltsstoffe bestehen biogene Festbrennstoffe aus einer Vielzahl an Elementen, die in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Hauptelemente,
- Nebenelemente,
- Spurenelemente.

Welche Elemente welcher Gruppe und welchen Eigenschaften zugeordnet werden, ist als Übersicht in Tabelle 2.1 zusammengestellt und nachfolgend zusammenfassend beschrieben (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 586ff):

Der Gruppe der Hauptelemente werden Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) zugeordnet, sie bilden die hauptsächliche Masse im Brennstoff und unterscheiden sich innerhalb der Biomassegruppe nur wenig. Überwiegend stellen der Kohlenstoff und in untergeordneter Rolle der Wasserstoff die gespeicherte Energie im Brennstoff dar, die bei ihrer Oxidation durch den Sauerstoff während dem Verbrennungsvorgang als Wärmeenergie nutzbar gemacht wird. Sie haben daher ihre Bedeutung für die Höhe vom Heizwert und den für die Verbrennung notwendigen Luftbedarf.

Die Nebenelemente haben wesentlich niedrigere Gehalte im Brennstoff, können jedoch grundlegend die Eigenschaften bei der Verbrennung verändern und massive Betriebsprobleme oder erhöhte Emissionen verursachen. Ihre Variationsbreite kann sich deutlich zwischen den Brennstoffen unterscheiden, je nachdem welche Pflanzenteile enthalten sind. Als wichtigster Indikator für die Brennstoffqualität gilt hier das Kalium (K). Als aerosolbildendes Element beeinflusst es unmittelbar die Partikelemissionen und begünstigt ein erniedrigtes Ascheerweichungsverhalten. Andere Elemente beeinflussen ebenfalls das Ascheschmelzverhalten, die Emissionen bei der Verbrennung, Korrosionseigenschaften oder die Ascheverwertung – wobei dies bei den verschiedenen Elementen durchaus gegenläufig geschieht. Um diese Effekte im Vorfeld eines Brennstoffeinsatzes abschätzen zu können, wird auf die Berechnung von Brennstoffindizes zurückgegriffen (siehe hierzu Abschnitt 2.1.3.3).

Bei den Spurenelementen kann es wie bei den Nebenelementen zu deutlichen Schwankungen in Brennstoffen kommen. Als kritische Elemente sind hier vor allem die Schwermetalle anzusehen. Je nach Flüchtigkeit der verschiedenen Spurenelemente gelangen sie über kondensiertes Abgas in emittierte Partikel (Flugasche) oder verbleiben in den festen Rückständen in der Asche in der Feuerung (Rostasche). Verschiedene der Schwermetalle spielen eine Rolle als Aerosolbildner. Außerdem haben sie überwiegend eine Bedeutung für die Ascheverwertung, da hier wegen ihrer Toxizität entsprechende Grenzwerte beispielsweise bei der Ausbringung von Asche als Düngemittel gelten. Sie kommen nicht natürlicherweise in besonderem Maße in Biomasse wie naturbelassenem Holz vor, sondern gelangen durch eine Behandlung von Holz in den Brennstoff. Daher können Elemente wie Zink oder Blei als Hinweis für die Verwendung oder Beimischung von nicht-naturbelassenem Holz im Brennstoff gesehen werden.

Tabelle 2.1: Brennstoffzusammensetzung von biogenen Festbrennstoffen und ihre brennstofftechnische Bedeutung

Elemente	Bedeutung für die Verbrennung biogener Festbrennstoff	Gehalt im Brennstoff
Hauptelemente		
<i>Stellen den Energiegehalt der Biomasse dar und beeinflussen damit den Heizwert für die energetische Nutzung.</i>		
C Kohlenstoff	Hauptsächlicher Energieträger im Brennstoff, dessen Energie bei der Verbrennung durch Oxidation freigesetzt wird. Relevant für Heizwert, Luftbedarf.	Kohlenstoff-Gehalt in Gew.-% (TM): 47 - 50 % Holzbrennstoffe 43 - 48 % Nicht-Holz-Brennstoffe
H Wasserstoff	Fungiert ebenfalls durch seine Oxidation als Energielieferant, allerdings mit untergeordneter Rolle gegenüber dem Kohlenstoff. Relevant für Heizwert, Luftbedarf.	Wasserstoff-Gehalt in Gew.-% (TM): 5 - 7 %
O Sauerstoff	Hauptfunktion während der Verbrennung ist die Rolle als Oxidationsmittel für Kohlenstoff und Wasserstoff. Relevant für Heizwert, Luftbedarf.	Sauerstoff-Gehalt in Gew.-% (TM): 40 - 45 %
Nebenelemente		
<i>Charakteristisch für die Brennstoffqualität, gelten als aschebildende Elemente und beeinflussen vor allem anlagen- und emissionsbezogene Aspekte wie Ascheerweichungs-verhalten und Verschlackungsneigung, Korrosionsverhalten, Ascheverwertung und Emissionsverhalten.</i>		
N Stickstoff	Geht bei seiner Oxidation während der Verbrennung in die Gasphase über und stellt damit direkt den Bildungsmechanismus von Stickoxid(NOx)-Emissionen dar.	Stickstoff-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,1 - 0,2 % Holzbrennstoffe (Stammholz) bis über 0,5 % bei höherem Rindenanteil 0,5 bis über 2 % Nicht-Holz-Brennstoffe
K Kalium	Hohe Bedeutung als Indikator für die Brennstoffqualität. Ist leicht flüchtig und gehört zu den aerosolbildenden Elementen (Partikelemissionen). Spielt in Verbindung mit Chlor und Eisen eine Rolle bei Korrosionsvorgängen in anlagentechnischen Bauteilen (Wärmeübertrager etc.). Erniedrigt die Ascheerweichungstemperatur.	Kalium-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,1 - 0,3 % Holzbrennstoffe 0,5 - 2 % Nicht-Holz-Brennstoffe
Na Natrium	Wirkt wie kalium als aerosolbildendes Element.	
Ca Calcium	Erhöht die Ascheerweichungstemperatur. Kann daher als Zuschlagstoff (Additiv , z.B. als Kalk) für Brennstoffe niedriger Qualität bzw. ungünstigem Ascheerweichungsverhalten eingesetzt werden. Kann andere Elemente in der Asche einbinden.	Gehalt kann stark variieren. Calcium-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,3 - 1 % Holzbrennstoffe (bei Rinde mehr) 0,2 - 2 % halmgutartige Brennstoffe, Körner
Mg Magnesium	Erhöht ebenfalls wie Calcium die Ascheerweichungstemperatur. Verwendung als Zuschlagstoff möglich.	Magnesium-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,03 - 0,1 % Holzbrennstoffe 0,5 - 2 % Nicht-Holz-Brennstoffe
P Phosphor	Überwiegende Bedeutung in der Ascheverwertung (Düngewert), keine weiter relevanten brennstofftechnischen Eigenschaften.	Phosphor-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,01 - 0,1 % Holzbrennstoffe 0,05 - 0,2 % Nicht-Holz-Brennstoffe
S Schwefel	Geht in die gasförmige Phase über und beeinflusst direkt die Schwefeldioxid(SO₂)-Emissionen oder wird über Rückkondensation in die Asche eingebunden. Kann in Verbindung mit Chlor die Dioxin-/Furanbildung beeinflussen. (Generell eher niedrigere Gehalte in Biomasse im Vergleich zu fossilen Brennstoffen.)	Schwefel-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,01 - 0,05 % Holzbrennstoffe 0,1 - 0,3 % Nicht-Holz-Brennstoffe
Si Silizium	Erniedrigt die Ascheerweichungstemperatur und kann dadurch zu Verschlackungsproblemen im Brennraum führen. Kann die Einbindung anderer Elemente in die Asche beeinflussen.	Silizium-Gehalt in g/kg (TM): 0,2 - 4 g/kg Holzbrennstoffe 3 - 12 g/kg Nicht-Holz-Brennstoffe
Cl Chlor	Kann sowohl in der Gasphase als auch in der Asche vorkommen. Hohe Bedeutung für die Brennstoffqualität und zählt zu den aerosolbildenden Elementen (Partikelemissionen). Kann korrosiv wirken, beeinflusst direkt die Chlor- Emissionen und kann die Dioxin/Furan-Emissionen erhöhen.	Chlor-Gehalt in Gew.-% (TM): 0,005 bis 0,02 % Holzbrennstoffe (oder unterhalb der Nachweisgrenze) 0,2 bis 0,8 % Nicht-Holz-Brennstoffe

Elemente	Bedeutung für die Verbrennung biogener Festbrennstoff
Spurenelemente (u.a.)	
Al Aluminium	Schwermetalle:
As Arsen	Kommen von Natur aus nur begrenzt in biogenen Brennstoffen vor. Stellen daher ein wesentliches Merkmal für
Cd Cadmium	den Unterschied zwischen naturbelassenen und nicht-naturbelassenen Brennstoffen dar.
Cr Chrom	
Cu Kupfer	Spielen je nach Flüchtigkeit und Toxizität eine Rolle als Aerosolbildner oder bei der Ascheverwertung .
Fe Eisen	Unterliegen teils Grenzwerten bei der Herstellung von Brennstoffen oder der Verwendung von Aschen.
Hg Quecksilber	
Ni Nickel	
Pb Blei	
Zn Zink	

2.1.3.2 Molekularer Aufbau von biogenen Festbrennstoffen

Die Hauptelemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff bilden die Basis für die in holzartigen und halmgutartigen Biomassen vorkommenden makromolekularen Verbindungen. Hierbei handelt es sich um die drei Biopolymere Zellulose, Hemizellulose und Lignin, die zusammen über 95% der Pflanzentrockensubstanz ausmachen (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 587). Diese und andere Arten von Biomasse werden daher auch als Lignozellulosematerialien bezeichnet. Je nach Art der Pflanze variiert das Verhältnis der unterschiedlichen Polymere zueinander und deren genaue Ausprägung.

In geringerer Menge und mit großer Variationsbreite kommen außerdem noch organische Verbinden in der Gruppe der Extraktstoffe und anorganische Verbindungen als Gruppe der mineralischen Bestandteile vor.

Die Nebenelemente und Spurenelemente sind entweder in den genannten Stoffgruppen eingebunden oder durch Fremdstoffe der Biomasse anhaftend.

Die wichtigsten Grundlagen zu den Bindungsformen sind nachfolgend zusammenfassend beschrieben und in Tabelle 2.2 gezeigt aus (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 587ff):

Tabelle 2.2: Bindungsformen und Polymerstrukturen in holzartiger und halmgutartiger Biomasse (zusammengestellt nach (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 587ff))

Beschreibung der Bindungsformen	Gehalte in holzartigen Brennstoffen (in Gew.-%)	Gehalte in halmgutartigen Brennstoffen (in % TM)
Zellulose		
Aufbau: Langkettige und unverzweigte Polymere aus gleichförmigen Monomeren (Glukosemolekülen). Funktion: Gerüstsubstanz in der Zellwand (Zugfestigkeit).	40 - 45 %	23 - 43 %
Hemizellulose		
Aufbau: Verzweigte Polymere aus verschiedenen Monomeren (Hexosen, Pentosen und andere). Funktion: vielfältig je nach genauem Aufbau.	21 - 27 %	14 - 29 %
Lignin		
Aufbau: räumlich vernetzte Polymere aus aromatisch aufgebauten Monomeren (Ringstrukturen). Polymer mit dem höchsten Kohlenstoffgehalt (Energiegehalt). Funktion: Füllstoff in der Pflanzenzelle (Druckstabilität).	22 - 30 %	11 - 19 %
Extraktstoffe		
Organische Bestandteile in pflanzlicher Biomasse mit sehr unterschiedlicher chemischer Struktur. Hierzu gehören unter anderem Harze und Fette (hauptsächlich bei Holz), Proteine, Kohlenhydrate, Aminosäuren, Fettsäuren, aromatische Verbindungen.	1 - 3 % Harze/ Fette	3 - 13 % Proteine
Minerale / Asche		
Mineralische (anorganische) Bestandteile, die im Brennstoff enthalten sein können oder aus Verunreinigungen stammen. Aus ihnen entsteht bei der Verbrennung von pflanzlicher Biomasse die Asche als fester Rückstand. Unterliegt je nach Art der Biomasse einer großen Schwankungsbreite.	1 - 2 %	2 - 11 %

2.1.3.3 Brennstoffindizes und Indikatoren

Manche der beschriebenen Elemente, Stoffgruppen oder Eigenschaften sind besonders charakteristisch oder relevant für das Verbrennungsverhalten oder Emissionsverhalten der Brennstoffe.

Daher werden diese in der Feuerungs- und Kraftwerkstechnik als Leitkomponenten für eine dem Brennstoffeinsatz vorgelagerte Abschätzung von möglichen Betriebsproblemen betrachtet – beispielsweise aufgrund von Verschlackung, Korrosion oder Emissionen – und finden in der Berechnung von Brennstoffindizes Anwendung.

Relevante Indikatoren für den Anlagenbetrieb:

- Indikator für die Ascheerweichung
- Indikator für die Hochtemperaturkorrosion

Relevante Indikatoren für Emissionen:

- Aerosolbildungsindikator
- Indikator für Stickoxid-Emissionen
- Indikator für Schwefeloxid- und Chlorwasserstoff-Emissionen
- Indikator für die Kaliumfreisetzung

Je hochwertiger ein Brennstoff, beispielsweise ein Holzbrennstoff ohne oder mit geringem Rindenanteil, umso unkritischer ist dessen Verhalten bei der Verbrennung und umso geringer die Betriebsprobleme und Emissionen.

Je mehr kritische Elemente im Brennstoff enthalten sind, umso geringer dessen Qualität und umso größer der Aufwand für dessen Handhabung bei der Verbrennung, Dies kann sich durch vermehrte Betriebsprobleme oder erhöhte Emissionen zeigen. Hier helfen die Indikatoren, die teils komplexen und mitunter gegenläufigen Wirkungen der verschiedenen Elemente abzuschätzen, um dem mit entsprechenden Maßnahmen im Betrieb und in der Abgasreinigung entgegenzuwirken.

Ein zentrales Problem im Betrieb bei der Verbrennung von holzartigen und halmgutartigen Brennstoffen stellt eine niedrige Ascheschmelztemperatur beziehungsweise ein ungünstiges Ascheerweichungsverhalten dar. Dies kann zur Verschlackung des Brennstoffes im Brennstoffbett in kleineren festen Klumpen bis hin zur Verblockung des gesamten Feuerraumes und damit dem Anlagenstillstand mit massiver Beschädigung der Anlage führen.

Ein weiteres Problem, vor allem bei Brennstoffen mit niedrigerer Qualität oder entsprechend enthaltenen Pflanzenteilen, können die bei ihrer Verbrennung verstärkt vorkommenden Emissionen sein. Diese können entweder durch ihre Menge und entsprechend folgender Schadstoff-Konzentration im Abgas zu immissionsschutzrechtlichen Problemen aufgrund von Grenzwertüberschreitung führen oder durch ihre Inhaltsstoffe Schäden an der Anlage oder Betriebsprobleme verursachen.

Vor allem Kalium kann in verschiedenen Brennstoffarten in relevanten Mengen vorkommen. Es kann einerseits die Ascheerweichung erniedrigen und damit die Gefahr zur Verschlackung des Brennraumes erhöhen, also auch als aerosolbildendes Element die Emissionen im Abgas erhöhen.

2.2 Grundlagen zur Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen

Als thermochemische Umwandlung unterliegt die Verbrennung holzartiger Biomasse bestimmten Prozessen und Bedingungen, deren Grundlage in diesem Abschnitt gegeben wird. Sie wird hier unabhängig vom Bezug zu einer konkreten Feuerungsanlage oder Feuerungstechnik gegeben, sondern soll die relevanten Aspekte der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen behandeln und verdeutlichen. Letztlicher Zweck der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen in Haushalten ist die Nutzung der im Brennstoff enthaltenen Energie für die Wärmebereitstellung in Form von Raumwärme zur Beheizung von Wohnräumen beziehungsweise je nach Bauform in Kombination mit einer Warmwasserbereitstellung.

Je nachdem in welcher Gasatmosphäre und bis zu welchem Oxidationsgrad die thermochemische Umwandlung der Biomasse stattfindet, wird allgemein zwischen Verbrennung, Vergasung und Pyrolyse unterschieden. Bei der Verbrennung reagiert der Brennstoff in einer Gasatmosphäre mit einem Oxidationsmittel – im einfachsten Fall dem Luftsauerstoff – und es wird eine möglichst vollständige Umsetzung des Brennstoffes angestrebt. Dies wird als direkte bzw. vollständige Umwandlung bezeichnet, da die Energie im Brennstoff unmittelbar in Form von Wärme angestrebt und genutzt wird (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 646ff). Bei der Vergasung und der Pyrolyse handelt es sich um eine indirekte bzw. absichtlich unvollständige Oxidation der Biomasse zur Herstellung von Sekundärenergieträgern in gasförmiger, flüssiger oder fester Form. Beide Verfahren werden im Bereich der Kleinfeuerungen nicht nennenswert eingesetzt und sind daher auch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Unabhängig des detaillierten zeitlichen oder örtlichen Ablaufs und der genauen Form des Brennstoffes – ob in stückiger Form als Holzsplit, zerkleinert als Hackgut oder in gepresster Form als Pellets oder Briketts – die Prozesse beim Verbrennungsvorgang laufen stets in den gleichen Phasen ab. Die Phasen werden unterteilt in Aufheizung, pyrolytische Zersetzung, Vergasung und Oxidation. Die eigentliche Oxidation der Kohlenstoffverbindungen in der Biomasse stellt also nur einen Teilschritt des gesamten Verbrennungsprozesses dar. Jede der Phasen läuft unter unterschiedlichen Bedingungen und Aspekten ab, wobei die Phasen untereinander nicht scharf getrennt sind, sondern sowohl zeitlich als auch räumlich überlappend oder parallel stattfinden. Dies führt in der Regel zu komplexen Prozessen auf molekularer Ebene mit einer Vielzahl von gleichzeitig ablaufenden chemischen Reaktionen und physikalischen Interaktionen und Wechselwirkungen. Die Eigenheiten der Phasen und die ablaufenden Prozesse werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben.

Die Verarbeitungsform des Brennstoffes beeinflusst hingegen stark die Durchmischung zwischen Brennstoff und Luft, was zu unterschiedlichen Auswirkungen führt. Je größer die einzelnen Stücke des Brennstoffes, umso schlechter lassen sich Brennstoff und Verbrennungsluft in Kontakt bringen und durchmischen. Dadurch können starke lokale Gradienten entstehen, was zum Beispiel wichtige Verbrennungsparameter wie Sauerstoffkonzentration oder Temperatur betrifft. Lokale Luftmangelsituationen oder kalte bzw. überhitzte Bereiche sind die Folge, die zu einer unvollständigen Verbrennung und erhöhter Schadstoffbildung führen.

Tabelle 2.3: Phasen der Verbrennung als Teilprozesse einer thermochemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe nach Kaltschmitt (2016)

Beschreibung der Phasen	Energiebilanz der Phase	Temperaturbereich	Ergebnis
Aufheizung (Trocknung)			
Das im Brennstoff enthaltene Wasser wird verdampft und damit der Brennstoff getrocknet. Hierfür ist eine externe Energiezufuhr notwendig.	Endothermer Prozess	Um 100°C	Trockener Brennstoff
Pyrolytische Zersetzung			
Die langen verzweigten und unverzweigten Biopolymere des Brennstoffes (Zellulose, Hemizellulose und Lignin) werden durch Wärme aufgespalten. Dabei entstehen kleinere, sehr verschiedenartige organische Bruchstücke, die als flüchtige Verbindungen in die Gasphase entweichen. Der Kohlenstoff der Polymere wird im festen Rückstand als Koks aufkonzentriert.	Endothermer Prozess	200 - 500 °C	Flüchtige Verbindungen entweichen gasförmig, Koks bleibt als fester Rückstand.
Vergasung			
Der im Glutbett als Koks verbliebene Kohlenstoff wird bei steigenden Temperaturen teilweise oxidiert. Aus dem Kohlenstoff und Sauerstoff aus der Verbrennungsluft entstehen brennbare Gase (wie Kohlenmonoxid oder Wasserstoff), die aus dem Brennstoff in die Gasphase entweichen.	Endothermer Prozess	500 - 1000 °C	Brennbare Gase (wie Kohlenmonoxid) entweichen gasförmig.
Oxidation			
Bei ausreichender Verfügbarkeit des Oxidationsmittels Sauerstoff werden die bisherigen Zwischenprodukte des Verbrennungsvorganges aufoxidiert. Es entstehen die Hauptprodukte Kohlendioxid und Wasser und andere gasförmige, flüssige und feste Nebenprodukte. Als exotherme Reaktion liefert dieser Schritt als einziger die Energie des gesamten Verbrennungsprozesses. Dies geschieht vor allem in Form von Wärmeenergie.	Exothermer Prozess	400 - 1200°C	Hauptprodukte Kohlendioxid und Wasser und verschiedene Nebenprodukte entstehen.

Hauptzweck bei der energetischen Nutzung der Biomasse als Brennstoff ist die unmittelbare Wärmebereitstellung. Für den Anwendungsbereich in Kleinfeuerungen in Haushalten wird als Prozess der thermochemischen Umwandlung daher eine vollständige Oxidation angestrebt – dies geschieht in Form der Verbrennung der Biomasse mit Luftsauerstoff.

Unabhängig von der genauen Herkunft oder der Stückigkeit und Form des Brennstoffes, läuft der Verbrennungsprozess stets in den gleichen Schritten – also Phasen – ab.

Den Hauptpfad der vielen verschiedenen chemischen Reaktionen und Reaktionspartnern stellt die Oxidation der in der Biomasse enthaltenen Lignozelluloseverbindungen dar (siehe

Abschnitt 2.1.3). Aus den Hauptelementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff der drei Biopolymere Zellulose, Hemizellulose und Lignin bilden sich die Hauptprodukte der Verbrennung Kohlendioxid und Wasser nach folgender vereinfachter Reaktion:



2.2.1 Produkte aus der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen

Ziel bei der Verbrennung ist die vollständige Oxidation aller im Brennstoff enthaltenen Verbindungen. Einerseits um die Energie im Brennstoff möglichst effizient zu nutzen, andererseits um möglichst wenige Schadstoffe freizusetzen. Aus unterschiedlichen Gründen gelingt dies jedoch bei Festbrennstoffen oft nicht, die Oxidation der Bestandteile bleibt dann teilweise unvollständig. Das betrifft sowohl die Kohlenstoffverbindungen als auch die anderen enthaltenden organischen und anorganischen Verbindungen und Elemente.

2.2.1.1 Produkte aus vollständiger Verbrennung

Im optimalen Fall entsteht in der vollständigen Oxidation aus den Hauptelementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff die Hauptprodukte Kohlendioxid und Wasser nach obiger Gleichung (1). Beide Reaktionsprodukte liegen bei den Verbrennungsbedingungen gasförmig vor, weshalb sie mit dem Abgas ausgetragen werden.

Die vollständige Oxidation ist in der energetischen Nutzung der biogenen Brennstoffe in Kleinf Feuerungen die erwünschte Form.

Außer den Hauptbestandteilen sind noch weitere Verbindungen im Brennstoff enthalten, je nach Biomasseart in unterschiedlicher Menge oder Ausprägung (siehe Verweis zu vorher). Alle anorganischen Bestandteile des Brennstoffes werden zu Mineralien und Salzen oxidiert, die je nach Art und Verbrennungsbedingungen gasförmig, fest oder flüssig vorliegen können und dementsprechend entweder mit dem Abgas ausgetragen werden oder im festen Rückstand verbleiben. Dies trifft analog auch auf die Extraktstoffe als organische Verbindungen zu.

Stoffe die bei einer vollständigen Verbrennung entstehen sind überwiegend von der Art des Brennstoffes und seinen Inhaltsstoffen abhängig. Die Verbrennungsbedingungen haben einen untergeordneten Einfluss auf ihre Bildung.

2.2.1.2 Produkte aus unvollständiger Verbrennung

Die Oxidation der Brennstoffverbindungen erfolgt in vielen Teilschritten (Verweis Abschnitt). Ist an entsprechender Stelle zu wenig Sauerstoff vorhanden, wird die Oxidation unterbrochen und die Zwischenprodukte können nicht weiter reagieren. Die Verbrennung verläuft unvollständig. Bei ausreichender Temperatur können die Zwischenprodukte an anderer Stelle mit mehr Sauerstoff weiteroxidieren oder bei zu geringer Temperatur verbleiben sie als teiloxidierte Bruchstücke. Sie werden mit dem Abgas ausgetragen oder verbleiben im Rückstand.

Eine unvollständige Oxidation hängt überwiegend von den lokal herrschenden Bedingungen bei der Verbrennung ab und wird nur untergeordnet durch die Brennstoffart beeinflusst.

2.3 Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1.BImSchV

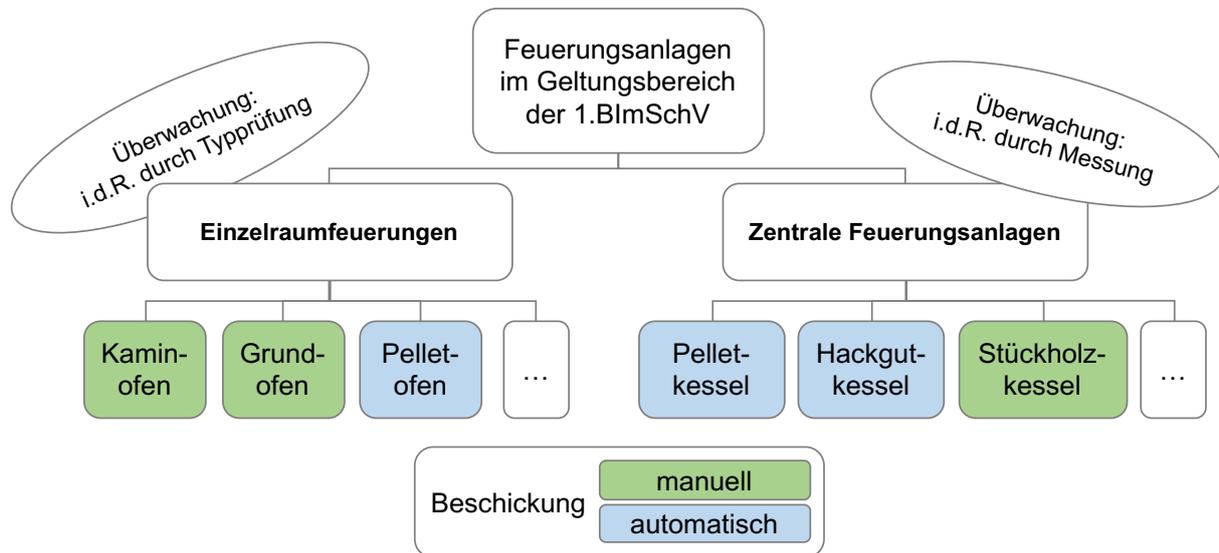


Abbildung 2.2: Übersicht über relevante Feuerungsanlagen für biogene Festbrennstoffe im Geltungsbereich der 1.BImSchV

Feuerungsanlagen zur energetischen Nutzung von Holz und anderen festen Brennstoffen werden in Haushalten zur Wärmebereitstellung eingesetzt. Durch thermo-chemische Konversion wird der Energieinhalt des Brennstoffes in Wärme umgewandelt, die mittelbar oder unmittelbar Wohnraum und/oder Brauchwasser beheizt. Die für den Prozess notwendige Verbrennungsluft wird entweder aus dem Wohnraum oder Heizraum (raumlufthängig) oder der Umgebungsluft (raumlufunabhängig) entnommen. Das bei der Verbrennung entstehende Abgas, das neben allen gasförmigen Produkten der Verbrennung auch diverse flüssige und feste Bestandteile und ebenfalls Abwärme beinhaltet, wird über ein Abgasrohrsystem mit Schornstein über Dach in die Umgebung abgeleitet. In der Feuerung bleiben feste Rückstände zurück, die je nach Grad der Vollständigkeit der Verbrennung aus einer Mischung aus Asche, kohlenstoffhaltigen oder anderen Verbindungen bestehen. Sie werden je nach Art der Feuerung kontinuierlich automatisch oder diskontinuierlich manuell entnommen. Ein verallgemeinertes Prozessschema zeigt die nachfolgende Abbildung 2.3.

Durch Art des Brennstoffes und Bauart der Feuerung entstehen vielfältige Konstellationen mit den verschiedensten Eigenheiten. Wie die Kleinfeuerungen eingeteilt und charakterisiert werden können, wie sich die rechtlichen Grundlagen gestalten, welche technischen Grundlagen zur Feuerungstechnik gegeben sind und welche Aspekte für die vorliegende Arbeit und das weitere Vorgehen wichtig sind, wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

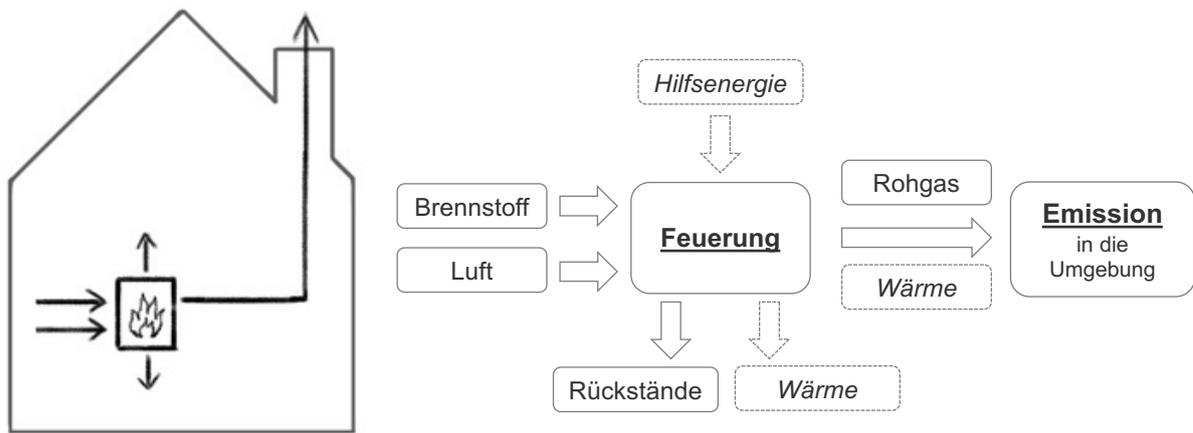


Abbildung 2.3: Allgemeines Prozessschema einer häuslichen Feuerung

Gehen von einer Anlage in Deutschland schädliche Umwelteinwirkungen aus, wird ihr Betrieb durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 1974) geregelt. Zweck des Gesetzes ist der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, unabhängig ob es sich um den Schutz von „Menschen, Tieren und Pflanzen, ... oder Sachgüter“ handelt (§1).

Feuerungsanlagen, wie sie im vorliegenden Fall zur Wärmeengewinnung in Haushalten eingesetzt werden, zählen im Sinne des BImSchG (§ 22 ff) zu den „nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen“ und werden von ihrer Anlagengröße her dem Größenbereich der kleinen und mittleren Feuerungsanlagen zugeordnet. Ihre konkrete Regelung unterliegt daher dem Geltungsbereich der ersten Bundesimmissionsschutzverordnung (1.BImSchV, 2010).

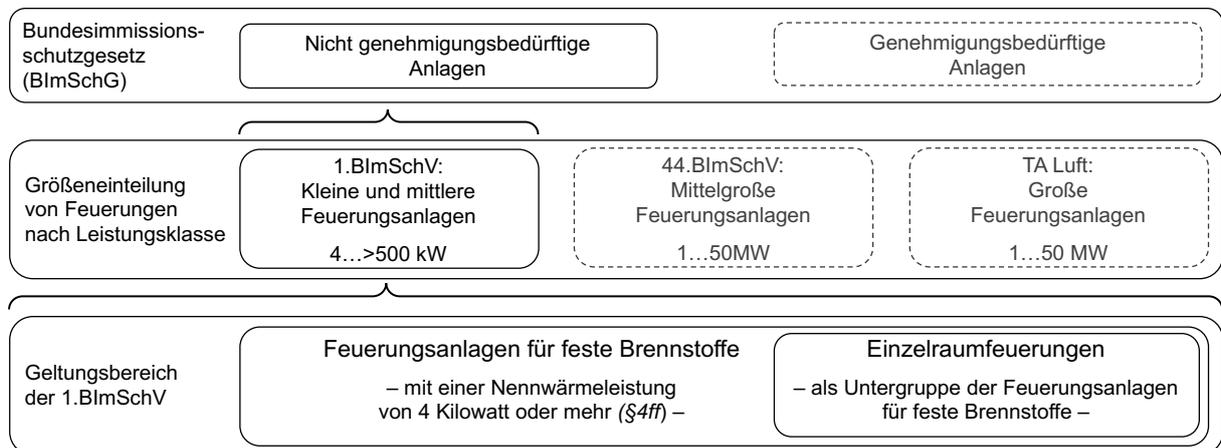


Abbildung 2.4: a) Rechtliche Einordnung von Feuerungsanlagen für biogene Festbrennstoffe (Ausführungen nur für betrachtete Größe und Brennstoffe berücksichtigt)

Neben der Einteilung der Feuerungen nach ihrem Leistungsbereich werden sie nach ihrem Beheizungszweck eingeteilt. Die 1.BImSchV unterscheidet hier wesentlich zwischen allgemeinen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und als besondere Form davon den Einzelraumfeuerungen. Für diese Untergruppe gelten verschiedene, teils essenzielle Ausnahmen innerhalb der Verordnung.

2.4 Unterteilung von Kleinfeuerungen

Für den Einsatz zur Wärmegewinnung in Haushalten gibt es verschiedene Bauarten von Feuerungen, um den verschiedenen vorkommenden Heizungssystemen, Brennstoffarten und räumlichen Gegebenheiten Rechnung zu tragen. Sie können allgemein nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert und charakterisiert werden:

- Größeneinteilung nach Leistungsklassen: nach Genehmigungs- und Verwaltungsvorschriften
- Rechtlich orientierte Einteilung nach Beheizungs-zweck und Funktion: Unterscheidung zwischen Zentralfeuerungen und Einzelraumfeuerungen
- Technisch orientierte Einteilung nach Beschickungsart und Brennstoffart: Unterscheidung zwischen manuell beschickten und automatisch beschickten Feuerungen

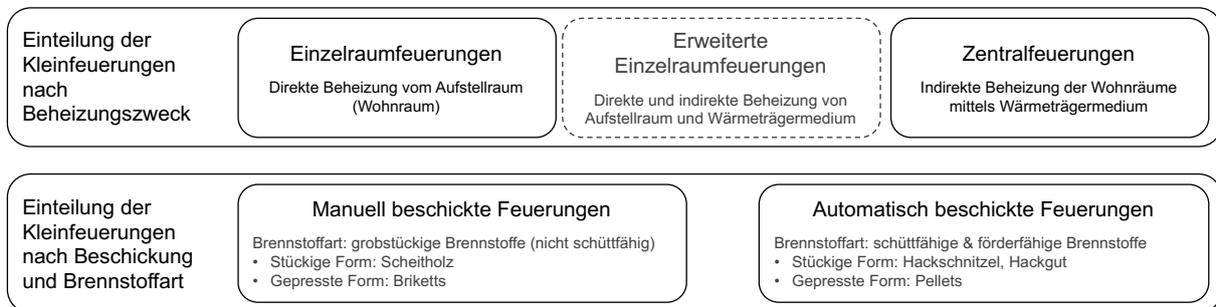


Abbildung 2.4 Fortsetzung: b) Rechtliche und technische Einteilung der Kleinfeuerungen

2.4.1 Unterteilung nach Beheizungs-zweck

Der wichtigste Aspekt bei dieser Unterscheidung zwischen Einzelraumfeuerungen und zentralen Feuerungen ist die Frage, welche Räumlichkeit vorrangig beheizt wird.

Eine Einzelraumfeuerung steht im Wohnraum selbst und beheizt auf direkte Art durch ihre Wärmeabstrahlung den sie umgebenden Raum. Sie wird definiert als eine „Feuerungsanlage, die vorrangig zur Beheizung des Aufstellraumes verwendet wird (...)“ (1.BImSchV, 2010 S. 33)

Eine zentrale Feuerung ist in der Regel in einem separaten Heizraum untergebracht, verfügt über einen entsprechenden Wärmetauscher, mit dem ein Wärmeträgermedium beheizt wird. Über einen Heizkreis erfolgt die Beheizung des Wohnraums bzw. verschiedener Wohnräume in indirekter Weise. Ferner kann die gewonnene Wärmeenergie ebenfalls zur Brauchwassererwärmung und nicht nur zur Raumbeheizung verwendet werden, was bei einer normalen Einzelraumfeuerung in der Regel nicht der Fall ist.

Eine Zwischenstufe zwischen den beiden eindeutigen Feuerungsbauarten stellen die sogenannten erweiterten Einzelraumfeuerungen dar. Sie weisen Merkmale und Anlagenteile von den beiden anderen Arten auf, und führen damit oft zu uneindeutigen Auslegungen und Streitfragen. Hierbei handelt es sich beispielweise um einen Kaminofen mit Wassertasche, also einer Einzelraumfeuerung, die im Wohnraum steht, aber ebenfalls

über einen Zugang zum Heizkreis verfügt. Diese Art der Feuerungen sind nicht Gegenstand der Arbeit und werden damit auch nicht weitergehend betrachtet.

2.4.2 Technische Unterteilung nach Beschickung und Brennstoffart

Die für die Feuerungstechnik und Funktionsweise wichtigste Einteilung von Feuerungen besteht in der Unterscheidung in der Beschickungsart beziehungsweise der Brennstoffform. Sie beeinflusst wesentlich die Verbrennungsvorgänge innerhalb der Feuerung und damit sowohl das zeitliche Verhalten der Verbrennung, die Verbrennungsbedingungen und ebenso das Emissionsverhalten. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit überwiegend diese Einteilung herangezogen.

Der Brennstoff muss zur Verbrennung in die Feuerung eingebracht werden, was grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen kann – manuell oder automatisch. Es wird daher grundsätzlich zwischen manuell beschickten und automatisch beschickten Feuerungen unterschieden, unabhängig vom Standort oder Beheizzweck der Anlage.

Eine manuell beschickte Anlage zeichnet sich dadurch aus, dass der Brennstoff händisch in den Brennraum eingebracht wird. Dies geschieht diskontinuierlich in Chargen, wobei die Brennstoffmenge pro Charge von der Anlagegröße abhängt. Die Stückigkeit bei den verwendeten Brennstoffen ist grob, es handelt sich üblicherweise um Stückholz in Form von Holzscheiten oder auch um eine gepresste Form wie Briketts.

Eine automatisch beschickte Anlage fördert den Brennstoff selbst und kontinuierlich aus einem Lagerbehälter über eine Fördereinrichtung in den Brennraum. Hierzu ist eine förderfähige oder schüttfähige Form des Brennstoffes notwendig, typischerweise in Form von Hackschnitzeln oder Pellets.

2.5 Entstehung von Partikelemissionen in Feuerungen

2.5.1 Partikelbildung

So vielfältig wie die Arte der Partikelemissionen und ihre Zusammensetzung und Eigenschaften sind, so vielfältig läuft ihre Bildung in der Feuerung ab.

Nachfolgend sind die wichtigsten Faktoren dargestellt (Abbildung 2.5).

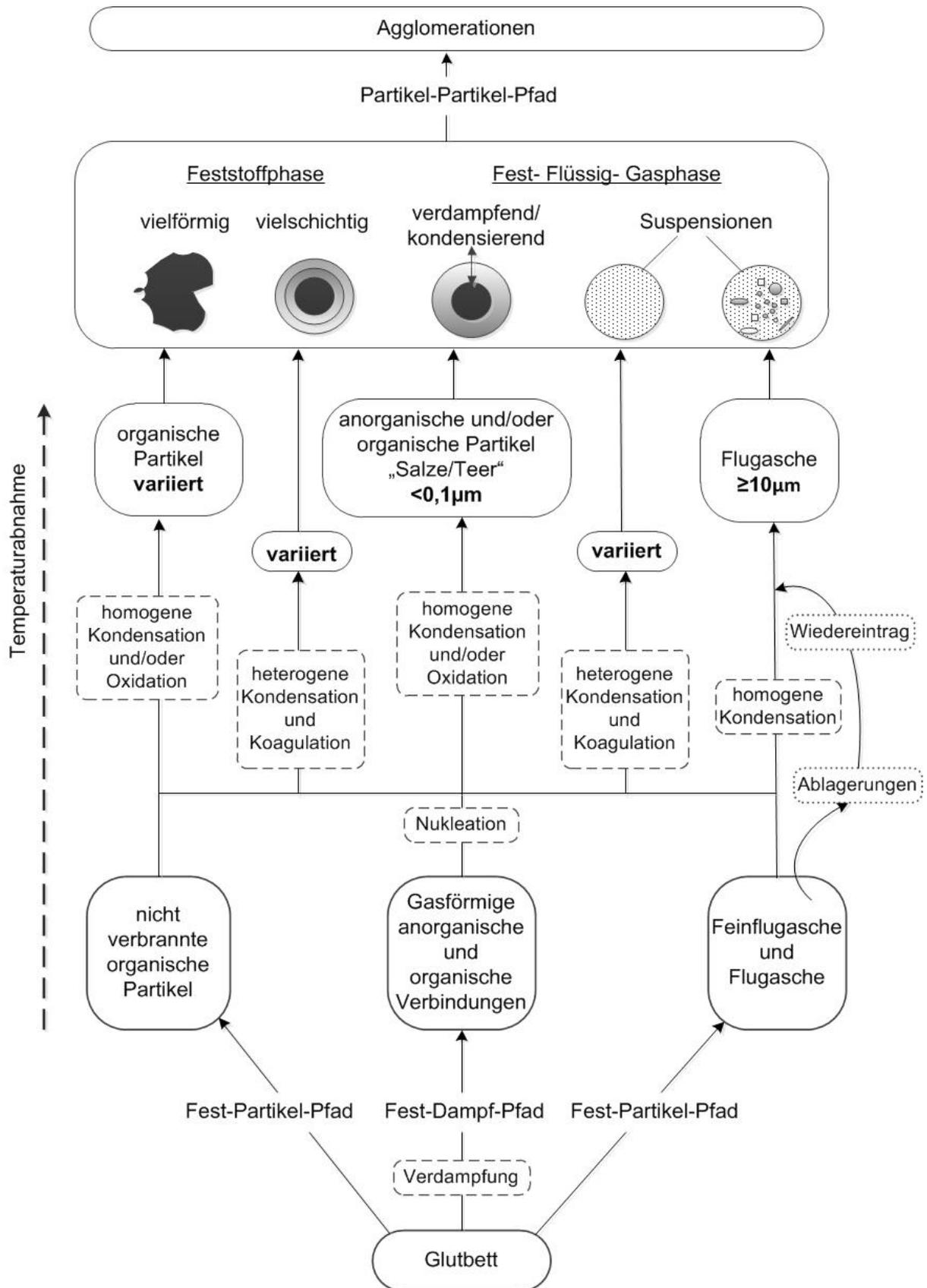


Abbildung 2.5: Partikelentstehung nach Schäfer (2016)

2.5.2 Zusammenfassung zu Partikelemissionen

Es gibt zwei Arten für die Entstehung von Partikelemissionen, und darin bedingen sich auch ihre Eigenschaften:

1. Flugasche aus Mineralien aus dem Brennstoff, der durch Art und Inhaltsstoffen des Brennstoffs verursacht
2. Partikel aus unverbrannten Biomasse, überwiegend Rußpartikel, die aus der unvollständigen Verbrennung stammen

2.6 Charakterisierung von Partikelemissionen aus Biomassekleinfeuerungen

Einen genauen Überblick gibt die Literatur beispielsweise in Hartmann et al. (2010) oder Juschka (2012).

Gesamtstaubemissionen und Korngrößenverteilungen sind nachfolgend dargestellt.

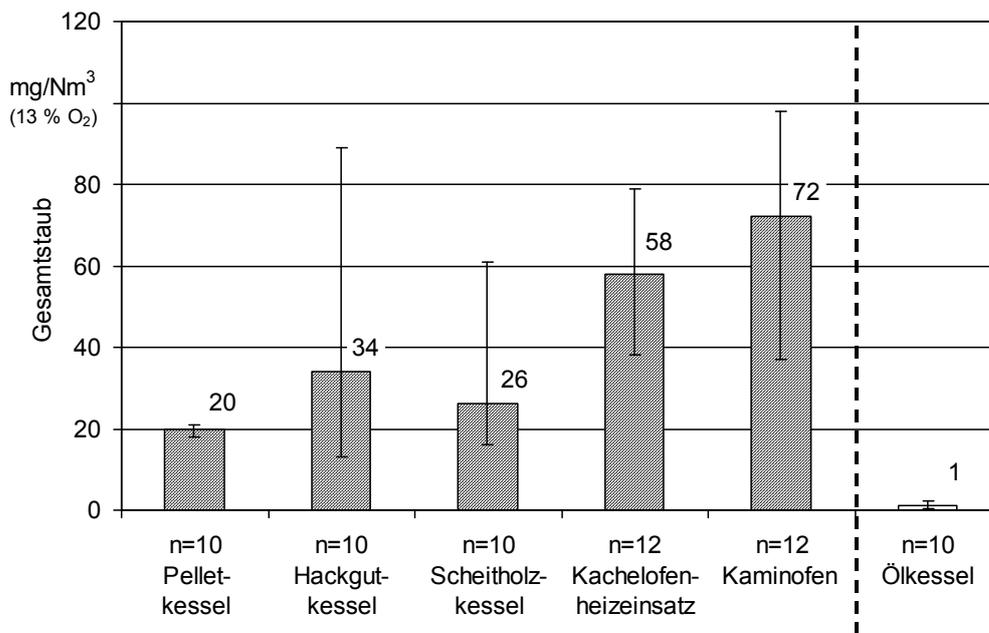


Abbildung 2.6: Mittlere Staubemissionen bei verschiedenen Feuerungen von Lenz et al. (2010), n = Anzahl der Messungen

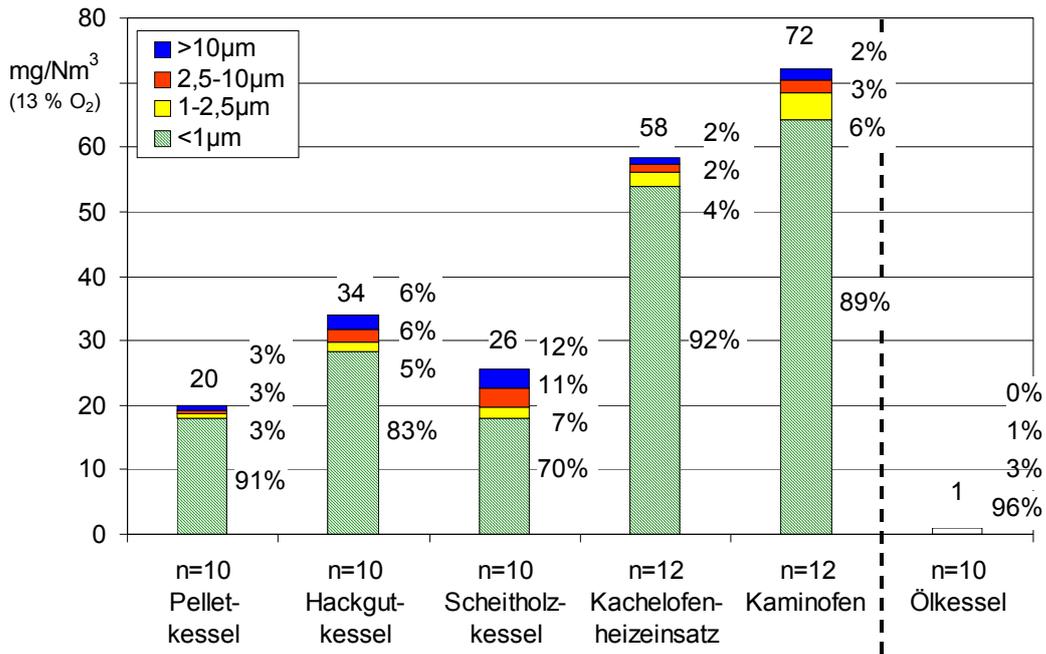


Abbildung 2.7: Korngrößenverteilung der Staubemissionen bei verschiedenen Feuerungen von Lenz et al. (2010), n = Anzahl der Messungen

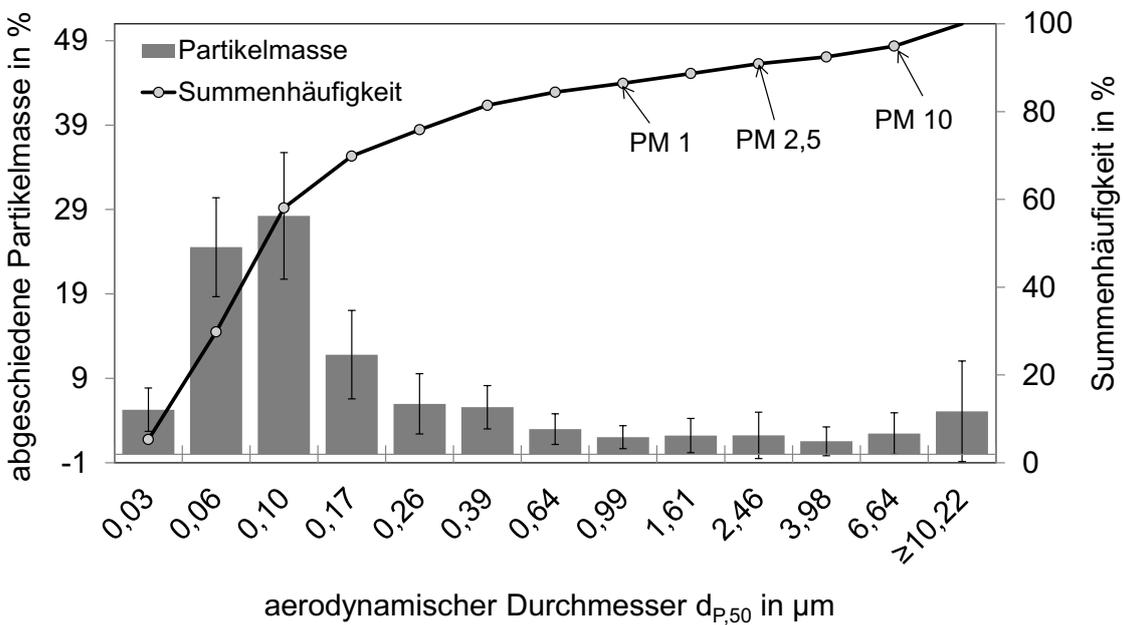


Abbildung 2.8: Korngrößenverteilung an verschiedenen Kleinf Feuerungsanlagen von Schäfer (2016)

Schäfer (2016) gibt das Maximum der Korngrößenverteilung an mit 0,1 µm. Übereinstimmend wird das Maximum der Korngrößenverteilung von (Gaderer, 2007) angegeben bei 0,07-0,15 µm.

3 Technische Grundlagen zu Elektroabscheidern für die Emissionsminderung bei Kleinfeuerungen

3.1 Prinzip und Funktionsweise von Elektroabscheidern

3.1.1 Prinzip der elektrostatischen Partikelabscheidung

Das Prinzip der elektrostatischen Abscheidung zur Abtrennung von Partikeln aus Gasströmungen ist eine bewährte Technologie, die in verschiedenen Anwendungsfeldern seit Jahrzehnten eingesetzt wird (VDI 3678-1, 1998). Zweck dabei ist entweder die Produktgewinnung oder die Gasreinigung. In dieser Arbeit werden nur die Aspekte weiterverfolgt, die für einen Einsatz als Entstaubung zur Minderung von Partikelemissionen relevant sind.

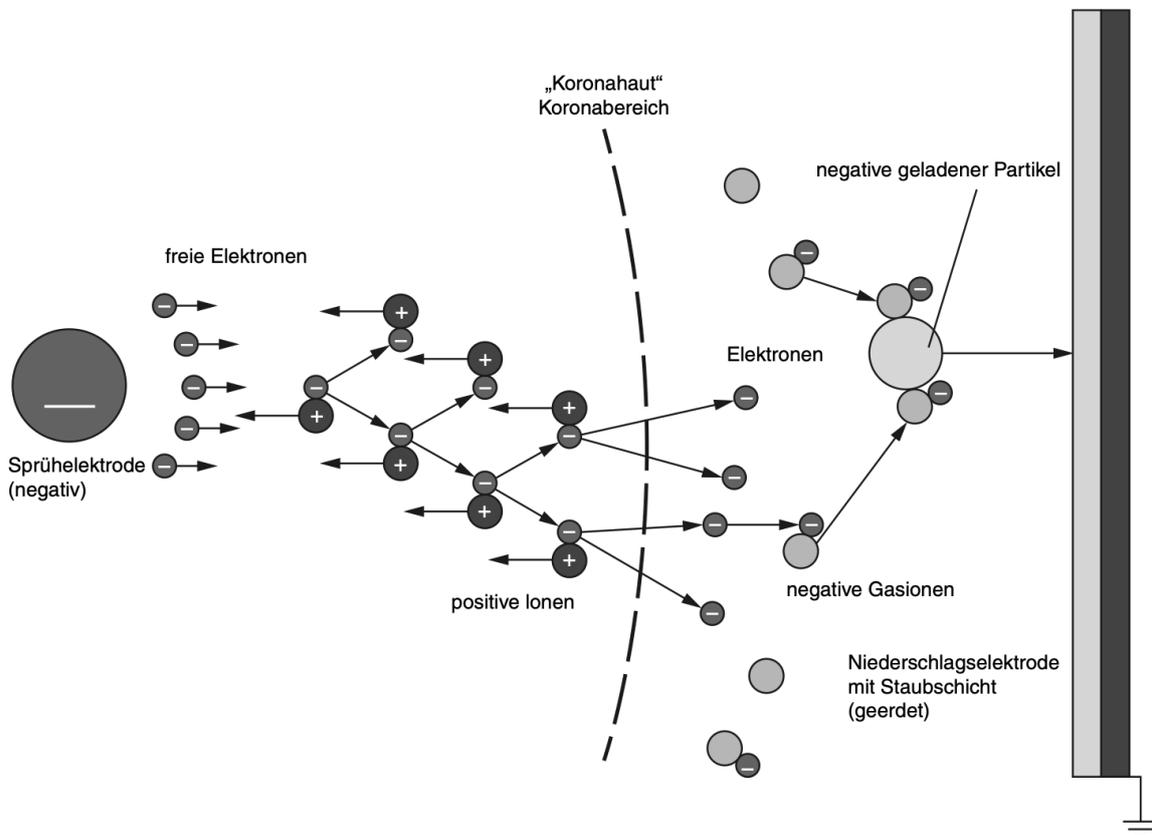


Abbildung 3.1: Erzeugung von negativen Gasionen aus der Korona zur Ladung der abzutrennenden Partikel (Schmoch, et al., 2022)

Der Abscheidemechanismus beruht auf elektrostatischen Kräften. Die gasgetragenen Partikel werden an Hochspannungselektroden durch eine Korona-Entladung elektrisch geladen und abgeschieden. Nachfolgend werden nur die wichtigsten Aspekte bearbeitet und zusammengefasst. Für weitergehende Informationen wird auf die ausführliche Literatur verwiesen. Als wesentliche Stellen und Standardwerke seien hier „Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern“ (White, 1969) und „Applied Electrostatic Precipitation“ (Parker,

1997). Die Richtlinie VDI 3678-1 (1998) „Elektrofilter: Prozessgas- und Abgasreinigung“ beschäftigt sich mit dem Anwendungsfeld der Elektrofilter zur Abgasreinigung.

3.1.2 Klassischer Prozess der elektrostatischen Partikelabscheidung

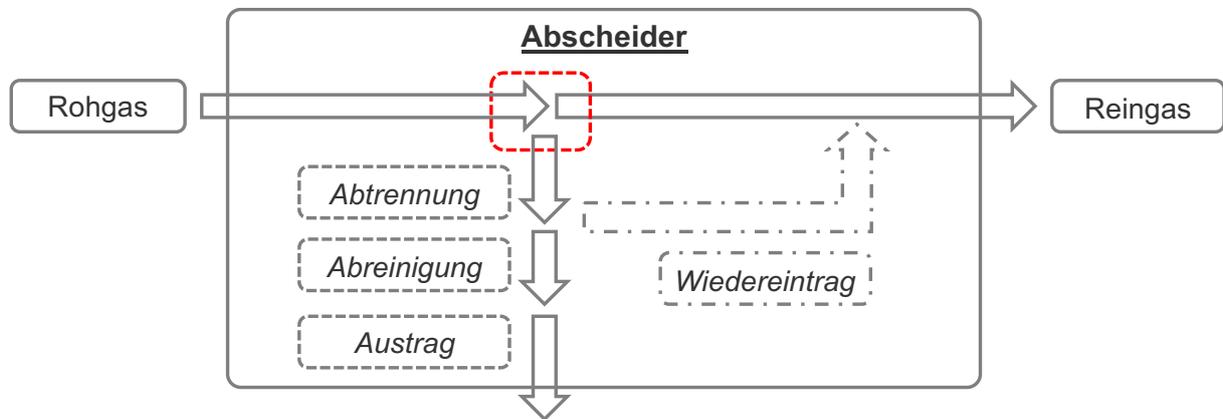


Abbildung 3.2: Veranschaulichung der Schritte beim Prozess der Partikelabscheidung

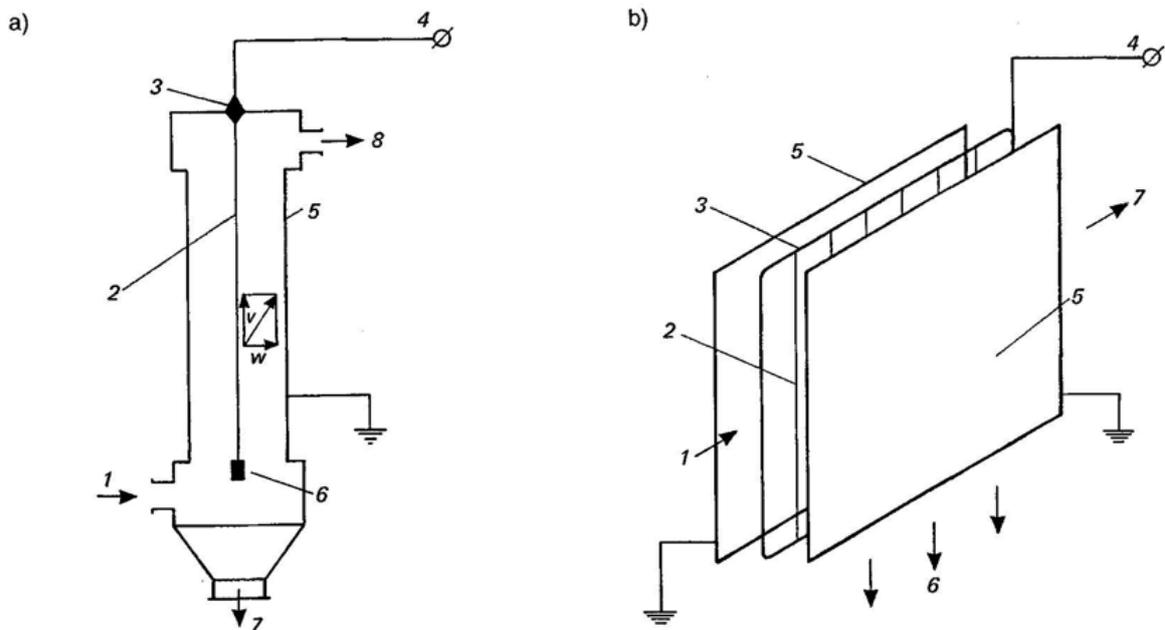
Das mit Partikeln beladene Gas strömt als Rohgas in den Abscheider. Das Gas passiert das angelegte elektrische Feld und wird dabei teilweise ionisiert. Die Gasionen lagern sich an die gasgetragenen Partikel an und ionisieren diese. Der Gasstrom wird durch den Abscheider vorbei an den Niederschlagsflächen geleitet. Die geladenen Partikel wandern in Richtung der geerdeten Niederschlagsflächen und haften dort an. Das Gas verlässt als Reingas den Abscheider. Die anhaftenden Partikel bilden über die Zeit eine Staubschicht auf den Niederschlagsflächen, die periodisch abgereinigt wird. Der abgereinigte Staub fällt in eine Sammelvorrichtung und wird aus dem System entfernt. Dabei werden je nach Literatur drei bis fünf Schritte unterschieden, zu denen in Tabelle 3.1 zwei Beispiele aufgeführt sind.

Tabelle 3.1: Schritte im Prozess der elektrostatischen Partikelabscheidung

Schritte nach Löffler (1988)	Schritte nach Miller et al. (1996)
1. Aufladung der Partikel	1. Erzeugung von Ladungsträgern in einer Koronaentladung
	2. Aufladung der Partikel durch die generierten Ladungsträger
2. Abscheidung der geladenen Partikel im elektrischen Feld	3. Partikeltransport durch elektrische Kräfte und Strömungskräfte zu einer Abscheideelektrode hin
	4. Anlagerung der Partikel an die Abscheideelektrode und Bildung von Agglomeraten
3. Entfernung der abgeschiedenen Partikel aus dem durchströmten Abscheideraum	5. Lösen der angelagerten Staubschicht durch Klopfen und Entfernen des Staubes aus dem gasdurchströmten Abscheideraum

3.1.3 Klassische Bauformen von Elektroabscheidern zur Entstaubung

Bei den klassischen Bauformen wird zwischen Röhrenfiltern und Plattenfiltern unterschieden (Abbildung 3.3). Sie unterscheiden sich durch die Ausführung der Sprühelektroden und der Niederschlagsflächen und werden für unterschiedliche Anforderungen eingesetzt. Die Grundlagen für diese Bauformen sind detailliert in der genannten Literatur beschrieben.



- a) Röhrenfilter
- 1 Rohgas
 - 2 Sprühelektrode (Kathode)
 - 3 Isolator
 - 4 Hochspannung, z.B. 40 kV
 - 5 Niederschlagselektrode (Anode)
 - 6 Belastungsgewicht
 - 7 Abgeschiedener Staub/Nebel
 - 8 Reingas

- b) Plattenfilter
- 1 Rohgas
 - 2 Sprühelektrode (Kathode)
 - 3 Sprühhahmen
 - 4 Hochspannung, z.B. 40 kV
 - 5 Niederschlagselektrode (Anode)
 - 6 Abgeschiedener Staub
 - 7 Reingas

Abbildung 3.3: Klassische Bauformen von Elektroabscheidern (VDI 3678-1, 1998)

3.1.4 Beschreibung der Ionisation für die Ladung der Partikel

Durch Anlegen einer Hochspannung im Gleichstrom zwischen der Sprühelektrode und einer Gegenelektrode entsteht durch die elektrische Entladung ein Plasma, wodurch das umliegende Gas ionisiert wird. Diese Art der elektrischen Entladung wird als Korona-Entladung bezeichnet. Sie ist definiert als „stabile selbständige Gasentladung zwischen einer Sprühelektrode... und einer passiven Elektrode (White, 1969). Der Plasmazustand des Gases ist als Leuchten in Form von einem oder mehreren Leuchtpunkten sichtbar. Wird eine

negative Hochspannung angelegt, handelt es sich um eine sogenannte negative Korona, bei positiver Hochspannung um eine positive Korona. Elektroabscheider zur Gasreinigung werden üblicherweise mit negativer Hochspannung betrieben, da hier eine höhere Spannung erreicht werden kann. Hierbei kann es bei Anwesenheit von Sauerstoff vermehrt zur Ozonbildung kommen.

Die wichtigsten elektrischen Betriebsgrößen eines Elektroabscheiders sind die angelegte Hochspannung und der resultierende Stromfluss. Der Zusammenhang zwischen der Hochspannung und dem Stromfluss folgt einem charakteristischen Verlauf, der oft in einer Strom-Spannungs-Kennlinie dargestellt wird. Bei geringer angelegter Hochspannung erfolgt kein nennenswerter Stromfluss an den Sprühelektroden. Wird die Koronaeinsatzspannung überschritten, findet die Entladung statt und es werden Elektronen freigesetzt. Mit steigender Spannung steigt ebenfalls der Stromfluss an, immer mehr Elektronen werden freigesetzt und stehen zur Verfügung. Ab einem gewissen Punkt ist der elektrische Durchbruch erreicht. Es kommt zum Zusammenbruch der elektrischen Entladung. Als Produkt aus angelegter Hochspannung und resultierendem Stromfluss ergibt sich die elektrische Leistung der Ionisation. Diese ist kurz unterhalb der Durchbruchspannung am größten. Da sie in direktem Zusammenhang zur Abscheideleistung steht, ist dies als Betriebspunkt wünschenswert (White, 1969).

Die Anwendung von Hochspannung macht die Verwendung einer Hochspannungsdurchführung vom Hochspannungsgerät in den Abscheider hinein notwendig. Da ihr Zweck darin besteht, die umliegenden Bauteile gegen die Hochspannung zu isolieren, wird diese als Isolator bzw. Hochspannungsisolator bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine zentrale Gerätekomponente, von deren Funktionsfähigkeit direkt die Betriebssicherheit des Elektroabscheiders abhängt. Kommt es zu einem unerwünschten Stromfluss auf der Oberfläche des Isolators, können sogenannte Kriechströme entstehen. Nehmen diese stark zu, kann dies zum Ausfall der Hochspannung führen.

Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten kommen bei Elektroabscheidern je nach Partikelgröße zwei verschiedene Auflademechanismen zum Tragen. Für Partikel über $1\ \mu\text{m}$ überwiegt die sogenannte Feld- oder Stoßaufladung, für Partikel unterhalb $0,2\ \mu\text{m}$ überwiegt die Diffusionsaufladung (White, 1969). Dies führt zu einem theoretischen Abscheideminimum in einem Bereich bei $0,5\ \mu\text{m}$. Schmoch et al. (2022) geht jedoch davon aus, dass in der Realität die Abscheidung nicht so weit abnimmt wie theoretisch berechnet. Die Berechnungen nehmen stets eine ideale gleichmäßig runde Partikelform und Oberfläche an. In der Realität ist die Oberfläche jedoch wegen der Ungleichheit realer Partikel größer, so dass sich mehr Ionen als angenommen ablagern können.

3.1.5 Beschreibung der Niederschlagsflächen

Die Flächen, an denen sich die geladenen Partikel anhaften und niederschlagen, werden als Abscheideflächen oder Niederschlagsflächen bezeichnet.

Bei der Bauform der Röhrenabscheider handelt es sich um eine zylindrische Röhre. Die Fläche wird charakterisiert durch den Rohrdurchmesser und die Länge des Rohres. Die Sprühelektrode ist als Draht in der Mitte des Rohres platziert. Diese Bauform wird überwiegend bei niedrigeren Gasvolumenströmen eingesetzt.

Bei einem Plattenabscheider werden mehrere rechteckige Platten nebeneinander angeordnet, die als Fläche fungieren. Bei der Anordnung bilden sich zwischen den Platten sogenannte Gassen. Die Sprühelektroden befinden sich als Drahtanordnungen in der Mitte der Gassen. Die Fläche wird charakterisiert durch die Länge der Platten und die Gassenbreite. Diese Bauform wird überwiegend bei hohen Gasvolumenströmen eingesetzt. Vor allem bei Plattenfiltern werden zusätzliche Fangkörper oder Hohlräume angebracht, um die Wiederaufwirbelung von abgeschiedenem Staub zu minimieren (White, 1969).

Beide Arten von Abscheideflächen werden automatisch periodisch meist durch Klopfvorrichtungen abgereinigt.

3.1.6 Abscheidegrad als Bewertungsgröße

Zur Bewertung der Abscheideleistung oder Abscheideeffizienz in einem Partikelabscheider wird als zentrale Größe der Abscheidegrad verwendet (VDI 3678-1, 1998).

$$\text{Abscheidegrad} \quad \eta = \frac{C_{Roh} - C_{Rein}}{C_{Roh}} \quad (2)$$

Mit	η	Abscheidegrad in %
	C_{Roh}	Rohgasstaubgehalt in mg/m ³
	C_{Rein}	Reingasstaubgehalt in mg/m ³

Der Abscheidegrad bewertet den Anteil an abgeschiedener Staubmenge bezogen auf den Rohgasstaubgehalt und ist daher eine relative Größe. Er transportiert keine Aussage darüber, bei welchen Bedingungen oder bei welchem Rohgasstaubgehalt der Wert bestimmt wurde. Er lässt auch keine Aussage über die Menge an abgeschiedenem Staub zu. Aus diesem Grund ist es für einen Vergleich verschiedener Bedingungen oder Abscheider hilfreich und teils notwendig, ergänzende Informationen wie die Rohgasstaubkonzentration mit anzugeben.

3.1.7 Klassische Auslegung auf Basis der Deutsch-Gleichung

Die Auslegung und Dimensionierung von Elektroabscheidern erfolgt klassischerweise anhand der Deutsch-Gleichung. Diese stellt einen vereinfachten Zusammenhang zwischen Betriebsgrößen des Abscheiders, der theoretischen Wanderungsgeschwindigkeit und des Abscheidegrades her (VDI 3678-1, 1998).

$$\text{Deutsch-Gleichung} \quad 1 - \eta = e^{-w_{th} \left(\frac{A}{\dot{V}} \right)} \quad (3)$$

Mit	η	Abscheidegrad in %
	w_{th}	theoretische Wanderungsgeschwindigkeit in m/s
	A	Niederschlagsfläche in m ²
	\dot{V}	Gasvolumenstrom in m ³ /s

$$\text{Deutsch-Gleichung} \quad 1 - \eta = e^{-w_{th} \frac{2L}{v\bar{b}}} \quad (4)$$

Für Plattenfilter

Mit	η	Abscheidegrad in %
	w_{th}	theoretische Wanderungsgeschwindigkeit in m/s
	L	Plattenlänge in m
	b	Gassenbreite (Plattenabstand) in m
	v	Gasgeschwindigkeit in m/s

Deutsch-Gleichung
Für Röhrenfilter

$$1 - \eta = e^{-w_{th} \frac{2L}{vra}} \quad (5)$$

Mit	η	Abscheidegrad in %
	w_{th}	theoretische Wanderungsgeschwindigkeit in m/s
	L	Rohrlänge in m
	r	Rohrradius in m
	v	Gasgeschwindigkeit in m/s

3.2 Elektroabscheider im Einsatzgebiet Kleinfeuerungen

3.2.1 Einsatz von Sekundärmaßnahmen an Kleinfeuerungen

Beim Einsatz von Sekundärmaßnahmen an häuslichen Kleinfeuerungen bestimmen die Vorgaben für die Kleinfeuerungen ebenfalls die Rahmenbedingungen für die Abscheider. Bei Kleinfeuerungen im Geltungsbereich der 1.BImSchV (2010) handelt es sich um Einzelraumfeuerungen und Zentralheizungen, wie sie im vorangegangenen Kapitel 2 beschrieben sind. Sie werden nach automatisch und manuell beschickten Feuerungen unterteilt. Die große Vielfalt an verwendeten Feuerungsarten und Brennstoffen hat eine sehr große Bandbreite an Abgasbedingungen und Rahmenbedingungen zur Folge. Dies erschwert eine zielgenaue Ausrichtung der Konzeptionierung und Dimensionierung einer Sekundärmaßnahme auf einen bestimmten Bereich an Einsatzbedingungen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Aspekte für den Einsatz von Elektroabscheidern als Sekundärmaßnahmen bei Kleinfeuerungen dargestellt.

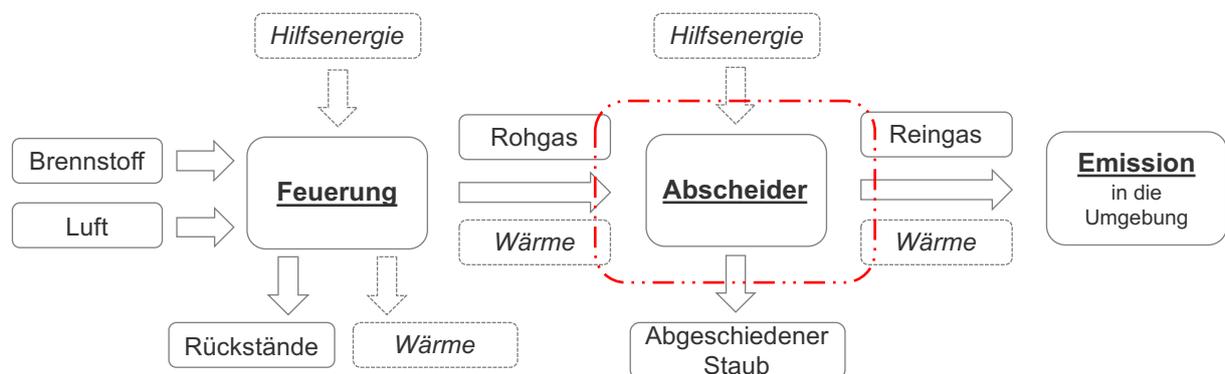


Abbildung 3.4: Verbund von Feuerung und Abscheider

3.2.2 Vorgaben in der 1.BImSchV (2010) für Einrichtungen zur Reduzierung der Staubemissionen

Die 1.BImSchV (2010) regelt die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von kleinen und mittleren Feuerungsanlagen. Dies betrifft unter anderem die Vorgabe zum Nachweis über die Einhaltung von Grenzwerten bezüglich Staubemissionen oder Emissionen von Kohlenmonoxid. Bestimmte Feuerungsarten müssen abhängig von ihrer Errichtung zu bestimmten Zeitpunkten und/oder ohne Nachweis über die Einhaltung der Anforderungen an Emissionen eine Einrichtung zur Staubminderung nachrüsten. Dies betrifft Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe und Grundöfen. Dabei gibt es bestimmte Ausnahmen und Übergangsregelungen. Tabelle 3.2 fasst die Vorgaben zusammen.

Tabelle 3.2: Vorgaben der 1.BImSchV bezüglich des Einsatzes von Staubminderungstechnik in der Nachrüstung

Stelle	Vorgabe
§4 Absatz (5) Grundöfen	Nachrüstung von Grundöfen (Errichtung nach dem 31.12.2014) mit Einrichtungen zur Staubminderung nach dem Stand der Technik, wenn sie die Einhaltung der Emissionsanforderungen (Kachelofenheizeinsätzen mit Füllfeuerungen nach DIN EN 13229/A1) nicht nachweisen können
§26 Absatz (2) Übergangsregelung für Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe	Nachrüstung der Feuerung mit einer Einrichtung zur Reduzierung der Staubemissionen nach dem Stand der Technik ist vorgeschrieben, wenn <ul style="list-style-type: none"> - Entweder die Einhaltung der Grenzwerte (0,15 g/m³ Staub und 4 g/m³ CO) zu bestimmten Zeitpunkten (spätestens 31.12.2024) nicht nachgewiesen werden können - Oder eine der Ausnahmen für die Feuerung nach Absatz (3) oder Absatz (5) zutrifft
§4 Absatz (6) Eignung von Einrichtungen zur Staubminderung	„Die nachgeschalteten Einrichtungen zur Staubminderung nach Absatz 5 dürfen nur verwendet werden, wenn ihre Eignung von der zuständigen Behörde festgestellt worden ist oder eine Bauartzulassung vorliegt. Die Eignungsfeststellung und die Bauartzulassung entfallen, sofern nach den bauordnungsrechtlichen Vorschriften über die Verwendung von Bauprodukten auch die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen eingehalten werden.“ Gilt für den Einsatz bei §4 Absatz (5), §26 Absätze (2) und (4)

Nachfolgend werden die genannten Spezifikationen für den Stand der Technik und die Bauartzulassung zur Eignungsfeststellung beschrieben.

3.2.3 Stand der Technik von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen

Die ausführliche Darlegung der Beschreibungen und Vorgaben der Richtlinie sollen verdeutlichen, dass zum Zeitpunkt der Erarbeitung und Veröffentlichung der Richtlinie eine Vielzahl an Technologien und wenig Erfahrung zu deren Einsatz, aber gleichzeitig auch wenig Erfahrung zur Anwendung von Prüfungen wie der Bauartzulassung oder dem Verfahren nach DIN SPEC 33999 (2014) und anderen Messmethoden und Bewertungskriterien bestand. Die Regelungen zu diesem Einsatzbereich befinden sich erst in der Erarbeitung. Die Beschreibung zu den elektrostatischen Abscheidern und vor allem die Ausführungen zu den Neuentwicklungen von Elektroabscheidern machen die Einfachheit zum aktuellen Status von Abscheidern dieser Technologie deutlich und wie wenig diese technisch ausgereift sind.

Die Richtlinie VDI 3670 (2016) legt den Stand der Technik für nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen für Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe fest. Sie definiert eine nachgeschaltete Staubminderungseinrichtung als „Einrichtung, die außerhalb der Feuerstätte im Abgasweg angeordnet ist, um die Emission aus dem Schornstein an Staubpartikeln zu verringern.“ Sie schließt dabei explizit sogenannte integrierte Abscheider aus, die angegeben werden als „Einrichtungen, die baurechtlich zusammen mit der Prüfung der Feuerstätte zugelassen werden (d.h. im Gehäuse der Feuerstätte integriert sind).“

Bei den Beschreibungen und Vorgaben wird grundsätzlich zwischen den Technologien der elektrostatischen Abscheider, der filternden Abscheider, der Massenkraftabscheider und der Nassabscheider unterschieden. Bei Elektroabscheidern wird zwischen Geräten im Gebäude und Geräten auf Dach bzw. am Schornsteinende unterschieden. Bei filternden Abscheidern wird zwischen Oberflächenfiltern und Tiefenfiltern unterschieden.

Kerninhalt der Richtlinie ist die Angabe von Mindestwerten für den Staubabscheidegrad. Diesen Mindestwert muss ein Staubabscheider erreichen, um den Stand der Technik nach dieser Norm zu erfüllen und als Einrichtung zur Staubminderung nach 1.BImSchV an den betroffenen Feuerungen eingesetzt werden zu können.

In Bezug auf die Feuerungsarten wird unterschieden zwischen:

- Einzelraumfeuerungen für Festbrennstoffe, alle Nennwärmeleistungen
- Zentralheizungsanlagen bei Holz oder Kohle mit Nennwärmeleistung 4...50 kW
- Zentralheizungsanlagen bei Holz oder Kohle mit Nennwärmeleistung 50...1000* kW (* Feuerungswärmeleistung)
- Zentralheizungsanlagen bei Agrarbrennstoffen mit Nennwärmeleistung 4...100 kW bzw. 4...1000 kW

Die starke Unterscheidung die hier zwischen Einzelraumfeuerungen und Feuerungen, die keine Einzelraumfeuerungen sind, getroffen wird, basiert auf den Vorgaben zur Prüfung und Überwachung der Feuerungen bzw. Abscheider der 1.BImSchV (2010). Hier besteht ein wesentlicher Unterschied. Abscheider die aufgrund der Vorgaben bei Einzelraumfeuerungen nachgerüstet werden müssen, müssen nur eine generelle Prüfung des Modells bestanden haben. Abscheider die bei Feuerungen nachgerüstet werden, die der wiederkehrenden Überwachungspflicht unterliegen, werden als tatsächlich eingebautes Gerät in Kombination mit der installierten Feuerung im Rahmen der Messungen durch den

Schornsteinfeger überprüft. Daher wird der Bereich der Zentralfeuerungen in die Leistungsbereiche und Brennstoffe unterteilt. Für jede der Untergruppen werden andere Mindestwerte für den zu erreichenden Staubabscheidegrad angegeben.

Zu Neuentwicklungen elektrostatischer Abscheider für Kleinfeuerungsanlagen gibt die Richtlinie zusammenfassend folgende Anmerkungen:

- Wird angegeben für Einzelraumfeuerungen und Feuerungen, die keine Einzelraumfeuerungen sind, mit einer Nennleistung von bis zu 50 kW
- Es kommen vorrangig Abscheider zum Einsatz, die als Niederschlagsselektrode die Wandung der Abgasanlage verwenden (Anmerkung: Prinzip Röhrenelektroabscheider)
- Die Einbringung erfolgt im Rauchrohr oder an der Schornsteinmündung
- Die meisten Geräte besitzen keinen eigenen Abreinigungsmechanismus
- Die Abreinigung der Niederschlagsselektrode (Wandung) erfolgt über den Anlagenbetreiber oder den Schornsteinfeger im Rahmen der üblichen Schornsteinreinigung
- Die Entfernung des abgereinigten Staubes, der sich am Boden des Schornsteins sammelt, erfolgt manuell
- Es ist explizit angegeben: „Eine Staubminderungseinrichtung, bei der die Reinigung darauf basiert, dass die agglomerierte Staubschicht sich selbst wieder löst und als Flocken ausgetragen wird, entspricht nicht dem Stand der Technik.“

Nachfolgend sind die Mindestwerte für die Staubabscheidegrade der verschiedenen Feuerungsarten in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Sie belaufen sich für Elektroabscheider zwischen 50 und 70%. Die Bestimmung der Wirksamkeit sollen bevorzugt nach dem Verfahren der DIN SPEC 33999 (2014) erfolgen. Während diese sich in der Validerung befindet, dürfen alternative vergleichbare Verfahren angewendet werden. Dies ist bis zur Veröffentlichung der zukünftigen DIN 33999 möglich.

Tabelle 3.3: Zusammenfassung der Vorgaben der VDI 3670 (2016) zum Mindestwert der Staubabscheidegrade je Feuerungsart

Feuerungsart	Vorgabe zum Mindestwert vom Staubabscheidegrad	
	(Mindestwerte gemäß Stand der Technik)	
Einzelraumfeuerungen*	Bereich Staub 40 bis 100 mg/m ³	≥ 60 %
	Bereich Staub 150 bis 300 mg/m ³	≥ 50 %
Zentralheizungsanlagen für Holz- und Kohlebrennstoffe bis zu 50 kW	Bereich Staub 30 bis 70 mg/m ³	60 %
	Bereich Staub 100 bis 150 mg/m ³	50 %
	Bereich Staub > 300 mg/m ³	50 %
Zentralheizungsanlagen für Holz- und Kohlebrennstoffe mit einer Nennwärmeleistung von mehr als 50 kW bis zu 1000 kW Feuerungswärmeleistung	Bereich Staub 30 bis 70 mg/m ³	70 %
	Bereich Staub 100 bis 150 mg/m ³	60 %
	Bereich Staub > 300 mg/m ³	50 %

*Es wird unterschieden nach „Elektrostatischer Abscheider im Gebäude mit zugänglicher Messöffnung nach Abscheider“ und „Elektrostatischer Abscheider im Gebäude auf Dach oder nicht im Nachgang messbar im Schornstein“, allerdings sind die Mindestwerte für beide Arten gleich.

3.2.4 Eignungsfeststellung durch Bauartzulassung

Sollen Staubabscheider zur Erfüllung der Vorgaben als Einrichtungen zur Reduzierung der Staubemissionen in der Nachrüstung bei Kleinf Feuerungen eingesetzt werden, benötigen sie einen Nachweis über die Eignung (1.BImSchV, 2010).

Die geforderte Bauartzulassung zur Eignungsfeststellung wird in Deutschland durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) geregelt.

Das DIBt erteilt im Bereich „Staubabscheider für Feuerungsanlagen“ (DIBt, 2022):

- allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Staubabscheider, die nicht von den geltenden harmonisierten Normen erfasst sind.
- allgemeine Bauartgenehmigungen für entsprechende Bauarten.

Für die nationale Zulassung muss eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beantragt werden. Das DIBt legt das Prüfprogramm fest, das an einer Prüf stelle durchgeführt werden kann. Die Entscheidung zur Zulassung obliegt dem DIBt. Sie erfolgt in der Regel für einen Zeitraum von fünf Jahren, nach denen erneut geprüft werden muss (Krüger, 2022).

Im Rahmen des Prüfverfahrens liegt die Anforderung an den Mindestwert des Abscheidegrades lediglich bei 30 % (Tebert, et al., 2022).

3.3 Technologieübersicht und Charakterisierung von Elektroabscheidern für Kleinf Feuerungen

3.3.1 Übersicht zum Aufbau von Abscheidern für Kleinf Feuerungen

Die nachfolgende Abbildung 3.5 veranschaulicht die wesentlichen Verfahrensschritte und Komponenten für einen Elektroabscheider.

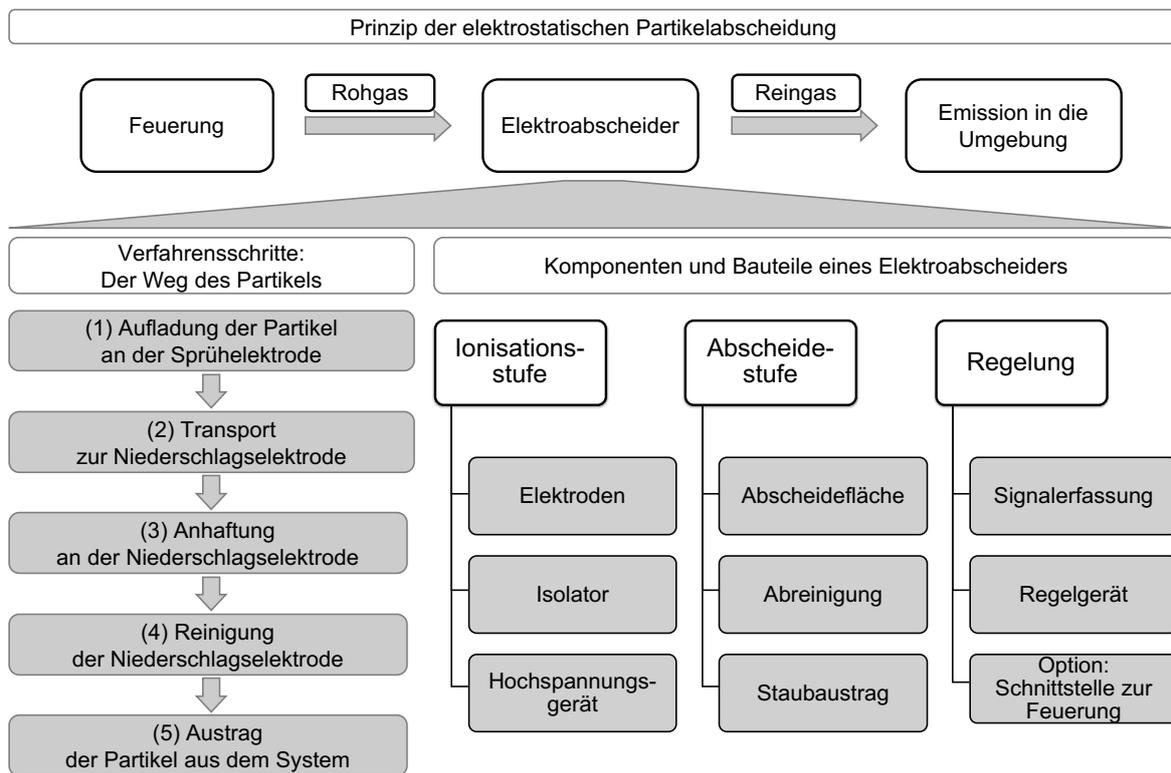


Abbildung 3.5: Verfahrensschritte und wesentliche Komponenten bei Elektroabscheidern für Kleinfeuerungen (eigene Darstellung, veröffentlicht in Glocker et al. (2017))

Grundsätzlich folgen die Elektroabscheider dem gleichen Prinzip, je nach Konzipierung und Bauform variiert jedoch die genaue Umsetzung der Bauteile und Komponenten.

Nach ihrer Funktion im Prozess der Partikelabscheidung lassen sich die Komponenten in drei wesentliche funktionale Gruppen einteilen: Komponenten für die Ionisation (Elektroden, Hochspannungsisolator, Hochspannungserzeugung), für die Abscheidung selbst (Abscheidefläche, Abreinigung, Staubaustrag) und softwareseitige Komponenten (Steuergerät mit Signalerfassung und Regelung, gegebenenfalls Schnittstellen zur Kommunikation mit dem Feuerungssteuergerät oder dem Betreiber).

3.3.2 Bauformen

Die Bauformen der kleinen Abscheider sind sehr inhomogen. Für den kleinen Feuerungsleistungsbereich $< 50 \text{ kW}$ wird am meisten als Grundform das Prinzip der Röhrenelektrofilter verwendet. Abscheider auf Basis der Großelektrofilter mit Platten sind nicht verbreitet. Auf der Suche nach möglichst kompakten Lösungen, die für die beengten Platzverhältnisse in häuslichen Feuerungen geeignet sind, sind vielfältige neuartige Bauformen entwickelt worden.

Die einfachste Bauform besteht aus der Einbringung einer Drahtelektrode ins Abgasrohr, die dann die Funktion der Abscheidefläche übernimmt. Sie verfügen über keine aktive

Abreinigung oder Staubentfernung. Die Form und Einbringung der Sprühelektroden kann auf verschiedene Arten ausgeführt sein.

Als weitergehende Entwicklungen hieraus sind Modelle entstanden, die einen manuellen oder automatischen Abreinigungsmechanismus enthalten. Dieser kann durch Klopfen, Bürsten oder Spülung mit Wasser ausgeführt sein.

Es sind erweiterte Bauformen entstanden, die sich durch zusätzliche Einbauten oder Komponenten weitere Abscheideeffekte außer der elektrostatischen Kräfte zunutze machen. Dabei kann es sich um Schüttungen, Filtermedien, lamellenförmige Elemente oder um zusätzliche Umlenkungen der Gasströmung handeln.

Die Form der Ionisationsstufe und der Elektroden unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Geräten zum Teil erheblich. Die meisten folgen der Form der Drahtanordnung in einem Rohr mit unterschiedlicher Länge und Form. Es sind ebenfalls Formen entwickelt worden, die mehrere Entladungspunkte besitzen. Diese können sternförmig, als Drahtpaket mit beliebigen Spitzen oder als Spitze-Ring-Anordnung umgesetzt sein (Abbildung 3.6). Bei diesen Modellen werden Ionisation und Abscheidefläche voneinander getrennt, so dass sie teilweise als zweistufig bezeichnet werden. Dies ist jedoch nicht zu verwechseln mit zweistufigen Abscheidern aus der Raumluftreinigung. Dort wird in einer zweiten Stufe ein gegensätzlich gepoltes elektrisches Feld umgesetzt. Das ist bei den Abscheidern hier nicht der Fall. Wird hier der Begriff zweistufig verwendet, wird damit verdeutlicht, dass die funktionale Gruppe der Ionisation mit den Sprühelektroden von der Abscheidefläche getrennt ist.

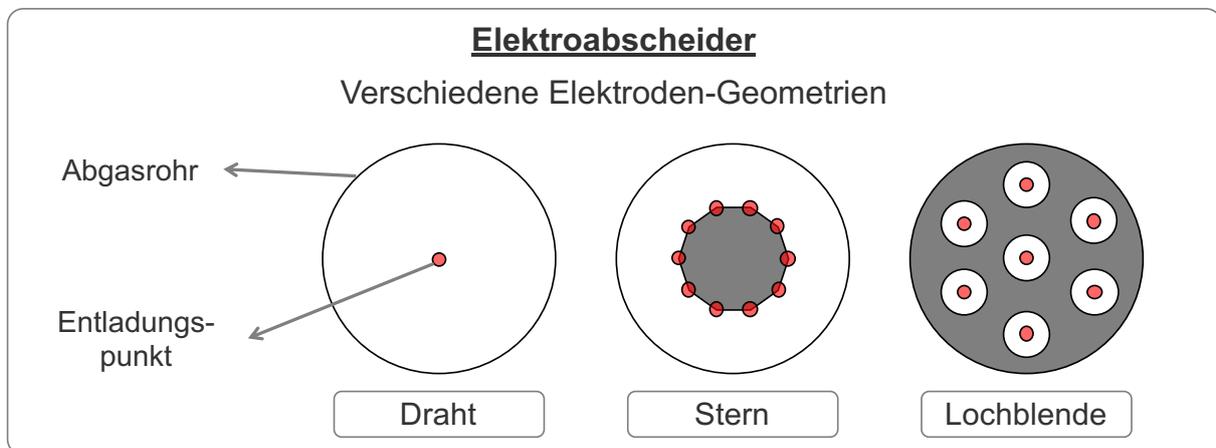


Abbildung 3.6: Veranschaulichung verschiedener Ionisationsstufen mit unterschiedlicher Form der Elektroden

Durch die große Vielzahl an Bauformen mit unterschiedlichsten Merkmalen, wird die Vergleichbarkeit der verschiedenen Abscheidermodelle untereinander sehr schwierig.

Durch die Abweichung von den klassischen Formen, sind ebenfalls die theoretischen Grundlagen und Berechnungen nur bedingt anwendbar. Diese sind nur für die beiden klassischen Formen Röhrenfilter und Plattenfilter genau überprüft.

3.3.3 Einbauorte

Die räumlichen Gegebenheiten bei häuslichen Feuerungen mit Abgassystem lassen verschiedene Einbaumöglichkeiten und Einbauorte für nachgeschaltete Abscheider zu. Alle Varianten werden von den verschiedenen Modellen ausgeschöpft.

Mögliche Einbauorte sind in der Abbildung 3.7 veranschaulicht.

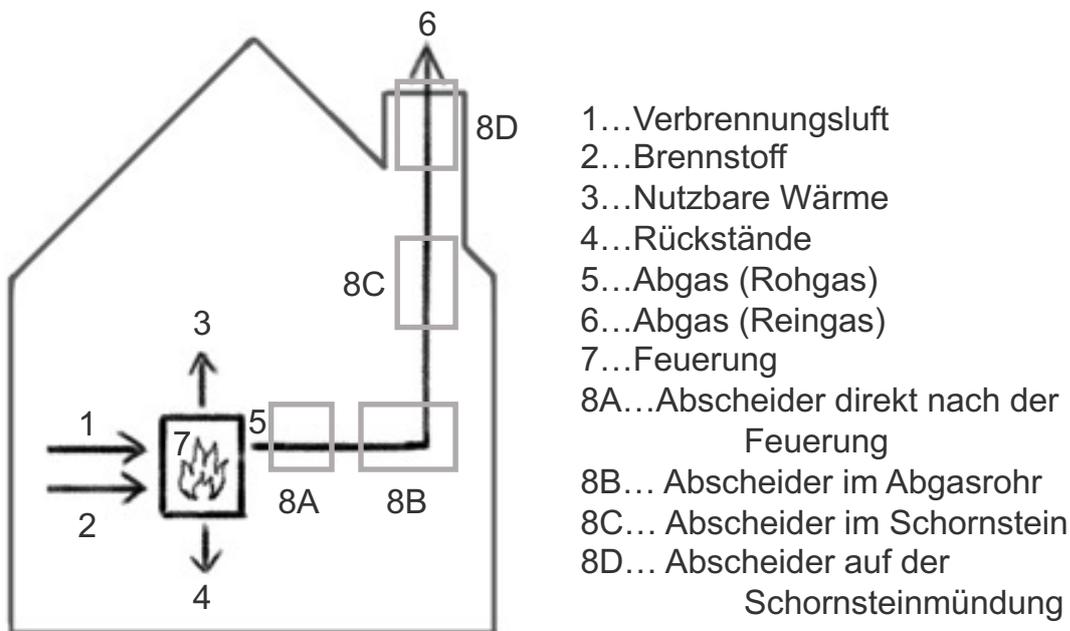


Abbildung 3.7: Mögliche Einbauorte für Abscheider bei häuslichen Feuerungen

Folgende Einbauorte werden in der DIN SPEC 33999 (2014) unterschieden:

- Aufstellung im Gebäude im Verbindungsstück zwischen Feuerung und Abgasanlage;
- Aufstellung im Gebäude in der Abgasanlage;
- Aufstellung im Freien in der Abgasanlage;
- Aufstellung im Freien an der Mündung der Abgasanlage (Schornsteinaufsatz).

3.3.4 Übersicht zu Abscheidern für Kleinf Feuerungen

Für den Einsatz an Kleinf Feuerungen benötigen Staubabscheider eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Kapitel 3.2.4). Dies wird als der Status eines marktverfügbaren Gerätes gewertet. Der jeweilige Abscheider hat das Stadium der Entwicklung verlassen und kann verkauft und eingesetzt werden. Dies sagt jedoch nichts darüber aus, ob der Abscheider in nennenswerter Stückzahl verkauft und eingesetzt wird. Die nachfolgende Tabelle 3.4 gibt alle Modelle an, die zum angegebenen Stand eine zugängliche Information zu ihrer Zulassung erfassen ließen. Informationen über Abscheider, die sich im Zulassungsverfahren befinden, sind nicht erhältlich.

Tabelle 3.4: Übersicht zu Staubabscheider-Geräten mit DIBt-Zulassung (eigene Zusammenstellung, Stand Dezember 2022)

Zeichen	Gegenstand	Hersteller	Gültigkeit	Erste Zulassung
Z-7.4-3442	Staubabscheider Typ "AIRJEKT 1" und "AIRJEKT 1 Version 2.0" für Abgasanlagen	Kutzner + Weber GmbH	04.12.2020 bis 04.12.2025	2011
Z-7.4-3451	Staubabscheider für Abgasanlagen, System "OekoTube OT2" und "OekoTube-Inside"	OekoSolve AG	28.09.2021 bis 28.09.2026	2011
Z-7.4-3471*	Staubabscheider für Abgasanlagen, System "Future Refine"	Karl Schröder Nachf.	05.03.2013 bis 05.03.2018	2013
Z-7.4-3472	Staubabscheider für Abgasanlagen, System "AL-TOP"	Karl Schröder Nachf.	16.08.2018 bis 16.08.2023	2013
Z-7.4-3475*	Staubabscheider "MAHLE Pure Heat" für handbeschickte Feuerungsanlagen für den Brennstoff Scheitholz	MAHLE Industriefiltration GmbH	13.11.2014 bis 13.11.2019	2014
Z-7.4-3504*	Staubabscheider "CAROLA CCA-25, CCA-50, CCA-50.2, CCA-100, CCA-100.2 und CCA-200"	CCA - Carola Clean Air GmbH	06.02.2018 bis 24.08.2020	2015
Z-7.4-3519	Staubabscheider OekoRona für Abgasanlagen bis 300 KW	OekoSolve AG	21.07.2021 bis 21.07.2026	2016
Z-7.4-3534	Staubabscheider der Serie "Cyclojekt" für Abgasanlagen	Kutzner + Weber GmbH	22.10.2019 bis 22.10.2024	2019
Z-7.4-3535	Einrichtung zur Staubreduktion (Staubabscheider) "Airjekt 25"	Kutzner + Weber GmbH	03.12.2019 bis 03.12.2024	2019
Z-7.4-3537	Einrichtungen zur Staubreduktion (Staubabscheider) "CCA-Mini"	CCA - Carola Clean Air GmbH	11.12.2019 bis 11.12.2024	2019
Z-7.4-3544	Staubabscheider Typ "Fireclean" und "Fireclean Version 2.0" für Abgasanlagen	Hark GmbH & Co. KG Kamin- und Kachelofenbau	05.02.2021 bis 05.02.2026	2021
Z-7.4-3549	Staubabscheider für Abgasanlagen Typ "KaminFilterKat"	Vitesco Technologies Emitec GmbH	10.06.2022 bis 10.06.2025	2022
Z-7.4-3550	Staubabscheider für Abgasanlagen Typ "KaminFILTERKat"	Bluekat Technologie GmbH	27.07.2022 bis 27.07.2025	2022

* Zeitraum abgelaufen, Zulassung nicht mehr gültig

Für eine Beschreibung aller zugelassenen Abscheider und Abscheider in der Entwicklung wird auf die Literatur verwiesen. Übersichten und Beschreibungen der einzelnen Modelle sind enthalten Struschka et al. (2017) oder in Ulbricht et al. (2011).

3.4 Schwierigkeiten und Hindernisse der Technologie im Einsatzgebiet

Beim Einsatz von Abscheidern bei Kleinf Feuerungen bestehen vielerlei Herausforderungen. Bei den meisten Geräten und Modellen der Abscheider liegen kaum langfristige Erfahrungen vor. Nachfolgend sollen verschiedene Betriebserfahrungen und andere

Hinweise zu Einflussfaktoren, Schwierigkeiten und Hindernissen im Anwendungsbereich zusammengefasst werden.

3.4.1 Partikelagglomerate und Flockejan

Ein Dauerthema im Zusammenhang von Elektroabscheidern an Feuerungen ist die Bildung großer Partikelagglomerate, die auch als Flocken bezeichnet werden. Sie treten verstärkt bei einem hohen Rußanteil der Partikelemissionen und hohen Partikelkonzentrationen auf. Elektroabscheider begünstigen die Flockenbildung durch die elektrische Ladung der Teilchen. Ruß gibt bedingt durch seine hohe Leitfähigkeit die erhaltene Ladung schnell ab, wandert weniger gut zur geerdeten Niederschlagsfläche. Durch die geringe Dichte und lockere Struktur der Rußpartikel lagern sie sich aneinander an und werden mit dem Abgasstrom mitgetragen.

Tebert et al (2022) beschreiben die Problematik aller aktuell angebotenen Staubfilter zur Flockenbildung am elektrostatischen Abscheider und dem Flockenaustrag wie folgt:

- Partikel akkumulieren an der Abgasrohr-Innenwand als Flocken
- Flocken werden mit dem Abgasstrom aus dem Kamin ausgetragen
- Verbleib des Flockenaustrags
- Teilweise verbleiben die Flocken auf dem Dach und werden mit dem Regen in die Kanalisation getragen
- Teilweise gelangen die Flocken in die nahe Umgebung / Nachbarschaft

Zotter et al. (2021) beobachten während ihrer Untersuchungen wie folgt:

- Während der Staubmessung: Russ tritt auf aus unvollständiger Verbrennung, die Agglomeration im Elektroabscheider führt zu einem flockigem Schichtaufbau
- Als Konsequenz für den Elektroabscheider beschreiben sie: eine Feinstaubreduktion ist auch bei „schlechter“ Verbrennung möglich; es treten vermehrt Kurzschlüsse im Elektroabscheider auf; ohne Hochspannung verlieren die Flocken die Haltekraft und werden ausgetragen

3.4.2 Reinigung und Entfernung des abgeschiedenen Staubes

Die hohen Staubkonzentrationen in den Abgasen der Kleinfeuerungen können auch schon nach kurzer Betriebszeit erhebliche Staubablagerungen an sämtlichen Bauteilen und Stellen verursachen. Selbst bei Abscheidern mit Abreinigungsverrichtung der Abscheideflächen, können die Ablagerungen an Elektroden oder Temperatursensoren zu Betriebsstörungen führen und müssen periodisch entfernt werden. Dies ist oft aufwändig und schlecht durchführbar (Hartmann, et al., 2010). Bei Abscheidern ohne Abreinigungsverrichtung ist der Reinigungsaufwand noch größer.

3.4.3 Spannungsüberschläge

Spannungsüberschläge an den Elektroden sind üblich für den Betrieb von Elektroabscheidern. Sie können jedoch mit einer Geräuschbelästigung einhergehen, was vor allem im Wohnraum problematisch ist (Hartmann, et al., 2010).

4 Methodische Grundlagen für die experimentelle Untersuchung von Partikelabscheidern an Biomassekleinfeuerungen

4.1 Einflussgrößen auf die Partikelabscheidung aus Feuerungsabgasen

Auf die Abscheidung von Partikeln aus Feuerungsabgasen gibt es verschiedene Einflussgrößen. Diese lassen sich ganz generell der Feuerung oder dem Abscheider selbst zuordnen. Nachfolgend sind sie in einer Übersicht dargestellt.

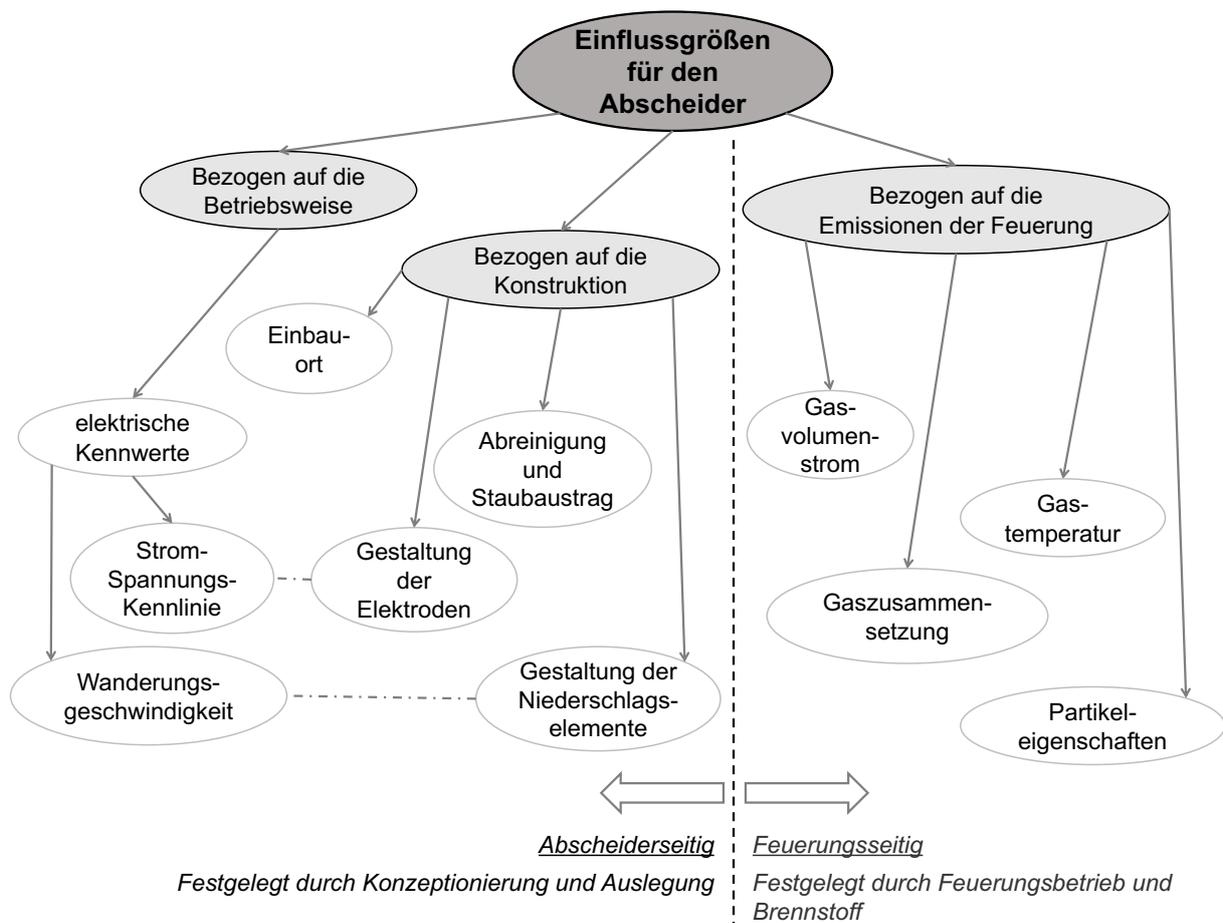


Abbildung 4.1: Einflussgrößen auf einen Abscheider bei Feuerungen

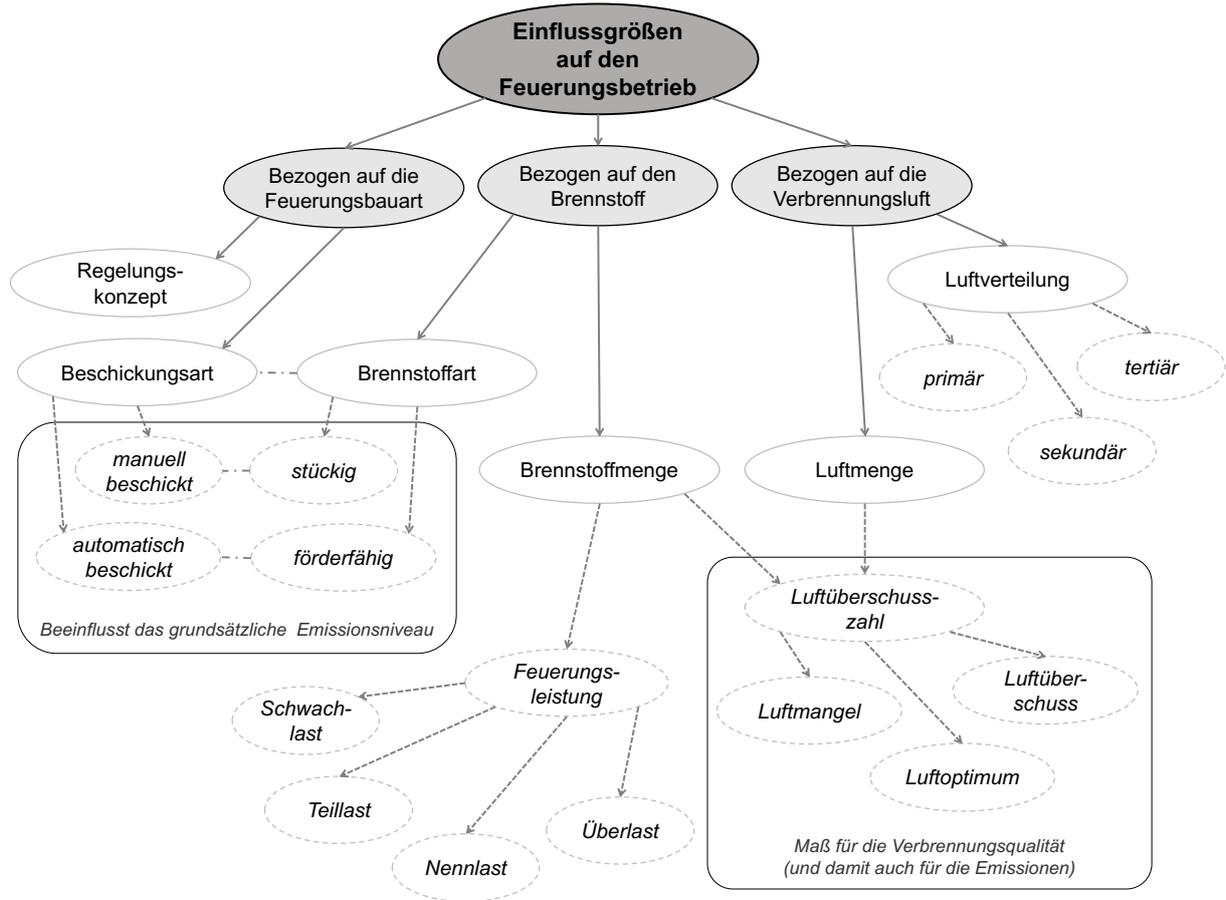


Abbildung 4.2: Einflussfaktoren auf den Feuerungsbetrieb und die Emissionen

Verschiedene Einflussgrößen haben Auswirkungen auf den Feuerungsbetrieb, sie sind in Abbildung 4.2 gezeigt.

Der Feuerungsbetrieb wiederum beeinflusst direkt die Eigenschaften des Abgases und das Emissionsverhalten und damit auch die Abscheidung der im Abgas enthaltenen Partikelemissionen. Abbildung 4.3 zeigt verschiedene relevante Einflussgrößen.

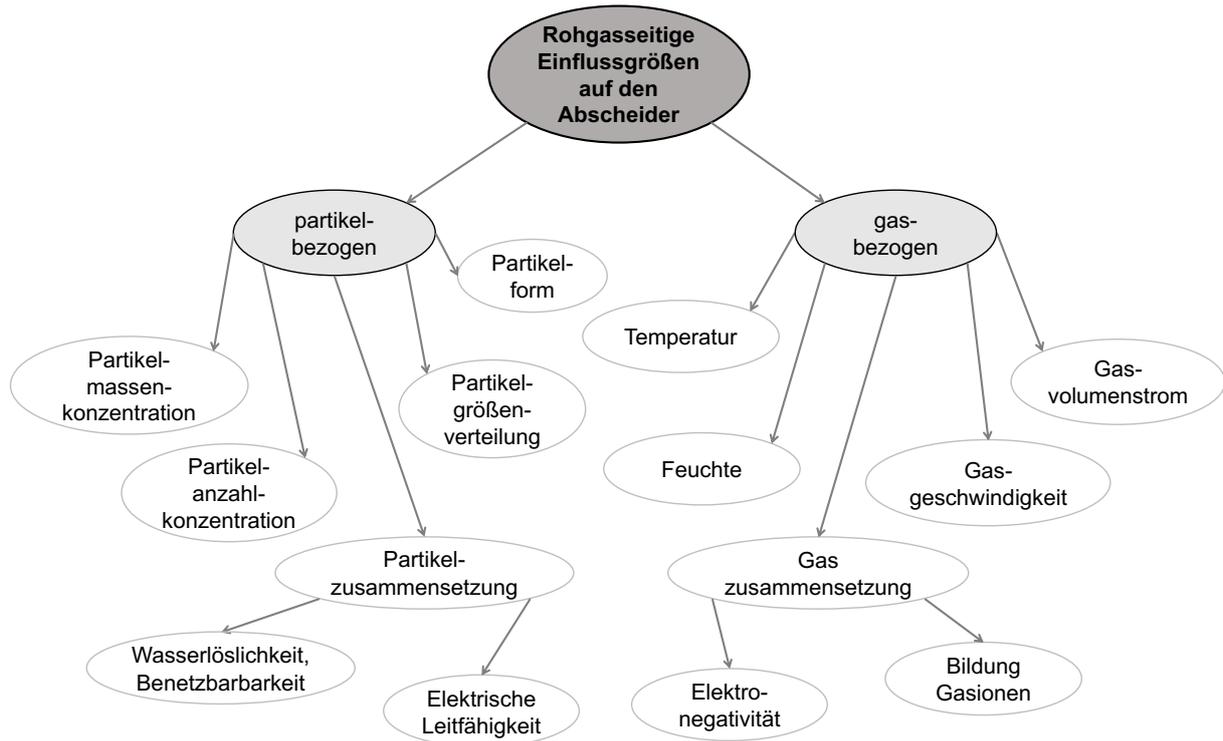


Abbildung 4.3: Einflussfaktoren seitens der Rohgasbedingungen auf den Abscheider

4.2 Experimentelle Untersuchung von Abscheidern an Feuerungen mittels Emissionsuntersuchungen

4.2.1 Untersuchungen in Feuerungsabgasen

Die experimentellen Untersuchungen der Arbeit fokussieren sich auf die Anwendung von Emissionsuntersuchungen beim Einsatz von Partikelabscheidern in Feuerungsabgasen in einer Prüfstands Umgebung.

In den nachfolgenden Abschnitten werden alle relevanten Messgrößen, Messverfahren, Versuchsbedingungen und Vorgehensweisen zur experimentellen messtechnischen Untersuchung von Partikelabscheidern an Kleinfeuerungen beschrieben. Übliche Standardverfahren und die messtechnischen Herausforderungen werden gleichermaßen zusammengefasst ebenso wie aktuelle Themen und Fragestellungen im Forschungsbereich. Als Schlussfolgerung der aufgearbeiteten Kenntnisse werden am Ende des Kapitels die Fragestellungen für die eigenen Untersuchungen herausgearbeitet.

Abhängig vom Fokus und den Fragestellungen einer experimentellen Untersuchung, können für die Durchführung verschiedene Versuchsumgebungen zur Verwendung kommen. Für grundlegende Zusammenhänge und Fragestellungen eignen sich Versuche in einer Laborumgebung am meisten. Sollen Fragestellungen unter realen aber möglichst definierten Versuchsbedingungen untersucht werden, ist dies mit Prüfstandsversuchen am besten zu erreichen. Sollen Aspekte des realen Praxiseinsatzes untersucht werden, ist hierfür

eine Umgebung im Praxisbetrieb, beispielsweise im Rahmen von Feldmessungen, notwendig.

Der Hauptteil der Untersuchungen für diese Arbeit werden in einer Realgasumgebung am Feuerungsprüfstand als Emissionsuntersuchungen mit verschiedenen Feuerungen und Elektroabscheidern (Kapitel 6 und 7) durchgeführt.

4.2.2 Messverfahren und Probenahme bei Emissionsuntersuchungen

Abgas- und emissionsbezogene Größen werden entweder unmittelbar im Abgas gemessen oder es wird ein Teilvolumenstrom entnommen, der anschließend gegebenenfalls konditioniert und der entsprechenden Messtechnik oder Probenahmeeinrichtung zugeführt wird. Aus Gründen einer besseren Vergleichbarkeit werden üblicherweise die meisten emissionsbezogenen Messgrößen auf einen Bezugssauerstoffgehalt und Normbedingungen berechnet angegeben (1.BImSchV, 2010).

Einen Überblick und grundlegende Erklärungen zu Messverfahren bei Feuerungsabgasen gibt (Baumbach, 1993).

Als speziellen Bezug zu Untersuchungen durch Bestimmung partikelförmiger Emissionen diskutiert (Lenz, et al., 2014) in der „Messmethodensammlung Feinstaub“ verschiedene messtechnische Grundlagen und Messverfahren für die gravimetrische Staubmessung und Partikelzählverfahren bei Feinstaubmessungen an Feuerungen für feste Biobrennstoffe.

Eine ausführliche Untersuchung zum Thema der Messgenauigkeit von gravimetrischen Staubmessverfahren an Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe gibt (Schäfer, 2016). Dort ist ebenfalls die hier verwendete Messtechnik zur Staubmessung detailliert beschrieben und diskutiert. In einem späteren Abschnitt (Kapitel 4.6) wird genauer auf den Einfluss der isokinetischen Probenahme bei der Staubmessung eingegangen, der vom Autor in der genannten Arbeit diskutiert wird. Ebenso die Unsicherheiten bei dem Vergleich zwischen der Gesamtstaubmessung und der Messung der Partikelgrößenverteilung.

Vor allem die Erfassung partikelbezogener Messgrößen unterliegt einigen messtechnischen Herausforderungen – vor allem Agglomerationen von Partikeln im Zusammenhang mit Restladungen an Elektroabscheidern ebenso wie die genaue Mess-Position für die Probenahme vor und hinter einem Abscheider sorgen oft für Diskussionen. Daher wird in einem separaten Abschnitt darauf eingegangen (siehe Kapitel 4.6).

4.2.3 Versuchsbedingungen bei Emissionsuntersuchungen

4.2.3.1 Versuchsaufbau

Der grundlegende Aufbau für die Durchführung von Emissionsuntersuchungen folgt meist dem gleichen Schema. Die Feuerung als Emissionsquelle der Partikelemissionen bildet die Basis, in der Regel folgt der Aufbau dem gängigen Aufbau eines Feuerungsprüfstandes, wie er vielfach in der Literatur beschrieben ist (DIN SPEC 33999, 2014). Unmittelbar im Anschluss an die Feuerung befindet sich die erste Messposition oder Messstrecke im Abgas, die das Rohgas darstellt. Anschließend folgt der Abscheider. Danach schließt sich die zweite

Messposition oder Messstrecke als Reingas an. Zuletzt folgt eine Abgassammeleinrichtung, die die Feuerungsabgase entsprechend ableitet.

Obwohl sich die Versuchsaufbauten im grundsätzlichen Aufbau alle gleichen, kann es doch erhebliche Unterschiede in den Details und Abmessungen geben. Ein wesentlicher Unterschied besteht beispielsweise darin, ob der Abscheider im Vollstrom mit dem kompletten Abgasstrom beaufschlagt wird, oder ob ein Aufbau mit Teilvolumenstrom mittels einer Bypass-Regelung umgesetzt wird. Ein Aufbau im Vollstrom bildet den Praxiseinsatz näher ab, die Verwendung eines Teilstroms hingegen lässt einen flexibleren Versuchsbetrieb zu und entkoppelt den Feuerungsbetrieb mehr vom Abscheiderbetrieb. Je nach Untersuchungszweck und Feuerungsbauart ist daher einer der beiden Arten zu bevorzugen.

Ein Prüfaufbau in zwei Varianten zeigt die DIN SPEC 33999, der in Kapitel 4.4.2 genauer beschrieben wird.

Schwierigkeiten bereitet der Aufbau mit passenden Messstrecken für Abscheider als On-Top-Geräte, also Geräte, die an der Schornsteinmündung platziert sind. Im Praxiseinsatz sind diese nicht ohne großen zusätzlichen Aufwand im Reingas zu vermessen, da sie kein nachgelagertes Abgasrohr besitzen, sondern in die Umgebung münden.

Im Fall bei deren Verwendung an einem Prüfstand besteht die Möglichkeit eine entsprechende Reingasmessstrecke anzufügen, jedoch mit einigem zusätzlichem apparativem und messtechnischem Aufwand. Wie dies umgesetzt werden kann, wird beispielsweise in Struschka et al. (2017) beschrieben. Das aus dem Abscheider austretende Abgas wird mit einer Abgashaube zusammen mit Umgebungsluft abgesaugt. Dies ist notwendig, um durch dieses Vorgehen keine Rückkopplung der Absaugung auf die Durchströmung des Abscheiders oder die Durchströmung und damit Betriebsbedingungen der Feuerung zu verursachen. Es hat jedoch zur Folge, dass die Verdünnung analog wie bei einem Verdünnungstunnel gasseitig überwacht werden muss, was in der Regel durch die zusätzliche Erfassung von Sauerstoff oder Kohlendioxid in der Reingasmessstrecke gemacht wird. Bei Abscheidern, die mit Isolator-Spülluft arbeiten, ist dies zur Kontrolle und zur Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt ebenfalls zu empfehlen.

Für die Untersuchungen dieser Arbeit werden je nach Fragestellung und verwendeter Geräte etwas verschiedene Aufbauten verwendet. Wie genau der verwendete Versuchsaufbau aussieht, ist im jeweiligen Versuchskapitel beschrieben (siehe Kapitel 6 und 7).

4.2.3.2 Messstellen und Messstrecke

Im Wesentlichen sind die beiden Messstellen „Rohgas“ und „Reingas“ für die Untersuchung und messtechnische Bewertung von Abscheidern relevant. Die DIN SPEC 33999 definiert Rohgas als „Staubbeladener Gasstrom, der dem Abscheider zugeführt wird“ und Reingas als „Aus dem Abscheider austretender Gasstrom“. Hier werden ebenso die Begriffe „Messstrecke 1“ und „Messstrecke 2“ verwendet, wie in der Abbildung 4.5 zu sehen.

Abgesehen von den gasseitigen Messstellen für die Erfassung und Probenahme werden manche Messgrößen an anderer Stelle erfasst, wie beispielweise in oder an der Feuerung

oder in oder am Abscheider direkt oder auch an anderen Anlagenteilen. Dies ist in der jeweiligen Versuchsbeschreibung oder schematischen Darstellung gekennzeichnet und beschrieben.

Als ein wichtiger Einflussfaktor sei die Temperatur respektive die Abgastemperatur an der Messstelle genannt. Bei Kleinfeuerungen resultieren der vergleichsweise niedrige Abgasvolumenstrom in Kombination mit vergleichsweise großen Abgasrohrdurchmessern in relativ niedrigen Abgasgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5 bis 2,0 m/s und hohen thermischen Oberflächenverlusten der Abgasrohre. Dadurch kann sich ein Temperaturabfall von 50 K über einen Meter Rohrstrecke ergeben. Durch die Ein- und Auslaufstrecken zur Probenahme an den Messstellen vor und nach Abscheider kann die Abgastemperatur daher an der hintersten Messstelle erheblich reduziert sein im Vergleich zur Messung unmittelbar nach der Feuerung. Im Wesentlichen spielen hier Kondensationseffekte des im Abgas enthaltenen Feuchtegehalts eine Rolle und ebenfalls die Änderung des Aggregatzustandes von bestimmten Partikel- und Aerosolfraktionen. Beides kann zu Verschiebungen, Verfälschungen und Verlusten bei der Probenahme führen. Eine thermische Isolation oder Beheizung der Abgasrohrsysteme oder zumindest der Probenahmeeinrichtungen kann daher nötig sein.

Ebenfalls beachtet werden müssen die empfohlenen Abstände der Messstellen zu strömungsrelevanten Hindernissen und Umlenkungen im Abgassystem. Dies gilt vor allem für die partikelbezogenen Messgrößen. So schreibt etwa die VDI 2066-1 eine Einlaufstrecke vor dem Messpunkt von fünf hydraulischen Durchmessern und eine Auslaufstrecke nach dem Messpunkt von drei hydraulischen Durchmessern vor (VDI 2066-1, 2006). Die Summe aus Einlaufstrecke, Probenahme und Auslaufstrecke wird als Messstrecke bezeichnet. Bei einem typischen Abgasrohrdurchmesser von 150 mm in rundem Querschnitt beläuft sich dies also auf eine 0,75 m lange ungestörte Einlaufstrecke und eine 0,45 m lange freie Auslaufstrecke.

Zusätzlich müssen für die Abscheider bei einer Messung die Bauform des Abscheiders und mögliche Herstellerangaben beachtet werden. Je nach Abscheiderprinzip und Bauform ist das den Abscheider anschließende Rohrstück als Abscheidestrecke ausgelegt und darf somit erst an deren angegebendem Ende als Reingas vermessen werden.

Da manche der Anforderungen an die Messstellen sich widersprechen und oft die Anwendung in den räumlichen Gegebenheiten erschwerend hinzu kommt, ist die reale Umsetzung eines Aufbaus in den meisten Fällen Kompromissen unterworfen. Hierbei ist stets zu berücksichtigen, welche die jeweils wichtigsten Aspekte einer Untersuchung darstellen, sei es die möglichst genaue Abbildung des Praxisverhaltens, die messtechnische Genauigkeit eines Messverfahrens, Temperaturabhängigkeiten, Ein- und Auslaufstrecken, die Vergleichbarkeit zu anderen Untersuchungen oder aus anderen Gründen.

Es sei angemerkt, dass in Struschka et al (2015) der Einfluss einer langen Messstrecke an einem Kaminofen mit Elektroabscheider unter Verwendung von Spülluft untersucht wurde. Es wird der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die Position der Messstrecke zeigt und ob es zur Zunahme an Partikeln im Abgas kommt durch eine Temperaturabkühlung aufgrund dem Spülluftstrom und wegen der langen Messstrecke. Bei laufenden Feuerungsbetrieb und Betrieb der Spülluft bei ausgeschalteter Hochspannung wurde

lediglich eine Abweichung von 2% der Gesamtstaubmasse zwischen Rohgas und Reingas festgestellt. Der Abstand der Messstellen liegt bei etwa 4 m, die Temperaturen im Rohgas liegen bei 330 °C und im Reingas bei 70°C. Die Abweichung der Staubmesswerte liegt im Streubereich der Staubmessung und damit kann dieser Einfluss bei den Untersuchungen vernachlässigt werden.

4.2.3.3 Messintervall und Probenahmedauer

Einen großen Einfluss auf das Ergebnis einer Messung hat der Zeitpunkt der Messung. Vor allem bei handbeschickten Feuerungen mit ihrem diskontinuierlichen Betrieb und einem stark schwankendem Emissionsverhalten ist der genaue Zeitpunkt und das Messintervall von entscheidender Bedeutung für den resultierenden Messwert.

Für Emissionsmessungen zur Bewertung von Feuerungen geben die Vorschriften der Typprüfung der verschiedenen Feuerungsbauarten die Basis.

Jedoch treten vor allem in den ersten Minuten nach der Brennstoffauflage die höchsten Emissionen auf, die durch das Vorgehen nach Typprüfung oft nicht erfasst werden. Daher wurden teilweise neue Vorschläge ausgearbeitet, die mehr Emissionen erfassen sollen, um das Praxisverhalten realer abzubilden oder auch um Partikelabscheider in diesen Phasen hoher Emissionen zu bewerten. Untersuchungen dazu gibt Struschka et al. (2015) und (2017). In der DIN SPEC 33999 (2014) oder der Zertifizierung „Blauer Engel“ (Blauer Engel, 2022) erfolgt die Messung unmittelbar nach der Brennstoffauflage.

Der passende Messpunkt und Messintervall hängt außerdem stets von der Fragestellung der Messaufgabe ab. Da sich dies im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit unterscheiden aufgrund verschiedener Fragestellungen, wird das jeweilige Messintervall im jeweiligen Versuchskapitel erläutert.

4.2.3.4 Probenahmestrategie

Vor allem für die Bestimmung des Abscheidegrades ist die Vorgehensweise bei der Ermittlung der beiden Vergleichswerte in Rohgas und Reingas von großer Bedeutung.

Der empfohlene Fall ist stets die zeitgleiche Messung an beiden Messstellen in Rohgas und Reingas. Dies wird auch als simultane oder parallele Messung bezeichnet. Voraussetzung dafür ist vor allem eine ausreichende messtechnische Ausrüstung. Für kontinuierlich erfasste Messgrößen wie die Temperatur oder auch die Abgaszusammensetzung lässt sich dies verhältnismäßig gut umsetzen. Schwieriger wird es bei der Verwendung der Messtechnik zur Gesamtstaubmessung mittels Planfilterkopfgerät (VDI 2066-1, 2006). Noch aufwändigere Messverfahren wie Kaskadenimpaktoren (VDI 2066-5, 1994) oder auch Partikelzählverfahren stehen in den meisten Fällen nicht ausreichend zur Verfügung, um eine zeitgleiche Messung durchzuführen. Daher wird in diesen Fällen auf eine andere Strategie bei der Probenahme ausgewichen und die Messung beider Mess-Positionen zeitlich versetzt durchgeführt. Dies wird auch als serielle Messung bezeichnet. Zur Bewertung und Untersuchung von Abscheidern sind vor allem zwei Varianten in der Anwendung: die zeitlich versetzte Messung an den beiden Positionen in Rohgas und Reingas, oder die Messung nur im Reingas über den Wechsel eines aktiven und nicht-aktiven Abscheiders. Bei Elektroabscheidern wird dies durch Ein- und Ausschalten der Hochspannung erreicht. Dies ist allerdings nicht bei allen Bauformen umzusetzen. Im Falle einer seriellen Messung sind die Fehlerquellen deutlich höher als bei einer parallelen Messung. Um diese Fehler und Abweichungen möglichst zu minimieren, sind stets

Kontrollgrößen im Abgas zu erfassen, so dass die Bedingungen zwischen beiden Messzeitpunkten ausreichend vergleichbar sind. Dies kann beispielsweise durch Erfassung und Vergleichen der Abgaszusammensetzung, den Feuerungsbedingungen und den Abscheiderkenngrößen umgesetzt werden.

Sofern nicht anders angegeben, sind die Rohgas- und Reingasmesswerte der eigenen Untersuchungen zeitgleich erfasst worden. Im Bezug der Korngrößenverteilung wurde auf eine parallele Messung ausgewichen. Dies erfolge allerdings überwiegend bei automatisch beschickten Feuerungen und unter Kontrolle der anderen Emissionsparameter, so dass der Fehler dadurch als vertretbar angesehen werden kann und der Vergleich der Messpositionen trotzdem möglich ist. Genaueres ist in den jeweiligen Versuchskapiteln beschrieben.

4.3 Potenzielle Messgrößen zur Charakterisierung bei Emissionsuntersuchungen

4.3.1 Übersicht zu Messgrößen für Emissionsuntersuchungen

Eine Messgröße kann als „quantifizierbare Eigenschaft des zu untersuchenden Abgases, beispielsweise Konzentration einer Messkomponente, Temperatur, Geschwindigkeit, Massenstrom“ definiert werden (VDI 2066-1, 2006).

Von grundlegendem Interesse für eine Untersuchung sind alle Parameter, die die Bedingungen und den Zustand in den Feuerungsabgasen erfassen und abbilden. Neben den allgemeinen Eigenschaften des Abgases wie die Gastemperatur ist die Gaszusammensetzung von wichtiger Bedeutung. Als Hauptprodukte einer vollständigen Umsetzung bei der Biomasseverbrennung sind der Gehalt an Sauerstoff und Kohlendioxid zu nennen. Das entstehende Wasser liegt im heißen Abgas in Form von Wasserdampf vor und befindet sich daher ebenfalls in der Gasphase.

Als Produkt einer unvollständigen Verbrennung gilt vor allem der Gehalt an Kohlenmonoxid als Leitgröße für die Qualität der Verbrennung. Als Summengröße wird – ebenfalls als Produkte der unvollständigen Verbrennung – die flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds (VOC), im deutschen organisch gebundener Kohlenstoff (OGC)) gemessen.

Am wichtigsten für die Beurteilung eines Partikelabscheiders sind die partikelbezogenen Messgrößen. Hier kann bei der Bestimmung grundlegend zwischen zwei verschiedenen Eigenschaften unterschieden werden: der Bestimmung von physikalischen oder der Bestimmung von chemischen Eigenschaften.

Als wichtigste Größe ist die gravimetrische Gesamtstaubkonzentration zu nennen. Die zulässige Emission einer Feuerung ist je nach Bauart und Baujahr durch den jeweiligen Grenzwert seitens der (1.BImSchV, 2010) reglementiert. Das Referenzmessverfahren als gravimetrisches Messverfahren zur Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes mit Planfilterkopfggerät und dessen Durchführung sind durch die (VDI 2066-1, 2006) gegeben. Neben der Gesamtstaubkonzentration können andere Eigenschaften der im Abgas mitgetragenen Partikel erfasst werden, wie beispielsweise die Korngrößenverteilung, der

Anteil von Feinstaub bzw. Ultrafeinstaub, die Partikelanzahl oder auch bestimmte Inhaltsstoffe oder die chemische Zusammensetzung der Partikel.

In Tabelle 4.1 sind die relevanten Messgrößen und die Basis zu ihren Messverfahren aufgelistet und im Nachfolgenden beschrieben.

Alle Messgrößen, die im Abgas bestimmt werden können, können sowohl im Rohgas hinter der Feuerung als auch im Reingas hinter dem Abscheider erfasst werden. Welche Möglichkeiten und Einflüsse es hier für die Messstelle und die Messstrategie gibt, wird im vorherigen Abschnitt diskutiert (Kapitel 4.2.3).

Für alle allgemeinen Abgasparameter und Messgrößen wird nur in der Übersicht der Tabelle die Messverfahren etc. dargestellt. Nur die für Partikelemissionen relevanten Messgrößen, Messverfahren und Vorschriften werden nachfolgend detaillierter ausgeführt.

Sofern nicht anders angegeben, werden die Messgrößen auf einheitliche Bezugsbedingungen umgerechnet. Der Bezugswert für den Druck wird auf 101,3 kPa gerundet berücksichtigt, die Temperatur auf 273 K und die Basis für das Abgasvolumen bildet trockenes Abgas (VDI 2066-1, 2006).

Tabelle 4.1: Übersicht zu Messgrößen für Emissionsuntersuchungen

Messgröße	Kürzel	Messprinzip	Einheit	Messaufgabe	Messung / Probenahme
Allgemeine Abgasparameter					
Temperatur	T	Thermospannung	°C	Bezugsgröße	Abgas direkt
Absolutdruck	p		Pa	Abgasbedingungen,	Abgas direkt
Differenzdruck ("Zug")	dp		Pa	Abgasbedingungen,	Abgas direkt
Abgasgeschwindigkeit	v		m/s	Durchströmung der Feuerung, Abgasvolumenstrom	Abgas direkt
Abgaszusammensetzung					
Sauerstoff	O ₂	Paramagnetisch	Vol.-%	Leitgröße der Verbrennung (Restsauerstoffgehalt, Lambda), Bezugsgröße	Teilvolumenstrom, gekühlt, trocken
Kohlendioxid	CO ₂	Nicht-dispersive Infrarotabsorption (NDIR)	Vol.-%	Leitgröße der Verbrennung (Biomasseumsatz), Kontrollgröße	Teilvolumenstrom, gekühlt, trocken
Kohlenmonoxid	CO	Nicht-dispersive Infrarotabsorption (NDIR)	mg/m ³ (teils ppm)	Leitgröße für Verbrennungsbedingungen und Emissionsniveau; Grenzwert	Teilvolumenstrom, gekühlt, trocken
Kohlenwasserstoffe	TVOC (OGC)	Flammen-Ionisations-Detektor (FID)	mgC/m ³ (teils ppm)	Emission von organischen Verbindungen und Schadstoffen	Teilvolumenstrom, heiß
Teere		Nass-chemische Analyse	mg/m ³		Teilvolumenstrom, konditioniert,
Abgasfeuchte					
Besondere Spezies im Abgas wie z.B. HCl		Nass-chemische Analyse	mg/m ³		Teilvolumenstrom, konditioniert,

Messgröße	Kürzel	Messprinzip	Einheit	Messaufgabe	Messung / Probenahme
Partikelbezogene Messgrößen: physikalische Eigenschaften					
Gesamtstaubmessung	PM	Gravimetrisch mit Planfilterkopfgerät nach VDI 2066-1	mg/m ³	Gesamtstaubemissionen; Grenzwert; Referenzverfahren	Teilvolumenstrom, heiß
Gesamtstaubmessung Schornsteinfeger- Messgeräte	PM	Je nach Verfahren (gravimetrisch oder optisch) nach VDI 4206-2	mg/m ³	Grenzwertüberwachung Kleinfeuerungen; Kontinuierlich	Teilvolumenstrom, konditioniert
Korngrößenverteilung (massebezogen)		Gravimetrisch mit Impaktor nach VDI 2066-5		Forschungsfragestellungen	Teilvolumenstrom, heiß
Größenfraktionen	PM1; PM2,5; PM 10	nach VDI 2066-10		Forschungsfragestellungen	Teilvolumenstrom, heiß
Partikelanzahl	#	je nach Verfahren		Forschungsfragestellungen	je nach Verfahren
Partikelanzahlverteilung	#	je nach Verfahren		Forschungsfragestellungen	je nach Verfahren
Partikelbezogene Messgrößen: chemische Eigenschaften und Partikelzusammensetzung					
Kohlenstoffanteile	TC, EC, OC, IC	DIN 19539:2016-12		Forschungsfragestellungen	Teilvolumenstrom, konditioniert, nachträgliche Laboranalyse
Mineralische Bestandteile		DIN 51729-11:1998-11		Forschungsfragestellungen	Teilvolumenstrom, konditioniert,
Besondere Spezies wie z.B. Chlorid		DIN EN ISO 10304-1:2009-07		Forschungsfragestellungen	Teilvolumenstrom, konditioniert,
Parameter des Abscheiders					
Differenzdruck / Druckverlust / Filterdruckverlust	dp		Pa	Betriebsgröße Abscheider	Vor und nach dem Abscheider im Abgas
Spannung (Hochspannung)	U		V	Betriebsgröße Elektroabscheider	Erfassung durch Steuergerät des Abscheiders
Stromfluss	I		A	Betriebsgröße Elektroabscheider	Erfassung durch Steuergerät des Abscheiders
Abgastemperatur	T	Thermospannung	°C	Betriebsgröße Abscheider	

In der klassischen Verfahrenstechnik werden bei der Beschreibung von Trennprozessen und Trennapparaten andere verschiedene Begriffe verwendet, die hier zusammenfassend erläutert werden sollen. Klassischerweise wird zwischen verschiedenen Mengenströmen „Aufgabegut“ (Rohgas), „Grobgut“ (abgeschiedene Anteile) und „Feingut“ (durchgelassene Anteile) unterschieden (Löffler, 1988 S. 14ff).

Als essenzielle Größe wird dort der Trenngrad $T(x)$ verwendet, der ebenso als Fraktionsabscheidegrad bezeichnet wird. Er gibt für jede Partikelgröße das Verhältnis der ins Grobgut gehenden Menge bezogen auf die im Aufgabegut enthaltene Menge an. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei bei 0 alle Partikel durchgelassen und bei 1 alle Partikel abgeschieden werden. Er ist unabhängig von der Mengenart, kann also sowohl die Anzahl als auch die Masse abbilden. Wird der Trenngrad als Verlauf dargestellt wird dies als Trennkurve bezeichnet (Löffler, 1988 S. 17ff).

4.3.2 Charakterisierung von Partikelemissionen im Abgas

4.3.2.1 Bestimmung von Partikelemissionen

Für die Untersuchung des Emissionsverhaltens der Feuerung und des Abscheideverhaltens der Emissionsminderungsmaßnahmen müssen die Partikelemissionen im Rohgas und im Reingas bestimmt werden. Sie können durch verschiedene Messgrößen charakterisiert werden, wobei zwischen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Partikel unterschieden werden kann. Zu den physikalischen Eigenschaften werden unter anderem die massebezogenen und die anzahlbasierten Konzentrationen und Verteilungen, als auch Parameter wie Partikelform, Dichte oder Lichtreflektion gezählt. Die chemischen Eigenschaften umfassen vor allem die stoffspezifische Zusammensetzung der Partikel wie beispielsweise den organischen oder anorganischen Anteilen oder bestimmte Inhaltsstoffe wie Kohlenstoffverbindungen, Minerale oder Schwermetalle.

Grundlegende Beschreibungen finden sich umfassend in der Literatur. Mit speziellem Bezug zu Kleinfeuerungen sei auf eine allgemeine Übersicht in (Lenz, et al., 2014) und mit besonderem Bezug zur Aufgabe der Staubmessung mit dem Referenzmessverfahren in (Schäfer, 2016) hingewiesen. Vergleichende Feldmessungen und die verwendeten Messverfahren im Hinblick auf Gesamtstaubmessung, Feinstaubmessung und Partikeldichtemessung werden in (Gaderer, 2007) beschrieben.

Im Nachfolgenden werden die relevanten Aspekte der hier verwendeten Größen und Messverfahren beschrieben und zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Übersicht über Messvorschriften zur Erfassung von Partikelemissionen

Bezeichnung	Jahr	Titel	Status und Ersatzvermerk *
VDI 2066 Blatt 1:2021-05	2021	Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung	Aktuell; Dieses Dokument ersetzt VDI 2066 Blatt
VDI 2066 Blatt 1:2006-11	2006	Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung	Zurückgezogen
VDI 2066 Blatt 5:1994-11	1994	Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen; Fraktionierende Staubmessung nach dem	Aktuell
VDI 2066 Blatt 10:2004-10	2004	Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen - Messung der Emissionen von PM ₁₀ und PM _{2,5} an geführten Quellen nach dem Impaktionsverfahren	Aktuell
VDI 4206 Blatt 2:2015-02	2015	Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen - Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen	Aktuell; Dieses Dokument ersetzt VDI 4206 Blatt 2:2011-06.

* Angabe: Letzter Zugriff am: 17.10.2022

In der vorliegenden Arbeit kommen ausschließlich gravimetrisch basierte Staubmessverfahren zum Einsatz. Sie erfordern in der Regel einen höheren Aufwand als die indirekt arbeitenden optischen oder elektrisch basierten Verfahren, sind jedoch als direkte Verfahren weniger von den Eigenschaften der Partikel abhängig und besitzen somit eine genauere Aussagefähigkeit. Eine Übersicht gibt (Schäfer, 2016) und ebenfalls eine Einschätzung zu Messgenauigkeit und Abhängigkeiten der Verfahren.

Kontinuierlich arbeitende Verfahren besitzen den großen Vorteil den zeitlichen Verlauf der Emissionsbedingungen verfolgen zu können. Aufgrund ihrer höheren Unsicherheit sind sie jedoch nur mit Einschränkungen zu übertragen.

4.3.2.2 Gesamtstaub

Der wichtigste der partikelbezogene Emissionsparameter ist die Gesamtstaubkonzentration, also die Gesamtmasse des partikelförmigen Anteils im Abgas. Dies wird als Staubgehalt, Gesamtstaubgehalt, Staubbelastung, Gesamtstaubbelastung, Gesamtstaubkonzentration oder als Partikelkonzentration bezeichnet und beschreibt die gesamte erfassbare Partikelmasse pro Kubikmeter Abgas im Normzustand.

Als zentrale Messgröße für die Partikelemissionen wird die Gesamtstaubkonzentration als Hauptmessgröße für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit verwendet. Dies

betrifft sowohl die Untersuchung des Emissionsverhaltens als auch die des Abscheideverhaltens.

Diese Messgröße beinhaltet die Information über die gesamte partikelförmige Emission einer Feuerungsanlage und aus diesem Grund wird sie immissionsschutzrechtlich begrenzt (1.BImSchV, 2010). Sie beinhaltet keine Information über andere Eigenschaften der Partikel wie Größe, Zusammensetzung oder Anzahl.

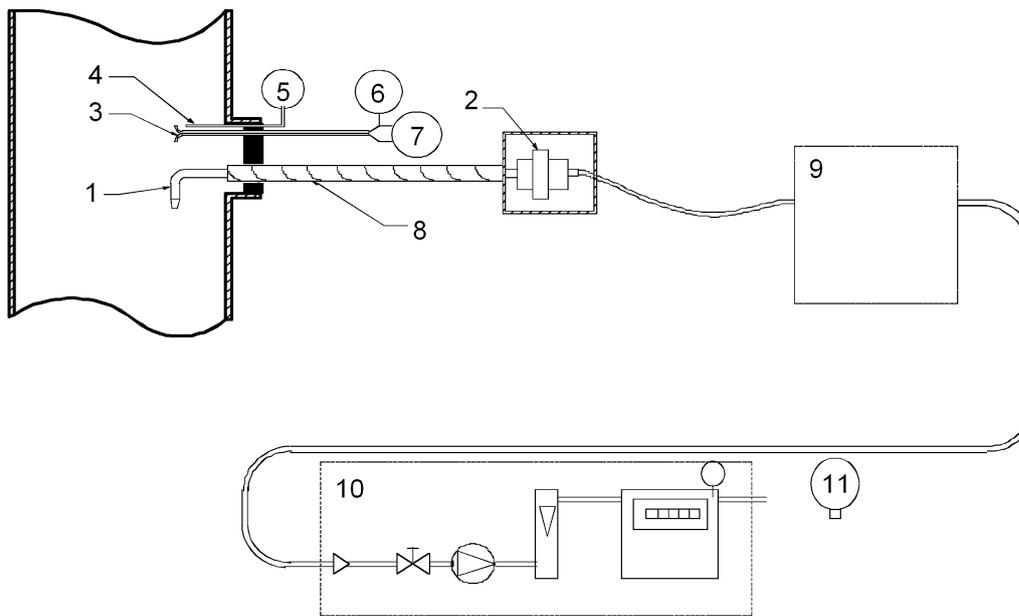
Als Standardreferenzmessverfahren gilt die Bestimmung der gravimetrischen Staubbelastung mit Planfilterkopfgerät, die durch die VDI 2066-1 (2006) beschrieben ist. Sie definiert Staub als „Partikel jeder Form, Struktur oder Dichte, die bei den lokalen Probenahmebedingungen in der Gasphase dispergiert sind und unter festgelegten Bedingungen bei repräsentativer Probenahme des zu untersuchenden Gases durch die Filtration gesammelt und nach dem Trocknen unter festgelegten Bedingungen bestimmt werden.“ „Staubgehalt oder Staubbelastung wird definiert als „Verhältnis von Staubmassenstrom zu Volumenstrom des Gases“, wobei wiederum der Staubmassenstrom definiert ist als „Quotient aus der durch einen Querschnitt strömenden Staubmasse und der Zeit“ (VDI 2066-1, 2006).

Ein Teilvolumenstrom des Abgases wird mittels einer Sonde aus dem Abgasrohr abgeleitet und dem Probenahmesystem zugeführt. In einem Filtergehäuse ist ein rundes flaches Filterelement eingesetzt. Das Gas durchströmt den Filter, der Staub bleibt auf dem Filter zurück. Danach wird das Gas durch eine Trocknungseinrichtung geleitet, in der die enthaltene Feuchtigkeit entfernt wird. Das trockene Abgasvolumen wird durch einen Gasmengenzähler erfasst. Durch Wägung des Filters vor und nach der Messung wird das Gewicht des abgeschiedenen Staubes bestimmt. Das Verhältnis von abgeschiedener Staubmasse und dem erfassten Gasvolumen ergibt als Summenmittelwert über die Probenahmedauer die gewünschte Messgröße der Gesamtstaubkonzentration.

Bei hohen Staubbelastungen oder langer Probenahmedauer können statt der Planfilter auch Hülsenfilter oder bei grobem Staub ein vorgeschalteter Zyklon eingesetzt werden.

Entscheidend ist für heiße Abgase, dass das Probenahmesystem bis hinter den Filter beheizt wird. Durch die enthaltene Feuchtigkeit würde sonst deren Kondensation das Messergebnis verfälschen oder die Messung unbrauchbar machen.

Sehr feiner Staub kann das Filter mit dem Gasstrom passieren und wird nicht erfasst. Die Trenngröße hängt vom Filtermaterial des Planfilters oder der Filterhülse ab. Im Bereich der Biomassekleinfeuerungen ist dies jedoch im Normalfall vernachlässigbar.



- 1 Entnahmesonde
- 2 Filtergehäuse
- 3 Staudrucksonde
- 4 Temperatursensor
- 5 Temperaturanzeige
- 6 Gerät zur Messung des statischen Drucks
- 7 Gerät zur Messung des dynamischen Drucks
- 8 Absaugrohr (Out-Stack-Filtergerät)
- 9 Abkühl- und Trocknungseinrichtung
- 10 Absaugaggregat und Gasmesseinrichtungen
- 11 Druckmessgerät

Abbildung 4.4: Standardreferenzmessverfahren zur Bestimmung der gravimetrischen Staubbelastung (Out-Stack-Filtration) nach VDI 2066 Blatt 1

Neben dem Standardreferenzmessverfahren sind zur Grenzwertüberwachung der Gesamtstaubemissionen Messverfahren für den Einsatz an Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe durch die (VDI 4206-2, 2015) geregelt. Sie werden auch als Geräte zur Schornsteinfegermessung bezeichnet. Verschiedene Verfahren sind vorhanden, die nach dieser Messvorschrift arbeiten. Die meisten davon sind kontinuierlich arbeitende Verfahren. Es sind sowohl direkt gravimetrische Verfahren als auch optische Verfahren dabei. Sie sind beschrieben in (Schäfer, 2016).

Großer Vorteil dieser vereinfachten Messverfahren besteht in der Möglichkeit, sie für eine kontinuierliche Online-Messung direkt im Abgas einsetzen zu können. Damit ist es möglich, sowohl eine direkte Aussage über den aktuellen Istwert als auch einen zeitlichen Verlauf zu erhalten. Vor allem im Hinblick auf Phasen mit kritischen

Emissionsbedingungen und für den Einsatz von Sekundärmaßnahmen können hiermit interessante Fragestellungen – zumindest qualitativ – untersucht werden.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit kommt ein solches Messverfahren zum Einsatz, in der Form eines SM500 der Firma Wöhler (Wöhler Technik GmbH, 2022).

4.3.2.3 Korngrößenverteilung

Die Partikel im Abgas liegen nicht alle in der gleichen Größe, sondern sehr inhomogen als polydisperses Partikelkollektiv vor. Mit dem Abgas werden sowohl Partikel unterschiedlicher Größe als auch unterschiedlicher Zusammensetzungen aus der Feuerung ausgetragen und im Abgasstrom mittransportiert. Je nach Brennstoff und Verbrennungsbedingungen können ganz unterschiedliche Partikelgrößen und Inhaltsstoffe vorliegen.

Eine Möglichkeit ihrer Charakterisierung besteht in der Klassierung des Partikelkollektivs durch gravimetrische Erfassung verschiedener Größenklassen. Die Trennung der verschiedenen Größenklassen – der Fraktionen – kann durch das Prinzip der Impaktion erfolgen. Werden mehrere Impaktionsstufen hintereinander gereiht, wird von Kaskadenimpaktoren gesprochen. Das zugehörige Messverfahren wird durch die (VDI 2066-5, 1994) beschrieben. Durch das Verfahren resultieren verschiedene Größenfraktionen für die Partikel, wobei die Trennung der Fraktionen aufgrund ihres aerodynamischen Durchmessers erfolgt.

Eine Impaktorstufe besteht aus je einer Düse und einer Prallplatte. Die Partikel werden im Gasstrom durch die Düse geleitet. Durch ihre Trägheit können sie der Gasströmung nicht folgen und werden auf der Platte abgeschieden. Kleinere bzw. leichtere Partikel werden nicht abgeschieden und folgen der Gasströmung in die nächste Stufe. Durch immer kleiner werdende Geometrien der Impaktorstufen werden immer kleinere Partikelfraktionen abgeschieden. Den Abschluss bildet ein Endfilter, der durchströmt wird und die verbliebenen Partikel zurückhält. Durch Wägung der Prallplatten beziehungsweise der aufbrachten Probenplättchen jeweils vor und nach der Probenahme kann die Masse des abgeschiedenen Staubes pro Stufe und die gesamte Staubmasse in Summe aller Stufen bestimmt werden. Hieraus lässt sich die Korngrößenverteilung ermitteln und darstellen. Die Zuordnung der Stufen nach Korngröße der Partikel hängt von Geometrie und Strömungsverhältnissen des Impaktors ab.

Bei der Abscheidung innerhalb der Stufen spielen sowohl die Dichte als auch die Form der Partikel eine Rolle und auch die Anhaftung der Partikel auf der Prallplatte. Das führt dazu, dass es in der Realität keine scharfe Trennung der verschiedenen Größenklassen gibt, sondern auch immer Partikel gleicher Größe in anderer Stufe abgeschieden werden können.

Als Bezug zu dieser Arbeit steht die Frage nach den Zusammenhängen zwischen den Partikelemissionen und ihrer Abscheidung. Eine der Fragestellungen beschäftigt sich damit, ob bestimmte größenspezifische Fraktionen bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden werden und welcher Einfluss zum Abscheideverhalten besteht. Aus diesem Grund werden bei den experimentellen Untersuchungen ausgewählte Messungen durch die Bestimmung der Korngrößenverteilung ergänzt.

4.3.2.1 Partikelanzahl

Neben der Partikelmasse wird immer wieder die Partikelanzahl als Messgröße genannt. Als Anzahlkonzentration wird in der Regel die Anzahl an Partikeln pro Kubikmeter Abgas angegeben. Wird dies in Korngrößenklassen aufgetrennt erfasst, kann eine Partikelanzahlverteilung errechnet werden.

Die Messung der Partikelanzahl ist hingegen zur Masse jedoch mit noch mehr Abhängigkeiten und Unsicherheiten von den Bedingungen bei der Messung und dem Messverfahren verbunden. Als essenzieller Unterschied lässt sich ebenfalls anmerken, dass es sich – anders als bei der Masse in einem System – bei der Anzahl nicht um eine physikalische Erhaltungsgröße handelt. Sie kann daher auch nicht bilanziert werden.

Anders als die gravimetrischen Verfahren zur direkten Ermittlung der Staubmasse arbeiten die meisten Zählverfahren auf einer optischen Erfassung der Partikel.

Am verbreitetsten sind Verfahren wie der Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), der Electrical Low Pressure Impactor ELPI oder auch Kondensationskernzähler (Condensed Particle Counter CPC). In der Regel werden die Partikel in einem ersten Schritt anhand ihres aerodynamischen Durchmessers klassiert und danach durch optische Verfahren gezählt. Bei den verschiedenen Schritten werden jeweils verschiedene Annahmen zu physikalischen oder chemischen Eigenschaften der Partikel getroffen, wie beispielsweise die Form der Partikel, ihre elektrischen Eigenschaften oder ihre Zusammensetzung. Weichen die Eigenschaften der Partikel von den getroffenen Annahmen ab, können die Klassierung oder Zählung mehr oder weniger verfälscht werden.

Bei der Bewertung und Interpretation von Ergebnissen zur Partikelanzahl ist daher Vorsicht geboten, da das Ergebnis stets mit einer großen Abhängigkeit von den genauen Bedingungen bei der Entstehung des Messwertes behaftet ist.

Für die Messung der Partikelanzahl existiert derzeit kein genormtes Messverfahren, wie dies bei der Gesamtmasse und anderen Größen vorhanden ist. Auch in den Prüfverfahren für Feuerungen oder für Staubabscheider ist die Partikelanzahl nicht als Messgröße enthalten. Sie wird allerdings immer wieder zur Untersuchung von speziellen Forschungsfragestellungen verwendet.

In der vorliegenden Arbeit wird die Partikelanzahl nicht als Messgröße verwendet, daher sei an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur verwiesen (in der Übersicht zum Beispiel (Lenz, et al., 2014)).

4.3.3 Charakterisierung von Partikelemissionsproben durch Laboranalysen

4.3.3.1 Inhaltsstoffe und Zusammensetzung von Partikeln

Unterschiedliche Brennstoffe und Verbrennungsbedingungen beeinflussen die Entstehung und den Aufbau von Partikeln und damit auch ihre chemische Zusammensetzung, ihre Größe und andere Eigenschaften. Für verschiedene Fragestellungen ist daher die Zusammensetzung der Partikel oder bestimmte enthaltene chemische Stoffe, Verbindungen oder Spezies von Bedeutung. Einerseits für Untersuchungen zu Bildungsmechanismen und Vorgängen während dem Verbrennungsprozess, andererseits für nachgelagerte Fragestellungen wie die Alterung oder auch Ausbreitung der Partikelemissionen genauso wie der Zusammenhang zwischen Partikelemissionen und möglicher toxischer Wirkungen für Mensch und Umwelt.

Im Fokus dieser Arbeit steht stets die Frage nach den Zusammenhängen zwischen den Partikelemissionen und ihrer Abscheidung. Eine der Fragestellungen beschäftigt sich damit, ob bestimmte stoffspezifische Fraktionen bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden werden und welcher Einfluss zum Abscheideverhalten besteht.

Um also die Partikelemissionen in ihren Eigenschaften zu charakterisieren, werden ausgewählte Partikelproben einer Laboranalyse zu bestimmten Inhaltsstoffen zugeführt. Nachfolgend werden die relevanten Parameter und Verfahren kurz beschrieben.

Tabelle 4.3: Übersicht über Analyseverfahren zur angewendeten Laboranalyse von Partikelproben aus Emissionsmessungen

Bezeichnung	Jahr	Titel	Status und Ersatzvermerk*, Anmerkungen
DIN 19539:2016-12	2016	Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC ₄₀₀ , ROC, TIC ₉₀₀)	Durchführung der Untersuchungen erfolgte mit Version DIN 19539 – E.
DIN 51729-11: 1998-11	1998	Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Brennstoffasche - Teil 11: Atomemissionsspektrometrische Bestimmung mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	Aktuell
DIN 51719:1997-07		Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes	Aktuell
DIN EN ISO 10304-1:2009-07	2009	Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:2009	Aktuell
DIN EN ISO 16993:2016-11	2016	Biogene Festbrennstoffe - Umwandlung von Analysenergebnissen einer Bezugsbasis in Ergebnisse mit anderer Bezugsbasis (ISO 16993:2016); Deutsche Fassung EN ISO	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 16993:2015-07.

* Angabe: Letzter Zugriff am: 18.10.2022

Grundsätzlich sind neben den hier verwendeten Analyseverfahren und Inhaltsstoffen auch vielfältige andere Fragestellungen möglich, zu denen auf die Literatur verwiesen wird. Aufgrund ihrer hohen Toxizität sind beispielweise polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe Gegenstand in anderen Untersuchungen (Lenz, 2010). Ebenso wie die Untersuchung von Levoglucosan als Leitkomponente für Partikel aus der Holzverbrennung und Black Carbon in Proben aus Partikelemissionen (Zheng, 2020). Im Sinne einer nachhaltigen Anwendung der Holzverbrennung sind auch Fragestellungen zur Verwendung von deren Aschen und die Untersuchung nach Nährstoffen und Schwermetallen als Düngemittel von Interesse (Bachmeier, et al., 2021).

4.3.3.1 Arten von Kohlenstoffverbindungen mittels Kohlenstoffanalyse

Im idealen Fall einer vollständigen Verbrennung und damit Oxidation des im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoffs geht der gesamte Kohlenstoff aus den Ligno-Zellulose-Verbindungen und sonstigen Stoffgruppen im Biomassebrennstoff in Form von Kohlendioxid in die Gasphase über und wird mit dem Abgasstrom gasförmig in die Umgebung abgeleitet.

In der Realität findet die Umwandlung des Kohlenstoffs zu Kohlendioxid jedoch nicht vollständig, sondern nur unvollständig statt. Es verbleiben Kohlenstoff-Verbindungen in unterschiedlicher Form entweder in den festen Rückständen in der Feuerung (Rostasche), werden als Partikel oder Aerosole (Flugasche, Feinstaub) oder als gasförmige Verbindungen im Abgas ausgetragen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage nach dem Einfluss verschiedener stoffspezifischen Fraktionen der Partikelemissionen. Bei unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen entstehen je nach Luftzufuhr bevorzugt Verbindungen aus den drei Gruppen Ruß, Teere und Salze. Um vor allem die Art der Kohlenstoffverbindungen für die Untersuchungen charakterisieren zu können, werden ausgewählte Partikelproben aus der Gesamtstaubmessung auf die verschiedenen Kohlenstoffanteile analysiert.

Dies kann mittels des Analyseverfahrens zur Kohlenstoffanalyse nach DIN EN 19539 geschehen.

Bei diesem Verfahren wird die Probe in einer oxidierenden Atmosphäre mit einem definierten Temperaturverlauf erhitzt. Der enthaltene Kohlenstoff wird ausgetrieben, nachfolgend oxidiert und als Kohlendioxid in der entweichenden Gasphase erfasst. Je nach Art der Kohlenstoffverbindung reagiert diese in den unterschiedlichen Temperaturbereichen. Die erfasste Menge an Kohlendioxid je Temperaturbereich ist ein Maß für den Anteil der Kohlenstoffart in der Probe. Die gesamte Summe des enthaltenen Kohlenstoffs wird als *TC (Total Carbon, Gehalt an Gesamt-Kohlenstoff)* bezeichnet. Das Temperaturprogramm für die Probenzone von *TOC (Total Organic Carbon, Organisch gebundener Kohlenstoff)* liegt im Bereich von 150°C – 400°C, das von *TEC (Total Elemental Carbon, Elementar gebundener Kohlenstoff)* von 400°C – 600°C und das von *TIC (Total Inorganic Carbon, Anorganisch gebundener Kohlenstoff)* von 600°C – 900°C (DIN 19539, 2016).

4.3.3.2 Hauptelemente und Mineralische Bestandteile mittels Ionen-Analyse

Als Maß für den Anteil der mineralischen Bestandteile der Partikelprobe können die Hauptelemente der veraschten Probe in Form von Oxiden der häufigsten mineralischen Elemente wie beispielsweise Kaliumoxid oder Natriumoxid ermittelt werden. Das Analyseverfahren wird durch die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Brennstoffasche geregelt (DIN 51729, 1998). Als weiteres Element wird der Chlorid-Gehalt als Anion mittels Ionenchromatografie bestimmt (DIN EN ISO 10304, 2009)

4.4 Standardisierte Prüfverfahren für Partikelabscheider

4.4.1 Prüfverfahren und Messvorschriften

Durch den stärkeren Fokus auf Emissionen aus Kleinfeuerungen und die Grenzwertverschärfung der 1.BImSchV ab dem Jahr 2015, ist ebenfalls die Anwendung der Emissionsminderung durch Sekundärmaßnahmen zur Rauchgasreinigung auch bei kleineren Feuerungsleistungen notwendig geworden. Dies führte dazu, dass für Abscheider kleiner Bauart entsprechende Zulassungsverfahren, Prüfverfahren und Messvorschriften erarbeitet werden mussten.

Entscheidend für die Prüfung und Zulassung von Abscheider ist deren Zuordnung. Wird ein Abscheider mit einer bestimmten Feuerung im Verbund als integriertes Gerät zugelassen, erfolgt dies im Rahmen der Prüfung der Feuerung.

Soll ein Abscheider hingegen als Nachrüstgerät für beliebige Feuerungsmodelle bauaufsichtlich zugelassen werden, geschieht dies durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt). Da anfangs, als die ersten Abscheider für Kleinfeuerungen auf den Markt kamen, keine entsprechende Mess- oder Prüfvorschrift vorhanden war, erfolgte dies durch das DIBt in einer Einzelfallprüfung noch ohne konkretes standardisiertes Vorgehen. Dies entwickelte sich erst mit wachsender Anzahl an Zulassungsprüfungen (siehe Kapitel 3.2.4).

Zeitgleich entstand der Bedarf nach Vorschriften zur messtechnischen Bewertung, die von der entsprechenden Arbeitsgruppe des DIN-Normenausschusses erarbeitet wurde. 2014 wurde der Entwurf einer DIN Norm zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen in Form eines Vorschlags für ein Prüfverfahren an Kleinfeuerungen veröffentlicht (DIN SPEC 33999, 2014). Der Entwurf befindet sich aktuell in der Überarbeitung.

Parallel zur DIN SPEC 33999 wurde an einer Vorschrift zur Definition zum Stand der Technik für nachgeschaltete Abscheider gearbeitet, die im Jahr 2016 veröffentlicht wurde (VDI 3670, 2016). Zur Zeit befindet sich eine Neufassung der Richtlinie in Bearbeitung.

Nachfolgend sollen die wichtigsten Aspekte zu den Vorschriften und Verfahren zusammengefasst beschrieben werden.

Als wichtiger Hinweis sei hier angemerkt, dass die experimentellen Untersuchungen in ähnlichem zeitlichem Rahmen zu den Veränderungen und der Entstehung der Messvorschriften stattfanden, so dass diese teils noch nicht veröffentlicht oder bekannt waren, als die eigenen Versuche durchgeführt wurden. Diese sind daher auch nur in Teilen bei der Versuchsplanung und der Durchführung der experimentellen Untersuchungen und der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt.

4.4.2 Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit (DIN SPEC 33999)

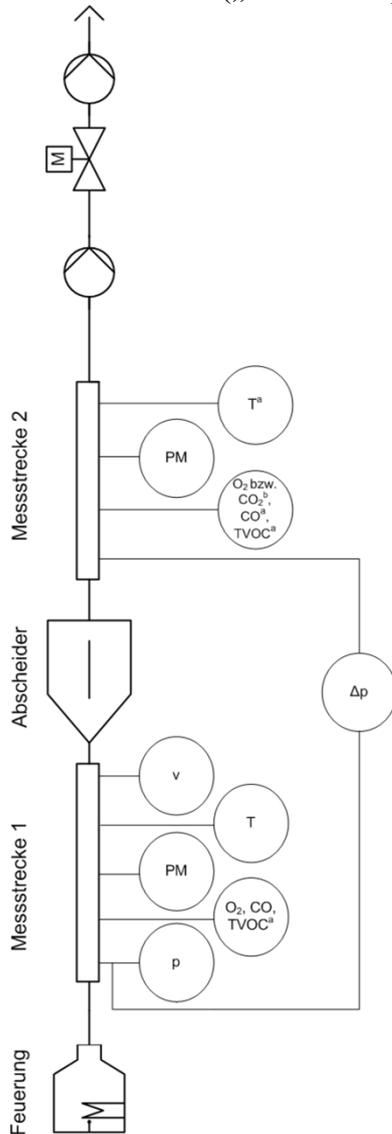
Motivation und Zweck der DIN SPEC 33999 für die Festlegung eines Prüfverfahrens für nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen ist, eine Messvorschrift als vergleichbare Basis für eine messtechnische Bewertung dieser Abscheider bereitzustellen. Sie richtet sich explizit an den Einsatz von Staubabscheidern für Kleinfeuerungen im Geltungsbereich der 1.BImSchV.

Dabei kommt sie ebenfalls zu folgender Einschätzung: „Da das Abscheidevermögen durch die Staubeigenschaften, die Staubkonzentration und den Abgasvolumenstrom beeinflusst wird und diese Parameter wiederum von der Art und dem Betrieb der Feuerung einerseits und vom Brennstoff andererseits abhängig sind, sind zur Vergleichbarkeit der Abscheideleistung verschiedener Staubabscheider einheitliche Prüfkriterien erforderlich.“ (DIN SPEC 33999, 2014)

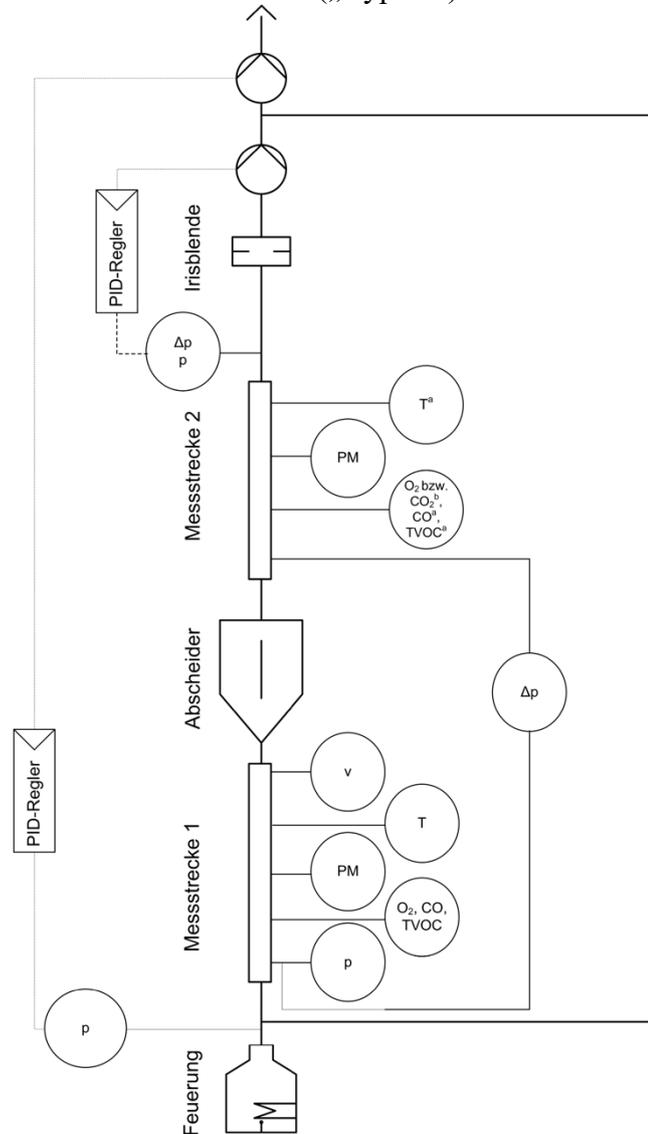
Dies ist deckungsgleich mit den eigenen Erfahrungen im Rahmen der Durchführung verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Fachbereich, und bestätigt ebenfalls noch einmal die Notwendigkeit für die Untersuchung von verschiedenen Mess- und Bewertungsgrößen und deren Einfluss auf die Abscheidung innerhalb der Sekundärmaßnahmen und deren Aussagefähigkeit und ebenso die Abhängigkeit der Abscheidung von den Abgasbedingungen und Emissionsparametern.

In der beschriebenen Prüfnorm DIN SPEC 33999 werden zwei verschiedene Prüfverfahren vorgeschlagen, die sich an den verschiedenen Feuerungsbauarten orientieren. Zur einfacheren Differenzierung werden die zwei Varianten hier in der Arbeit als „Vollstrom“ und „Bypass“ bezeichnet. Einmal sind Aufbau und Prüfbedingungen für Feuerungen mit diskontinuierlicher Beschickung wie Einzelraumfeuerungen und Naturzugkessel ohne Gebläse vorgeschlagen. Und als zweites ein Vorgehen mit Aufbau und Prüfbedingungen für kontinuierlich beschickte Feuerungen wie Hackschnitzel-, Pelletkessel und Pelletöfen. Die nachfolgende Abbildung 4.5 zeigt die in der DIN SPEC 33999 enthaltenen Beispiele für die entsprechende Umsetzung von einem Prüfaufbau mit den beiden Varianten Vollstrom (links, für manuell beschickte Feuerungen bzw. Einzelraumfeuerungen) und Teilstrom mit Bypass (rechts, für automatische Feuerungen).

Beispiel für den Prüfaufbau für
 Staubabscheider an handbeschickten
 Einzelraumfeuerungen ohne eigenes
 Gebläse („Vollstrom“)



Beispiel für den Prüfaufbau für
 Staubabscheider bei konstantem
 Volumenstrom oder konstantem Zug
 („Bypass“)



Legende

- | | | | |
|--------------|--|-----------------|---|
| PM | Staubmasse | CO | Kohlenstoffmonoxid |
| p | Druck gegenüber Umgebung | CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| Δp | Druckdifferenz über den Abscheider bzw. über die Irisblende | TVOC | Flüchtige Kohlenwasserstoffe
(en: Total Volatile Organic Carbon) |
| T | Temperatur | PID-Regler | en: proportional-integral-derivative
controller |
| v | Abgasgeschwindigkeit | | |
| ^a | Messgrößen, die nur bei katalytisch wirkenden Abscheidern zu messen sind. | | |
| ^b | Wenn der Sauerstoffgehalt bauartbedingt hinter dem Abscheider steigen kann (Verdünnung), dann muss der Sauerstoffgehalt auch hinter dem Abscheider gemessen werden, um die Messwerte auch hinter dem Abscheider auf den Bezugssauerstoffgehalt beziehen zu können. | | |

Abbildung 4.5: Beispiele für einen Prüfaufbau der (DIN SPEC 33999, 2014); links: Vorschlag Vollstrom-Variante bei Verwendung einer manuell beschickten Einzelraumfeuerung; rechts: Vorschlag Variante mit Bypass-Regelung bei automatisch beschickten Feuerungen mit Gebläse

Das Prüfverfahren folgt einer sehr speziellen Vorgehensweise, die zur besseren Veranschaulichung als eigens erstellte Übersicht in Abbildung 4.6 dargestellt ist. Zu sehen ist im oberen Teil der Abbildung eine allgemeine Beschreibung zu den verschiedenen Schritten und im unteren Teil ist der Bezug zu den zwei verschiedenen Varianten je nach Feuerungsbauart gegeben. In der Abfolge beginnt die Prüfung mit der Vorkonditionierung des Abscheiders mit Feuerungsabgasen, gefolgt von der Reinigung des Abscheiders. Danach erfolgt die Durchführung der Prüfversuche anhand der Bedingungen der Versuchsmatrix. Die so erhaltenen Messwerte werden wie sonst auch üblich auf einen Bezugssauerstoffgehalt und Normbedingungen umgerechnet. Es erfolgt die Berechnung des gemittelten Abscheidegrades aus den Staubkonzentrationen in Rohgas und Reingas, gemittelt über die verschiedenen Versuche und gegebenenfalls korrigiert um den Blindabscheidegrad. Anhand der Bewertungsmatrix erfolgen die Berechnungen zum Abscheidegrad, der zuletzt dann als signifikanter Abscheidegrad angegeben wird.

Für die Durchführung der Prüfversuche werden verschiedene Prüfkriterien in einer Versuchsmatrix vorgegeben. Die Einteilung der Versuchsbedingungen erfolgt je „Abgasstaubzustand“, der unterschiedliche Abgasbedingungen bzw. Emissionsbedingungen der verschiedenen Feuerungsbauarten und Verbrennungsbedingungen repräsentieren soll. In der Versuchsmatrix sind für verschiedene Prüfkriterien jeweils Bereiche oder Werte vorgegeben. Die wesentliche Größe ist hierbei die Staubkonzentration im Rohgas. Des Weiteren sind teilweise Vorgaben zum Kohlenmonoxidgehalt CO und zum Gehalt an organischen Kohlenwasserstoffverbindungen TVOC und zur Abgastemperatur angegeben. Für handbeschickte Feuerungen sind zwei verschiedene Abgasstaubzustände vorgegeben, „gut“ und „schlecht“. Für automatische Feuerungen sind insgesamt fünf Abgasstaubzustände angegeben, je nach Art des Abscheiders, Art der Feuerung und Art des Brennstoffes relevant. Die Einteilung und Zuordnung der Feuerungsbauarten zeigt Tabelle 4.4.



Abbildung 4.6: Übersicht zum speziellen Prüfverfahren nach DIN SPEC 33999: Vorgehensweise mit Einteilung in zwei Varianten an Prüfaufbau je nach Feuerungsbauart, Prüfbedingungen mit Versuchsmatrix, Auswertung und Art der Ergebnisse, Vorschlag mit Bewertungsmatrix (eigene Darstellung)

Tabelle 4.4: Feuerungsbauarten nach Einteilung der DIN SPEC 33999

Bezeichnung	Beschreibung
Feuerungsarten nach Kapitel 5 der DIN SPEC 33999 (Vorgehensweise „Vollstrom“)	
A1	Naturzugfeuerungen, diskontinuierlich beschickt gemäß Anlage 4 der 1. BImSchV (außer Pelletöfen); dies betrifft Raumheizer, Speichereinzelfeuerstätten, Kamineinsätze, Kachelofeneinsätze, Herde, Heizungsherde
A2	Durchbrandkessel, diskontinuierlich beschickt mit Naturzug
A3	Unterbrandkessel, diskontinuierlich beschickt mit Naturzug
Feuerungsarten nach Kapitel 6 der DIN SPEC 33999 (Vorgehensweise „Bypass“)	
B1	Feuerungen diskontinuierlich beschickt mit gebläseunterstützter Abgas- und/oder Verbrennungsluftführung und Abgastemperaturen von > 150 °C (z. B. Stückholzkessel)
B2	Feuerungen diskontinuierlich beschickt mit gebläseunterstützter Abgas- und/oder Verbrennungsluftführung und Abgastemperaturen von < 150 °C (z. B. Stückholzkessel) relevant für Schornsteinaufsätze
C1	Automatisch beschickte Feuerungen allgemein mit Abgastemperaturen von > 150 °C (z. B. Pelletkessel, Hackschnitzelkessel)
C2	Automatisch beschickte Feuerungen allgemein mit Abgastemperaturen von < 150 °C (z. B. Pelletkessel, Hack- schnitzelkessel) relevant für Schornsteinaufsätze
C3	Automatischbeschickte Feuerungen mit kondensierendem Abgas (z.B. Pelletkessel, Hackschnitzelkessel) relevant für Schornsteinaufsätze
C4	Pelletöfen
D	Automatisch beschickte Feuerung für Nicht-Holzbrennstoffe gemäß § 3 Absatz 1 Ziffer 8 und Ziffer 13 der 1. BImSchV (z. B. Stroh, Gräser, Maisspindel)

Den Versuchen nachfolgend findet die Auswertung und Umrechnung der Messwerte statt. Die gemessenen Werte wie Staubkonzentration und Gaszusammensetzung werden auf Bezugsbedingungen (13 Vol.-% Bezugssauerstoffgehalt) und Normbedingungen (273,15 K und 1 013 hPa und trockenes Abgas; feuchtes Abgas nur bei TVOC) umgerechnet.

Aus den einzelnen Staubkonzentrationen von Rohgas und Reingas wird der Abscheidegrad berechnet. Von dem Abscheidegrad der Messwerte „gemessener Abscheidegrad“ wird ein Blindabscheidegrad abgezogen, es ergibt sich der „korrigierte Abscheidegrad“. Der Blindabscheidegrad entsteht aus dem Abscheidegrad der reinen Rohrstrecke zwischen den Messstrecken 1 (Rohgas) und 2 (Reingas), soll also die Abscheidung von Partikeln innerhalb des Rohrstückes zwischen den Messpunkten ohne den eigentlichen Abscheider berücksichtigen.

Für den Sonderfall eines Abscheiders auf der Schornsteinmündung gibt es eine weitere Korrektur des Abscheidegrades um den Wert der Abscheidung in einer zusätzlich aufgebrauchten Messstrecke 2.

Anschließend werden aus den einzelnen Messwerten die arithmetischen Mittelwerte je Abgasstaubzustand gebildet. So werden die korrigierten gemittelten Messwerte und Abscheidegrade je Zustand erhalten und angegeben. Zusätzlich werden die statistischen Daten wie Anzahl der Messung, erweiterte Unsicherheit aus der Standardabweichung und dem Studentfaktor angegeben. Sie werden im Ergebnis eingerechnet, um eine hohe Unsicherheit bei wenigen Messungen oder eine hohe Streuung der Abscheidewerte mit

einem schlechteren Ergebniswert zum Abscheidegrad zu berücksichtigen. Als Ergebnis der Mittelung und Korrekturen wird der sogenannte „signifikante Abscheidegrad“ für jeden Abgasstaubzustand berechnet und angegeben.

Als Vorschlag für die Abschätzung des Verhaltens vom geprüften Abscheider bei anderen als den in der Prüfung verwendeten Feuerungsgeräten wird im Anhang C der DIN SPEC 33999 ein Bewertungsverfahren mit Bewertungsmatrix vorgeschlagen. Hier werden je Feuerung beziehungsweise je Brennstoff verschiedene Gewichtungsfaktoren angegeben. Mit diesen lässt sich der „bewertete Abscheidegrad“ aus den verschiedenen Abscheidegraden der unterschiedlichen Abgasstaubzustände berechnen. Je nachdem welche CO-Emissionswerte von der Feuerung zu erwartenden sind, bei der der Abscheider eingesetzt werden soll, sind verschiedene Gewichtungsfaktoren vorgeschlagen.

Als Aussicht zur DIN SPEC 33999 lässt sich anmerken, dass aktuell die Bearbeitung des Prüfverfahrens zur Veröffentlichung endgültig als Norm im Normungsverfahren durch die entsprechende Normenarbeitsgruppe erfolgt. In dieser überarbeiteten Fassung der DIN SPEC 33999 soll für die Staubabscheiderprüfung das in der DIN EN 16510-1 (2023) zur Prüfung von häuslichen Feuerstätten beschriebene Staubmessverfahren angewendet werden.

Wie eine Auswertung mit dem Schema nach DIN SPEC 33999 mit realen Messwerten aussieht, wird im Rahmen dieser Arbeit im Kapitel 7.1.5 angewendet und in 8.3.4 diskutiert.

4.4.3 Vorgaben aus der Zertifizierung „Blauer Engel“ für Staubabscheider

Sehr neu sind die Bestrebungen eine Zertifizierung für Abscheider zu erreichen. Durch die Erfüllung von Anforderungen, die über die Mindestvorgaben hinaus gehen, können Abscheider den „Blauen Engel“ als Qualitätsmerkmal erreichen (Blauer Engel, 2022).

Ziel dabei soll sein, den Feinstaub und den Flockenauswurf so weit wie möglich zu begrenzen (Tebert, et al., 2022).

4.5 Stand der Forschung zur experimentellen Untersuchung von Partikelabscheidern

Mit der Untersuchung von Elektroabscheidern an Holzfeuerungen allgemein und Biomassekleinfeuerungen im Speziellen haben sich schon mehrere Einrichtungen und Forschungsgruppen befasst. Die Anwendung der Abscheidetechnologie für Feuerungen kleiner Leistungsklasse und insbesondere für den Bereich der Kleinfeuerungen bringt verschiedene Fragestellungen mit sich. Eine direkte Übertragung der bisherigen Erkenntnisse aus dem Bereich der großindustriellen elektrostatischen Abscheider, wie sie oft in der Abgasreinigung von Kraftwerken wie Kohlekraftwerken eingesetzt werden, scheiterte an den speziellen Rahmen-, Feuerungs- und Abgasbedingungen der Kleinfeuerungen. Teils ergaben sich verschiedene technische Fragen aufgrund des besonderen Emissionsverhaltens dieser Feuerungen, genauso wie rechtliche, regulatorische und methodische Fragestellungen. Allgemein war zu wenig über die Zusammenhänge zwischen Feuerungsbetrieb und Abscheider bekannt, welche Parameter die Einflussgrößen darstellen und welche davon im realen Betrieb dominieren.

Mit unterschiedlichen Ansätzen hat sich die Literatur mit verschiedenen Fragestellungen und Schwerpunkten befasst, sowohl was die Methodik von Untersuchungen, die Durchführung von Praxismessungen, allgemeine Einflussgrößen, Fragen der Messtechnik und auch theoretische Betrachtungen zu Abgasparametern, Abscheiderkenngrößen, Auslegung, Konstruktion und Bauform, Gestaltung der Elektroden, und auch mit Strömungsverhältnissen angeht.

Nachfolgend soll der Kenntnisstand aus verschiedenen für diese Arbeit relevanten Projekten und Messberichten und seine wesentlichen Schlussfolgerungen zusammenfassend aufgeführt werden.

Tabelle 4.5: Übersicht über Untersuchungen und Forschungsprojekte mit
Elektroabscheidern an Kleinfeuerungen

Literatur	Gegenstand	Abscheider
Evaluation von Messverfahren zur Messung der Wirksamkeit von Partikelabscheidern bei kleinen Holzfeuerungen	(Griffin, et al., 2008) Untersuchungen an einem Röhrenelektroabscheider mit verschiedenen Messmethoden	Röhrenabscheider (Elektrostatischer Partikelabscheider Zumikron)
Berichte aus dem TFZ Nr. 23 Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel (2010)	(Hartmann, et al., 2010) Feldversuche und Prüfstandsversuche; mehrmonatiger Feldversuch in 10 Haushalten mit verschiedenen Feuerungsarten; Feuerungsprüfstand: KW Zumikron und APP Residential ESP an zwei unterschiedlichen Kaminöfen; Spanner SFF20 an Scheitholzessel	- KW Zumikron der Kutzner + Weber GmbH - APP Residential ESP von Applied Plasma Physics AS - Abscheider von TH-Alternativ-Energie - SFF20 und SFF50 der Firma Spanner Re2 GmbH
Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern	(Lauber, et al., 2010) Laborversuche: Untersuchungen an einem modifizierten Pelletkessel (15 kW)	Röhrenabscheider
Berichte aus dem TFZ Nr. 38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für	(Oehler, et al., 2015) Feld- und Prüfstandsmessungen; Automatisch beschickter Hackschnitzelkessel mit 100 kW (HDG Compact 100)	Modularer Röhrenabscheider (SFF der Firma Spanner Re ² GmbH)
IFK Projektbericht Überprüfung der Wirksamkeit von Staubabscheidern für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe (2015)	(Struschka, et al., 2015) Prüfstandsmessungen: Untersuchung zweier verschiedener Elektroabscheider an zwei unterschiedlichen Kaminöfen und bei unterschiedlichen Messintervallen	- Röhrenabscheider (Elektrostatischer Partikelabscheider Zumikron) - zweistufiger Abscheider (CCA Carola Clean Air GmbH)
Methodische Bewertung von Sekundärmaßnahmen für kleine Biomassefeuerungen	(Struschka, et al., 2017) Messbericht zu Prüfstandsmessungen an einem Kaminofen mit Abscheider bei unterschiedlicher Betriebsweise und Messintervallen	Röhrenabscheider (OekoTube der OekoSolve AG)
Feldmessungen: Monitoring des Praxisbetriebs von Elektroabscheidern (2021)	(Zotter, et al., 2021) Feldmessungen bei sieben verschiedenen Kleinfeuerungen je mit mündungsbasiertem Rohrabscheider	Röhrenabscheider (OekoTube der OekoSolve AG)

Tabelle 4.6: Zusammengefasste Ergebnisse der Untersuchung zur Wirksamkeit von Staubabscheidern (eigene Darstellung mit Daten aus Struschka et al (2015))

	Elektrofilter A (Röhrenelektrofilter Zumikron)			Elektrofilter B (CCA Carola-Abscheider)
	15 Min. Mix*	15 Min. HV**	30 Min.***	30 Min.***
Kaminofen 1 - gute Verbrennung				
Gesamtstaub in mg/m ³	124	68	84	72
Abscheidegrad in %	16	40	25	54
Kaminofen 1 - schlechte Verbrennung				
Gesamtstaub in mg/m ³	285	91	79	73
Abscheidegrad in %	40	50	31	70
Kaminofen 2 - gute Verbrennung				
Gesamtstaub in mg/m ³	-	-	127	105
Abscheidegrad in %	-	-	16	54
Kaminofen 2 - schlechte Verbrennung				
Gesamtstaub in mg/m ³	-	-	124	118
Abscheidegrad in %	-	-	8	63

*15 Minuten: Anbrand und Anfang Hauptverbrennung

**15 Minuten: innerhalb der Hauptverbrennung

***30 Minuten: Anbrand und Hauptverbrennung

Anm.: Startpunkt der Messung im Anbrand: 30 s nach Brennstoffauflage

Zusammenfassung der getroffenen Aussagen zu den Ergebnissen (Struschka, et al., 2015) zur Untersuchung der Wirksamkeit von Elektroabscheidern:

- Aussage zu Elektrofilter A:
 - Abhängigkeit generell: Abscheidegrad sowohl von der Verbrennungsqualität als auch von der eingesetzten Feuerung abhängig
 - bei Kaminofen 1: nimmt der Abscheidegrad nimmt zu wenn sich die Verbrennungsqualität verschlechtert, unabhängig von der Probenahmedauer oder der Verbrennungsphase.
 - Bei Kaminofen ist es nicht so, und hier generell Abscheidegrad schlechter als bei Kaminofen 1.
- Aussage zu Elektrofilter B:
 - Abhängigkeit generell: Abscheidegrad nur wenig von der Verbrennungsqualität und nicht von der eingesetzten Feuerung abhängig
 - Bei beiden Kaminöfen: Abscheidegrad nimmt zu bei schlechterer Verbrennungsqualität

In der Untersuchung von Griffin et al. (2008) wird als Messgrößen die Messung der Anzahlkonzentration und Messung der Masse, aber begrenzt auf kleine Partikel durchgeführt. Als Messtechnik wird das massebasierten Onlinemessverfahren (Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM)) und anzahlbasiert (Diffusion Size Classifier

(DiSC)) verwendet. Die zusammenfassende Aussage ist wie folgt: „Partikel aller Größen werden durch den Abscheider gleich beeinflusst; sowohl die Masse als auch die Partikelanzahl werden um über 70% reduziert.“

Mit den Partikelarten und ihrer Abscheidung befasst sich Lauber (2010). Es werden Versuche an einem Pelletkessel mit Röhrenabscheider durchgeführt. Es erfolgt eine Einteilung der Partikeltypen nach Ruß, Salze und Teeren. Es erfolgen Messungen mit unterschiedlichen Lambda Bereichen, die Messung der Gaszusammensetzung, chemische Analysen der Kohlenstoffanteile und des Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnisses, spezifischer Staubwiderstand, Gesamstaub und Partikel-Anzahl mittels SMPS/CPC. Ebenso wie die Auswertung der Strom-Spannungs-Charakteristik und Staubschichtaufbau am Elektroabscheider.

Zotter et al (2021) führt Feldmessungen bei sieben verschiedenen Kleinfeuerungen je mit mündungsbasiertem Rohrabscheider durch und kommt zu den Schlussfolgerungen:

- Elektroabscheider funktionieren zuverlässig, wenn sie sachgerecht eingesetzt werden und wenn die Steuerung den Feuerungsbetrieb richtig detektiert.
- Feinstaubemissionen der Pelletfeuerungen mit ausgeschaltetem Elektroabscheider sind in derselben Größenordnung wie jene von Stückholzfeuerungen mit aktivem Elektroabscheider.
- Es wurden Feinstaub-Abscheidegrade zwischen 55 % und 90 % erreicht.
- Der Einsatz der Elektroabscheider kann insbesondere bei unvollständiger Verbrennung aufgrund von Agglomeration von Russ zu erhöhten Emissionen an Grobstaub führen.

4.6 Herausforderungen bei der experimentellen Untersuchung von Partikelabscheidern

4.6.1 Messtechnische Herausforderungen

Im vorliegenden Abschnitt sollen verschiedene Einflussfaktoren und Effekte betrachtet werden, die bei der Durchführung von Emissionsmessungen und der messtechnischen Bewertung von Abscheidern eine Rolle spielen können. Dies betrifft vor allem die Probenahme und das Messverfahren zur Erfassung von Partikeleigenschaften wie die Staubmassenkonzentration und Korngrößenverteilung, und dies insbesondere im Zusammenhang mit elektrostatisch arbeitenden Abscheidern. In der Diskussion der Arbeit (Kapitel 8) nach Abschluss der experimentellen Untersuchungen wird betrachtet, inwieweit die beschriebenen Effekte auftraten und welcher Einfluss ihnen zugeordnet werden kann.

4.6.2 Temperaturabhängigkeit des festen Partikelzustandes

Durch ein stetiges Absinken der Temperatur des Abgases entlang der Wegstrecke durch das Abgasrohrsystem, kommt es zu Änderungen des Aggregatzustandes von gasgetragenen Verbindungen. Flüssige oder gasförmige Verbindungen können in den festen Zustand übergehen und so ein Anwachsen der Menge an festen Partikeln verursachen. Dies betrifft vor allem die organischen Kohlenwasserstoffverbindungen, die abhängig von der

Temperatur zwischen einem noch flüssigen zu einem schon festen Zustand wechseln können. Aus diesem Grund sind oft Probenahmesysteme beheizt, um möglichst nah an der Abgastemperatur zu messen.

Da durch die doppelte Messstrecke bei der Untersuchung von Abscheidern für die Messung in Rohgas und Reingas und dem Abscheider selbst oft die Rohrstrecke mehrere Meter umfassen kann, ist der Effekt durchaus möglich. Um hier möglichst wenig Unsicherheit für die Messung zu verursachen, ist es ebenfalls angeraten, die Abgasrohrwege zu beheizen oder zumindest eine Wärmedämmung aufzubringen. Für mineralische Verbindungen und auch rußartige Verbindungen ist dieser Effekt im vorliegenden Temperaturbereich weniger relevant.

4.6.1 Partikelagglomerate

Im zeitlichen Verlauf entlang dem Abgasweg kollidieren Partikel und neigen dazu, sich zu Agglomeraten zu verbinden. Durch Trägheits- und Thermophorese-Effekte tendieren Partikel dazu, sich an sämtliche Oberfläche im Abgasrohrsystem und auch in Probenahmeeinrichtungen anzulagern. Durch die Eigenschaften von Metallbauteilen hinsichtlich ihrer elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sind diese besonders betroffen, aber nicht ausschließlich.

Verstärkt werden diese Vorgänge durch elektrostatische Ladungseffekte, die in kleinerem Umfang im Abgas von alleine stattfinden. In erheblichem Umfang kann dies durch elektrostatische Felder beim Einsatz von Elektroabscheidern verstärkt werden. Partikel, die den Elektroabscheider passieren, können Restladungen tragen. Die so geladenen Partikel schlagen sich bevorzugt an Bauteilen innerhalb des Abgasstroms wie Probenahmensonden nieder, da die Sonden in der Regel durch ihre Verbindung zum Abgasrohrsystem elektrisch geerdet sind und sich inmitten der Gasströmung befinden. Damit verschiebt sich der eigentlich im Raum des Abscheiders gewünschte Effekt der Wanderung von den geladenen Partikeln in Richtung der geerdeten Niederschlagsfläche auf den nachgelagerten Raum im Abgasweg. Vor allem bei einfachen Rohrabscheidern kann dies zu erheblichen Schwankungen und Unsicherheiten führen, da die meisten Modelle dieser Bauart über kein definiertes Ende der Abscheidefläche verfügen. Die Abscheidung ist also an keiner bestimmten Stelle abgeschlossen, sondern streckt sich meist über die gesamte nachgelagerten Abgasrohrteile des Schornsteins.

Ein ebenfalls bevorzugt bei Elektroabscheidern auftretender Vorgang ist der Wiedereintrag von bereits auf den Niederschlagsflächen oder der Rohrrinnenwand anhaftenden Partikel zurück in den Gasstrom. Dies wird oft auch als Ausflockungen oder Flockenbildung oder Agglomeration bezeichnet.

Vor allem Rußverbindungen sind hier besonders zu erwähnen. Durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit neigen sie dazu, die in Elektroabscheidern beaufschlagte elektrische Ladung schnell an der Niederschlagsselektrode abzugeben, und so nicht mehr durch elektrostatische Kräfte an die Oberfläche gebunden werden. Sie neigen zu einem verästelten Aufbau insbesondere beim Anhaften an metallischen Oberflächen, wodurch sich vergleichsweise leichte aber große Agglomerate bilden. In Kombination mit der dadurch resultierenden sehr geringen Dichte und der schnellen Ladungsabgabe, lösen sie sich auch schon bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten ab und folgen erneut dem Gasstrom ins Reingas. Diese Agglomerate lagern sich bevorzugt an Gegenständen im Abgassystem wie der Staubprobenahme an und können zu erheblichen Problemen bei der Erfassung und Probenahme zur Staubmessung

führen. Eine der Maßnahmen, um dies zumindest teilweise im Rahmen des Probenahmeverfahrens berücksichtigen kann, ist die Spülung der Staubsonde, also aller der eigentlichen Probenahme vorgelagerter Teile. Dies wird in einem der nachfolgenden Abschnitte thematisiert.

4.6.2 Isokinetik bei der Probenahme zur Staubmessung

Eine isokinetische Absaugung des Teilvolumenstroms aus dem Abgasstrom zur Erfassung bei der Staubmessung kann die repräsentative Probenahme beeinflussen. Bei einer Absaugung, bei der die Geschwindigkeit innerhalb der Staubentnahmesonde nicht der Geschwindigkeit des Abgasstroms entspricht, kann das abgesaugte Partikelkollektiv von dem im Abgasstrom abweichen – die Menge an erfasstem Staub könnte also über- oder unterbewertet werden und die Messung verfälschen. Der Effekt beruht auf der Trägheit vor allem größerer Partikel, da diese sich nicht schnell genug mit der Gasströmung mitbewegen, sondern durch ihre Trägheit der falschen Strömungslinie in oder außerhalb der Sonde folgen können.

Zur Frage des Einflusses der Isokinetik auf die Probenahme lässt sich hier die Einschätzung von (Schäfer, 2016) anführen, dass durch eine nicht-isokinetische Probenahme keine relevante Abweichung bei der gravimetrischen Messung der Staub-Konzentration zu erwarten ist. Dies liegt an den Abgasbedingungen von Kleinfeuerungsanlagen mit kleiner Partikelgröße und vergleichsweise niedrigen Abgasgeschwindigkeiten, was dort durch vielzählige Vergleichsmessungen untersucht und belegt wurde.

4.6.3 Erfassung von Staubablagerungen im Probenahmesystem der Staubmessung durch Spülung der Staubsonde

Vor allem beim Messverfahren zur Bestimmung der Gesamtstaubkonzentration mittels Planfilter spielt die Erfassung von Staubablagerungen im Probenahmesystem eine Rolle. Aufgrund der kleineren Abgasrohrdurchmesser bei Kleinfeuerungen wird die Out-Stack-Filtration verwendet, was zu einer nicht zu vernachlässigbaren Probenahmestrecke von der Düse bis zum Planfilter resultiert. Die Spülung der dem Filter vorgelagerter Teile, die nicht durch Wägung ermittelt werden, erfolgt mit einer Mischung aus entionisiertem Wasser und Aceton (VDI 2066-1, 2006). Die Staubablagerungen werden zusammen mit der Spüllösung aufgefangen, anschließend wird die Spüllösung verdampft und die aufgefangene Staubmasse durch Hin- und Rückwiegen des Spülbehälters gravimetrisch erfasst. Die so ermittelte Masse wird der Staubmasse auf dem Planfilter hinzuaddiert. An diesem Vorgehen orientiert sich ebenfalls das Prüfverfahren zur Wirksamkeit der Staubminderungseinrichtungen (DIN SPEC 33999, 2014).

Wie im vorliegenden Fall die praktische Umsetzung bei Staubmessungen mit dem Referenzmessverfahren und die Spülung aussieht, beschreibt (Schäfer, 2016).

4.7 Untersuchung von Emissionsverhalten und Abscheideverhalten

Der Zweck des Abscheidereinsatzes liegt in der sekundären Minderung der Schadstoffemissionen, die bei der Verbrennung innerhalb einer Biomassefeuerung entstehen und freigesetzt werden.

Für die Untersuchung dieser Minderung durch Partikelabscheider müssen neben dem reinen Abscheideverhalten innerhalb der Sekundärmaßnahmen auch die Bedingungen betrachtet werden, unter denen die Abscheidung der Partikel stattfindet. Einen wesentlichen Einfluss spielen daher auch die Abgasbedingungen, die dem Abscheider zugeführt werden, also dem Emissionsverhalten der vorgelagerten Feuerung. Feuerung und Abscheider sind über die Abgasbedingungen miteinander gekoppelt – sie können sich gegenseitig auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen. Für eine wirksame Abscheidung müssen Feuerung und Abscheider als Verbund gesehen werden, weshalb in dieser Arbeit beide Seiten gleichermaßen betrachtet werden.

Aus diesem Grund wird für die Untersuchungen mehr als nur der reine Abscheidegrad berücksichtigt. Um den Einfluss von Emissionsverhalten und Abscheiderbauform auf das Abscheideverhalten zu untersuchen, sollen daher verschiedene Emissionsparameter betrachtet werden. Und es soll der Frage nachgegangen werden, welche dieser Parameter aus dem Bündel an möglichen Messgrößen sich für die Bewertung des Abscheideverhaltens eignet und welche zusätzlichen Informationen zum Emissionsverhalten sinnvoll oder notwendig sind.

4.7.1 Untersuchung und Bewertung des Emissionsverhaltens von Feuerungen

Partikel in Feuerungsabgasen stammen aus unterschiedlichen Entstehungspfaden (siehe Kapitel 2.5), was ihre grundlegend unterschiedlichen Eigenschaften erklärt. Partikel aus der vollständigen Verbrennung stammen aus den mineralischen Anteilen im Brennstoff. Sie hängen primär von der Brennstoffart, Brennstoffzusammensetzung und dem Aschegehalt ab. Durch Brennraumgestaltung, Luftzufuhr und der Abgasführung kann ihr Anteil an der im Brennstoffbett verbleibenden Rückstände und der mit dem Abgas ausgetragene Staubgehalt verschoben werden. Partikel aus der unvollständigen Verbrennung hingegen werden primär durch die lokalen Verbrennungsbedingungen beeinflusst. Die Haupteinflüsse neben der Stückigkeit des Brennstoffes sind vor allem der verfügbare Sauerstoff und die Temperatur. Bei guten Verbrennungsbedingungen im Optimum der Luftzufuhr wird der Brennstoff nahezu vollständig oxidiert und die Produkte unvollständiger Verbrennung sind minimal. Die emittierten Partikel bestehen überwiegend aus weißen Salzen aus den mineralischen Aschebestandteilen des Brennstoffes.

Wird die Verbrennungsqualität schlechter durch reduzierte Luftzufuhr bis hin zum Luftmangel bei hohen Temperaturen, bilden sich schwarze Rußverbindungen mit einem hohen Kohlenstoffanteil. Die Gesamtmenge an Partikelemissionen steigt stark an. Bei hoher Luftzufuhr hingegen wird die Qualität der Verbrennung im Luftüberschuss ebenfalls schlechter, es entstehen bräunliche Teerverbindungen aus Kohlenwasserstoffen. Die Gesamtmenge an Partikelemissionen steigt an, allerdings träger und weniger ausgeprägt als im Luftmangel.

Um das Emissionsverhalten für die Untersuchungen abzubilden sind daher die beiden Aspekte zur Qualität der Verbrennung und zur Qualität des Brennstoffes von Bedeutung für die Partikelemissionen.

Die Qualität der Verbrennung wird oft über das CO-Lambda-Diagramm dargestellt. Analog können auch die Partikelemissionen über Lambda dargestellt werden. Sie weisen einen ähnlichen Kurvenverlauf auf. Je nach Bedingungen zur Luftzufuhr können die drei Bereiche Luftmangel, Lufoptimum und Luftüberschuss eingeteilt werden.

Die Qualität des Brennstoffes kann einerseits über die Stückigkeit des Brennstoffes und andererseits über die Brennstoffzusammensetzung, vor allem über den Aschegehalt, eingeteilt werden. Standardisierte Holzpellets aus naturbelassenem Holz stellen die höchste Qualität dar. Je größer die Stückigkeit wird oder je mehr Anteile aschereicher Fraktionen wie Rinde, Astmaterial oder auch halmgutartige Brennstoffe enthalten sind, umso schlechter wird die Qualität und umso höher sind die Emissionen.

Charakterisiert werden können die Partikelemissionen und damit auch das partikelbezogene Emissionsverhalten über die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Messgrößen im Abgas zu Gesamtstaubkonzentration, Partikelgrößenverteilung und der Partikelart. Bei letzterem können Aussagen über die Art der Kohlenstoffverbindungen, den Mineralgehalt oder das molare C/H-Verhältnis getroffen werden.

4.7.2 Untersuchung und Bewertung des Abscheideverhaltens von Partikelabscheidern

Unter dem Abscheideverhalten wird hier der gesamte Prozess der Partikelabscheidung verstanden. Dies schließt verschiedene Parameter zu dessen Bewertung ein, die nachfolgend erläutert werden.

Ausgehend von den einzelnen Messgrößen im Abgas und am Abscheider können zur weitergehenden Bewertung verschiedene Kenngrößen ermittelt werden. Als wichtigstes für Partikelabscheider ist der Abscheidegrad zu nennen (siehe Gleichung (2)). Er berechnet sich aus der jeweiligen massebezogenen Gesamtstaubkonzentration im Rohgas und im Reingas und ist stets auf den Rohgaswert bezogen. Er enthält keine Information über die absolute Höhe der Staubkonzentration, weder über das Niveau der Emissionen im Rohgas noch über die Höhe vom Reingasstaubgehalt. Und er enthält auch keine Information über die abgeschiedene Staubmenge, spiegelt also nicht die Bedingungen im Abgas wider, unter denen den Wert entstanden ist. Für die hohe Bandbreite an Emissionsbedingungen bei Kleinfeuerungen ist dies allerdings durchaus sehr entscheidend für die Bewertung eines Abscheiders.

Ein hoher Abscheidegrad bei einfachen Emissionsbedingungen ist leicht zu erreichen. Dies leistet jedoch keinen wesentlichen Beitrag zur gesamten Emissionsminderung, da vor allem die schwierigen Emissionsbedingungen klima- und umweltschädliche Wirkungen haben und vor allem diese gemindert werden sollten. Es ist daher entscheidender für eine gute Wirkung für die Emissionsminderung, vor allem eine stabile Abscheidung über einen möglichst großen Emissionsbereich zu erreichen.

Es gibt also einige verschiedene Einzelgrößen als Messgrößen, aber in der isolierten Betrachtung liefern sie nicht genug Information. Ihre Aussagefähigkeit ist nur eingeschränkt und selten vergleichbar oder übertragbar auf andere Situationen. Daher soll das Abscheideverhalten anhand mehrerer Größen bewertet werden, die hier zu untersuchen und zu identifizieren sind. Als Fazit nach den Untersuchungen soll die Frage beantwortet werden können, welche Messgrößen für sich genommen oder in der Kombination eine bessere Aussagefähigkeit haben. Dabei soll stets der Messaufwand im Verhältnis zur Aussagefähigkeit der Bewertungsgrößen berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen daher andere Parameter untersucht werden, die diese Information bereitstellen und ergänzend zum Abscheidegrad angegeben werden können,

um die Aussagefähigkeit und Übertragbarkeit verbessern zu können. Um geeignete Bewertungsgrößen für Partikelabscheider und ihr Abscheideverhalten zu untersuchen, sollen verschiedene Möglichkeiten in den experimentellen Untersuchungen betrachtet werden. Es sollen der Abscheidegrad und der Fraktionsabscheidegrad ebenso betrachtet werden wie die absolute Emissionsminderung. Ebenso soll die Stabilität der Abscheidung verschiedener Partikelfraktionen untersucht werden.

4.8 Versuchsplanung für die eigenen Untersuchungen

Aus den Beschreibungen des vorherigen Abschnittes sollen hier konkrete Fragestellungen formuliert werden, die mittels der experimentellen Untersuchungen betrachtet und schließlich beantwortet werden sollen.

Gegenstand ist der Einfluss des Emissionsverhaltens auf das Abscheideverhalten in Verbindung mit dem Zusammenhang zur Abscheiderbauform und worin liegen die Ursachen für die verminderte Abscheidung bei schwierigen Emissionsbedingungen bei der Anwendung von Partikelabscheidern kleiner Bauart bei Biomassekleinfeuerungen.

Gründe für die Veränderung von partikelbezogenen Emissionsparameter im Abgas liegen in der Feuerung, wie in Kapitel 2 beschrieben.

Hiervon ausgehend werden die Brennstoffart, die Verbrennungsbedingungen und der Feuerungsbetrieb als wesentliche Einflussgrößen ausgewählt und sollen daher für die Versuche als Stellgrößen ausgewählt werden.

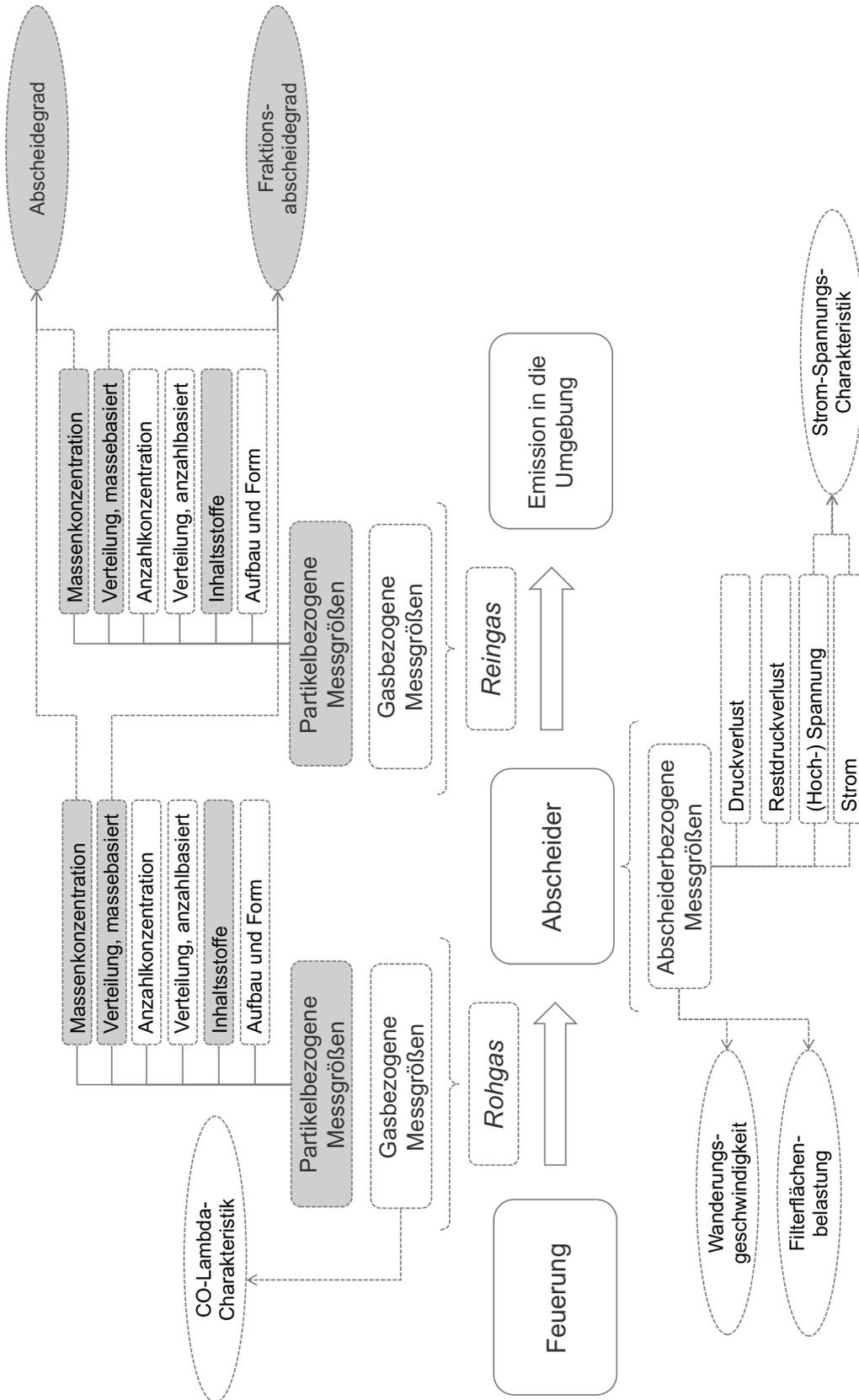


Abbildung 4.7: Übersicht zu Messgrößen und Kenngrößen für die experimentelle Untersuchung von Abscheidern an Feuerungen

In Hinsicht auf die Untersuchung des Abscheideverhaltens sollen Elektroabscheider untersucht werden, da sie vor allem im kleinen Feuerungsleistungsbereich zunehmend eingesetzt werden. Hier sollen vor allem der Einfluss verschiedener Emissionsparameter auf die Abscheidung untersucht werden, die bei verschiedenen Feuerungen über die Stellschrauben Brennstoffart, Verbrennungsbedingungen und Feuerungsbetrieb generiert werden. Aufgrund des essenziell anderen Emissionsverhaltens von manuell und automatisch beschickten Feuerungen, werden die Untersuchungen anhand der Beschickungsart der verwendeten Feuerungen aufgeteilt (siehe Kapitel 6 und 7).

Tabelle 4.7: Versuchsübersicht über die eigenen experimentellen Untersuchungen

Fokus der Untersuchung	Varianten	Messgrößen	Feuerung	Abscheider
Einfluss der Verbrennungsqualität	Luftmangel	Gesamtstaub	Pelletofen	Zweistufiger kompakter
	Luftoptimum	Partikelzusammensetzung		Elektroabscheider-
	Luftüberschuss			Prototyp
Einfluss der Brennstoffart	Holz hackschnitzel	Gesamtstaub	Hackgut- kessel	Zweistufiger kompakter
	Holz pellets	Korngrößenverteilung		Elektroabscheider-
	Pelletmischung	Partikelzusammensetzung		Prototyp
	(80% Holz+20% Heu)			
Einfluss der Betriebsweise	Normalbetrieb	Gesamtstaub	Kaminofen	mündungsbasierter
	Teillast			Röhrenabscheider
	Luftmangel			(OekoTube, OekoSolve AG)
Einfluss der Verbrennungsphase	Anbrand	Gesamtstaub	Kaminofen	Zweistufiger Abscheider
	Hauptverbrennung			(Prototyp CCA Carola
	Ausbrand			Clean Air GmbH)

5 Voruntersuchungen zu ausgewählten Aspekten und Einflussfaktoren im Anwendungsbereich

5.1 Parameteranalysen zu Einflussfaktoren auf den theoretischen Abscheidegrad bei Elektroabscheidern auf Basis der Deutsch-Gleichung

5.1.1 Zum Einfluss von Design-Parametern auf den theoretischen Abscheidegrad bei klassischen Bauformen von Elektroabscheidern

Bei Elektroabscheidern stellt die Deutschgleichung (Gleichung (3)) über die theoretische Wanderungsgeschwindigkeit der Partikel einen Zusammenhang zwischen verschiedenen Parametern des Abscheiders und einem theoretisch erreichbaren Abscheidegrad her. Bei sämtlichen Umrechnungen und Darstellungen wird zwischen den klassischen Bauformen Röhrenfilter und Plattenfilter unterschieden. Dies soll auch hier als Ausgangspunkt angewendet werden.

Um verschiedene Zusammenhänge zu zeigen, soll hier als Vorbetrachtung zu den experimentellen Untersuchungen eine Parameteranalyse auf dieser Grundlage gegeben werden, die typische Bereiche beim Einsatz an Kleinfuerungsanlagen einbezieht und deren Parameter auf diesen Einsatzbereich adaptiert werden.

Tabelle 5.1: Gleichungen für die Berechnungen zur Parameteranalyse

Deutsch-Gleichung (Gleichung (3))	Für Plattenfilter (Gleichung (4))	Für Röhrenfilter (Gleichung (5))
$1 - \eta = e^{-w \left(\frac{A}{\dot{V}}\right)}$	$1 - \eta = e^{-w \frac{2L}{vb}}$	$1 - \eta = e^{-w \frac{2L}{vr_a}}$

Mit	η	theoretischer Abscheidegrad in %
	w	theoretischer Wanderungsgeschwindigkeit in m/s
	A	Niederschlagsfläche in m ²
	\dot{V}	Gasvolumenstrom in m ³ /s
	L	Länge der Niederschlagsfläche in m
	B	Gassenbreite in m
	r_a	Rohrradius in m

Es wird eine Parameteranalyse in Form einer Funktion von η als $f(w, v, L, b$ bzw. $r)$ durchgeführt. Der Zusammenhang von theoretischem Abscheidegrad η_{th} und der theoretischen Wanderungsgeschwindigkeit w_{th} bei verschiedenen Design-Parametern – im Sinne von Konstruktionsparametern eines Abscheiders – wird mittels der angegebenen Formeln berechnet. Die Darstellung der Kurvenscharen erfolgt über die Darstellung des Abscheidegrades als Funktion der Wanderungsgeschwindigkeit, jeweils mit Variation der Gasgeschwindigkeit v , der Gesamtlänge L , der Gassenbreite b (Plattenfilter) und des Rohrradius r (bei Röhrenfiltern). Das rechnerische Ergebnis ist in Abbildung 5.1 zu sehen. Die Gasgeschwindigkeit wird in dieser Betrachtung ebenfalls als Parameter der Auslegung und des Konstruktionsentwurfs gesehen, da der Gasvolumenstrom je Einzelement, wie

beispielweise eine Gasse oder ein Rohr, über die Anzahl der Elemente aufgeteilt und beeinflusst werden kann.

Im Rahmen der theoretischen Betrachtung kann der Abscheidegrad als idealisiert angesehen werden, da von einem optimalen Fall ausgegangen wird. In der Realität ist daher in der Regel der Abscheidegrad schlechter zu erwarten. Bei der Betrachtung wird angenommen, dass die sämtliche Niederschlagsfläche für die Abscheidung zur Verfügung steht, die Strömung gleichmäßig erfolgt und keine Neben- oder Störeffekte auftreten. Es lässt keine verlässliche Aussage über einen realen zu erwartenden Abscheidegrad zu, sondern soll lediglich die Zusammenhänge veranschaulichen. Werden reale Messdaten mit eingesetzt, können auch Rückschlüsse über einen realen Einsatz gezogen werden.

Der Bereich der Wanderungsgeschwindigkeit von 0,02 bis 0,2 m/s kann für den Einsatzbereich als realistisch eingeschätzt werden, daher ist dieser innerhalb der Diagramme gekennzeichnet (gestrichelte Linien). Für jede der beiden klassischen Abscheiderbauformen ist der Abscheidegrad über der Wanderungsgeschwindigkeit dargestellt. Je ein Parameter wird als Variation dargestellt, die beiden jeweils anderen Parameter werden konstant gehalten.

Über die Darstellung der Gesamtlänge wird für beide Bauformen der Zielkonflikt zwischen einerseits einer kompakten Baugröße und andererseits einer hohen Abscheidung ersichtlich. Insgesamt lässt sich zusammenfassen: für eine hohe Abscheidung sollte die Gasgeschwindigkeit möglichst gering, die Gesamtlänge möglichst hoch und die Gassenbreite bzw. der Rohradius möglichst klein sein. Durch die Betrachtung der Geschwindigkeit lässt sich zeigen, wie stark der Abscheidegrad sinken kann, wenn zeitliche oder örtliche Geschwindigkeitsspitzen auftreten. So würde bei Annahme einer gleichbleibenden Wanderungsgeschwindigkeit bei der Zunahme der Geschwindigkeit von 0,5 m/s auf 1,0 m/s der Abscheidegrad aufgrund dessen um 20%-Punkte sinken (siehe „Beispiel 1“). Sinkt die Wanderungsgeschwindigkeit zusätzlich, beispielsweise aufgrund schlechterer Partikelaufladung, verstärkt sich der Effekt zusätzlich und der Abscheidegrad würde zum Beispiel von 80% auf 40% sogar halbiert werden (siehe „Beispiel 2“).

Der Einfluss der Länge L zeigt für den Anwendungsbereich keine hohe Relevanz als Stellschraube aufgrund der in der Regel beengten Platzverhältnisse und dem Ziel einer gewissen Kompaktheit der Anlage. So führt bei Plattenfiltern eine Verdoppelung der Länge von 0,5 m auf 1,0 m bei der Annahme einer Wanderungsgeschwindigkeit von 0,05 m/s nur zu einer Verbesserung der Abscheidung von 60 % auf ca. 85 % bzw. eine weitere Verdoppelung auf 2,0 m nur noch um eine Steigerung um ca. 10 %-Punkte (siehe „Beispiel 3“). Bei Röhrenfiltern verhält sich dies grundsätzlich ähnlich.

Hier besteht jedoch die Besonderheit, dass das ohnehin in der Anlage vorhandene Abgasrohr mit seiner kreisförmigen Geometrie als zusätzliche gleichermaßen geformte Abscheidefläche mitwirken werden kann. Dies wird bei einigen Abscheidern auch in der Realität angewendet, das dem Abscheider vorgelagerte oder nachfolgende Abgasrohr wird direkt als Abscheidefläche mit dimensioniert. Schwierigkeit hierbei besteht allerdings dabei, dass dies nur unter bestimmten Voraussetzungen gut funktioniert, was zum Beispiel die Beschaffenheit und Oberfläche des Abgassystems angeht. Ebenfalls großes Streitthema bildet die Frage nach der Systemgrenze des Abscheiders, mit sowohl rechtlichen als auch messtechnischen Folgefragen. Rein für die Abscheidung betrachtet ist dies auf jeden Fall effektiv – kann das Abgasrohr als reine Abscheidefläche eingerechnet werden, erhöht dies

beispielsweise den Abscheidegrad von nur 25 % bei 0,5 m Länge auf 95 % bei 5,0 m (siehe „Beispiel 4“).

Eine wirksame Stellschraube zur Erhöhung der Abscheidung bildet die Gassenbreite bzw. der Rohrradius. Dies spielt eine Rolle für den modularen Aufbau von Abscheideflächen, wenn mehrere gleichartige Abscheideflächen parallel verwendet werden. So macht eine Gassenbreite von 0,2 m wenig Sinn – dies wäre mehr als der übliche Abgasrohrdurchmesser. Üblich sind daher die Verwendung von Plattenpackungen, also mehrere Plattengassen mit niedrigerer Gassenbreite, die parallel angeströmt werden. Das gleiche ist für Rohrbündel möglich. Die Aufteilung des Volumenstroms auf 4 Elemente (Gassen bzw. Rohre) hat eine dementsprechende Reduzierung der Gasgeschwindigkeit je Element zur Folge. Die Auswirkung auf die Abscheidung ist gut zu erkennen, sie wird deutlich erhöht (siehe „Beispiel 5“ und „Beispiel 6“). Eine Schwierigkeit bei der Verkleinerung der geometrischen Abmessungen bei der Verwendung von Bündeln oder Packungen ist die dadurch schwieriger werdende Abreinigung der Elemente, die ebenfalls entsprechend vervielfältigt und verkleinert werden muss und dadurch die Größe nach unten hin einschränkt ist. Ebenfalls ist dann der ansteigende Druckverlust des Abscheiders zu beachten.

Bauform "Plattenfilter" $\eta = 1 - e^{-w \frac{2L}{vb}}$

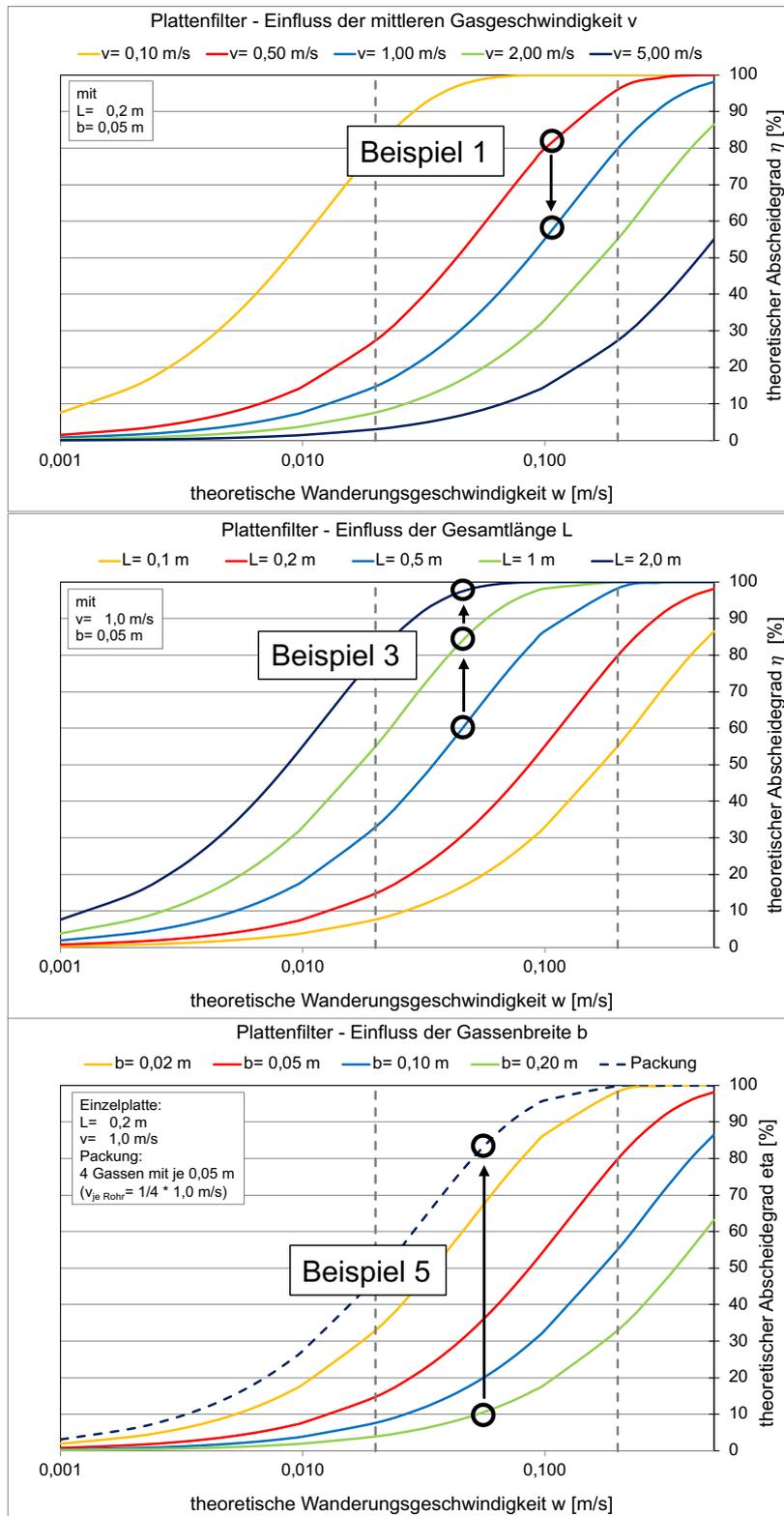


Abbildung 5.1: Darstellung des theoretischen Abscheidegrades η in Abhängigkeit der theoretischen Wanderungsgeschwindigkeit w für verschiedene Design-Parameter; Berechnungen auf Basis der Deutsch-Gleichung, adaptiert an einen Wertebereich für Elektroabscheider beim Einsatz an Kleinfeuerungsanlagen

Bauform "Röhrenfilter" $\eta = 1 - e^{-w \frac{2L}{vr_a}}$

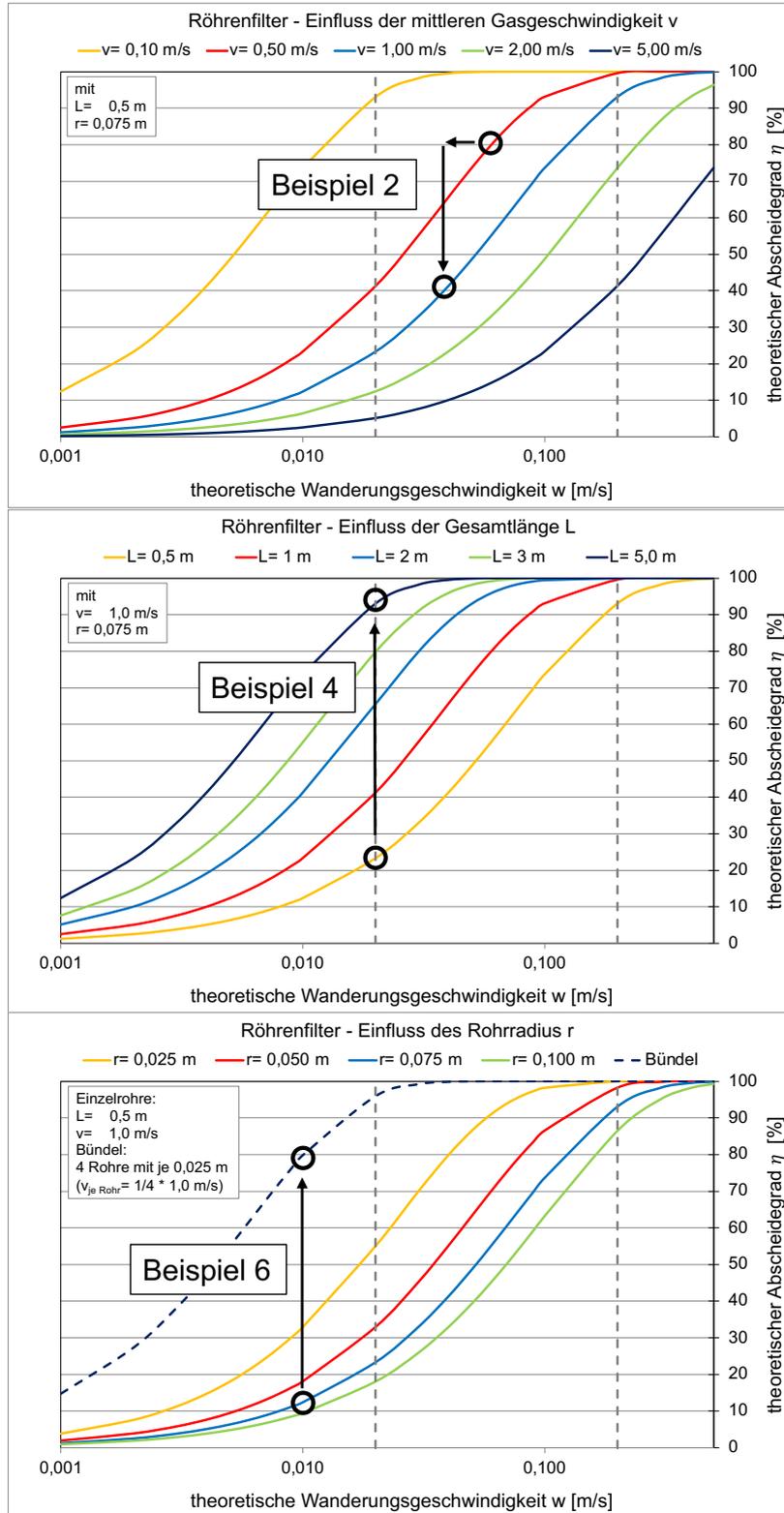


Abbildung 5.1 Fortsetzung: Darstellung des theoretischen Abscheidegrades η in Abhängigkeit der theoretischen Wanderungsgeschwindigkeit w für verschiedene Design-Parameter; Berechnungen auf Basis der Deutsch-Gleichung, adaptiert an einen Wertebereich für Elektroabscheider beim Einsatz an Kleinfeuerungsanlagen

Die im Rahmen der Arbeit betrachteten Abscheider und marktübliche Geräte lassen sich zum Teil dieser binären Einteilung zu Platten- und Röhrenfiltern zuordnen. Am gängigsten sind aufgrund des im Vergleich zu großtechnischen Anlagen niedrigen Gasvolumenstroms Röhrenfilter als Basis verwendet worden. Der hier verwendete zweitstufige Kompakt-Elektroabscheider-Prototyp ist je nach Generation den Plattenfiltern oder keinem der beiden Gruppen zuzuordnen (Glocker, et al., 2013). Dies führt dazu, dass nicht alle Abscheider unmittelbar vergleichbar sind mit der hier beschriebenen klassischen Herangehensweise. Andere Möglichkeiten oder Ansätze werden im weiteren Verlauf betrachtet und diskutiert.

Durch die Darstellung hier in diesem Abschnitt wird also der Zielkonflikt im Bereich der sekundären Emissionsminderung bei Kleinfeuerungen weiter verdeutlicht – die hohe Bandbreite und Dynamik des Emissionsverhaltens lässt sich durch eine entsprechend große Dimensionierung von zum Beispiel Elektroabscheidern zur Rauchgasreinigung technisch zwar lösen. Allerdings lassen die gegebenen Rahmenbedingungen im Bereich der häuslichen Feuerungen zur Wärmebereitstellung eine dafür notwendige aufwändige Anlagentechnik schlichtweg nicht zu. Aus diesem Grund entstanden für diesen Anwendungsbereich neue Arten und Generationen an Bauformen und Umsetzungen, die zwar ursprünglich auf großtechnischen bewährten Konzepten basieren, sich aufgrund dieses Konflikts jedoch in sehr unterschiedliche Richtungen und Kombinationen verändert haben. Dies macht auch deren technische Bewertung und Beurteilung schwieriger, da die klassischen Einordnungen zu Berechnungen, Auslegungen und auch messtechnische Bewertungen nicht eins zu eins übertragbar sind. Dies wird im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit und in der Diskussion weiter betrachtet.

5.1.2 Parameteranalyse über Einflussgrößen auf den theoretischen Abscheidegrad unabhängig von der Bauform der Abscheidefläche

Eine allgemeinere Darstellungsform der oben beschriebenen Deutsch-Gleichung (siehe Abschnitt 5.1) ist die Verwendung einer allgemeineren Form in Bezug auf die spezifische Abscheidefläche. Diese Darstellung gilt unabhängig von der Einteilung nach Plattenfiltern und Röhrenfiltern. Die spezifische Abscheidefläche, die auch als f-Wert bezeichnet wird, wird definiert als „das Verhältnis der senkrecht zum Gasstrom projizierten gesamten Abscheidefläche A zum Gasvolumenstrom \dot{V} “ (VDI 3678-1, 1998 S. 16).

f-Wert auf Basis der
Deutsch-Gleichung

$$f = \frac{A}{\dot{V}} = \frac{1}{w} \ln \frac{1}{1 - \eta} \quad (6)$$

Mit	f	spezifische Abscheidefläche in s/m
	η	theoretischer Abscheidegrad in %
	w	theoretischer Wanderungsgeschwindigkeit in m/s
	A	Niederschlagsfläche in m ²
	\dot{V}	Gasvolumenstrom in m ³ /s

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter zu verdeutlichen, wird in Abbildung 5.2 eine relative Änderung des f-Wertes beziehungsweise des Exponenten k durch eine Kurvenschar dargestellt.

Abscheidegrad η als
Funktion von w und f
bzw. k

$$\eta = 1 - e^{-wf} = 1 - e^{-k} \quad (7)$$

Mit	η	theoretischer Abscheidegrad in %	
	f	spezifische Abscheidefläche in s/m	
	w	theoretischer Wanderungsgeschwindigkeit in m/s	
	k	Exponent (dimensionslos)	$k = wf = w \frac{A}{\bar{v}}$

Der Exponent k befindet sich in linearer Abhängigkeit von w und f respektive der Fläche A , des reziproken Gasvolumenstroms \bar{V} und damit auch ebenso linear reziprok von der Gasgeschwindigkeit v .

Verringert sich nun beispielweise die Abscheidefläche auf 50% des ursprünglichen Wertes, kann sich der Abscheidegrad je nach Bereich der Wanderungsgeschwindigkeit von 80% auf 50% verringern (siehe „Beispiel 1“). Den gleichen Effekt hätte eine Verdoppelung der Gasgeschwindigkeit, da auch sie den Exponenten k auf 50% verringern würde.

Es lässt sich zusammenfassen: jeder dieser Parameter kann gleichermaßen den Exponenten linear erhöhen oder erniedrigen, unabhängig davon, um welchen der genannten Parameter es sich handelt. Der Abscheidegrad wiederum hängt über die e-Funktion, also nicht-linear, von den Parametern ab. Dies bedeutet im Umkehrschluss auch, dass alleine beispielweise durch eine Verdoppelung der Abscheidefläche keine Verdoppelung des Abscheidegrades erreichbar ist (siehe „Beispiel 2“).

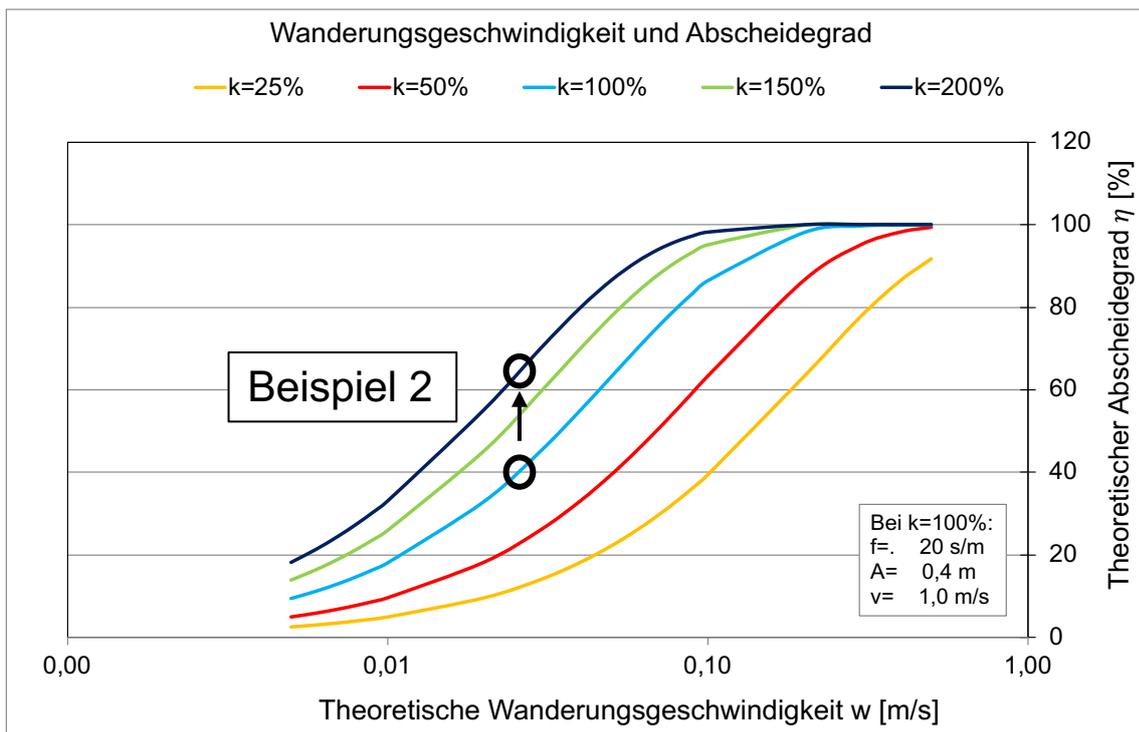
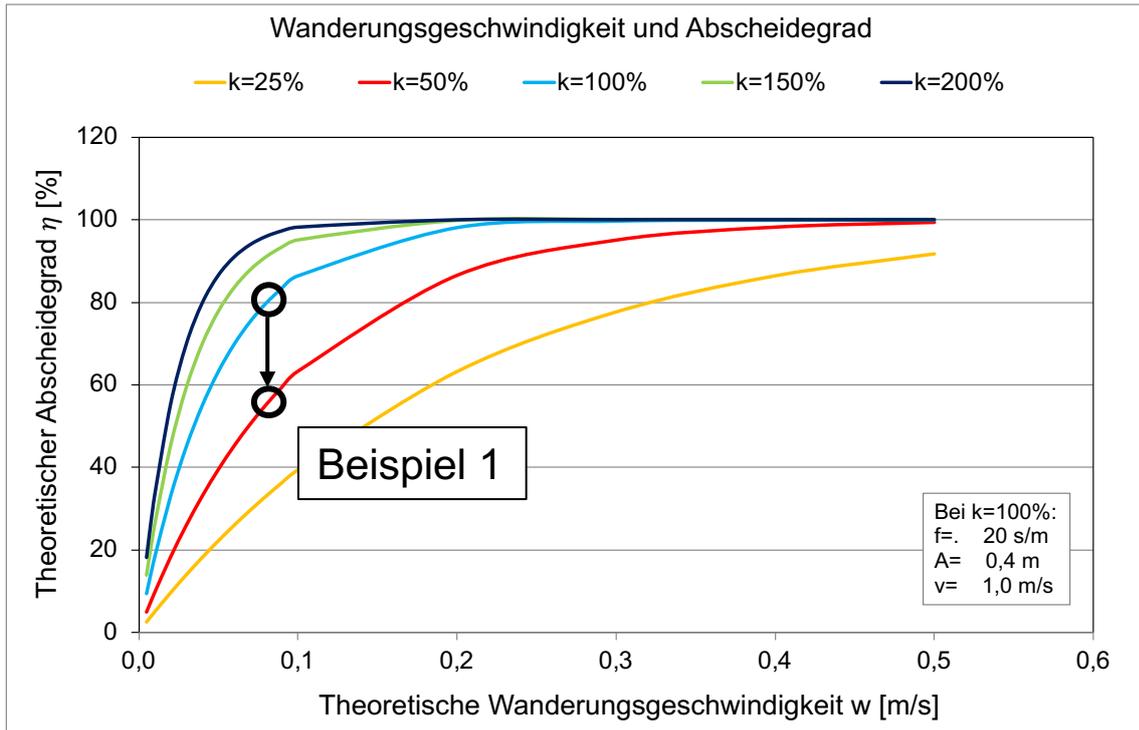


Abbildung 5.2: Theoretischer Abscheidegrad in Abhängigkeit der theoretischen Wanderungsgeschwindigkeit für verschiedene Exponenten k bzw. f -Werte (oben: w linear aufgetragen, unten: w logarithmisch aufgetragen)

Es lässt sich ebenfalls darstellen, dass bei größerer Oberfläche der Abscheidegrad weniger stark von der Wanderungsgeschwindigkeit w und auch der Gasgeschwindigkeit v abhängig ist.

5.1.3 Vergleichende Berechnungen zu verschiedenen Prototypen von Abscheideflächen

Zur Einschätzung von verschiedenen Arten von Abscheideflächen in einem Elektroabscheider-Prototypen, sollen diese auf Basis der theoretischen Berechnungen bezüglich ihrer Abscheidefläche verglichen werden. Bei den zu vergleichenden Varianten handelt es sich um zwei verschiedene Packungen an Platten, einmal locker gepackt mit 7 Platten ($A=0,56 \text{ m}^2$) und einmal kompakter mit 11 Platten ($A=0,75 \text{ m}^2$) im gleichen Volumen, außerdem um ein sehr lockeres Drahtgitter ($A=0,09 \text{ m}^2$) und um eine annähernd gassenförmig angeordnete Kettenpackung ($A=0,51 \text{ m}^2$) und zum Vergleich eine Rohrform ($A=0,09 \text{ m}^2$). Alle Varianten weisen vergleichbare Außenabmessungen und die gleiche Länge auf.

Aufgrund ihrer großen Fläche weisen die Varianten der Ketten- und Plattenpackungen grundsätzlich einen hohen theoretischen Abscheidegrad auf. Im betrachteten Geschwindigkeitsbereich fallen sie kaum ab, zeigen also ein vergleichsweise stabiles Verhalten gegenüber einer Änderung der Geschwindigkeit des einströmenden Gases.

Anders verhält es sich für die Varianten mit Rohr und Drahtgitter, die eine eher niedrige spezifische Abscheidefläche aufweisen. Bei sehr kleinen Geschwindigkeiten ist auch hier der theoretische Abscheidegrad hoch, jedoch fällt er stark mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Diese beiden Varianten verhalten sich im betrachteten Bereich demnach nicht stabil gegenüber einer Änderung der Gasgeschwindigkeit.

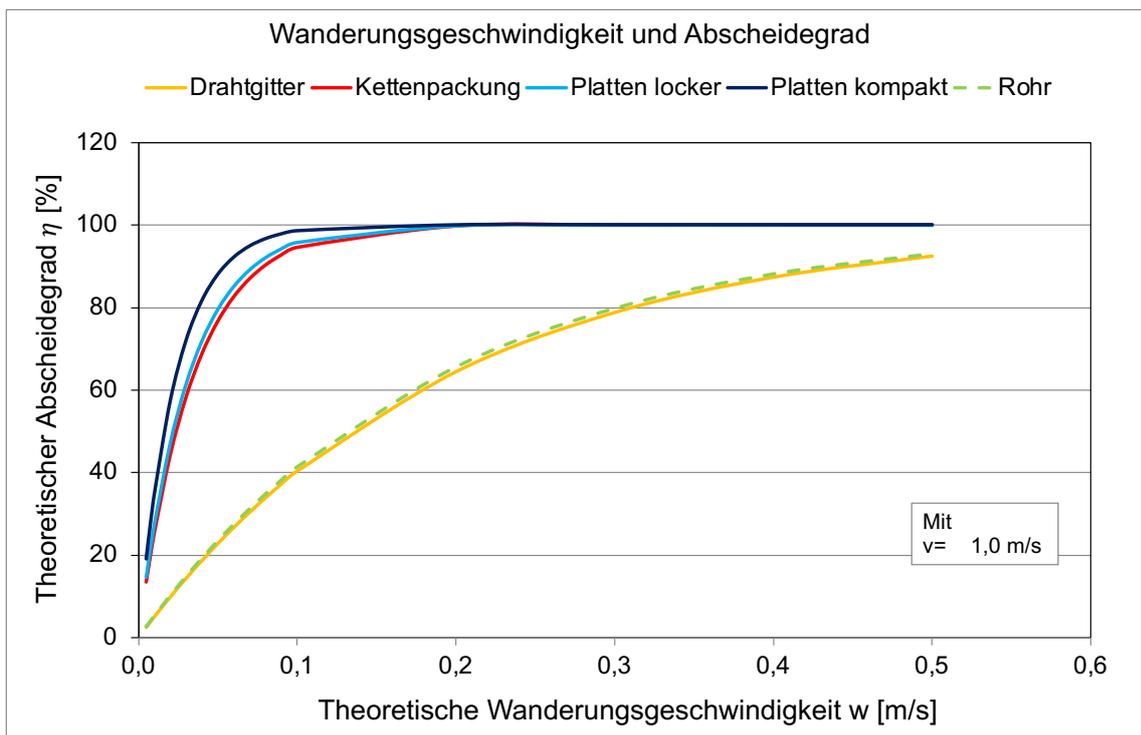
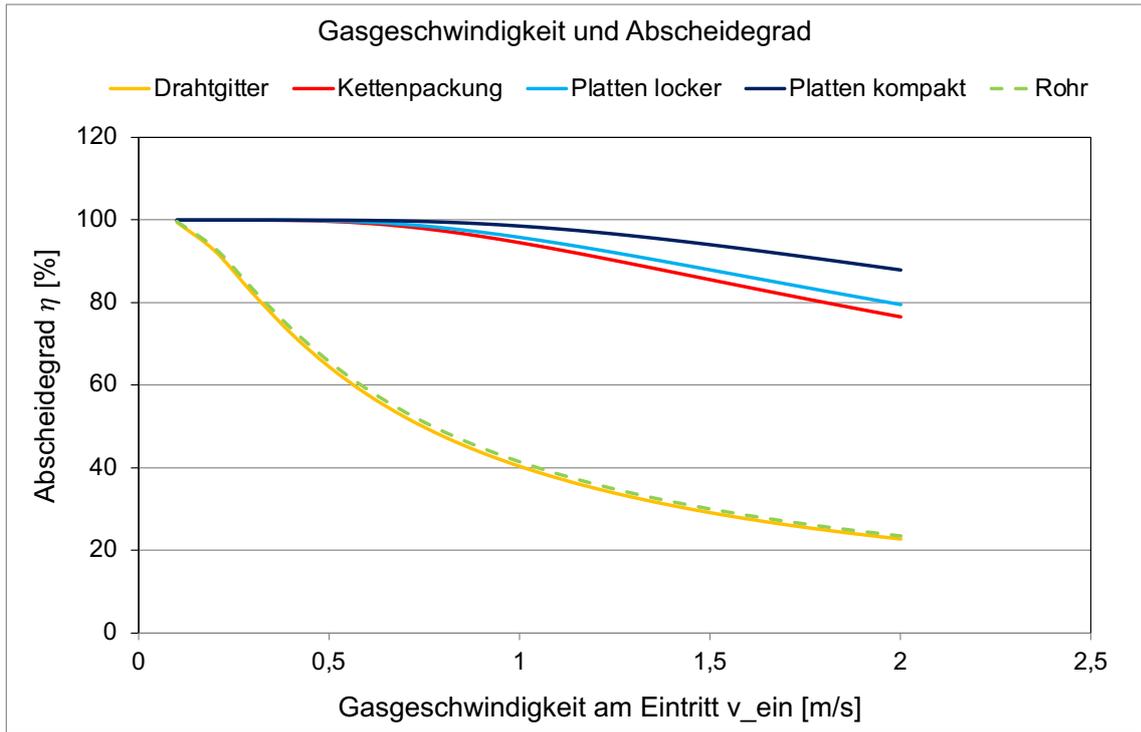


Abbildung 5.3: Vergleich von verschiedenen Varianten an Abscheideflächen über den theoretischen Abscheidegrad (oben: Zusammenhang zur Gasgeschwindigkeit, unten: Zusammenhang zur Wanderungsgeschwindigkeit)

5.2 Kurzstudie mittels numerischer Strömungsmodellierung zum Einfluss des Designs der Abscheidefläche auf deren Anströmung

Die Ausführungen im vorherigen Abschnitt zeigen die Relevanz einer guten Nutzung der zur Verfügung stehenden Abscheidefläche und die sonst folgernde Reduzierung des theoretischen – und folglich auch praktischen – Abscheidegrades.

Um dies zu veranschaulichen, erfolgt in diesem Abschnitt eine Kurzstudie anhand einer eigenen Strömungsmodellierung von verschiedenen Anordnungen von Abscheide-Platten innerhalb einer Plattenpackung und anderen Arten von Flächen. Es soll gezeigt werden, dass nicht nur die rechnerisch eingebrachte und zur Verfügung stehende Fläche allein entscheidend ist, sondern dass vor allem auch ihre Anströmung und damit effektive Nutzung eine wesentliche Rolle spielt.

Durchgeführt wird die Kurzstudie an einem digitalen Modell eines Elektroabscheider-Prototypen mit separater Ionisations- und Abscheidestufe (Glocker, et al., 2013). Untersucht werden verschiedene Abscheideflächen, sie sind in der jeweiligen Abbildung beschrieben. Es handelt sich dabei um eine Referenz ohne Abscheidefläche (Variante 0), verschiedenen Anordnungen von Abscheideplatten (andere Anzahl, Gassenbreiten und Positionen), verschiedene Anordnungen von kettenförmigen Elementen (gassenförmig, wabenförmig, dichter und lockerer), einem Drahtgitter (geringe Oberfläche, dafür leichtere Durchströmung und Druckverlust) und zwei Varianten an Kombinationen (Platten mit Kettenelementen). Beschreibungen und Details sind im Anhang zu finden (siehe Abbildung 10.7 und Tabelle 10.5).

Der verwendete Abscheiderprototyp weist die Eigenheit auf, die Gasströmung durch die besonders gestalteten Elektroden in Form einer Düsenplatte (mehrfache Spitze-Ring-Anordnung) auf bestimmte Bereiche zu konzentrieren. Dadurch entsteht eine über den Querschnitt inhomogene Strömungsverteilung, mit lokal sehr unterschiedlich Bereichen hoher und niedriger Geschwindigkeiten und teils Rückströmungen. Um zu zeigen, wie sich dies auf die Anströmung der Niederschlagsflächen auswirkt, wird die Strömung mittels numerischer Strömungsmodellierung berechnet und dargestellt. Hierdurch können die Vorgänge innerhalb der verschiedenen Bereiche besser verstanden und veranschaulicht werden und die unterschiedlichen Varianten können standardisierter miteinander verglichen werden, um sowohl Vorteile als auch Schwachpunkte herauszuarbeiten. Es kann eine Aussage darüber getroffen werden, welcher Anteil der gesamten Abscheidefläche effektiv angeströmt wird und als nutzbar gewertet werden kann, und welcher Anteil aufgrund einer schlechten oder inhomogenen Strömungsverteilung als Verlustfläche anzusehen ist.

Mit dieser Abschätzung können dann beispielsweise die Berechnungen aus dem vorangegangenen Abschnitt (Kapitel 5.1) relativiert und verglichen werden, so dass die Auswirkungen auf die zu erwartende Reduzierung des Abscheidegrades aufgrund inhomogener Strömung abgeschätzt werden können.

Bei der durchgeführten Modellierung wird die numerische Berechnung als Werkzeug im Vorfeld zur Konstruktion von verschiedenen Abscheideflächen zum Einsatz in einem Elektroabscheider-Prototypen verwendet. Modelliert wird ein halber Abscheider mit Symmetrieebene und den wesentlichen Bauteilen. Als Systemeinlass und -auslass wird jeweils ein kreisrundes Rohr abgebildet, das den Anschluss an das Abgasrohr nachbildet (Details siehe Abbildung 10.1 und (Glocker, et al., 2013)).

Die nachfolgende Abbildung 5.4 zeigt beispielhaft eine Möglichkeit, Ergebnisse aus der numerischen Berechnung zu veranschaulichen. Grundsätzlich sind vielfältige Auswertungs- und Darstellungsoptionen möglich. Hier sind die Varianten der verschiedenen Plattenanordnungen im Vergleich mit der Referenz als Schnittansicht mit Geschwindigkeitsverteilungen gezeigt. Zur Verdeutlichung ist jeweils die Strömungsrichtung in den seitlichen Bereichen mit roten Pfeilen ergänzt. Die Gasströmung erfolgt im Bild von unten nach oben. Andere Ansichten und Schnitte können ebenso wie andere Parameter, beispielsweise Strömungslinien, visuell dargestellt werden (siehe Abbildung 10.1). Genauso können Parameter wie Druckverlust oder andere Größen als Summe, Verteilung oder an bestimmten Koordinaten für eine weitergehende Auswertung errechnet werden (siehe Abbildung 5.6).

Durch die starke Konzentrierung der Strömung durch die Düsenplatte der Elektroden, ist im mittleren Bereich die Geschwindigkeit stark erhöht im Vergleich zu den äußeren Randbereichen. Die Verwendung einer Düsenplatte hat ihre Begründung in einer besseren Aufladung der Partikel in der Ionisationsstufe, verursacht jedoch für den Bereich der Abscheidestufe diese ungünstige Strömungskonzentration. Es stellt sich daher die Frage, welche der Varianten an Abscheideflächen hier eine gleichmäßige Verteilung des Gasvolumenstroms begünstigen, um möglichst viel der enthaltenen Abscheidefläche den geladenen Partikeln zur Anhaftung zur Verfügung zu stellen. Es wäre also von Vorteil, entlang des Abscheiders eine Aufweitung der Strömung aus der Mitte in Richtung der äußeren Bereiche zu erreichen, sowohl in der Höhe als auch in der Breite.

Alle Platten lassen konstruktionsbedingt keine Querströmungen zu, sobald das Gas in die Plattengasse eingetreten ist. Eine Aufweitung der Strömung in der Höhe lässt sich bei allen Varianten von Platten erkennen (Abbildung 5.4). Ein Unterschied zwischen den Varianten besteht allerdings, in welche Gassen sich die Strömung verteilt. Hier weisen die Varianten 1A/B/C einen Vorteil gegenüber den Varianten 2 und 3 auf. Die äußerste Gasse wird ebenfalls in der richtigen Richtung durchströmt und ist somit für die Abscheidung nicht nutzlos. Am stärksten wird sie bei Variante 1B mit den verkürzten Platten durchströmt. Diese Variante besitzt durch die verkürzten Platten jedoch von vorneherein eine geringere eingebrachte Fläche. Aus Basis solch eines Vergleichs können konstruktionsbedingte Parameter explizit im Entwurf neuer Flächen oder der Optimierung bestehender Konstruktionen berücksichtigt werden. Für den vorliegenden Fall können so die Positionen und Breiten der Gassen ganz genau auf die Strömung der Düsen angepasst werden, um eine möglichst gute Anströmung der einzelnen Elemente zu erzielen.

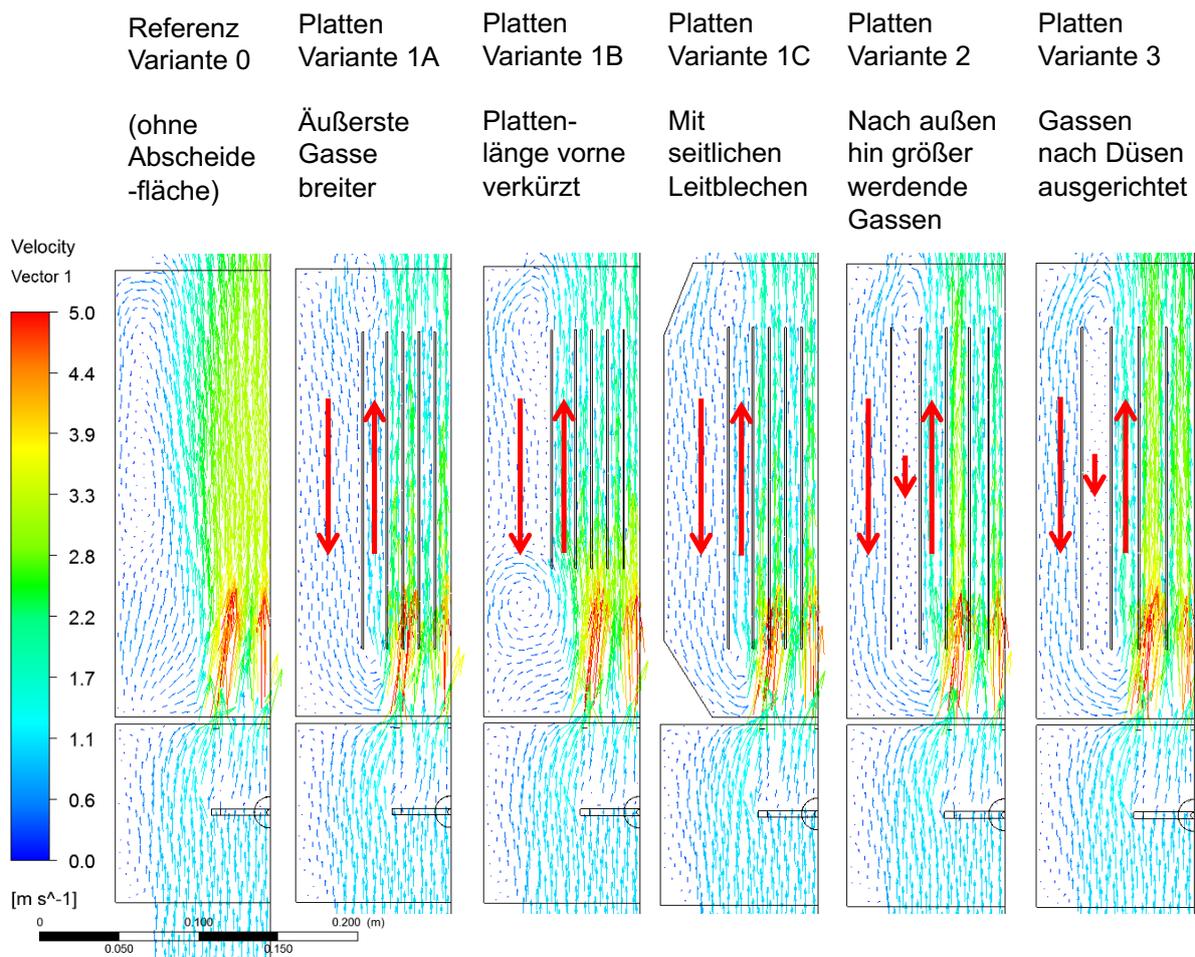


Abbildung 5.4: Strömungsmodell: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung verschiedener Plattenanordnungen in einem Abscheider-Prototypen

Deutlichere Unterschiede im Strömungsverhalten ergeben sich beim Vergleich der unterschiedlichen Arten an Abscheideflächen (Abbildung 5.5). Die meiste Aufweitung der Strömung lässt die sehr durchlässige Gitterstruktur zu, sie besitzt jedoch auch am wenigsten Oberfläche. Die Kettenelemente lassen je nach Anordnung (gassen-, wabenförmig oder kombiniert) eine Aufweitung stärker oder schwächer zu. Die Varianten Kombi als Kombination von Platten mit Kettenelementen lassen aufgrund der Platten keine Aufweitung in die Breite und eine mittlere Aufweitung in der Höhe zu.

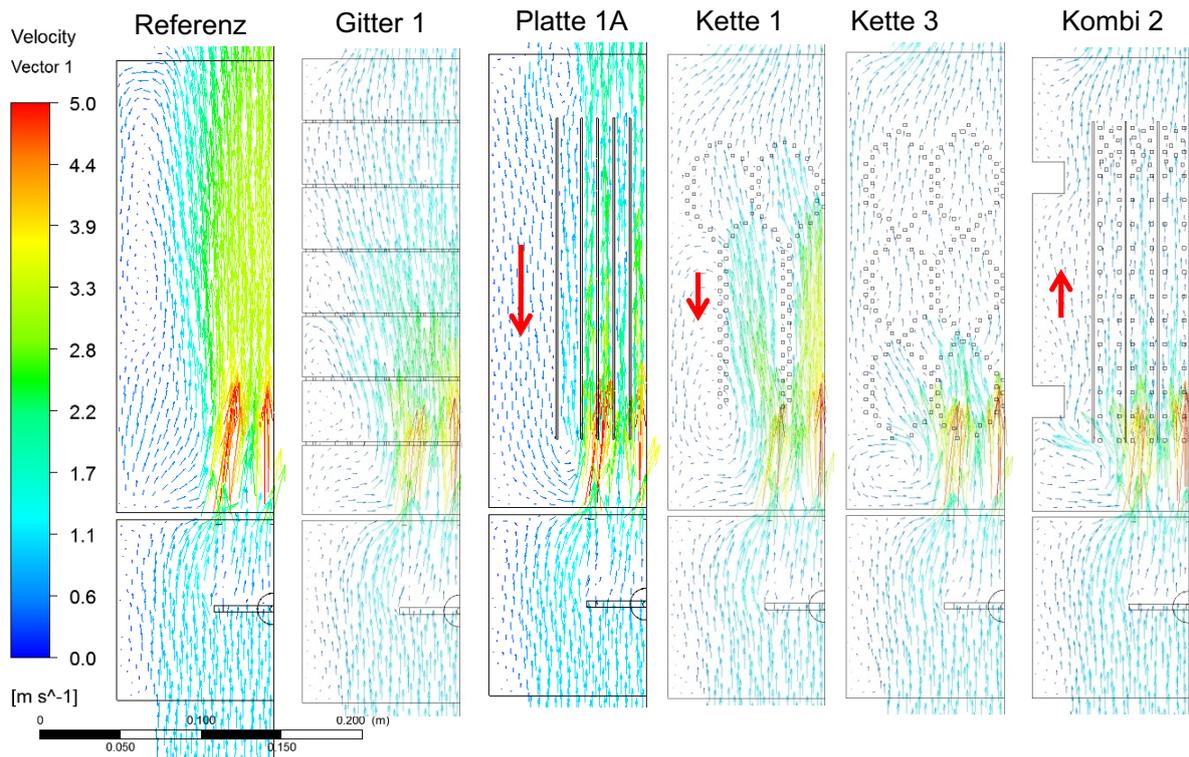


Abbildung 5.5: Strömungsmodell: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung verschiedener Abscheideflächen in einem Abscheider-Prototypen

Auf Basis der Modellierung lassen sich verschiedene Kriterien für einen punktwertbasierten Vergleich der verschiedenen Varianten ableiten (Abbildung 5.6). Die hier gewählten Bewertungskriterien sind der berechnete Druckverlust, Oberfläche, Aufweitung und Rückhaltefähigkeit. Referenz bildet weiterhin das leere Gehäuse ohne Abscheidefläche.

Beim Druckverlust erfolgt die Bewertung auf Basis der Daten aus der Modellierung, in Form einer prozentualen Änderung gegenüber der Referenz. Oberfläche steht für die vorhandene absolute Abscheidefläche der Variante. Unter Aufweitung wird die Aufweitung der Strömung in horizontaler (Breite) und vertikaler (Höhe) bewertet. Als weiteres Kriterium wird unter Rückhaltefähigkeit die Eigenschaft der Variante bewertet, die abgeschiedenen Partikel daran zu hindern, mit der Strömung wieder abgelöst zu werden oder größere Partikelagglomerate zurückzuhalten.

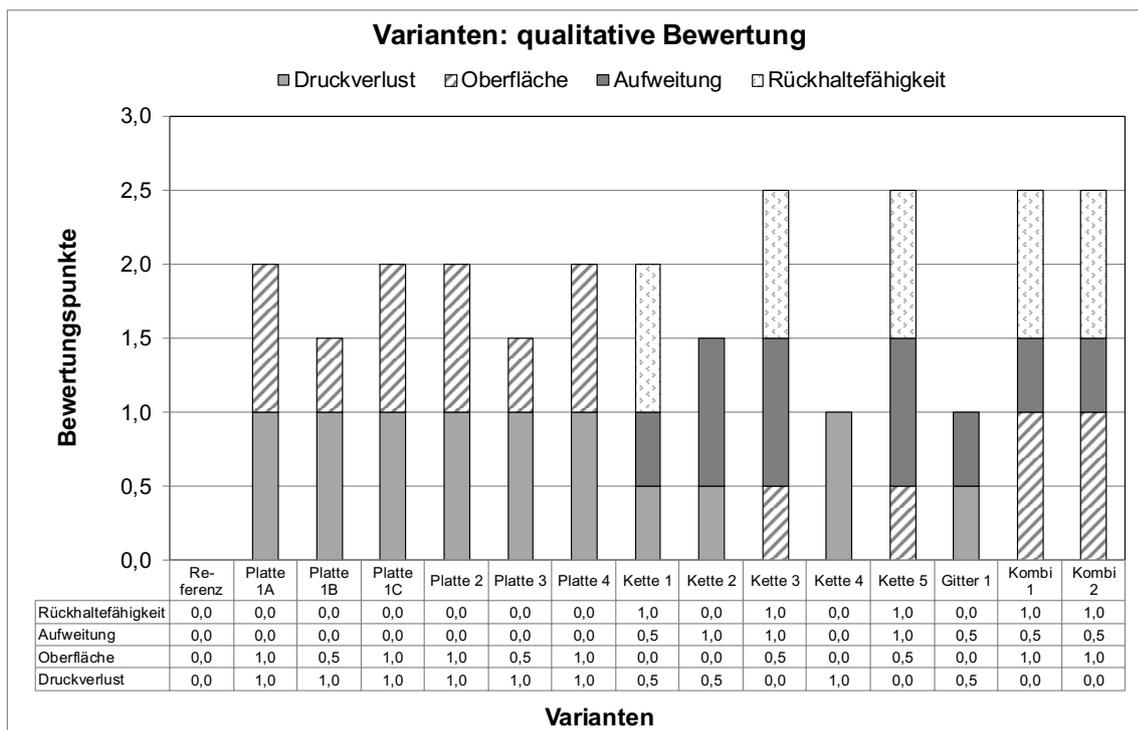
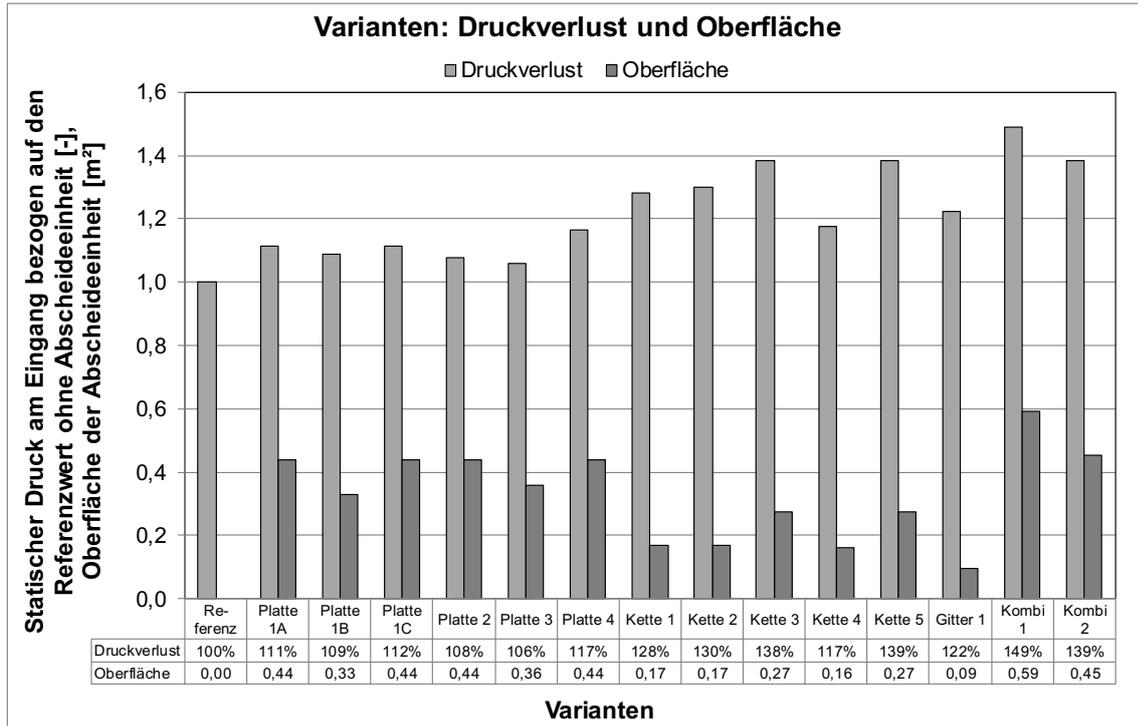


Abbildung 5.6: Auswertung von Daten und Informationen aus der Strömungsmodellierung :Oben: Betrachtung des Druckverlusts im Abscheider (Referenz (ohne Abscheidefläche) entspricht 100%) und freie Oberfläche (Niederschlagsfläche); Unten: qualitative Bewertung der Varianten hinsichtlich Druckverlust, Oberfläche, Aufweitung der Strömung und Rückhaltefähigkeit

In dieser Konstellation wären sowohl die Varianten Kette 3 und 5, also auch die Kombinationen 1 und 2 zur weiteren Betrachtung zu empfehlen. Die meisten der

Plattenvarianten liegen nur kurz dahinter, und wären durch eine Optimierung oder mögliche andere Aspekte (sehr einfacher Aufbau) nicht auszuschließen. Am wenigsten zum Empfehlen wären die Varianten Gitter und Kette 4.

Hierbei nicht berücksichtigt ist die Abreinigung der Flächen, die auf ganz unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden kann.

5.3 Verbrennungsversuche zu Entstehung und Regeneration von Rußschichten an einem Hochspannungsisolator

5.3.1 Hintergrund zum Versuchszweck

Ein zentrales und vor allem betriebskritisches Bauteil ist der Hochspannungsisolator. Im Laufe der Betriebszeit lagern sich je nach Einsatzbedingungen verschiedene Stoffe und Verbindungen am Hochspannungsisolator ab. Bilden diese Ablagerungen eine elektrisch leitfähige Schicht, verliert der Isolator seine Funktionsfähigkeit als elektrisch isolierende Barriere zwischen den hochspannungsführenden Teilen und den geerdeten Teilen des Abscheiders. Dies führt dazu, dass zwischen den Sprühelektroden und den Gegenelektroden kein ausreichendes elektrisches Potenzial mehr aufgebaut werden kann, und es erfolgt keine oder eine stark verminderte Ionisierung des Abgases und der enthaltenen Partikel. Kommt es zu diesem Zustand, ist der Betrieb des Abscheiders gestört und der Abscheider ist nicht mehr funktionsfähig.

Die Ablagerung von Partikel auf der Isolatoroberfläche beruht einerseits auf Trägheit und andererseits auf einem Effekt, der als Thermophorese bekannt ist. Darunter wird eine minimale lokale Gasbewegung entlang einem Temperaturgradienten verstanden, deren Gasbewegung ebenfalls die enthaltenen Partikel folgen. Es findet also ein Partikeltransport im Abgas von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur statt, so dass Partikel bevorzugt an Stellen abgeschieden werden, die eine niedrigere Temperatur als die Abgastemperatur aufweisen, wie beispielsweise der Isolator. Befinden sich Teile des Isolators innerhalb der Abgasströmung, wird der Effekt durch die Trägheit der Partikel im Gasstrom noch verstärkt.

Es gibt verschiedene Gegenmaßnahmen, um Ablagerungen am Isolator zu verhindern. Bei großtechnischen Anlagen wird dies vor allem über sogenannte Spülluft oder Sperrluft umgesetzt. Dabei wird ein kleiner Luftstrom von außen am Isolator vorbei in den Abgasstrom geleitet. Bei großen Volumenströmen ist der Spülluftstrom vernachlässigbar, und in der Regel stellt dies kein Sicherheitsrisiko durch Öffnungen in die Umgebung dar. Im Bereich von Kleinf Feuerungen ist dies jedoch anders. Wird dauerhaft aus dem Aufstellraum, beispielsweise dem Wohnzimmer bei Einzelraumfeuerungen, Raumluft entnommen und ins Abgas eingeleitet, mindert dies den Wirkungsgrad der Feuerung. Ebenso stellt eine direkte Öffnung der Abgaswege in den Wohnraum ein Sicherheitsrisiko dar. Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen wie Rückschlagklappen sind dann notwendig.

Eine weitere mögliche Variante ist, den Isolator möglichst weit außerhalb der Gasströmung zu platzieren. Durch die geringen Platzverhältnisse im Bereich der Abgaswege und Aufstellorte von Kleinf Feuerungen ist dies meist jedoch schwierig umzusetzen.

Eine weitere Gegenmaßnahme besteht in der Beheizung des Isolators. Dadurch wird eine am Isolator höhere Temperatur erreicht, so dass der Temperaturgradient in Richtung Abgas gerichtet ist und nicht in Richtung Isolator. Dies kann daher Ablagerungen vermindern.

Vorteil dieser Maßnahme ist, dass sie platzsparender als die anderen Maßnahmen unterzubringen ist, jedoch eines deutlich aufwändigeren Isolators bedarf.

Dazu sollen nachfolgend die Versuche zur Machbarkeit der Maßnahme gegen Rußschichten in Verbrennungsversuchen gezeigt werden.

5.3.2 Versuchsbeschreibung

Vor allem leitfähige Verbringungen wie die emittierten Rußverbindungen in Feuerungsabgasen können schon nach wenigen Stunden Betriebszeit der Feuerung starke Ablagerungen an Bauteilen und vor allem am Hochspannungsisolator von Elektroabscheidern verursachen. Wie beschrieben gibt es verschiedene Gegenmaßnahmen, um Ablagerungen dieser Art zu vermindern und die Funktionsfähigkeit des Isolators und damit der Hochspannung aufrecht zu erhalten.

Bei der Beheizung eines Isolators als Gegenmaßnahme stellt sich die Frage, inwieweit die Ablagerungen von der Temperatur am Isolator und den Feuerungsbedingungen abhängen. Dies soll hier durch eine eigene Versuchsreihe im Rahmen der Vorversuche in einer Realgasumgebung betrachtet werden.

Ein Isolator-Prototyp wird im Feuerungsabgas eines Kaminofens bei verschiedenen Heiztemperaturen eingesetzt und die Entstehung von Rußablagerungen bei guten und schlechten Verbrennungsbedingungen verglichen, vergleiche hierzu Beschreibungen in Glocker et al (2013). Ebenfalls wird die Regenerationsfähigkeit zur thermischen Behandlung der Ablagerungen betrachtet.

Der Isolator besteht aus zwei ineinander angeordneten Keramiksichten, innerhalb deren eine Heizwendel und eine Temperaturmessung eingebettet sind (siehe Abbildung 10.2 zum Querschnitt des Aufbaus im Anhang). Regelgröße ist die Isolator Innentemperatur, deren Sollwert auf Basis der aktuellen gemessenen Abgastemperatur zuzüglich der variabel einstellbaren Temperaturüberhöhung berechnet wird. Die Ansteuerung der Heizwendel erfolgt durch getaktetes An- und Ausschalten durch die umgesetzte Regelung.

Die Erfassung der Kennlinie zum Zusammenhang zwischen Innen- und Außentemperatur am Isolator erfolgt als Laborversuch ohne Abgasumgebung.

Der Einsatz des Isolators erfolgt direkt über der Feuerung im Abgasstrom. Als Feuerung wird ein handelsüblicher Kaminofen der Firma Buderus Modell Blue Line 4W verwendet und nach Bedienungsanleitung betrieben. Als Brennstoff werden Buchenholzscheite verwendet.

Es werden drei verschiedene Temperaturüberhöhungen dT (150 K, 100 K, 50 K) bei jeweils zwei verschiedenen Verbrennungsbedingungen („gut“, „schlecht“) für je einen Versuchstag mit sieben aufeinanderfolgenden Abbränden absolviert. Nach jedem Versuchstag erfolgt die optische Begutachtung des Isolators und eine einfache manuelle Reinigung.

Nach Beendigung der Abgasversuche erfolgt die thermische Regeneration des entstandenen Isolatorbelags, der nicht manuell abgereinigt werden kann. Dies erfolgt durch Abfahren eines vorgegebenen Temperaturprogramms und ohne Feuerungsbetrieb in Umgebungsluft. Die Regelung der Heizung folgt daher statt auf Basis der Abgastemperatur anhand dem zeitgesteuerten Temperaturprogramm bis zu einer Außentemperatur von 400°C. Dies gilt als Temperaturschwelle für die Umsetzung und den Abbau von Rußverbindungen.

5.3.3 Ergebnisse

Jeder Versuchstag kann als Tagesverlauf der Temperaturen dargestellt werden, beispielhaft ist die Variante der guten Verbrennung in Kombination mit einer Temperaturüberhöhung am Isolator mit 150 K in Abbildung 5.7 dargestellt. Gut zu sehen ist der typische Abbrandverlauf einer handbeschickten Feuerung anhand der Abgastemperatur. Dem folgend wird die Solltemperatur im inneren des Isolators berechnet und dementsprechend die Beheizung geregelt, was zu Innentemperaturen zwischen etwa 300°C am Ende eines Abbrandes und einem Maximum von 450°C in der Hauptverbrennungsphase führt.

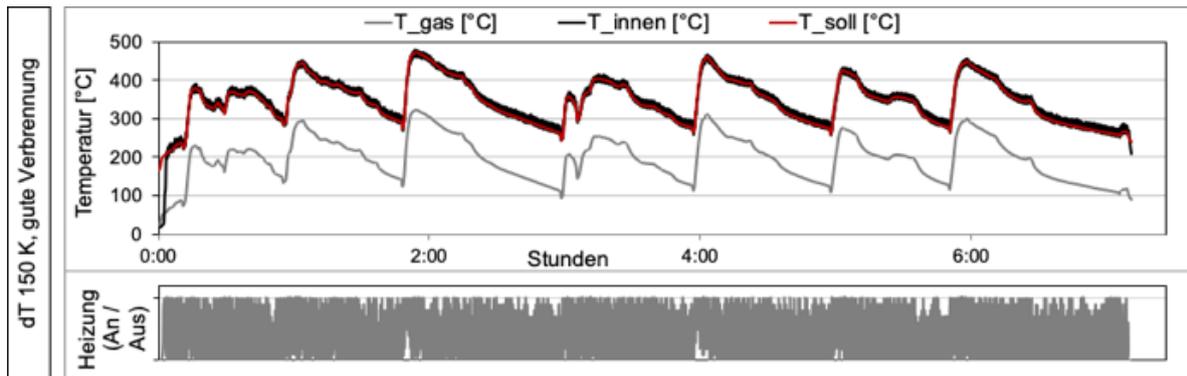
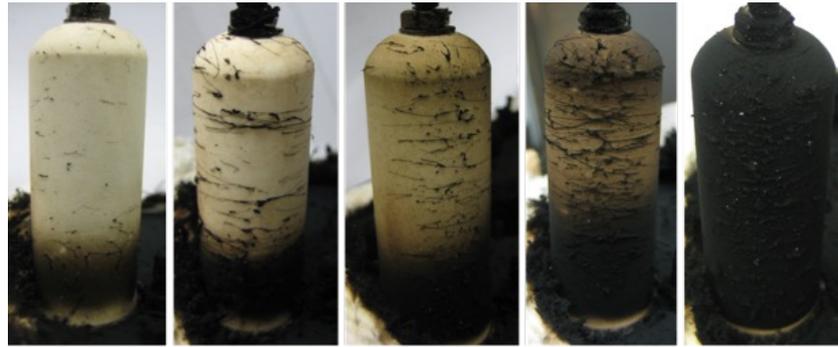


Abbildung 5.7: Darstellung der Temperaturen als Verlauf an einem Versuchstag mit sieben Abbränden an einem Kaminofen (Abgastemperatur T_{gas} , Isolator Innentemperatur Istwert T_{innen} und Sollwert T_{soll} , alle in °C); Beispielhaft gezeigt für eine Temperaturüberhöhung von 150 K und „gute Verbrennung“

Die nachfolgende Abbildung 5.8 zeigt die optische Begutachtung der Isolatoroberfläche und die Versuchsmittelwerte über die jeweils absolvierten sieben Abbrände je Variante.

Aufgrund der bereits starken Ablagerungen bei niedriger Temperaturstufe schon bei guter Verbrennung, wurde die schlechte Verbrennung nicht mehr umgesetzt, da hier durch höhere Emissionen noch mehr Ablagerungen zu erwarten wären.

Die durchschnittliche Abgastemperatur belief sich bei allen Versuchstagen auf etwa 200°C über die jeweils absolvierten sieben Abbrände. Bei der höchsten Temperatureinstellung der Beheizung (dT 150K) ergab sich eine Außentemperatur an der Isolatoroberfläche von etwa 260°C, die Oberfläche am Isolator war demnach etwa 65 K über der Abgastemperatur. Bei dieser Einstellung entstanden kaum Ablagerungen bei guter Verbrennung und wenige fadenförmige Agglomerate als Ablagerungen bei schlechter Verbrennung. Bei der mittleren Einstellung (dT 100K) ergab sich ein Temperaturunterschied zwischen Isolatoroberfläche und Abgastemperatur von etwa knapp 30 K. Hier sind schon deutlichere Ablagerungen zu erkennen. Auch eine bräunliche Verfärbung tritt ein, was dafür spricht, dass sich neben rußartigen Verbindungen auch organische Verbindungen wie teerhaltige Stoffe ablagern. Ebenfalls ergeben sich bei guter Verbrennung weniger Ablagerungen und bei schlechter Verbrennung ein stärkerer Effekt. In der niedrigsten Temperatureinstellung (dT 50K) ist selbst bei guter Verbrennung die Isolatoroberfläche dicht belegt mit verschiedenartigen Agglomeraten und Ablagerungen. Hier hat die Isolatoroberfläche etwa die gleiche Temperatur wie die Abgastemperatur.



Parameter	Kürzel	Einheit	dT 150 K gute Verbrennung	dT 150 K schlechte Verbrennung	dT 100 K gute Verbrennung	dT 100 K schlechte Verbrennung	dT 50 K gute Verbrennung
Abgastemperatur	T_gas	[°C]	195	196	190	187	193
Temperaturüberhöhung Sollwert	dT_soll	[K]	150	150	100	100	50
Temperaturüberhöhung Istwert	dT_ist	[K]	152	153	106	107	59
Isolator Innentemperatur Sollwert	T_soll	[°C]	345	346	290	287	243
Isolator Innentemperatur Istwert	T_innen	[°C]	347	349	297	294	251
Temperaturdifferenz Isolator	dT i-a	[K]	87	87	80	80	60
Isolator Außentemperatur geschätzt	T_außen	[°C]	260	262	217	214	191
Temperaturdifferenz T_gas zu T_außen		[K]	65	66	26	27	-1
Betrieb Heizung (an oder aus)	Heiz	[V]	4	4	3	3	2
Anteil Heizbetrieb "an"	Heiz an	[%]	64	64	48	47	30
Abgasdruckbedingung (Zug)	dp	[Pa]	11	10	9	9	9

Abbildung 5.8: Ergebnisse der Verbrennungsversuche zur Entstehung von Partikelablagerungen an einem Isolator-Prototyp im Abgas eines Kaminofens: optische Ansicht des Isolators und Mittelwerte je Versuchstag (je 7 Abbrände)

Aus der optischen Beurteilung fällt des weiteren der Einfluss der Anströmungsrichtung auf, vor allem bei den Varianten mit stärkerer Belagsentstehung. Auf der strömungszugewandten Seite befinden sich nahezu alle die vorhandenen Beläge, auf der strömungsabgewandten Seite hingegen sind deutlich weniger Beläge vorhanden (vergleiche hierzu Abbildung 10.4 im Anhang).

Als erste Stufe der thermischen Regeneration soll eine Oxidierung der kohlenstoffhaltigen Ablagerungen während der Beaufschlagung mit Abgas in einem stabilen Betriebszustand erfolgen, also bei hoher Temperatureinstellung und guter Verbrennung. Hierdurch kann ein Großteil der Ablagerungen entfernt werden. Durch anschließendes Hochheizen in Umgebungsluft auf eine Isolatoraußentemperatur von 400°C können alle restlichen Beläge oxidiert und von der Materialoberfläche entfernt werden (siehe Abbildung 10.5 im Anhang). Dadurch kann die Vermutung bestätigt werden, dass es sich bei den Belägen überwiegend um kohlenstoffhaltige Verbindungen wie Ruß und Teere handelt, da diese ab dieser Temperatur mit Sauerstoff reagieren. Da dies teilweise auch schon bei Temperaturen

unterhalb dieser Schwelle auftritt, liegt des weiteren die Vermutung nahe, dass das keramische Material einen gewissen Katalysatoreffekt bei der Reaktion spielt.

5.3.4 Fazit zu den untersuchten Ablagerungen und ihrer Regenerationsfähigkeit

Durch das Verhalten der Ablagerungen bei der Entstehung und bei der Reperation der Partikelschichten auf dem Isolator kann davon ausgegangen werden, dass Rußverbindungen hierbei die dominierende Fraktion sind, mit untergeordneter Rolle von teerhaltigen Verbindungen. Die entstandenen Beläge konnten durch eine thermische Behandlung oxidiert und ins Abgas rückgeführt werden, weisen also eine hohe Regenerationsfähigkeit auf. Deutlich wird ebenso der Einfluss der Anströmung auf die Ablagerungen, da sie dominierend an der strömungszugewandten Seite auftreten und vernachlässigbar wenig an der strömungsabgewandten Seite.

Da die verwendete Art der Feuerung zu einem Betrieb mit Luftüberschuss neigt, stimmen die Ergebnisse gut mit der Erwartung überein, dass es überwiegend zu Rußemissionen kommt. Im Rahmen der Hauptversuche soll dies weiter verfolgt werden, welche Fraktionen der Partikelemissionen den Betrieb und die Abscheidung von Elektrofiltern beeinflussen.

Zur technologischen Beurteilung der Abscheider lässt sich sagen, dass aufgrund der teils hohen auftretenden Emissionen unterschiedlicher Art und Eigenschaften, eine wirksame Gegenmaßnahme gegen Ablagerungen an einem Hochspannungsisolator zwingend erforderlich ist, um den Betrieb aufrechterhalten zu können. Ohne entsprechenden Maßnahme wären sonst nach wenigen Betriebsstunden ein kritischer Betriebspunkt erreicht oder überschritten.

5.4 Einfluss der Temperatur auf die Strom-Spannungs-Kennlinie bei einem Elektroabscheider

Die Strom-Spannungs-Kennlinie wird standardmäßig zur Charakterisierung der Sprühelektroden in einem Elektroabscheider durchlaufen. Die Kennlinie unterliegt vielfachen Einflüssen, neben konstruktiven Parametern auch Faktoren wie der Zusammensetzung des umliegenden Gases oder der Temperatur.

Um diesen Einfluss bei dem in Kapitel 6 verwendeten Elektroabscheider zu zeigen, wird der Abscheider mit kalter und beheizter Umgebungsluft durchströmt und die Kennlinien aufgezeichnet.

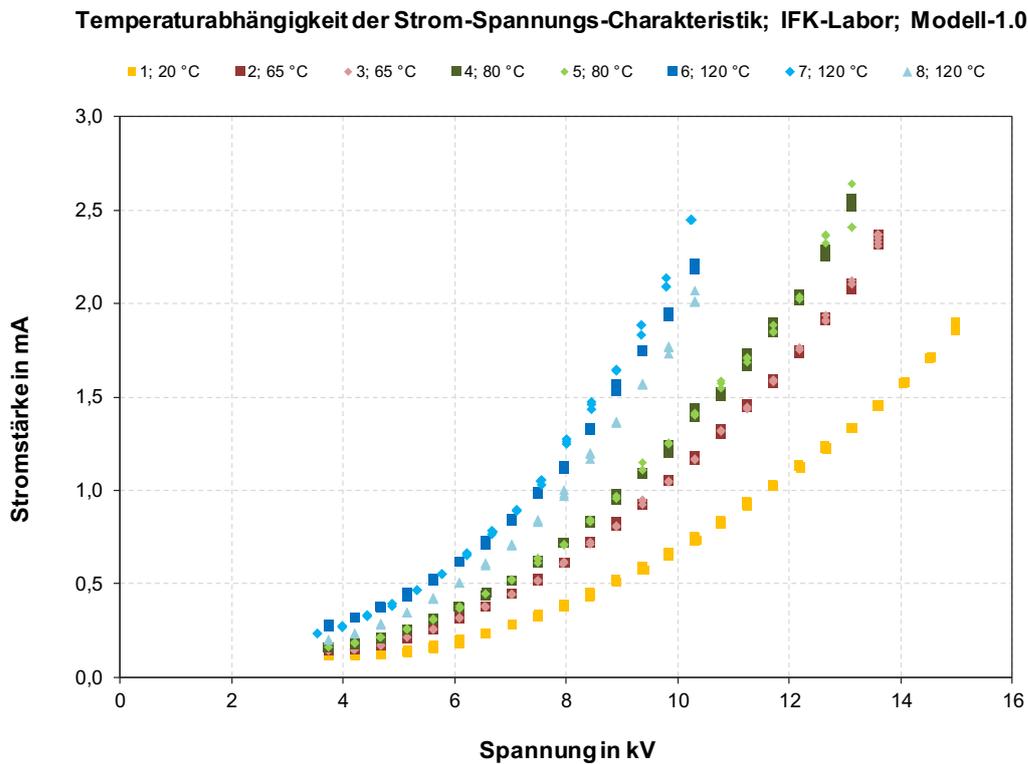


Abbildung 5.9: Strom-Spannungs-Kennlinie eines verwendeten Elektroabscheiders unter Einfluss der Umgebungstemperatur

Die Darstellung soll die große Abhängigkeit der Charakteristik von der Temperatur zeigen, um den Einfluss der Abgastemperatur auf den Arbeitsbereich eines Elektroabscheiders zu verdeutlichen. Vor allem hohe Temperaturen bis 300°C und darüber, wie sie vor allem in kleineren Feuerungen ohne richtige Wärmetauscherflächen vorkommen, können also das Strom-Spannungsverhalten stark beeinflussen und den Betrieb eines Elektroabscheiders leicht destabilisieren.

5.5 Andere Aspekte und Fragestellungen

Im Rahmen der Arbeiten an der Dissertation und anderen Forschungsprojekten werden verschiedene weitere Themen und Fragestellungen betrachtet, die hier der Vollständigkeit halber kurz aufgeführt werden sollen. Sämtliche der in dieser Arbeit genannten studentischen Arbeiten wurden durch den Autor initiiert und größtenteils eng begleitet. Aus den Fragestellungen der Materialanalyse geht hervor, dass mit Partikelanalysen und Messverfahren verschiedene Aspekte betrachtet werden. Dabei kann es sich beispielsweise um die Charakterisierung von Partikelproben aus Feuerungsabgasen handeln wie in Reitberger (2016) beschrieben oder in Schneider (2015) diskutiert oder Fragen zur Leitfähigkeit in Rußschichten wie in Kohn (2012).

Als Begleitforschung zur Entwicklung von neuartigen Bauformen von Partikelabscheidern gibt es vielzählige Fragestellungen, denen zur Technologieentwicklung nachgegangen werden kann. Genannt seien hier sowohl Aspekte zum Zusammenhang der elektrischen Kenngrößen eines Elektroabscheiders wie in Wolf (2015) thematisiert, also auch eine systematische Entwicklung eines Konzeptes für Abscheideflächen speziell für die Anforderungen an Kleinf Feuerungen erarbeitet, wie in Baum (2017) beschrieben und als Prototyp umgesetzt. Des Weiteren kann, wie im vorherigen Abschnitt verwendet (siehe Kapitel 5.2), die Strömungsmodellierung als zeitgemäßes Werkzeug eingesetzt werden, um zentrale Fragen zu Zusammenhängen und Parameterstudien zu bearbeiten, wie in Dominiczak (2016).

6 Emissionsuntersuchungen an automatisch beschickten Feuerungen mit zweistufigem Elektroabscheider

6.1 Versuchsbeschreibung

6.1.1 Gegenstand für die Untersuchungen

Zweck dieser Emissionsmessungen an automatisch beschickten Feuerungen ist es, den Einfluss von variierenden Partikelemissionen auf die Partikelabscheidung in einem Elektroabscheider zu untersuchen. Dabei soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit unterschiedliche Partikelemissionen die Abscheideeffizienz beeinflussen und welche Eigenschaften der Partikel hierbei besonders von Bedeutung sind. Als direkte Messungen in Rohgas und Reingas werden physikalische Eigenschaften der Partikel bestimmt wie die Gesamtstaubmassenkonzentration und die massebezogenen Partikelfraktionen. In Partikelanalysen werden als chemische Eigenschaften ausgewählte Inhaltsstoffe wie der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) und die einzelnen Kohlenstoffanteile (OC, EC) bestimmt.

Für die Untersuchung dieses Zusammenhanges wird das Prinzip der automatisch beschickten Feuerung verwendet. Diese lassen grundsätzlich einen besser einstellbaren und kontinuierlicheren Betrieb zu als manuell beschickte Anlagen, und sind daher für diese Fragestellungen der Versuche besser geeignet. Als Vertreter der Einzelraumfeuerungen wird in der ersten Versuchsreihe ein Pelletofen, in der zweiten Versuchsreihe als Zentralfeuerung eine Hackgutfeuerung verwendet. Als Abscheider wird ein Prototyp eines Elektroabscheiders verwendet, der einem zweistufigen Prinzip mit getrennter Auflade- und Abscheidestufe folgt (Glocker, et al., 2017). Die Durchführung der Versuche findet an einem speziell für die Versuche konzeptionierten und aufgebautem Feuerungsprüfstand statt.

Nachfolgend werden alle verwendeten Geräte und Verfahren, der Prüfaufbau, die Versuchsdurchführung und Randbedingungen beschrieben. Es wird die erste Versuchsreihe an einem Pelletofen mit Elektroabscheider und ihre Ergebnisse erläutert, gefolgt von der zweiten Versuchsreihe an einer Hackgutfeuerung mit Elektroabscheider und zuletzt wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen daraus gegeben.

6.1.2 Prüfaufbau

Beim Prüfaufbau handelt es sich um einen Feuerungsprüfstand, an dem eine Feuerung unter praxisnahen Bedingungen betrieben und untersucht werden kann. An unterschiedlichen Positionen können verschiedene Parameter direkt im Abgas gemessen oder Proben entnommen werden. Der Abscheider ist in einer separaten Prüfeinheit untergebracht, so dass er unabhängig von der Feuerung betrieben werden kann. Anschließend wird das Abgas über Abgasrohre an eine zentrale Sammelstelle im Technikum übergeben und abgeleitet.

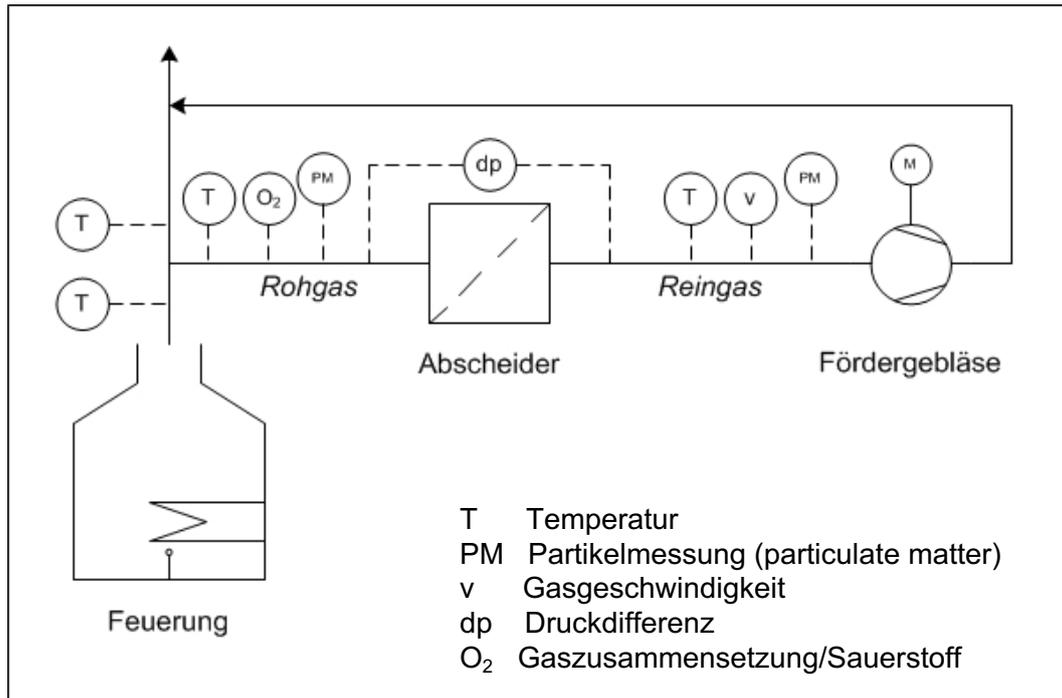


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Feuerungsprüfstands mit Feuerung, Partikelabscheider und Messstellen

Die Gastemperatur im Abgas wird an verschiedenen Stellen zu Kontrollzwecken und für die spätere Umrechnung auf normierte Bedingungen erfasst. Die Druckdifferenz über den Abscheider wird erfasst und stellt seinen Druckverlust dar. Die Gaszusammensetzung, vor allem der Sauerstoffgehalt, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt werden im Rohgas erfasst, ebenso wie die flüchtigen Kohlenwasserstoffe.

Vor dem Abscheider werden die partikelbezogenen Emissionsparameter als Rohgas und hinter dem Abscheider als Reingas erfasst. Hauptsächliche Messgröße hierbei ist die Gesamtstaubkonzentration, beispielhaft ergänzt durch die Analyse der Partikelinhaltsstoffe oder die Korngrößenverteilung.

6.1.3 Versuchsdurchführung und Mess-Strategie

Die Durchführung der Versuche erfolgt am beschriebenen Prüfstand.

Die Feuerung wird automatisch gezündet und regelt sich automatisch in einen vorgegebenen Betriebspunkt. Die Versuchsbedingungen werden hergestellt, sobald diese konstant gehalten werden, beginnt der Messzeitraum. Die manuelle Abreinigung des Abscheiders wird vor Messbeginn einmal betätigt. Kontinuierlich erfasste Messgrößen werden aufgezeichnet und entsprechend den Zeiträumen als Zeitverlauf und als Mittelwert ausgewertet. Die Messung der diskontinuierlich erfassten Messparameter wie die Staubbemessung erfolgt ausschließlich während dem Messzeitraum und wird als Mittelwert über den Messzeitraum errechnet. Sofern nicht anders angegeben, handelt es sich bei den Mittelwerten der Messparameter um eine Messung mit einer Messdauer von 15 Minuten.

Als Besonderheit ergibt sich für die messtechnisch aufwändigen Versuche zur Messung in Rohgas und Reingas, dass aufgrund einer nicht ausreichend vorhandenen Messtechnik nicht

alle Größen und Parameter zeitgleich, also parallel, erfasst werden können. Daher wird für diese Parameter auf eine sogenannte serielle Mess-Strategie zurückgegriffen. Dies bedeutet, dass ein Versuchspunkt bei gleichen Einstellungen nacheinander statt gleichzeitig in Rohgas und Reingas vermessen wird. Kontinuierlich erfasste Größen dienen als Kontrollgrößen, um die Vergleichbarkeit der zeitlich versetzten Messzeiträume soweit wie möglich zu überwachen. Hiervon betroffen sind die Messung der Korngrößenverteilung mittels Impaktor und Partikelanalysen (siehe Tabelle 6.1). Die Gesamtstaubmessung mit Planfilter erfolgt jeweils parallel in Rohgas und Reingas, und dient damit ebenfalls als Kontrollgröße für die seriell erfassten Parameter.

Tabelle 6.1: Messgrößen und ihre zeitliche Erfassung

Messgröße	Erfassung	Messung in Rohgas und Reingas
Abgas		
Gaszusammensetzung	kontinuierlich	parallel
Temperaturen	kontinuierlich	parallel
Gesamtstaub	diskontinuierlich	parallel
Korngrößenverteilung	diskontinuierlich	seriell
Abscheider		
Spannung Sollwert	kontinuierlich	parallel
Spannung Istwert	kontinuierlich	parallel
Strom Istwert	kontinuierlich	parallel
Partikelanalysen		
TC/TIC/TEC/TOC	diskontinuierlich	seriell
Kationen-Analyse	diskontinuierlich	seriell
Chlor-Analyse	diskontinuierlich	seriell

Die nachfolgende Abbildung 6.2 zeigt die umgesetzte Mess-Strategie zur Probenahme für die partikelbezogenen Messgrößen mit Angaben zur parallelen und seriellen Messung von Parametern. Die Planfilter aus der Gesamtstaubmessung werden für die Laboranalysen als Partikelproben verwendet. Jeweils ein ganzer Planfilter wird für die Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehaltes und je ein halber für die Bestimmung der Kationen und des Chloridgehaltes verwendet.

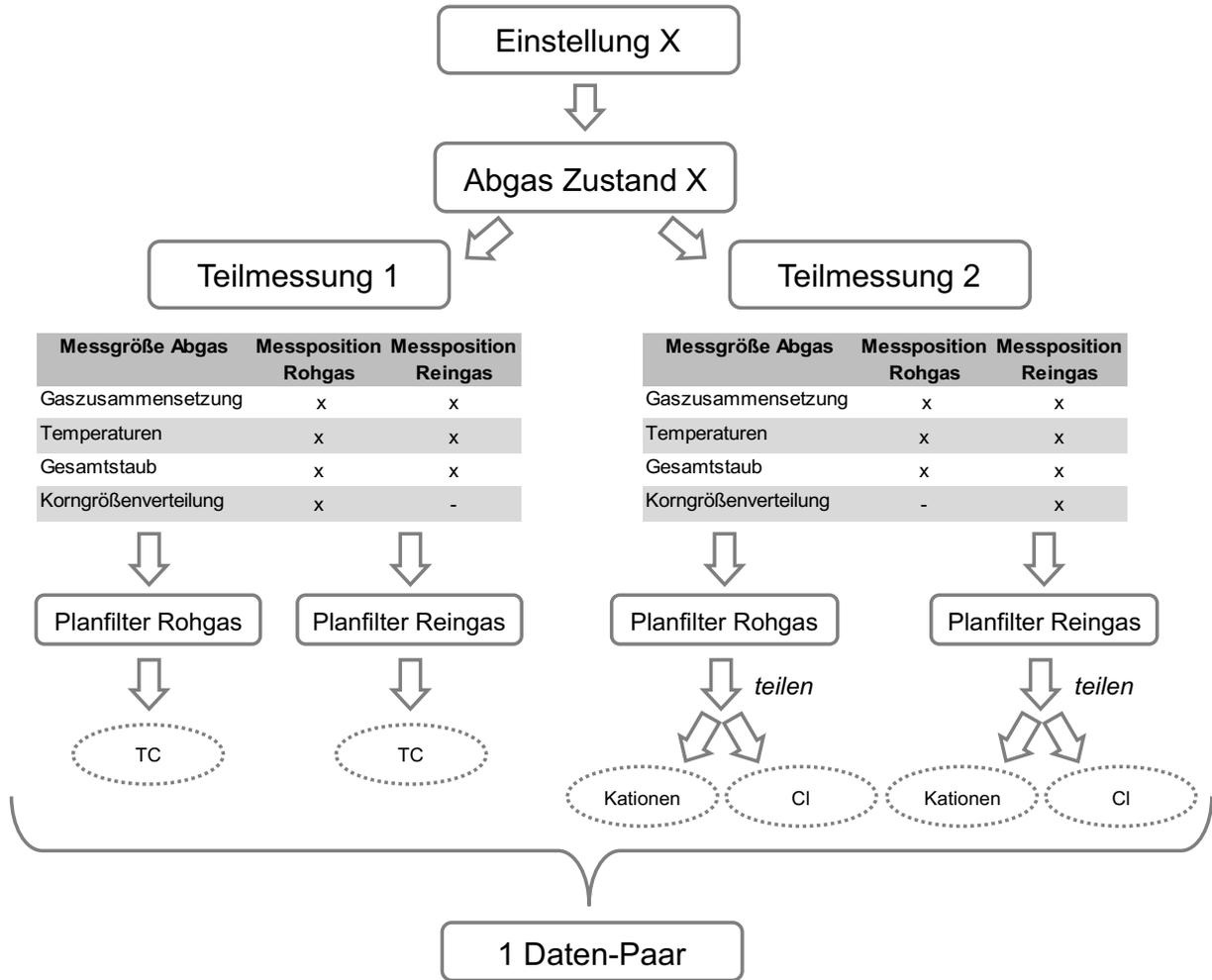


Abbildung 6.2: Umsetzung zur Mess-Strategie für die partikelbezogenen Messgrößen (Gesamtstaubkonzentration, Korngrößenverteilung, Partikelanalysen)

6.1.4 Messgrößen und Messverfahren

Die nachfolgende Tabelle 6.2 zeigt die verwendeten Messgeräte für die verschiedenen Messgrößen und Parameter.

Tabelle 6.2: Technische Daten der verwendeten Messgeräte für diese
Emissionsuntersuchungen (Messgeräteliste)

Messgröße	Kürzel	Einheit	Messprinzip	Messgerät	Messbereich
Gastemperatur	Temp	°C	Thermospannung	NiCr-Ni Thermoelemente	
Sauerstoff- Konzentration	O2	Vol.-%	Paramagnetismus	Emerson NGA 2000	0...25 %
Kohlendioxid- Konzentration	CO2	Vol.-%	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Emerson NGA 2000	0...20 %
Kohlenmonoxid- Konzentration	CO	ppm	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Emerson NGA 2000	0...1000 ppm
Kohlenmonoxid- Konzentration	CO	Vol.-%	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Emerson NGA 2000	0...1 %
Flüchtige Kohlenwasserstoff	VOC	ppm	Flammenionisation	Testa FID 123	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 ³	Gravimetrisch nach VDI 2066-1	Planfilterkopfgerät 50mm	
Gesamtstaub	c	mg/m ³	Gravimetrisch, nach VDI 4206-2	Wöhler SM500	
Korngrößen- verteilung	-	mg	Impaktion, gravimetrisch nach VDI 2066-5	Impaktor Dekati D-LPI	

Für die Partikelanalysen wird der belegte Planfilter der Gesamtstaubmessung mit Planfilterkopfgerät verwendet nach vorher beschriebener Vorgehensweise. Tabelle 6.3 gibt die dafür verwendeten Analysemethoden für die Partikelproben an.

Tabelle 6.3: Übersicht über die angewendeten Laboranalysen zur Charakterisierung der chemischen Eigenschaften der Partikelemissionsproben

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

6.1.5 Verwendete Geräte und Brennstoffe

6.1.5.1 Pelletofen als automatisch beschickte Einzelraumfeuerung

Als Feuerung wird ein handelsüblicher Pelletofen der Marke Buderus Blueline verwendet. Es handelt sich um eine Einzelraumfeuerung mit einer Nennwärmeleistung von 8,1 kW und ist als Fallstufensystem konzipiert, bei dem die Pellets über eine Förderschnecke aus dem Vorratsbehälter in den Brennraum gefördert werden und über eine Rutsche in die Brennschale fallen. Die Zündung erfolgt über ein Zündgebläse. Die Verbrennungsluft wird über ein modulierbares Gebläse eingebracht.

Zu Forschungszwecken ist die Regelung softwareseitig verändert, so dass Einfluss auf die Brennstoff- und Luftzufuhr genommen werden kann. Dies ermöglicht die Untersuchung von sowohl regulären Verbrennungsbedingungen als auch davon abweichenden Bedingungen, um beispielsweise eine Verbrennung in Luftmangelsituationen mit erhöhten Partikelemissionen zu erhalten. Damit ist die Feuerung gut als Partikelquelle geeignet, um die Fragestellungen nach Partikelemissionen mit verschiedenen Eigenschaften und Inhaltsstoffen aufgrund sich ändernder Verbrennungsbedingungen wie Luftmangel und Luftüberschuss nachzustellen. Als automatisch beschickte Feuerung können die Bedingungen so über einen ausreichenden Zeitraum annähernd kontinuierlich mit nur geringer Schwankung gehalten werden.

Als Brennstoff werden handelsübliche Standard-Holzpellets verwendet.

6.1.5.2 Hackgutfeuerung als automatisch beschickte Zentralfeuerung

Als Vertreter der Zentralfeuerungen wird ein handelsüblicher Hackgutkessel verwendet. Es handelt sich um das Modell T4 der Firma Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH (Fröling, 2013), eine Retortenfeuerung mit Wärmeübertrager und automatischer Entaschung, der für Hackgut (Hackschnitzel) und Holzpellets als Brennstoffe geeignet ist.

Zur Erreichung höherer Abgastemperaturen oder Partikelemissionen wird zu Versuchszwecken die Ablenkplatte im Wärmeübertrager modifiziert, was nicht dem regulären Betriebsempfehlungen folgt, sondern zu Versuchszwecken dient. Ebenso wird deshalb die Abgastemperaturbegrenzung der Kesselsteuerung erhöht.

6.1.5.3 Elektroabscheider-Prototyp als Abscheider

Als Partikelabscheider wird ein zweistufiger elektrostatischer Abscheider kleiner Bauart als Prototyp im Entwicklungsstadium verwendet. Dieser wird im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten entwickelt und in Struschka et al (2011), Glocker et al (2013) und Glocker et al (2017) genauer beschrieben ist.

In einer Aufladestufe sind neun Elektroden spitzen mit jeweils einer zugehörigen Gegenelektrode angebracht, die zusammen in einer Düsenplatte angeordnet sind. Die Elektroden folgen daher einer Spitze-Ring-Anordnung. Im Vorderbereich tritt das Abgas von der Feuerung kommend als Rohgas in den Abscheider ein. Durch die angelegte Hochspannung, die zwischen 0 und 16 kV eingestellt werden kann, wird das durchströmende Gas und die enthaltenen Partikel ionisiert. Der erste Geräteteil wird daher auch als Plasmastufe, Ionisationsstufe oder auch Aufladestufe bezeichnet. Nach der Düsenplatte ist die sogenannte Abscheidestufe mit geerdeten Niederschlagselementen angeordnet, an denen das partikelbehaftete Abgas vorbeiströmt und an denen die geladenen Partikel anhaften. Das gereinigte Abgas verlässt den Abscheider im hinteren Bereich über ein Abgasrohranschluss als Reingas.

Im Rahmen der Versuche wurden verschiedene Abscheideelemente verwendet. Für die Untersuchung am Pelletofen wird eine Abscheideeinheit verwendet, die sich aus Kettenelementen zusammensetzt (vergleiche hierzu Beschreibung aus Kapitel 5.1 und Bild des Modells in Abbildung 10.7).

Für die Untersuchung an der Hackgutfeuerung wird eine Abscheideeinheit mit spiralförmig angeordneten plattenförmigen Abscheideflächen verwendet. Für diese Untersuchung wird eine Abscheideeinheit verwendet, die sich aus spiralförmig angeordneten Platten gestaltet, und mittels einer angebrachten Bürste abgereinigt werden können (siehe Abbildung 10.8).

6.1.5.1 Brennstoffe

Als standardisierter Brennstoff mit generell niedrigem Emissionsniveau werden handelsübliche Holzpellets eingesetzt. Als weit verbreiteter, naturbelassener holzartiger Brennstoff werden Holzhackschnitzel eingesetzt. Als Vertreter halmgutartiger Brennstoffe werden Heupellets als Mischung verwendet. Da reine halmgutartige Brennstoffe aufgrund eines kritischen Ascheschmelzverhaltens nicht ohne zusätzliche Maßnahmen in dieser Feuerungsart verwendet werden können, werden sie mit Holzpellets vermischt verwendet; aus Sicherheitsgründen zur Vermeidung von Schlackebildung mit einem relativ geringen Anteil (ca. 20 Massenprozent). Halmgutartige Brennstoffe sind in der Regel schwieriger zu Verbrennen als naturbelassenes Holz und neigen aufgrund ihrer Inhaltsstoffe zu höheren Partikelemissionen und einer anderen Partikelzusammensetzung (Stichwort Kalium als Aerosolbildner).



Abbildung 6.3: Verwendete Brennstoffe: links: handelsübliche Holzpellets, mitte: handelsübliche Holzhackschnitzel mit Rindenanteil, rechts: Pelletmischung Holzpellets mit Heupellets-Anteil

6.1.6 Einfluss auf die Partikelemissionen der Feuerungen als Partikelquelle

6.1.6.1 Variation der Partikelemissionen durch Änderung der Verbrennungsbedingungen

Gegenstand der Untersuchung ist die Generierung unterschiedlicher Partikelarten an Emissionen an einem Pelletofen und die anschließende Betrachtung deren Abscheideverhalten in einem nachgeschalteten Elektroabscheider. Hierzu werden unterschiedliche Verbrennungsbedingungen am Pelletofen erreicht durch einerseits Variation der Brennstoffzufuhr und andererseits Variation der Luftzufuhr. Es sollen die drei verschiedenen Verbrennungsluftbereiche mit Luftmangel, guter Verbrennung und Luftüberschuss untersucht werden. Charakterisiert werden diese über das Verbrennungsluftverhältnis λ , kurz Luftverhältnis.

Aus den Grundlagen und Untersuchungen an diesem Pelletofen in Moloeznik (2016) ist bekannt, dass bei Änderungen der Verbrennungsqualität durch Luftmangel oder Luftüberschuss hohe Emissionen und auch hohe Partikelemissionen entstehen. Dies wird genutzt, um absichtlich schwierige Emissionsbedingungen herzustellen, um dessen Einfluss auf das Verhalten der Abscheidung zu untersuchen. Hier wurde der betroffene Pelletofen als Vertreter der Feuerungsgruppe einer automatisch beschickten Einzelraumfeuerungsanlage auf seine notwendigen Einstellungen und die Höhe der resultierenden Partikelemissionen untersucht.

Ausgehend von den Einstellungen für gute Verbrennung mit den geringsten Partikelkonzentrationen bei $\lambda = 2 \dots 4$ wird die Luftzufuhr entweder reduziert auf $\lambda < 2$ in den Luftmangelbereich, beziehungsweise erhöht auf $\lambda > 4$ in den Bereich des Luftüberschusses. In allen drei Bereichen werden gleichermaßen Emissionsmessungen durchgeführt.

6.1.6.1 Variation der Partikelemissionen durch Änderung der Brennstoffwahl

Je nach Zusammensetzung von Biomassebrennstoffen bilden sich bei deren Verbrennung unterschiedliche Arten von Rückständen, die nicht nur das Verbrennungsverhalten im Feuerraum, sondern auch die emittierten Partikelarten und die Gesamtmenge an Partikelemissionen beeinflussen. Dies wird hier genutzt, um in einer automatisch beschickten Feuerung unter Verwendung verschiedener Brennstoffe Partikelemissionen mit

unterschiedlichen Konzentrationen und Eigenschaften zu erhalten. Beispielsweise ein höherer mineralischer Gehalt in Rinde oder halmgutartigen Brennstoffen führt zu einem höheren Aschegehalt und damit mehr festen Rückständen, was sich nicht nur in einem höheren Ascheaufkommen sondern auch in höheren Partikelkonzentrationen äußert.

6.2 Untersuchung zum Einfluss der Verbrennungsqualität an einem Pelletofen mit Elektroabscheider

6.2.1 Charakterisierung der Feuerungsparameter

Zur Herstellung von verschiedenen Partikelarten werden über zwei Einstellungen an Feuerungsparametern am Pelletofen verschiedene Verbrennungsbedingungen verursacht. Zum einen wird die Luftzufuhr und zum anderen die Brennstoffzufuhr variiert, um durch unterschiedliche Kombinationen der Verbrennungsluftverhältnisse die notwendige Bandbreite im Emissionsverhalten zu bekommen.

Die nachfolgende Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse zur Charakterisierung der Feuerungsabgase bei verschiedenen Feuerungseinstellungen. Die linke Abbildung stellt den Zusammenhang bei variierender Luftzufuhr und konstanter Brennstoffzufuhr dar. Es wäre zu erwarten, dass sich die Sauerstoffkonzentration und damit ebenfalls das Luftverhältnis mit verändernder Lufteinstellung deutlich ändern. Dies verhält sich jedoch nicht so, es lässt sich hier kein eindeutiger Einfluss erkennen. Es wird vermutet, dass das für die Luftzufuhr verantwortliche Gebläse den Verbrennungsluftstrom in dieser Konstellation nur sehr wenig verändert, so dass es keine signifikanten Auswirkungen für die Verbrennungsbedingungen hat. Anders verhält es sich mit der Einstellung der Brennstoffzufuhr, deren Zusammenhang zur Gaszusammensetzung und dem Luftverhältnis auf der rechten Seite dargestellt ist. Hier ist ein deutlicher Einfluss auf alle drei dargestellten Parameter zu erkennen. Bei der niedrigsten Brennstoffzufuhr und damit auch Brennstoffleistung, ergeben sich die höchsten Sauerstoffwerte und passend hierzu der höchste Luftüberschuss mit Lambda 8. Mit zunehmender Brennstoffzufuhr wird mehr Biomasse umgesetzt – der Kohlendioxidgehalt steigt an, der verbleibende Sauerstoffgehalt im Abgas sinkt und damit auch der Luftüberschuss und das Luftverhältnis auf unter 2.

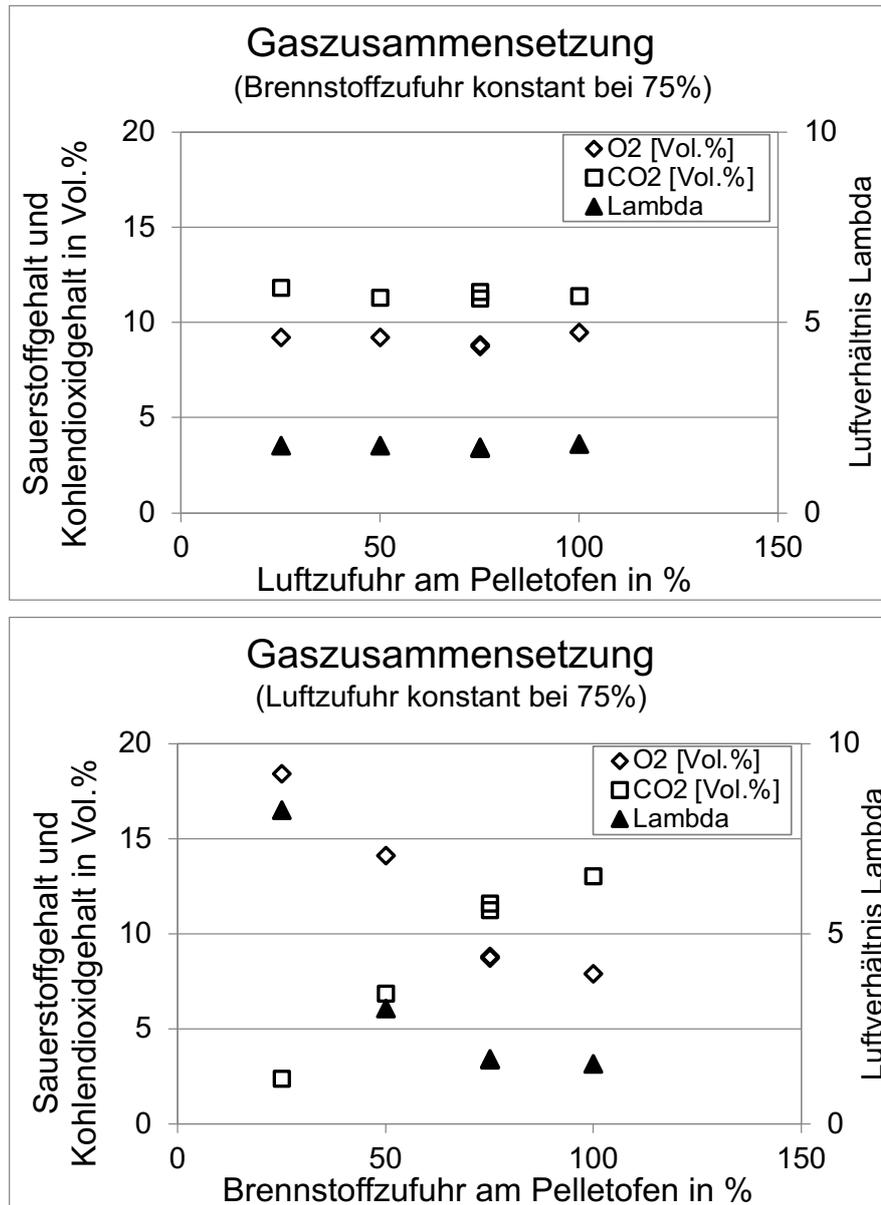


Abbildung 6.4: Gaszusammensetzung im Abgas und berechnetes Luftverhältnis in Abhängigkeit der verwendeten Feuerungseinstellungen (Auszug aus allen Messwerten); links: Zusammenhang zur Luftzufuhr, rechts: Zusammenhang zur Brennstoffzufuhr

Die nachfolgende Abbildung 6.5 zeigt alle Werte dieser Untersuchung, im Unterschied zur vorherigen Abbildung, in der nur die beschriebenen Kombinationen als Auswahl dargestellt sind. Da sich der Einfluss über die Brennstoffzufuhr deutlicher zeigt, wird dies als Parameter verwendet, um die Abgasbedingungen und das Verhalten der Feuerung darzustellen. Der Zusammenhang zeigt sich gleichermaßen wie vorher beschrieben, bei steigender Brennstoffzufuhr steigt der Biomasseumsatz und damit der Kohlendioxidgehalt, mehr Sauerstoff wird verbraucht, so dass der Sauerstoffgehalt im Abgas und auch das Luftverhältnis Lambda sinkt.

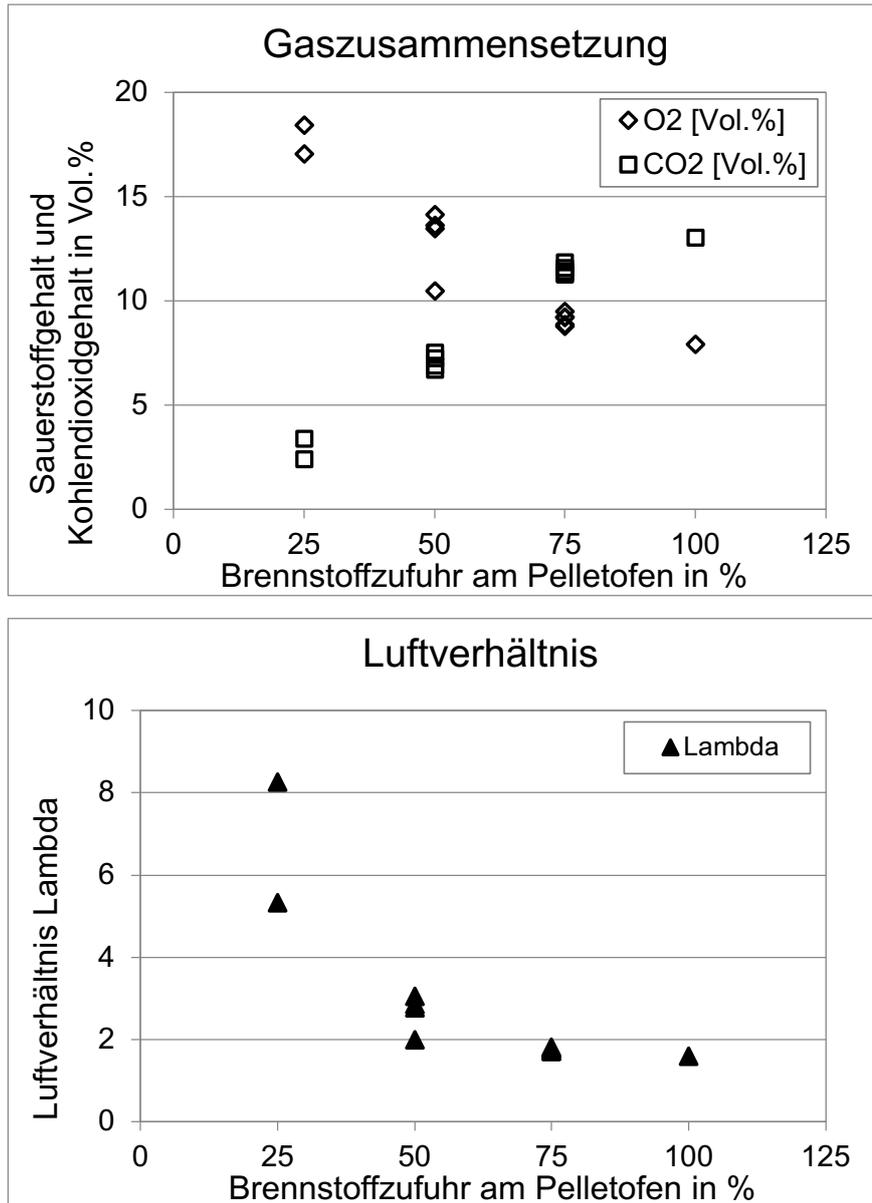


Abbildung 6.5: Charakterisierung der Feuerung durch die Gaszusammensetzung (links) und das Luftverhältnis Lambda (rechts) in Abhängigkeit der eingestellten Brennstoffzufuhr am Pelletofen (Darstellung aller Messwerte)

6.2.1 Ergebnisse zum allgemeinen Emissionsverhalten am Pelletofen

Charakterisiert wird das Emissionsverhalten über die Konzentrationen von Kohlenmonoxid als Leitgröße für die Verbrennungsqualität, den flüchtigen organisch gebundenen Kohlenwasserstoffen und dem Gesamtstaub.

Nachfolgend sind in Abbildung 6.6 die Mittelwerte der Messungen im Zusammenhang mit dem Luftverhältnis dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die vielfach aus der Literatur bekannte Form der Badewanne. Im Bereich der guten Verbrennung mit besten Verbrennungsbedingungen sind alle drei Schadstoff-Emissionen am niedrigsten. Auf dem linken Ast bei sinkender Luftzufuhr gelangen die Verbrennungsbedingungen in einen kritischen Bereich, in dem es bei hohen Temperaturen zum Luftmangel kommt, die

Emissionen steigen sehr stark an. Hierbei handelt es sich um einen sensiblen Bereich, bei dem schon kleine Änderungen eine große Auswirkung auf die Bildung der Schadstoffe haben. Auf dem rechten Ast kommt es durch die Verdünnung mit zu viel Luft im Bereich des Luftüberschusses zu einer Abkühlung bei der Verbrennung, die ebenfalls zu einem Anstieg an Schadstoffbildung führt. Diese Seite reagiert jedoch deutlich weniger sensibel auf eine Änderung der Verbrennungsbedingungen als die Seite des Luftmangelbereichs.

In Bezug auf das Emissionsverhalten lässt sich also festhalten, dass vor allem der Bereich an der Grenze zum Luftmangel aufgrund des steilen Emissionsanstiegs für die Partikelabscheidung als besonders kritisch zu betrachten ist. Das im Fachbereich bekannte Verhalten an diesem Kipppunkt kann durch die Versuche bestätigt werden. Die Auswirkungen auf das Abscheideverhalten werden nachfolgend gezeigt.

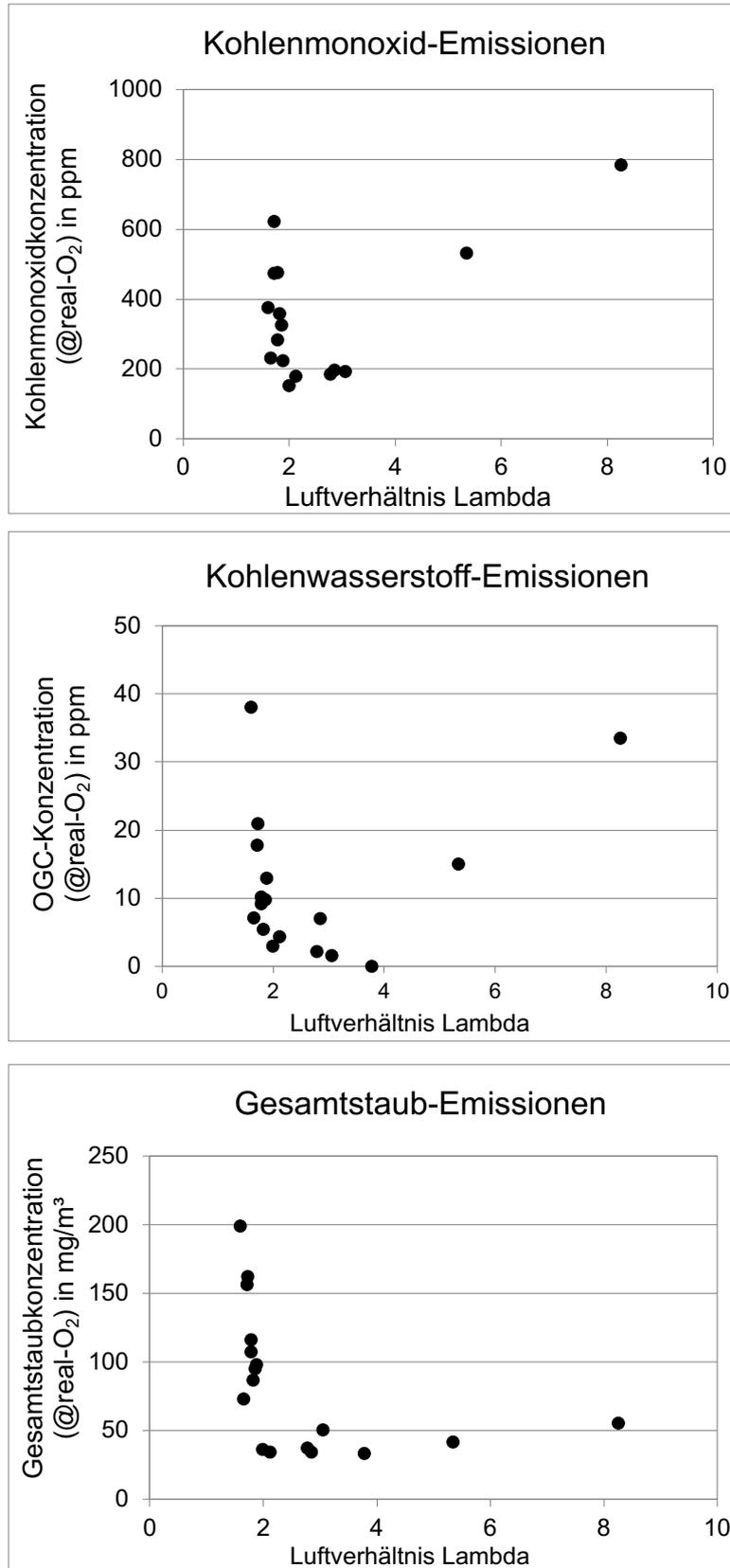


Abbildung 6.6: Allgemeines Emissionsverhalten am Pelletofen: Charakterisierung über die Konzentrationen im Abgas von: Kohlenmonoxid (oben), flüchtige Kohlenwasserstoffe (OGC, mitte) und Gesamtstaub (unten), jeweils als gemessene Werte

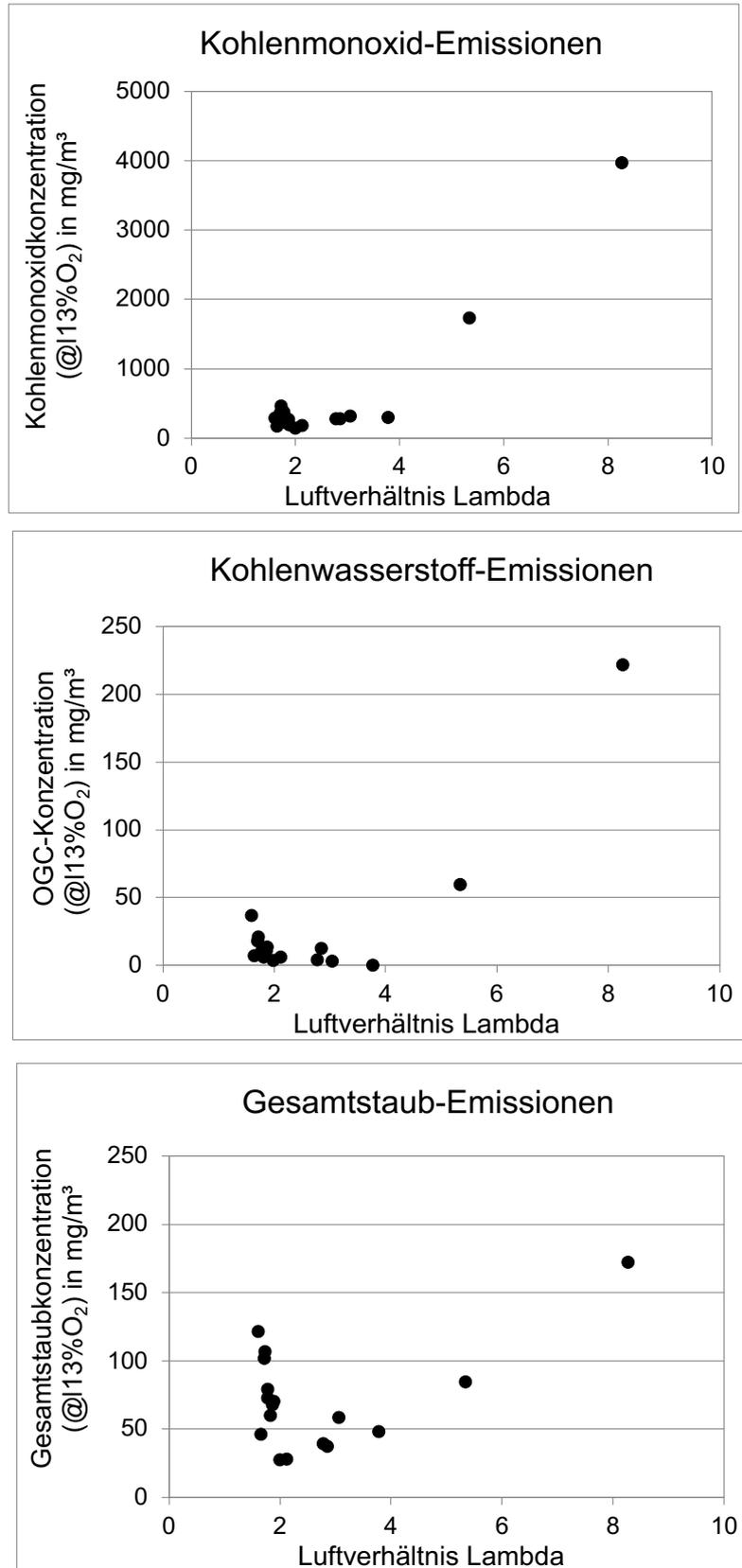
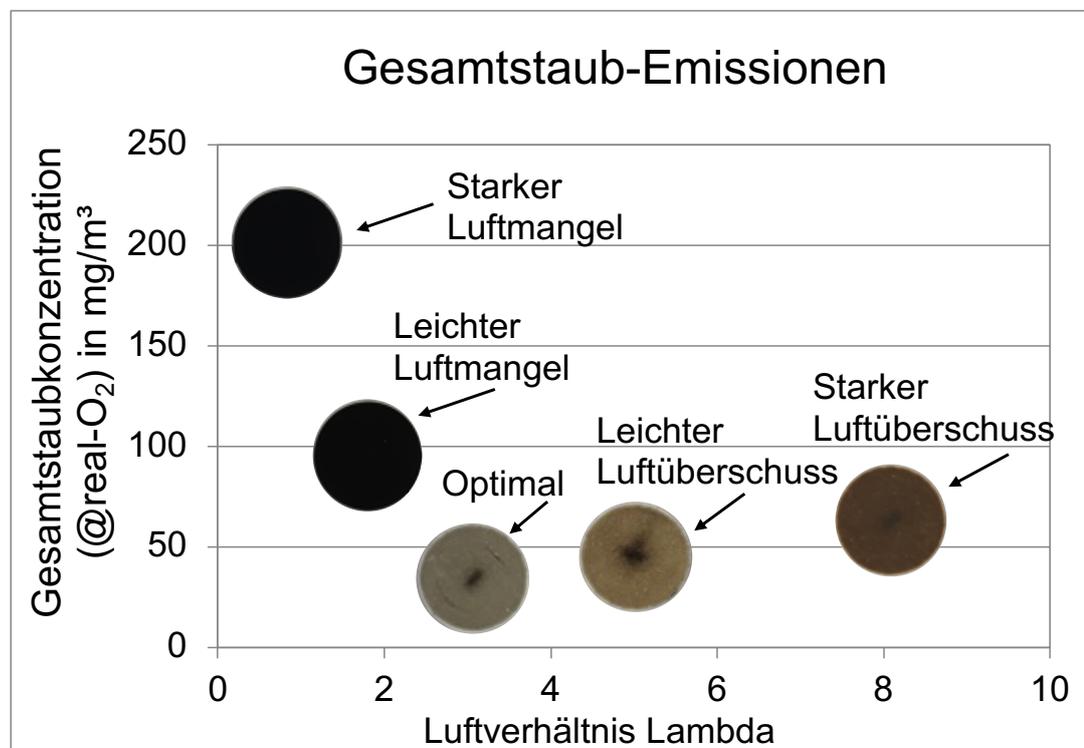


Abbildung 6.6 Fortsetzung: Allgemeines Emissionsverhalten am Pelletofen: Charakterisierung über die Konzentrationen im Abgas von: Kohlenmonoxid (oben), flüchtige Kohlenwasserstoffe (OGC, mitte) und Gesamtstaub (unten), jeweils bezogen auf 13% Sauerstoff

6.2.2 Zusammenhang zwischen Partikelemissionen und Verbrennungsqualität

Die Versuchsergebnisse bestätigen ein charakteristisches Bild der Partikelproben und damit ein charakteristisches Partikelemissionsverhalten, das sich in Abhängigkeit der Verbrennungsqualität in Form des Verbrennungsluftverhältnisses Lambda darstellen lässt.

Die verschiedenen Bereiche lassen sich im Wesentlichen durch drei Partikelarten beschreiben, die hier deutlich optisch zu unterscheiden sind. Im Luftmangel entstehen die schwarzen Rußverbindungen, im Bereich einer weitgehend optimalen Verbrennung eine hellere Probe durch einen hohen mineralischen Anteil weißer Färbung, die sich durch die Vermischung mit anderen Verbindungen als gräulich ergibt, und eine typisch bräunliche Verfärbung durch teerhaltige Verbindungen im Bereich des Luftüberschusses. Sowohl im Luftmangel wie im Luftüberschuss zeigen sich unterschiedliche Abstufungen (leicht, stark), die sich hauptsächlich durch die Intensität der beschriebenen Ausprägungen als auch durch eine Erhöhung der Gesamtstaubkonzentration in Richtung weg vom Optimum verstärken.



		Starker Luftmangel	Leichter Luftmangel	Optimale Luftzufuhr	Leichter Luftüberschuss	Starker Luftüberschuss
Lambda	-	1,6	1,8	2,8	5,3	8,3
Gesamtstaub- konzentration @real-O ₂	mg/m ³	199	87	34	42	55

Abbildung 6.7: Veranschaulichung zum charakteristischen Partikelemissionsverhalten in Abhängigkeit von der Verbrennungsqualität; beispielhafte Darstellung ausgewählter repräsentativer Gesamtstaubmessungen und Partikelfilter am Pelletofen

6.2.3 Ergebnisse zum Abscheideverhalten beim Einsatz am Pelletofen

Um das Abscheideverhalten beim Einsatz des Abscheiders am Pelletofen zu beschreiben, werden die Gesamtstaubkonzentration im Reingas betrachtet ebenso wie der Vergleich zur Gesamtstaubkonzentration im Rohgas. Die nachfolgende Darstellung zeigt die Ergebnisse hierzu und zeigt ebenso die absolute Emissionsminderung in mg/m^3 als Differenz der beiden Konzentrationen in Rohgas und Reingas als auch den klassischen Abscheidegrad (Abbildung 6.8).

Die Reingaskonzentration zeigt ein analoges Verhalten wie die Rohgaskonzentration mit einem steilen Anstieg im Bereich des Luftmangels und einem flachen Anstieg im Bereich des Luftüberschusses mit einem Minimum im Bereich der optimalen Luftzufuhr. Ebenso zeigt die absolute Emissionsminderung diese Kurve, wobei es einen sehr steilen Anstieg im Bereich des Luftmangels bei hohen Emissionen gibt und in den restlichen beiden Bereichen kaum einen Unterschied. Der Abscheidegrad hingegen lässt kaum einen Zusammenhang zum Luftverhältnis erkennen. Es scheint als würde auf beiden Ästen der Abscheidegrad mit der Entfernung zum Optimum abnehmen.

Aus diesem Grund wird in Abbildung 6.9 noch eine andere Darstellung gewählt. Hier werden die absolute Minderung und der Abscheidegrad über der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas dargestellt. Es lässt sich sagen, dass sich die Minderung in erster Linie von der Gesamthöhe der Emissionen abhängig zeigt. Der Bereich der Verbrennungsqualität spielt dabei keine signifikante Rolle.

Für den Abscheidegrad lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zur Rohgaskonzentration generell oder innerhalb der Bereiche der Verbrennungsqualität feststellen. In allen drei Bereichen Luftmangel, Lufoptimum und Luftüberschuss werden gleichermaßen höhere und niedrigere Abscheidegrade erreicht.

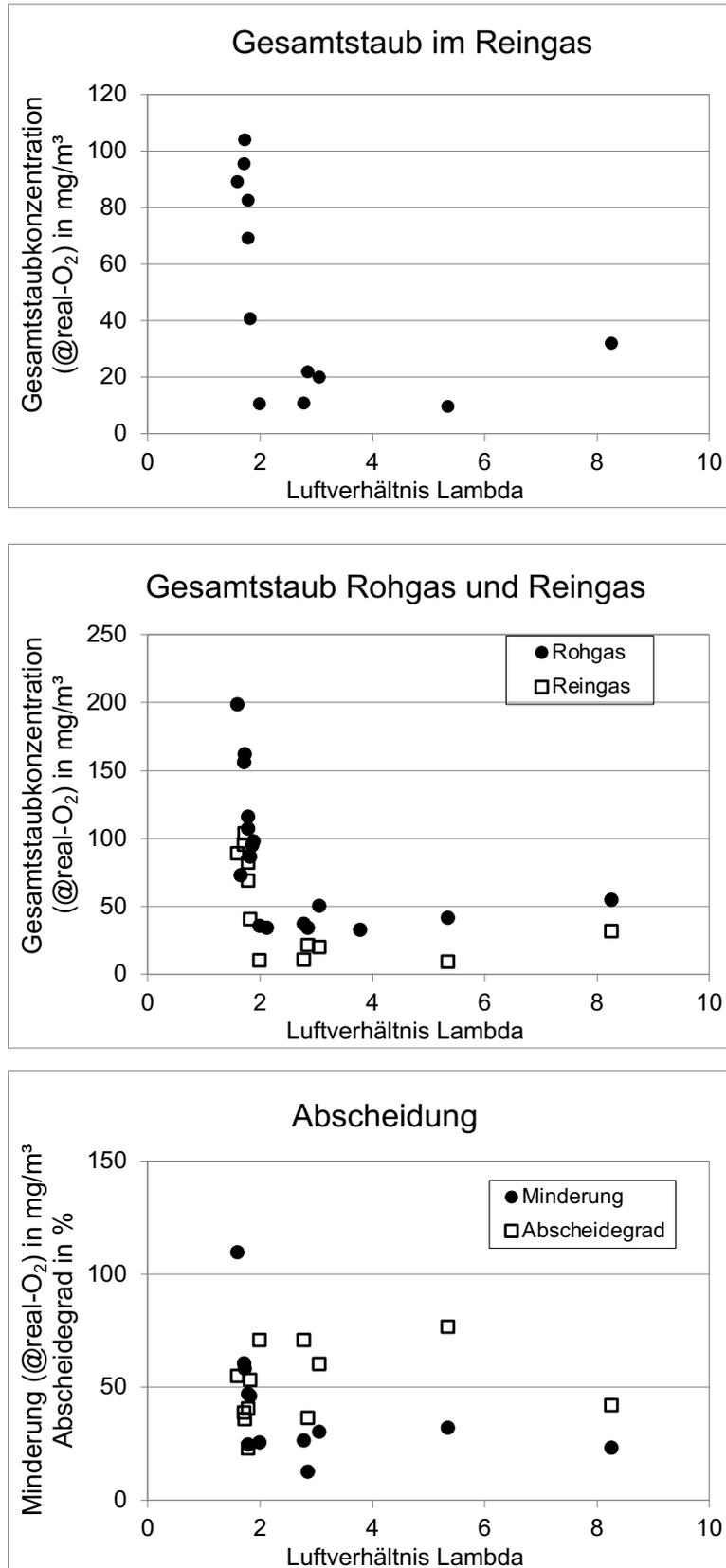


Abbildung 6.8: Abscheideverhalten am Pelletofen charakterisiert über: Gesamtstaubkonzentration im Reingas (oben), Rohgas- und Reingaskonzentration (mitte), absolute Emissionsminderung und Abscheidegrad (unten), jeweils als gemessene Werte

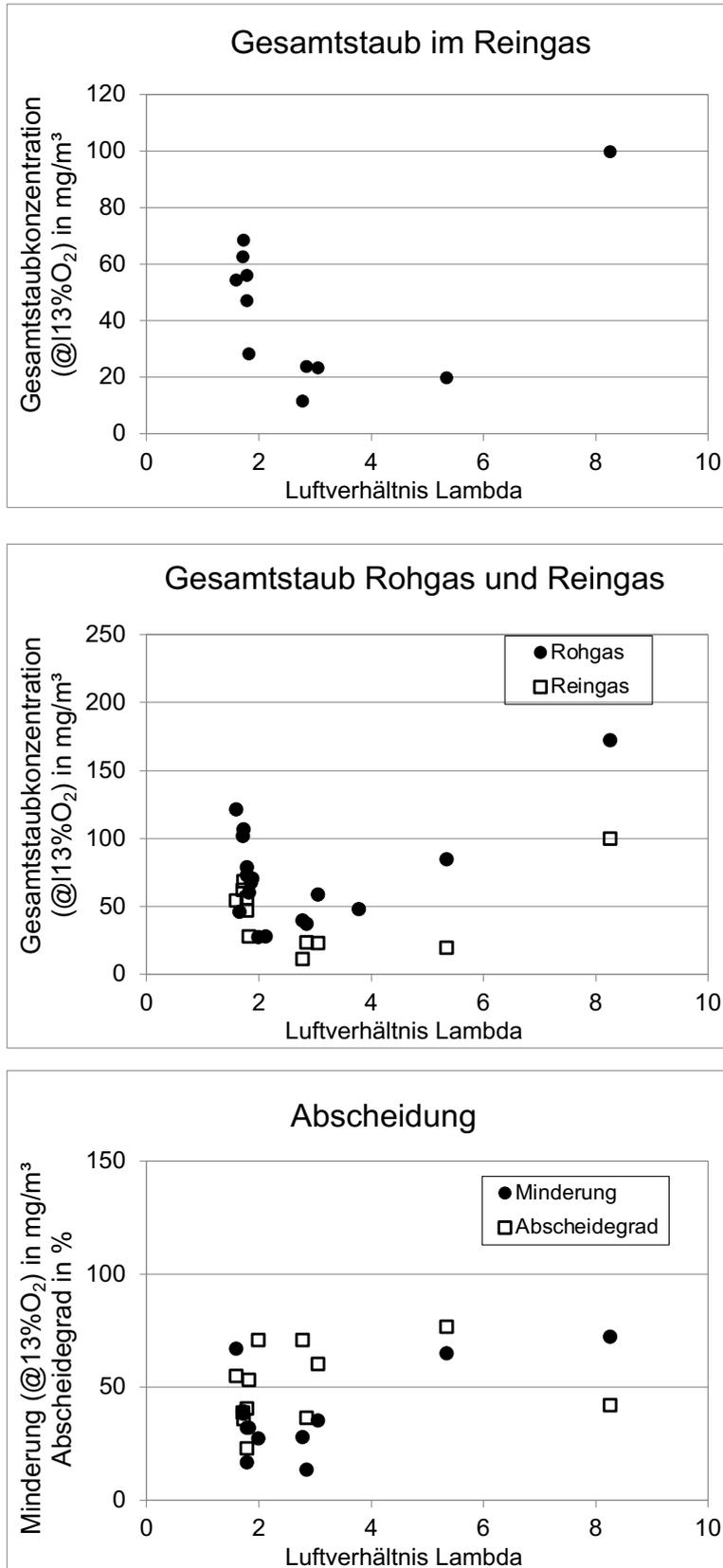


Abbildung 6.8 Fortsetzung: Abscheideverhalten am Pelletofen charakterisiert über: Gesamtstaubkonzentration im Reingas (oben), Rohgas- und Reingaskonzentration (mitte), absolute Emissionsminderung und Abscheidegrad (unten), jeweils bezogen auf 13% Sauerstoff

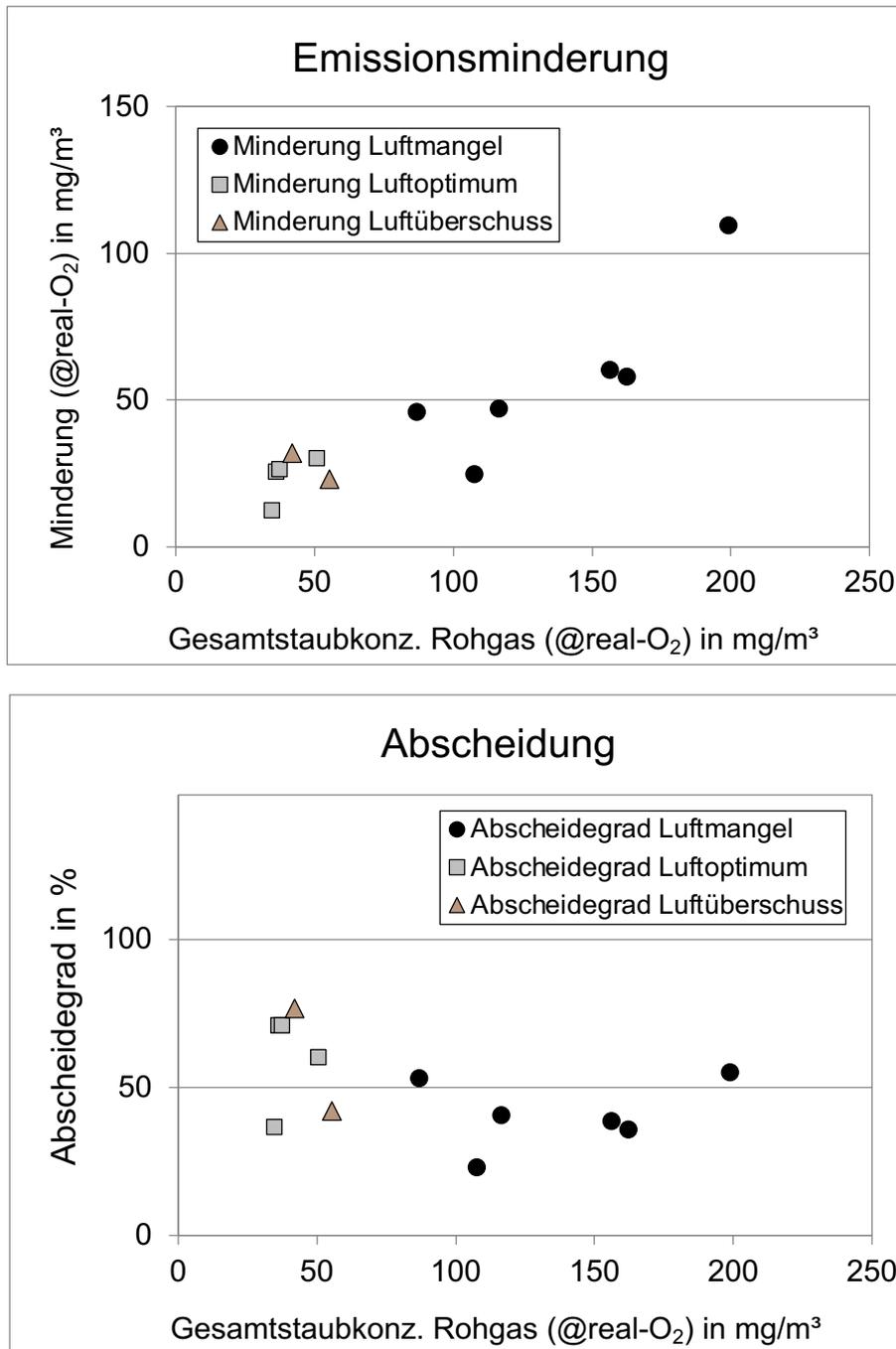


Abbildung 6.9: Versuchsergebnisse zur absoluten Emissionsminderung des Gesamtstaubes zwischen Rohgas und Reingas und zum Abscheidegrad in Abhängigkeit der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas am Pelletofen mit Elektroabscheider

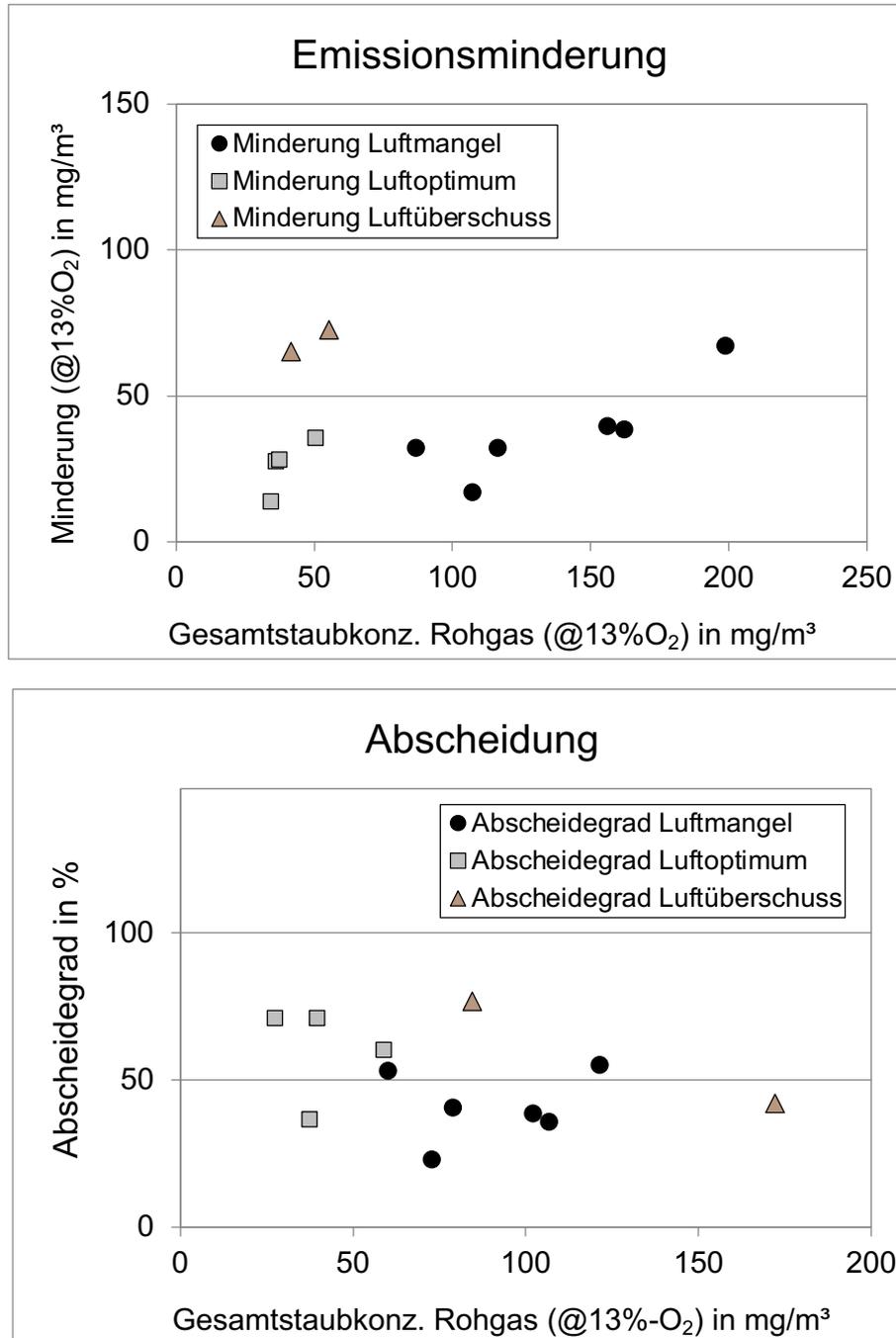
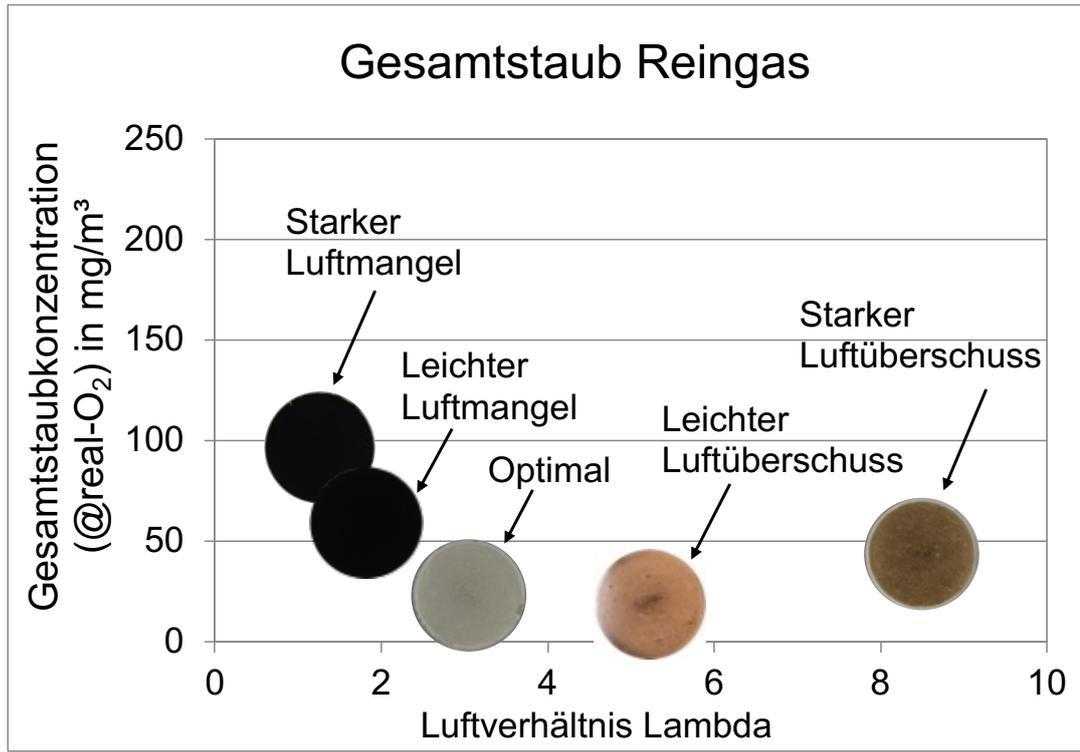


Abbildung 6.9 Fortsetzung: Versuchsergebnisse zur absoluten Emissionsminderung des Gesamtstaubes zwischen Rohgas und Reingas und zum Abscheidegrad in Abhängigkeit der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas am Pelletofen mit Elektroabscheider

Es kann demnach nicht nachgewiesen werden, dass die Partikelart, die durch Änderung der Verbrennungsqualität verursacht wurde, einen eindeutigen oder dominierenden Einfluss auf die Abscheidung in dieser hier verwendeten Kombination der Feuerung mit dem zweistufigen Elektroabscheider hat.



		Starker Luftmangel	Leichter Luftmangel	Optimale Luftzufuhr	Leichter Luftüberschuss	Starker Luftüberschuss
Lambda	-	1,6	1,8	3,1	5,3	8,3
Gesamtstaubkonzentration @real-O ₂ im Rohgas	mg/m ³	199	116	51	42	55
Gesamtstaubkonzentration @real-O ₂ im Reingas	mg/m ³	89	69	20	10	32
Absolute	mg/m ³	110	47	30	32	23
Abscheidegrad	%	55	41	60	77	42

Abbildung 6.10: Veranschaulichung zum Partikelabscheideverhalten in Abhängigkeit von der Verbrennungsqualität; beispielhafte Darstellung ausgewählter repräsentativer Gesamtstaubmessungen und Partikelfilter am Pelletofen

6.2.4 Charakterisierung des Abscheiders

Als wesentliche Betriebsgrößen des Abscheiders werden nachfolgend die elektrischen Kennwerte zu angelegter Hochspannung und resultierendem Stromfluss und elektrischer Leistung gegeben (Abbildung 6.11). Die Hochspannung ist konstant eingestellt und daher bis auf wenige Ausfälle über die Versuche gleich. Der Stromfluss ergibt sich aus den jeweiligen Bedingungen im Abgas und zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Gesamtstaubkonzentration im Rohgas oder im Reingas. Die elektrische Leistung ergibt sich damit zwangsläufig zu einem ähnlichen Verhalten bei konstanter Hochspannung.

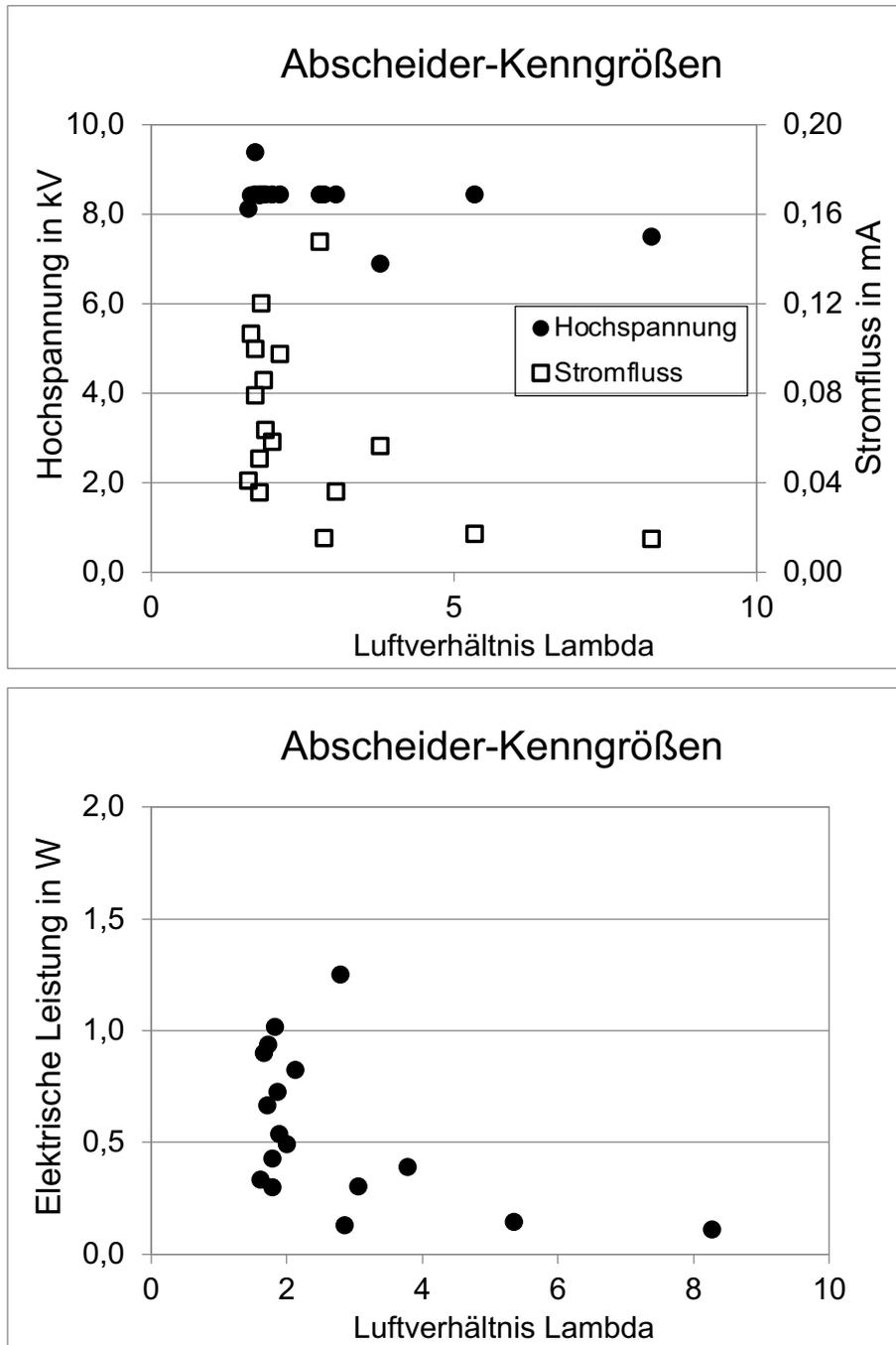


Abbildung 6.11: Betriebsgrößen des Abscheiders: Hochspannung, Stromfluss und elektrische Leistung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses

Theoretisch gilt der Zusammenhang, dass bei höherer elektrischer Leistung auch der Abscheidegrad erhöht wird. Dies kann hier nicht gezeigt werden, wie Abbildung 6.12 veranschaulicht. Weder beim Abscheidegrad noch bei der absoluten Minderung lässt sich ein Zusammenhang darstellen, weder generell noch unter Einfluss der Verbrennungsluftbereiche. Es ist anzunehmen, dass zu viele andere Effekte diese Tendenz überlagern.

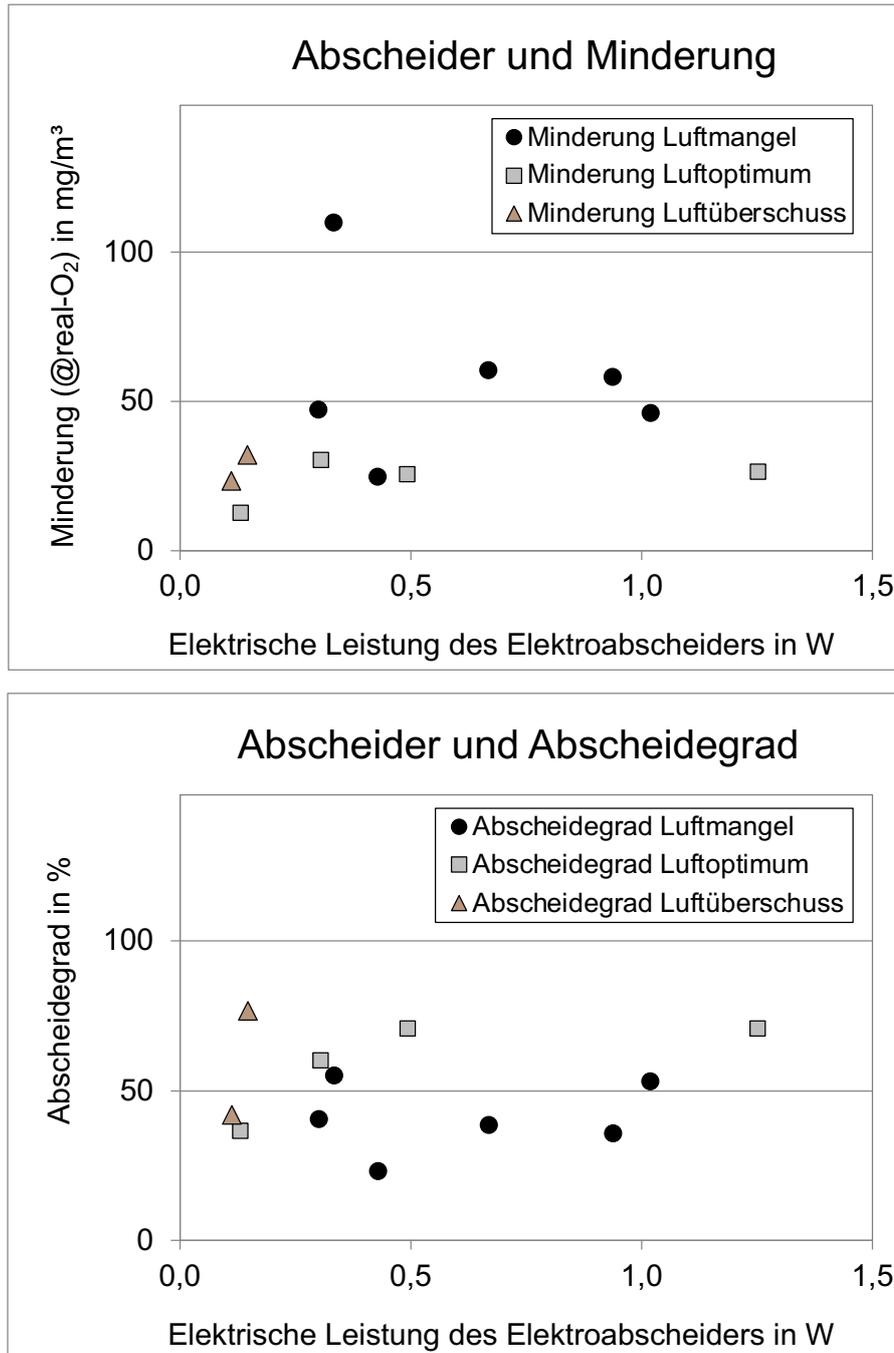


Abbildung 6.12: Zusammenhang zwischen eingebrachter elektrischer Leistung und Emissionsminderung und Abscheidegrad, unterschieden nach Verbrennungsqualität (Luftmangel, Luftoptimum und Luftüberschuss)

Die Ursachen für das Verhalten des Stromflusses am Elektroabscheider (Abbildung 6.11) sollen weitergehend betrachtet werden. Es zeigt sich ein erhöhter Stromfluss im Bereich des Luftmangels, nicht aber im Luftüberschuss. Eine Vermutung besteht im Einfluss der Temperatur des Abgases. Hierfür ist der Zusammenhang gezeigt in Abbildung 6.13. Es zeigt sich kein ähnliches Verhalten, somit wird die Gastemperatur als Hauptursache für unwahrscheinlich befunden. Eine weitere Vermutung besteht im Einfluss der Gaszusammensetzung, da Moleküle mit Sauerstoff durch dessen elektronegative Eigenschaften den Sprühstrom der Corona-Entladung begünstigen. Hier ist jedoch auch

kein direkter Zusammenhang erkennbar, zudem der Gesamtanteil als Summe von Sauerstoff und Kohlendioxid vergleichbar bleibt und damit auch der Stickstoffanteil, der den Sprühstrom verschlechtern würde. Im Bereich des Luftüberschusses steigt das Kohlenmonoxid deutlich an, der Stromfluss jedoch nicht, so dass dies ebenfalls nicht als Einfluss gesehen werden kann (Abbildung 6.6). Der Stromfluss scheint sich hingegen mit der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas parallel zu verhalten. Dies könnte über verschiedene Weisen zusammenhängen, die beide jedoch auf der hohen Leitfähigkeit von Rußpartikeln basieren. Zum einen wäre möglich, dass sich durch hohe Rußemissionen viele leitende Beläge auf den Bauteilen ablagern und zu Kriechströmen führen. Dies würde sich durch einen erhöhten Stromfluss bemerkbar machen. Da jedoch die Abscheidung trotzdem hoch bleibt und nicht einbricht, würde es mehr dafür sprechen, dass der vermehrte Stromfluss tatsächlich ins Abgas geleitet wird. Das würde bedeuten, dass der höhere Stromfluss durch die höheren Partikelemissionen resultiert. Im Bereich des Luftüberschusses tritt dies nicht auf, was zusätzlich nahelegt, dass nicht nur die reine Gesamtkonzentration an Staubpartikeln eine Rolle spielt, sondern ebenfalls die Art der Partikel, in diesem Fall die Rußverbindungen. Möglich wäre eine positive Beeinflussung durch vermehrte Aufnahme von Elektronen ins Gas, möglicherweise aufgrund hohem Ladungsabtransport aus dem Gas auf die Rußpartikel.

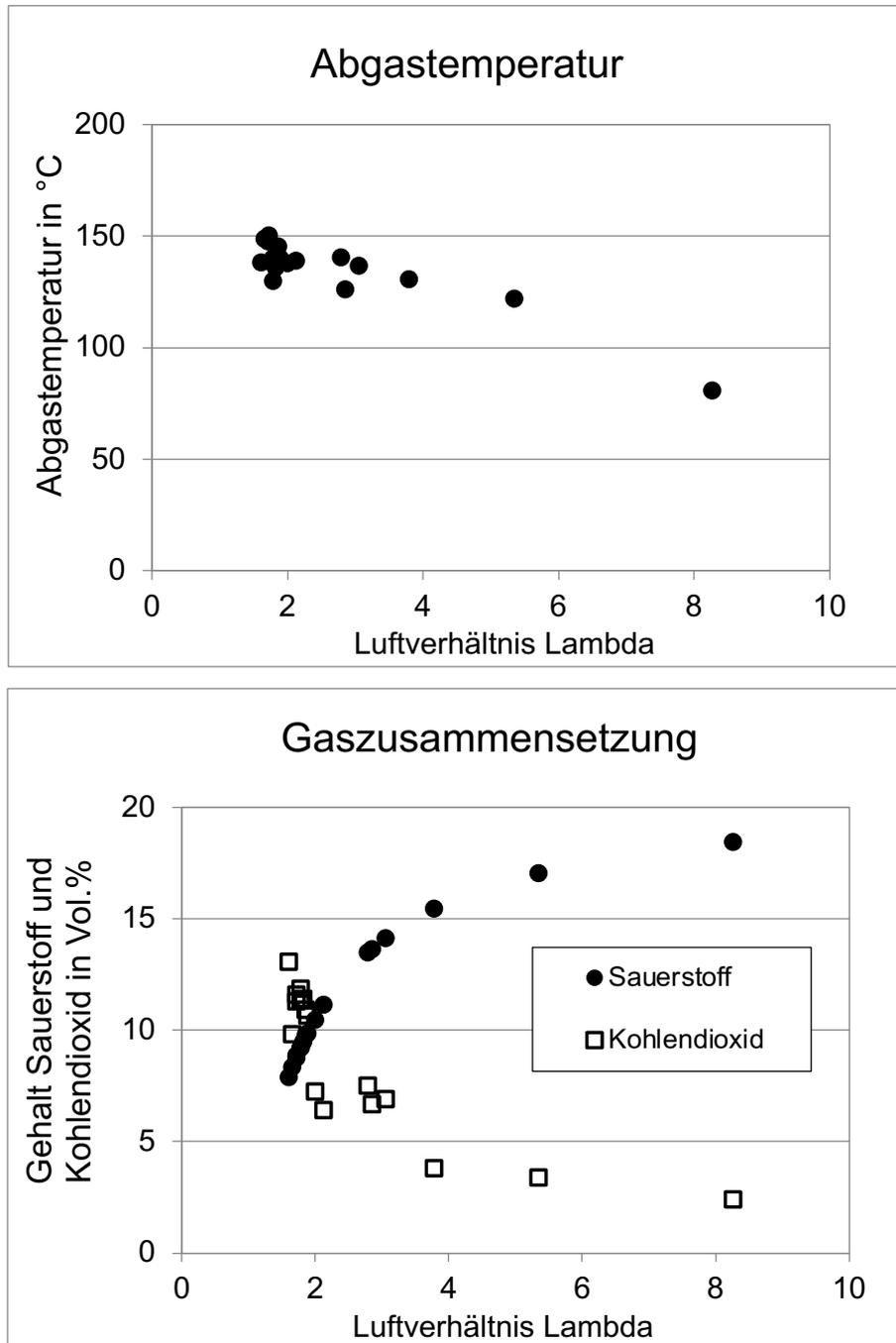


Abbildung 6.13: Zusammenhang zur Abgastemperatur und der Gaszusammensetzung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses

Als Fazit zu diesem Effekt lässt sich damit die Vermutung anstellen: die Partikelart beeinflusst in dieser Kombination von Feuerung und Abscheider die Aufladung innerhalb der Ionisationsstufe durch Erhöhung des Stromflusses ins Abgas, jedoch nicht die nachgeschaltete Abscheidung der Partikel in der Abscheidestufe erkennbar erhöht. Unklar ist, inwieweit dies von der speziellen Bauform des verwendeten Abscheiders abhängt. Hierzu müssen aus den anderen Untersuchungen Hinweise zum Verhalten in anderen Abscheidern verwertet und diskutiert werden (siehe Kapitel 8).

6.2.5 Ergebnisse der Kohlenstoffanalysen repräsentativer Partikelproben

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Kohlenstoffanalysen ausgewählter Partikelfilterproben der Gesamtstaubmessung vorgestellt.

Exemplarische Ergebnisse einer Ionenanalyse bei guter Verbrennung mit optimaler Luftzufuhr sind in der nächsten Untersuchung in Kapitel 6.3.4 enthalten.

Je Bereich der Verbrennungsqualität werden die verschiedenen Kohlenstoff-Fractionen für Rohgas und Reingas gezeigt. Es wird unterschieden nach elementar gebundenem Kohlenstoff (TEC, Ruß), organisch gebundenem Kohlenstoff (TOC, Teere) und anorganisch gebundenem Kohlenstoff (TIC). Alle drei Fractionen bilden als Summe den Anteil an gesamtem Kohlenstoff (TC) in einer Probe. Als Rest sind hier sämtliche andere Stoffe zusammengefasst, also alle Nicht-Kohlenstoffverbindungen. Hierzu gehören sowohl alle mineralischen Salze und Bestandteile als auch Wasserstoff und Spurenelemente. Aus den Anteilen an Kohlenstoff und Wasserstoff kann ein molares C/H-Verhältnis berechnet werden (Reitberger, 2016). Dies bildet einen Hinweis über die Art der Kohlenstoffverbindungen, ein hohes C/H-Verhältnis weist auf einen hohen C-Anteil in der Verbindung hin, was charakteristisch für Ruß ist, ein etwas niedrigeres Verhältnis deutet auf Teerverbindungen mit einem höheren Wasserstoffanteil hin.

In Abbildung 6.14 sind die verschiedenen stoffspezifischen Fractionen dargestellt. Mittels der Gesamtstaubkonzentration kann ihr Anteil an der Probe auf eine Konzentration im Abgas umgerechnet werden. Deutlich zu erkennen ist die jeweils dominierende Fraction der Probe aus dem Rohgas. Im Luftmangel dominiert der elementare Kohlenstoff, was für einen hohen Rußanteil spricht und die Optik der Probe bestätigt. Im Luftüberschuss dominiert der organisch gebundene Anteil, der die Teere repräsentiert und ebenfalls konsistent mit der optischen Erscheinung ist. Bei guter Verbrennung im Bereich des Luftoptimums sind wie zu erwarten deutlich weniger Kohlenstoffverbindungen enthalten.

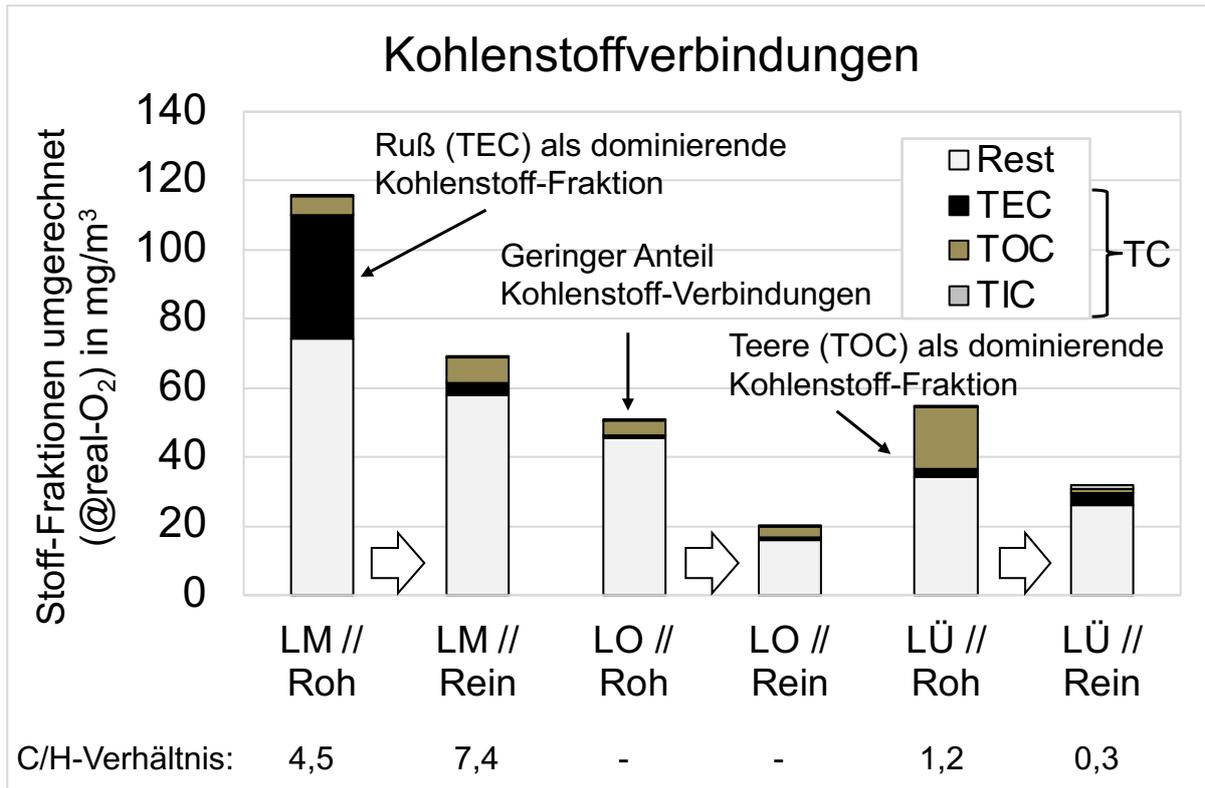


Abbildung 6.14: Kohlenstoff-Fractionen der Partikelanalysen, umgerechnet als Konzentrationen über die Gesamtstaubkonzentration; eingeteilt nach Verbrennungsqualität: Luftmangel (LM), Luftpoptimum (LO) und Luftüberschuss (LÜ) und Rohgas und Reingas

In Abbildung 6.15 sind die Ergebnisse zum stoffspezifischen Abscheideverhalten der Kohlenstoff-Fractionen dargestellt. Die Betrachtung zur absoluten Minderung zeigt sich als anschaulicher und verdeutlicht den Anteil der Kohlenstoff-Minderung an der Minderung des Gesamtstaubs. Die jeweils vorherrschende Fraktion wird auch am meisten gemindert. Je höher die Rohgaskonzentration, umso höher die absolute Minderung. Bei der Betrachtung des Abscheidegrades lässt sich ebenfalls erkennen, dass im Luftmangel und im Luftüberschuss der Kohlenstoff überproportional im Vergleich zum Gesamtstaub gemindert wird, im Luftpoptimum verhält es sich genau umgekehrt.

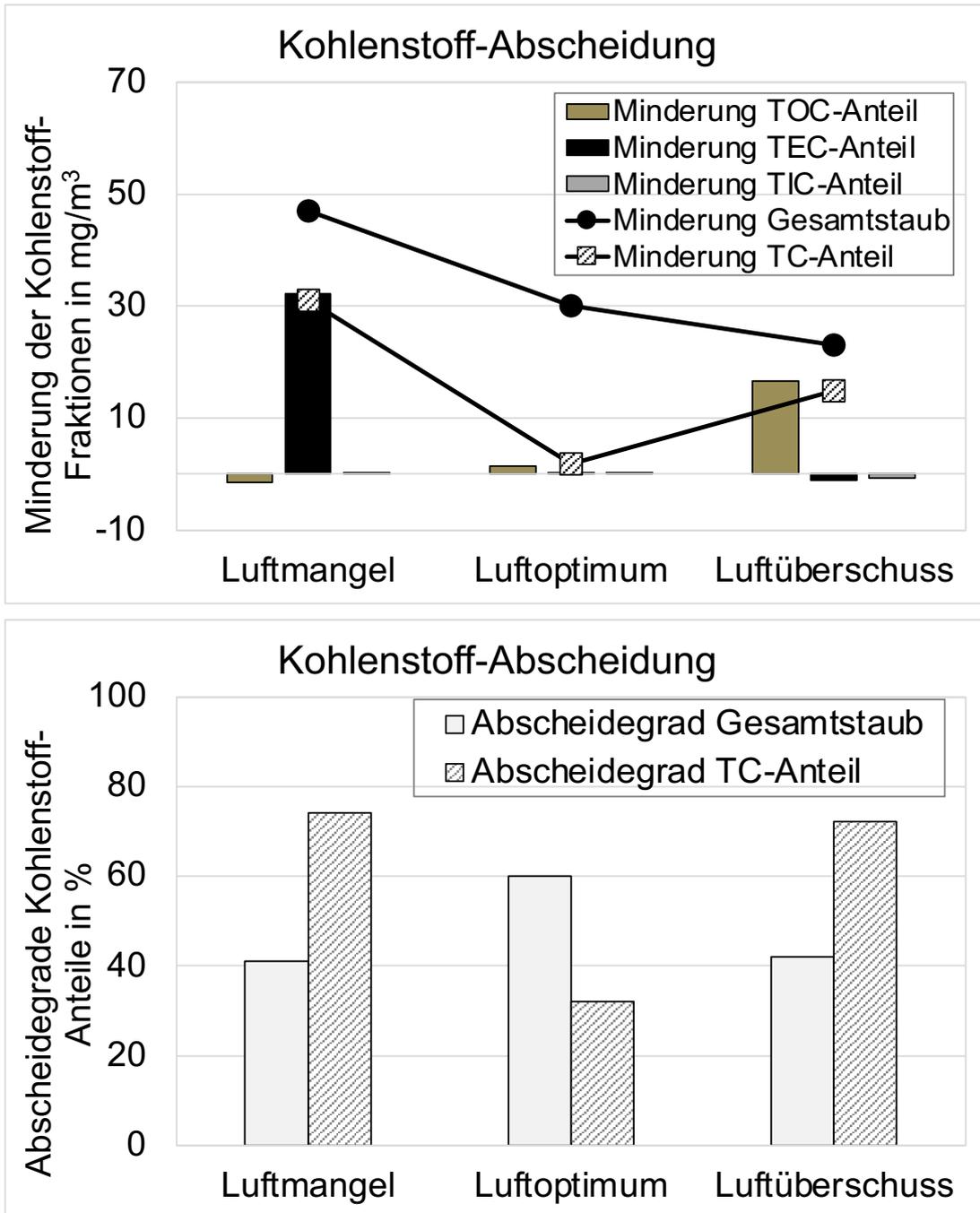


Abbildung 6.15: Abscheidung der Kohlenstoff-Fractionen am Pelletofen mit Elektroabscheider, eingeteilt nach Verbrennungsqualität

Bezüglich der Abscheidung ist zu erkennen, dass die jeweils dominierende Fraktion der unterschiedlichen Verbrennungsqualitäten am meisten abgeschieden wird, egal um welche der Fraktion es sich handelt. Dies legt den Schluss nahe, dass die Abscheidung in dieser Untersuchung nicht primär von der Art der Verbindung abhängt.

Diese Ergebnisse aus der genaueren Betrachtung der Kohlenstoffanteile zeigen die gleiche Aussage wie die Ergebnisse der Gesamtstaubmessungen: es kann nicht festgestellt werden, dass eine der Fraktionen bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden wird.

6.2.6 Ergebnisse zur Korngrößenverteilung

Elektroabscheider unterliegen dem ungünstigen technologischen Umstand, dass ihr Effizienz-Minimum mit dem üblichen Maximum der Korngrößenverteilung bei Biomassekleinfeuerungen zusammenfällt. Daher sollen hier ergänzend Ergebnisse zur Messung der Korngrößenverteilung gezeigt werden, um diesbezüglich eine Abschätzung für diese Kombination von Feuerung und Abscheider treffen zu können.

Die Ergebnisse zur Korngrößenverteilung für Rohgas und Reingas sind in Abbildung 6.16 dargestellt. Die Verteilung im Rohgas zeigt das typische Maximum bei 0,1 µm und ist konsistent zu den Erwartungen und anderen Untersuchungen (Schäfer, 2016), die teils an derselben Feuerung durchgeführt wurden. Es wird deutlich, dass der Hauptanteil der Partikelmasse in der Größenklasse PM 1 mit über 90 % zu finden ist, es sich also bei den meisten der Partikelemissionen um Ultrafeinstaub handelt. Die Korngrößenverteilung im Reingas ist weniger eindeutig. Zu sehen ist ein Maximum im gleichen Bereich wie im Rohgas, das jedoch weniger ausgeprägt ist und mit weiteren Schwankungen über die anderen Größenfraktionen. Was den Ultrafeinstaub angeht, liegen im Rohgas 96 % in dieser Fraktion, im Reingas sind es mit 82 % etwas weniger. Es könnte also vermutet werden, dass die Verteilung durch den Einsatz eines Elektroabscheiders in Richtung größerer Partikel verschoben wird.

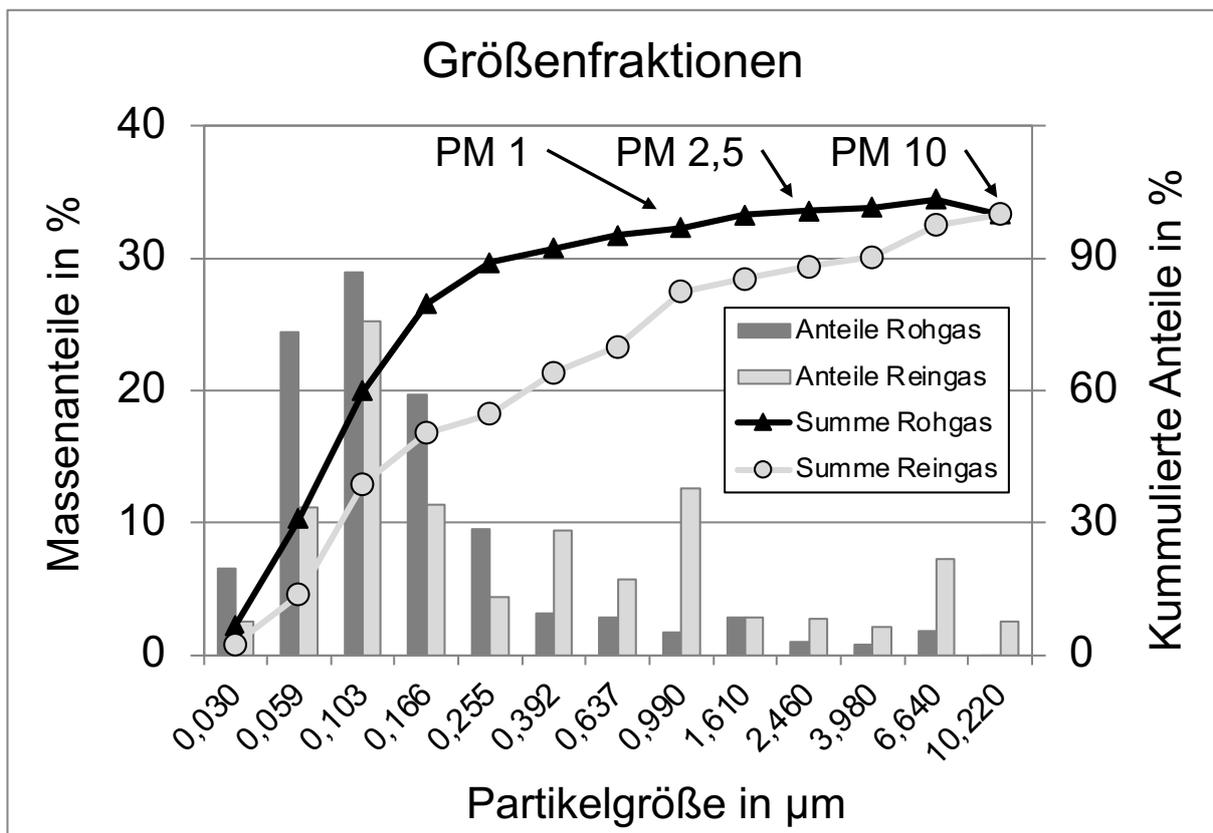


Abbildung 6.16: Korngrößenverteilung als Massenanteile der Größenfraktionen und kumulierte Anteile in Rohgas und Reingas am Pelletofen mit Elektroabscheider

Vielfach wird in Elektroabscheidern eine Verschiebung hin zu größeren Partikelfraktionen gefunden, dies scheint hier ähnlich zu sein, zumindest wenn ausschließlich die Verteilung

betrachtet wird. Hierzu soll auch die Gesamthöhe an Partikelemissionen über die Gesamtstaubkonzentration betrachtet werden, um dies zu relativieren. Wird die Verteilung anhand der Gesamtstaubemissionen umgerechnet, kann eine Abschätzung zur Emission und Abscheidung der Größenfraktionen getroffen werden, wie in Abbildung 6.17 gezeigt. Hier ist zu sehen, dass sich das Maximum an der gleichen Stelle befindet, die Gesamtmenge jedoch deutlich vermindert ist, also in diesem Bereich eine hohe Abscheidung stattfindet. Die Zunahme der Bereiche um und über 1 µm ist sehr minimal und kann aufgrund der sehr geringen Massen nicht als signifikant betrachtet werden.

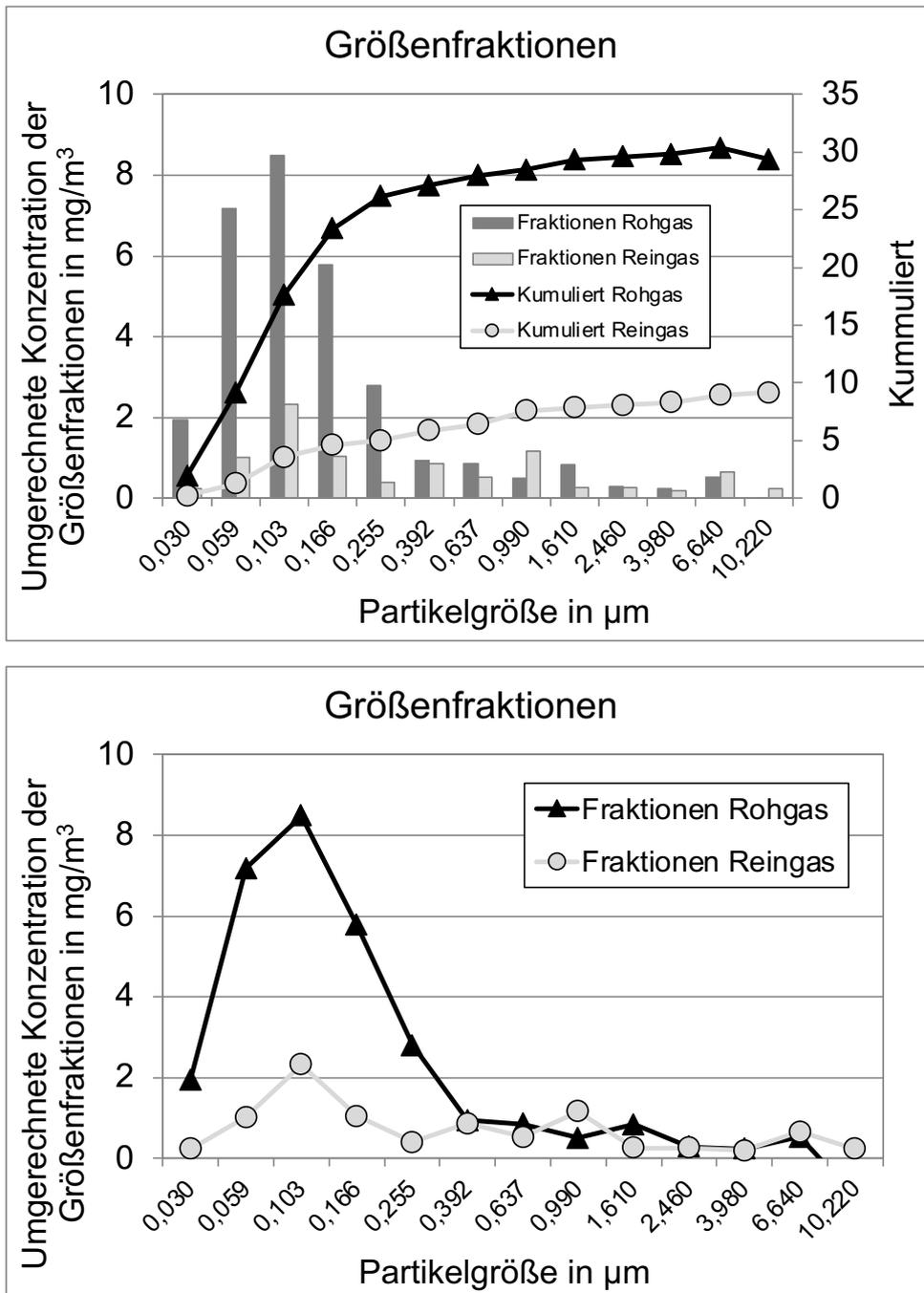


Abbildung 6.17: Partikelgrößenfraktionen am Pelletofen in Rohgas und Reingas, umgerechnet über die Gesamtstaubkonzentration

Sollen Aussagen über die Abscheidung getroffen werden, wird üblicherweise der Fraktionsabscheidegrad angegeben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.18 zu sehen. Durch die Art der Berechnung des Abscheidegrades werden kleine Werte oft stark verzerrt, so wie hier zu sehen für den Wert bei 0,99 μm . Werden die absoluten Werte betrachtet, hier dargestellt über die absolute Minderung der Fraktionen wird deutlich, dass die überwiegende Abscheidung im Bereich des Maximums der Verteilung um 0,1 μm herum stattfindet.

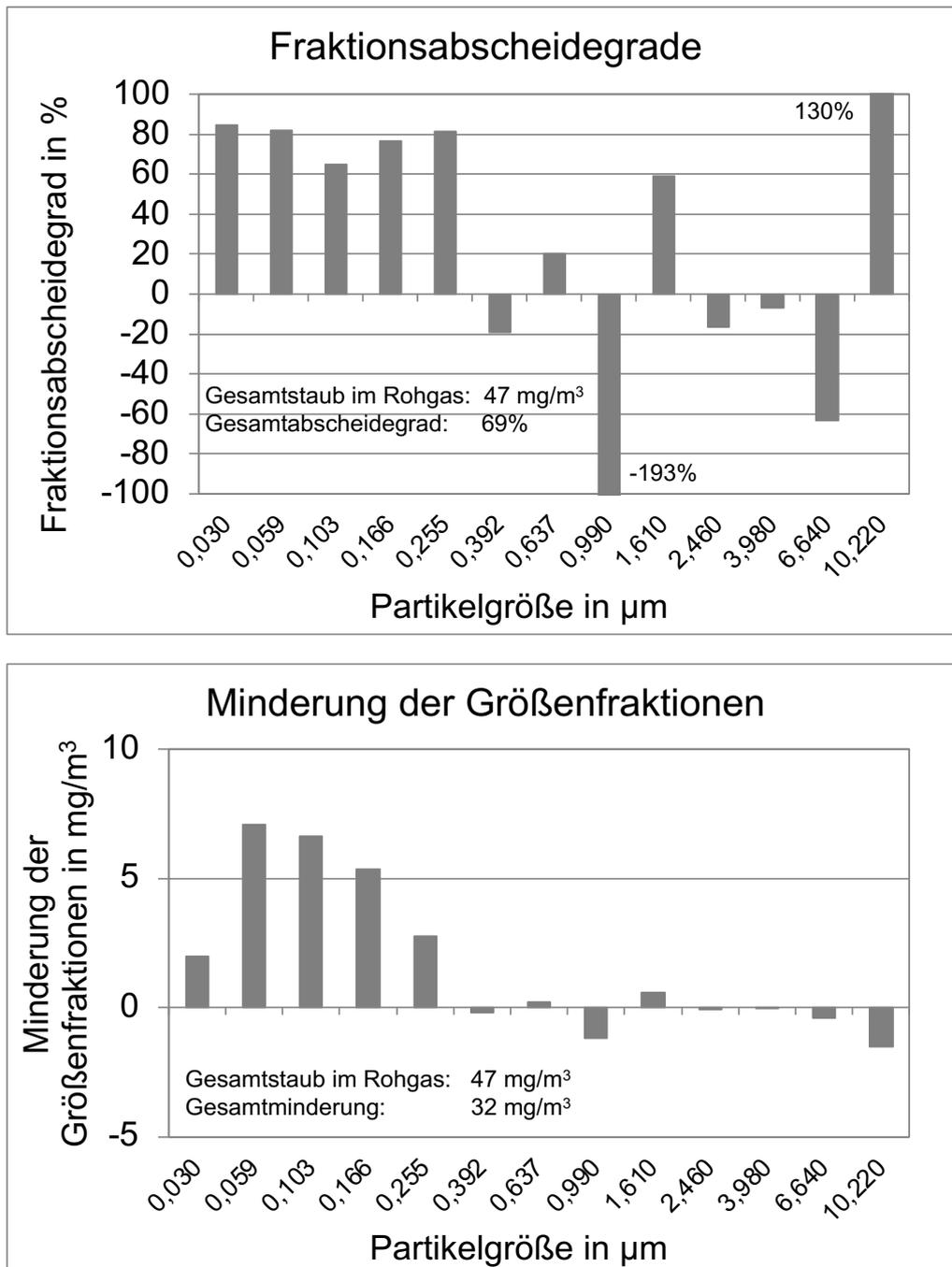


Abbildung 6.18: Abscheidegrade und absolute Minderung der Partikelgrößenfraktionen am Pelletofen mit Elektroabscheider

6.3 Untersuchung zum Einfluss der Brennstoffart an einer Hackgutfeuerung mit Elektroabscheider

6.3.1 Ergebnisse zu Feuerungsparametern und allgemeinem Emissionsverhalten

Grundsätzlich befinden sich die Feuerungsparameter und die Abgaszusammensetzung in einem ähnlichen Bereich, der Sauerstoffgehalt variiert um ca. 10,5-11 Vol.%. Unterschiede zeigen die Kohlenmonoxid-Emissionen, diese sind bei Hackschnitzeln höher als bei den Pelletbrennstoffen, dasselbe gilt für die Partikelemissionen.

Tabelle 6.4: Versuchsdaten der Messungen zum Vergleich der Brennstoffe am Hackgutkessel mit Elektroabscheider

Versuchsnummer	Feuerung (Hackgutkessel)	Abgaszustand Rohgas										Abgaszustand Reingas				Abscheider (ESP) und Abscheidegrad					
		Brennstoff	Abgastemperatur T_Kessel [°C]	O2 [Vol. %]	CO2 [Vol. %]	CO (unbezogen) [ppm]	CO (bezogen) [mg/m³]	Luftüberschuss lamda [-]	Abgastemperatur T_Rohgas [°C]	Unterdruck Abgas [Pa]	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 [%]
1.06	HHS	197	10,8	9,8	143	152	2,0	172	7	66	51	96	10,8	32	25	10,6	8,2	0,07	0,55	51	26
1.07	HHS	198	10,6	9,4	119	119	2,0	172	6	78	60	102	10,6	39	30	10	8,9	0,04	0,35	50	30
1.09	HoP	209	11,1	9,5	21	21	2,1	178	6	29	23	107	11,1	8	6	10	7,1	0,17	1,22	72	17
1.10	HoP	214	10,3	10,4	23	21	2,0	183	5	20	15	110	10,3	7	6	10	9,1	0,14	1,31	63	9
1.11	PM	158	10,5	10,1	21	20	2,0	135	5	38	29	80	10,5	21	16	10	9,4	0,08	0,79	43	12
1.12	PM	158	11,4	9,2	15	16	2,2	135	6	31	25	80	11,4	19	16	10	9,4	0,04	0,42	37	10

6.3.2 Ergebnisse zum Gesamtstaub und dem Abscheideverhalten

In der folgenden Abbildung 6.19 sind die Ergebnisse zur Gesamtstaubkonzentration für die verschiedenen Brennstoffe zu sehen. Wie zu erwarten, verursacht die Verwendung der Holzpellets die niedrigste Emission am Hackgutkessel. Zum Vergleich sind Daten bei ähnlichen Verbrennungsbedingungen vom Pelletofen mit Holzpellets ergänzt. Dessen Emissionen liegen trotz des gleichen Brennstoffes jedoch höher. Die Beimischung von Heupellets zum Pelletmix erhöht die Emissionen etwas. Die höchsten Emissionen

verursachen die Holzhackschnitzel. Dieser Brennstoff ist deutlich inhomogener und besitzt einen Rindenanteil, was zu diesem Emissionsverhalten führt.

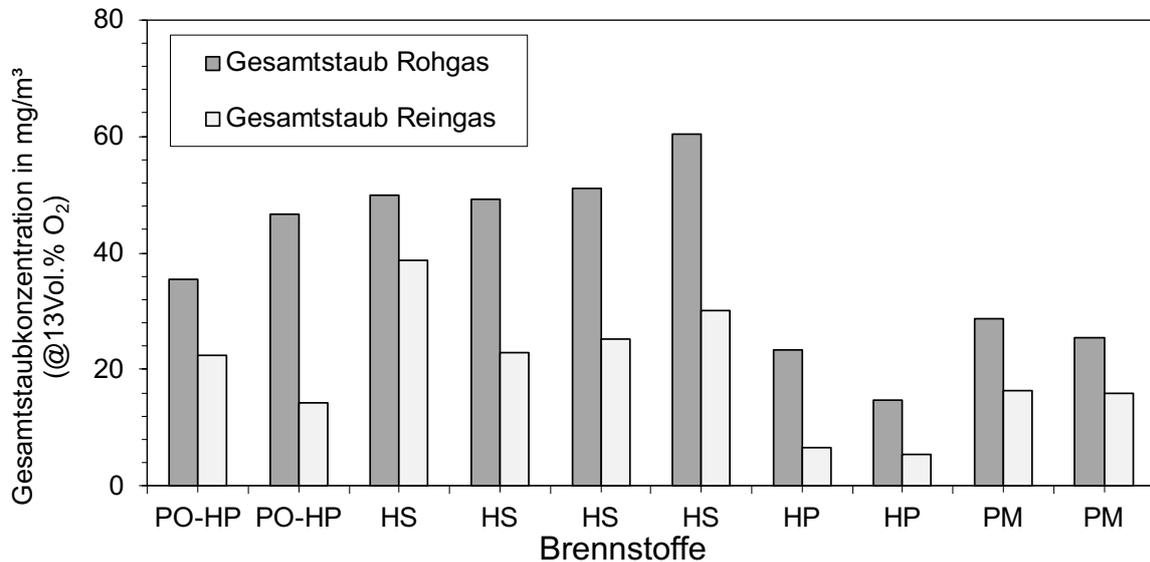


Abbildung 6.19: Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas in Abhängigkeit des Brennstoffes am Hackgutkessel (HK) und Vergleich zum Pelletofen (PO): HP: Holzpellets, HS: Hackschnitzel, PM: Pelletmix

Zur Verdeutlichung sind die Werte noch nach Brennstoff klassiert im Kastendiagramm zu sehen in Abbildung 6.20.

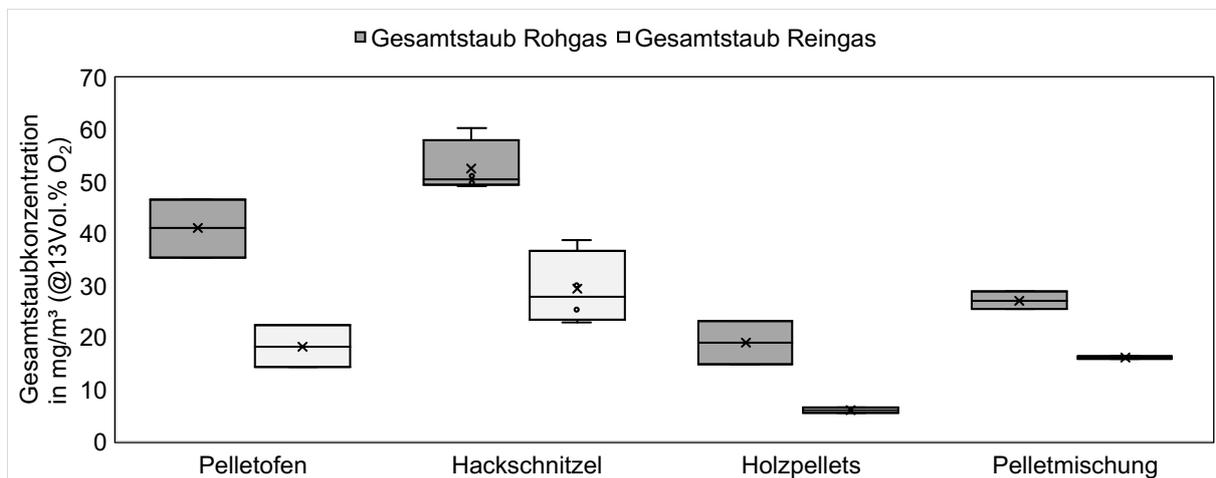


Abbildung 6.20: Kastendiagramm der Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas in Abhängigkeit des Brennstoffes und der Feuerung

Zum Abscheideverhalten des Gesamtstaubs in Abbildung 6.21 lässt sich sagen, dass absolut betrachtet die Minderung bei Hackschnitzeln am größten ist, hier sind jedoch auch die Emissionen am höchsten. Bezogen auf den Abscheidegrad lässt sich erkennen, dass hier der Wert der Holzpellets am größten ist mit etwa 70 %, die beiden anderen Brennstoffe liegen ähnlich mit ca. 40 %.

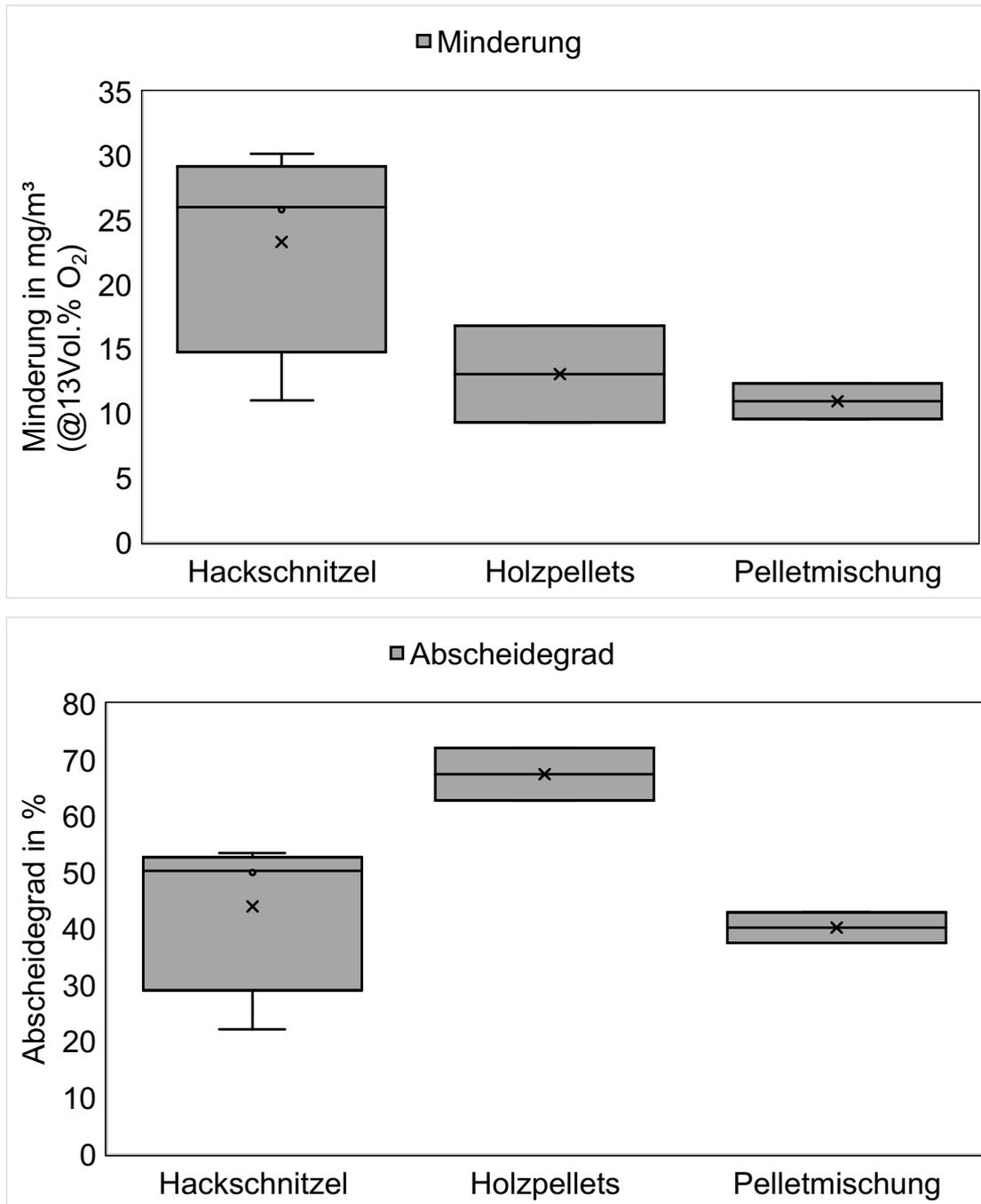


Abbildung 6.21: Abscheideverhalten der Gesamtstaubkonzentrationen am Hackgutkessel bei verschiedenen Brennstoffen

6.3.3 Ergebnisse zur Korngrößenverteilung und Größenklassen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen zur Korngrößenverteilung vorgestellt. Die einzelnen Verteilungen zum Vergleich der Brennstoffe gibt Abbildung 6.16, zu sehen sind die Verteilungen für Rohgas und Reingas. Die feinste Verteilung weisen die gemischten Pellets mit Holz und Heuanteil bei $0,06 \mu\text{m}$ auf, was zur Erwartung passt, denn durch einen erhöhten mineralischen Anteil ist zu vermuten, dass auch mehr dieser feinen

Partikel ins Abgas übergehen. Die Partikelemissionen der Hackschnitzel besitzen ihr Maximum der Feinstpartikel etwas höher als die der Pelletbrennstoffe bei $0,1 \mu\text{m}$. Die Verteilung bei den Holzpellets weist im groben Bereich noch einen leichten Anstieg der Werte auf.

Bei allen drei Brennstoffen verschiebt sich die Verteilung im Reingas hin zu größeren Partikelgrößen, während die feineren Partikel alle vermindert werden. Es lässt sich daher sagen, dass die Partikel beim Passieren des Abscheiders sich in Summe vergrößern, also agglomerieren.

Tabelle 6.5: Klassierte Größenfraktionen der Korngrößenverteilungen, angegeben in Massenteilen (%); 100 % entspricht der Summe der Beladungen aller Stufen

Klassierte	V-1.06	V-1.07	V-1.09	V-1.10	V-1.11	V-1.12
Massenanteile in %	HS // Roh	HS // Rein	HP // Roh	HP // Rein	PM // Roh	PM // Rein
1 (Stufen 1-3)	47	43	58	39	66	59
2 (Stufen 4-8)	46	34	20	22	30	24
3 (Stufen 9-10)	2	7	6	3	1	4
4 (Stufen 11-13)	4	16	15	36	3	13
<i>Summe</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

Die Ergebnisse der Größenklassen (Abbildung 6.23 und Tabelle 6.5) sind konsistent zu den Messungen der Gesamtstaubkonzentration. Holzpellets weisen die niedrigsten Emissionen auf, etwas höher die Pelletmischung und am höchsten bei den Hackschnitzeln.

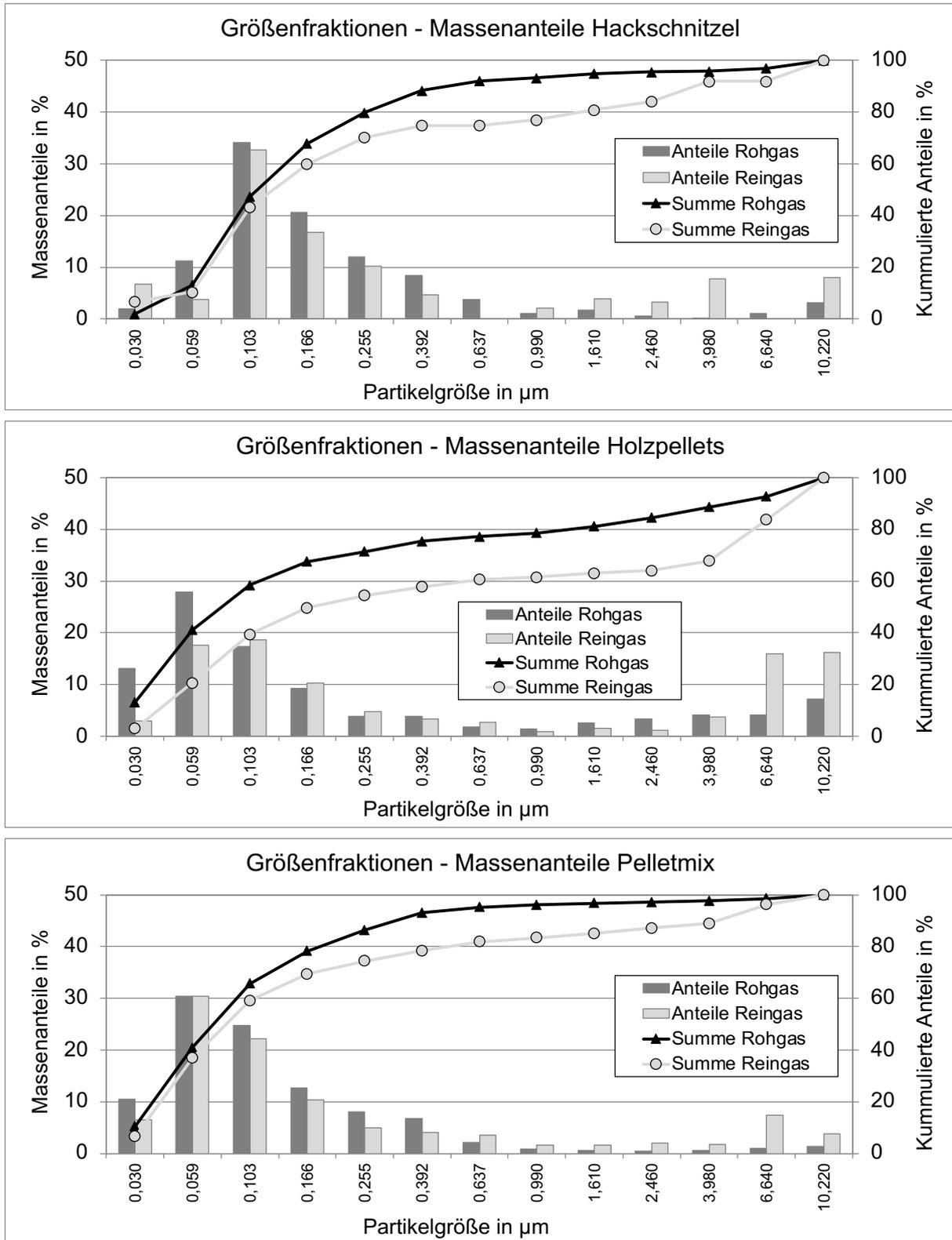


Abbildung 6.22: Korngrößenverteilungen in Rohgas und Reingas am Hackgutkessel mit Elektroabscheider bei verschiedenen Brennstoffen

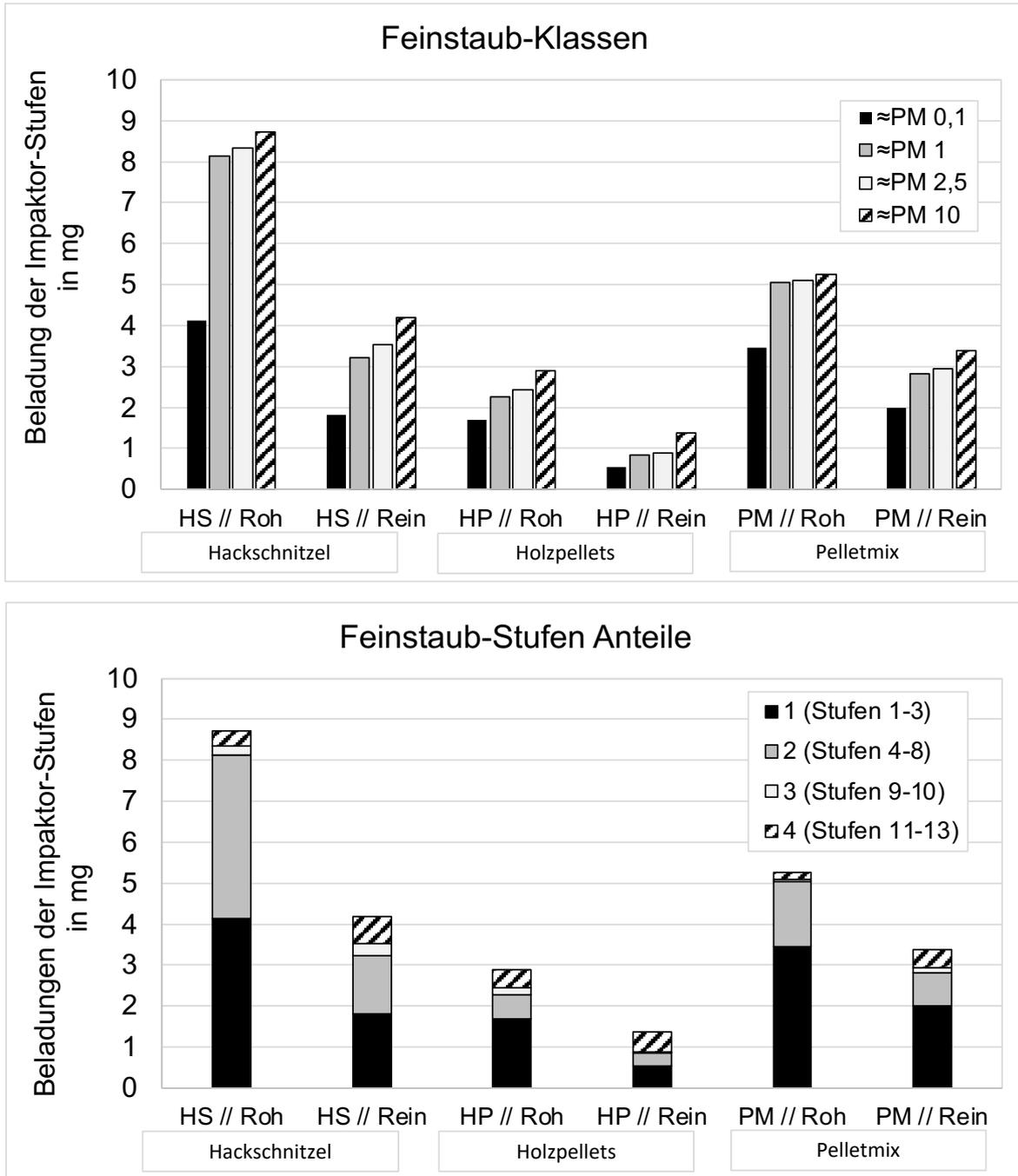


Abbildung 6.23: Klassierte Größenfraktionen der Korngrößenverteilungen

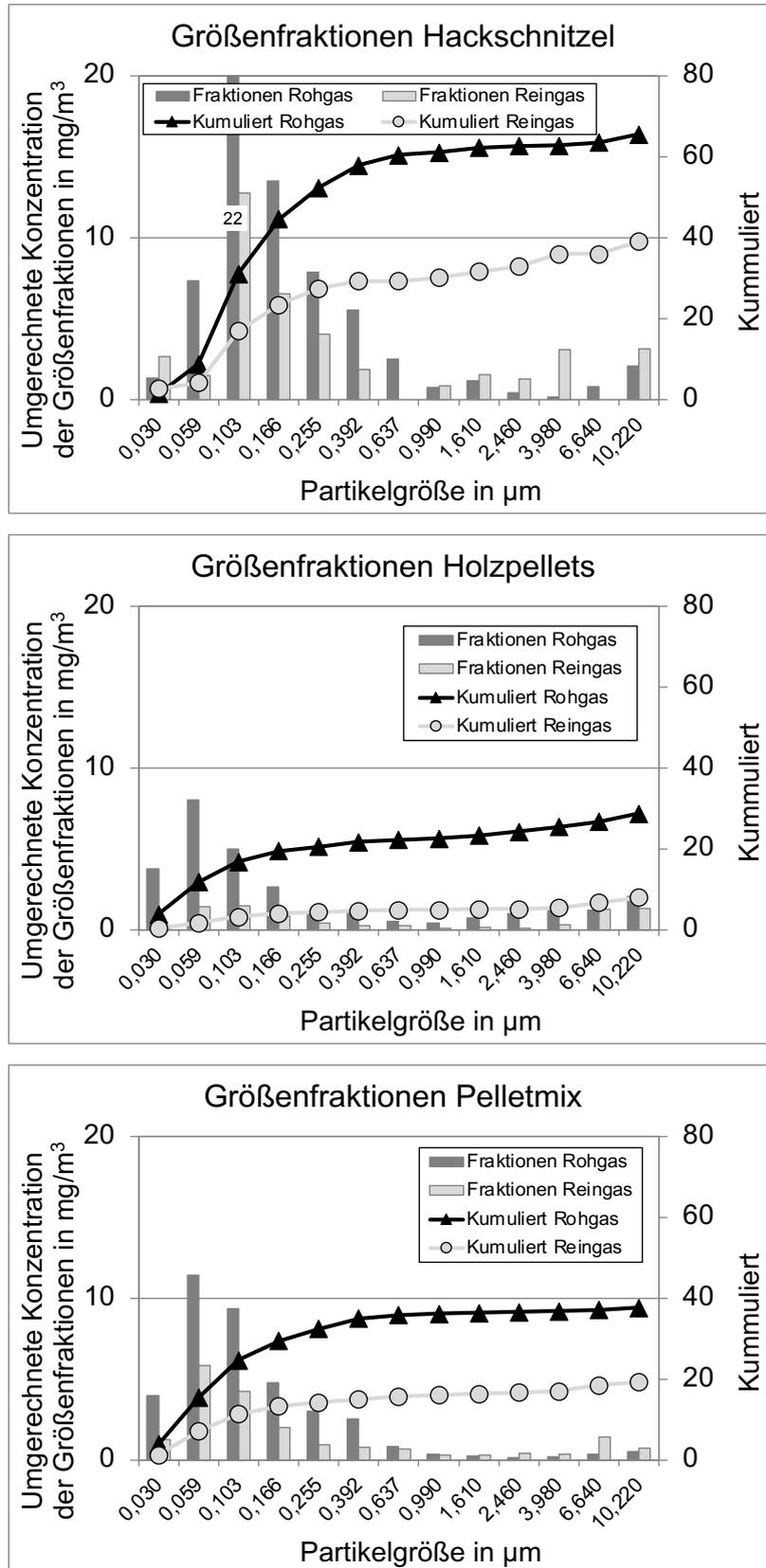


Abbildung 6.24: Umgerechnete Korngrößenverteilungen in Rohgas und Reingas am Hackgutkessel mit Elektroabscheider bei verschiedenen Brennstoffen

Zum Abscheideverhalten der Partikelgrößenfraktionen lässt sich in Abbildung 6.25 erkennen, dass bei allen drei Brennstoffen die ultrafeinen Partikel vermindert werden. Bei den Holzpellets können durchweg alle der Größenklassen gemindert werden. Beim Pelletmix werden vor allem die ultrafeinen Partikel vermindert, die Zunahme bei den größeren Klassen ist kaum erkennbar aufgrund der niedrigen Werte. Bei den Hackschnitzeln nimmt die Fraktion PM 0,1 deutlich ab, die Fraktion PM 1 hingegen etwas zu.

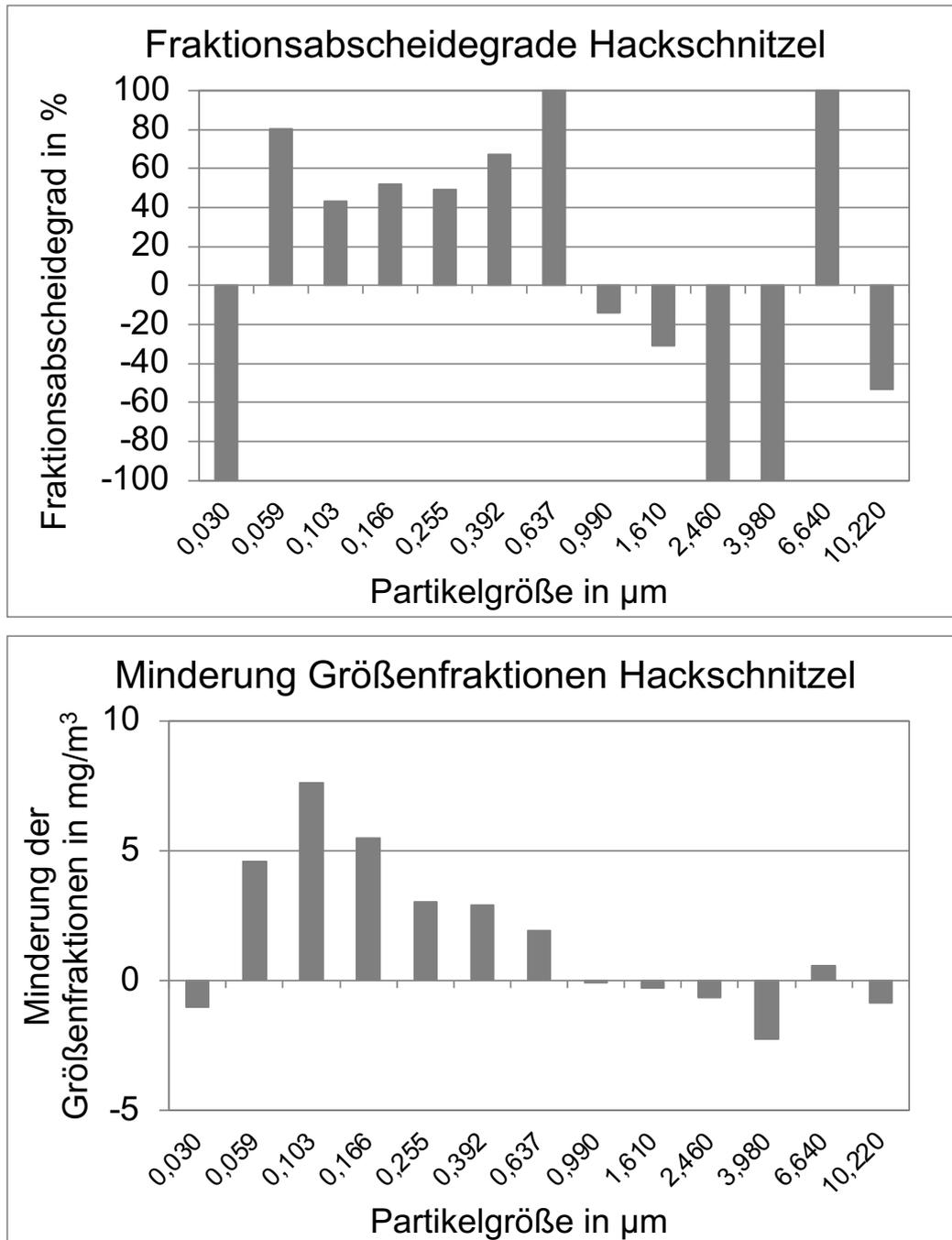


Abbildung 6.25: Fraktionsabscheidegrade und Minderung der einzelnen Korngrößen der Impaktorstufen für den Brennstoff Hackschnitzel am Hackgutkessel

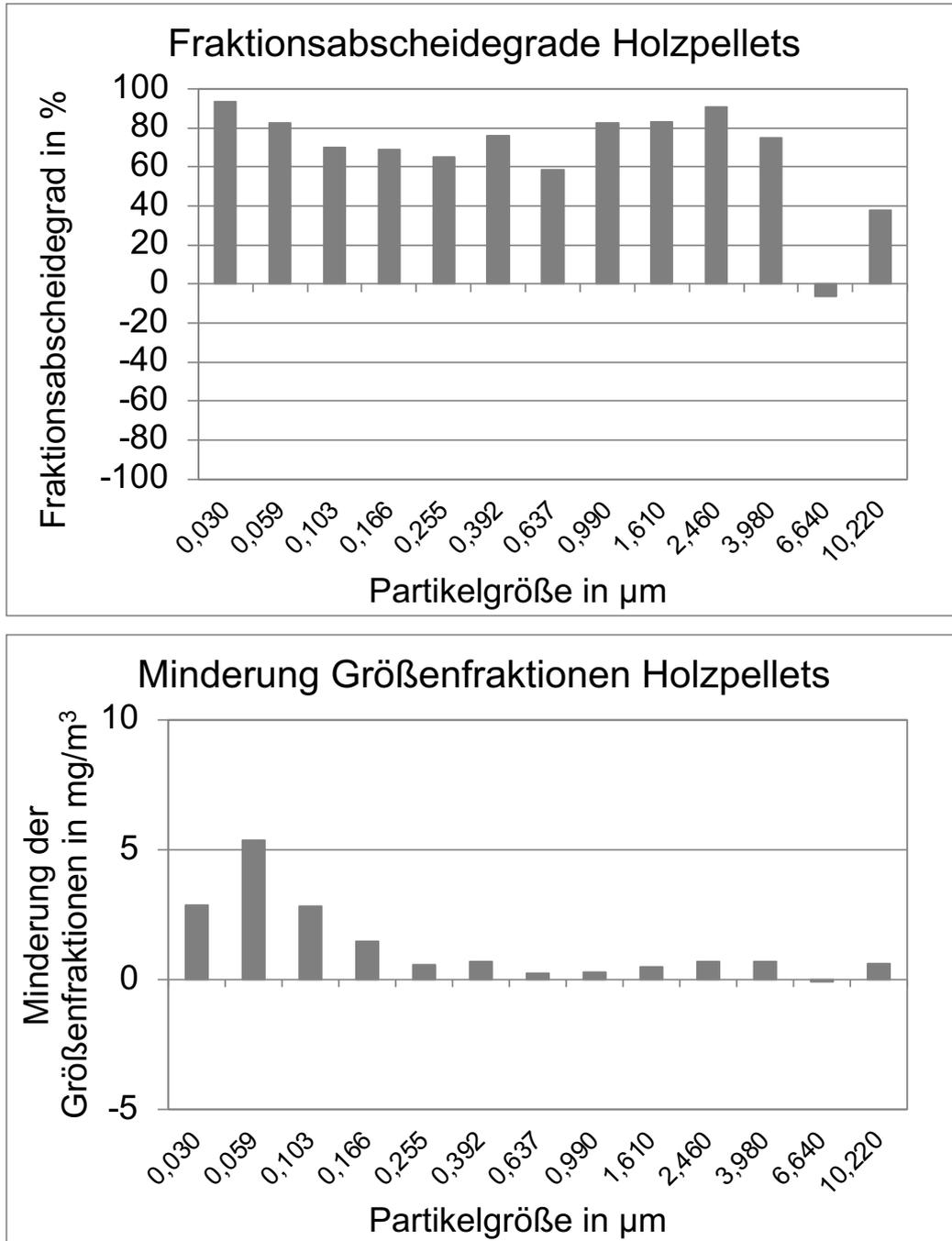


Abbildung 6.25 Fortsetzung: Fraktionsabscheidegrade und Minderung der einzelnen Korngrößen der Impaktorstufen für den Brennstoff Holzpellets am Hackgutkessel

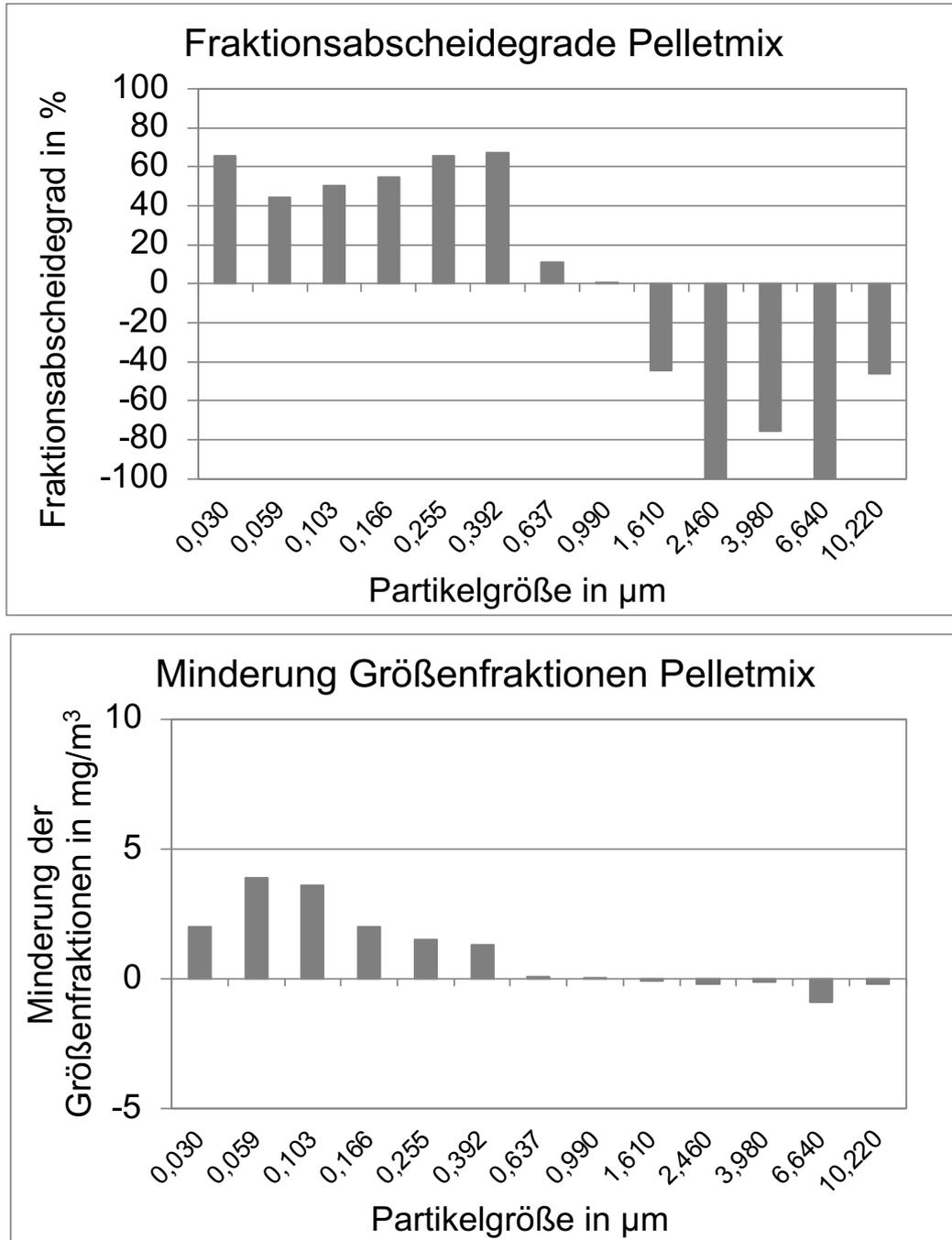


Abbildung 6.25 Fortsetzung: Fraktionsabscheidegrade und Minderung der einzelnen Korngrößen der Impaktorstufen für den Brennstoff Pelletmix am Hackgutkessel

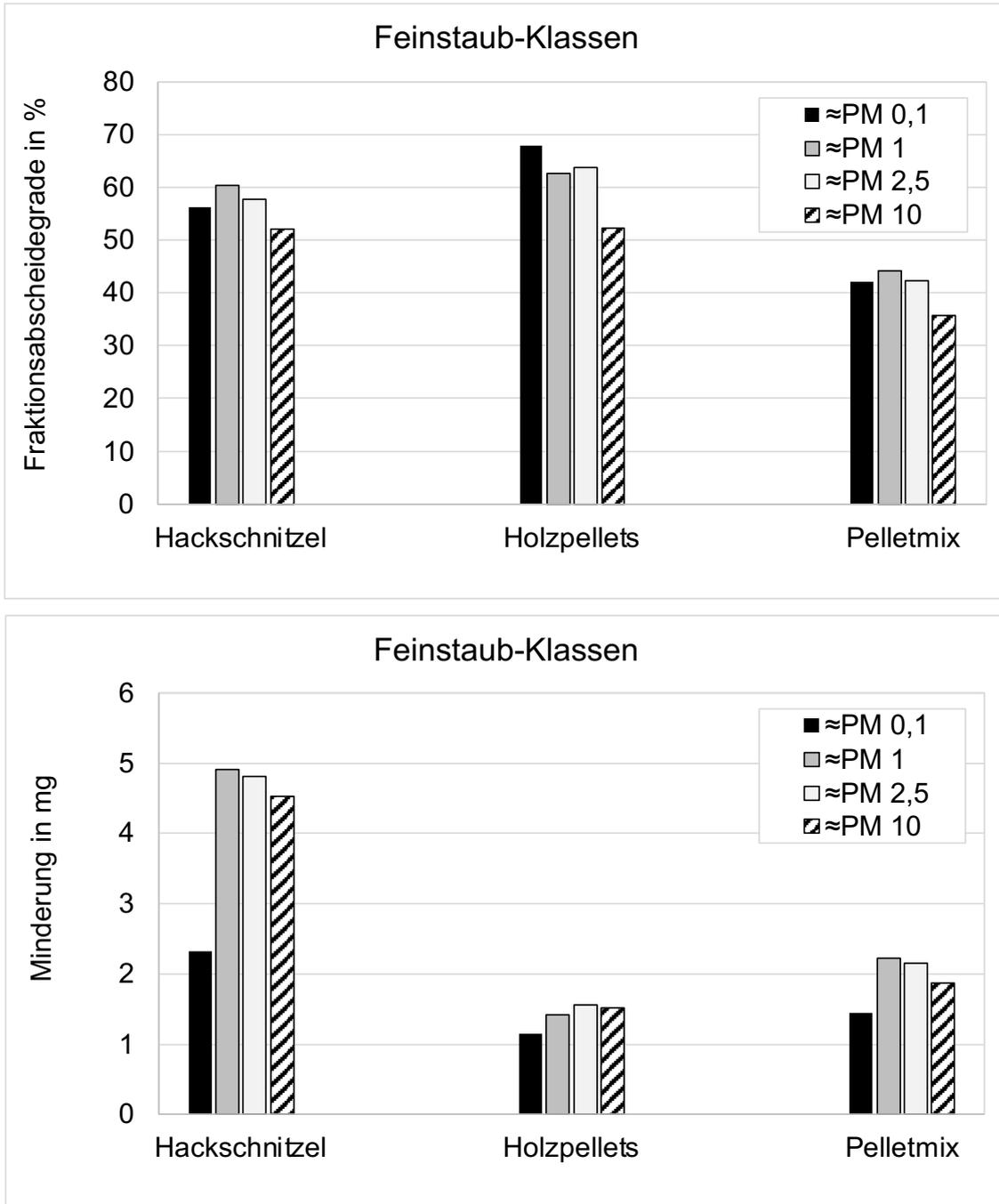


Abbildung 6.26: Vergleich der Abscheidung in den Feinstaub-Klassen PM 0,1, PM 1, PM 2,5 und PM 10 in Abhängigkeit des Brennstoffs am Hackgutkessel

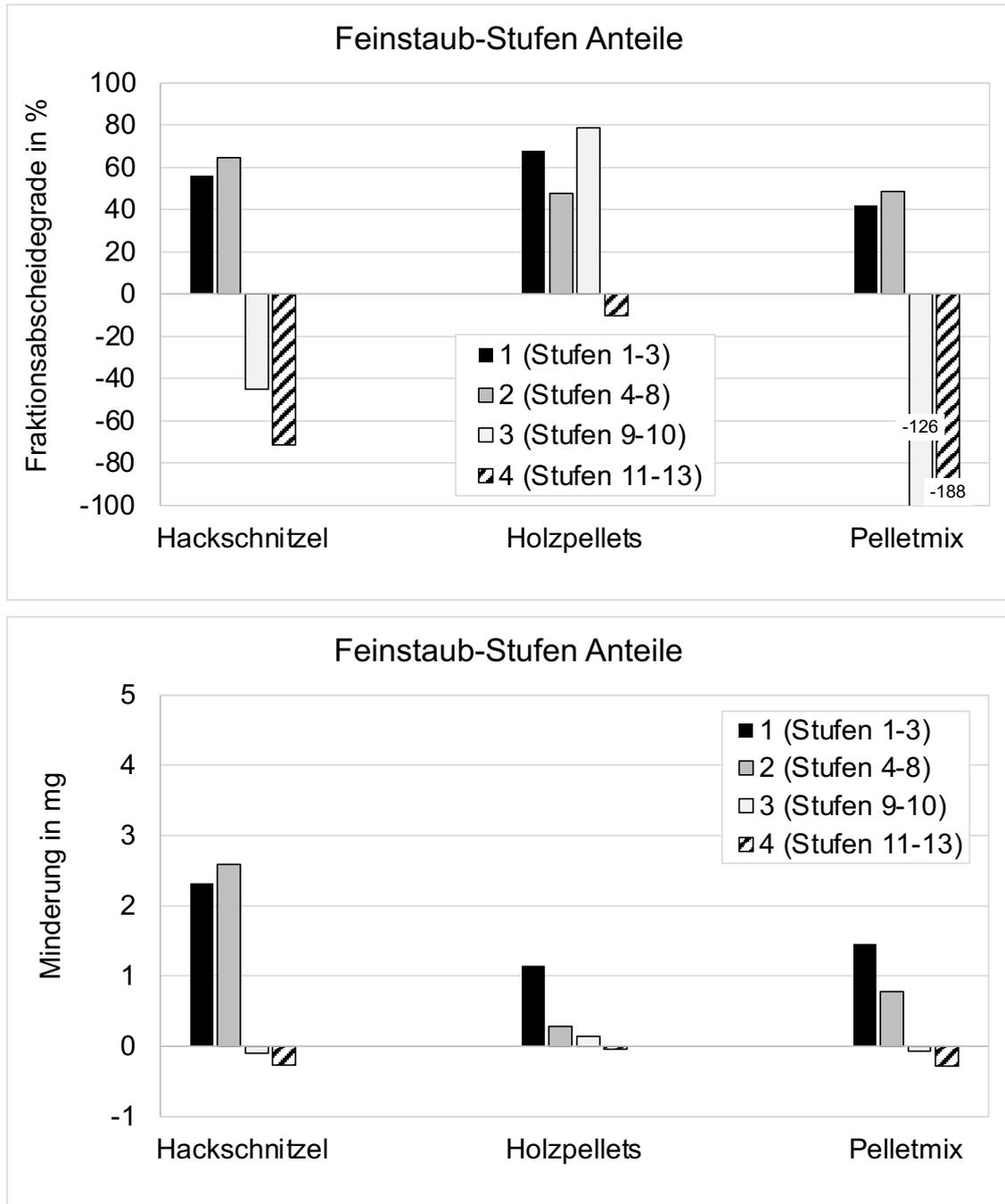


Abbildung 6.26 Fortsetzung: Vergleich der Abscheidung in den Feinstaub-Stufen-Anteilen in Abhängigkeit des Brennstoffs am Hackgutkessel

6.3.4 Ergebnisse zur Partikelzusammensetzung repräsentativer Planfilterproben

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Kohlenstoffanalyse vorgestellt.

Bezogen auf die Kohlenstoffverbindungen der Partikelproben in Abbildung 6.27 lässt sich festhalten, dass der gesamte Kohlenstoffanteil (TC) bei allen Proben sehr viel niedriger ist als beispielsweise am Pelletofen (vergleiche Abbildung 6.14). An der Partikelprobe des Planfilter ist zu erkennen, dass selbst dieser geringe Kohlenstoffanteil in Form von Ruß oder

Teeren den Filter schwarz verfärbt. Die Partikelproben der Pelletbrennstoffe weisen eine sehr gräuliche Farbe in unterschiedlichen Intensitäten auf.

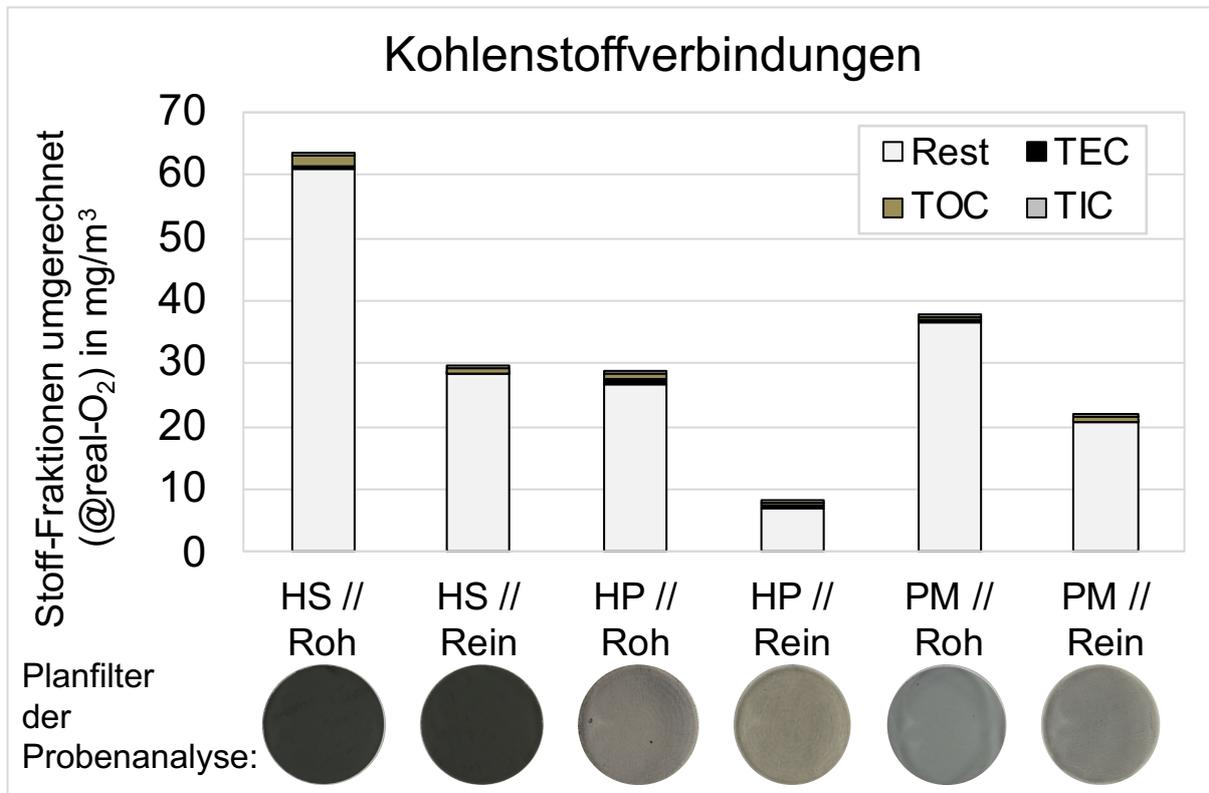


Abbildung 6.27: Kohlenstoff-Fractionen der Partikelanalysen in Rohgas und Reingas, umgerechnet als Konzentrationen über die Gesamtstaubkonzentration; eingeteilt nach Brennstoff: HS: Hackschnitzel, HP: Holzpellets, PM: Pelletmix

Aufgrund der niedrigen Werte der Kohlenstoffanteile lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang der Abscheidung bestimmter Kohlenstoff-Fractionen zur Brennstoffart erkennen.

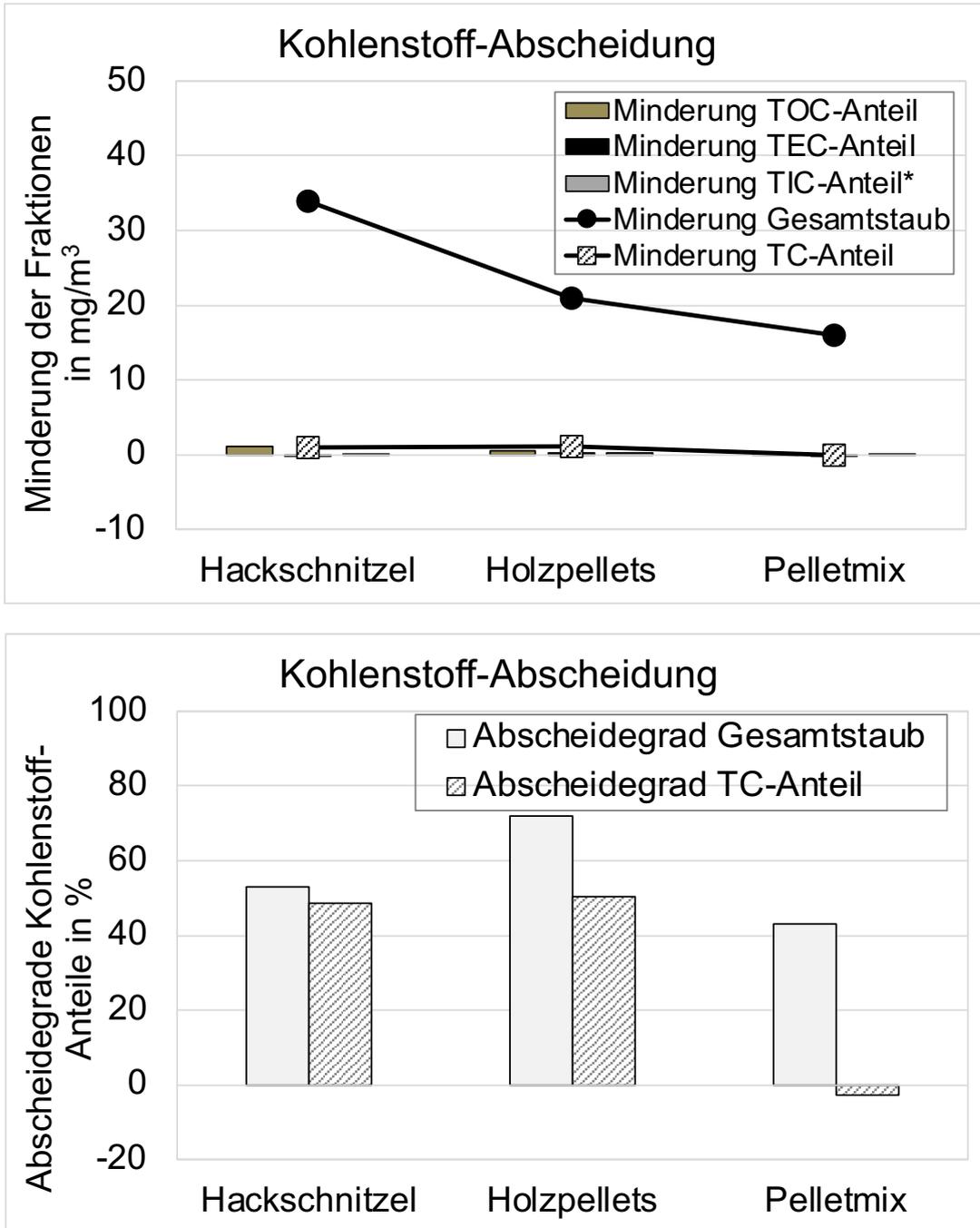


Abbildung 6.28: Abscheidung der Kohlenstoff-Fractionen am Hackgutkessel mit Elektroabscheider, eingeteilt nach Brennstoff

Um den Einfluss der Brennstoffwahl auf die Partikelzusammensetzung und ihre Abscheidung betrachten zu können, werden ausgewählte Partikelproben einer Ionenanalyse unterzogen nach beschriebener Vorgehensweise (siehe Kapitel 6.1). Nachfolgend sind die Ergebnisse vorgestellt in Tabelle 6.6. Zum Vergleich sind die Daten von Proben vom Abgas des Pelletofens mit angegeben.

Der beschriebene niedrige Kohlenstoffanteil spricht sehr für einen hohen Anteil an mineralischen Bestandteilen, was sowohl die Probenfarbe als auch die Analyse aus Tabelle 6.6 zeigen. Dies betrifft beispielsweise die Anteile von Kalium, Natrium und auch den

Chloranteil. Dieser ist bei der Beimischung von Heupellets deutlich erhöht aufgrund eines höheren Grünanteils im Heu im Vergleich zu Holz.

Tabelle 6.6: Ionenanalysen ausgewählter Proben bei verschiedenen Brennstoffen am Hackgutkessel (HK) und Vergleich zum Pelletofen (PO): HP: Holzpellets, HS: Hackschnitzel, PM: Pelletmix

Probe	P2.3	P2.4	P15.01	P15.02	P.03	P.04	P.13	P.14
Labornummer	552/16	553/16	591/16	592/16	113/17	114/17	115/17	116/17
Versuchsnummer	19	19	23	23	27	27	29	29
Messstelle	Reingas	Rohgas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
Feuerung	PO	PO	HK	HK	HK	HK	HK	HK
Brennstoff	HP	HP	HS	HS	HP	HP	PM	PM
Hauptelemente	- an -	- an -	- an -	- an -	- an -	- an -	- an -	- an -
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃), %	1,14	0,51	0,26	0,20	0,41	0,13	0,11	0,11
Bariumoxid (BaO), %	0,07	0,12	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02
Kalziumoxid (CaO), %	3,23	9,94	1,24	0,79	2,75	1,86	0,51	0,59
Eisenoxid (Fe ₂ O ₃), %	7,33	0,69	0,25	0,20	1,43	0,30	0,24	0,26
Kaliumoxid (K ₂ O), %	23,1	33,9	42,7	40,9	49,3	51,6	58,3	56,6
Magnesiumoxid (MgO), %	0,38	1,78	0,23	0,16	0,38	0,27	0,08	0,11
Manganoxid (MnO ₂), %	0,22	1,20	0,07	0,05	0,33	0,30	0,17	0,18
Natriumoxid (Na ₂ O), %	0,62	0,52	1,61	1,57	2,78	3,05	2,04	3,85
Phosphoroxid (P ₂ O ₅), %	0,18	1,21	0,80	0,72	0,39	0,29	0,47	0,48
Schwefeltrioxid (SO ₃), %	34,5	44,3	22,9	22,8	12	12,6	5,23	5,41
Strontiumoxid (SrO ₂), %	0,013	0,030	0,002	0,000	0,010	0,006	0,002	0,002
Titanoxid (TiO ₂), %	0,048	0,019	0,005	0,004	0,017	0,003	0,003	0,002
Chlorid (Cl), %	4,16	3,34	19,1	16,3	17,85	19,16	33,96	33,69
Summe, %	74,9	97,6	89,2	83,7	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Die Ergebnisse zu den Hauptelementen durch die Bestimmung mittels Ionenanalyse lassen teils deutliche Unterschiede zwischen den Brennstoffarten erkennen. Es kann also ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einerseits der Zusammensetzung und dem unterschiedlichen Charakter der verschiedenen Brennstoffe und andererseits einer unterschiedlichen Zusammensetzung der Partikelemissionen gefunden und bestätigt werden.

In Bezug auf das Abscheideverhalten kann jedoch kein eindeutiger Zusammenhang gefunden werden, ob eine bestimmte Stoff-Fraktion bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden wird.

7 Emissionsuntersuchungen an manuell beschickten Einzelraumfeuerstätten mit Elektroabscheidern unterschiedlicher Bauart

7.1 Einfluss des Ofenbetriebs an einem Kaminofen mit mündungsbasiertem Röhrenelektroabscheider

7.1.1 Versuchsbeschreibung

7.1.1.1 Gegenstand für die Untersuchung

Zweck der Untersuchung ist die Frage, inwieweit die verschiedenen Verbrennungsbedingungen an einer manuell beschickten Einzelraumfeuerung die Emissionsbedingungen und die Partikelabscheidung beeinflussen. Als häufigster Vertreter dieser Klasse soll ein handelsüblicher Kaminofen verwendet werden. Hierbei sollen verschiedene Feuerungseinstellungen verändert werden, um deren Auswirkungen auf das Emissions- und Abscheideverhalten zu untersuchen, wie der Betrieb in Teillast oder mit verminderter Luftzufuhr. Dies spiegelt typische Verhaltensweisen der Nutzer wider. Als Abscheider wird ein handelsüblicher mündungsbasierter Röhrenabscheider verwendet. Hierbei soll vor allem der Frage nachgegangen werden, in welchen Zuständen eine gute Abscheidung erreicht werden kann und unter welchen Umständen die Abscheidewirksamkeit vermindert ist.

Ergänzend betrachtet werden sollen Aspekte zum Messintervall und die Auswertung der Versuchsdaten unter dem Auswerte-Schema der DIN SPEC 33999 (2014), das in Kapitel 4.4.2 genauer beschrieben ist. Prüfaufbau und Versuchsablauf sowie weitergehende Informationen sind beschrieben in Struschka et al (2016).

7.1.1.2 Versuchsdurchführung und Messintervalle

Durch den diskontinuierlichen Charakter der Feuerungsart werden nacheinander Abbrände mit Buchenscheitholz durchgeführt, um die entsprechenden Partikelemissionen für deren Untersuchung zu erhalten. Die Emissionsmessungen erfolgen während jeweils bestimmten Zeitpunkten in Abhängigkeit zur Brennstoffauflage. Die zugehörigen Messintervalle mit Startpunkt sind in Tabelle 7.1 ersichtlich. Die Abbrände erfolgen nach gleichbleibendem Ablauf, der in Tabelle 7.2 beschrieben ist.

Vor und nach dem Abscheider erfolgt die zeitgleiche Messung der Gesamtstaubkonzentration nach VDI 2066-1 (2006) in Rohgas und Reingas. Ebenfalls wird die Gaszusammensetzung erfasst. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt als Mittelwerte über das genannte Messintervall.

Tabelle 7.1: Mögliche Messintervalle: Startpunkt der Messung und Messdauer; Für die Darstellung der Versuchsauswahl hier wird das Prüfverfahren nach DIN SPEC 33999 angewendet

Messintervall	Staubprobenahme Startpunkt	Staubprobenahme Messdauer	Angewendet bei
praxisnah (nur rechnerisch für Gaskonzentrationen)	Gase: unmittelbar nach Brennstoffaufgabe	Gase: gesamter Abbrand	- Normalbetrieb
Typprüfung Raumheizer (DIN EN 13240 (2005) und für Staub nach DIN CEN/TS 15883 (2009)	3 min nach Brennstoffaufgabe	30 min	- Normalbetrieb
Prüfverfahren Staubminderungseinrichtungen (DIN spec 33999, 2014)	30 s nach Brennstoffaufgabe	15 min	- Normalbetrieb - Teillast - Luftmangel

Tabelle 7.2: Versuchsablauf für die verschiedenen Betriebsweisen

Abbrand	Normalbetrieb	Luftmangel	Teillast
-	Anfeuern	Anfeuern	Anfeuern
0	Zwischenabbrand	Zwischenabbrand	Zwischenabbrand
1	Nennwärmeleistung	Betrieb bei Luftmangel	Nennwärmeleistung
2	Nennwärmeleistung	Betrieb bei Luftmangel	Betrieb in Teillast
3	Nennwärmeleistung	Betrieb bei Luftmangel	Betrieb in Teillast

7.1.1.3 Versuchsbedingungen

Die Durchführung der Versuche erfolgt je nach Betriebsweise bei verschiedenen Bedingungen, die in Tabelle 7.3 zu sehen sind.

Tabelle 7.3: Versuchsbedingungen und Feuerungseinstellungen

Zustand	Brennstoff	Primärluft	Sekundärluft
Anheizen	0,5 kg feines Holz	offen	offen
Zwischenabbrand	ca. 1 kg (kleinere Holzscheite)	etwas schließen	offen
Nennwärmeleistung (Normalbetrieb)	2 kg (zwei Holzscheite)	fast geschlossen	zweite Einkerbung
Luftmangel *	2 kg (zwei Holzscheite)	fast geschlossen	fast geschlossen
Teillast	1 kg (zwei Holzscheite)	fast geschlossen	zweite Einkerbung

* laut Herstellerangaben nicht vorgesehen

7.1.1.4 Messgrößen und Messverfahren

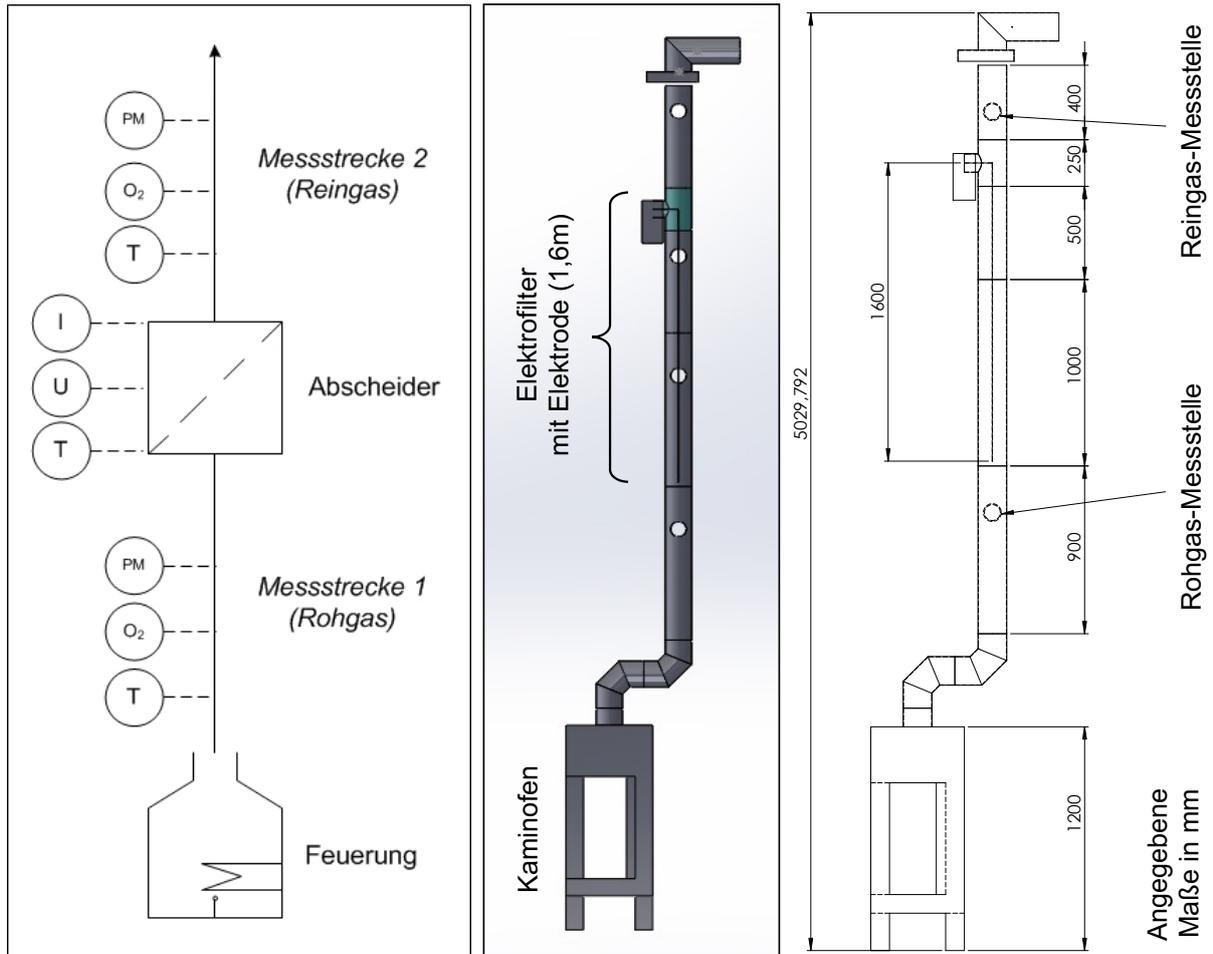
Zur Charakterisierung der Gaszusammensetzung im Abgas werden Sauerstoffgehalt, Kohlendioxidgehalt und die Schadstoff-Konzentrationen Kohlenmonoxid, flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC / OGC) und als Hauptmessgröße die Gesamtstaubkonzentration bestimmt. Die technischen Daten zu den verwendeten Geräten zeigt Tabelle 7.4.

Tabelle 7.4: Technische Daten der verwendeten Messgeräte für diese
 Emissionsuntersuchungen (Messgeräteliste)

Messgröße	Kürzel	Einheit	Messprinzip	Messgerät	Messbereich
Rohgas					
Gastemperatur	Temp	°C	Thermospannung	NiCr-Ni Thermoelemente	
Sauerstoff- Konzentration	O2	Vol.-%	Paramagnetismus	Rosemount Oxynos 100	0...25 %
Kohlendioxid- Konzentration	CO2	Vol.-%	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Rosemount Binos 100 2M	0...20 %
Kohlenmonoxid- Konzentration	CO	ppm	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Rosemount Binos 100	0...1.000 ppm
Kohlenmonoxid- Konzentration	CO	Vol.-%	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Rosemount Binos 100 2M	0...3 %
Flüchtige Kohlen- wasserstoffe	VOC/ OGC	ppm	Flammenionisation	Testa FID 123	0...1000 ppm
Gesamtstaub	c	mg/m ³	Gravimetrisch nach VDI 2066-1	Planfilterkopfgerät 50mm	
Reingas					
Gastemperatur	Temp	°C	Thermospannung	NiCr-Ni Thermoelemente	
Sauerstoff- Konzentration	O2	Vol.-%	Paramagnetismus	Rosemount Oxynos 100	0...25 %
Kohlendioxid- Konzentration	CO2	Vol.-%	Nicht dispersive Infrarot- Absorption (NDIR)	Rosemount Binos 100 2M	0...20 %
Gesamtstaub	c	mg/m ³	Gravimetrisch nach VDI 2066-1	Planfilterkopfgerät 50mm	

7.1.1.5 Prüfaufbau

Herausforderung bei dieser Untersuchung ist der Einsatz eines mündungsbasierten Abscheiders, weshalb kein normaler Feuerungsprüfstand verwendet werden kann. Durch die speziellen Anforderungen des Abscheiders und der zugehörigen Messstrecken ist ein besonderer Prüfaufbau notwendig. Dieser wird speziell für die Untersuchung konzipiert und umgesetzt und ist in Abbildung 7.1 dargestellt.



T	Temperatur
PM	Partikelmessung (particulate matter)
O ₂	Gaszusammensetzung (Hauptsächlich: Sauerstoff)
U	Hochspannung
I	Strom

Abbildung 7.1: Feuerungsprüfstand, speziell konzipiert und aufgebaut für den Einsatz und die Untersuchung von mündungsbasierten Partikelabscheidern

7.1.1.6 Feuerung und Brennstoffe

Bei der verwendeten Feuerung handelt es sich um einen handelsüblichen Kaminofen der Firma Hase Kaminofenbau GmbH, Modell Modena mit einer Nennwärmeleistung von 8 kW. Das Gerät besitzt auf drei Seiten Sichtscheiben. Durch zwei Verbrennungsluftschieber am Gerät kann die Luftzufuhr eingestellt werden. Die Einstellung von Primärluft und Sekundärluft erfolgt separat voneinander.

Als Brennstoff wird zum Anfeuern handelsübliches Anzündholz aus Nadelholz verwendet und als Hauptbrennstoff naturbelassenes stückiges Buchenholz.

7.1.1.7 Abscheider

Beim Abscheider handelt es sich um einen handelsüblichen Elektroabscheider, der oberhalb auf das Abgasrohr aufgesetzt wird und zu den mündungsbasierten Geräten gehört. Statt der im regulären Betrieb auf den Abscheider aufgesetzten Haube wird stattdessen die Reingas-

Messstrecke angebracht. Der Abscheider besteht aus einem T-Stück, durch das eine ca. 1,6 m lange Elektrode in das Abgasrohr eingebracht ist. Die Rohrstrecke unterhalb des Abscheiders muss ausreichend senkrecht verlaufen. Die Elektrode ist schwingend gelagert und über einen Isolator mit dem Hochspannungsnetzteil in der außenliegenden Steuereinheit verbunden. Zur Erfassung der Abscheider-Kennwerte (Hochspannung, Strom, Statusüberwachung) wird das Steuergerät ausgelesen.

7.1.2 Abbrandverhalten

Eine manuell und diskontinuierlich beschickte Feuerung zeigt stets ein typisches Abbrandverhalten mit den verschiedenen Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand. Die Phase Anbrand zeichnet sich durch hohe Emissionen (Emissionspeak) mit großer Schwankungsbreite aus und hoher Dynamik. In der stabileren Hauptverbrennung erfolgt der eigentliche Biomasseumsatz und die Energiefreisetzung der Verbrennung mit sinkenden Emissionen und einem höheren Kohlendioxidgehalt unter sichtbarer stabiler Flammenbildung. Erlöschen die Flammen und sinkt der Brennstoffumsatz, wechselt die Verbrennung in die Ausbrandphase. Charakteristisch ist hier ein Anstieg des Kohlenmonoxids, jedoch ohne den Anstieg von Partikelemissionen.

In Bezug auf Partikelemissionen ist demnach der Anbrand und teilweise die Hauptverbrennung als relevant anzusehen und hat daher auch für die Partikelabscheidung die wichtigste Bedeutung.

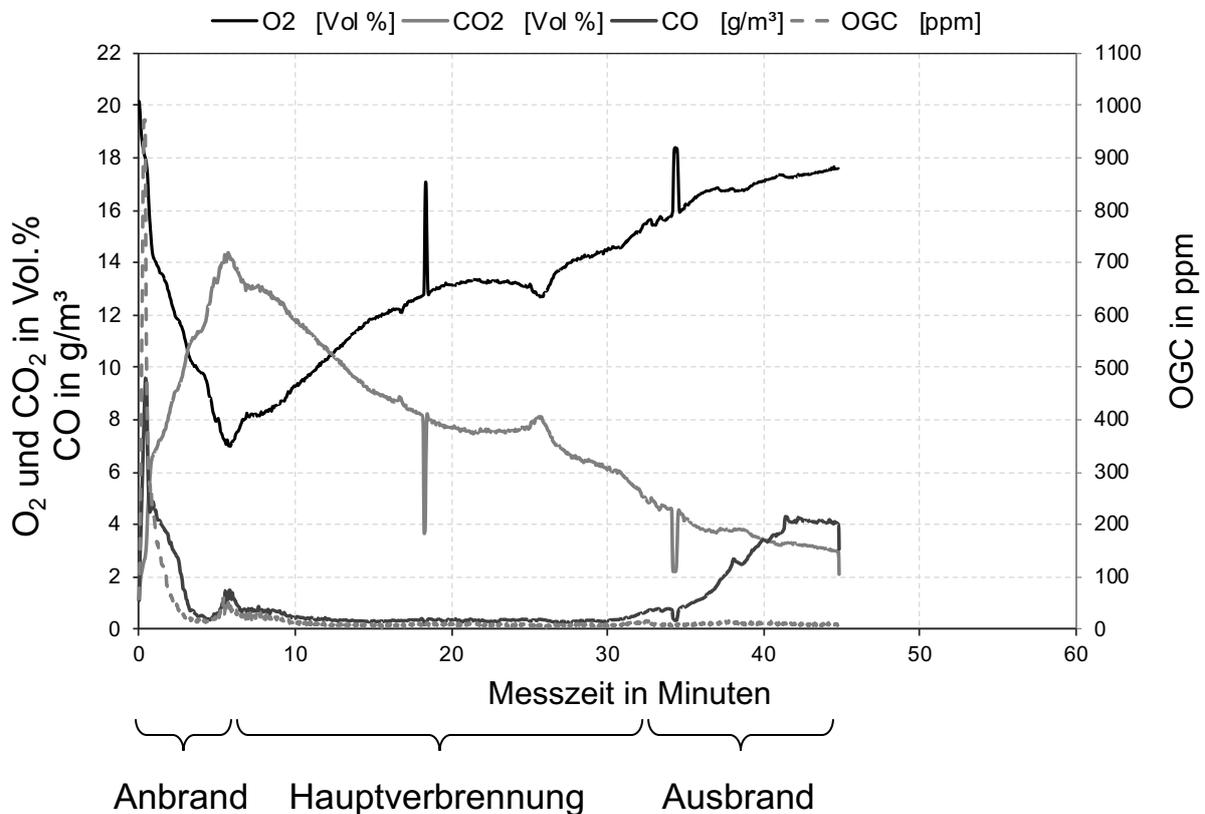


Abbildung 7.2: Typischer Abbrand mit den drei Verbrennungsphasen am Kaminofen

7.1.3 Ergebnisse zum Emissionsverhalten am Kaminofen unter dem Einfluss der Betriebsweise

Nachfolgend sind in Abbildung 7.3 die Versuchsergebnisse zur Gaszusammensetzung und dem Emissionsverhalten des Kaminofens für die unterschiedlichen Betriebsarten im Normalbetrieb bei Nennwärmeleistung, zum Betrieb im Luftmangel und in Teillast dargestellt. Auf der linken Seite ist die Darstellung der drei Betriebsarten dargestellt, auf der rechten Seite der Zusammenhang zum Sauerstoffgehalt im Abgas an der Rohgas-Messstelle.

Insgesamt ist der Sauerstoffgehalt hoch, was für die Art der Feuerung jedoch nicht untypisch ist, sondern diese üblicherweise bei einem hohen Luftverhältnis konzipiert und betrieben werden. Selbst im Bereich mit absichtlich verminderter Luftzufuhr, um eine Verbrennungssituation im Luftmangel mit erhöhten Emissionen zu provozieren, sinkt der Sauerstoffgehalt im Abgas nur zum Teil. Gegenläufig hier verläuft stets der Kohlendioxidgehalt. Er stellt das Maß für die Brennstoffumsetzung dar.

Die Kohlenmonoxidkonzentrationen weisen keinen eindeutigen Zusammenhang zur Betriebsweise auf, sondern generell eine hohe Bandbreite. Betrieb im Luftmangel begünstigt besonders hohe Emissionen, die nicht zwingend jedes Mal auftreten müssen aber ihre Häufigkeit stark zunimmt. Ähnliches gilt für die Emissionen an flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen. Für die Gesamtstaubemissionen lässt sich hier sagen, dass diese beim Betrieb im Luftmangel alle erhöht sind im Vergleich mit den beiden anderen Betriebsbedingungen. Bei allen drei Emissionsarten lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zum vorherrschenden gemittelten Sauerstoffgehalt erkennen.

In Bezug auf eine wirksame Emissionsminderung lässt sich festhalten, dass **vor allem eine Betriebsweise im Luftmangel zu charakteristisch hohen Gesamtstaubemissionen führt**. Vor allem in diesen Zuständen ist demnach zwingend ein stabiler Betrieb des Abscheiders mit hoher Abscheidewirksamkeit erforderlich, soll die Emissionsbelastung durch manuell beschickte Feuerungen deutlich reduziert werden.

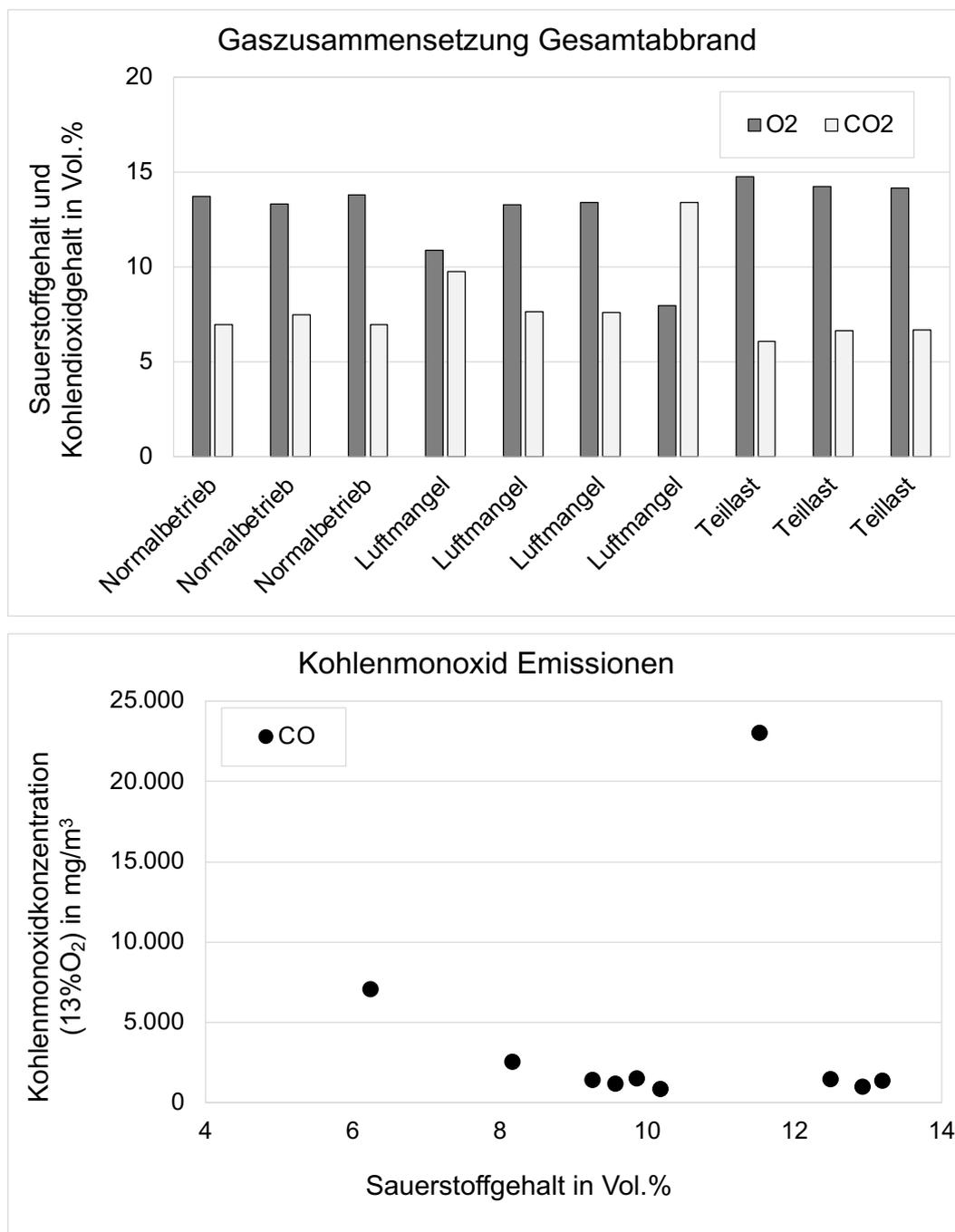


Abbildung 7.3: Emissionsverhalten am Kaminofen: Charakterisierung über die Gaszusammensetzung und die Konzentrationen an Kohlenmonoxid

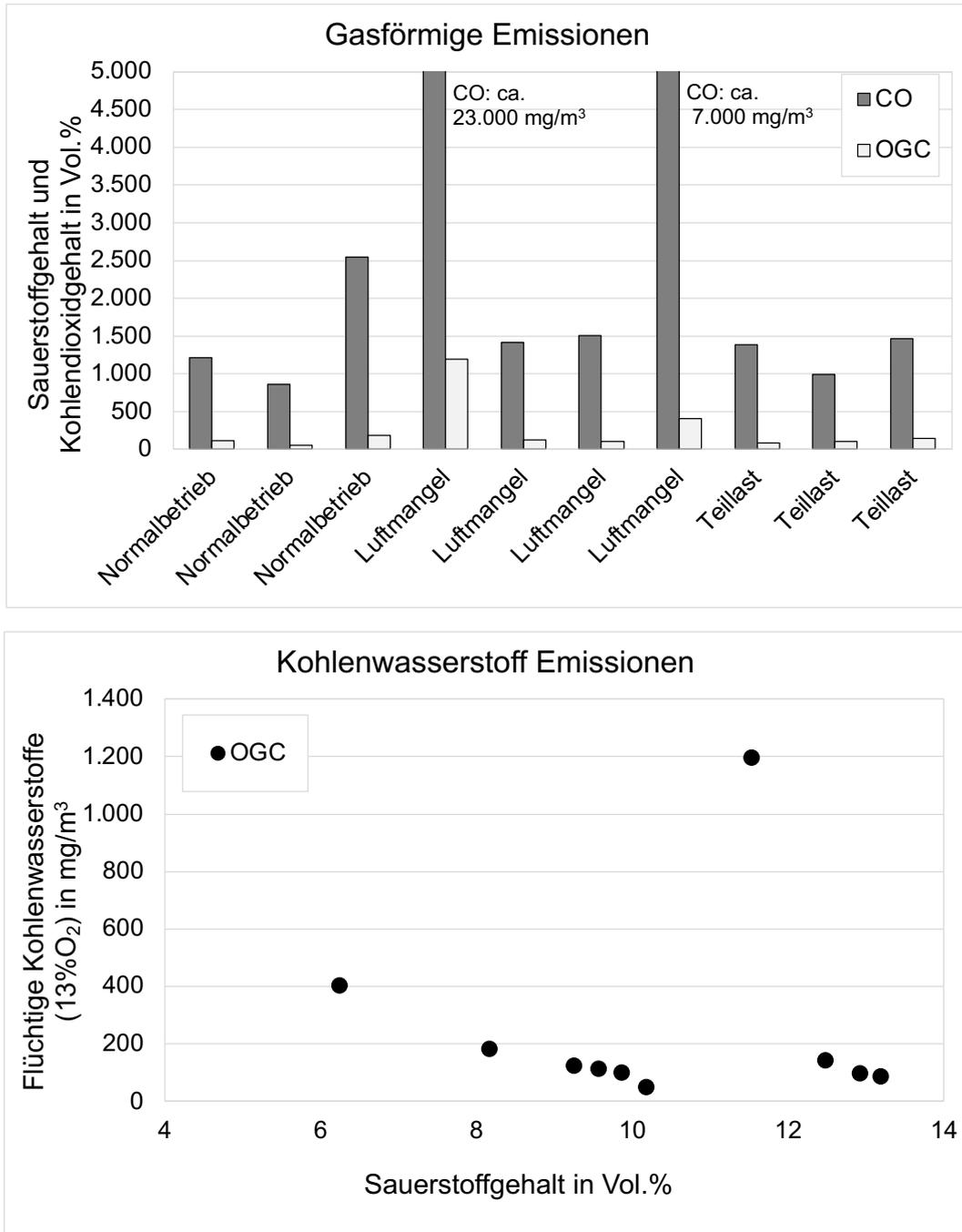


Abbildung 7.3 Fortsetzung: Emissionsverhalten am Kaminofen: Charakterisierung über die gasförmigen Emissionen und die Konzentrationen an flüchtigen Kohlenwasserstoffen

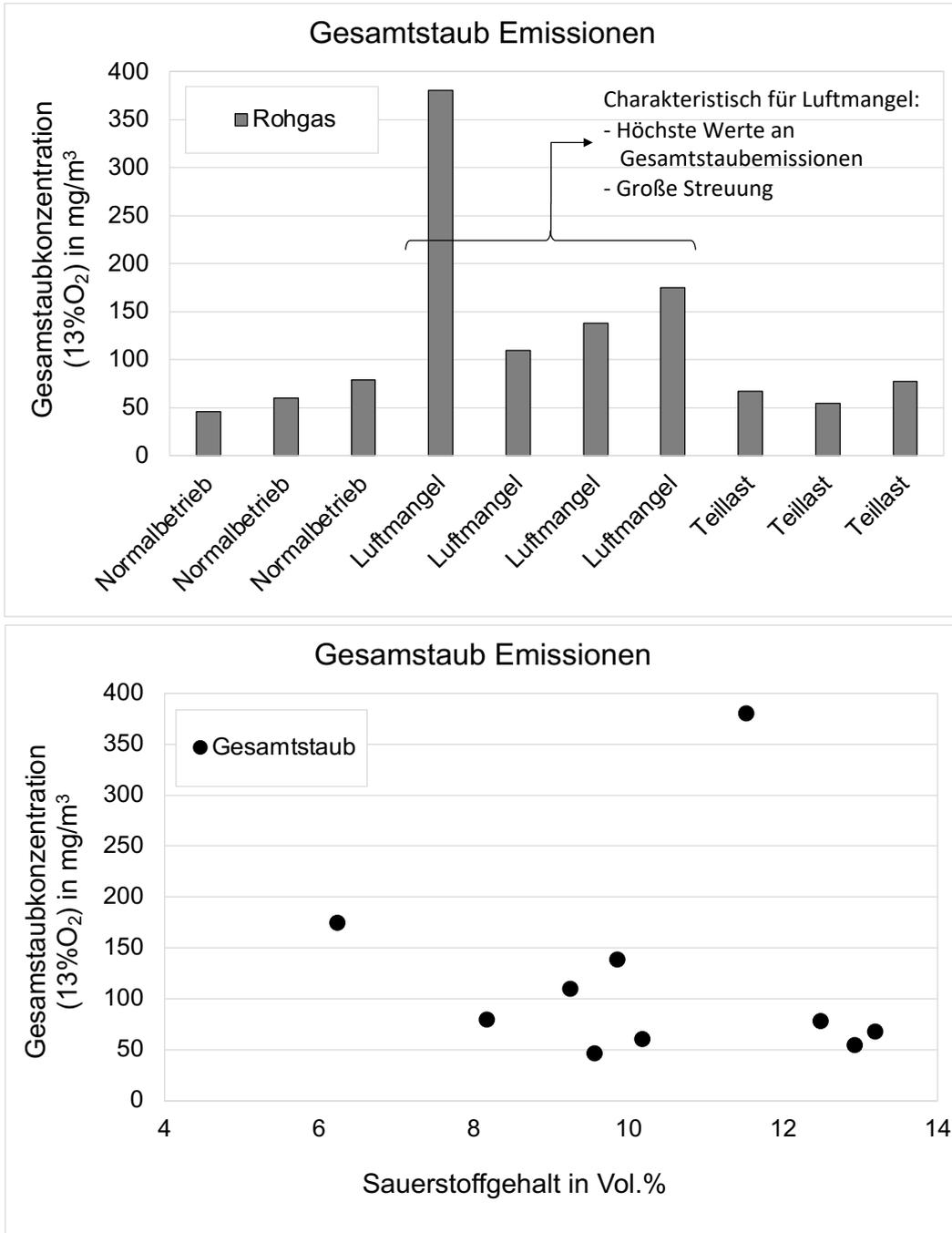


Abbildung 7.3 Fortsetzung: Emissionsverhalten am Kaminofen: Charakterisierung über die Gesamtstaub-Emissionen

7.1.4 Ergebnisse zu Partikelemissionen und dem Abscheideverhalten

Die nachfolgende Abbildung 7.4 zeigt die einzelnen Gesamtstaubkonzentrationen im Rohgas und Reingas, dargestellt über die untersuchten Betriebsarten.

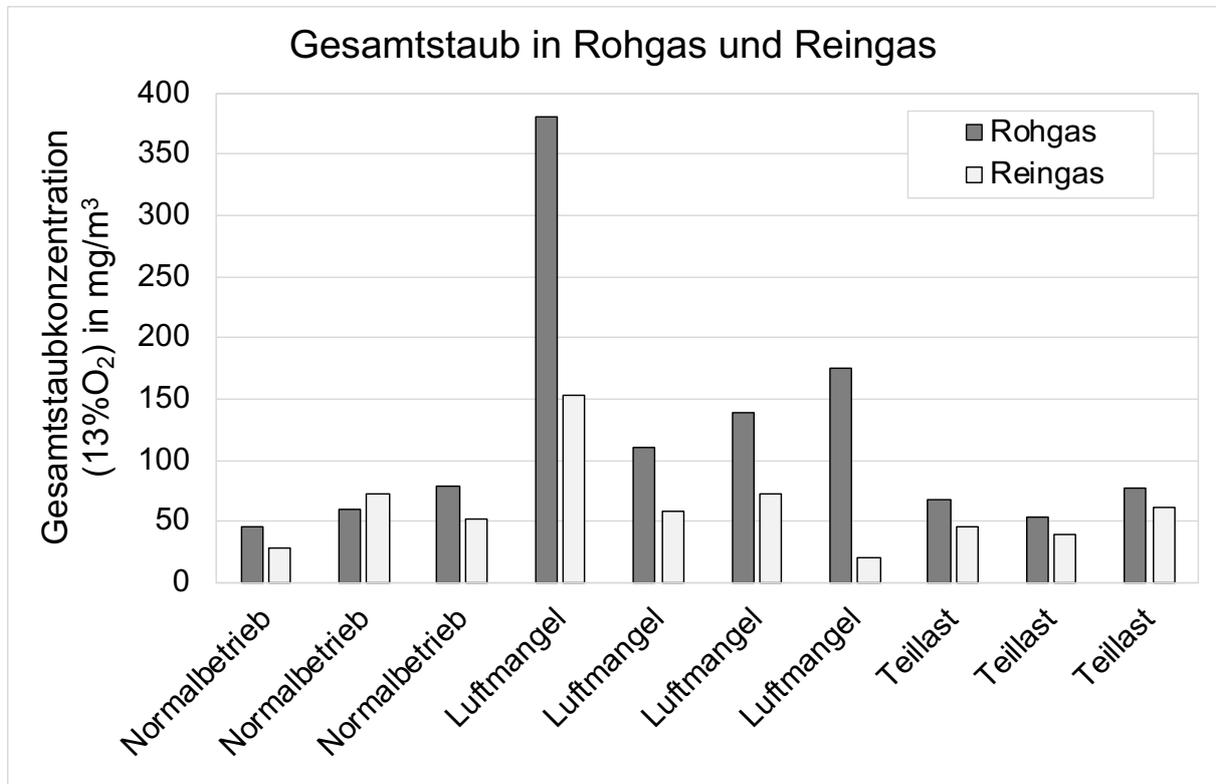


Abbildung 7.4: Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas am Kaminofen mit Röhrenelektroabscheider in Abhängigkeit der Betriebsweise

Um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Bereichen besser zu veranschaulichen, sind sie nachfolgend in Abbildung 7.5 in einem Kastendiagramm dargestellt, dies wird auch als Boxplot bezeichnet. Hier sind die deutlich höheren Gesamtstaubemissionen im Betrieb im Luftmangel gut zu erkennen. Ebenso gut zu erkennen sind die dadurch etwas höheren Konzentrationen im Reingas. Überraschend ist der Bereich des Normalbetriebs. Hier wäre eine gute Abscheidung zu erwarten, jedoch steigen die Konzentrationen im Reingas teils sogar an, so dass der Mittelwert über dem Rohgas liegt. Dies bedeutet, dass während der Messung es zu einer Zunahme im Reingas an Partikel kommt, was Wiedereintrag vermuten lässt. In Zuständen mit höheren Emissionen im Luftmangel ist eine gute Abscheidung zu erkennen, im Betrieb mit Teillast eine geringe aber positive Abscheidung.

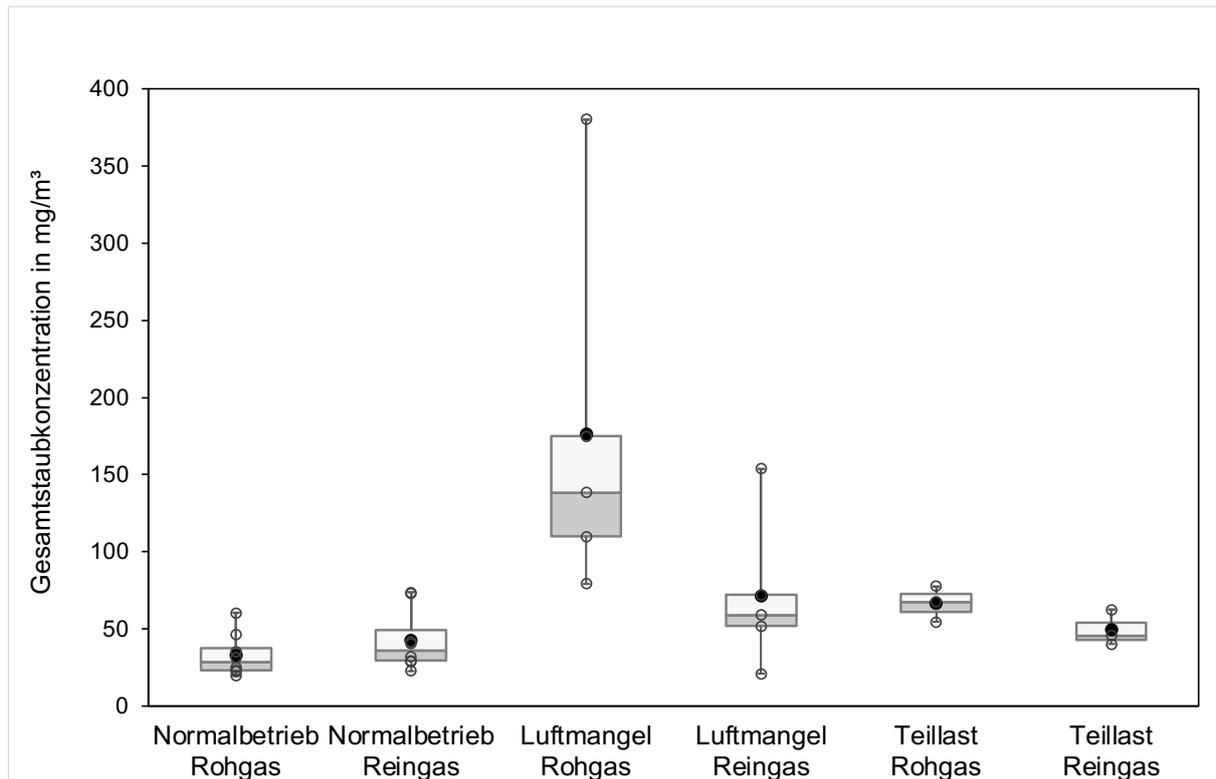


Abbildung 7.5: Darstellung der Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas als Kastendiagramm (Box Plot), klassiert nach Betriebsweise und Messstelle

Eine Ursache für die bessere Abscheidung bei höheren Emissionen könnte darin vermutet werden, dass dann auch viele größere Partikel enthalten sind, die viel einfacher abgeschieden werden können.

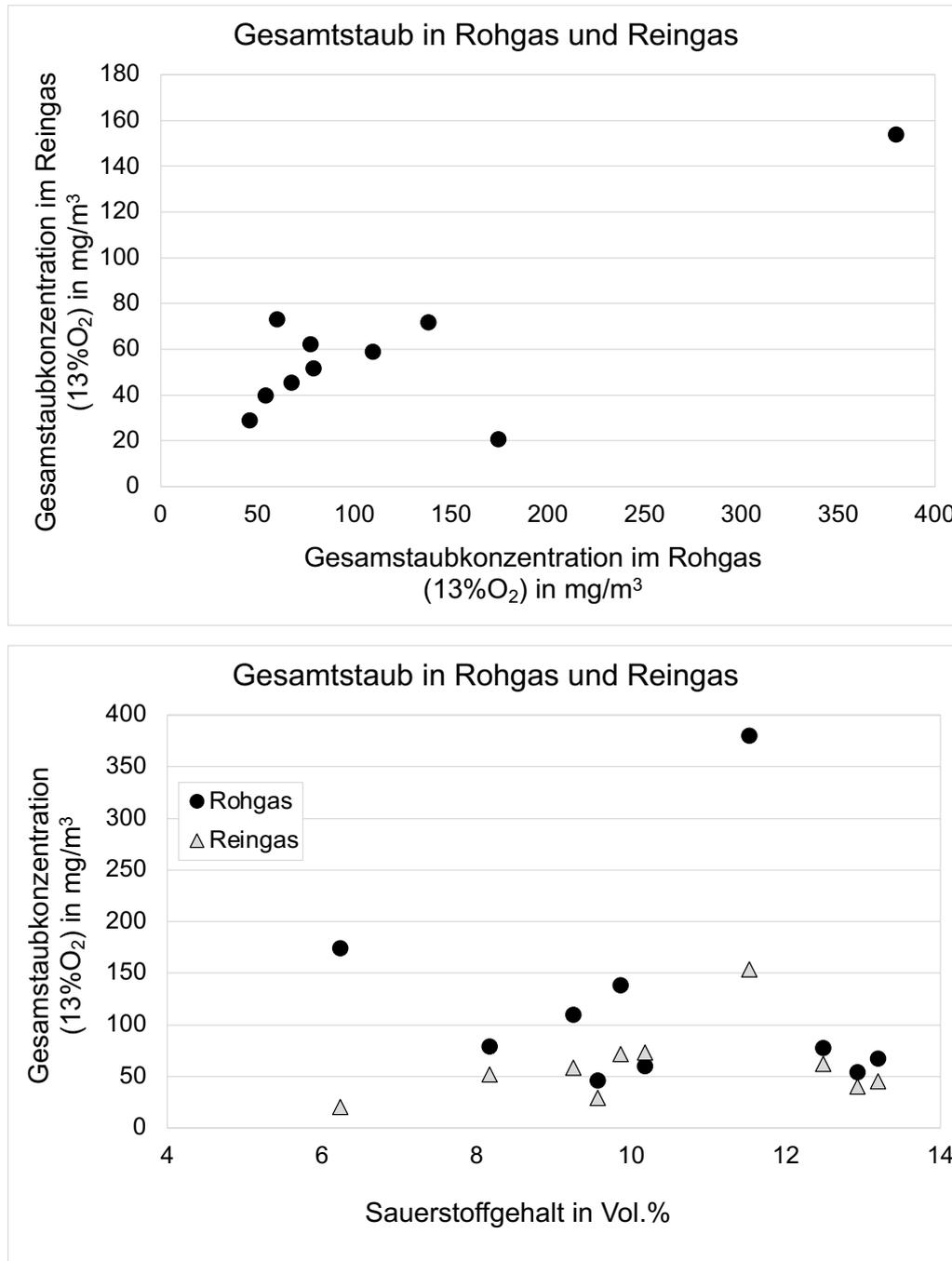


Abbildung 7.6: Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas am Kaminofen mit Röhrenelektroabscheider, dargestellt in gegenseitiger Abhängigkeit (oben) und über dem Sauerstoffgehalt (unten)

Die übliche Verwendung des Abscheidegrades soll durch die Betrachtung der absoluten Konzentrationsminderung ergänzt werden, da der Abscheidegrad durch die relative Angabe die Höhe der Emissionen nicht berücksichtigt.

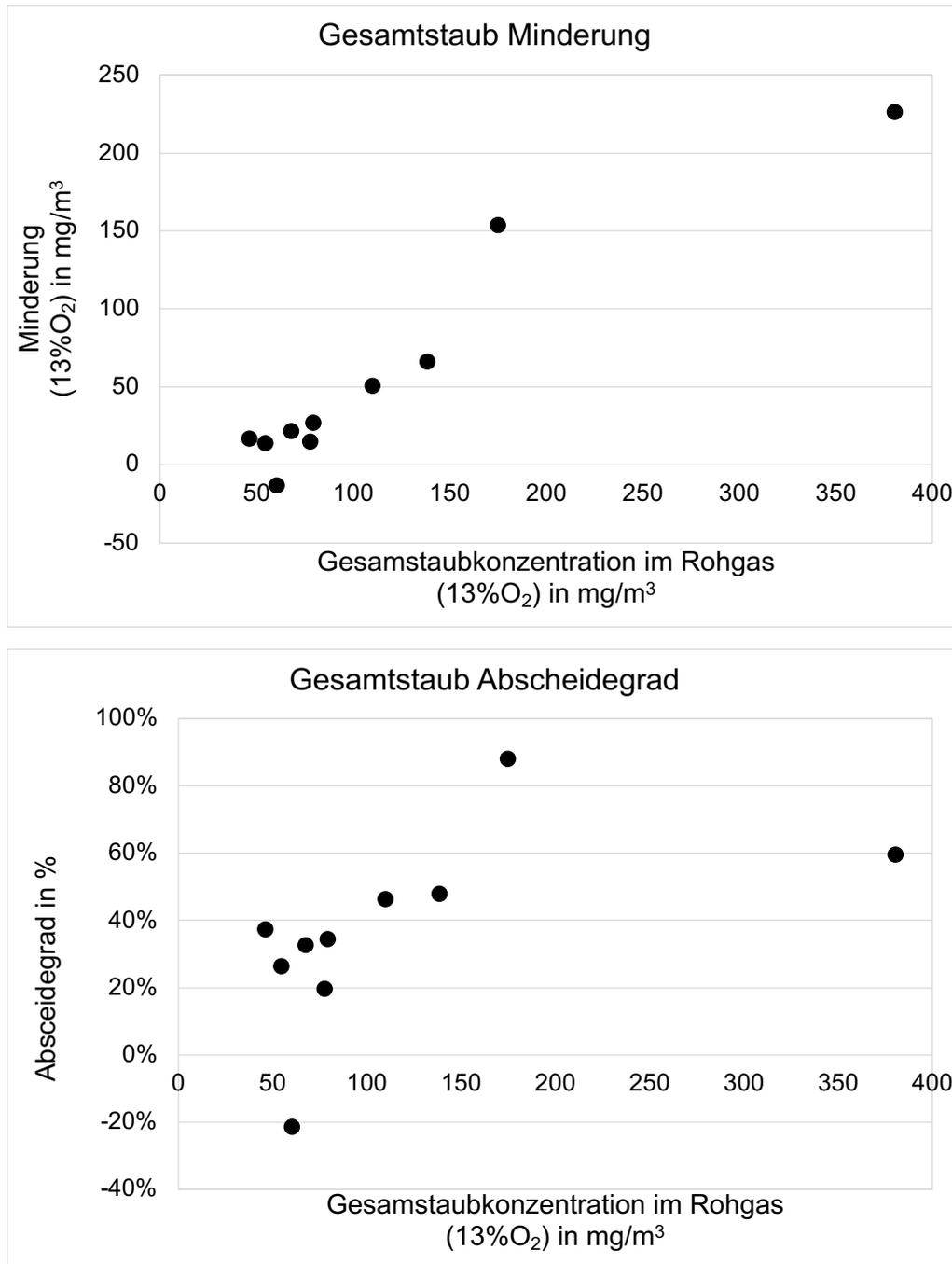


Abbildung 7.7: Abscheideverhalten des Röhrenelektroabscheiders: Darstellung der absoluten Minderung und des Abscheidegrades in Abhängigkeit der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas

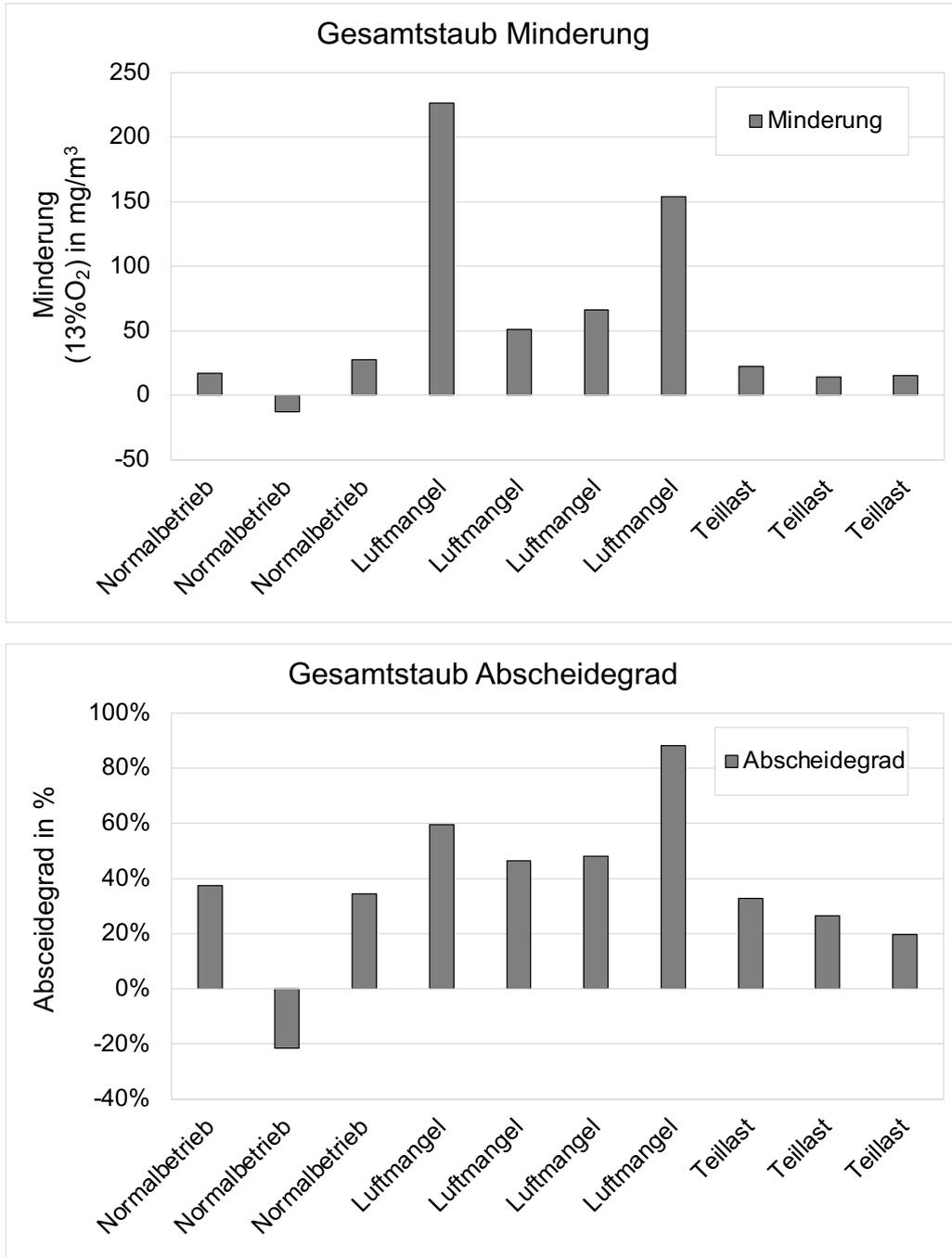


Abbildung 7.7 Fortsetzung: Abscheideverhalten des Röhrenelektroabscheiders: Darstellung der absoluten Minderung und des Abscheidegrades in Abhängigkeit der Gesamtstaubkonzentration je Betriebsart

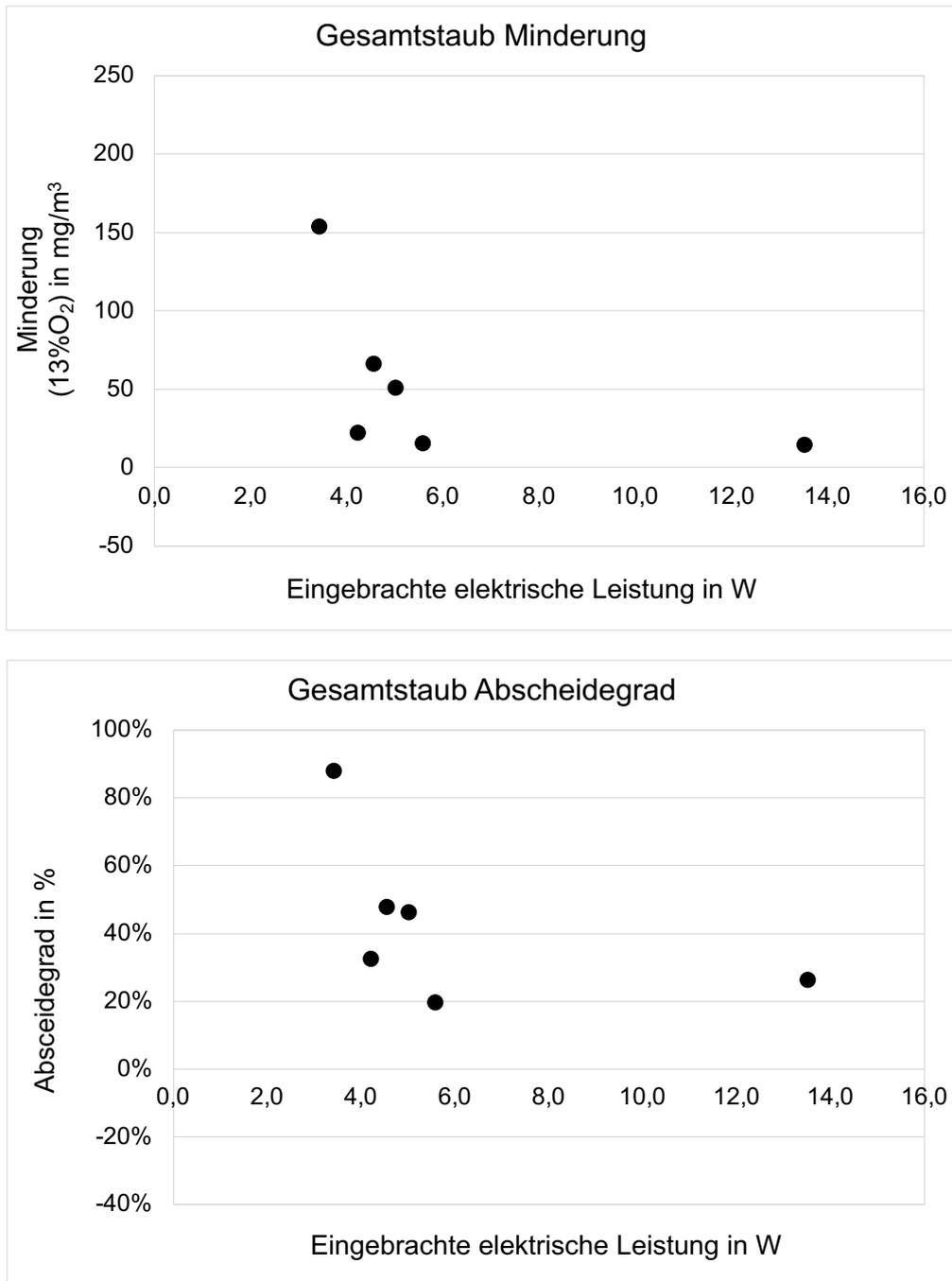


Abbildung 7.8: Abscheideverhalten in Abhängigkeit zur eingebrachten elektrischen Leistung des Abscheiders

Theoretisch besteht bei einem Elektroabscheider ein Zusammenhang zwischen der Abscheidung und der eingebrachten elektrischen Leistung. Dies kann hier nicht gefunden werden, wie in Abbildung 7.8 zu sehen ist. Vermutet wird, dass der Zusammenhang von zu vielen anderen Faktoren überlagert wird.

7.1.5 Beispielhafte Auswertung der eigenen Versuchsergebnisse nach dem Bewertungsverfahren der DIN SPEC 33999 (2014)

Für den vorliegenden Fall soll beispielhaft eine Auswertung der ermittelten Versuchsergebnisse nach dem Bewertungsverfahren der DIN SPEC 33999 (2014) durchgeführt und deren Anwendbarkeit getestet werden.

Das Verfahren ist in Kapitel 4.4.2 beschrieben, daher erfolgt hier nur die Anwendung und Berechnung mit den eigenen Versuchsdaten als Basis.

Die Auswertung erfolgt auf Grundlage der Angaben der DIN SPEC 33999 (2014) Kapitel 5, S.11ff, für die Prüfung von Abscheidern für handbeschickte Feuerungen ohne Gebläse.

Einteilung in Abgasstaubzustände

Zur Auswertung der Daten werden diese in zwei verschiedene Klassen eingeordnet (hier in Tabelle 7.5 zu sehen, dortige Tabelle 2, S.17). Die Klassen werden als Abgasstaubzustände bezeichnet – Abgasstaubzustand 1 „gut“ entspricht einem Feuerungszustand mit niedrigeren Emissionen, Abgasstaubzustand 2 „schlecht“ entspricht einem höheren Emissionsniveau. Für beide Klassen sind zulässige Bereiche für die Parameter Gesamtstaubkonzentration, CO-Konzentration und TVOC-Konzentration vorgegeben – jeweils als Angabe in mg/m³ und bezogen auf Rohgas und auf 13 Vol.-% O₂.

Tabelle 7.5: Versuchsmatrix der DIN SPEC 33999 (2014) für Abscheider für handbeschickte Feuerungen ohne Gebläse

Variante Nr.	Abgasstaubzustand	Staubkonzentration im Rohgas mg/m ³	CO mg/m ³	TVOC mg/m ³	Zu prüfende Feuerungsart	Bemerkung
1	„gut“	40 bis 100	300 bis 4 000		A1, A2, A3	Es ist darauf zu achten, dass die Abgastemperatur bei der Messung in dem vom Hersteller zulässigen Temperaturbereich liegt.
2	„schlecht“	150 bis 300	3 000 bis 8 000	> 200 ^a	A1, A2, A3	
<p>Es bedeuten:</p> <p>A1 Naturzugfeuerungen, diskontinuierlich beschickt gemäß Anlage 4 der 1. BImSchV [1] (außer Pelletöfen);</p> <p>A2 Durchbrandkessel, diskontinuierlich beschickt mit Naturzug;</p> <p>A3 Unterbrandkessel, diskontinuierlich beschickt mit Naturzug.</p> <p>^a Bei Prüfung von Staubabscheidern mit katalytischer Wirkung.</p>						

Auswertung der Messergebnisse

Zur Auswertung der Messungen werden zuerst sämtliche Emissionswerte auf 13 Vol.-% Sauerstoff bezogen (dortige Gleichung 1 und 2). Für jede Messung wird der Abscheidegrad η_{gem} aus den Gesamtstaubkonzentrationen von Rohgas c_1 und Reingas c_2 errechnet (dortige Gleichung 4). Pro Abgasstaubzustand wird ein Mittelwert der Abscheidegrade $\eta_{1,m}$ bzw. $\eta_{2,m}$ gebildet (dortige Gleichung 6). Unter Einberechnung des Blindabscheidegrades des Leerrohres ohne bzw. bei ausgeschaltetem Abscheider wird pro Abgasstaubzustand ein gemittelter, korrigierter Abscheidegrad $\eta_{1,m,\text{kor}}$ bzw. $\eta_{2,m,\text{kor}}$ berechnet (dortige Gleichung 5).

Darstellung der Messergebnisse

Zur Darstellung der Messergebnisse wird dann schließlich der signifikante Staubabscheidegrad pro Abgasstaubzustand η_{sig} berechnet (dortige Gleichung 9, S.23f). In der Anmerkung 1 dazu heißt es: „Ein möglicher Wiederaustrag von Partikeln bzw. Wiedereintrag ins Abgas wird durch wiederholte Messung ohne Zwischenabreinigung des Messaufbaus während eines Abgasstaubzustandes mitberücksichtigt.“

Anwendung auf die Versuchsergebnisse

Nachfolgend wird die Anwendung dieses Vorgehens auf die oben beschriebenen Versuchsergebnisse am Kaminofen beschrieben. Aus den durchgeführten Versuchen werden die zu den Vorgaben der Abgasstaubzustände passenden Versuche ausgewählt, wie in Tabelle 7.6 ersichtlich.

Für den Zustand „gut“ sind sieben Versuche vorhanden, die in die Vorgaben des Schemas passen. Für den Zustand „schlecht“ fällt lediglich ein einziger Versuch in die Vorgaben, die anderen fallen in die „Lücke“ zwischen $100 \dots 150 \text{ mg/m}^3$. Mit nur einem Versuch ist keine weitergehende Auswertung möglich. Daher wird **hier abweichend zum vorgegebenen Verfahren der Bereich erweitert** auf „**schlecht***“ mit Staubkonzentrationen $>100 \text{ mg/m}^3$, anstatt $>150 \text{ mg/m}^3$. Damit stehen immerhin vier Versuche zur Verfügung.

Tabelle 7.6: Auswahl der Versuche und Zuordnung zu den Abgasstaubzuständen "gut" und "schlecht" („schlecht“ wird gegenüber der Vorgabe erweitert)

Abgasstaubzustand "gut" 40-100 mg/m ³		Gesamtabbrand					Mittelwert Staubprobenahme - Rohgas -							Mittelwert Staubprobenahme - Reingas -			
Versuch	Abbrand	CO ₂ in Vol%	CO in mg/m ³	VOC mg/m ³	CO in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	VOC in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	CO in mg/m ³	VOC in mg/m ³	Staub in mg/m ³	O ₂ in Vol%	Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	CO in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	OGC in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Staub in mg/m ³	O ₂ in Vol%	Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Abscheidegrad in %
09	0 Zwischenabbrand	5,7	1.916	226	2.619	308	2.632	360	42	15,2	58	3.632	496	8	19,5	41	29%
10	1 Normalbetrieb	7,0	2.211	72	2.433	80	1.731	161	66	9,6	46	1.208	112	12	17,6	29	37%
11	2 Normalbetrieb	7,5	1.260	40	1.317	41	1.161	68	82	10,2	60	857	50	27	18,1	73	-21%
12	3 Normalbetrieb	7,0	2.725	120	3.042	134	4.089	292	127	8,2	79	2.543	181	22	17,5	52	35%
18	2 Teillast	6,1	1.447	88	1.866	113	1.352	84	66	13,2	68	1.384	86	8	19,6	45	33%
19	3 Teillast	6,6	968	71	1.151	84	996	99	55	12,9	54	986	98	9	19,2	40	26%
20	4 Teillast	6,7	1.822	95	2.140	112	1.559	151	83	12,5	78	1.463	142	12	19,4	62	20%

Die Vorgabe "CO 300 bis 4000 mg/m³" wird von den Versuchsdaten erfüllt.

Bezüglich der VOC-Werte gibt es keine Vorgabe.

Abgasstaubzustand "schlecht*" >100 mg/m ³		Gesamtabbrand					Mittelwert Staubprobenahme - Rohgas -							Mittelwert Staubprobenahme - Reingas -			
Versuch	Abbrand	CO ₂ in Vol%	CO in mg/m ³	VOC mg/m ³	CO in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	VOC in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	CO in mg/m ³	VOC in mg/m ³	Staub in mg/m ³	O ₂ in Vol%	Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	CO in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	OGC in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Staub in mg/m ³	O ₂ in Vol%	Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Abscheidegrad in %
13	4 Luftmangel	9,8	8.051	400	6.361	316	27.301	1.418	451	11,5	380	23.026	1.196	38	19,0	154	60%
14	1 Luftmangel	7,7	2.284	88	2.370	92	2.085	183	162	9,2	110	1.416	124	20	18,2	59	46%
15	2 Luftmangel	7,6	2.134	128	2.250	135	2.105	138	193	9,9	138	1.508	99	20	18,7	72	48%
16	3 Luftmangel	13,4	6.958	388	4.257	238	13.077	744	323	6,2	175	7.065	402	6	18,6	21	88%

* Regulär vorgegebener Zustand "schlecht" wird erweitert auf den Bereich >100mg/m³

Die Vorgabe "CO 3000 bis 8000 mg/m³" wird nicht von allen Versuchsdaten erfüllt.

Die Vorgabe "VOC über 200 mg/m³" wird nicht von allen Versuchsdaten erfüllt.

Auffallend hierbei ist, dass sämtliche Versuche von „gut“ alles den Betriebsweisen „Normalbetrieb“, „Zwischenabbrand“ und „Teillast“ angehören. Alle Versuche die dem erweiterten Zustand „schlecht*“ zugeordnet werden können, gehören zur Betriebsweise „Luftmangel“.

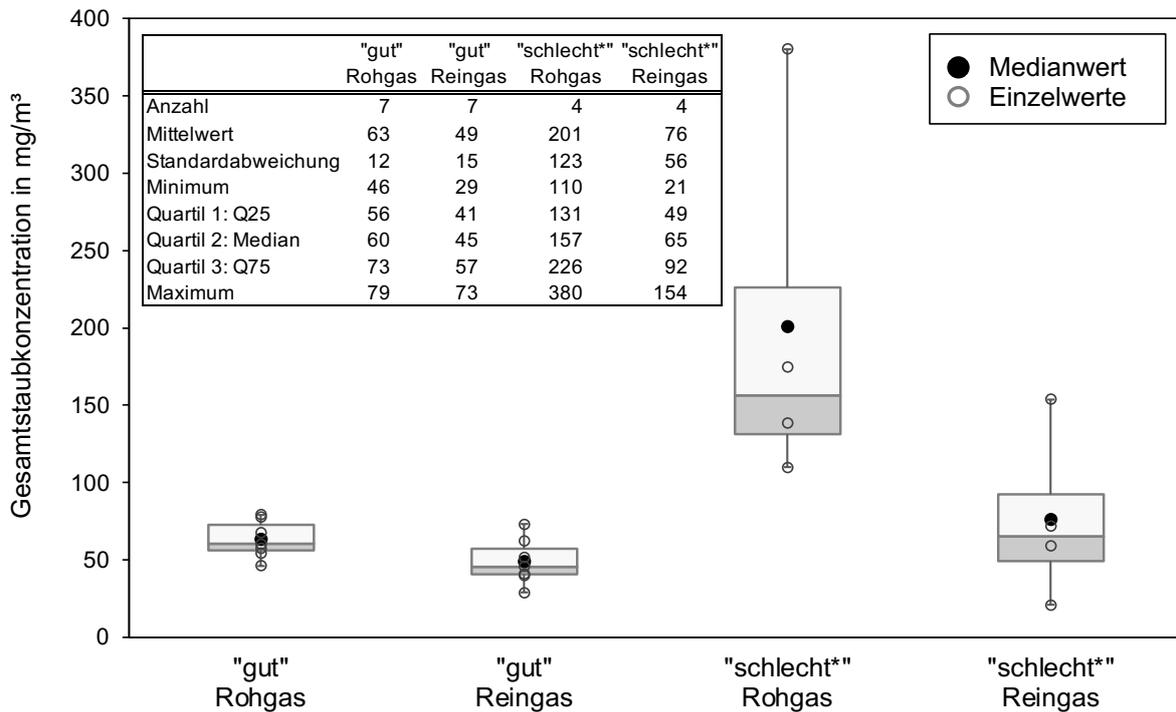


Abbildung 7.9: Kastendiagramm (Boxplot) für die Gesamtstaubkonzentrationen (bezogen auf 13Vol.-% Sauerstoff) in Rohgas und Reingas, aufgeteilt nach Abgasstaubzustand „gut“ und „schlecht*“ (erweitert)

Der reguläre Abgasstaubzustand „schlecht“ ist wie beschrieben hier nicht auswertbar, liefert also kein Ergebnis. Beim Abgasstaubzustand „gut“ errechnet sich der signifikante Staubabscheidegrad zu -27% bei einem gemittelten Abscheidegrad von 23%. Der modifizierte Abgasstaubzustand „schlecht*“ liefert einen signifikanten Abscheidegrad von -1% bei einem gemittelten Abscheidegrad von 61%. Die negativen Ergebnisse der signifikanten Abscheidegrade bei jedoch positiv ausfallenden gemittelten Abscheidegraden kommen durch die hohe Schwankungsbreite der Messwerte bei gleichzeitig recht niedriger Anzahl an Messwerten pro Zustand, die als hohe Unsicherheit in die statistische Berechnung eingehen.

Tabelle 7.7: Berechnung des signifikanten Abscheidegrades nach Formel (9) der
DIN SPEC 33999 (2014)

			"gut"	"schlecht" (regulär)	"schlecht**" (erweitert)
Anzahl der Einzelwerte	n	-	7	1	4
Studentfaktor für 95 % Vertrauensbereich	t *	-	2,47		3,18
Standardabweichung der gemessenen Abscheidegrade in %	s	%	20		19
erweiterte Ergebnisunsicherheit in %	U	%	50		61
mittlerer Staubabscheidegrad in %	η_m	%	23	88	61
signifikanter Staubabscheidegrad in %	η_{sig}	%	-27		-1

*(Vertrauensbereich ist auf 95% festgesetzt)

Berechnung des bewerteten Abscheidegrades nach Anhang C der DIN SPEC 33999 (2014)

Eine Abschätzung der Eignung eines Staubabscheiders für eine Feuerung, an der ein nach DIN SPEC 33999 geprüfter Staubabscheider eingesetzt werden soll, gibt deren Anhang C. Dies erfolgt durch Gewichtung und Verrechnung der gemittelten Abscheidegrade der beiden Abgasstaubzustände, je nachdem welches Emissionsniveau bei der Feuerung zu erwarten ist.

Für handbeschickte Feuerungen ohne Gebläse gilt die Gleichung (C.1). Die Ergebnisse der Berechnungen von den durchgeführten Messungen ergibt folgende Tabelle.

Tabelle 7.8: Bewertung der Eignung des Staubabscheiders in Abhängigkeit der CO-
Klasse (nach DIN SPEC 33999 - Anhang C (2014)), Berechnung nach der
Vorgabe für Einzelraumfeuerungen ohne Pelletöfen nach Formel (C.1)

			CO-Klasse 1,25 g/m ³	CO-Klasse 2 g/m ³	CO-Klasse 4 g/m ³
mittlerer Staubabscheidegrad von Abgasstaubzustand 1	$\eta_{1,m}$	%	23	23	23
Gewichtungsfaktor für den Abgasstaubzustand 1	F1	-	0,6	0,4	0,2
mittlerer Staubabscheidegrad von Abgasstaubzustand 2	$\eta_{2,m}$	%	61	61	61
Gewichtungsfaktor für den Abgasstaubzustand 2	F2	-	0,4	0,6	0,8
bewerteter, gemittelter Abscheidegrad	$\eta_{b,m}$	%	38	45	53

Als Beispiel, wie das Ergebnis zu verstehen ist: der vermessene Staubabscheider soll an einer Feuerung in der CO-Klasse bis 1,25 mg/m³ eingesetzt werden. Dann wäre unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Messungen und beschriebenen Berechnungen mit einem durchschnittlichen Staubabscheidegrad von 38 % zu rechnen.

Vorgaben für den Sonderfall Schornsteinaufsatzabscheider

Zur Messstrecke ist angegeben, dass „der Prüfaufbau sicherstellen muss, dass die Messstrecke die Messung nicht dadurch beeinflusst, dass die Messstrecke zusätzliche Abscheidefläche für die Partikelabscheidung bereitstellt.“ Zwei Handlungsmöglichkeiten werden zugelassen:

1. Wenn 80% der Messstrecke innerhalb des Abscheiders bzw. dessen Auslassstutzen liegen, kann ohne weitere Berücksichtigung fortgefahren werden;
2. Ist dies konstruktiv nicht möglich, muss eine Ergänzungsmessung durchgeführt werden, mit der der Abscheidegrad einer verlängerten Messstrecke, die als zusätzliche Abscheidefläche gilt, vermessen wird. Dieser wird dann bei der Auswertung der Ergebnisse eingerechnet.

Für den Prüfaufbau der hier durchgeführten Versuche gilt Fall 1.

Abweichungen zum Vorgehen während Messung und Auswertung gegenüber der 33999:

- Zwischen den zwei Abgasstaubzuständen erfolgt keine Kehrung des Aufbaus
- Es erfolgt keine Berechnung des korrigierten, nur des normalen gemittelten Abscheidegrades (keine Einrechnung des Blindabscheidegrades)
- Erweiterung von Abgasstaubzustand 2 von 100 – 300 mg/m³ als „schlecht-2“

Bezug der DIN SPEC 33999 (2014) zur VDI 3670 (2016)

Zweck der Richtlinie 3670 ist die Beschreibung von Merkmalen zum Stand der Technik von Staubabscheidern („nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen“) für den Einsatz an Feuerungen im Geltungsbereich der 1.BImSchV. Für Einzelraumfeuerungen sind erreichbare Abscheidegrade als Orientierung zum Stand der Technik in dortiger Tabelle 4 angegeben. Unterschieden wird wie in der DIN SPEC 33999 nach zwei Bereichen. Für den Bereich „Abgaszustand bei Staub 40 – 100 mg/m³“ wird ein erreichbarer Abscheidegrad von 60 % oder mehr angegeben, für den Bereich „Abgaszustand bei Staub 150 – 300 mg/m³“ mit 50 % oder mehr. Ob sich die Empfehlungen auf den gemittelten oder signifikanten Abscheidegrad nach DIN SPEC 33999 beziehen, ist nicht konkretisiert.

7.2 Einfluss der Verbrennungsphase an einem Kaminofen mit zweistufigem Elektroabscheider mit automatischer Abreinigung

7.2.1 Versuchsbeschreibung

7.2.1.1 Gegenstand für die Untersuchung

Bei handbeschickten Feuerungen zeigt sich stets ein charakteristisches Verhalten der Verbrennung und auch der Emissionen (vergleiche Kapitel 7.1.2). In dieser Untersuchung soll der Einfluss der Verbrennungsphase an einem Kaminofen mit Elektroabscheider betrachtet werden. Da es sich um ein technisch aufwändigeres Standgerät mit automatischer Abreinigung handelt, soll deren Verhalten besonders im Hinblick auf einen konstruktionsbedingt zu erwartenden stabileren Betrieb und eine konstant höhere Abscheidung betrachtet werden.

7.2.1.2 Versuchsdurchführung und Messintervalle

Untersucht werden neben der Gaszusammensetzung hier vor allem die Gesamtstaubkonzentrationen im Rohgas und Reingas, die parallel gemessen werden.

Durch die hohe Dynamik der Verbrennungsphasen werden die Messungen als Kurzzeitmessungen mit einem sehr kurzen Messintervall durchgeführt (5 Minuten).

7.2.1.3 Messgrößen und Messverfahren

Im Unterschied zu den anderen Versuchen werden aufgrund des kurzen Messintervalls für die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen keine Messungen mit Planfilterkopfggerät nach VDI 2066-1 (2006) durchgeführt, sondern es wird mit einem kontinuierlich gravimetrisch arbeitenden Messverfahren gearbeitet. Dabei handelt es sich um zwei baugleiche online Schornsteinfegermessgeräte des Modells SM500 der Firma Wöhler Technik GmbH (2022), das nach VDI 4206-2 (2015) geprüft ist.

Alle anderen Messparameter und Verfahren gleichen den Angaben in Tabelle 7.4.

Da es sich um einen Abscheider handelt, der ohne Spülluft arbeitet, wird das Abgas nicht hierdurch verdünnt, und es erfolgt keine zusätzliche Messung der Gaszusammensetzung im Reingas.

7.2.1.4 Prüfaufbau

Für die Untersuchungen wird ein erweiterter Feuerungsprüfstand verwendet, ähnlich zu Abbildung 7.1. Hierzu unterscheidet sich die Einbringung des Abscheiders. Da es sich um ein Standgeräte handelt, wird nach der Feuerung die Rohgasmessstrecke und unmittelbar danach der Abscheider auf gleicher Höhe angebracht, gefolgt von der Reingasmessstrecke.

7.2.1.5 Feuerung und Brennstoff

Feuerung und Brennstoff entsprechen den Geräten der vorangegangenen Untersuchung, beschrieben in Kapitel 7.1.1.6.

7.2.1.6 Abscheider

Beim Abscheider handelt es sich um einen zweistufigen Abscheider mit Ionisationsstufe und Abscheidefläche in Röhrenform mit integrierter automatischer Abreinigung im Entwicklungsstadium. Die Abreinigung der Rohrfläche erfolgt zeitgesteuert mittels

Drehung einer eingebauten spiralförmig ausgeführten Metallbürste. Der Abscheider ist als Standgerät ausgeführt, das direkt an die Feuerung angeschlossen wird. Die Strom- und Spannungswerte werden über das eingebaute Hochspannungsgerät für die Versuche ausgelesen und erfasst.

7.2.2 Ergebnisse zum Abbrandverlauf

Beispielhaft sollen hier in Abbildung 7.10 die Ergebnisse zum zeitlichen Verlauf über mehrere Abbrände gezeigt werden. Markiert sind die Zeitpunkte der Brennstoffauflage, zu erkennen am Abfall des Sauerstoffgehalts, dem Anstieg der Abgastemperatur und dem sprunghaften Anstieg von Kohlendioxid, ebenso wie der Emissionsanstieg von Kohlenmonoxid und den flüchtigen Kohlenwasserstoffen.

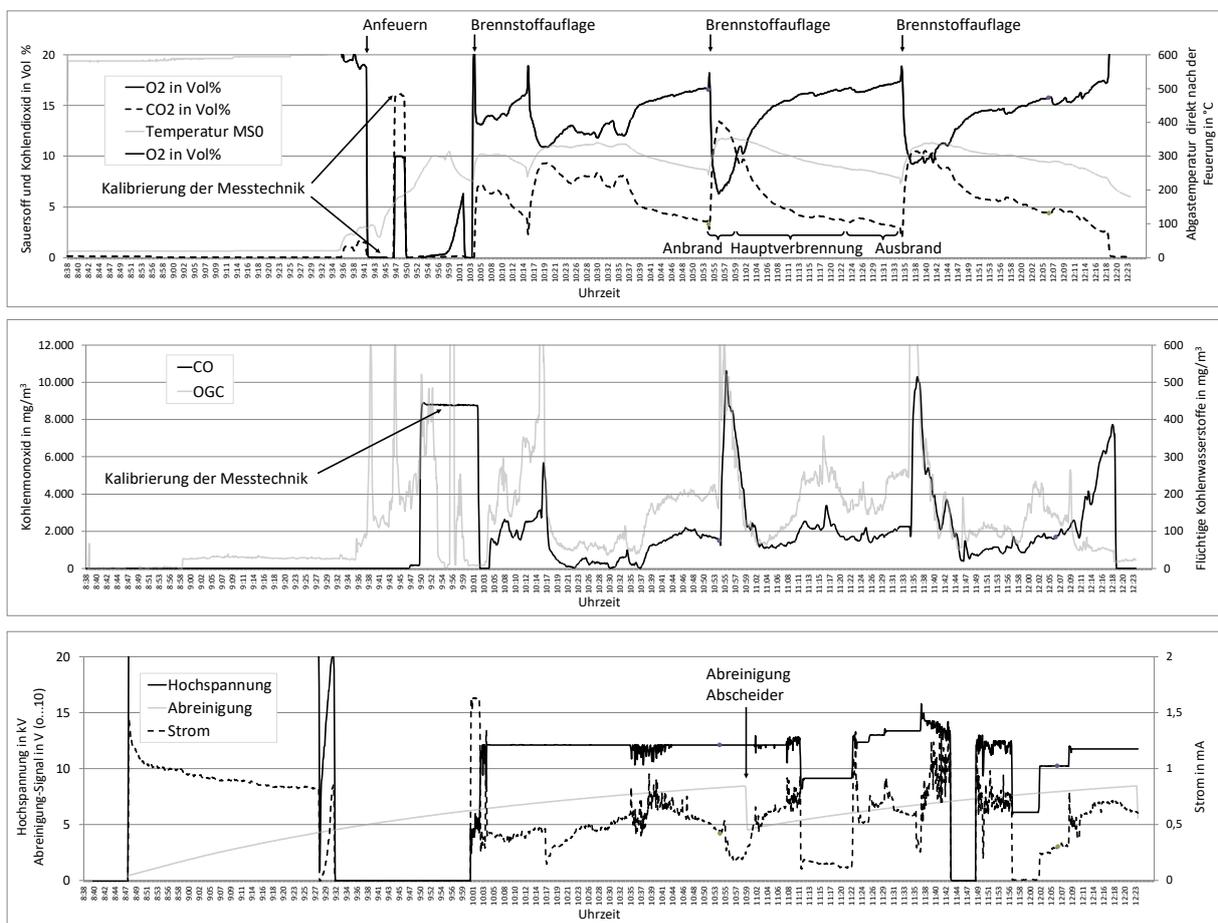


Abbildung 7.10: Abbrandverhalten des Kaminofens (oben: Gaszusammensetzung und Abgastemperatur, mitte: gasförmige Emissionen) und Messgrößen des Abscheiders (unten)

7.2.3 Ergebnisse zum Einfluss der Verbrennungsphase auf das Emissionsverhalten

Nachfolgend sind in Abbildung 7.11 die Ergebnisse zu Gaszusammensetzung im Abgas und dem Emissionsverhalten der Feuerung dargestellt. Generell lässt sich sagen, dass die Streuung der Werte im Anbrand am höchsten ist. Die Emissionen sind im Anbrand für alle

drei Schadstoffe am höchsten, am deutlichsten ist dies für die Gesamtstaubemissionen zu erkennen, die in den anderen Phasen deutlich niedriger liegen.

Dies unterstreicht die Wichtigkeit dieser Phase beim Thema der Emissionsminderung.

Vor allem in dieser Phase muss eine Sekundärmaßnahme einen stabilen Betrieb mit einer möglichst hohen Abscheidung aufweisen, soll die Emissionsbelastung durch die Feuerung dauerhaft gemindert werden.

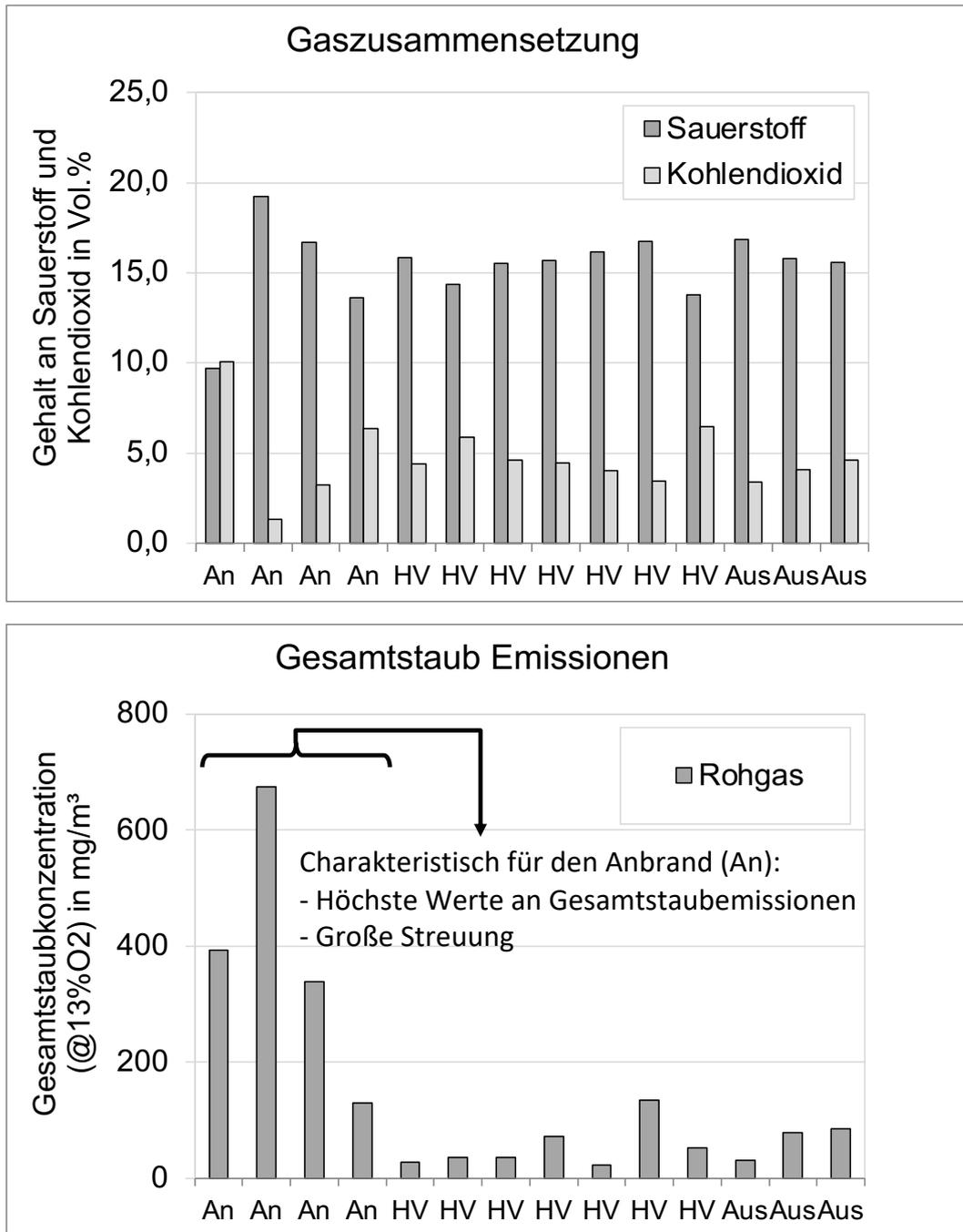


Abbildung 7.11: Emissionsverhalten am Kaminofen in Abhängigkeit zur Verbrennungsphase (An: Anbrand, HV: Hauptverbrennung, Aus: Ausbrand)

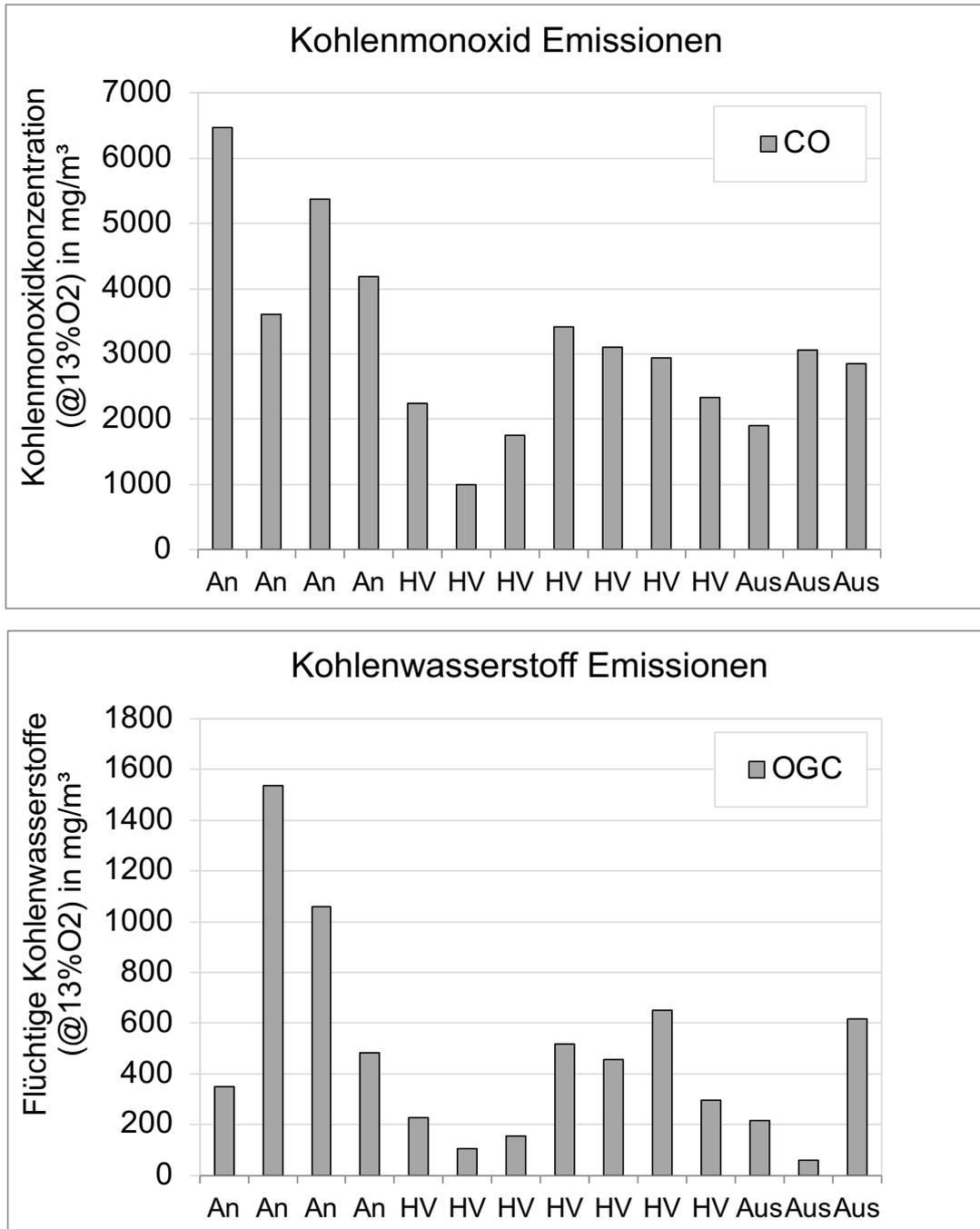


Abbildung 7.11 Fortsetzung: Emissionsverhalten am Kaminofen in Abhängigkeit zur Verbrennungsphase (An: Anbrand, HV: Hauptverbrennung, Aus: Ausbrand)

7.2.4 Ergebnisse zum Einfluss der Verbrennungsphase auf das Abscheideverhalten

Nachfolgend sind verschiedene Darstellungen zu den Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas in Bezug auf die Verbrennungsphasen gegeben. Abbildung 7.12 gibt die Gesamtstaubkonzentrationen der Verbrennungsphasen, in Abbildung 7.13 werden diese durch Angabe des Abscheidegrades und den Versuchen im gestörten Betrieb ergänzt. Für eine bessere Übersicht über die Abhängigkeit der Werte zur Verbrennungsphase, sind diese in Abbildung 7.14 noch als Kastendiagramme gezeigt.

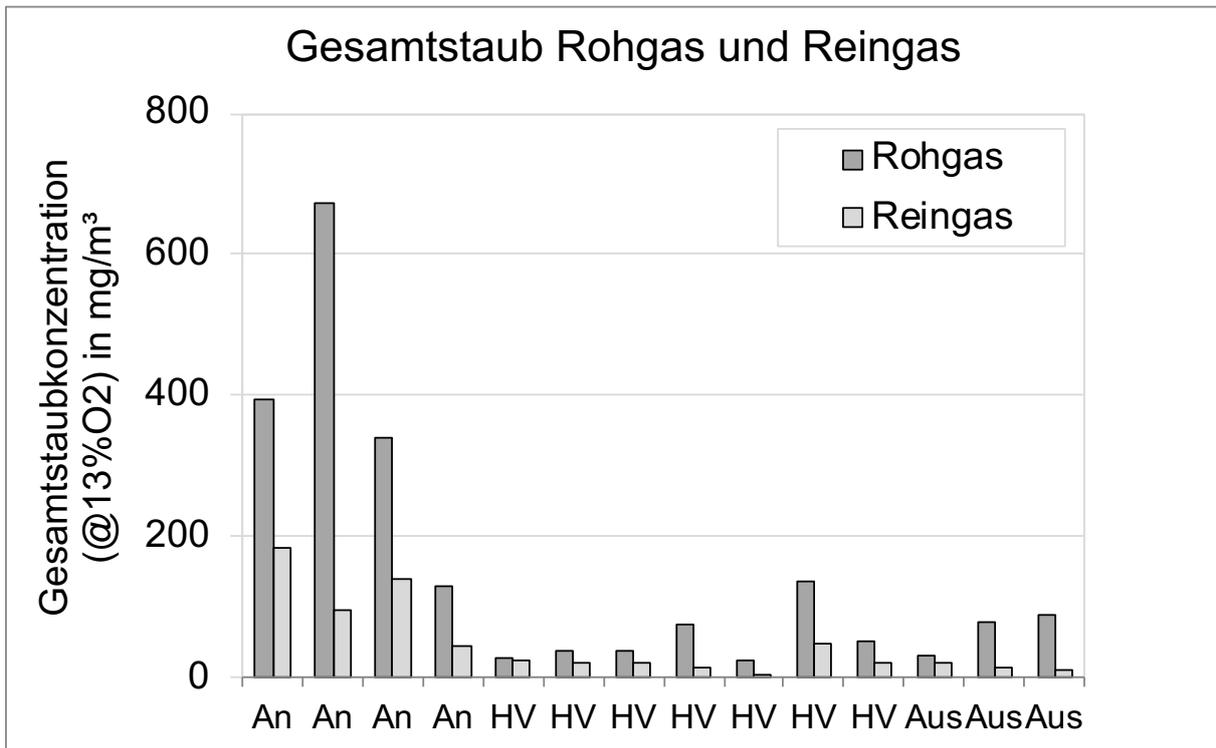


Abbildung 7.12: Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas in Abhängigkeit zur Verbrennungsphase (An: Anbrand, HV: Hauptverbrennung, Aus: Ausbrand)

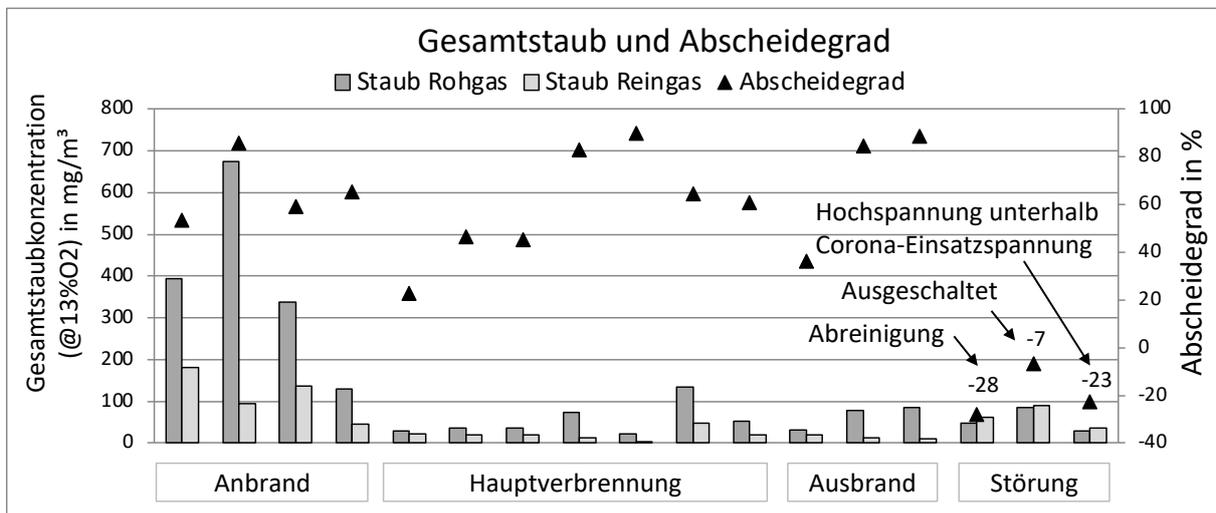


Abbildung 7.13: Zusammenfassende Darstellung zu Gesamtstaub und Abscheidegrad in Abhängigkeit der Verbrennungsphasen und im gestörten Betrieb

Alle der Diagramme verdeutlichen die hohe Emissionsbelastung vor allem im Anbrand. Es zeigt ebenfalls, dass der Abscheider über alle Phasen einen stabilen Betrieb mit konstant mittlerer bis hoher Abscheidung aufweist, vor allem aber auch in der Anbrandphase. Im Mittel ergeben sich die Abscheidegrade zu 66 % im Anbrand bei einer Partikelemission von 384 mg/m³, in der Hauptverbrennung bei 55 mg/m³ zu 59 % und im Ausbrand bei 66 mg/m³ zu 70 %, was einem gesamten mittleren Abscheidegrad von 65 % entspricht.

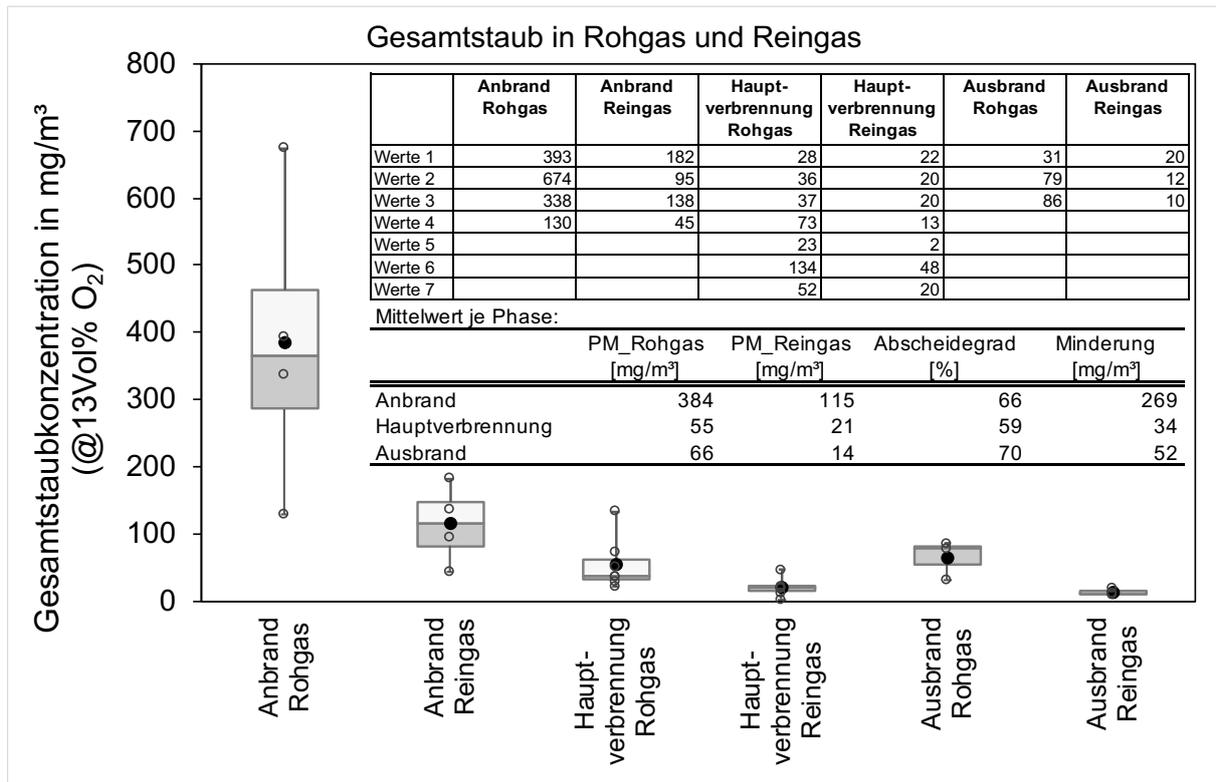


Abbildung 7.14: Kastendiagramm (Boxplot) zu den Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas in Abhängigkeit zur Verbrennungsphase bei einem Kaminofen mit Elektroabscheider

Die Abbildung 7.15 zeigt die einzelnen Ergebnisse zum Abscheideverhalten, gezeigt durch den Abscheidegrad und die absolute Minderung der Gesamtstaubkonzentration in den verschiedenen Abbrandphasen.

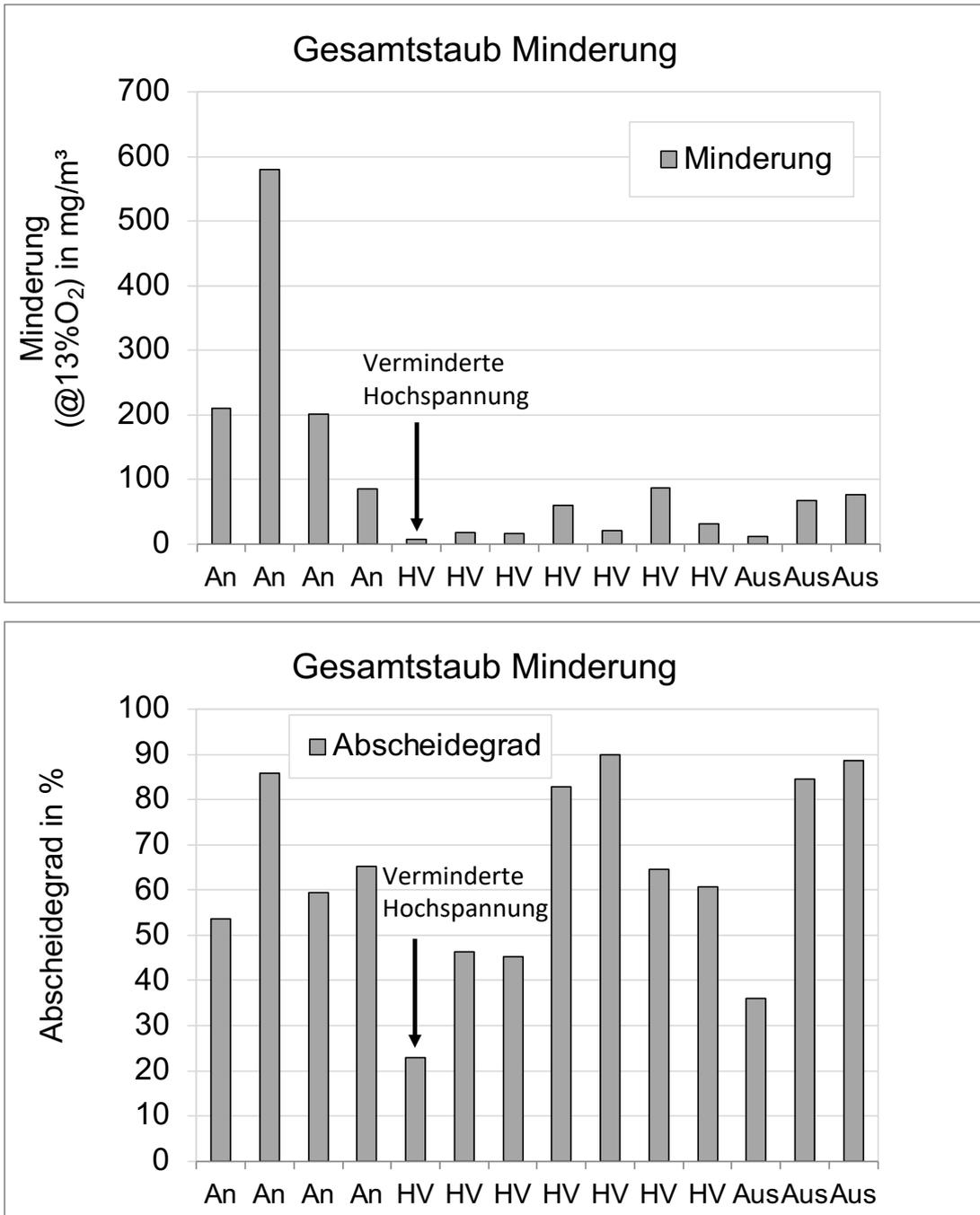


Abbildung 7.15: Abscheideverhalten in Abhängigkeit zur Verbrennungsphase am Kaminofen mit Elektroabscheider

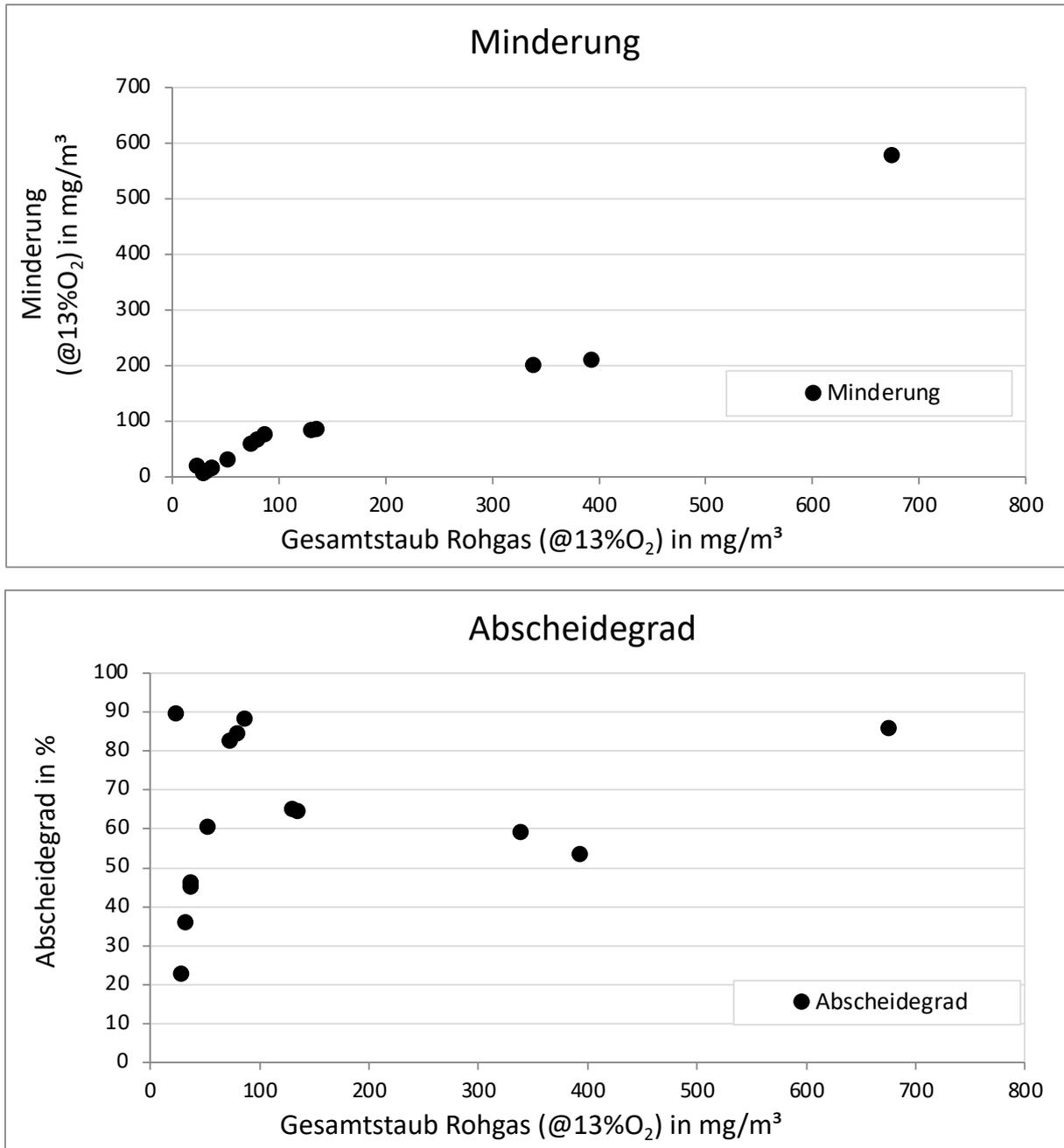


Abbildung 7.16: Abscheideverhalten : Zusammenhang der Abscheidung zur Gesamtstaubkonzentration im Rohgas

Abbildung 7.16 zeigt die Ergebnisse zum Abscheideverhalten in Abhängigkeit zur Gesamtstaubkonzentration im Rohgas.

7.2.5 Ergebnisse zu Abscheider-Kenngrößen

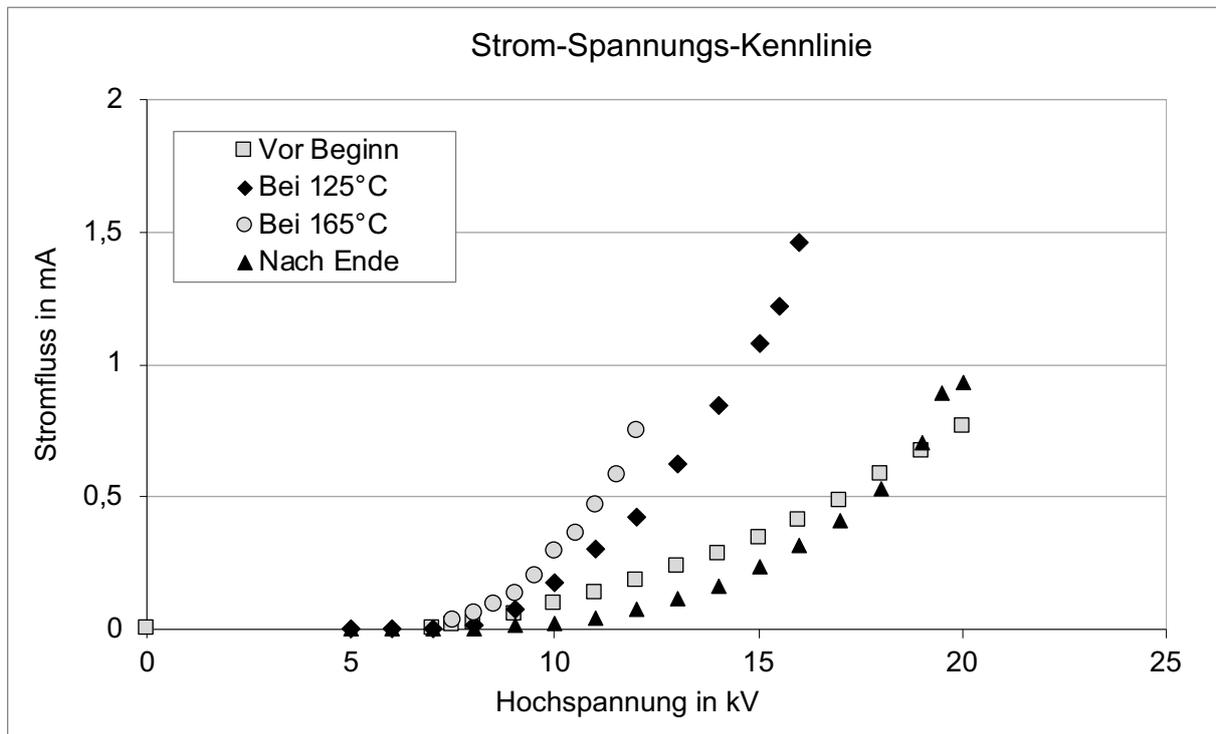


Abbildung 7.17: Strom-Spannungs-Kennlinien bei unterschiedlichen Bedingungen: Vor Beginn der Versuche (kalt), nach Ende der Versuche (kalt) und bei verschiedenen Temperaturen im Abgas während der Versuche

Ergebnisse zu den Kenngrößen des Abscheiders Hochspannung und Stromfluss zeigt Abbildung 7.17 verschiedene Kennlinien und Abbildung 7.18 die Ergebnisse in Abhängigkeit zur eingebrachten elektrischen Leistung. Die Strom-Spannungs-Kennlinie charakterisiert die Corona-Entladung der Elektroden bei einem Elektroabscheider. Hier ist der Vergleich vor und nach den absolvierten Versuchen zu sehen im kalten Zustand bei Raumtemperatur. Es ergibt sich eine leichte Veränderung der Charakteristik, nach den Versuchen ist die Kurve etwas steiler. Dies könnte auf eine Verschmutzung der Elektroden hindeuten oder auch auf eine leichte Verschiebung der Elektroden gegeneinander. Gut zu sehen ist der Einfluss der Temperatur. Je höher die Temperatur, umso steiler wird die Kurve und umso weniger angelegte Hochspannung ist notwendig, um einen höheren Stromfluss zu erzielen, um das umliegende Abgas zu ionisieren.

Wird der Zusammenhang zwischen den elektrischen Größen und der Abscheidung betrachtet, lässt sich bei diesen Versuchen erkennen, dass der theoretisch bestehende Einfluss der eingebrachten elektrischen Leistung nur in der stabileren Hauptverbrennung gefunden werden kann. Innerhalb Anbrand und Ausbrand wird dies nicht ersichtlich. Es wird vermutet, dass dies in der großen Streubreite und einer Vielzahl von anderen überlagernden Einflussgrößen und in der hohen Dynamik liegt, die in diesen Phasen vorherrschen.

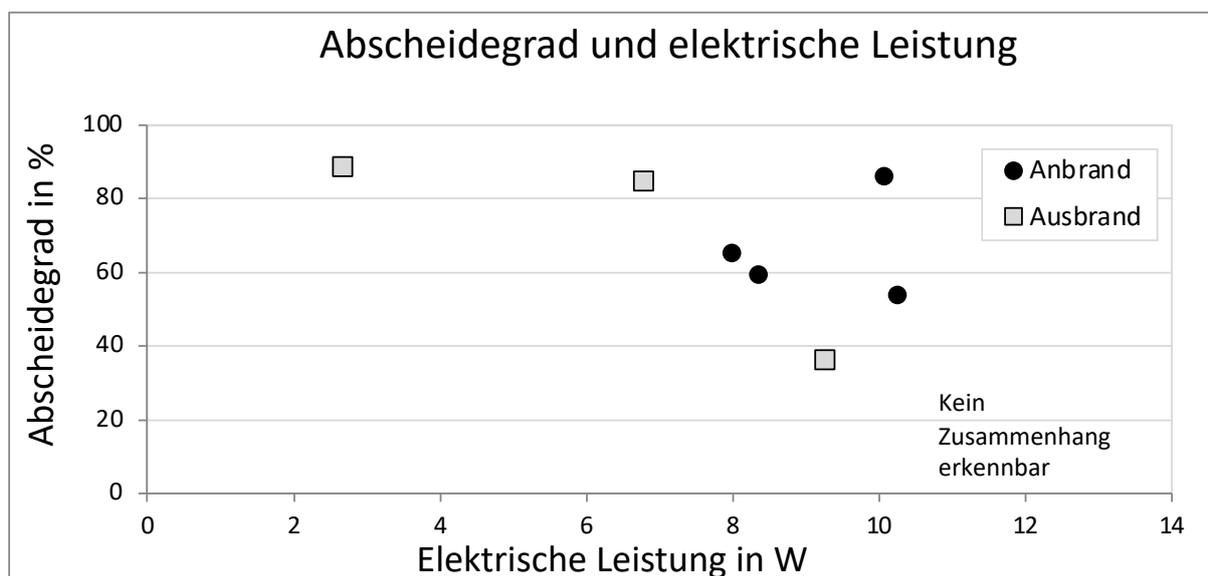
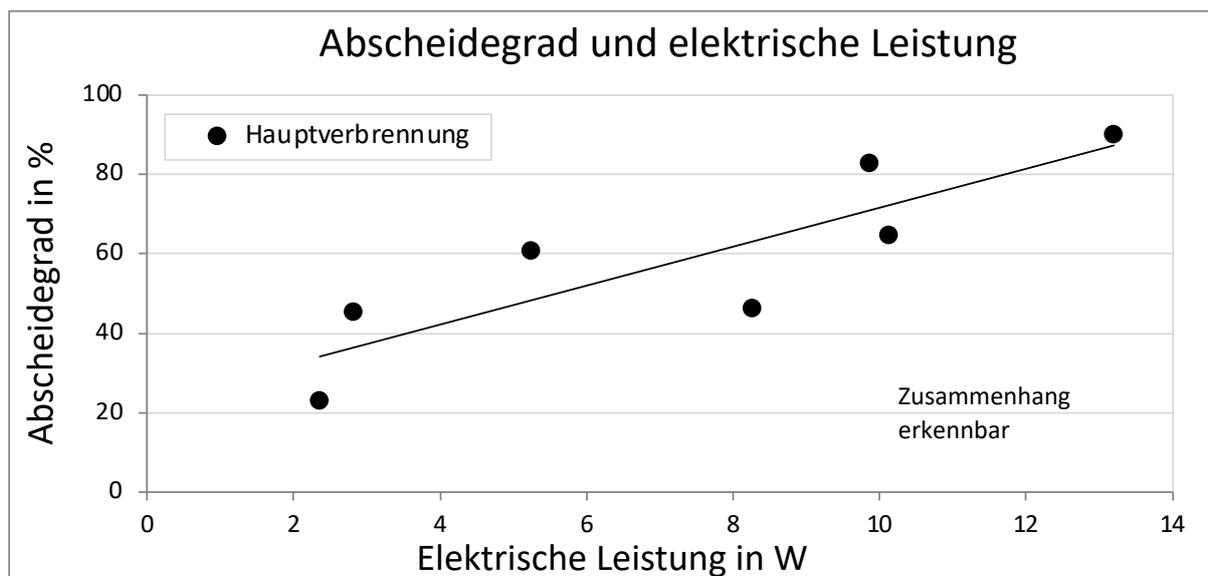


Abbildung 7.18: Zusammenhang zwischen Abscheidegrad und eingebrachter elektrischer Leistung in Abhängigkeit zur Verbrennungsphase

8 Diskussion und Schlussfolgerungen

8.1 Diskussion der einzelnen Untersuchungsergebnisse

8.1.1 Diskussion zum Einfluss der Verbrennungsqualität auf die Abscheidung

Es lässt sich zusammenfassen, dass das Emissionsverhalten am Pelletofen den Erwartungen entspricht. Bezüglich der Bereiche der Verbrennungsqualität bestätigen die Messungen die Abhängigkeit der Partikelbildung von den Verbrennungsluftverhältnissen, sowohl was die Gesamtstaubkonzentration angeht als auch die dominierende Partikelart. Die Charakterisierung der drei verschiedenen Verbrennungsluftbereiche Luftmangel, Luftoptimum und Luftüberschuss zeigt die jeweils dominierende Stoff-Fraktion der Partikelzusammensetzung als Ruß, Minerale und Teere.

Zum Abscheideverhalten lässt sich zusammenfassen, dass in der untersuchten Kombination an Feuerung und Abscheider nicht die Partikelart als Haupteinfluss für die Abscheidung gefunden wurde, sondern die Abscheidung in erster Linie von der Gesamtmenge an Partikelemissionen abhängig ist. Weder Rußverbindungen, noch Teerverbindungen oder von mineralischen Verbindungen dominierte Fraktionen werden bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden. Die absolute Minderung hängt von der Emissionshöhe ab, der Abscheidegrad zeigt keinen erkennbaren Zusammenhang. Ein dominierender Einfluss der Partikelart respektive der Verbrennungsqualität kann nicht gefunden werden (Kapitel 6.2.3 und Abbildung 6.9).

8.1.2 Diskussion zum Einfluss der Brennstoffart auf die Abscheidung

Zum Emissionsverhalten am Hackgutkessel lässt sich sagen, dass die höchsten Emissionen bei der Verwendung von Hackschnitzeln auftreten, sowohl was die Konzentrationen von Kohlenmonoxid als auch des Gesamtstaubs angeht. Dies ist konsistent zu den Erwartungen, da dies aufgrund ihrer inhomogeneren Form als auch der enthaltenen Rindenanteile bedingt ist. Holzpellets weisen die geringsten Emissionen auf. Die Beimischung von Heupellets erhöht die Gesamtemissionen etwas, verändert jedoch vor allem die Zusammensetzung der Partikelemissionen, der geringe Anteil von 20 % ist hierfür schon ausreichend. Betriebsprobleme sind aufgrund dessen noch keine aufgetreten.

Zur Betrachtung des Abscheideverhaltens weist der Abscheider bei Holzpellets den höchsten Abscheidegrad auf, für Hackschnitzel und Pelletmix hierzu vermindert aber beide vergleichbar. Die absolute Minderung ist bei Hackschnitzeln am höchsten, hier treten jedoch auch deutlich höhere Rohgaskonzentrationen auf. Es könnte vermutet werden, dass die Partikelgesamtemissionen der gemischten Pellets weniger gut abgeschieden werden als die der Holzpellets und Hackschnitzel. Allerdings bestand eine geringere elektrische Leistung am Abscheider, weshalb dies auch hierin begründet sein könnte.

Betriebsprobleme am Abscheider oder Wiedereintrag sind während der Versuche nicht aufgetreten.

Die gefundene Gesamtmenge bei der Messung zur Korngrößenverteilung mit Impaktor spiegelt die Ergebnisse zur Gesamtstaubmessung mit Planfilter wider – bei Holzpellets die geringsten Emissionen, bei gemischten Pellets etwas höher und am höchsten bei

Hackschnitzeln. Bei allen drei Brennstoffen befindet sich im Rohgas das Maximum und der größte Massenanteil der Korngrößenverteilung im Bereich von PM_{0,1}.

Zur Abscheidung der Größenfraktionen lässt sich zusammenfassen, dass bei allen drei Brennstoffen die Verschiebung der Korngrößenverteilung hin zu größeren Partikeln gefunden wird, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei den Holzpellets werden alle vorhandenen Größenfraktionen gemindert. Bei Hackschnitzeln und den gemischten Pellets nur zum Teil, hier liegen bei den groben Partikeln die Reingaswerte teilweise über den Rohgaswerten. Ein Teil der feineren Partikel agglomerieren und verschieben ihre Masse damit in die größeren Fraktionen. Diese Anteile sind jedoch vergleichsweise gering in Bezug auf die Abscheidung der feinen Fraktionen und auch des Gesamtstaubes. Die massebezogen größten Fraktionen werden am meisten vermindert, dies verhält sich genauso wie beim Gesamtstaub.

Es wird vermutet, dass eine etwas größere Dimensionierung des Abscheiders der verminderten Abscheidung bei Hackschnitzeln und Pelletmischungen ausreichen könnte, um eine ähnlich hohe Abscheidung wie bei Holzpellets zu erreichen.

In Bezug auf die Stoff-Fraktion der Kohlenstoffverbindungen lässt sich sagen, dass sie nur sehr geringe Anteile an den Partikelemissionen darstellen. Die Partikelemissionen bestehen daher zu einem Großteil aus Nicht-Kohlenstoffverbindungen. Aufgrund der niedrigen Werte spielen diese Verbindungen hier vermutlich eine untergeordnete Rolle. Dies gilt gleichermaßen bei allen der drei Brennstoffen. Ein Zusammenhang von den Kohlenstoffarten zu den Emissionen oder ihrer Abscheidung kann nicht gefunden werden.

Durch die verschiedenen hohen Salz-Anteile besitzen die Partikel mutmaßlich einen hohen Anteil an mineralischen Bestandteilen (Asche), was die Ergebnisse zur Ionenanalyse der Partikelproben bestätigen. Es wird keine mineralische Stoff-Fraktion als dominierend für die Abscheidung gefunden.

Das Emissionsverhalten und die Zusammensetzung der emittierten Partikel hängen entscheidend vom Brennstoff ab. In Bezug auf die Abscheidung kann in dieser Untersuchung jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zu bestimmten mineralischen oder kohlenstoffhaltigen Bestandteilen oder Stoff-Fraktionen gefunden werden.

8.1.3 Diskussion zum Einfluss der Betriebsweise auf die Abscheidung

Über das Emissionsverhalten am Kaminofen lässt sich zusammenfassen, dass vor allem der Betrieb im Luftmangel als Einstellung der Feuerung mit verminderter Luftzufuhr für eine hohe Belastung an Partikelemissionen führt. Dies äußert sich einerseits durch hohe Gesamtstaubkonzentrationen im Rohgas, andererseits durch eine große Streuung der Ergebnisse. Dies stellt also für nachgeschaltete Abscheider die kritischen Emissionsbedingungen dar, die sie zu bewältigen haben. Die Gesamtemissionen bei Normalbetrieb und Teillast sind auf einem vergleichbaren Niveau und liegen insgesamt alle unterhalb der Emissionen beim Betrieb im Luftmangel. Außerdem unterliegen sie einer geringeren Streubreite als im Betrieb bei Luftmangel.

Die Ergebnisse des verwendeten Röhrenabscheiders zum Abscheideverhalten zeigen über die verschiedenen Betriebsweisen eine mittelhohe Partikelabscheidung, jedoch mit großer Streubreite und instabilem Verhalten. Es wird vermutet, dass die teils hohe Abscheidung im Luftmangel bei hoher Emissionsbelastung mit größeren Partikeln mit hohem Rußanteil zu tun hat. Größere Partikel lassen sich deutlich leichter agglomerieren und abscheiden. Es wird vermutet, dass rußhaltige Partikel leichter die Ladung des ionisierten Gases aufnehmen

und aufgrund ihrer geringeren Dichte leichter zur Niederschlagsfläche wandern. Sie neigen jedoch stark zum Wiedereintrag, weshalb dieser Effekt ebenfalls vermehrt auftritt.

Gefunden wird eine negative Abscheidung – also eine Zunahme der Gesamtstaubs im Reingas im Vergleich zum Rohgas im Messzeitraum – im Normalbetrieb, was sich entgegen den Erwartungen verhält. Hier sind die Emissionen niedriger als im Luftmangel und dies wird allgemein als ein einfacher zu bewältigender Betrieb angesehen. Möglicherweise hängt dies mit der Abscheidefläche zusammen, die sich im Laufe der Versuche schnell belegt und nicht abgereinigt wird, so dass sie als „Speicher“ für abgeschiedene Partikel dienen, die unkontrolliert zurück in den Gasstrom und ins Reingas gelangen. Die genaue Ursache für das Abscheideverhalten im Normalbetrieb ist jedoch unklar.

Da der verwendete Abscheider keine Einbauten besitzt, um die wiedereingetragenen Partikel zurückzuhalten, und zusätzlich keine aktive Abreinigung, ist er für Wiedereintrag besonders anfällig und kann hier nicht dauerhaft eine stabile Abreinigung erbringen.

Diese Bauform scheint vor allem gut geeignet zu sein, um gröbere Partikel zu reduzieren, deren Abscheidung im Abgassystem zu unterstützen und Zustände mit hoher Emissionsbelastung abzumildern. Sie weisen jedoch große Unsicherheiten beim Betrieb auf und werden hier daher nur eingeschränkt als Lösung für eine dauerhafte und signifikante Emissionsminderung betrachtet.

8.1.4 Diskussion zum Einfluss der Verbrennungsphase

Die Versuche zeigen, dass die Phase des Anbrandes am Kaminofen durch eine hohe Emissionsbelastung und eine hohe Dynamik charakterisiert ist und damit als kritische Emissionsbedingung für die Partikelabscheidung angesehen werden kann. Ebenso weisen die Ergebnisse eine hohe Streubreite auf. In der Hauptverbrennung und im Ausbrand kommt es zu einem deutlich niedrigeren Niveau an Gesamtstaubemissionen, die Streubreite ist immer noch höher als bei automatisch beschickten Feuerungen aber niedriger als im Anbrand.

Der verwendete Abscheider weist im Durchschnitt eine mittlere bis hohe Abscheidung auf. Am wichtigsten ist jedoch zu erwähnen, dass dies mit einer hohen Stabilität absolviert wird. Die Abscheidung kann über alle Phasen vergleichbar aufrechterhalten werden, hier sind keine bevorzugten oder benachteiligten Emissionsbedingungen zu erkennen. Zu erkennen ist ebenfalls, dass es unmittelbar zu einem Einbruch der Abscheidung oder sogar Wiedereintrag kommen kann, sobald der Betrieb des Abscheiders aus beliebigen Gründen gestört ist, wie beispielsweise durch eine laufende Abreinigung oder eine zu niedrige oder ausgefallene Hochspannung. Beim Einsatz dieses Abscheiders wird deutlich, wie essenziell eine Abreinigung der belegten Abscheidefläche mit relativ hoher Frequenz ist (hier 1 mal pro Stunde), soll der Staub aus dem Abgas dem System entzogen und nicht wieder eingetragen werden.

8.2 Zusammenführung der einzelnen Untersuchungsergebnisse

8.2.1 Übersicht zu den Versuchsergebnissen zu Emissionsverhalten und Abscheideverhalten

Zur Veranschaulichung und Zusammenführung der Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen zu den verschiedenen Einflussfaktoren gibt Abbildung 8.1 die Übersicht.

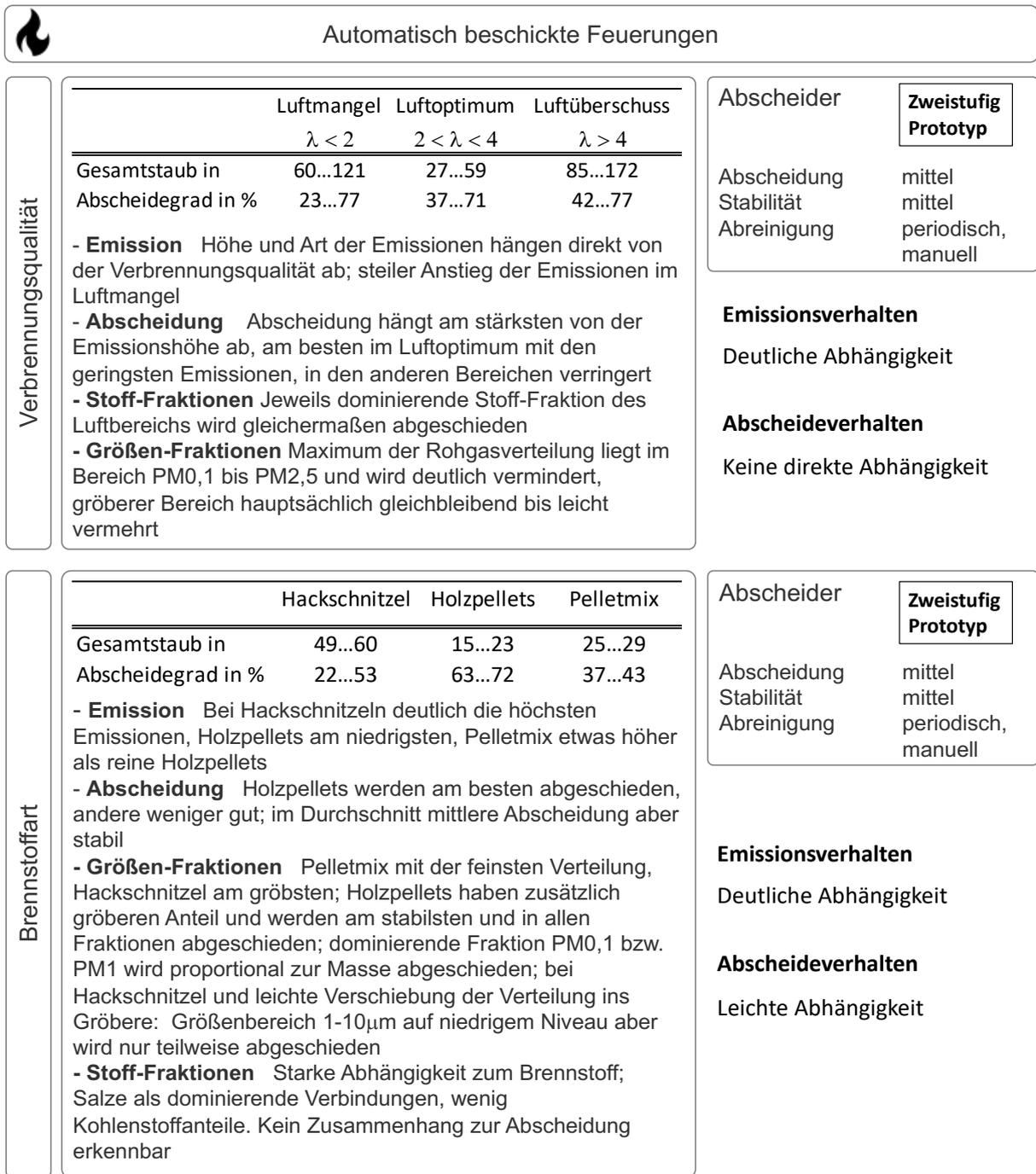


Abbildung 8.1: Übersicht zu den Versuchsergebnissen zu Emissionsverhalten und Abscheideverhalten der durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss von Verbrennungsqualität, Brennstoffart, Betriebsweise und Verbrennungsphase

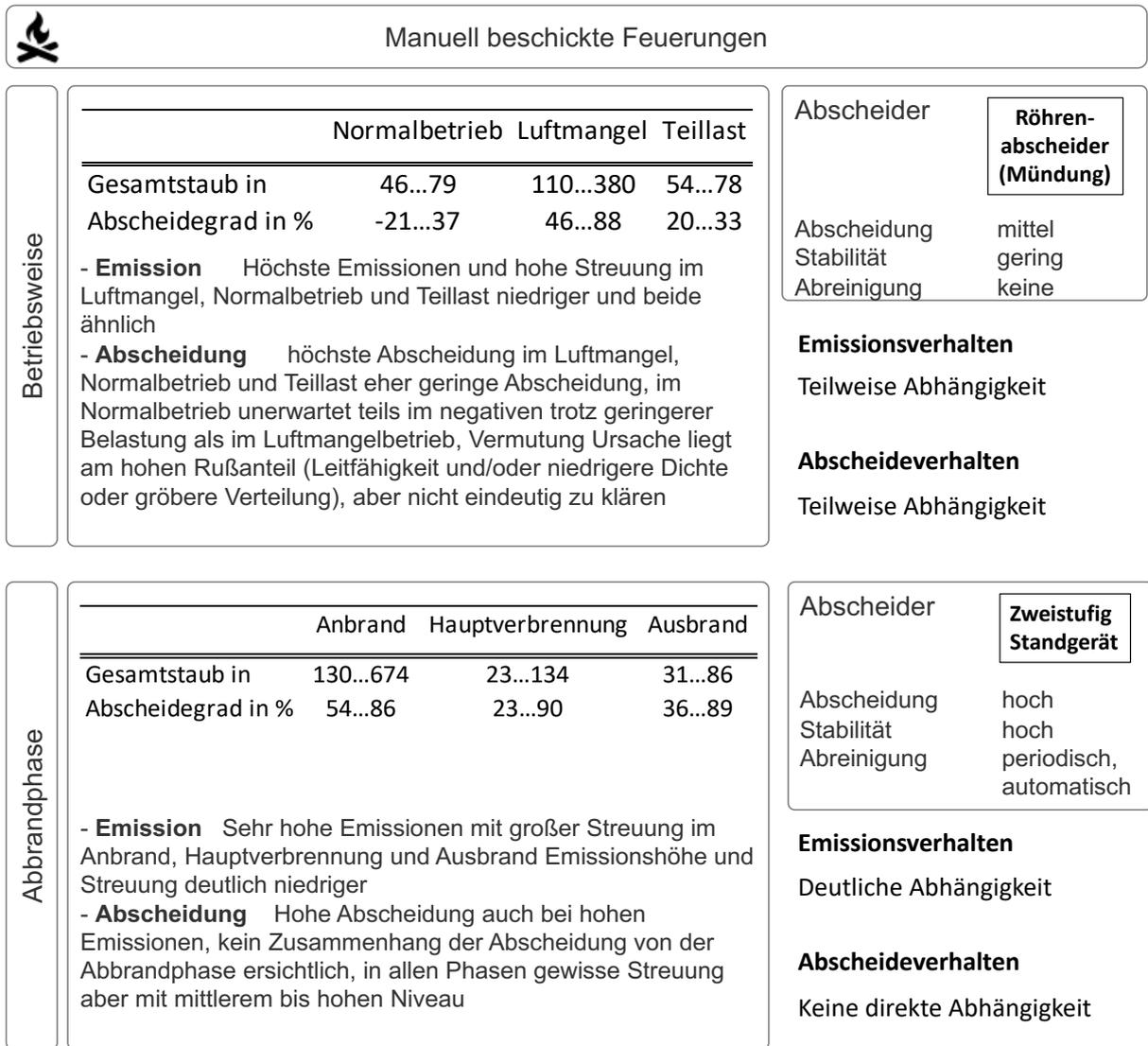


Abbildung 8.1 Fortsetzung: Übersicht zu den Versuchsergebnissen zu Emissionsverhalten und Abscheideverhalten der durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss von Verbrennungsqualität, Brennstoffart, Betriebsweise und Verbrennungsphase

Als generelle Schlussfolgerung der durchgeführten Untersuchungen lässt sich sagen, dass der Einsatz im Realgas bei einem praxisnahen Betrieb von Kleinf Feuerungen sehr starken Schwankungen und der Vermischung sämtlicher Einflussfaktoren unterliegt. Dies betrifft in gewissem Maße automatisch beschickte Anlagen, aber noch mehr die manuell beschickten Anlagen.

Als Gesamtaussage zum Emissionsverhalten kann gesagt werden, dass die Abhängigkeiten zu den untersuchten Einflussfaktoren als deutlich zu erkennen sind. Sie werden konsistent zu den Erwartungen und zur Literatur gefunden.

Als eindeutige Einflüsse für die Abscheidung kann als emissionsbedingter Einfluss lediglich der Zusammenhang zu der Höhe der Gesamtstaubemissionen im Rohgas als wesentliche Abhängigkeit bei allen Abscheidern gefunden werden. Als weitere wesentliche Einflüsse für die Abscheidung werden nicht-emissionsbedingte Zusammenhänge gefunden: konstruktionsbedingte Einflüsse wie die Bauform und Umsetzung der Ionisationselektroden

und Abscheideflächen und deren Dimensionierung, betriebsbedingte Einflüsse wie die angelegte Hochspannung bzw. die eingebrachte elektrische Leistung oder der Belegungszustand der Abscheideflächen.

Erst nachrangig zu all diesen Einflüssen könnte an manchen Stellen ein Einfluss von Größen- oder Stoff-Fractionen oder der Partikelzusammensetzung vermutet werden. Dies ist jedoch in Summe von so vielen anderen Schwankungen überlagert, dass einzelne spezielle Zusammenhänge untergehen und nicht sicher genug geschlussfolgert oder bestätigt werden können.

8.2.2 Schlussfolgerungen zur Bauform von Abscheidern aus den Untersuchungen

In Bezug auf die Konstruktion eines Abscheiders haben sich manche Merkmale als besonders vorteilhaft erwiesen für eine dauerhaft stabile hohe Abscheidung: separate Ionisationsstufe mit mehreren Entladungspunkten und einem dafür kleineren Elektrodenabstand als in einem Röhrenfilter mit Abgasrohrmaßen und eine Umsetzung von Maßnahmen zur Rückhaltung gegen Partikelagglomerate und Wiedereintrag bzw. dem Durchbruch geladener Partikel. Ebenfalls von großem Vorteil ist eine aktive oder automatische Abreinigung mit hoher Frequenz mit entsprechender Staubsammlung.

Als Rückhaltemaßnahmen für Partikelagglomerate werden im Grobelektrofilterbereich beispielsweise Fangkörperelektroden eingesetzt, die aufgrund der Baugröße für Kleinanlagen allerdings als eher ungeschickt angesehen werden. Besser möglich sind hingegen einfache Strömungshindernisse im Gasstrom, die sich die Trägheit vor allem der agglomerierten und damit größeren Partikel als ergänzenden Abscheidemechanismus zunutze machen (wie die zweistufigen Abscheider der Untersuchungen).

Aufgrund der hohen Bandbreite an Partikelarten und Partikelgrößen und der gleichzeitig geforderten kompakten Baugröße im Einsatz bei Kleinf Feuerungen ist eine hohe Effizienz sowohl der Ionisation als auch der Partikelanhaftung notwendig.

Hinzu kommt der Umstand, dass das Maximum der Korngrößenverteilung bei Biomassenkleinf Feuerungen mit etwa $0,1 \mu\text{m}$ (PM_{0,1}) fast genau mit dem Effizienzminimum der Technologie Elektroabscheider bei $0,2 \mu\text{m}$ zusammenfällt. Dieses ist durch die Auflademechanismen des elektrischen Feldes physikalisch bedingt. Unterhalb der $0,2 \mu\text{m}$ dominiert für kleine Partikel die Diffusionsladung, oberhalb $0,2 \mu\text{m}$ für größere Partikel wirkt die Feldaufladung. Im Übergangsbereich überlagern sich diese Mechanismen jedoch, und die Ionisation der Gasmoleküle und damit auch die Aufladung der Partikel ist vermindert.

8.3 Schlussfolgerungen zur messtechnischen Untersuchung und Bewertung von Elektroabscheidern bei Biomassekleinf Feuerungen

8.3.1 Staubmessung mit Partikelagglomeraten bei Elektroabscheidern

Immer wieder wird von messtechnischen Problemen im Zusammenhang mit Elektroabscheidern berichtet, daher sollen die eigenen Erfahrungen dazu hier angemerkt werden. Verstärkt sind während der Messungen am Röhrenabscheider der Untersuchung in Kapitel 7.1 aufgetreten. Vor allem beim Auftreten von noch geladenen Partikeln im

Reingas, die entweder den Abscheider passieren, weil sie nicht an einer der Flächen angehaftet sind oder weil sie wiedereingetragen wurden, tritt der Effekt der Partikelagglomerate gehäuft auf (vergleiche Kapitel 3.4.1 Kapitel 4.6.1). Gekennzeichnet sind diese Messungen dann meist mit einem negativen Abscheidegrad, was bedeutet das im zutreffenden Messzeitraum mehr Partikel den Abscheider im Reingas verlassen haben als ihm mit dem Rohgas zugeführt wurden. Messtechnisch unterstreicht das die Wichtigkeit der SONDENSPÜLUNG bei der Gesamtstaubmessung (vergleiche Kapitel 4.6.3). Hierbei werden alle dem Planfilter vorgelagerten Rohrteile gespült und das Gewicht der so gewonnenen Staubmasse der Masse auf dem Planfilter hinzugerechnet, siehe zum Verfahren die Angaben in VDI 2066-1 (2006) und bei Schäfer (2016). Üblicherweise werden die außenliegenden Partikel am Kranz der Sondendüse nicht erfasst, sondern nur die innerhalb anhaftenden.

Grundsätzlich ist eine Messung bei diesem Effekt aber möglich, sofern die Spülung wie beschrieben berücksichtigt wird. Es führt jedoch zu einer Erhöhung der Messunsicherheit.

8.3.2 Emissionsmessungen an Elektroabscheidern mit Spülluft

Beim Einsatz von Spülluft als Schutzmaßnahme gegen Ablagerungen am Hochspannungsisolator wird Umgebungsluft am Isolator vorbei ins Abgas geleitet, was letztlich den Abgasstrom verdünnt. Dies erhöht den Messaufwand, da es für den Bezug der Messwerte im Reingas erforderlich wird, den Sauerstoffgehalt zusätzlich im Reingas zu erfassen.

In der Untersuchung in Kapitel 7.1 ändert sich der Sauerstoffgehalt von einem Bereich von etwa 8 – 10 Vol.% im Rohgas durch die Spülluft auf einen Bereich von 17 – 18 Vol.%.

Je nachdem um welchen Einbauort es sich bei dem betroffenen Abscheider handelt, hat die Verwendung von Spülluft noch weitere Auswirkungen. Bei Geräten die im Innenraum oder im Wohnraum eingebaut sind, müssen erhöhte sicherheitstechnische Aspekte bedacht werden (Rückschlagklappe in der Öffnung der Spülluft), und es kann zu Wirkungsgradverlusten kommen, wenn erwärmte Raumluft im Wohnraum über die Spülluft in das Abgas gezogen werden.

8.3.3 Emissionsmessungen bei mündungsbasierten Abscheidern

Als wichtigster Punkt zur Messung an mündungsbasierten Abscheidern ist der deutlich erhöhte Messaufwand anzumerken. Es muss eine separate Reingas-Messstrecke aufgebaut werden, was die Messstrecke deutlich verlängert. Ebenfalls müssen die Abscheider in einem gewissen Abstand zur Feuerung eingebaut werden, da sonst die Abgasbedingungen nicht mit einem realen Einsatz vergleichbar sind. Dies verlängert die Abgasstrecke zusätzlich.

Es kann also kein normaler Feuerungsprüfstand oder Prüfaufbau hierfür verwendet werden. Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich erwähnen, dass durch den erhöhten Aufwand es zu mehr Schwierigkeiten kam und dadurch die Unsicherheiten erhöht werden.

Bei der regelmäßigen und standardisierten Prüfung von Abscheidern auf diese Weise, könnte dies sicherlich verringert werden.

8.3.4 Fazit zur Anwendung des Auswerteverfahrens nach DIN SPEC 33999 (2014)

Im Rahmen der Untersuchung an einem Kaminofen mit Elektroabscheider (Kapitel 7.1.5) wird eine Auswertung nach Verfahren der DIN SPEC 33999 (2014) mit eigenen Messwerten durchgeführt. Nachfolgend sollen diesbezüglich Schlussfolgerungen und ein Fazit zur Anwendung der Vorgaben der Versuchsmatrix und des Verfahrens gegeben werden.

Grundsätzlich ist das Verfahren anwendbar. Folgende Punkte haben dabei jedoch Schwierigkeiten bereitet:

- Die Vorgehensweise ist kompliziert gestaltet und nicht schnell nachzuvollziehen.
- Die Einteilung in handbeschickte und kontinuierlich beschickte Anlage (mit bzw. ohne Gebläse), wird als sinnvoll erachtet. Ebenso die Einteilung nach Brennstoffen, da dies beides für die Vorgaben der 1.BImSchV (2010) essenziell ist.
- Die Vorgaben der Versuchsmatrix sind zu einschränkend. Vor allem die Lücke in der Staubkonzentration zwischen „gut“ und „schlecht“ führt dazu, dass eigentlich ein typischer Emissionsbereich streng genommen nicht verwendet werden kann. Dies führt zu einem erhöhten Versuchsaufwand, da mehr Versuche absolviert werden müssen, um ausreichend Auswahl zu haben. Dies verteuert die Prüfung nach diesem Verfahren, ohne aber dabei die Qualität der Ergebnisse zu verbessern.
- Die Vorgabe einer CO- oder VOC-Konzentration wird hier als nicht zwingend notwendig sondern als verzichtbar angesehen, da sie die Auswahl der Versuche zusätzlich einschränkt, aber keine signifikante Rolle für das Verhalten des Staubabscheiders erachtet wird.

Die eigenen Erfahrungen spiegeln die Erfahrungen anderer Anwender und Prüfstellen wider, so dass das Verfahren bisher nicht breit sondern nur sehr begrenzt angewendet wird, und die Vorgehensweise derzeit in der Überarbeitung befindet, um als Vollnorm veröffentlicht zu werden.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die Wichtigkeit bei einer Prüfung, dass eine Unterteilung nach manuell und automatischen Anlagen erfolgt

8.3.5 Schlussfolgerungen für eine messtechnischen Bewertung von Elektroabscheidern

Im Rahmen der Untersuchungen kann kein allgemeiner Zusammenhang zwischen bestimmten Größen- oder Stoff-Fraktionen und einer bevorzugten oder benachteiligten Abscheidung gefunden werden, da diese anderen Einflüssen und Abhängigkeiten gegenüber als nachrangig gefunden werden.

Im Umkehrschluss bedeutet dies jedoch, dass beispielsweise eine Bewertung oder Prüfung zum allgemeinen Abscheideverhalten eines Abscheiders nicht unter Berücksichtigung einzelner Fraktionen, spezieller Zustände oder Bereichen zusätzlicher gasförmiger Emissionsgrößen notwendig ist.

Wichtiger für eine aussagekräftige messtechnische Bewertung sollte das Abscheideverhalten unter hoher Emissionslast und über einen längeren Zeitraum sein, um eine repräsentative Aussage zur dauerhaft erreichbaren Abscheidung zu erhalten. Es wird dabei als wichtiger erachtet, welcher minimale Abscheidegrad und welcher Bereich des Abscheidegrades im Rahmen der Messungen eingehalten wird, und weniger der

Durchschnitt oder das Maximum als einzelner Wert nach oben. Hierbei könnte eine Art Mindestabscheidegrad als Bewertungskriterium dienen. Der Fokus sollte hier eher auf einer Art Belastungstest oder Stresstest liegen, als auf Abgasbedingungen mit niedrigem Emissionsniveau.

Ein standardisiertes Prüf- oder Bewertungsverfahren wird möglichst einfach empfohlen, da die Hauptabhängigkeit über alle Abscheider im Zusammenhang mit der Gesamthöhe an Staubkonzentrationen abhängt. Eine Abhängigkeit zu Verbrennungsphasen oder Verbrennungsqualität besteht überwiegend bei den einfachen Röhrenabscheidern, und auch dies nicht konsistent über alle Feuerungen oder Abscheidermodelle.

Neben der Kurzeitbewertung mit einzelnen Abbränden oder kurzen Messintervallen wäre auch eine längerfristige Bewertung beispielweise über einen festgelegten Nutzungszyklus, der sich am Nutzungsverhalten der Feuerungsbauarten orientiert. Dies würde dem Umstand Rechnung tragen, dass bei Einzelraumfeuerungen die akute Emissionslast zwar deutlich höher liegt als bei zentralen Feuerungen, diese jedoch auch über einen viel kürzeren Zeitraum und nur punktuell eingesetzt werden, und nicht zur Deckung der Grundlast an Wärmedarf.

Es stellt sich die Frage, wo sich das größte Emissionsminderungspotenzial ergibt, denn das Nutzen-Aufwand-Verhältnis unterscheidet sich teils deutlich zwischen den Feuerungsarten. Dies alles sollte bei einem entsprechenden Bewertungsverfahren berücksichtigt werden, um möglichst effiziente und stabile Technologien als besser zu bewerten, um eine möglichst hohe Wirkung zu einem realen Absinken der gesamten Emissionen aus der Biomasse- und Holzverbrennung zu erzielen und einen wirksamen aber zugleich zumutbaren Beitrag zum Immissionsschutz zu leisten.

8.3.6 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Beschickungsart von Feuerungen

8.3.6.1 Fazit aus Messungen an bei manuell beschickten Einzelraumfeuerungen

- Messintervall / Vergleich Emissionsniveau:
 - Messintervall nach 33999 (30s nach Auflage): kann bestätigt werden ist geeignet um die Phasen mit hohen Emissionen abzudecken
 - Ausbrand keine hohe Emissionsbelastung und bringt keine Zusatzinformation, kann also weggelassen werden
- Messung: durch die große Streuung der Abgasbedingungen zwischen verschiedenen Abbränden, zwingend eine parallele Messung der Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas erforderlich
- Generell Einzelraumfeuerungen: hohe Emissionen mit großer Streuung kann bestätigt werden → schlechte Voraussetzungen für den Einsatz eines einfachen Abscheiders
- Einsatz höherwertiger Abscheider: stabiler Betrieb mit hoher Abscheidung, die unabhängig von den Verbrennungsbedingungen ist ABER hält das Kriterium der Verhältnismäßigkeit für Einzelraumfeuerung nicht ein (Baugröße im Größenbereich einer Einzelraumfeuerung)

8.3.6.2 Fazit aus Messungen an automatisch beschickten Einzelraumfeuerungen:

- Deutlich niedrigere Emissionen als manuelle Feuerungen kann bestätigt werden.
- Deutlich weniger Streuung der Abgasbedingungen und wesentlich konstanter durch die Beschickungsart; Messintervall dadurch weniger entscheidend
- Naturbelassenes Holz egal in welcher Form (Hackschnitzel oder Holzpellets) erreicht vergleichbare Abscheidung. Nicht-Holz-Brennstoffe verringern Abscheidung leicht, aber war nur zu Versuchszwecken wird in häuslichen Feuerungen nicht verwendet.
- Nur Manipulation der Feuerung (zur Erreichung der Luftbereiche zu Versuchszwecken) führte zu hohen Emissionen; bei Regulärem Feuerungsbetrieb deutlich niedriger. Maximaler Abscheidegrad vergleichbar, nur minimaler Abscheidegrad im Luftmangel etwas niedriger

8.4 Aktuelle und zukünftige Entwicklungen

Aktuell ist im Bereich der normativen Regelungen viel in der Bearbeitung. Sowohl die anstehende Weiterentwicklung der DIN SPEC 33999 (2014) in die Vollnorm DIN 33999, als auch die aktuell laufende Validierungsphase für die Anpassung der VDI 3670 (2016).

Hinzu kommt seit kurzem die Zertifizierung „Blauer Engel“ für Staubabscheider mit höheren Anforderungen, zu deren Umsetzung erst noch Erfahrungen folgen müssen. Zusätzlich steht die 1.BImSchV vor einer grundlegenden Novellierung (Lenz, 2022). Hier wird eine Verschärfung der Luftreinhaltevorgaben erwartet. Auf der anderen Seite wird ein Anstieg in der Nutzung von alternativen Brennstoffen erwartet, die erhöhte Emissionen bei der Verbrennung vorweisen. Es wird demnach Bedarf geben und die Notwendigkeit, die bestehenden Abscheider und Technologien weiterzuentwickeln.

Als Empfehlung aus den Ergebnissen der Arbeit und mit den eben beschriebenen zu erwartenden Entwicklungen ist eine Spezialisierung der Geräte anzustreben, um die Abscheider besser auf bestimmte Feuerungsbauarten und Anwendungsfälle anzupassen.

Dabei sollte das Potenzial der zweistufigen Ausführung berücksichtigt werden. Sie können definierter auf die Bedingungen und Anforderungen abgestimmt werden, sind oft kompakter, und haben eine stabilere Abscheidung gezeigt als die einfachen Röhrenabscheider. Ebenso ist eine regelmäßige Abreinigung der Abscheideflächen notwendig.

9 Zusammenfassung

Die Wirksamkeit von Elektroabscheidern unterliegt als Sekundärmaßnahme zur Minderung von Partikelemissionen bei Biomassekleinfeuerungen vielerlei unterschiedlichen Einflüssen. Viele der Einflüsse im Einsatzbereich sind jedoch noch nicht bekannt.

Die vorliegende Arbeit untersucht verschiedene Aspekte, die sich mit dem Zusammenhang zwischen dem Emissionsverhalten der Feuerung und dem Abscheideverhalten des Partikelabscheiders beschäftigen. Die Emissionsuntersuchungen werden an verschiedenen biomassebetriebenen Kleinfeuerungen mit verschiedenen Elektroabscheidern durchgeführt. Für die Versuche werden Feuerungsprüfstände verwendet, die für den Einsatz von Abscheidern erweitert werden.

Die Emissionsuntersuchungen erfolgen an verschiedenen Feuerungen und verschiedenen Abscheidern. Bei jeder Untersuchung steht ein anderer Einfluss im Vordergrund. Betrachtet wird das Emissionsverhalten der Feuerung und das Abscheideverhalten des Elektroabscheiders.

An den automatisch beschickten Feuerungen werden durch Änderung der Verbrennungsbedingungen oder Änderung der Brennstoffart unterschiedliche Partikelemissionen mit unterschiedlichen Eigenschaften (Menge, Größe, Zusammensetzung) erzeugt. Neben der Abgaszusammensetzung und der Gesamtstaubkonzentration werden beispielhaft ausgewählte Partikelinhaltsstoffe und Korngrößenverteilungen in Rohgas und Reingas gemessen.

An den manuell beschickten Einzelraumfeuerungen werden der Einfluss der Betriebsweise der Feuerung und der Einfluss der Verbrennungsphase untersucht. Es werden die Abgaszusammensetzung und die Gesamtstaubkonzentration bestimmt.

Die Untersuchung zum Einfluss der Verbrennungsqualität wird an einem Pelletofen mit zweistufigem Elektroabscheider-Prototyp als Kompaktgerät durchgeführt. Der Pelletofen ist steuerungsseitig modifiziert, so dass die Brennstoff- und Luftzufuhr verändert werden können. Hierbei werden unter Veränderung des Verbrennungsluftverhältnisses λ unterschiedliche Verbrennungsbedingungen erzeugt, die zu jeweils typischen Partikeleigenschaften der emittierten Partikel führen. Betrachtet werden die drei Bereiche Luftmangel, Luftpoptimum und Luftüberschuss.

Für das Emissionsverhalten kann gezeigt werden, dass die drei Bereiche der Verbrennungsqualität sich wie erwartet verhalten und sich deutlich voneinander unterscheiden. Die Unterschiede bestehen sowohl in der Menge als auch in der Zusammensetzung der Emissionen, dies betrifft sowohl die Gaszusammensetzung (Kohlenmonoxid und flüchtige Kohlenwasserstoffe) als auch die Partikeleigenschaften (Gesamtstaubkonzentration, Kohlenstoffanteile). Im Luftpoptimum (hier $\lambda=2...4$) ergeben sich die niedrigsten Partikelemissionen (ca. 30 – 60 mg/m³). Ihre Zusammensetzung weist einen hohen Anteil an mineralischen Bestandteilen auf (Asche), der Anteil an Kohlenstoff ist am niedrigsten. Charakteristisch für den Luftmangelbereich (hier $\lambda < 2$) sind stark ansteigende Gesamtstaubkonzentrationen (bis 120 mg/m³) und ein hoher Anteil an elementarem Kohlenstoff der Partikel in Form von Rußverbindungen (TC 36%, EC 31%). Dies verursacht die typisch schwarze Färbung der Partikelproben. Im Luftüberschuss (hier $\lambda > 4$) steigen ebenfalls die Emissionen an Gesamtstaub (bis 170 mg/m³) und der Kohlenstoffanteil an, allerdings moderater als im Luftmangel. In diesem Bereich dominieren überwiegend Teere die Art der Kohlenstoffverbindungen (TC 37%, OC 32%).

Für das Abscheideverhalten lässt sich zusammenfassen, dass kein Hinweis auf einen erkennbaren Zusammenhang zwischen Partikelart und Abscheidung gefunden wird. Die jeweils dominierende Partikelfraktion wird am meisten abgeschieden. Der Abscheidegrad im Luftoptimum wird am höchsten erreicht, jedoch herrschen hier auch die niedrigsten Gesamtstaubkonzentrationen vor. In den Bereichen Luftmangel und Luftüberschuss ist der Abscheidegrad etwas verringert, hier liegen allerdings auch die Konzentrationen im Rohgas deutlich höher. Es besteht bezüglich der beiden Bereiche kein erkennbarer Unterschied zwischen der Abscheidung der von Ruß oder der von Teeren dominierten Fraktionen.

Es konnte nicht nachgewiesen werden, dass die Abscheidung signifikant von der Zusammensetzung der Partikelemissionen abhängt. Keine der Stoff-Fraktionen wird bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden. Die eingesetzte Abscheider zeigt sich daher nicht als abhängig von der Verbrennungsqualität, sondern überwiegend von der Höhe der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas und anderen nicht partikelgebundenen Faktoren (unter anderem die eingebrachte elektrische Leistung).

Die Untersuchung zum Einfluss der Brennstoffart wird an einer leicht modifizierten Hackgutfeuerung mit zweistufigem Elektroabscheider-Prototyp als Kompaktgerät unter Verwendung von Holzpellets, Holzhackschnitzeln und einer Pelletmischung (Holzpellets mit Heupellets) durchgeführt. Das Emissionsverhalten wird direkt durch die verschiedenen Brennstoffe beeinflusst. Dies betrifft sowohl die Menge der gasförmigen und partikelförmigen Emissionen als auch die Partikeleigenschaften (Zusammensetzung und Korngrößenverteilung).

Die Verbrennung der Hackschnitzel führt wie erwartet zu den höchsten Emissionen und Gesamtstaubemissionen (bis 60 mg/m^3), die der Holzpellets zu den niedrigsten (ca. 20 mg/m^3). Die Zumischung der Heupellets als Pelletmischung (20%Heu+80%Holz) weist etwas höhere Emissionen ($25\text{-}30 \text{ mg/m}^3$) auf als die reinen Holzpellets.

Zum Abscheideverhalten des Gesamtstaubs lässt sich sagen, dass nur leichte Unterschiede zwischen den verschiedenen Brennstoffen festgestellt werden konnten. Die höchste Abscheidung kann bei Holzpellets erreicht werden (60-70%) bei den niedrigsten Rohgaskonzentrationen, eine mittlere Abscheidung bei Hackschnitzeln (ca. 50%) bei höheren Rohgaskonzentrationen. Bei der Pelletmischung ergibt sich die geringste Abscheidung (ca. 40%). Dies ist jedoch nicht eindeutig, da die elektrische Leistung am Abscheider vermindert ist, und die geringere Abscheidung auch daran begründet sein kann.

In Bezug auf die Zusammensetzung der Partikel ergeben sich geringe Anteile an Kohlenstoffverbindungen. Hier können keine Einflüsse des Kohlenstoffgehalts auf den Abscheidegrad festgestellt werden. Bei der dominierenden Fraktion der Zusammensetzung handelt es sich um die mineralischen Bestandteile (Asche). Hier stehen die verschiedenen Salze und ihre Anteile in direktem Zusammenhang zum verwendeten Brennstoff. Die Beimischung der Heupellets ist deutlich zu erkennen. Dies betrifft beispielsweise die erhöhten Anteile von Kalium, Natrium und auch den deutlich höheren Chloranteil. Was die Abscheidung betrifft, können keine eindeutigen Zusammenhänge zu den verschiedenen Verbindungen gefunden werden. Keine der Stoff-Fraktionen wird bevorzugt oder benachteiligt abgeschieden.

Bei der Betrachtung der Korngrößenverteilung besitzen alle drei Brennstoffe das Maximum der Verteilung im ähnlichen Bereich. Bei Hackschnitzeln bei $0,1 \mu\text{m}$, bei Holzpellets und Pelletmischung leicht darunter bei $0,06 \mu\text{m}$. Die dominierende Fraktion ist also der Größenbereich der Klasse PM 0,1. Bei allen drei Brennstoffen verschiebt sich die Verteilung im Reingas hin zu größeren Partikelgrößen, während die feineren Partikel alle

vermindert werden. Es lässt sich daher sagen, dass die Partikel beim Passieren des Abscheiders sich in Summe vergrößern, also agglomerieren. Dies ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und geschieht nachrangig zu der Verminderung der dominierenden Größenfraktion PM 0,1. Bei Holzpellets tritt dieser Effekt am wenigsten auf, hier liegen die Reingaskonzentrationen trotz der Verschiebung unter den Rohgaskonzentrationen. Bei Hackschnitzeln und der Pelletmischung liegen manche der groben Fraktionen über den Rohgaskonzentrationen. Die massebezogen größten Fraktionen werden am meisten vermindert, dies verhält sich genauso wie beim Gesamtstaub.

Die Untersuchung zum Einfluss der Betriebsweise wird an einem Kaminofen mit mündungsbasiertem Röhrenelektroabscheider durchgeführt. Es wird zwischen den verschiedenen Betriebsweisen Normalbetrieb (bei Nennwärmeleistung), Teillast (bei verminderter Wärmeleistung) und Luftmangel (Betrieb bei verminderter Luftzufuhr) unterschieden. Als Brennstoff werden Buchenholzscheite verwendet. Die Durchführung der Messungen erfolgt in Anlehnung an die DIN SPEC 33999 (2014).

Die höchsten Emissionen bestehen beim Betrieb im Luftmangel (100 bis >300 mg/m³) und eine große Streuung der Bedingungen. Die Emissionen im Normalbetrieb und in Teillast liegen deutlich darunter (ca. 50 bis 80 mg/m³) und mit geringerer Streuung.

Das Abscheideverhalten unterscheidet sich zwischen den Betriebsweisen. Im Luftmangelbetrieb bei den höchsten Emissionen können die höchsten Abscheidegrade erreicht werden (ca. 50-80%). Im Normalbetrieb kann keine stabile Abscheidung erreicht werden, es treten teils negative Abscheidegrade auf (ca. -30%). Der maximal erreichte Abscheidegrad ist auf mittlerem Niveau (ca. 40%). Im Betrieb in Teillast treten zwar nur positive Abscheidegrade auf, jedoch bei eher geringem Niveau (ca. 20-30%). Es zeigt sich bei diesem Abscheider also ein Einfluss der Abscheidung von der Betriebsweise und damit den Abgasbedingungen. Technologisch weist dieser Abscheider einen einfacheren Aufbau auf, sowohl was die Stufe der Partikelaufladung als auch die Form der Niederschlagsfläche betrifft und auch eine fehlende Abreinigung des abgeschiedenen Staubes. Dadurch werden die Partikel weniger effektiv aufgeladen, abgeschieden und dem System entzogen, so dass diese Bauform einen weniger stabilen Betrieb bei den schwankenden Einsatzbedingungen der Einzelraumfeuerung aufweist.

Die Untersuchung zum Einfluss der Verbrennungsphase wird an einem Kaminofen mit zweistufigem Elektroabscheider als Standgerät durchgeführt. Es wird innerhalb der Anbrandphase, der Hauptverbrennung und dem Ausbrand unterschieden. Im Anbrand treten die mit Abstand höchsten Emissionen an Gesamtstaub (100 bis >600 mg/m³) mit großer Streuung auf. In den anderen zwei Phasen ist die Emissionshöhe und Streuung deutlich niedriger als im Anbrand. In der Hauptverbrennung (ca. 20-130 mg/m³) etwas höher als im Ausbrand (ca. 30-90 mg/m³).

Die Abscheidung liegt im Durchschnitt bei einem mittleren bis hohen Niveau, auch bei teils hohen Rohgaskonzentrationen. Am höchsten ist der Abscheidegrad im Anbrand (50-90%), gefolgt vom Ausbrand (20-90%) und danach in der Hauptverbrennung (40-90%). Es konnte keine spezielle Abhängigkeit des untersuchten Abscheiders zu den Abbrandphasen gefunden werden. Die Bauform des Abscheiders zeigt also eine stabile Abscheidung bei den absolvierten unterschiedlichen Einsatzbedingungen der Einzelraumfeuerung.

Ziel der Arbeit war die Untersuchung von ausgewählten Einflussfaktoren für das Emissionsverhalten der Feuerung und das Abscheideverhalten von Elektroabscheidern, um

den Kenntnisstand zum Einsatz von Elektroabscheidern an Biomassekleinfeuerungen zu erweitern. Genau unter diesem Aspekt wurden diese Einflussfaktoren systematisch ausgewählt und analysiert. Durch die Untersuchungen konnten die Unterschiede zwischen den Abgasbedingungen und dem Emissionsverhalten von automatisch beschickten im Vergleich zu manuell beschickten Feuerungen deutlich gemacht werden. Es konnte ebenso verdeutlicht werden, dass das Abscheideverhalten der untersuchten Abscheider starken Schwankungen unterlag und bei keinem eine durchgängig hohe Abscheidung erreicht werden konnte. Als Lösungsansatz für den Zielkonflikt zwischen den vielfältigen Feuerungsbauarten und Abgasbedingungen und der Erfüllung der Verhältnismäßigkeit des Abscheiders im Vergleich zur Partikelquelle Feuerung wird empfohlen, die Technologie der Elektroabscheider stärker an die speziellen Eigenschaften der Feuerungsbauarten anzupassen. Hierzu muss bei der Entwicklung der Abscheider zwischen den Einsatzbereichen für manuell oder automatisch beschickte Feuerungen und der Einteilung nach Einzelraumfeuerungen und Zentralfeuerungen unterschieden werden.

Zukünftig wird auch weiterhin Holz als nachwachsender Rohstoff als qualitativ hochwertiger Brennstoff bei der Wärmebereitstellung in Haushalten eine wichtige Rolle zukommen. Durch vermehrte Nutzungskonkurrenz von nachwachsenden Rohstoffen werden auch vermehrt holzähnliche Brennstoffe mit geringerer Qualität eingesetzt werden, die bei ihrer Verbrennung noch höhere Partikelemissionen als Holz aufweisen können. Gleichzeitig werden jedoch die Anforderungen an den Immissionsschutz steigen. Hierbei können die verschiedenen Erkenntnisse und Aspekte der durchgeführten Untersuchungen eingesetzt werden, um Elektroabscheider stärker anwendungsbezogen auszurichten. Damit können speziellere und damit besser ausgerichtete Lösungen für die Emissionsminderung bei Biomassekleinfeuerungen umgesetzt werden.

10 Literaturverzeichnis

- 1.BImSchV. 2010.** *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV).* 2010.
- Bachmeier, Hans, Kuptz, Daniel und Hartmann, Hans. 2021.** *Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie.* Straubing : Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2021. Berichte aus dem TFZ Nr. 72.
- Baum, Christian. 2017.** *Methodische Entwicklung einer Abreinigungs- und Austragseinrichtung für einen neuartigen Klein-Elektrofilter.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2017. Bachelorarbeit Nr. 3412.
- Baumbach, Günter. 1993.** *Luftreinhaltung: Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen. Messtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften.* Berlin Heidelberg New York : Springer, 1993. ISBN 3-540-56823-9.
- BImSchG. 1974.** *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG).* 1974.
- Blauer Engel. 2022.** *Staubabscheider für Scheitholz-Einzelraumfeuerungen DE-UZ 222.* Blauer Engel Umweltzeichen, RAL gGmbH. Bonn : Eigenverlag, 2022. Vergabekriterien Ausgabe Januar 2022 Version 2.
- DBFZ. 2010.** *DBFZ Report Nr. 1: Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen.* Leipzig : s.n., 2010. ISSN 2190-7943.
- DIBt. 2022.** *Staubabscheider für Feuerungsanlagen | DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik.* [Online] 2022. [Zitat vom: 28. 12 2022.] <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/staubabscheider-fuer-feuerungsanlagen>.
- DIN 19539. 2016.** *Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC₄₀₀, ROC, TIC₉₀₀).* Deutsches Institut für Normung (Hrsg). Berlin : Beuth Verlag, 2016.
- DIN 51729. 1998.** *Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Brennstoffasche - Teil 11: Atomemissionspektrometrische Bestimmung mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES).* Deutsches Institut für Normung (Hrsg). s.l. : Beuth Verlag, 1998.
- DIN EN 16510-1. 2023.** *Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 16510-1:2022.* Berlin : Beuth Verlag, 2023.

DIN EN ISO 10304. 2009. *Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1.* Deutsches Institut für Normung (Hrsg). s.l. : Beuth Verlag, 2009.

DIN EN ISO 17225-1. 2014. *Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* Deutsches Institut für Normung (Hrsg). Berlin : Beuth Verlag, 2014.

DIN SPEC 33999. 2014. *Emissionsminderung – Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) – Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen.* Deutsches Institut für Normung (Hrsg). Berlin : Beuth Verlag, 2014.

Dominiczak, Tobias. 2016. *Entwicklung eines Laborelektroabscheiders für polydisperse Stoffsysteme und strömungstechnische Parameterstudie.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2016. Masterarbeit Nr. 3411.

FNR. 2013. *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen.* Gülzow : Eigenverlag, 2013.

FNR. 2014. *Leitfaden Feste Biobrennstoffe.* Gülzow : Eigenverlag, 2014. ISBN 9783000153891.

Fröling. 2013. Produkt Prospekt Hackgutkessel T4. *Fröling Homepage.* [Online] 2013. [Zitat vom: 18. 12 2022.] https://www.froeling.com/uploads/media/DE_Prospekt_T4.pdf.

Gaderer, Matthias. 2007. *Wärmeversorgung mit fester Biomasse bei kleiner Leistung.* Technische Universität München. München : Eigenverlag, 2007. Dissertation.

Gao, Huiting. 2015. *Untersuchung einer neuen Abreinigungstechnik für Gewebefilter bei Biomassefeuerungen.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2015. Masterarbeit Nr. 3699.

Glocker, Bernd, et al. 2013. *Entwicklung eines Elektroabscheiders für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen - 1. Phase.* PlasmaAir AG und IFK der Universität Stuttgart. Weil der Stadt : Glocker, Bernd; Dobslaw, Christine; Struschka, Michael; Goy, Julia; 2013. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az. 29769 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Glocker, Bernd, et al. 2017. *Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Abscheideleistung und Partikeleigenschaften bei Elektroabscheidern für kleine Biomassefeuerungen - 2. Phase.* PlasmaAir AG und IFK der Universität Stuttgart. Weil der Stadt : Glocker, Bernd; Marienfeld, Silke; Dobslaw, Christine; Struschka, Michael; Goy, Julia, 2017. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az. 32159 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Goy, Julia und Struschka, Michael. 2016/3. *Entwicklung eines praxisnahen Prüfablaufs zur Bewertung des Langzeitverhaltens von einem Gewebefilter.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum : s.n., 2016/3. Tagungsband zum 7.Fachgespräch "Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen" am 9.März in Leipzig.

Goy, Julia und Struschka, Michael. 2016/6. Untersuchungen zur Bewertung des Langzeitverhaltens eines Gewebefilters durch einen standardisierten Prüfablauf. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*. Juni 2016/6, 76.

Griffin, Timothy und Burtscher, Heinz. 2008. *Evaluation von Messverfahren zur Messung der Wirksamkeit von Partikelabscheidern bei kleinen Holzfeuerungen*. FHNW - Prüfstelle für Holzfeuerungen. 2008. Schlussbericht.

Gugelfuß, Anne. 2017. *Methodische Bewertung von Sekundärmaßnahmen für kleine Biomassefeuerungen*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2017. Studienarbeit Nr. 3486.

Hartmann, Hans, et al. 2010. *Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel*. Straubing : Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), 2010. Berichte aus dem TFZ Nr. 23.

Hartmann, Hans, et al. 2010. *Partikelemissionen aus Klein-feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen*. Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Straubing : Eigenverlag, 2010. Berichte aus dem TFZ 22.

Hirner, Manfred. 2017. *Untersuchung der Korngrößenverteilung im Abgas von Kleinf Feuerungen mit elektrostatischem Staubabscheider*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2017. Studienarbeit Nr. 3485.

Juschka, Winfried und Struschka, Michael. 2012. *Untersuchungen zur Feinstaubentstehung und CO-Bildung beim Verbrennungsprozess in chargenweise betriebenen Hausbrandfeuerstätten und Entwicklung emissions- und partikelarmer Feuerungsanlagen*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2012. Endbericht zum AiF / FDBI Vorhaben Nr. 16207 N.

Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans und Hofbauer, Hermann. 2016. *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2016.

Kohn, Eric. 2012. *Bewertung und Charakterisierung von Partikelniederschlägen an Bauteilen von Elektrofiltern*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. 2012. Projektarbeit Nr. 3127.

Krüger, Dennis. 2022. Zulassungen | Deutsches Biomasseforschungszentrum. [Online] Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), 2022. [Zitat vom: 28. 12 2022.] <https://www.dbfz.de/staubabscheider-in-haeuslichen-feuerungen/zulassungen>.

Löffler, Friedrich. 1988. *Staubabscheiden*. Stuttgart ; New York : Thieme Verlag, 1988. ISBN 3-13-712201-5.

Lauber, Adrian und Nussbaumer, Thomas. 2010. *Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern*. Zürich : s.n., 2010. 11. Holzenergie-Symposium.

Lenz, Volker. 2022. *Überblick über aktuelle gesetzliche und normative Rahmenbedingungen.* DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig : s.n., 2022. Tagungsreader 13. Fachgespräch Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen.

Lenz, Volker. 2010. *Feinstaubminderung im Betrieb von ScheitholzKaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz.* Leipzig : Eigenverlag DBFZ, 2010. Dissertationsschrift. DBFZ Report N. 3.

Lenz, Volker, et al. 2010. *Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen.* Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Leipzig : Eigenverlag, 2010. DBFZ Report Nr.1. In Kooperation mit Technologie- und Förderzentrum (TFZ) und Technische Universität Hamburg- Harburg (TUHH).

Lenz, Volker, Thrän, Daniela und Pfeiffer, Diana. 2014. *Messmethodensammlung Feinstaub: Methodenvorschlag zur Feinstaubfassung an Feuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe.* Leipzig : DBFZ, 2014. ISSN 2192-1806.

Miller, J. und Schwab, A. 1996. *Feinstaubabscheidung in betrieboptimierten Elektrofiltern.* [Hrsg.] Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF) im Forschungszentrum Karlsruhe. Karlsruhe : s.n., 1996.

Moloeznik Paniagua, Daniela. 2016. *Untersuchung eines kleinen elektrostatischen Staubabscheiders bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen an einem Pelletofen.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2016. Masterarbeit Nr. 3374.

Oehler, Heike, Turowski, Peter und Hartmann, Hans. 2015. *Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinf Feuerungsanlagen.* Straubing : Eigenverlag des TFZ, 2015. Berichte aus dem TFZ Nr. 38. ISSN 1614-1008.

Parker, K. R. 1997. *Applied Electrostatic Precipitation.* London : Blackie Academic and Professional, 1997.

Peglow, Nicolai. 2012. *Evaluierung zum Stand der Technik von elektrostatischen Partikelabscheidern im Bereich von Biomasse-Kleinf Feuerungsanlagen.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2012. Bachelorarbeit Nr. 3096.

Puttkamer, Thore von. 2005. *Charakterisierung biogener Festbrennstoffe.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 2005.

Reitberger, Jennifer. 2016. *Charakterisierung von Partikelproben aus Feuerungsabgasen von kleinen Biomassefeuerungen mit Staubabscheider.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : IFK, 2016. Studienarbeit Nr. 3445.

Schäfer, Christian. 2016. *Dissertation: Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkonzentration im Abgas von Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe.* Düsseldorf : VDI Verlag, 2016. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 15 Nr. 258.

Schmoch, Manfred und Steiner, Dominik. 2022. *Handbuch Elektrofilter. Physik, Hochspannungsversorgung, Erdung und Auslegung.* Wiesbaden : Springer Verlag, 2022. Bd. 2. Auflage. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-658-36207-2_4.

Schneider, Max. 2015. *Aussagefähigkeit von Analyseverfahren zur Charakterisierung von Partikelproben aus einer Biomassefeuerung mit Staubabscheider.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2015. Bachelorarbeit Nr. 3403.

Struschka, Michael und Goy, Julia. 2011. *Entwicklung eines Feinstaubabscheiders für holzbetriebene Kleinf Feuerungsanlagen.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. 2011. Sachbericht zum ZIM-Projekt mit dem Förderkennzeichen KF2530201TN9.

Struschka, Michael und Goy, Julia. 2015. *Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Gewebefilters für Biomassekessel.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. s.l. : Eigenverlag, 2015. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 22031611 der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR).

Struschka, Michael, Goy, Julia und Gugelfuß, Anne. 2017. *Methodische Bewertung von Sekundärmaßnahmen für kleine Biomassefeuerungen.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : s.n., 2017. Abschlussbericht zum Verbundprojekt im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW).

Struschka, Michael, Goy, Julia und Juschka, Winfried. 2016. *Durchführung von Messungen an einer ausgewählten Sekundärmaßnahme für kleine Biomassefeuerungen.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2016. Messungen im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW).

Struschka, Michael, Winter, Patricia und Baumbach, Günter. 2015. *Überprüfung der Wirksamkeit von Staubabscheidern für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe.* Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2015. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem Az: 30972 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Tebert, Christian, Hartmann, Ingo und Ulbricht, Tobias. 2022. *Der neue Blaue Engel für Staubabscheider für Scheitholzfeuerungen (UZ 222).* Straubing, Leipzig (virtuell) : s.n., 2022. DBFZ Tagungsreader, Nr. 23; 13. Fachgespräch "Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen".

UBA/AGEE-stat. 2021. *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.* Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2021.

Ulbricht, Tobias und Lenz, Volker. 2011. *Abscheider für biogene Kleinf Feuerungsanlagen - Technologien und Marktübersicht.* DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig : Eigenverlag, 2011. DBFZ Report Nr. 8 Kompakt.

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

VDI 2066-5. 1994. *Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen; Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskadenimpaktor*. Berlin : Beuth Verlag, 1994. VDI-Richtlinie.

VDI 3670. 2016. *Abgasreinigung - Nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen für Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe*. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin : Beuth Verlag, 2016. VDI-Richtlinie.

VDI 3678-1. 1998. *Elektrofilter: Prozessgas- und Abgasreinigung*. Berlin : Beuth Verlag, 1998. VDI-Richtlinie.

VDI 4206-2. 2015. *Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinf Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen*. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin : Beuth Verlag, 2015. VDI-Richtlinie.

Wöhler Technik GmbH. 2022. *DATENBLATT Wöhler SM 500 Staubmessgerät*. [<https://www.woehler.de/shop/sm-500-staubmessgeraet-287.html>] Bad Wünnenberg : s.n., 2022. Zuletzt aufgerufen am 17.12.2022.

White, Harry J. 1969. *Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969.

Wolf, Amadeus. 2015. *Untersuchung des Zusammenhangs von Strom- und Spannungsverhalten an einem kleinen elektrostatischen Staubabscheider*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigenverlag, 2015. Bachelorarbeit Nr. 3327.

Zheng, Jiexia. 2020. *Ambient Air Pollution from Wood Burning of Domestic Heating*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Stuttgart : Eigendruck, 2020. Dissertationsschrift.

Zotter, Peter, Lauber, Adrian und Nussbaumer, Thomas. 2021. *Monitoring des Praxisbetriebs von Elektroabscheidern bei sieben Kleinf Feuerungen über zwei Heizperioden*. Straubing, Leipzig (virtuell) : s.n., 2021. DBFZ Tagungsreader, Nr. 21; 12. Fachgespräch "Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen".

Anhang A – Grundlagen zu Feuerungen und Abscheidern

Tabelle 10.1: Übersicht über Normen zum Thema „Biogene Festbrennstoffe“ mit dem Unterthema „Terminologie und Klassifizierung“

Bezeichnung	Jahr	Titel	Status*	Ersatzvermerk*	Anmerkungen
<u>Auf Basis ISO 16559</u>					
ISO 16559:2022-01	2022	Biogene Festbrennstoffe - Terminologie	NORM [NEU]	Dieses Dokument ersetzt ISO 16559:2014-07	Terminologie / Definitionen
DIN EN ISO 16559:2022-05	2022	Biogene Festbrennstoffe - Terminologie (ISO 16559:2022); Deutsche Fassung EN ISO 16559:2022	NORM [NEU]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 16559:2014-12	Terminologie / Definitionen
[DIN EN ISO 16559:2014-12]	2014	Biogene Festbrennstoffe - Terminologie, Definitionen und Beschreibungen (ISO 16559:2014); Deutsche Fassung EN ISO 16559:2014	NORM [ZURÜCK- GEZOGEN]	Dokument wurde ersetzt durch DIN EN ISO 16559:2022-05.	Terminologie / Definitionen
[ISO 16559:2014-07]	2014	Biogene Festbrennstoffe - Terminologie, Definitionen und Beschreibungen	NORM [ZURÜCK- GEZOGEN]	Dokument wurde ersetzt durch: ISO 16559:2022-01	Terminologie / Definitionen
[DIN EN ISO 16559:2020-05 - Entwurf]	2020	Biogene Festbrennstoffe - Terminologie, Definitionen und Beschreibungen (ISO/DIS 16559:2020); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 16559:2020	NORM- ENTWURF	-	Terminologie / Definitionen
<u>Auf Basis ISO 17225</u>					
DIN EN ISO 17225-2:2021-09	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets (ISO 17225-2:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-2:2021	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 17225-2:2014-09	Brennstoff- spezifikationen: Holzpellets
DIN EN ISO 17225-3:2021-06	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 3: Klassifizierung von Holzbriketts (ISO 17225-3:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-3:2021	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 17225-3:2014-09	Brennstoff- spezifikationen: Holzbriketts
DIN EN ISO 17225-4:2021-06	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln (ISO 17225-4:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-4:2021	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 17225-4:2014-09	Brennstoff- spezifikationen: Holzhackschnitzel
DIN EN ISO 17225-5:2021-11	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 5: Klassifizierung von Stückholz (ISO 17225-5:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-5:2021	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 17225-5:2014-09	Brennstoff- spezifikationen: Stückholz
DIN EN ISO 17225-6:2021-11	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 6: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets (ISO 17225-6:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-6:2021	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 17225-6:2014-09	Brennstoff- spezifikationen: nicht-holzartige Pellets
DIN EN ISO 17225-7:2021-11	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 7: Klassifizierung von nicht-holzartigen Briketts (ISO 17225-7:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-7:2021	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 17225-7:2014-09	Brennstoff- spezifikationen: nicht-holzartige Briketts
[ISO/TS 17225-8:2016-12]	2016	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 8: Klassifizierung von thermisch behandelten und gepressten Brennstoffen aus Biomasse	VORNORM	-	Brennstoff- spezifikationen
[DIN EN ISO 17225-9:2021-10]	2021	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 9: Klassifizierung von grobem Schredderholz und Holzhackschnitzeln für die industrielle Verwendung (ISO 17225-9:2021); Deutsche Fassung EN ISO 17225-9:2021	NORM [AKTUELL]	-	Brennstoff- spezifikationen
[DIN EN ISO 17225-1:2014-09]	2014	Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17225-1:2014	NORM [ZURÜCKGE- ZOGEN]	-	Brennstoff- spezifikationen

* Angabe: Letzter Zugriff: 05.05.22

Tabelle 10.2: Übersicht über Normen zum Thema „Biogene Festbrennstoffe“ mit dem Unterthema „Bestimmung chemischer Eigenschaften und von Inhaltsstoffen“

Bezeichnung	Jahr	Titel	Status*	Ersatzvermerk*	Anmerkungen
DIN EN ISO 14780:2020-02	2020	Biogene Festbrennstoffe - Probenherstellung (ISO 14780:2017 + Amd 1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 14780:2017 + A1:2019	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 14780:2017-08	
DIN EN ISO 16948:2015-09	2015	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff (ISO 16948:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16948:2015	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 15104:2011-04	Brennstoff-Analyse: C, H, N
DIN EN ISO 16967:2015-07	2015	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung von Hauptelementen - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16967:2015	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 15290:2011-04	Brennstoff-Analyse: Hauptelemente (Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, Ti)
DIN EN ISO 16968:2015-09	2015	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung von Spurenelementen (ISO 16968:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16968:2015	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 15297:2011-04	Brennstoff-Analyse: Spurenelemente
DIN EN ISO 16993:2016-11	2016	Biogene Festbrennstoffe - Umwandlung von Analysenergebnissen einer Bezugsbasis in Ergebnisse mit anderer Bezugsbasis (ISO 16993:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16993:2016	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 16993:2015-07	Brennstoff-Analyse: Bezugsbasis (luftgetrocknet, wasserfrei, aschefrei)
DIN EN ISO 16994:2016-12	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor (ISO 16994:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16994:2016	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 16994:2015-07	Brennstoff-Analyse: S, Cl
DIN EN ISO 16995:2015-05	2015	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des wasserlöslichen Gehaltes an Chlorid, Natrium und Kalium (ISO 16995:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16995:2015	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 15105:2011-04	Brennstoff-Analyse: Cl, Na, Ka
DIN EN ISO 18122:2021-11 - Entwurf		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes (ISO/DIS 18122:2021); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 18122:2021	NORM-ENTWURF	(Wird DIN EN ISO 18122:2016-03 ersetzen.)	Eigenschaften: Aschegehalt
DIN EN ISO 18122:2016-03		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes (ISO 18122:2015); Deutsche Fassung EN ISO 18122:2015	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 14775:2012-11	Eigenschaften: Aschegehalt
DIN EN ISO 18123:2016-03		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen (ISO 18123:2015); Deutsche Fassung EN ISO 18123:2015	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 15148:2010-03 .	Eigenschaften: Flüchtige
DIN EN ISO 18125:2017-08		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Heizwertes (ISO 18125:2017); Deutsche Fassung EN ISO 18125:2017	NORM [AKTUELL]	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 14918:2014-08 .	Eigenschaften: Heizwert
DIN EN ISO 18134-1:2021-11 - Entwurf		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser - Referenzverfahren (ISO/DIS 18134-1:2021); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 18134-1:2021	NORM-ENTWURF	- (Wird DIN EN ISO 18134-1:2015-12 ersetzen.)	Eigenschaften: Wassergehalt
DIN EN ISO 18134-1:2015-12		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser - Referenzverfahren (ISO 18134-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 18134-1:2015	NORM-ENTWURF	Dieses Dokument ersetzt DIN EN 14774-1:2010-02 .	Eigenschaften: Wassergehalt
DIN EN ISO 18134-2:2017-05		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser - Vereinfachtes Verfahren (ISO 18134-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 18134-2:2017	NORM-ENTWURF	Dieses Dokument ersetzt DIN EN ISO 18134-2:2015-12 .	Eigenschaften: Wassergehalt
DIN EN ISO 21404:2020-06		Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens (ISO 21404:2020); Deutsche Fassung EN ISO 21404:2020	NORM-ENTWURF	Dieses Dokument ersetzt DIN CEN/TS 15370-1:2006-12 .	Eigenschaften: Ascheschmelzverhalten

* Angabe: Letzter Zugriff: 05.05.22

Tabelle 10.3: Übersicht über Normen zum Thema „Biogene Festbrennstoffe“ mit dem Unterthema „Bestimmung mechanischer Eigenschaften, Lagerung“

Bezeichnung	Jahr	Titel
DIN EN ISO 5370:2022-03 - Entwurf	2022	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes von Feingut in Pellets (ISO/DIS 5370:2022); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 5370:2022
DIN EN ISO 17827-1:2016-10	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe - Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber (ISO 17827-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17827-1:2016
DIN EN ISO 17827-2:2016-10	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe - Teil 2: Vertikales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darunter (ISO 17827-2:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17827-2:2016
DIN EN ISO 17831-1:2016-05	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts - Teil 1: Pellets (ISO 17831-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17831-1:2015
DIN EN ISO 17831-2:2016-05	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts - Teil 2: Briketts (ISO 17831-2:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17831-2:2015
DIN EN ISO 17828:2016-05	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte (ISO 17828:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17828:2015
DIN EN ISO 17829:2016-03	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets (ISO 17829:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17829:2015
DIN EN ISO 17830:2016-11	2016	Biogene Festbrennstoffe - Partikelgrößenverteilung von Pellet-Ausgangsmaterial (ISO 17830:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17830:2016
DIN EN ISO 18135:2017-08	2016	Biogene Festbrennstoffe - Probenahme (ISO 18135:2017); Deutsche Fassung EN ISO 18135:2017
DIN EN ISO 18846:2016-12	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an Feingut in Mengen von Pellets (ISO 18846:2016); Deutsche Fassung EN ISO 18846:2016
DIN EN ISO 18847:2016-12	2016	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikeldichte von Pellets und Briketts (ISO 18847:2016); Deutsche Fassung EN ISO 18847:2016
DIN EN ISO 19743:2017-08	2017	Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an schweren Fremdstoffen mit einer Partikelgröße von mehr als 3,15 mm (ISO 19743:2017); Deutsche Fassung EN ISO 19743:2017
DIN EN ISO 21945:2020-06	2020	Biogene Festbrennstoffe - Vereinfachtes Verfahren zur Probenahme an kleinen Anlagen (ISO 21945:2020); Deutsche Fassung EN ISO 21945:2020
DIN EN ISO 20023:2019-04	2019	Biogene Festbrennstoffe - Sicherheit von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen - Sicherer Umgang und Lagerung von Holzpellets in häuslichen und anderen kleinen Feuerstätten (ISO 20023:2018); Deutsche Fassung EN ISO 20023:2018
DIN EN ISO 20024:2020-09	2020	Biogene Festbrennstoffe - Sicherer Umgang und Lagerung von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen in gewerblichen und industriellen Anwendungen (ISO 20024:2020); Deutsche Fassung EN ISO 20024:2020

Tabelle 10.4: Übersicht über Brennstoff-Indikatoren und deren Relevanz
(zusammengefasst nach (Kaltschmitt, et al., 2016 S. 603ff))

Berechnungsgrundlage	Beschreibung	Relevanz
Stickoxid-Emissionen		
N-Gehalt	Direkte Abhängigkeit der Stickstoffoxid(NOx)-Emissionen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff. Dadurch Einteilung in Brennstoffe mit geringem, mittlerem oder hohem Stickstoffgehalt.	Emissionen: Relevant für die Abschätzung der notwendigen Entstickungsmaßnahmen.
SOx/HCl-Emissionen		
Molares (K+Na)/(x(2S+Cl)) Verhältnis <i>mit x = brennstoff- spezifischer Faktor</i>	Schwefel und Chlor gehen während der Verbrennung in die Gasphase über und werden als Schwefeldioxid (SO _x) und Chlorwasserstoff (HCl) emittiert. Treffen sie auf Alkalimetalle wie Kalium (K) oder Natrium (Na), bilden sie Salze und werden weniger emittiert.	Emissionen: Relevant für die Abschätzung möglicher Maßnahmen für die Gasreinigung.
Aerosolbildung		
Summe aus (K+Na+Pb+Zn)	Flüchtige Elemente wie vor allem Kalium (K), daneben Natrium (Na), Blei (Pb) und Zink (Zn) gehen bei der Verbrennung in die Gasphase über und kondensieren als feine Partikel im Abgas oder auf Anlagenoberflächen. Sie gelten daher als Hauptindikator für Feinstaubemissionen. Einteilung der Brennstoffe mit geringer, mittlerer oder hoher Neigung zu Aerosolbildung.	Emissionen: Relevant für die Abschätzung möglicher Maßnahmen für die Gasreinigung, vor allem Entstaubung im Feinstaubbereich. Relevant für holzartige und halmgutartige Brennstoffe je nach Art und Zusammensetzung.
Kaliumfreisetzung		
Molares Si/K-Verhältnis	Kalium als leichtflüchtiges Element erhöht als Aerosolbildner die Partikelemissionen. In Anwesenheit von Silizium wird dies je nach Verhältnis stärker oder schwächer vermindert, da das Kalium stattdessen als Silikat in die Asche eingebunden wird und weniger ins Abgas gelangt.	Emissionen: Relevant für die Abschätzung möglicher Maßnahmen für die Gasreinigung. Hauptsächlich relevant bei siliziumreichen Brennstoffen (wie Stroh und andere).
Ascheerweichung		
Molares Si/(Ca+Mg) Verhältnis - alternativ auch - (Si+P+K)/(Ca+Mg)	Silizium (Si) und Kalium (K) erniedrigen die Ascheschmelztemperatur, Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) erhöhen diese. Je nach Verhältnis kann es daher bei einer niedrigeren Ascheschmelztemperatur zu Betriebsproblemen aufgrund von Verschlackung kommen.	Anlagenbetrieb: Relevant für Ascheverhalten und Verschlackungsneigung. Relevant für Brennstoffe mit hohen Gehalten an Si, Ca, Mg und K wie etwa halmgutartigen Brennstoffe.
Hochtemperaturkorrosion		
Molares 2S/Cl-Verhältnis	Bei hohen Chlorgehalten im Brennstoff kommt es vermehrt zur Ablagerung chlorhaltiger Verbindungen auf Anlagenoberflächen, die zur Beschädigung von Anlagenteilen (Chlor-Korrosion) führen. Schwefel (S) wirkt dem entgegen.	Anlagenbetrieb: Relevant für Anlagenteile.

Anhang B – Voruntersuchungen ausgewählter Einzelaspekte

Zur Strömungsmodellierung (zu Kapitel 5.2):

Tabelle 10.5: Beschreibung aller modellierten Varianten von Abscheideflächen

	Variante 0		Platte 1A		Platte 1B		Platte 1C		Platte 2		Platte 3		Platte 4	
	Referenz ohne Platten		innen gleiches b, außen größer (umgesetzte Variante)		kürzere Platten, 150 statt 200 mm		wie 1A nur mit seitlichen Leitblechen		von innen nach außen größer werdendes b		Platten sind genau in Düsenmitte bzw. genau dazwischen		wie 1A (umgesetzt), nur mit seitlichen Alu-Profilen	
	b	Position	b	Position	b	Position	b	Position	b	Position	b	Position	b	Position
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
mittlere Platte				98,5	0	98,5	0	98,5		98,5		98,5		98,5
Platte 1			10	108,5	10	108,5	10	108,5	10	108,5	17	115,5	10	108,5
Platte 2			10	118,5	10	118,5	10	118,5	12	120,5	17	132,5	10	118,5
Platte 3			10	128,5	10	128,5	10	128,5	14	134,5	17	149,5	10	128,5
Platte 4			10	138,5	10	138,5	10	138,5	16	150,5	18	167,5	10	138,5
Platte 5			15	153,5	15	153,5	15	153,5	18	168,5			15	153,5

		Variante 0	Kette 1	Kette 2	Kette 3	Kette 4	Kette 5
		Referenz ohne Platten (Ursprung für Ketten-Variationen)	Anordnung nach Modell 2.0 (Gassen und Waben)	aus Variante 1, Anordnung umgedreht (Waben und Gassen)	Variante mit dichter Anordnung (nur Waben)	Variante mit lockerer Anordnung (nur Gassen)	Variante 3 mit Umlenkplatte
Anfangsposition	mm	-	180	180	160	160	160
Elemente		0	105	105	171	100	171

		Variante 0	Gitter 1
		Referenz ohne Platten (Ursprung für Ketten-Variationen)	schräges Gitter, 30 mm, versetzt
Anfangsposition	mm	-	160
Maschenweite		-	30
Gitterplatten		-	6
Abstand Gitter		-	40

	Variante 0		Platte 4		Kombi 1		Kombi 2	
	Referenz ohne Platten		Variante Platte 4		Kombination Platten mit Ketten (dichter gepackt)		Kombination Platten mit Ketten (lockerer gepackt)	
	b	Position	b	Position	b	Position	b	Position
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
mittlere Platte				98,5		97		97
Platte 1			10	108,5	16,5	113,5	20,5	117,5
Platte 2			10	118,5	16	129,5	20	137,5
Platte 3			10	128,5	16	145,5	20	157,5
Platte 4			10	138,5	16	161,5		
Platte 5			15	153,5				

Platten ganzes Modell	11	9	7
Platten halbes Modell	5,5	4,5	3,5
Elemente Kette halbes Modell	0	144	108
		anderes netz!	anderes netz!

Einstellungen der durchgeführten Strömungsmodellierung (im Programm ANSYS Fluent):

Netz

- Einstellungen:
 - Größenfunktion: Krümmung
 - Phys. Relevanz: Fein
 - Glätten: Hoch
 - Übergang: Schnell
 - Spannwinkel: Fein
 - Max. Flächengröße: 4 mm

- Netzqualität:
 - Elemente: 1,2 Mio
 - Schiefe: max. 0,899

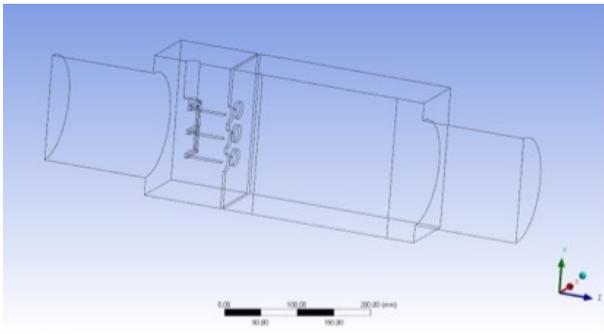
Setup

- Modell: Viscous:
 - k-epsilon
 - realizable
 - enhanced wall treatment

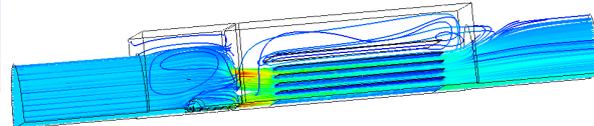
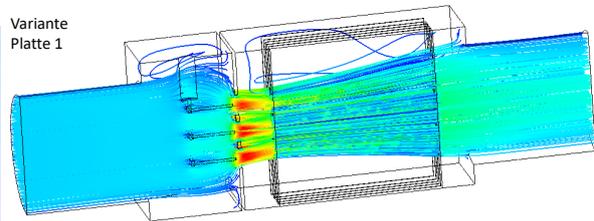
- Boundary Conditions:
 - inlet: velocity inlet, 1 m/s
 - outlet: pressure outlet, -1Pa
 - platte: wall
 - symmetrie: symmetry

- Solution methods:
 - pressure: presto
 - mom/turb: first order upwind

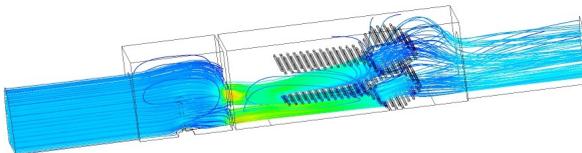
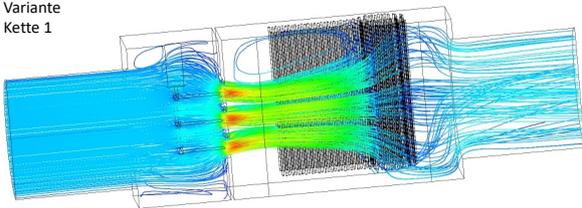
Digitales Modell Variante 0 (Referenz)



Variante
Platte 1



Variante
Kette 1



Variante
Gitter 1

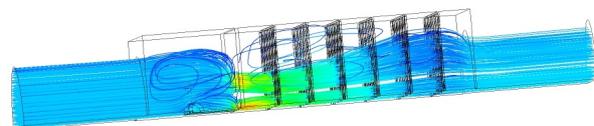
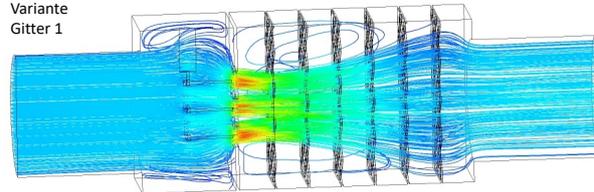


Abbildung 10.1: Modell der Referenz (Variante 0 ohne Abscheidefläche) in ANSYS Fluent und Strömungslinien in der Schnittansicht der Varianten „Platte 1“, „Kette 1“ und „Gitter 1“

Anhang zu: Verbrennungsversuche an einem Kaminofen zu Partikelablagerungen an einem Hochspannungsisolator (Kapitel 5.3)

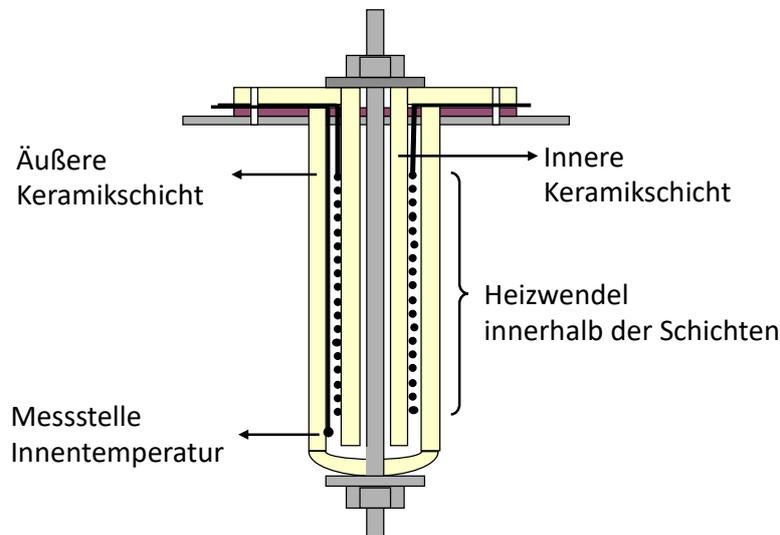
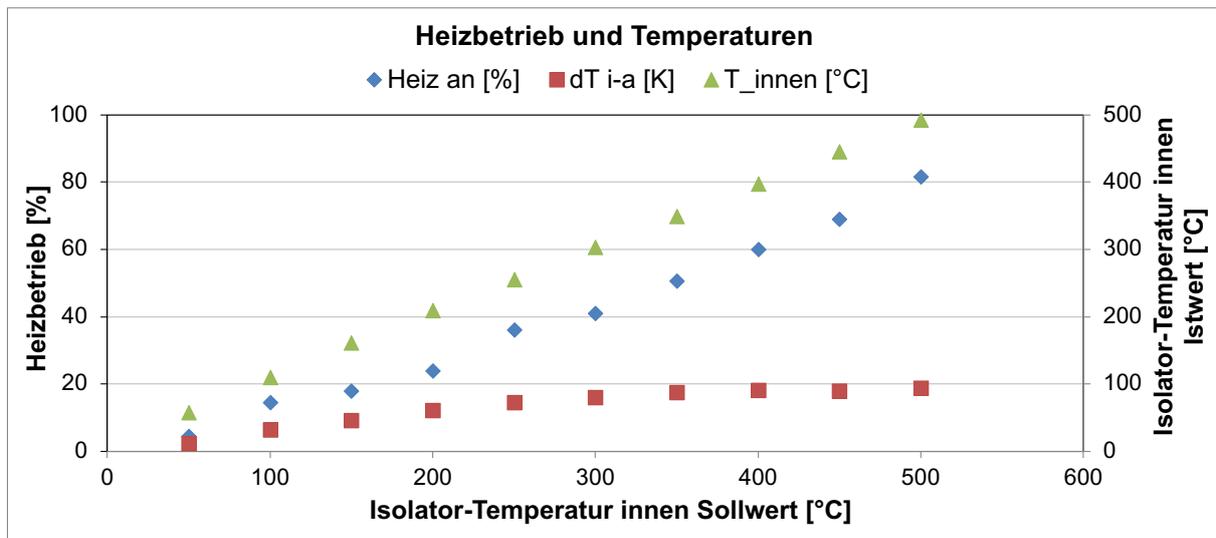


Abbildung 10.2: Aufbau des verwendeten Hochspannungsisolators (Prototyp) mit Heizwendel und Temperatur-Messpunkt; Ansicht im Querschnitt



T_soll [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
T_innen [°C]	57	110	161	209	255	303	350	397	445	493
T_außen [°C]	45	77	115	149	183	223	262	306	355	399
dT i-a [K]	12	32	46	60	73	80	87	91	90	94
Heiz an [%]	4	15	18	24	36	41	51	60	69	81

Abbildung 10.3: Kennlinie der Innen- und Außentemperaturen am Hochspannungsisolator in Umgebungsluft



Abbildung 10.4: Einfluss der Strömungsrichtung auf Ablagerungen am Hochspannungsisolator bei Verbrennungsversuchen

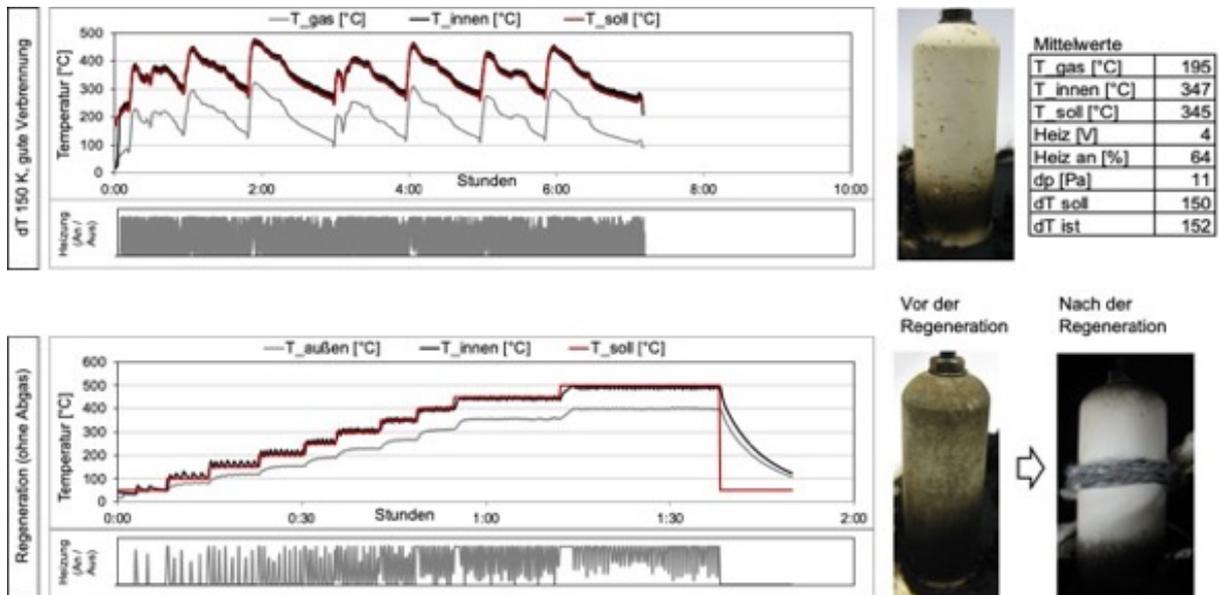


Abbildung 10.5: Thermische Regeneration des Hochspannungsisolators: oben: im laufenden Betrieb mit Feuerungsabgas bei hoher Temperatureinstellung (dT 150K); unten: in Umgebungsluft durch Hochheizen des Isolators auf eine Oberflächentemperatur über 400°C werden entstandene kohlenstoffhaltige Ablagerungen entfernt

Anhang C – Untersuchungen an automatisch beschickten Feuerungen

Zu den Untersuchungen an automatisch beschickten Feuerungen

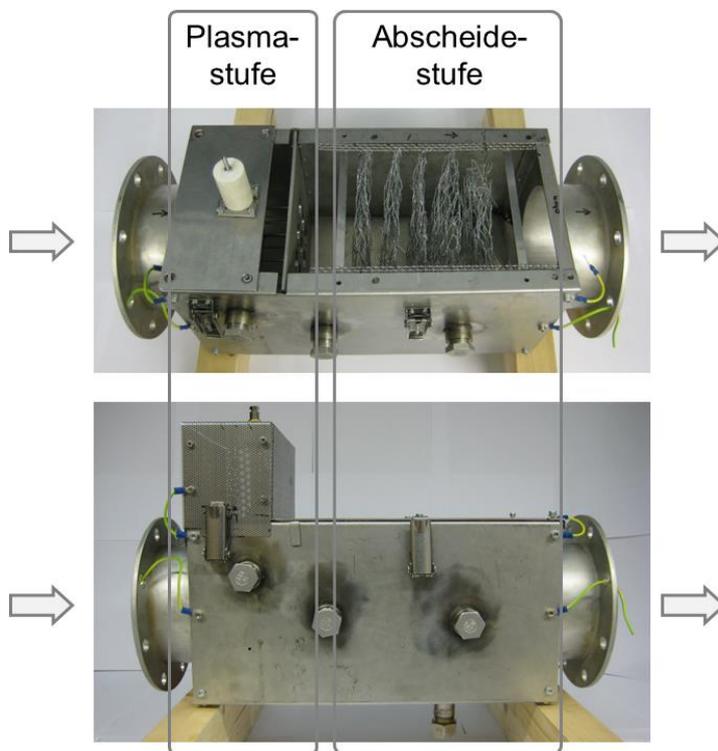


Abbildung 10.6: Verwendeter zweitstufiger Elektroabscheider-Prototyp mit Ionisationsstufe und Abscheidestufe (siehe Beschreibungen in Struschka et al (2011), Glocker et al (2013) und Glocker et al (2017))

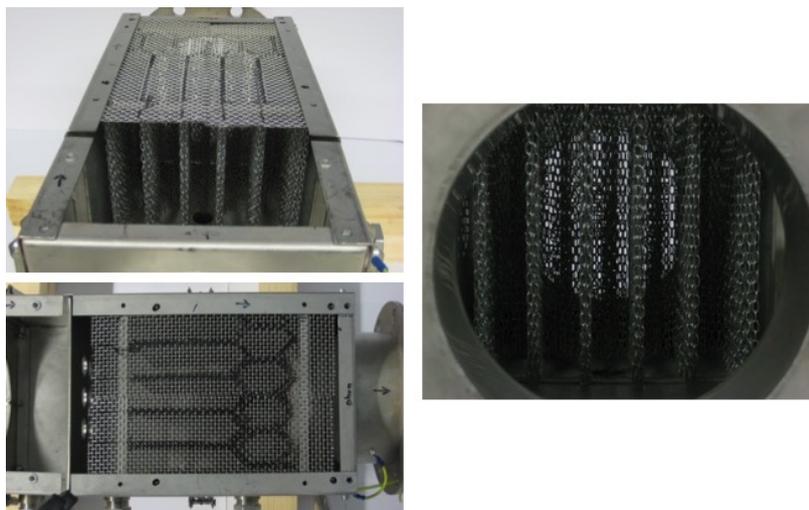


Abbildung 10.7: Elektroabscheider-Prototyp, Entwicklungsgeneration Modell 2, mit Abscheidefläche „Kette 1“

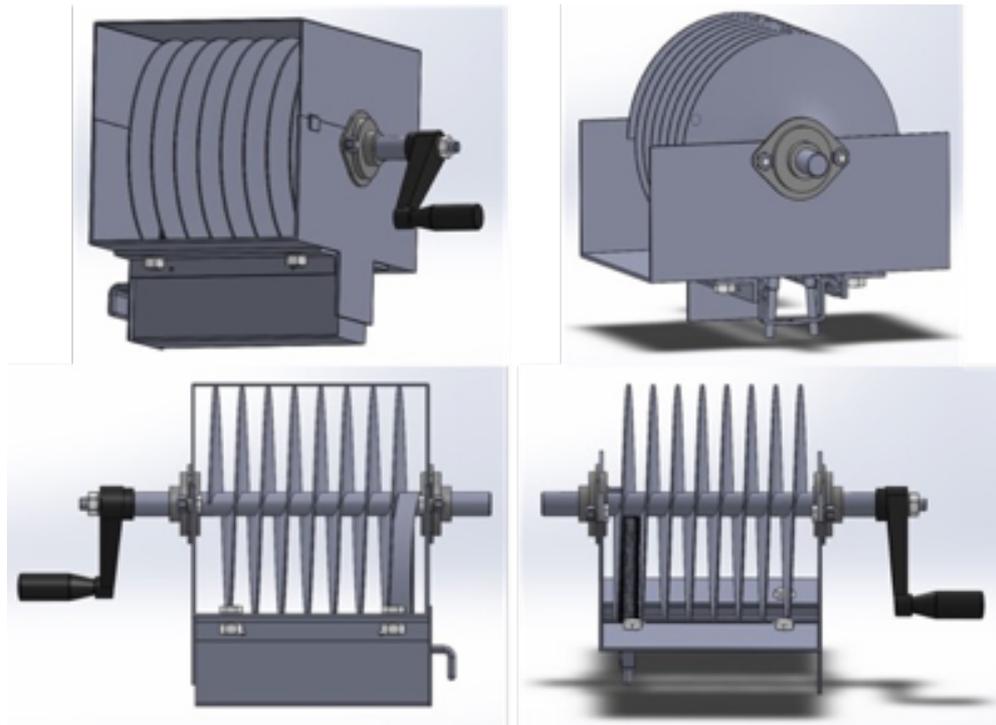


Abbildung 10.8: CAD-Modell der verwendeten Abscheidefläche für die Versuche am Hackgutkessel, genau beschrieben in Baum (2017)

Tabelle 10.6: Versuchsdaten der Untersuchungen am Pelletofen mit Elektroabscheider

Versuch Nummer	Feuerung (Pelletofen)					Abgaszustand Rohgas										Abgaszustand Reingas				ESP				Planfilter Rohgas 1	Planfilter Rohgas 2	Planfilter Reingas 1	Planfilter Reingas 2			
	Leistung (Schnecke)	Leistung (Schnecke)	Luftzufuhr (Gebläse)	Luftzufuhr (Gebläse)	Luftzufuhr (Gebläse)	Leistung (Schnecke)	Brennstoff-leistung Ofen (berechnet)	Abgastemperatur T _{Ofen} [°C]	O ₂ [Vol.-%]	CO ₂ [Vol.-%]	CO [ppm]	CO [mg/m ³ bezogen]	OGC [mg/m ³ bezogen]	Luftüberschuss lambda	Abgastemperatur T _{Rohgas} [°C]	Unterdruck Abgas [Pa]	Staubkonzentration [mg/m ³]	Staubkonzentration [mg/m ³]	Staubkonzentration [mg/m ³]	PM ₁₀ Rohgas [mg/m ³]	Staubkonzentration [mg/m ³]	Staubkonzentration [mg/m ³]	PM ₁₀ Reingas [mg/m ³]					Staubkonzentration [mg/m ³]	PM ₁₀ Reingas bezogen [mg/m ³]	Hochspannung U _{Soll-Wert} [kV]
01-1	50	50	90	90	90	303	-	4,0	131	16	33	48	-	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	6,9	0,06	0,4
02-1	75	75	90	90	90	177	11	1,7	149	20	73	46	-	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,4	0,11	0,9	
02-2	50	50	50	50	50	184	7	2,1	139	15	35	28	-	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,10	0,8	
02-3	50	50	50	50	50	150	5	2,0	138	17	36	27	-	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,06	0,5	
03-1	75	75	75	75	75	272	16	1,9	145	13	95	68	-	102	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,09	0,7	
03-2	75	75	75	75	75	365	29	1,7	148	13	156	102	-	101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,08	0,7	
03-3	75	75	50	50	50	192	21	1,9	140	9	98	71	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,06	0,5	
03-4	75	73	50	50	50	233	16	1,8	140	9	107	73	-	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,05	0,4	
05-1	75	75	75	75	75	468	34	1,7	150	13	162	107	-	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	9,4	0,10	0,9	
05-2	25	25	50	50	50	1734	24	5,3	122	12	42	85	-	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,02	0,1	
05-3	50	50	50	50	50	286	11	2,8	126	12	34	37	-	86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,02	0,1	
06-01	25	25	75	75	75	3971	54	8,3	81	58	55	172	ja	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	7,5	0,01	0,1	
06-02	100	100	75	75	75	288	61	1,6	138	50	199	121	-	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,1	0,04	0,3	
06-03	50	50	75	75	75	324	3	3,1	137	50	51	59	ja	72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,4	0,04	0,3	
06-04	75	75	25	25	25	376	15	1,8	130	54	116	79	ja	67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,4	0,04	0,3	
07-01	75	75	100	100	100	296	9	1,8	136	23	87	60	-	82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,12	1,0	
07-02	50	50	100	100	100	283	4	2,8	141	22	37	40	-	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8,5	0,15	1,3	

Tabelle 10.7: Wertetabelle der Kohlenstoff-Analysen der Partikelfilterproben am Pelletofen mit zweistufigem Elektroabscheider

		Luftmangel		Luftoptimum		Luftüberschuss	
		Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
Nummer Planfilter		P30.7	P30.8	P30.5	P30.6	P30.1	P30.2
TC	%	36,1	15,7	10,90	18,90	37,20	17,70
TOC	%	4,88	10,4	8,53	14,80	32,50	3,85
TEC	%	30,9	5,2	1,73	3,63	4,18	10,60
TIC	%	0,28	0,2	0,63	0,49	0,58	3,22
C/H-Verhältnis	mol/mol	4,53	7,44	-	-	1,17	0,33

		Luftmangel		Luftoptimum		Luftüberschuss	
		Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
TC	mg/m ³	41,9	10,8	5,6	3,8	20,5	5,7
TOC	mg/m ³	5,7	7,2	4,4	3,0	17,9	1,2
TEC	mg/m ³	35,8	3,6	0,9	0,7	2,3	3,4
TIC	mg/m ³	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	1,0
Rest	mg/m ³	74,2	58,1	45,4	16,2	34,5	26,3
Lambda	-	1,8	1,8	3,1	3,1	8,3	8,3
Gesamtstaub-	mg/m ³	116	69	51	20	55	32
konzentration (real-O ₂)							
Absolute Minderung	mg/m ³	47	47	30	30	23	23
Abscheidegrad	%	41	41	60	60	42	42

Tabelle 10.8: Wertetabelle zur Abscheidung der Kohlenstoff-Fraktionen aus den Analysen der Partikelfilterproben

@real-O ₂		Luftmangel	Luftoptimum	Luftüberschuss
Minderung Gesamtstaub	mg/m ³	47,0	30,0	23,0
Minderung TC-Anteil	mg/m ³	31,0	1,8	14,8
Minderung TOC-Anteil	mg/m ³	-1,5	1,4	16,6
Minderung TEC-Anteil	mg/m ³	32,3	0,2	-1,1
Minderung TIC-Anteil	mg/m ³	0,2	0,2	-0,7

		Luftmangel	Luftoptimum	Luftüberschuss
Abscheidegrad Gesamtstaub	%	41	60	42
Abscheidegrad TC-Anteil	%	74	32	72
Abscheidegrad TOC-Anteil	%	-27	32	93
Abscheidegrad TEC-Anteil	%	90	18	-48
Abscheidegrad TIC-Anteil	%	58	69	-223

Tabelle 10.9: Wertetabelle zu den Partikelanalysen (Kohlenstoffanalyse und Ionenanalyse) aus dem Abgas automatisch beschickter Feuerungen

Befund		16-0083-0086		16-0341-0343		16-0554-0555		16-0589-0590		2017 / 013 / 0109						
TC-Analyse Verlaufskurve		16-0083-0086-RC		16-0341-0343-RC		6-0554-0555-R		16-589-590-RC								
Probe		P30.1	P30.5	P30.7	Blind- probe	P30.2	P30.6	P30.8	P2.5	P2.6	P11.03	P11.04	P.01	P.02	P.11	P.12
Labornummer	83/16	84/16	85/16	86/16	86/16	341/16	342/16	343/16	554/16	555/16	589/16	590/16	109/17	110/17	111/17	112/17
Versuchsnummer	12	14	15	-	-	12	14	15	20	20	22	22	26	26	28	28
Messstelle	Rohgas	Rohgas	Rohgas	Rohgas	-	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas	Reingas
Feuerung	PO	PO	PO	PO	-	PO	PO	PO	PO	PO	HK	HK	HK	HK	HK	HK
Brennstoff	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HS	HS	HP	HP	PM	PM
Staubbelastung, mg	5,4	4,1	13,9	-	-	1,7	1,2	4,4	1,86	5,23	19,78	12,89	13,89	4,22	13,00	6,40
Anteil für TC-Bestimmung, %	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Anteil für Cl-Bestimmung, %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Anteil für HE-Bestimmung, %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Kohlenstoffanalyse																
Gesamt-Kohlenstoff (TC), %	37,2	10,9	36,1	0,09	17,7	18,9	100	11,4	7,52	3,28	3,61	7,29	13	2,19	3,94	3,94
organ.-Kohlenstoff (TOC), %	32,5	8,53	4,88	0,06	3,85	14,8	0	9,27	4,48	3,14	2,87	3,57	6,51	1,6	2,51	2,51
elementarer Kohlenstoff (EC), %	4,18	1,73	30,9	0,02	10,6	3,63	99,8	2	2,38	0,25	0,68	2,7	6,52	0,59	1,43	1,43
anorgan.-Kohlenstoff (TIC), %	0,58	0,63	0,28	0,02	3,22	0,49	0,2	0,13	0,66	<0,10	<0,10	1,02	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Wasser laut RC-Verlauf-Daten, %	95,2	93,3	23,9	2,46	163	302	40,3	87	123	7,78	30,0					

* Abweichendes Analysen-Programm verwendet: --> Abschätzung notwendig

Abschätzung von Probe 343 auf Basis der Probe 83

Wasseranteil Probe 83 in % 95,2

Wasseranteil Probe 343 in % 40,3

ergibt einen Faktor von 42%

damit Abschätzung von TC

TC Probe 83 in % 37,2

TC Probe 343 in % 15,7

dieser geschätzte Wert wird weiter verwendet

Abschätzung der Anteile von 343 für OC (2/3) und EC (1/3) anhand Kurvenfläche:

Anteil TIC in % laut Probenbefund 0,2

restlicher geschätzter Anteil für TOC und 15,5

geschätzter Anteil TOC in % 10,4

dieser geschätzte Wert wird weiter verwendet

geschätzter Anteil EC in % 5,2

dieser geschätzte Wert wird weiter verwendet

Tabelle 10.9 Fortsetzung: Wertetabelle zu den Partikelanalysen (Kohlenstoffanalyse und Ionenanalyse) aus dem Abgas automatisch beschickter Feuerungen

Befund	16-0552-0553	16-0591-0592	2017 / 014 / 0113					
TC-Analyse Verlaufskurve								
Probe	P2.3	P2.4	P15.01	P15.02	P.03	P.04	P.13	P.14
Labornummer	552/16	553/16	591/16	592/16	113/17	114/17	115/17	116/17
Versuchsnummer	19	19	23	23	27	27	29	29
Messstelle	Reingas	Rohgas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
Feuerung	PO	PO	HK	HK	HK	HK	HK	HK
Brennstoff	HP	HP	HS	HS	HP	HP	PM	PM
Staubbelastung, mg	2,43	5,36	19,97	14,37	12,28	12,00	10,7	7,6
Anteil für TC-Bestimmung, %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Anteil für Cl-Bestimmung, %	50%	50%	43,7	44,1	48,9	46,1	47,7	47,4
Anteil für HE-Bestimmung, %	50%	50%	56,3	55,9	51,1	53,9	52,3	52,6
Hauptelemente	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>	<i>- an -</i>
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃), %	1,14	0,513	0,256	0,199	0,412	0,129	0,113	0,107
Bariumoxid (BaO), %	0,071	0,119	0,02	0,02	0,04	0,033	0,011	0,023
Kalziumoxid (CaO), %	3,23	9,94	1,24	0,786	2,75	1,86	0,505	0,59
Eisenoxid (Fe ₂ O ₃), %	7,33	0,688	0,245	0,197	1,43	0,295	0,241	0,26
Kaliumoxid (K ₂ O), %	23,1	33,9	42,7	40,9	49,3	51,6	58,3	56,6
Magnesiumoxid (MgO), %	0,379	1,78	0,234	0,162	0,376	0,265	0,083	0,11
Manganoxid (MnO ₂), %	0,218	1,2	0,071	0,053	0,33	0,296	0,169	0,179
Natriumoxid (Na ₂ O), %	0,622	0,524	1,61	1,57	2,78	3,05	2,04	3,85
Phosphoroxid (P ₂ O ₅), %	0,18	1,21	0,798	0,718	0,389	0,286	0,466	0,476
Schwefeltrioxid (SO ₃), %	34,5	44,3	22,9	22,8	12	12,6	5,23	5,41
Strontiumoxid (SrO ₂), %	0,013	0,03	0,002	0	0,01	0,006	0,002	0,002
Titanoxid (TiO ₂), %	0,048	0,019	0,005	0,004	0,017	0,003	0,003	0,002
Chlorid (Cl), %	4,16	3,34	19,1	16,3	17,85	19,16	33,96	33,69
Summe, %	74,9	97,6	89,2	83,7	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 10.10: Ergebnisse der Impaktormessungen am Hackgutkessel mit Elektroabscheider

Filterstufe	Trenndurchmesser [μm]	Beladungen in mg					
		Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
		V-1.06	V-1.07	V-1.09	V-1.10	V-1.11	V-1.12
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
Summe		8,72	4,19	2,88	1,37	5,25	3,38

Tabelle 10.11: Ergebnisse der Kohlenstoffanalysen der Partikelproben am Hackgutkessel je Brennstoff

@real-O ₂		Hackschnitzel	Holzpellets	Pelletmix
Minderung Gesamtstaub	mg/m ³	34,0	21,0	16,0
Minderung TC-Anteil	mg/m ³	1,0	1,1	0,0
Minderung TOC-Anteil	mg/m ³	1,1	0,5	0,1
Minderung TEC-Anteil	mg/m ³	0,0	0,3	-0,1
Minderung TIC-Anteil*	mg/m ³	0,0	0,3	0,0
		Hackschnitzel	Holzpellets	Pelletmix
Abscheidegrad Gesamtstaub	%	53	72	43
Abscheidegrad TC-Anteil	%	49	50	-3
Abscheidegrad TOC-Anteil	%	57	49	10
Abscheidegrad TEC-Anteil	%	-27	33	-38
Abscheidegrad TIC-Anteil*	%	53	97	43

* alle Werte <0,1 zu 0,1 gesetzt

Anhang D – Untersuchungen an manuell beschickten Feuerungen

Tabelle 10.12: Versuchsdaten zur Untersuchung zum Einfluss der Betriebsweise am Kaminofen mit Elektroabscheider

Abbrand	Ofenbetrieb	Messintervall Staub	Versuch	Gesamtabbrand O ₂ in Vol%	Gesamtabbrand CO ₂ in Vol%	Gesamtabbrand CO in mg/m ³	Gesamtabbrand VOC in mg/m ³	Gesamtabbrand CO in mg/m ³	Gesamtabbrand VOC in mg/m ³	Messintervall VOC in mg/m ³	Staub Rohgas in mg/m ³	Messintervall O ₂ in Vol% Rohgas	Staub Rohgas in mg/m ³	Messintervall CO in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Messintervall CO in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Messintervall OGC in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Staub Reingas in mg/m ³	Messintervall O ₂ Reingas in Vol%	Staub Reingas in mg/m ³	Abscheidegrad in % (bei 13 Vol% O ₂)	Minderung in mg/m ³ (bei 13 Vol% O ₂)	Planfilter Rohgas	Planfilter Reingas	Verdünnungsverhältnis	(O ₂ gerechnet)	Verdünnungsverhältnis	(CO ₂ gerechnet)	Verdünnungsverhältnis gemittelt	Hochspannung U in kV	Strom I in mA	Elektrische Leistung P _{el} in W	Anmerkungen					
1	Normalbetrieb	Typprüfung	01	13,8	6,8	2.157	68	2.410	76	1.338	48	24	12,6	23	1.272	46	11	18,0	29	-27	-6	01	02	2,9	3,1	3,0	23,3	0,2	5,3								
2	Normalbetrieb	Typprüfung	02	14,5	6,1	1.886	48	2.313	59	1.032	37	38	12,2	35	938	34	17	17,8	41	-18	-6	03	04	2,7	3,0	2,9	24,0	0,2	5,2								
3	Normalbetrieb	Typprüfung	03	13,2	7,5	1.175	34	1.207	35	634	26	21	12,5	20	596	24	16	17,7	40	-105	-21	05	06	2,6	2,8	2,7	24,0	0,2	5,2								
1	Normalbetrieb	DIN 33999	04								25	12,0	22			8	18,0	23	10	-1	07	08				24,0	0,3	8,2				keine Gaswerte					
2	Normalbetrieb	DIN 33999	05								28	12,0	25			12	18,0	32	-28	-7	09	10				24,0	0,3	7,7				keine Gaswerte					
3	Normalbetrieb	DIN 33999	06								36	12,0	32			28	18,0	74	-133	-42	11	12				24,0	0,1	1,6				keine Gaswerte					
1	Blindmessung	DIN 33999	07	14,4	6,4	2.020	152	2.459	185	1.495	103	17	11,7	15	1.291	89	15	18,1	42	-185	-27	13	14	3,2	3,5	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ESP aus				
2	Blindmessung	DIN 33999	08	13,8	7,2	1.159	99	1.291	111	1.559	144	20	12,1	18	1.405	130	13	18,2	36	-95	-18	15	16	3,2	3,6	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ESP aus				
0	Zwischenabbrand	DIN 33999	09	15,1	5,7	1.916	226	2.619	308	2.632	360	42	15,2	58	3.632	496	8	19,5	41	29	16	17	18	3,9	4,6	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ESP an;			
1	Normalbetrieb	DIN 33999	10	13,7	7,0	2.211	72	2.433	80	1.731	161	66	9,6	46	1.208	112	12	17,6	29	37	17	19	20	3,4	3,8	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ESP an;		
2	Normalbetrieb	DIN 33999	11	13,3	7,5	1.260	40	1.317	41	1.161	68	82	10,2	60	857	50	27	18,1	73	-21	-13	21	22	3,7	4,2	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Datenausfall	
3	Normalbetrieb	DIN 33999	12	13,8	7,0	2.725	120	3.042	134	4.089	292	127	8,2	79	2.543	181	22	17,5	52	35	27	23	24	3,7	4,2	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Datenausfall
4	Luftmangel	DIN 33999	13	10,9	9,8	8.051	400	6.361	316	27.301	1.418	451	11,5	380	23.026	1.196	38	19,0	154	60	226	25	26	4,8	5,8	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Datenausfall
1	Luftmangel	DIN 33999	14	13,3	7,7	2.284	88	2.370	92	2.085	183	162	9,2	110	1.416	124	20	18,2	59	46	51	27	28	4,2	4,8	4,5	24,0	0,2	5,0								
2	Luftmangel	DIN 33999	15	13,4	7,6	2.134	128	2.250	135	2.105	138	193	9,9	138	1.508	99	20	18,7	72	48	66	29	30	4,9	5,8	5,4	24,0	0,2	4,6								
3	Luftmangel	DIN 33999	16	8,0	13,4	6.958	388	4.257	238	13.077	744	323	6,2	175	7.065	402	6	18,6	21	88	154	31	32	6,2	7,6	6,9	24,0	0,1	3,4								
1	Volllast, VT	DIN 33999	17	15,0	5,8	2.494	179	3.332	239	1.844	149	51	13,0	51	1.854	150	5	19,0	21	58	30	35	36	4,1	5,2	4,6	24,0	0,2	3,9							ESP an	
2	Teillast	DIN 33999	18	14,8	6,1	1.447	88	1.866	113	1.352	84	66	13,2	68	1.384	86	8	19,6	45	33	22	34	37	5,8	8,3	7,1	24,0	0,2	4,2								
3	Teillast	DIN 33999	19	14,3	6,6	968	71	1.151	84	996	99	55	12,9	54	986	98	9	19,2	40	26	14	38	39	4,6	5,9	5,2	23,5	0,6	13,5								
4	Teillast	DIN 33999	20	14,2	6,7	1.822	95	2.140	112	1.559	151	83	12,5	78	1.463	142	12	19,4	62	20	15	40	41	5,4	7,2	6,3	24,0	0,2	5,6								
5	Volllast, VT	DIN 33999	21	14,8	6,1	1.915	114	2.466	147	1.956	187	56	11,7	48	1.672	160	23	18,7	78	-63	-30	42	43	4,0	5,2	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ESP aus

Tabelle 10.13: Wertetabelle zum Kastendiagramm (Boxplot) in Abbildung 7.5

	Datensatz 1 Normalbetrieb Rohgas	Datensatz 2 Normalbetrieb Reingas	Datensatz 3 Luftmangel Rohgas	Datensatz 4 Luftmangel Reingas	Datensatz 5 Teillast Rohgas	Datensatz 6 Teillast Reingas
Anzahl	8	8	5	5	3	3
Mittelwert	33	43	176	71	67	49
Standardabweichung	14	20	119	50	12	12
Minimum	20	23	79	21	54	40
Quartil 1: Q25	23	29	110	52	61	43
Quartil 2: Median	28	36	138	59	68	45
Quartil 3: Q75	38	49	175	72	73	54
Maximum	60	74	380	154	78	62



Abbildung 10.9: Ablagerungen an Staubprobenahmesonden bei der Untersuchung zum Einfluss der Betriebsweise am Kaminofen: Messungen hinter einem Elektroabscheider, Fotos veröffentlicht in Struschka et al (2016)