



Universität Stuttgart



IGTE

INSTITUT FÜR GEBÄUDEENERGETIK
THERMOTECHNIK UND ENERGIESPEICHERUNG



Abschlussbericht der Machbarkeitsstudie: Energieeffiziente Aerosolabscheidung mittels heterogener Kondensation (HetKond)

Förderkennzeichen: 35093/01

Abschlussbericht vom 31.01.2022

Lukas Siebler, M.Sc.

Fabian Schott, M.Sc

Dipl.-Ing. Stephan Bachmann

Marc Oliver Schmid, M.Sc.

Dr.-Ing. Ulrich Vogt

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	35093/01	Referat	Fördersumme: 125.000,-
Antragstitel		Machbarkeitsstudie zum geplanten Vorhaben „Energieeffiziente Aerosolabscheidung mittels heterogener Kondensation (HetKond)“	
Stichworte		Heterogene Kondensation, effiziente Aerosolpartikelabscheidung, Biomasseverbrennung, Wäscher, Nassabscheidung	
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18+5 Monate	25.11.2019	31.10.2021	1
Ein Zwischenbericht ist über den Zeitraum vom 25.11.2019 - 06.11.2020 erfolgt.			
Bewilligungsempfänger		Universität Stuttgart Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos konstantinos.stergiaropoulos@igte.uni-stuttgart.de	
		Tel 0711 685 62084	
		Fax 0711 685 52084	
		Projektleitung Lukas Siebler, M.Sc.	
		Bearbeiter Fabian Schott, M.Sc (IFK) Lukas Siebler (IGTE)	
Kooperationspartner		Universität Stuttgart Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik Dr.-Ing. Ulrich Vogt ulrich.vogt@ifk.uni-stuttgart.de	
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens			
<p>Sprühwäscher finden in der Industrie und im Energiesektor Anwendung zur Gaswäsche. Die Erfahrung zeigt, dass hierbei aufgrund von Trägheitseffekten Partikel größer 1 µm Durchmesser abgeschieden werden können, kleinere jedoch nicht. Ziel des geplanten Forschungsvorhabens ist es, auch submikrone Partikel in Sprühwäschern abzuscheiden – durch Herbeiführung heterogener Kondensation, durch gezielte Gas- und Waschwasserführung im Sprühwäscher und mit der Erweiterung um Trayeinbauten. Das Anliegen des Projektkonsortiums ist es technische Lösungen zur Aerosolabscheidung in Biomasseverfeuerungen (halmgutartige Brennstoffe) zu erforschen, die zeitnah in die praktische Umsetzung gelangen können – dieses Potential ist beim Sprühwäscher gegeben. Weiterhin soll dieses Forschungsvorhaben auch die wissenschaftlichen Grundlagen für neuartige Verfahren zur Aerosolabscheidung mittels heterogener Kondensation schaffen. Zu den Grundlagen zählen insbesondere die Aktivierbarkeit von Aerosolen aus Biomassefeuerungen.</p>			
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden			
<p>In einem ersten Arbeitsschritt wurde an einem völlig neuartigen Prüfstand untersucht, inwieweit sich Aerosolpartikel aus der Verbrennung halmgutartiger Biomasse (insbesondere Stroh) prinzipiell aktivieren lassen bzw. ob an deren Oberfläche heterogene Kondensation auftreten kann und welche Übersättigungen hierfür erforderlich sind. Die Ergebnisse sollten daraufhin in die Randbedingungen und Parameter für Sprühwäscher überführt werden, um somit eine optimierte Betriebsweise zu finden (große Übersättigungen bei geringem Energieaufwand).</p> <p>Im Rahmen einer Parameterstudie sollten die Abscheideraten im Sprühwäscher identifiziert und die Sensitivität der Parameter untersucht werden. Abschließend sollten Messungen an einem hierfür speziell entwickelten elektrostatischen Abscheider durchgeführt werden, welcher als Referenzgerät zum Sprühwäscher diente. Dies erlaubte vergleichende Betrachtungen der Verfahren (Investitions-, Betriebskosten und Umweltwirkung).</p>			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de			

Ergebnisse und Diskussion

An einem speziell entwickelten Prüfstand konnte die erforderlichen Dampfübersättigungen zur Aktivierung von Partikeln in Rauchgasen von Biomassefeuerungen ermittelt werden. Erstmals konnte gezeigt werden, dass sich die Partikel aller Bestandteile aktivieren lassen, was das erwartete große Potential der Aerosolabscheidung durch heterogene Kondensation für Biomassefeuerungen bestätigt. Vor allem der hohe Anteil salzhaltiger Partikel begünstigt diesen Prozess, da dieser geringere Übersättigungen erfordert. Mit einem optischen In-situ-Messsystem konnte ferner ein zeitlich aufgelöstes Tropfenwachstum analysiert werden. Diese Erkenntnisse können zwar nur bedingt auf die Betriebsweise eines Wäschers übertragen werden, doch kann anhand von Parameterstudien dennoch aufgezeigt werden, dass eine wirkungsvolle Abscheidung möglich ist. Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Staubabscheidung im Sprühwäscher werden durch diverse Untersuchungen analysiert. Hierzu gehören neben dem L/G-Verhältnis (Flüssig/Gas-Verhältnis) der Einsatz diverser Trays, Anpassungen der Düsengeometrien und eine Dampfnebelinjektion. Die Staubabscheideleistung konnte durch Optimierung dieser Parameter auf bis zu 67,2 % gesteigert werden, wodurch der konstruierte Sprühwäscher konkurrenzfähig zum elektrostatischen Referenzabscheider ist. Auch eine Analyse des zirkulierenden Waschwassers zeigte eine deutliche Akkumulation an wasserlöslichen anorganischen Rauchgasbestandteilen wie Kalium, Chloriden und Sulfaten. Aus den Messungen können wichtige Erkenntnisse gezogen werden, mit denen der Sprühwäscher in einer Folgestudie hinsichtlich der Abscheideleistung sowie des Energieaufwands weiter optimiert werden kann.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vortrag Lukas Siebler *Wärme- und Stoffübertragung bei der heterogenen Kondensation in Aerosolen*, Hermann-Rietschel-Colloquium, Hirschegg (Österreich), 10.03.2020

Publikation Fabian Schott: *Investigations to quantify and improve particle removal Efficiency on biomass combustion units by heterogeneous condensation*, International Conference on Air Quality – Science and Application, Thessaloniki (Griechenland), 27.06.2022-01.07.2022

Ferner ist eine Veröffentlichung in einem renommierten Fach-Journal geplant.

Fazit

Die Erkenntnis, dass die Partikel aller untersuchter Stoffe, welche im Rauchgas von Biomassefeuerungen enthalten sind, aktivierbar sind und eine Tropfenvergrößerung bei bereits geringen Übersättigungen möglich ist, bestätigt das Potential, welches das Verfahren zur Aerosolabscheidung besitzt. Auch die Versuchsergebnisse im Sprühwäscher selbst zeigen schon die Wirksamkeit des Prozesses auf. Hierbei konnten die bisherigen Erkenntnisse genutzt und die Betriebsparameter optimiert werden, um höhere Abscheidegrade zu erzielen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Staubabscheidegrade mit erhöhten L/G-Verhältnissen, dem Einsatz von Trays, sowie durch den Wechsel von Voll- auf Hohlkegeldüsen zunahm. Mit diesen Maßnahmen konnte der Abscheidegrad auf bis zu 67,2% gesteigert werden, was auch ungefähr der Performance eines speziell für diese Studie entwickelten elektrostatischen Abscheiders (ESP) entsprach.

Zusammenfassung

Das Ziel, für die Energieerzeugung der Zukunft den Anteil erneuerbarer Energien zu steigern, erfordert auch die Einbindung der Verbrennung von Biomasse. Die dabei im Rauchgas enthaltenen submikronen Partikel stellen allerdings Abscheider nach aktuellem Stand der Technik vor herausfordernde Aufgaben. In dieser Machbarkeitsstudie wird daher das tatsächliche Potential des vielversprechenden Ansatzes der heterogenen Kondensation zur Partikelabscheidung untersucht.

Hierfür wurde ein speziell konzipierter Prüfstand am IGTE aufgebaut. In einem geschlossenen System wurden gezielt nahezu adiabate Expansionen durchgeführt, die eine kontrollierte Dampfübersättigung zur Folge haben. Mit einem optischen Messsystem konnte dann identifiziert werden, ab welchen Werten Kondensationsprozesse an bestimmten Reinstoffpartikeln auftraten. Anhand einer Stoffanalyse der Asche einer Biomassefeuerung konnte dann überprüft werden, welche Folgen dies auf die Abscheidung der Partikel eines realen Rauchgases zur Folge hat. Besonders betont werden können hierbei die geringen erforderlichen Übersättigungen der salzhaltigen Partikel, die auch von der Fachliteratur so bestätigt werden. Aufgrund der hohen Anteile salzhaltiger Partikel im Rauchgas wird anhand der Messergebnisse das Potential der heterogenen Kondensation speziell bei der Biomassefeuerung unterstrichen. Das optische Messsystem erlaubt darüber hinaus die zeitlich aufgelöste Erfassung des Tropfenwachstums und ermöglicht darüber auch die Validierung eines eigenentwickelten Simulationsmodells der heterogenen Kondensation. Das detaillierte Verständnis dieses, in einem Bruchteil einer Sekunde abgeschlossenen Prozesses, kann künftig zielorientierte Optimierungsaufgaben im Wäscher eröffnen.

Für die Untersuchungen im Sprühwäscher wurde ein neuer Prüfstand konstruiert und aufgebaut. Der Wäscher wurde in diversen Messkampagnen modifiziert. Die Abscheideleistung konnte dabei von zunächst < 30 % durch diverse Modifikationen auf bis zu 67,2 % gesteigert werden. Am elektrostatischen Abscheider wurden in einem Spannungsbereich von 12,5 bis 14,0 kV eine Abscheideleistung von 37,3 bis max. 83,7 % gemessen, im Mittel beträgt die Abscheideleistung hierbei 67,1 %. Im Gegensatz zum Wäscher konnte am ESP nur ein verdünnter Rauchgasvolumenstrom gereinigt werden, da ansonsten aufgrund rascher Verschmutzung Fehlfunktionen wie Spannungsüberschläge auftraten, was wiederum zu Abscheideleistungen < 50 % führt. Die aufgewendete elektrische Arbeit normiert auf den gereinigten Rauchgasvolumen beträgt beim Wäscher für die zwei betrachteten Fälle 0,9 und 1,8 Wh/m³ und beim elektrostatischen Abscheider 1,3 Wh/m³. Somit ist der Sprühwäscher sowohl hinsichtlich der Abscheideleistung als auch hinsichtlich der Energieeffizienz konkurrenzfähig zum elektrostatischen Referenzabscheider.

Für eine avisierte nächste Phase sind diverse Verbesserungen und Optimierungen des Prüfstandes vorgesehen, mit denen sich die Abscheideleistung des Wäschers noch steigern lassen kann, wie z. B. die Optimierung der Parameter Wasserdampfinjektion, Trayeinbauten und die Änderung der Düsengeometrie. Des Weiteren wäre dann auch die Erstellung eines Simulationsmodells bezüglich der Übersättigungen im Wäscher empfehlenswert.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	II
Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Bildverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungen	VI
Formelzeichen	VII
1 Einleitung und Ziel	1
2 Theoretische Grundlagen und Messmethodik	3
2.1 Grundlagen der Biomasseverbrennung	3
2.2 Theorie zur Partikelabscheidung	4
2.2.1 Trockenabscheider (Masseträgheitsabscheidung)	4
2.2.2 Trockenabscheider (Filterierende Abscheidung)	5
2.2.3 Nassabscheider (Wäscher)	6
2.2.4 Elektrostatische Abscheider	7
2.3 Theorie der Heterogenen Kondensation.....	9
2.3.1 Wärme und Stoffübertragung bei Kondensation	9
2.3.2 Aktivierung der Partikel	13
2.3.3 Tropfenwachstum.....	16
3 Vorgehen	18
3.1 Heterogene Kondensation im geschlossenen System.....	18
3.1.1 Prüfstand - geschlossenes System	18
3.1.2 Messsystem	21
3.1.3 Herausforderungen mit der Messtechnik und Lösungsansätze	25
3.1.4 Resultierendes Vorgehen zur Analyse von erforderlichen Übersättigungen von Reinstoffen.....	29
3.1.5 Vorgehen bei Stoffgemischen	33
3.2 Heterogene Kondensation im Wäscher	34
3.2.1 Versuchsstand Wäscher	34
3.2.2 L/G-Einfluss	39
3.2.3 Untersuchungen zum Tray-Einfluss.....	40
3.2.4 Untersuchungen zur Düsengeometrie	42
3.2.5 Einfluss Wasserdampfzugabe	43
3.2.6 Waschwasseranalytik.....	43
3.3 Analyse der Staubabscheidung am Referenzabscheider	44
4 Ergebnisse	47
4.1 Tropfenwachstum.....	47

4.2	Kritische Übersättigungen bei verschiedenen Stoffen	48
4.2.1	Lösliche Stoffe	48
4.2.2	Unlösliche Stoffe	48
4.2.3	Stoffgemische	49
4.3	Staubabscheidung im Wäscher.....	50
4.3.1	Brennstoffanalytik.....	51
4.3.2	Rohgasemissionen.....	52
4.3.3	Ergebnisse der L/G-Versuche	53
4.3.4	Ergebnisse Tray	54
4.3.5	Ergebnisse zum Einfluss der Düsengeometrie	55
4.3.6	Ergebnisse zum Einfluss der Wasserdampfzugabe und des Einsatzes eines zweistufigen Trays	56
4.4	Staubabscheidung am Referenzabscheider	57
4.5	Waschwasseranalytik.....	60
4.6	Energieeffizienz	61
5	Fazit und Ausblick.....	65
6	Anhang	67
7	Literatur.....	69

Bildverzeichnis

Bild 2-1: Aufbau eines Zyklons [16]	5
Bild 2-2: Gewebefilter - Filtrierung und Abgasreinigung [5]	6
Bild 2-3: p, v, T Diagramm aller möglichen Phasenzustände [19]	9
Bild 2-4: Schema zum Ablauf von spontaner homogener und heterogener Kondensation [19, 25–28]	11
Bild 2-5: Kritische Sättigung von Wasserdampf über dem Radius der Aerosolpartikel nach der Kelvin-Gleichung für $T_{gas} = 293, 15 K$ mit den Stoffdaten für Wasser	13
Bild 2-6: Gleichgewichtskurven der entstehenden Tropfen auf unterschiedlichen NaCl-Partikeln (5 nm, 10 nm, 50 nm) entsprechend der Köhler-Theorie [35]	15
Bild 3-1: Schema des Prüfstands	18
Bild 3-2: Messkammer und Messtechnik	20
Bild 3-3: verschiedene Zustände in der Messkammer: unbeladen (links), partikelbeladen (mitte), und nach erfolgter Kondensation (rechts)	21
Bild 3-4: 3-WL-DQ Software – Grafische Benutzeroberfläche	24
Bild 3-5: Prüfstand zur Untersuchung im geschlossenen System	25
Bild 3-6: Der in der Messkammer eingebaute Drucksensor	26
Bild 3-7: Zeitlicher Druckverlauf in der Messkammer bei verschiedenen Unterdrücken hinter dem Kolben	27
Bild 3-8: Drift der Laserintensitäten – Messung 1	28
Bild 3-9: Zeitlicher Verlauf der relativen Laserintensität und des abs. Drucks einer Messung	30
Bild 3-10: Schema des Sprühwäscher-Prüfstands	34
Bild 3-11: Brennkammer der Feuerung (links); Betrieb der Brennkammer (rechts)	35
Bild 3-12: Verwendete Biobrennstoffe dieser Studie	35
Bild 3-13: Ausgebauter Demister	38
Bild 3-14: Exemplarische Berechnung des L/G-Verhältnisses	39
Bild 3-15: ausgebauter Tray (links); eingebauter Tray (rechts)	41
Bild 3-16: Exemplarischer Düsenkopf in einer Waschebene	42

Bild 3-17 a) Elektrostatischer Abscheider b) Abscheidepaket (Innenansicht).....	44
Bild 4-1: Gegenüberstellung einer exemplarische Messung des Tropfenwachstums von KCl mit dessen Simulation.....	47
Bild 4-2: Masseanteile einzelner Stoffbestandteile vor und nach der Zerstäubung der Holzasche.....	49
Bild 4-3: Wechselwirkung der Holzasche mit Wasser (vor und nach der Zerstäubung).....	50
Bild 4-4: Rogasmesswerte verschiedener Biobrennstoffe.....	53
Bild 4-5: Abscheidegrad in Abhängigkeit des L/G-Verhältnisses.....	54
Bild 4-6: Ergebnisse aus Messkampagne 2.....	55
Bild 4-7: Detailaufnahme eines zweistufigen Trays.....	56
Bild 4-8: Abscheidegrade des ESP in Abhängigkeit der anliegenden Spannung	58
Bild 4-9: Reingas-Partikelanzahlkonzentration bei ein- und ausgeschaltetem ESP	59
Bild 4-10: Waschwasserprobe	60
Bild 6-1: Exemplarischen Partikelgrößenverteilung einer zerstäubten KCl-Lösung	67
Bild 6-2: Graphischer Benutzeroberfläche des Sprühwäscherprüfstands	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: verwendete Messtechnik am Prüfstand.....	37
Tabelle 3-2: Versuchsplanung zu den L/G-Untersuchungen.....	40
Tabelle 3-3: Versuchsplanung zu den Tray-Untersuchungen	41
Tabelle 3-4: Versuchsplanung zu den Untersuchungen mit Axial-Hohlkegeldüsen.....	43
Tabelle 3-5: Versuchsplanung zu den ESP-Untersuchungen (Spannungsreihe)	45
Tabelle 3-6: Versuchsplanung zu den ESP-Untersuchungen (Partikelanzahlverteilung).....	46
Tabelle 4-1: Kritische Sättigungsgrade löslicher Stoffe	48
Tabelle 4-2: Kritische Sättigungsgrade nicht löslicher Stoffe.....	49
Tabelle 4-3: Stoffzusammensetzung aus der Laboranalyse.....	52
Tabelle 4-4: Ergebnisse aus Messkampagne 3	56
Tabelle 4-5: Ergebnisse aus Messkampagne 4	57

Tabelle 4-6: Stoffanteile im Waschwasser und im Trinkwasser (Referenz).....61

Tabelle 4-7: Leistung und elektrische Arbeit pro gefiltertem m³ Rauchgas je Betrachtungsfall
.....63

Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
Ca	Kalzium
Cl	Chlor
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
ESP	Elektrostatische Abscheider
FNR	Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe
GKS	Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt
HHS	Holzackschnitzel
H ₂ O	Wasser
HS	Holzpellets
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
ICP-OES	Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie
IFK	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik
K	Kalium
L/G	Liquid-to-gas
Mg	Magnesium
MVV	Abfallverbrennungsanlage Mannheim
Na	Natrium
NaCl	Natriumchlorid
O ₂	Sauerstoff

S	Schwefel
TS	Trockensubstanz
UFP	Ultrafeine Partikel (Aerosole): Partikel < 0,1 μm
3WEM	3-Wellenlängen-Extinktionsmessgerät

Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
c	Anzahlkonzentration	$\frac{1}{\text{m}^3}$
D_{diff}	Diffusionskoeffizient	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
d	Durchmesser	m
d_g	Geometrischer mittlerer Durchmesser der Partikel	nm
DQ	Dispersionskoeffizient	–
F_E	Elektrische Feldkraft	$\frac{\text{V}}{\text{m}}$
Δh_v	Spezifische Verdampfungsenthalpie	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
I	Intensität des Lichtstrahls nach Extinktion	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
I_0	Ausgangsintensität des Lichtstrahls von Extinktion	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
i	Van`-t-Hoff-Faktor	-
L	Messlänge	m
M	molare Masse	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
N	Partikeldichte	$\frac{1}{\text{m}^3}$
m	Masse	kg

VIII

m_k	Komplexer Brechungsindex	-
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
n	Anzahl	-
N_A	Avogadro-Konstante	$\frac{1}{mol}$
P	Leistung	W
p	Druck	Pa
$p(d)$	Partikelgrößenverteilung	-
Q	Elektrische Ladung	$A \cdot s$
\dot{Q}	Wärmestrom	W
Q_{ext}	Extinktionskoeffizient	nm
R	spezifische Gaskonstante	$\frac{J}{kg \cdot K}$
\tilde{R}	universelle Gaskonstante	$\frac{J}{mol \cdot K}$
r	Radius	m
S	Sättigung	-
s	Übersättigung	-
T	Temperatur	K
t	Zeit/Zeitpunkt	s
V	Volumen	m^3
\bar{V}	Partielles Volumen	$\frac{m^3}{mol}$
v	spezifisches Volumen	$\frac{m^3}{kg}$
x	Wasserdampfgehalt	$\frac{kg}{kg}$
σ	Standardabweichung	-

σ_{wat}	Oberflächenspannung	$\frac{N}{m}$
Λ	Mittlere freie Weglänge der Moleküle in Gasphase	m
λ	Wellenlänge des Lichtstrahls	nm
λ_{gas}	Wärmeleitfähigkeit der Gasphase	$\frac{W}{mK}$
η	Wirkungsgrad	—

Index	Beschreibung
AG	Aggregation
<i>air</i>	Trockene Luft
<i>crit</i>	kritisch
<i>drop</i>	Tropfen
<i>el</i>	elektrisch
<i>gas</i>	Gasphase
<i>h</i>	hydraulisch
<i>k</i>	Kupplung
<i>m</i>	mechanisch
<i>M</i>	Motor
<i>Part</i>	Partikel
<i>sat drop</i>	Sättigung über einen Tropfen
<i>sat</i>	Sättigung
<i>vap</i>	Wasserdampf
<i>W</i>	Flüssigkeit
<i>wat</i>	Wasser

1 Einleitung und Ziel

Luftreinhaltung ist eine der herausforderndsten Aufgaben des 21. Jahrhunderts. Neben der Reduzierung der gasförmigen Schadstoffe wie CO_2 , NO_x , CH_4 sollten auch die Emissionen von partikelförmigen Stoffen unbedingt weiter eingeschränkt werden. Vor allem submikrone Partikel gelten aufgrund ihrer lungengängigen Eigenschaften als besonders gesundheitsgefährdend. Ihre Entstehung sind bei vielen technischen Prozessen (z.B. Verbrennungsvorgängen) allerdings nicht zu vermeiden, ihre Freisetzung schon.

Es bedarf daher geeigneter Technologien, die solchen Prozessen nachgeschaltet werden und die Partikel effizient aus den Abgasströmen entfernen. Vor allem Verbrennungsprozesse der Biomasse, die aufgrund ihrer quasi CO_2 -neutralen Eigenschaft als besonders attraktiver nachhaltiger Energieträger eingestuft wird, setzt viele dieser gesundheitsgefährdenden Partikel frei. Dem von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) eingeschätzten Potential dieser Energiequelle [1] stehen jedoch hohe Emissionen der als besonders kritisch einzustufenden Feinstäube entgegen, die mit der gegenwärtigen Technik nur begrenzt und mit hohem energetischen Aufwand abgeschieden werden können [2]. Anlagenbetreiber von Biomassefeuerungen, wie Stadtwerke mit Nahwärmenetzen, Biomasseheizkraftwerke oder Industriebetriebe, die ihren Wärmebedarf bereits durch Biomasse decken, sollen eine Möglichkeit erhalten, Feinstaubemissionen zu senken und neue Biomassepotentiale zu erschließen, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden.

Bei einer exemplarischen Strohverfeuerung ist der „Fest-Dampf-Partikel-Pfad“ die dominante Prozesskette. Bei ihm treten hauptsächlich Salze mit Durchmessern von ca. $0,1 \mu\text{m}$ auf. Fliehkraftabscheider werden von der BAFA als nicht förderfähig für Biomasseanlagen zwischen 5 und 100 kW Nennwärmeleistung eingestuft [3]. Daher bleiben von den bekannten Technologien nur filternde und elektrostatische Abscheider für die trockene Abscheidung von Aerosolen aus Biomassefeuerungen übrig.

Bei den filternden Abscheidern werden im Standardfall Gewebefilter eingesetzt. Diese sind jedoch sehr empfindlich gegenüber Funkenflug und Glutpartikeln, weswegen im Zweifelsfall ein Zyklon vorgeschaltet werden muss, um den Gewebefilter zu schützen. Zwar erreichen Gewebefilter gute Abscheidegrade, jedoch ist der Druckverlust mit ca. $1.000 \dots 2.000 \text{ Pa}$ als relativ hoch einzustufen. Vorgeschaltete Zyklone erhöhen den Druckverlust sogar auf $2.000 \dots 4.000 \text{ Pa}$ [4, 5]. Dies bedeutet, dass ein Energieaufwand für den Lufttransport durch den Zyklon und den Gewebefilter von ca. $1,2 \text{ kWh}/(1000 \text{ m}^3)$ notwendig wird.

Gewebefilter müssen zudem periodisch durch Druckstöße gegen die Strömungsrichtung oder „Abrütteln“ gereinigt werden [2, 6]. Durch die periodisch auftretenden Druckspannungen erfährt das Filtermaterial eine erhöhte Belastung und damit eine Abnutzung [4]. Des Weiteren reagieren Gewebefilter empfindlich auf Verklebungen durch Kondensation von Wasserdampf oder Teeren. In diesem Fall kann keine Abreinigung erfolgen. Daher werden dem Rauchgas vermehrt Additive zugegeben, um ein solches Verkleben zu unterbinden. Hierbei fallen neben der aufwendigen Dosierung aufgrund der zusätzlich benötigten Betriebsmittel auch höhere Betriebskosten an. Neben der mit einem erheblichen energetischen Aufwand verbundenen Produktion der Additive erhöht sich die Menge an zu entsorgenden Reststoffen.

Elektrostatische Abscheider: Aerosole werden im Abgasstrom elektrostatisch aufgeladen und durch die Coulomb-Kraft im elektrischen Feld zu der geladenen Niederschlagselektrode beschleunigt und haftet dort an. Im Allgemeinen haben elektrostatische Abscheider im Vergleich zu Gewebefiltern einen erheblich geringeren Druckverlust von ca. 0,3 bis 4 hPa [5]. Der Energieaufwand zur Aufladung beträgt günstigen Literaturwerten zu Folge ca. 0,3 kWh/(1000 m³) [7–9]. Der Gesamtenergieaufwand, also der für Lufttransport und Aufladung, lässt sich daher bei elektrostatischen Abscheidern auf ca. 0,42 kWh/(1000 m³) schätzen. Je nach Anlagengröße variieren die erreichbaren Abscheidegrade, tendenziell sinken Sie mit zunehmender Anlagengröße [4, 5, 10]. Vor allem ultrafeine Aerosole (Partikel < 0,1 µm) lassen sich hierbei nicht vollständig erfassen. Speziell im Falle der Strohfeuerung kommt es zu einem hohen Staubwiderstand (elektrischer Widerstand der Staubschicht), was bei herkömmlichen Elektroabscheidern zu einer Wiedereintragung der Aerosole zurück in den Gasstrom führt [11, 12].

Es kann festgehalten werden, dass es gegenwärtig an Aerosolabscheidungsverfahren mangelt, die unter Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Aspekte zur Verwendung in kleinen und mittleren Biomassefeuerungen die mit Stroh betrieben werden, geeignet sind. Genau hier setzt diese Machbarkeitsstudie an.

Unter heterogener Kondensation wird der Phasenwechsel von der Dampf- zur Flüssigphase an fremden Oberflächen verstanden. Dieser Prozess findet auch an Oberflächen ultrafeiner Partikel statt, deren Massen dadurch bis zum Tausendfachen des ursprünglichen Wertes vergrößert werden können. Dieses Teilchenwachstum eröffnet Möglichkeiten einer effektiven und effizienten Abscheidung der Partikel aus dem Abgasstrom, da sich die ursprünglich sehr kleinen ultrafeinen Partikel nur sehr ungenügend mit den üblichen Verfahren abreinigen lassen. Ziel dieser Machbarkeitsstudie war es also, eine Aerosolabscheidung mittels heterogener Kondensation zu untersuchen und gezielt auf Partikel der Biomassefeuerung anzupassen. Zu den grundlegenden Untersuchungen hierbei zählen insbesondere die Aktivierbarkeit der Aerosole aus Biomassefeuerungen. Ferner soll der Transfer dieses Wissens in die Aerosolabscheidung durch heterogene Kondensation in Sprühwäschern übertragen werden, um so einen höheren Abscheidegrad zu erreichen. Als Referenz soll dabei ein Elektroabscheider dienen.

Der Energieaufwand im Wäscher setzt sich größtenteils zusammen aus der benötigten Ventilator- und Pumpenleistung zur Überwindung des gas- und wasserseitigen Druckverlusts. Das Waschwasser sollte in einem geschlossenen Prozess geführt und eine kontinuierliche Ausschleusung der Feststoffe im Waschwasserkreislauf realisiert werden. Anhand einer Parameterstudie wurden gezielt deren Sensitivitäten auf die Partikelabscheidung untersucht. Insbesondere das Verhältnis von Flüssigkeit zu Gas (L/G-Verhältnis) ist hierbei Forschungsgegenstand, in welchem großes Optimierungspotential steckt.

Ziel der Studie ist es aufzuzeigen, wie wirkungsvoll eine Aerosolabscheidung mit heterogener Kondensation im Wäscher gegenüber dem unzureichenden Stand der Technik ausfällt und welcher Energieaufwand dadurch eingespart werden kann.

2 Theoretische Grundlagen und Messmethodik

In diesem Kapitel werden relevante Grundlagen und die in diesem Vorhaben eingesetzten Messprinzipien erläutert.

2.1 Grundlagen der Biomasseverbrennung

Biomasse ist bei der Bereitstellung von erneuerbarer Endenergie mit einem Anteil von über 50 % der wichtigste erneuerbare Energieträger im deutschen Energiesektor [13]. Gerade im Wärmesektor ist Biomasse in Form von festen Brennstoffen unersetzlich. Neben den herkömmlichen Holzbrennstoffen, wie Holzsplit, -pellets sowie Hackschnitzel für automatisch beschickte Feuerungen, bestehen aber noch ungenutzte Potentiale sogenannter biogener Rest- und Abfallstoffe zur energetischen Nutzung.

Nach einer Studie der FNR (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe) liegt in Deutschland ein technisches Biomasse-Reststoffpotenzial von 98,4 Mio. t TS (Trockensubstanz) vor, wobei davon rund 30,9 Mio. t TS, also fast ein Drittel, nicht genutzt werden [1]. Dabei lässt sich der Begriff Biomasse in diverse Unterkategorien einteilen. Einen großen Beitrag zu diesem ungenutzten Biomasse-Reststoffpotenzial liefern dabei die Biomassen Waldrestholz, Getreidestroh und Landschaftspflegeholz mit ca. 21,5 Mio. t TS (ca. 70 %), wobei der Rest auf tierische Exkremente entfällt. (Zeitbezug nicht einheitlich).

Neben Produkten der vollständigen Verbrennung kommt es des Weiteren jedoch in Abhängigkeit der Verbrennungsqualität zur Freisetzung gasförmiger und partikelförmiger Luftschadstoffe, welche den Einsatz von biogenen Festbrennstoffen fraglich erscheinen lässt. Die Partikelemissionen aus der Biomasseverbrennung sind dabei sogar höher als die Partikelemissionen aus Ölkesseln [14], was den Vorteil gegenüber fossilen Energieerzeugern schmälert. Insbesondere die Emissionen an feinen und ultrafeinen Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern von $< 0,1 \mu\text{m}$ stehen heutzutage im Fokus der Kritik. Wie bekannt, hängen die Feinstaubemissionen aus der Biomasseverbrennung von der Brennstoffcharakteristik bzw. der chemischen Zusammensetzung ab [3, 4]. Gerade die Emissionen an submikronen Partikeln (PM₁) sind dabei deutlich höher bei der Verbrennung halmgutartiger Biomasse im Vergleich zu holzartigen Brennstoffen.

Die Verbrennung von Biomasse lässt sich in verschiedene physikalische und chemische Teilschritte untergliedern, wobei die Edukte Brennstoff und Sauerstoff (O₂) in die Endprodukte Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) überführt werden, bei gleichzeitiger Wärmeerzeugung. Die Teilschritte der Verbrennung lassen sich im Wesentlichen über folgende Prozesse beschreiben [15]:

- Erwärmung des Brennstoffs
- Ab ca. 100 °C: Trocknung des Brennstoffes, Verdampfung von H₂O
- Pyrolyse
- Vergasung der Biomasse mit Sauerstoff zu Brenngasen
- Vergasung des festen Kohlenstoffes zu Kohlenstoffmonoxid unter Wärmefreisetzung
- Oxidation der brennbaren Gase zu CO₂ und H₂O, sowie Wärmefreisetzung

Die Gesamtheit der bei der Verbrennung von Biomasse im Abgas existierenden Verbrennungsprodukte, kann unterteilt werden in Stoffe aus unvollständiger und aus vollständiger Verbrennung, sowie in Verbindungen, welche sich aus Spurenelementen bzw. Brennstoffverunreinigungen der Biomasse bilden. Dies sind somit:

- Produkte der vollständigen Verbrennung: CO_2 und H_2O
- Produkte aus der unvollständigen Verbrennung (CO , Kohlenwasserstoffe wie C_nH_m , Teere, Ruß) und unverbrannte Kohlenstoffpartikel
- Stoffe aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen

Bei einer vollständigen Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen handelt es sich bei der Partikelfracht im Abgas im Wesentlichen um Partikel, welche sich aus den Spurenelementen bzw. Verunreinigungen im Brennstoff bilden. Dies sind anorganische Salze, die vor allem aus den aerosolbildenden Elementen Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Schwefel (S), sowie einiger Spurenelemente wie Chlor (Cl) und Natrium (Na) gebildet werden. Diese anorganischen Komponenten werden nach der Verdampfung im Glutbett bei anschließender Abkühlung über Nukleation, Koagulation sowie Kondensation gebildet und machen den feineren Anteil der Partikelfracht aus. Des Weiteren kommt es bei der Verbrennung auch zum Austritt von größeren Aschepartikeln aus dem Glutbett. Einen entscheidenden Anteil der Partikelfracht aus Biomassefeuerungen machen dabei, wie bekannt, die Kaliumsalze KCl und K_2SO_4 aus [14].

2.2 Theorie zur Partikelabscheidung

Zur Abscheidung partikelförmiger Emissionen aus Abgasen und Abluftprozessen kommen prinzipiell verschiedene Abscheidungsmechanismen infrage. Wesentliche Prinzipien solcher Abscheider sind die Schwerkraft- und Fliehkraftabscheidung (u. a. Zyklone), Filtration, Abscheidung durch elektrische Feldkräfte und die Nassentstaubung, wo Grenzflächenkräfte wirken [5]. Diese Prinzipien werden im Folgenden vorgestellt.

2.2.1 Trockenabscheider (Masseträgheitsabscheidung)

Zu den Trockenabscheidern, die nach dem Prinzip der Masseträgheitsabscheidung funktionieren, gehören die Zyklone. Sie besitzen einen im oberen Teil zylindrisch und im unteren Teil konisch verjüngten Abscheideraum. Das zu reinigende Abgas wird tangential in das Gehäuse geführt und erfährt durch die Ablenkung im zylindrischen Gehäuse eine Rotationsbewegung. Durch die Zentrifugalkräfte erfahren die Partikel eine Bewegung in Wandrichtung, wobei durch die Reibkräfte die Staub- bzw. Aschepartikel an der Wand an Geschwindigkeit verlieren und nach unten in einen Sammelbehälter fallen. Das gereinigte Abgas erfährt anschließend eine Drehsenkenströmung, wodurch es über das Tauchrohr nach oben aus dem Zyklon geführt wird. Aufgrund der raschen Richtungsänderung und der Schwerkraft der Partikel können weitere feste Bestandteile aus dem Abgas entfernt werden, da diese die Richtung nicht so schnell wechseln können und an die Innenwände strömen, wo sie dann abgeschieden werden. Das Abscheideprinzip des Zyklons basiert demnach auf Nutzung der Schwer- und Zentrifugalkraft. Ein prinzipieller Aufbau ist in Bild 2-1 dargestellt. Es können damit Abscheidegrade von 30 % bis 65 % erreicht werden, wobei üblicherweise Partikel mit einem Durchmesser über $3 \mu\text{m}$ entfernt werden. Für die Abscheidung von Partikel mit einer Größe unter $1 \mu\text{m}$ sind Zyklone nicht geeignet. Der Zyklon eignet sich daher als kostengünstiges Verfahren zur Abscheidung von groben Stäuben, muss aufgrund der einzuhaltenden Grenzwerte allerdings immer von einem weiteren, nachgeschalteten Verfahren unterstützt werden. Durch die Parallelschaltung von mehreren Zyklonen kann die Abscheideleistung verbessert werden. [5]

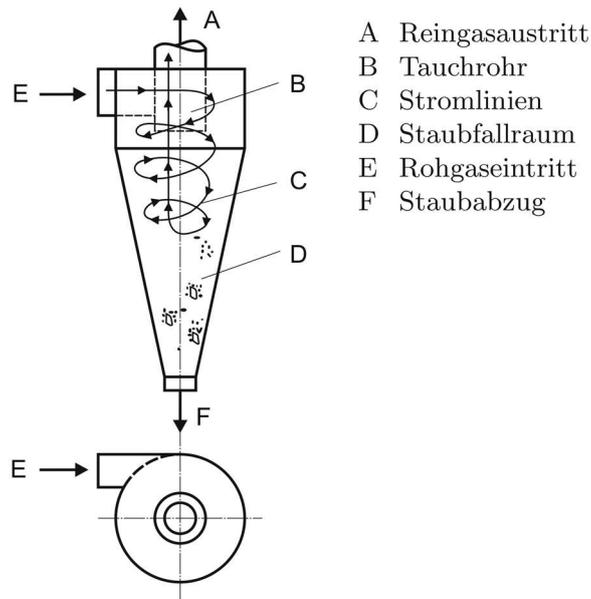


Bild 2-1: Aufbau eines Zyklons [16]

2.2.2 Trockenabscheider (Filtrierende Abscheidung)

Hauptkomponente bei filtrierenden Abscheidern ist eine poröse Schicht, welche für Staubpartikel nicht durchdringbar ist. Das Abgas durchströmt das Filtermedium, welches aus Glasgewebe, Metall oder Keramik besteht und die enthaltenen Staubpartikel werden an der Oberfläche zurückgehalten. Dies ist zu Beginn durch die Größe der Filterporen bedingt, durch welche die Partikel nicht hindurch können und später durch den sich bildenden Filterkuchen. Dieser bezeichnet den sich an der Oberfläche bildenden Rückstand der Partikel, wodurch auch Teilchen, die kleiner als die Filterporen sind, abgeschieden werden. [5] Der Filterkuchen ist daher maßgeblich für die Abscheideleistung verantwortlich. Mit der Zeit nimmt der Filterkuchen allerdings an Größe zu, wodurch auch der Druckabfall über den Gewebefilter ansteigt. Daher wird das Filtermedium in regelmäßigen Abständen entweder durch Druckluft, periodisches Rückspülen mit gesäubertem Abgas oder durch Rütteln bzw. Abklopfen vom Filterkuchen befreit. Mehrere Filterkerzen (Metall, Keramik) bzw. Filterschläuche (Glasgewebe) werden in der Regel parallel von außen nach innen mit dem zu reinigenden Abgas durchströmt und leiten den von Partikeln befreiten Abgasstrom am oberen Ende wieder aus dem Filtergehäuse hinaus (s. Bild 2-2). Entscheidend für die filtrierenden Abscheider sind die Haftkräfte (Van-der-Waals-Kräfte), welche zum einen für die Haftung der Partikel am eigentlichen Filtermedium verantwortlich sind, zum anderen aber auch für die Abscheidung der kleinsten Partikel (Durchmesser kleiner als die Filterporen) im anwachsenden Filterkuchen. Die filternden Staubabscheider stellen mit Reinigungsgraden von 99 % bis 99,9 % das effektivste Verfahren dar, wobei diese Effektivität auch bei kleinsten Stäuben von 0,1 μm bis 1 μm noch ausreichend gegeben ist.

Eingeschränkt wird die Anwendung dieses Mechanismus allerdings durch Teere, die trotz Primärmaßnahmen möglicherweise noch geringfügig vorhanden sind, und durch den Feuchtegehalt von Asche im Abgas. Teere und nasse, klebende Asche können das Filtermedium verstopfen und erschweren das Entfernen des Filterkuchens. Dadurch ergibt sich ein Druckabfall von 10 bis 20 hPa. Aus diesen Gründen werden filtrierende Abscheider bei Biomassefeuerungen nur noch selten zur reinen Staubabscheidung eingesetzt. Häufiger findet hingegen eine Benutzung Anwendung, bei der durch Zugabe von Additiven auch gasförmige

Schadstoffe am Filtermedium entfernt und die Verklebung des Filterkuchens verhindert werden kann. [5]

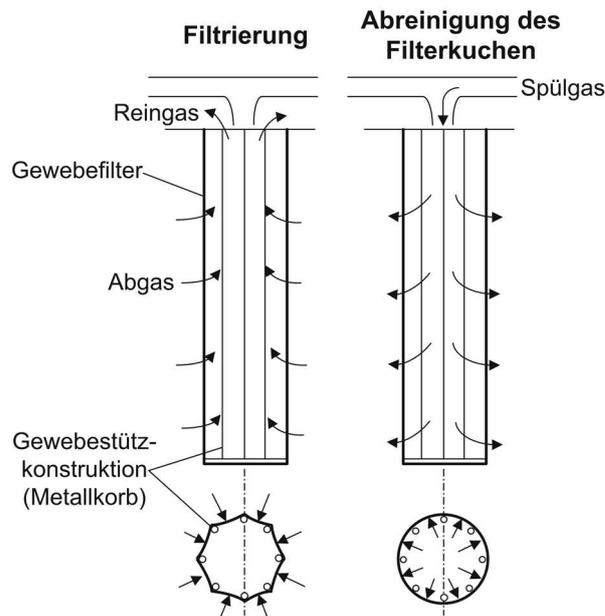


Bild 2-2: Gewebefilter - Filtrierung und Abgasreinigung [5]

2.2.3 Nassabscheider (Wäscher)

Wäscher sind eine bekannte Abgasreinigungstechnik, welche eine simultane Minderung der Belastung an gasförmigen und partikelförmigen Emissionen ermöglicht [5, 12]. Mit Hilfe von Wäschern werden die Staubpartikel im Abgas durch die Benetzung mit Tropfen einer Waschflüssigkeit vergrößert. In einem anschließenden Schwerkraft- oder Fliehkraftabscheider können die benetzten und agglomerierten (angehäuften bzw. vergrößerten) Staubpartikel sowie auch gasförmige Schadstoffe, die in den Flüssigkeitstropfen gelöst wurden, vom Abgasstrom abgeschieden werden. Die Agglomeration der Staubpartikel entsteht durch die Haftkräfte zwischen den Flüssigkeitstropfen und den Aschepartikeln. Als wesentliche Bauarten solcher Nassabscheider sind dabei die Kolonnen-, Venturi- und Radialstromwäscher zu nennen [5]. Aufgrund der schlechten Abscheidung von Feinstaubpartikeln die kleiner als $1\ \mu\text{m}$ sind und des hohen Druckabfalls (zwischen 20 und 80 hPa) wird dieses Verfahren bei Biomassefeuerungen kaum eingesetzt. Grund dafür ist die schlechte Benetzbarkeit der Partikel aus Rauchgasen der Holzverbrennung.

Eine Bauart mit geringen Druckverlusten und somit niedrigem Energieverbrauch ist dabei der sogenannte Waschturm, bei dem die Waschflüssigkeit und das zu reinigende Gas im Gegenstrom zugegeben werden. Diese Waschtürme haben eine hohe Effizienz für die Abscheidung gröberer Partikel $> 5\ \mu\text{m}$, weisen jedoch nur eine begrenzte Abscheideleistung für Partikel im submikronen Bereich auf [5]. Zur Steigerung der Abscheideleistung, insbesondere der feinen Partikel im submikronen Bereich, kann dagegen auf das Prinzip der heterogenen Kondensation zurückgegriffen werden.

Dabei lässt sich der Temperaturgradient zwischen heißem Rauchgas und kälterer Waschflüssigkeit nutzen. Bei Kontakt dieser Medien im Gegenstrom kommt es zu einem gleichzeitigen Wärme- und Massen/Stofftransfer, was zu einer sofortigen Abnahme der Rauchgastemperatur und zu einem (teilweisen) Verdampfen der Waschflüssigkeit führen kann [2]. Dies kann bei geeigneter Betriebsparameterwahl zu einer übersättigten Dampfphase

führen, was bei Überschreiten einer kritischen Übersättigung zu einer Partikelaktivierung und einem Partikelwachstum führen kann. Durch dieses Partikelwachstum ist es möglich, feinere Partikel, welche in einem konventionellen Wäscher nicht abgeschieden werden könnten, mithilfe des Waschwassers (aufgrund der Trägheit der Partikel bzw. durch Kontakt mit dem Waschwasser) oder mithilfe eines Demisters abzuscheiden.

Wie bekannt, lässt sich die Abscheideleistung von Wäschern durch Hinzugabe von Wasserdampf in das heiße Rauchgas signifikant erhöhen (7-10). Durch die Hinzugabe von Wasserdampf lässt sich die Sättigung der Gasphase vor dem Eintritt in den Wäscher einfach und deutlich anheben, was im nächsten Schritt das Erreichen einer Übersättigung durch das prompte Abkühlen im Wäscher vereinfacht.

2.2.4 Elektrostatische Abscheider

Elektrostatische Abscheider (ESP) sind eine der meistangewendeten Techniken zur Abluft- und Rauchgasreinigung in der Industrie, Müllverbrennung und im Kraftwerksbereich [9]. Diese Abscheidetechnologie bietet hohe Abscheidegrade bei gleichzeitig niedrigem energetischen Aufwand. Die Abtrennung der Partikel aus der Abluft oder dem Abgas erfolgt bei elektrostatischen Abscheidern durch Aufladung der Partikel mithilfe eines elektrischen Gleichspannungs-Feldes und der anschließenden Abscheidung dieser geladenen Partikel auf einer leitenden (entgegengesetzt geladenen) Niederschlagsfläche [10]. Partikel mit der elektrischen Ladung Q driften unter der Einwirkung der elektrischen Feldkraft F_E zur Abscheideelektrode und verbleiben dort.

$$F_E = Q \cdot E \quad (2-1)$$

F_E Coulombkraft in N (Newton)

Q Ladung in C (Coulomb)

E Feldstärke in V/m

Elektrostatische Abscheider enthalten grundsätzlich eine Sprüh- und eine Abscheideelektrode. An der Sprühelektrode erfolgt die Freisetzung der Ladungsträger (Gas-Ionen und Elektronen) durch die sogenannte Corona-Entladung, welche die abzuscheidenden Partikel aufladen. Die Aufladung erfolgt dabei durch direkten Kontakt der Elektronen mit den Partikeln und über den Kontakt ionisierter Gasmoleküle mit den Partikeln, welche dann die Partikel aufladen. Die Aufladung geschieht also durch Anlagerung von negativer Ladung an die Partikel und geschieht entweder über Feldaufladung oder über Diffusionsaufladung. Bei größeren Partikeln von $> 1 \mu\text{m}$ ist die Feldaufladung die vorherrschende Aufladung (gerichtete Bewegung der Gasmoleküle) während bei Partikeln $< 0,2 \mu\text{m}$ die Diffusionsaufladung eine wesentliche Rolle spielt. Für Korngrößen um ca. $0,2 - 1 \mu\text{m}$ sind beide Aufladevorgänge von Relevanz, wobei es in diesem Bereich ein Fraktionsabscheidegradminimum bei ca. $0,5 \mu\text{m}$ gibt, da die beiden Mechanismen für diese Partikelgröße nicht optimal ablaufen [11].

Elektrostatische Abscheider können an Kleinfeuerungsanlagen hohe Abscheidegrade bis deutlich über 90 % erbringen, jedoch fallen diese in der Praxis, je nach Betriebsbedingungen und -zustand des ESP, häufig auch geringer aus. In Studien von Oehler et al. [17] sowie von Lohberger et al. [18] schwankten die Abscheidegrade zwischen 63 und 88 % bzw. zwischen 50 und 90 % stark. Ursachen für eine niedrigere Abscheideleistung können Fehlfunktionen wie z. B. Spannungsüberschläge aufgrund von Verschmutzung oder das sogenannte re-entrainment von abgeschiedenen Partikeln auf die Reingasseite des Abscheiders sein.

2.3 Theorie der Heterogenen Kondensation

2.3.1 Wärme und Stoffübertragung bei Kondensation

Bei Verdampfungs- oder Kondensationsprozessen geht ein Stoff im Normalfall nicht schlagartig von einer Phase in die andere über. Stattdessen führt der Prozesspfad der Zustandsänderung zunächst in ein sogenanntes metastabiles Gebiet zwischen den beiden Phasen flüssig und gasförmig, was in Bild 2-3 dargestellt ist. Das jeweilige Gebiet wird, je nach Startpunkt in der flüssigen oder gasförmigen Phase, von einer der beiden sogenannten Spinodallinien und der Tau- bzw. Siedelinie begrenzt. Das für die Kondensation relevante metastabile Gebiet liegt zwischen der Taulinie und der rechten Spinodallinie und heißt übersättigter bzw. unterkühlter Dampf [19]. Metastabil bedeutet hier, dass das System den Zustand eine gewisse Zeit aufrechterhalten kann, bevor es zu einem Phasenwechsel kommt [20, 21]. In welchem Phasengebiet sich ein Stoff befindet hängt primär von den drei Zustandsgrößen Temperatur T , Druck p und spezifischem (d. h. massebezogenem) Volumen v ab, wobei nach der Gibbs'schen Phasenregel für ein Reinstoffsystem im Zwei-Phasen-Gebiet flüssig-dampfförmig nur eine der beiden Zustandsgrößen Temperatur T und Druck p frei wählbar ist [22].

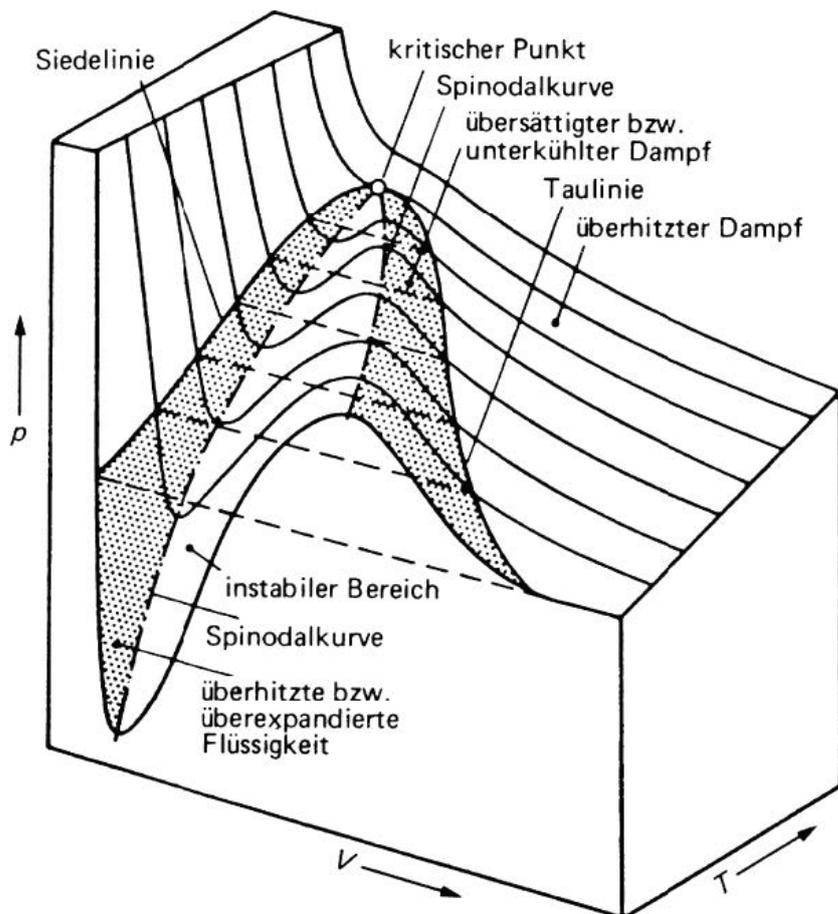


Bild 2-3: p, v, T Diagramm aller möglichen Phasenzustände [19]

Im Gegensatz zur homogenen Kondensation findet die heterogene Kondensation auf vorhandenen Fremdoberflächen statt, also z. B. auf Aerosolpartikeln [23].

Sowohl für die homogene als auch für die heterogene Kondensation spielt die Sättigung der Gasphase eine entscheidende Rolle. Die Sättigung S ist dabei folgendermaßen definiert:

$$S = \frac{p_{\text{vap}}}{p_{\text{sat}}} \quad (2-2)$$

S Sättigung

p_{vap} Wasserdampfpartialdruck in Pa

p_{sat} Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfs in Pa

Bei einer Sättigung von $S = 1$ befinden sich die Gasphase und eine ebene Oberfläche der flüssigen Phase in einem dynamischen Gleichgewicht, d. h. es kondensieren genauso viele Wassermoleküle an der Oberfläche der Flüssigphase wie von ihr verdampfen, die makroskopischen Zustandsgrößen ändern sich nicht. Bei einem Sättigungsgrad $S > 1$ wird von einer übersättigten Gasphase gesprochen. Das betrachtete System ist dann dazu geneigt, die Sättigung auf einen Wert nahe $S = 1$ abzubauen [24]. Der Begriff Übersättigung s bezeichnet den Wert, um den die Sättigung den Wert $S = 1$ übersteigt, d. h. eine Übersättigung von $s = 0,2$ entspricht einer Sättigung von $S = 1,2$. Diese Konvention wird jedoch in der Literatur nicht konsistent verwendet, sodass teilweise der Kontext betrachtet werden muss, in dem die Begriffe Sättigung und Übersättigung (im englischen Sprachgebrauch saturation und supersaturation) verwendet werden.

Eine weitere wichtige Größe ist der Wasserdampfgehalt der Luft. Dieser ist definiert als Quotient aus der Masse des Wasserdampfs und der Masse der trockenen Luft.

$$x = \frac{m_{\text{vap}}}{m_{\text{air}}} \quad (2-3)$$

x Wasserdampfgehalt in kg/kg

m_{vap} Masse des Wasserdampfs in kg

m_{air} Masse der trockenen Luft in kg

Zur Beschreibung des Verlaufs von homogener und heterogener Kondensation kann grob das in Bild 2-4 aufgezeigte und mit kleinen Abweichungen von mehreren Forschenden übereinstimmend verwendete Schema genutzt werden.

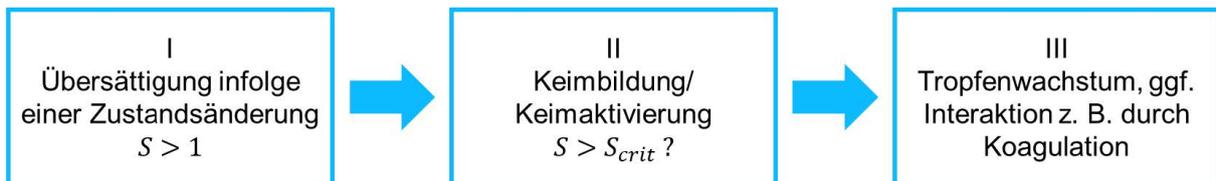


Bild 2-4: Schema zum Ablauf von spontaner homogener und heterogener Kondensation [19, 25–28]

Grundvoraussetzung dafür, dass Kondensation stattfinden kann, ist im Normalfall eine Sättigung der Gasphase von $S > 1$. Diese kann durch eine physikalische Zustandsänderung oder chemische Reaktionen in der Gasphase hervorgerufen werden. Im zweiten Schritt kommt es zur Keimbildung bzw. Keimaktivierung. Hier liegt der große Unterschied zwischen homogener und heterogener Kondensation. Während bei der homogenen Kondensation die Kondensationskeime durch zufällige Zusammenlagerung von Wassermolekülen zu sogenannten Clustern gebildet werden, findet die Kondensation bei der heterogenen Keimbildung bzw. Keimaktivierung auf bereits vorhandenen Fremdoberflächen wie z. B. auf Aerosolpartikeln statt [29]. Die Kondensationskeime sind in diesem Fall also schon vorhanden und werden nur aktiviert. Die Kondensation setzt jedoch nicht direkt ein, sobald die Sättigung $S = 1$ erreicht ist. Die Sättigung der Gasphase muss vielmehr einen kritischen Wert S_{crit} überschreiten [28, 30]. Bei der heterogenen Kondensation werden die Aerosolpartikel (sofern keine anderen Effekte auftreten) erst dann als Kondensationskeime aktiviert, wenn die kritische Größe, die ein Cluster aus reinen Wassermolekülen erreichen müsste, kleiner ist als die Aerosolpartikel [19]. Während bei der homogenen Kondensation teilweise Sättigungsgrade von $S_{crit} > 2 \dots 5$ nötig sind, um den Kondensationsprozess zu starten [19, 27, 30, 31], genügen bei der heterogenen Kondensation hingegen schon Sättigungsgrade knapp über $S = 1$, um die Kondensation auszulösen, sofern eine genügend große Anzahl an Fremdpartikeln zur Verfügung steht [19, 30].

Sofern eine genügend hohe Konzentration an Aerosolpartikeln in der Gasphase vorhanden ist, die als Kondensationskeime dienen, kann die homogene Kondensation bei der Modellierung eines Systems außer Acht gelassen werden. Der Grund dafür ist die deutlich höhere kritische Sättigung, die für das Einsetzen der homogenen Kondensation überschritten werden muss. Diese wird aufgrund der bei viel niedrigeren Sättigungsgraden einsetzenden heterogenen Kondensation in der Praxis nie erreicht, da die einsetzende heterogene Kondensation die Sättigung abbaut. Kritische Sättigungsgrade, also solche, bei denen sich exakt ein Phasengleichgewicht zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand einstellt, bzw. die überschritten werden müssen, um die heterogene Kondensation zu starten, werden mit dem Index „*crit*“ versehen.

Die kritische Übersättigung, die zur Keimaktivierung bei der heterogenen Kondensation nötig ist, hängt im Wesentlichen von vier Eigenschaften der Partikel ab, auf deren Oberfläche das Wasser bzw. allgemein die Flüssigkeit kondensiert. Diese sind:

- Größe der Partikel
- Löslichkeit der Partikel
- Benetzbarkeit der Partikel
- elektrische Ladung der Partikel

Die Größe der Partikel hat dahingehend einen Einfluss auf die kritische Übersättigung, als dass der Sättigungsdampfdruck über einem Tropfen aufgrund der Oberflächenspannung der Flüssigkeit höher ist als der Sättigungsdampfdruck über einer ebenen Fläche der Flüssigkeit. Das bedeutet, dass ein höherer Wasserdampfpartialdruck in der Gasphase vorliegen muss, damit der Wasserdampf und das auf den Partikeln kondensierte flüssige Wasser in einem Gleichgewichtszustand vorliegen. Dabei gilt allgemein, dass der Sättigungsdampfdruck mit sinkendem Radius des Tropfens zunimmt. Dieser Zusammenhang wurde zuerst von Sir William Thomson, später bekannt als Lord Kelvin, erkannt [32]. Die zugehörige allgemeine Kelvin-Gleichung findet sich u. a. in [19, 23, 30, 33, 34] und lautet für Wasser:

$$p_{\text{sat drop}} = p_{\text{sat } \infty} \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \sigma_{\text{wat}} \cdot M_{\text{wat}} \cdot v_{\text{wat}}}{\bar{R} \cdot T \cdot r_{\text{drop}}}\right) \quad (2-4)$$

bzw. nach Umstellen in eine ähnliche Form wie (2-2)

$$S_{\text{crit}} = \frac{p_{\text{sat drop}}}{p_{\text{sat } \infty}} = \exp\left(\frac{2 \cdot \sigma_{\text{wat}} \cdot M_{\text{wat}} \cdot v_{\text{wat}}}{\bar{R} \cdot T \cdot r_{\text{drop}}}\right) \quad (2-5)$$

$p_{\text{sat drop}}$	Sättigungsdampfdruck über einem Tropfen in Pa
$p_{\text{sat } \infty}$	Sättigungsdampfdruck ¹ über einer unendlich ausgedehnten Fläche mit der gleichen Temperatur wie der Tropfen in Pa
σ_{wat}	Oberflächenspannung des Wassers in N/m
M_{wat}	molare Masse des Wassers in kg/mol
v_{wat}	spezifisches Volumen des Wassers in m ³ /kg
\bar{R}	universelle Gaskonstante in J/(mol K)
T	Temperatur ² in K
r_{drop}	Radius eines Tropfens bzw. der Tropfen in m
S_{crit}	kritische Sättigung

Für eine ausführliche Herleitung der Formel sei auf Heidenreich verwiesen [23]. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Applikation dieser Formel gewisse Grenzen hat. Für einen Tropfenradius $r_{\text{drop}} \rightarrow 0$ sagt die Kelvin-Gleichung eine Entwicklung des Sättigungsdampfdrucks gegen unendlich voraus. Tatsächlich zeigen molekulardynamische Berechnungen, dass bei sehr kleinen Tropfen in der Größenordnung von wenigen Tausend Wassermolekülen die Kelvin-Gleichung ihre Gültigkeit verliert. In die andere Richtung erscheint eine

¹ Sofern nicht explizit von $p_{\text{sat drop}}$ die Rede ist, bezieht sich p_{sat} immer auf den Sättigungsdampfdruck über einer unendlich ausgedehnten Fläche.

² Für T kann in den meisten Fällen in guter Näherung die Temperatur der Gasphase eingesetzt werden. Weichen Gas- und Tropfentemperatur zu stark voneinander ab, muss die Tropfentemperatur eingesetzt werden, s. dazu auch [34] Gyarmathy, 1963, S. 282.

Grenzwertbetrachtung durchaus sinnvoll. Für einen Tropfenradius $r_{drop} \rightarrow \infty$ nähert sich die kritische Sättigung immer weiter dem Wert $S_{crit} = 1$ an, vgl. dazu auch Bild 2-5.

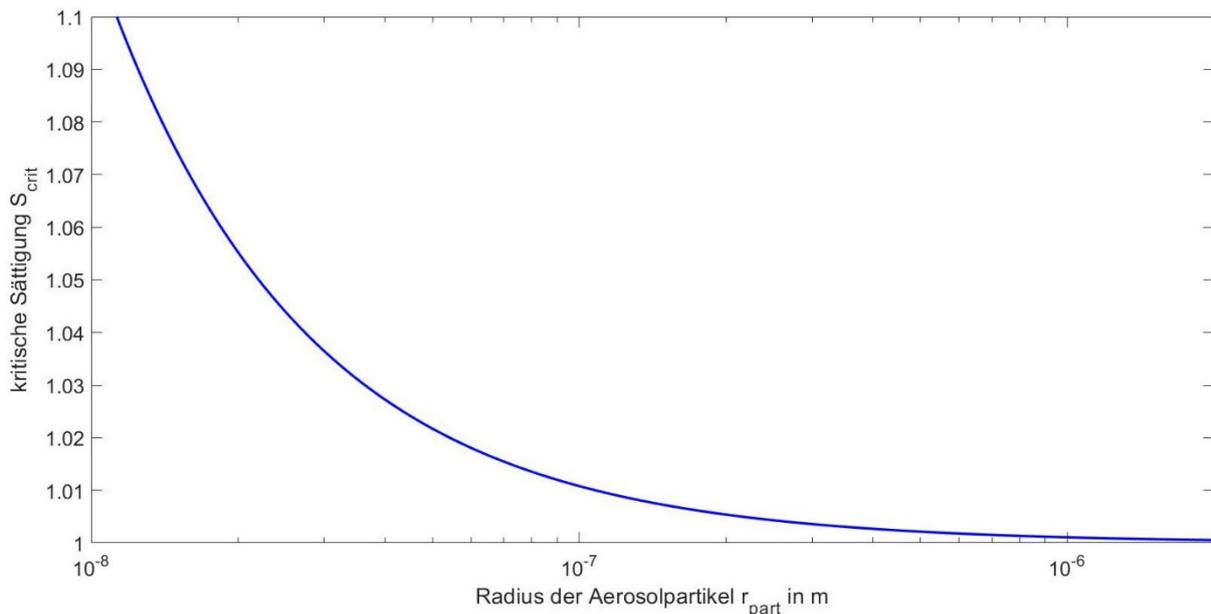


Bild 2-5: Kritische Sättigung von Wasserdampf über dem Radius der Aerosolpartikel nach der Kelvin-Gleichung für $T_{gas} = 293,15 \text{ K}$ mit den Stoffdaten für Wasser

2.3.2 Aktivierung der Partikel

Die für das Tropfenwachstum erforderliche kritische Übersättigung ist abhängig von den physikalischen und chemischen Wechselwirkungen zwischen der Oberfläche der Partikel und dem Wasserdampf sowie der Geometrie und Struktur der Partikel. Nach der Übersättigung findet die Keimbildung auf den Fremdoberflächen, den Aerosolpartikeln, statt. Für die Analyse und Beschreibung ist eine Unterscheidung nach Art der Partikel notwendig: lösliche, unlösliche Partikel und reine Flüssigkeitstropfen.

Unlösliche Partikel und reine Flüssigkeitstropfen

Bei unlöslichen Partikeln ist die Benetzbarkeit der Oberfläche entscheidend. Diese ist ein Indiz für das Verhalten von Flüssigkeit bei Kontakt mit einer Festkörperoberfläche. Eine Maßzahl stellt der Kontaktwinkel dar. Je kleiner dieser ist, desto größer ist die Benetzbarkeit, wodurch eine bessere Befeuchtung der Oberfläche möglich ist. Bei vollständiger Benetzbarkeit (Kontaktwinkel von 0°) verhalten sich die unlöslichen Partikel wie reine Flüssigkeitstropfen, weshalb die Kelvin-Gleichung zur Berechnung des kritischen Sättigungsgrades S_{crit} verwendet werden kann (s. Gleichung 2-4). [35, 36]

Bei keiner vollständigen Benetzbarkeit der Partikel sind zusätzliche Annahmen zu treffen, die die Berechnung und Analyse erschweren. Weitere Modelle für unlösliche Partikel, die hier nur erwähnt werden, sind die Modelle von Henson/Sorjamaa und Fletcher. [35]

Lösliche Partikel

Zur Beschreibung der Tropfenbildung bei löslichen Partikeln, z. B. Salze aus der Biomasseverbrennung kann das Köhler-Modell verwendet werden. Eine Besonderheit bei

löslichen Partikeln ist, dass bereits bei niedrigen Sättigungen Wasserdampf aus der feuchten Luft zu den Teilchen diffundiert und sich Lösungstropfen bilden. Der dafür notwendige Sättigungsgrad wird auch Erweichungspunkt genannt und liegt z. B. für Natriumchlorid (NaCl) bei $S \approx 0,7$. Durch die Lösung der Aerosolpartikel in den Kondensattröpfchen wird eine Reduzierung des Sättigungsdampfdruckes und ein stabiler Gleichgewichtszustand mit der Umgebung erzeugt, wobei geringe Sättigungsgradänderungen auch nur geringfügige Änderungen der Tropfengröße verursachen. Die Reduzierung des Sättigungsdampfdruckes bei löslichen Partikeln wirkt dabei entgegen seiner Erhöhung durch den Kelvin-Effekt. Mit Hilfe der Köhler-Gleichung wird die Gleichgewichtsbeziehung über einem Lösungstropfen dargestellt [35, 36]. Der notwendige kritische Sättigungsgrad S_{crit} für die Lösungstropfen, damit diese als Kondensationskeime wirken, instabil werden und ungehindertes Tropfenwachstum ablaufen kann, ist über die Gleichung 2-6 ermittelbar. [35]

$$S_{crit} = \left(\frac{128}{81} \frac{\pi \bar{M}_{part}}{i_{part} M_{part} \bar{V}_W} \left(\frac{\bar{V}_W \sigma_{wat}}{\tilde{R} T} \right)^3 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-6)$$

\bar{M}_{part} Molare Masse des Partikels in kg/mol

i_{part} Van-'t-Hoff-Faktor (Anzahl gelöster Partikel pro Formeleinheit) (-)

M_{part} Masse des Partikels in kg

\bar{V}_W Partielles molares Volumen der Flüssigkeit in m³/mol

In Bild 2-6 sind die Gleichgewichtskurven für verschiedene Partikeldurchmesser dargestellt.

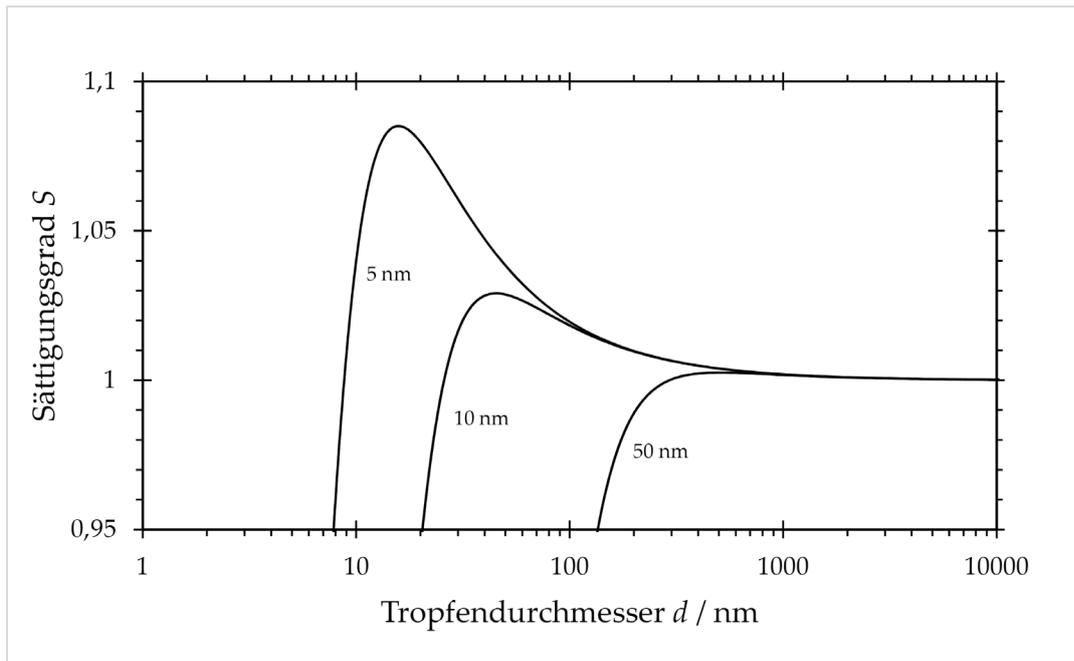


Bild 2-6: Gleichgewichtskurven der entstehenden Tropfen auf unterschiedlichen NaCl-Partikeln (5 nm, 10 nm, 50 nm) entsprechend der Köhler-Theorie [35]

Die Gleichgewichtskurven für drei unterschiedliche Partikeldurchmesser von NaCl werden als Funktion des Sättigungsgrades über dem Tropfendurchmesser dargestellt. Für Zustände auf diesen Kurven existiert ein stabiles Gleichgewicht zwischen Dampf und Flüssigkeit. Unterhalb der Kurven findet Verdampfung und eine Verringerung des Tropfendurchmessers statt, oberhalb der Linien Kondensation und Tropfenwachstum. Der kritische Sättigungsgrad ist der Maximalwert der jeweiligen Gleichgewichtskurve. Die Werte liegen nur knapp über 1 und sind niedriger als die durch die Kelvin-Gleichung berechneten Werte. Bei Betrachtung des Wachstums (Werte außerhalb der Kurven) für kleine Tropfendurchmesser links des Maximums ist zu erkennen, dass ein stabiler Zustand vorherrscht, solange $S < S_{crit}$, da das Tropfenwachstum durch die Gleichgewichtskurve begrenzt ist. Das bedeutet der Tropfen wächst, unter der Voraussetzung, dass der Sättigungsgrad aufrechterhalten wird, auf den Durchmesser an, der diesem Sättigungsgrad auf der Gleichgewichtskurve zugeordnet ist. Bei Sättigungen oberhalb des kritischen Werts liegt ein instabiler Zustand vor und es tritt ein ungehindertes Wachstum der Tropfen durch heterogene Kondensation ein, solange S oberhalb der zugehörigen Kurve in Bild 2-6 bleibt. Für Tropfengrößen rechts des Maximums ist dieser instabile Zustand daher auch für geringere Sättigungsgrade als S_{crit} vorhanden. [30]

Für das weitere Wachstum eines Tropfens nach der Aktivierung können vereinfachte Transportgleichungen für die Berechnung verwendet werden. Entscheidend ist hierfür noch die Tropfentemperatur, die aus der Wärmebilanz des Tropfens bestimmt werden kann. Damit das Wachstum weiter stattfindet, muss die freiwerdende Kondensationswärme vom Tropfen an die Umgebung abgegeben werden. Ein Anstieg der Tropfentemperatur würde hingegen zu einem Anstieg des Sättigungsdampfdrucks an der Tropfenoberfläche führen und damit das Wachstum beenden. Die Temperatur des Mediums, das den Tropfen umgibt, muss daher kleiner sein als die Temperatur des Tropfens. [36] Durch die Bestimmung der Tropfentemperatur kann anschließend der Sättigungsdampfdruck an der Oberfläche je nach Art des Partikels (löslich oder unlöslich) berechnet werden. Mit Hilfe dieses Wertes kann der Massenstrom des kondensierenden Wasserdampfes, der in Richtung der Tropfen gerichtet ist,

anhand vereinfachter Transportgleichungen bestimmt werden. Für weitere Details und Berechnungen zur Wärmebilanz der Tropfen sowie zu dem für das Wachstum erforderlichen Massenstrom sei an dieser Stelle auf *Heidenreich* verwiesen. [36]

Entscheidend beeinflusst werden kann das Tropfenwachstum mit folgenden Parametern [36]:

- Die Partikelkonzentration: Je höher dieser Wert, desto schneller ist das Wachstum beendet und desto kleiner sind die entstehenden Tropfen, da sich die verfügbare Dampfmenge bei der Kondensation auf mehr Partikel verteilt.
- Die Übersättigung: Mit höherer Übersättigung steht eine größere Dampfmenge zur Verfügung. Dies führt zu einem Anstieg des Massenstroms des kondensierenden Dampfes und damit einem Anstieg der Wachstumsgeschwindigkeit.

2.3.3 Tropfenwachstum

Kern der mathematischen Modellierung ist das Wachstumsgesetz für Tropfen in einer übersättigten Atmosphäre von *Gyarmathy* aus dem Jahr 1963 [34]. *Gyarmathy* stellt dabei einen Zusammenhang zwischen der Änderung des Tropfenradius und verschiedenen Zustandsgrößen der übersättigten Umgebung und der Tropfen, Stoffeigenschaften von Wasser, trockener Luft und Wasserdampf, sowie Hilfsgrößen her. Dabei werden auch molekulare Effekte durch Korrekturfaktoren für sehr kleine Tropfen- bzw. Aerosolpartikelradien berücksichtigt. Vorweggreifend muss erwähnt werden, dass die Modellierung vor allem für die Beschreibung des Wachstums von Tropfen in einer übersättigten Umgebung geeignet ist, d. h. wenn die tatsächliche Sättigung S größer als die kritische Sättigung S_{crit} ist. Eine etwaige (Wieder-)Verdampfung des kondensierten Wassers kann mit dem Modell nicht abgebildet werden. Darüber hinaus ergeben sich Schwierigkeiten, wenn die tatsächliche Sättigung der feuchten Luft kleiner als die kritische Sättigung ist. *Gyarmathy* geht von folgenden Annahmen aus [34]:

- Die Tropfen sind relativ zum Gas in Ruhe.
- Es werden Wärme- und Stofftransportvorgänge und der Einfluss der Kapillarität berücksichtigt.
- Die hergeleitete Formel soll für kontinuierliche und molekulare Transportvorgänge gelten, d. h. die Formel soll auch für große Knudsen-Zahlen gelten.
- Der Abstand zweier Tropfen im Vergleich zum Tropfenradius ist groß. Dies ist laut *Heidenreich* für die in technischen Prozessen vorkommenden Konzentrationen an Aerosolpartikeln erfüllt [23].
- In der Gasphase herrscht eine uniforme Gastemperatur, ein uniformer Gasgesamtdruck, sowie ein uniformer Wasserdampfpartialdruck.

Als treibende Kräfte hinter dem Tropfenwachstum bzw. der Kondensation des Wassers auf die Tropfen sieht *Gyarmathy* das Dampfdruckgefälle zwischen der von den Tropfen entfernten Gasphase und dem Bereich unmittelbar über den Tropfen sowie die freiwerdende Kondensationswärme bei der Kondensation von Wasser und den Abtransport dieser Wärme an die Gasphase [34].

Sind die oben genannten Bedingungen erfüllt, lässt sich das Wachstum eines Tropfens in einer übersättigten Umgebung laut *Gyarmathy* folgendermaßen beschreiben:

$$\frac{dr_{drop}}{dt} = v_{wat} \cdot \frac{1 - \frac{r_{drop\ crit}}{r_{drop}}}{r_{drop} + 1.59 \cdot \Lambda} \cdot \frac{\ln(S)}{\frac{(\Delta h_v)^2}{\lambda_{gas} \cdot R_{vap} \cdot T_{gas}^2} + \frac{p_{gas} - p_{vap}}{p_{gas}} \cdot \frac{R_{vap} \cdot T_{gas}}{p_{vap} \cdot D_{diff}}} \quad (2-7)$$

v_{wat}	spezifisches Volumen des Wassers in m ³ /kg
$r_{drop\ crit}$	kritischer Tropfenradius bei einer bestimmten Sättigung in m
Λ	mittlere freie Weglänge der Moleküle in der Gasphase in m
Δh_v	spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers in J/kg
λ_{gas}	Wärmeleitfähigkeit der Gasphase in W/(m K)
R_{vap}	spezifische Gaskonstante des Wasserdampfs in J/(kg K)
T_{gas}	Temperatur der Gasphase in K
p_{gas}	Gesamtdruck in der Gasphase in Pa
p_{vap}	Wasserdampfpartialdruck in Pa
D_{diff}	Diffusionskoeffizient des Gases in m ² /s

Die Hilfsgröße $r_{drop\ crit}$ berechnet *Gyarmathy* dabei über die Kelvin-Gleichung, vgl. Gleichung (3-4). Sie bietet eine anschauliche Darstellung dafür, ob die Tropfen sich im Gleichgewicht mit der sie umgebenden feuchten Luft befinden, oder ob sie über- oder unterkritisch sind. Überkritische Tropfen haben einen größeren Radius als $r_{drop\ crit}$, sie sind deswegen bestrebt, durch Kondensation von Wasserdampf weiter anzuwachsen, wodurch sich die Sättigung soweit abbaut, bis kritische Sättigung S_{krit} und tatsächliche Sättigung S übereinstimmen.

3 Vorgehen

In diesem Kapitel werden die Prüfstände, die Methoden und das angewandte Vorgehen bei den Messungen im Detail vorgestellt.

3.1 Heterogene Kondensation im geschlossenen System

Ein wichtiges Ziel des Vorhabens war die Herbeiführung von heterogenen Kondensationen auf Partikeln der Abgase einer Biomasseverbrennung in einem Sprühwäscher. Da in dieser Apparatur die Wärme- und Stoffprozesse eher komplex sind und damit ungleichmäßige örtliche Sättigungsgrade beim Betrieb vorliegen, sollten die kritischen Übersättigungen für die in der Biomasseverbrennung enthaltenen Stoffe an einem geeigneten Prüfstand, ohne Biomassefeuerung, identifiziert werden. Der Prozessablauf in einem geschlossenen System ermöglicht eine gleichmäßige örtliche Verteilung der Sättigung in einer Messkammer und damit eine akkuratere Bestimmung erforderlicher Sättigungen für die Kondensation.

3.1.1 Prüfstand - geschlossenes System

Das in Bild 3-1 dargestellte Schema des Prüfstands zeigt den Aufbau, der zur Durchführung der Messungen im Laufe der Studie optimiert wurde.

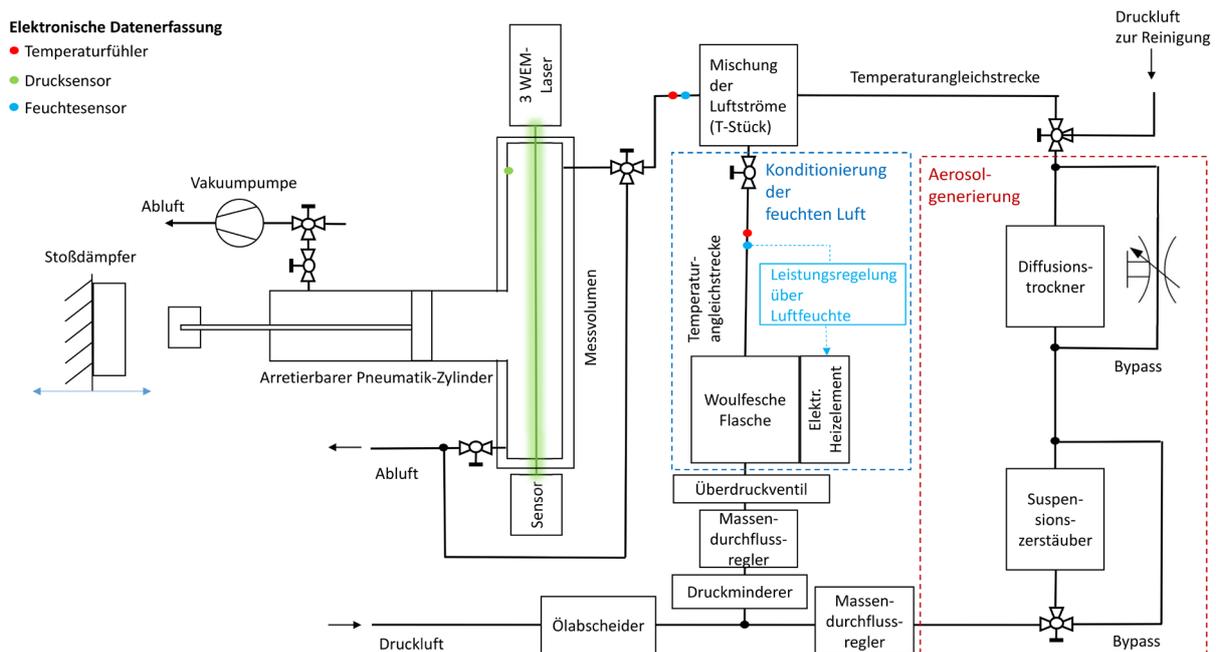


Bild 3-1: Schematischer Aufbau des Prüfstands

Der in Bild 3-1 blau markierte Pfad diente zur Befeuchtung der Druckluft (im Folgenden als Befeuchtungspfad bezeichnet) und im zweiten Pfad wurden die zu untersuchenden Aerosole generiert (im Folgenden Aerosolpfad). Die Volumenströme wurden in beiden Bereichen jeweils mit einem thermischen Massendurchflussregler kontrolliert.

In der Woulfeschen Flasche, mit einem optionalen, elektrischen Heizelement, wurde die Luft je nach gewünschtem Zustand befeuchtet und in einer anschließenden Schlauchstrecke über 24 m der Umgebungstemperatur wieder angeglichen. Im Parallelpfad wurde die Druckluft in

einen Aerosolgenerator geleitet, wo die Zerstäubung einer Lösung oder Suspension luftgetragene Partikel erzeugte. Hierbei handelt es sich um ein gängiges Verfahren, um ultrafeine Partikel künstlich zu erzeugen, die unter realen Bedingungen an einer Biomassefeuerung, in deren Rauchgasen enthalten wären. Ein großer Vorteil der Zerstäubung stellt die Möglichkeit der Erzeugung von Reinstoffen dar, welche bei Verbrennungen nur im Gemisch vorliegen.

Für Betriebszustände, in denen dieser Suspensionszerstäuber nicht benötigt wurde (z. B. Reinigung des Prüfstands), konnte die Luft über ein Dreiwegeventil vollständig über einen Bypass geleitet werden. Damit die relative Feuchte fast ausschließlich über den Befeuchtungspfad geregelt werden konnte und um trockene Aerosole ohne Wasserhülle zu erzeugen, war dem Aerosolgenerator ein Diffusionstrockner nachgeschaltet. Eine zusätzliche Regelkomponente stellt der zweite Bypass dar, der parallel zum Diffusionstrockner geschaltet ist. Dadurch konnte die relative Feuchte des Aerosolpfades eingestellt werden.

Die Zusammenführung der zwei Volumenströme fand in einem T-Stück statt. Mit Hilfe der zwei Sensoren wurde die Feuchte, für einen Bereich zwischen 0 % und 100 % mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ %, und zeitgleich die Temperatur, mit einem Messbereich von -40 °C bis 60 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3$ °C, jeweils an zwei Stellen des Prüfstands bestimmt. Entsprechend der an beiden Sensoren gemessenen relativen Feuchten wurde die Leistung der elektrischen Heizelemente der Woulfeschen Flasche und der Volumenstrom des Befeuchtungspfades variiert, um die gewünschte relative Feuchte des feuchten Aerosols einzustellen.

Die quaderförmige Messkammer weist ein Volumen von 19 l auf. Um eine gleichmäßige Durchströmung des Volumens zu gewährleisten, wurde das feuchte Aerosol über vier verteilte Anschlüsse an einem Ende der Messkammer eingeführt und verlässt es auf der anderen Seite über ebenfalls vier Anschlüsse. Die luftdichte Kammer war an den Stirnseiten mit Glasscheiben versehen, um die Messung des Tropfenwachstums durch heterogene Kondensation mit einem 3-Wellenlängen-Extinktionsmessgerät (3WEM) zu ermöglichen. Die Glasscheiben waren über Schraubzwingen ebenfalls abgedichtet (siehe Bild 3-2).

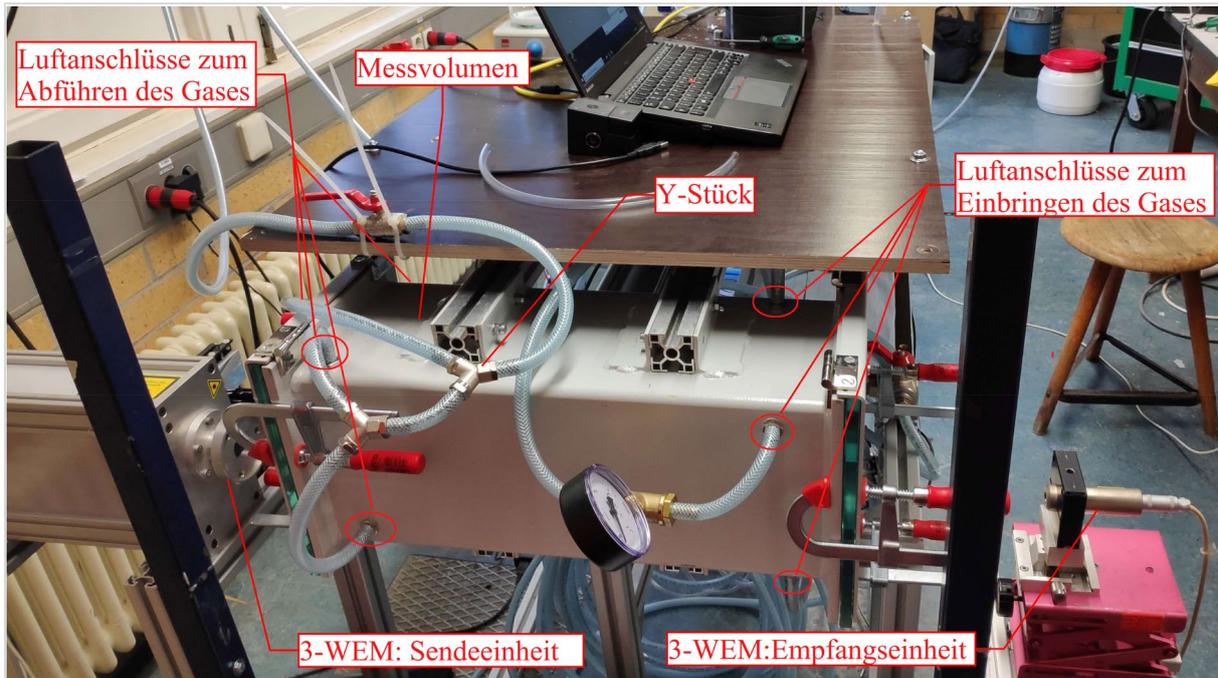


Bild 3-2: Messkammer und Messtechnik

Bei einem üblichen Messablauf wurde das Messvolumen so lange durchströmt, bis das feuchte Aerosol durch Variation der veränderbaren Parameter am Prüfstand die gewünschte relative Feuchte erreichte. Nach Erreichen dieser Feuchte wurde das Volumen weitere fünf Minuten durchströmt, um einen stationären Zustand im Messvolumen zu garantieren. Danach wurde das Volumen auf beiden Seiten durch Ventile luftdicht abgesperrt. Die für die heterogene Kondensation notwendige Übersättigung wurde durch eine nahezu adiabatische Expansion der abgesperrten Kammer realisiert. Über einen Pneumatik-Zylinder, der luftdicht mit der Messkammer verschraubt und abgedichtet war und eine Vakuumpumpe, erfolgte dabei durch Auslösen einer mechanischen Arretierung eine schlagartige Expansion, die bei entsprechenden Parametern einen Kondensationsprozess auslösen konnte. In Bild 3-2 ist der Zylinder nicht zu sehen. Er befand sich unter der Tischplatte auf der Rückseite der Messkammer.

Die verschiedenen Zustände der Messkammer während einer exemplarischen Messung sind in Bild 3-3 dargestellt. Zu Beginn einer jeden Messung lag in der Messkammer Luft vor, deren Partikelbeladung - ähnlich der Raumluft - vernachlässigbar klein war (links). Nach ca. 5 Minuten der Spülung mit dem generierten feuchten Aerosol, stellte sich in der Messkammer ein quasi stationärer Zustand ein und eine Trübung war zu erkennen (mitte). Die nun vorliegende Sichtbarkeit des 3WEM-Lasers durch die Streuung an den Partikeln unterstrich diesen Effekt. Gemäß der Initiationsättigung des Aerosols (bei ca. 1 bar) erfolgte durch die nahezu adiabatische Expansion bei ausreichend weiten Kolbenauslenkungen eine heterogene Kondensation, die durch eine erheblich intensiver ausfallende Trübung des Aerosols erkennbar wurde (rechts). Die Tropfen wuchsen dabei so intensiv an, dass sogar der Laserstrahl nur sehr viel weniger intensiv zu erkennen war. Genau dieser Effekt wurde anhand drei unterschiedlicher Wellenlängen von Photodioden (3WEM-Empfangseinheit: Bild 3-2) quantitativ vermessen und in einer Software ausgewertet.

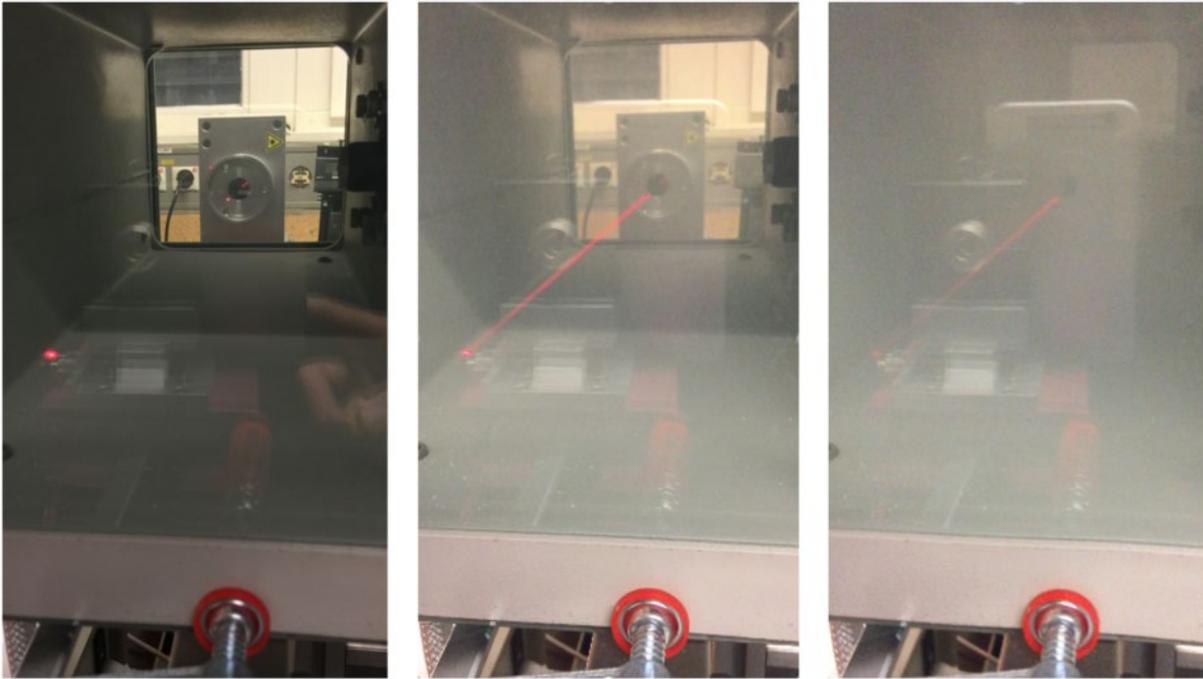


Bild 3-3: verschiedene Zustände in der Messkammer: unbeladen (links), partikelbeladen (mitte), und nach erfolgter Kondensation (rechts)

3.1.2 Messsystem

Zur Messung der Vorgänge in der Messkammer, insbesondere des Tropfenwachstums der Aerosolpartikel, wurde ein 3-Wellenlängen-Extinktionsmessgerät verwendet. Es handelt sich dabei um ein inline-in-situ-Messsystem, welches in Echtzeit die Veränderung der Partikel (Tropfenwachstum) am Reaktionsort (Messkammer) aufzeichnet [37]. Eine Probennahme und -aufbereitung war aufgrund der direkten, berührungslosen Messung daher nicht notwendig, weshalb dieses System ideale Voraussetzungen für die Untersuchungen am Prüfstand aufweist [38]. Es basiert auf dem 3-Wellenlängen-Extinktionsverfahren, bei welchem die Abschwächung eines monochromatischen Lichtstrahls einer bestimmten Wellenlänge λ durch ein partikelhaltiges Gasgemisch die Grundlage des Prinzips darstellt. Durch Absorption, Brechung, Beugung und Reflexion an den Partikeln wird die ursprüngliche Intensität I_0 des Lichtstrahls auf die Intensität I abgeschwächt. Bei Vernachlässigung von Mehrfachstreuungen, und unter der Annahme von kugelförmigen Partikeln, gilt nach dem Gesetz von Lambert-Beer Gleichung 3-1 [39, 40].

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-N \cdot L \cdot \int_0^{\infty} p(d) \cdot \pi \cdot d^2 \cdot Q_{ext}(d, \lambda, m_k) dd\right) \quad (3-1)$$

I	Intensität des Lichtstrahls nach Extinktion in W/m ²
I_0	Ausgangsintensität des Lichtstrahls vor Extinktion in W/m ²
N	Partikeldichte in 1/m ³
L	Messlänge in m
$p(d)$	Partikelgrößenverteilung (-)
d	Partikeldurchmesser in nm
Q_{ext}	Extinktionskoeffizient (-)
λ	Wellenlänge des Lichtstrahls in nm
m_k	Komplexer Brechungsindex (-)

Durch die Division der logarithmierten Intensitätsverhältnisse $\ln(I/I_0)$ zweier Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen konnte der Dispersionskoeffizient DQ nach Gleichung 3-2 bestimmt werden [39, 40].

$$DQ = \frac{\left(\ln \frac{I}{I_0}\right)_{\lambda_1}}{\left(\ln \frac{I}{I_0}\right)_{\lambda_2}} = \frac{\int_0^{\infty} p(d) \cdot d^2 \cdot Q_{ext}(d, \lambda_1, m_k) dd}{\int_0^{\infty} p(d) \cdot d^2 \cdot Q_{ext}(d, \lambda_2, m_k) dd} \quad (3-2)$$

DQ Dispersionskoeffizient (-)

Die Extinktionskoeffizienten können aus der Mie-Theorie abgeleitet werden [39]. Um bei der späteren Bestimmung des mittleren Partikeldurchmessers, insbesondere bei größeren Partikeln, Mehrdeutigkeiten durch die Verwendung von nur einem DQ zu vermeiden, wird üblicherweise ein dritter Lichtstrahl mit der Wellenlänge λ_3 verwendet. Dieser ermöglicht durch die Bildung eines zweiten, unabhängigen Dispersionskoeffizienten, die Bestimmung einer sekundären Partikeleigenschaft (Standardabweichung der Partikelgrößenverteilung). [38] Durch Einsetzen der Gleichung 3-3 (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung der Partikeldurchmesser) in die Formel 3-2 können die zwei unbekanntenen Größen, der geometrische mittlere Partikeldurchmesser d_g und die Standardabweichung σ der logarithmischen Normalverteilung, mit den zwei Gleichungen für DQ_1 und DQ_2 bestimmt werden. Mit den berechneten Werten ist die Partikeldichte N über die Gleichung 3-1 ermittelbar. Mit diesem Verfahren sind Partikelgrößen im Bereich von 50 nm bis 3 μ m messbar. [40]

$$p(d) = \frac{1}{\sigma \cdot d \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-3)$$

d_g Geometrischer mittlerer Durchmesser der Partikel in nm

σ Standardabweichung (-)

Die Annahme einer logarithmischen Normalverteilung ist bei der Partikelerzeugung durch Zerstäubung akzeptabel. Im Anhang ist in Bild 6-1 eine exemplarische SMPS-Messung einer zerstäubten KCl-Lösung und eine entsprechenden Kurvenanpassung gezeigt. Die grobe Übereinstimmung der Balken bestätigt diese Behauptung.

Im vorangegangenen Bild 3-2 ist auch die Integration des 3WEM im Prüfstand zu sehen. In der Sendeeinheit wurden die drei in Laserdioden erzeugten Lichtstrahlen zu einem Strahl überlagert. Zu Beginn der Studie lag nur die Wellenlänge λ_1 im sichtbaren (roten) Bereich (vgl. Bild 3-3). Die verwendeten Wellenlängen waren $\lambda_1 = 637 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 813 \text{ nm}$ und $\lambda_3 = 1313 \text{ nm}$. Beim Durchqueren des Messvolumens wurden die drei elektromagnetischen Wellen durch die im Gasgemisch enthaltenen Partikel unterschiedlich stark abgeschwächt und trafen hinter der Glasscheibe der Messkammer auf die Empfangseinheit. Hier wurde die abgeschwächte Intensität I jedes transmittierten Lichtstrahls mit Hilfe von Photodioden registriert. Die analogen Messsignale der Photodioden wurden digitalisiert und an die Software zur Auswertung weitergeleitet. [19] Dabei konnten die Messergebnisse in Echtzeit über die 3WL-DQ-Software angezeigt werden (s. Bild 3-4).

Zuvor wurde die Software auf die Länge des mit Partikeln gefüllten Messvolumens ($L = 52 \text{ cm}$) und den zu untersuchenden Stoff eingestellt. Dazu war es notwendig, den Brechungsindex der Partikel und des Gases, von welchem die Partikel umgeben sind, im Programm zu hinterlegen. Mit diesen Parametern erzeugte die Software das DQ-Feld des zu untersuchenden feuchten Aerosols. Dabei wurden entsprechend der Gleichung 3-2 alle mittleren Partikeldurchmesser d_g und Standardabweichungen σ in Abhängigkeit der DQ_1 - DQ_2 -Werte berechnet. Durch die Angabe des im DQ-Feld darzustellenden Durchmesserbereichs und der Standardabweichung konnte das Feld vor der Messung entsprechend angepasst und begrenzt werden. Zudem musste die Ausgangsintensität I_0 vor jeder Messung neu gespeichert werden. Dazu wurde die Extinktion der Laserstrahlen bei reiner Druckluft gemessen, wodurch die Abschwächung durch die Glasscheiben in der Ausgangsintensität berücksichtigt wurde. Bei der Durchführung der Messungen wurde die Abnahme der Ausgangsintensität daher allein durch das Gasgemisch im Messvolumen verursacht.

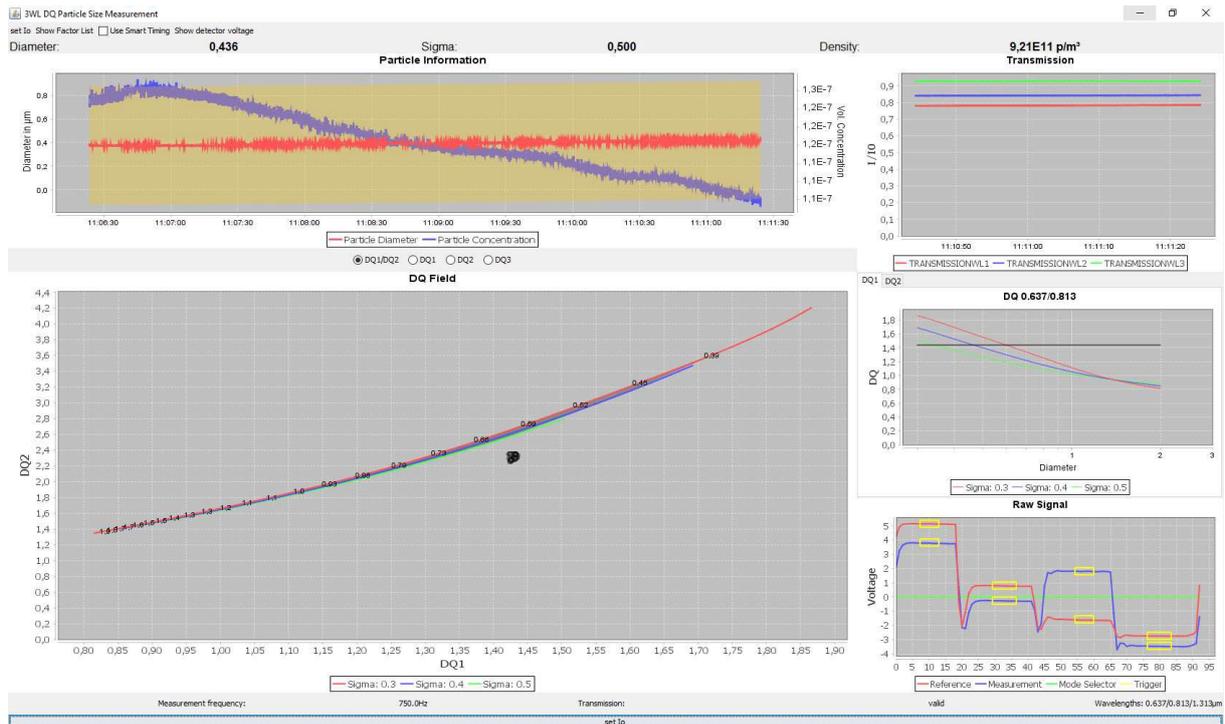


Bild 3-4: 3-WL-DQ-Software – Grafische Benutzeroberfläche

Wie in Bild 3-4 zu sehen ist, wurden durch die Messung der Intensität I die Intensitätsverhältnisse I/I_0 der drei elektromagnetischen Wellen und die Dispersionskoeffizienten DQ_1 , DQ_2 sofort berechnet und in Diagrammen simultan zur Messung angezeigt. Mit den berechneten DQ -Werten wurde für jeden Messzeitpunkt im DQ -Feld (großes Diagramm unten links in Bild 3-4) der entsprechende mittlere Partikeldurchmesser und die Standardabweichung bestimmt. Über die Partikeldichte N und den berechneten mittleren Partikeldurchmesser wurde zudem die Volumenkonzentration in m^3 Partikel / m^3 Gesamtvolumen ermittelt und im oberen, linken Diagramm dargestellt. Alle Messwerte wurden für die spätere Analyse in einer Excel-Datei gespeichert. Die 3-WL-DQ-Software wurde im Laufe der Arbeit mit weiteren Updates versehen. Die aktuelle Version bestimmt zusätzlich DQ_3 aus den Wellenlängen λ_1 und λ_3 . Durch die manuelle Vorgabe einer Standardabweichung konnte der mittlere Partikeldurchmesser auch durch die Verwendung eines einzelnen DQ -Werts bestimmt werden. Dies wurde in der aktuellen Version im Hintergrund durchgeführt und in der Excel-Datei für alle DQ -Werte gespeichert. Hintergrund dieses Updates war der Drift insbesondere einer Wellenlänge ($\lambda_3 = 1313 \text{ nm}$), teilweise aber auch zweier Wellenlängen (λ_3 und $\lambda_1 = 637 \text{ nm}$), der im Laufe der Arbeit nicht kompensiert bzw. dessen Ursache nicht herausgefunden werden konnte. Durch die Berechnung des Durchmessers mit Hilfe aller Dispersionskoeffizienten, konnte im Falle eines Drifts die entsprechende Wellenlänge unberücksichtigt bleiben. Im neuesten Update wurde auch die Partikeldichte N nach der Formel 3-1 nur über die nicht-schwankende Wellenlänge λ_2 berechnet und nicht wie in älteren Softwareversionen über eine Mittelung aller Wellenlängen. Für die hier durchgeführten Messungen war bei Verwendung des Messsystems ganz entscheidend, dass statt dem Brechungsindex der Partikel der Brechungsindex von Wasser zur Berechnung des DQ -Felds eingestellt wird. Durch einsetzendes Tropfenwachstum, aufgrund der Kondensation des Wasserdampfs auf den Partikeln, konnte der Anteil des Partikels im Tropfen vernachlässigt werden. Die

entscheidenden optischen Eigenschaften wurden dabei durch den ansteigenden Wasseranteil bestimmt, weshalb für das Messsystem die Brechungsindizes von Wasser und Luft zu hinterlegen waren. Für die in den Messungen überwiegend verwendeten löslichen Salzpartikel war diese Einstellung des Messsystems möglicherweise noch passender, da hier bereits bei einer niedrigeren Sättigung (bei NaCl: $S = 0,7$) der Erweichungspunkt eintritt, bei dem durch Diffusion des Wasserdampfs zu den Partikeln bereits Lösungstropfen gebildet werden. Das Zeitintervall der in der Excel-Datei abgespeicherten Messschritte wurde vor der Messung eingestellt. Das System weist eine maximale Abtastfrequenz von 750 Hz auf. Durch die Funktion „Smart-Timing“ erkannte das Messsystem plötzlich stattfindende Durchmesseränderungen der Partikel und speicherte für die Dauer dieses Vorgangs die Messschritte mit der maximalen Abtastfrequenz ab. Für bestmögliche Messergebnisse war diese Funktion vor einer Expansion und dem daraus folgenden Tropfenwachstum während der Messung zu aktivieren. In Bild 3-5 ist der restliche Teil des Prüfstands abgebildet.

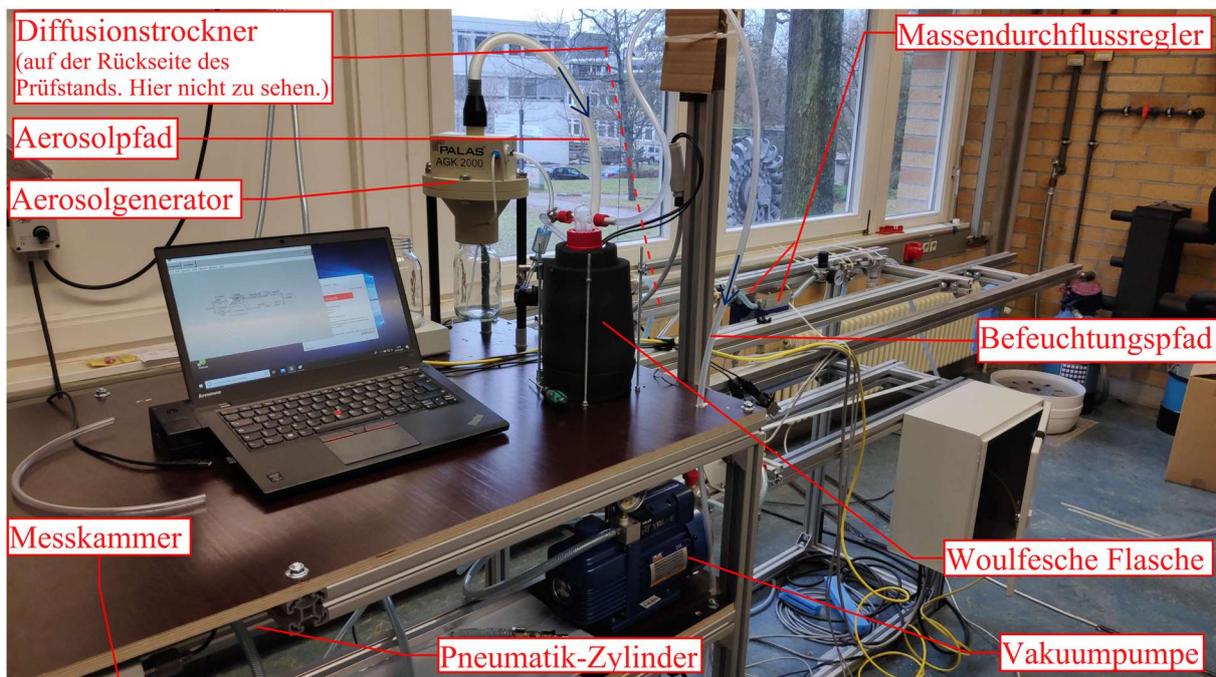


Bild 3-5: Prüfstand zur Untersuchung im geschlossenen System

3.1.3 Herausforderungen mit der Messtechnik und Lösungsansätze

Während der Studie sind zahlreiche Herausforderungen am Prüfstand zur Untersuchung der heterogenen Kondensation im geschlossenen System aufgetreten. Um eine akzeptable Messqualität gewährleisten zu können, bedurfte es zunächst Lösungen, um anschließend belastbare Ergebnisse zu generieren.

Feuchteschwankungen

Ein funktionsfähiger Feuchtehaushalt des Prüfstands war die Grundvoraussetzung für akkurate Messungen im Hinblick auf erforderliche Übersättigungen für die Kondensation. Gemäß Bild 3-1 erfolgte die Kontrolle der Feuchte des Aerosols über eine Entfeuchtung des Rohaerosols im Diffusionstrockner und durch eine Woulfesche Flasche zur Befeuchtung der feuchten Luft.

Während des Beladungsprozesses der Messkammer mit Aerosol musste streng genommen die Feuchte zeitlich gemittelt werden, um den hygrischen Initialzustand in der Messkammer genauer zu identifizieren. Größere Schwankungen der Werte machten selbst diesen Prozess ungenau.

Druckmessumformer

Erst im Laufe der Machbarkeitsstudie wurde der Drucksensor P-30 der Firma WIKA in Betrieb genommen. Dieser wurde wie in Bild 3-6 dargestellt in der Messkammer installiert. Er ermöglichte eine erheblich genauere Ermittlung der durch die Expansion erreichten Übersättigung in der Messkammer, im Vergleich zur zeitlichen Messung der Kolbenauslenkung.

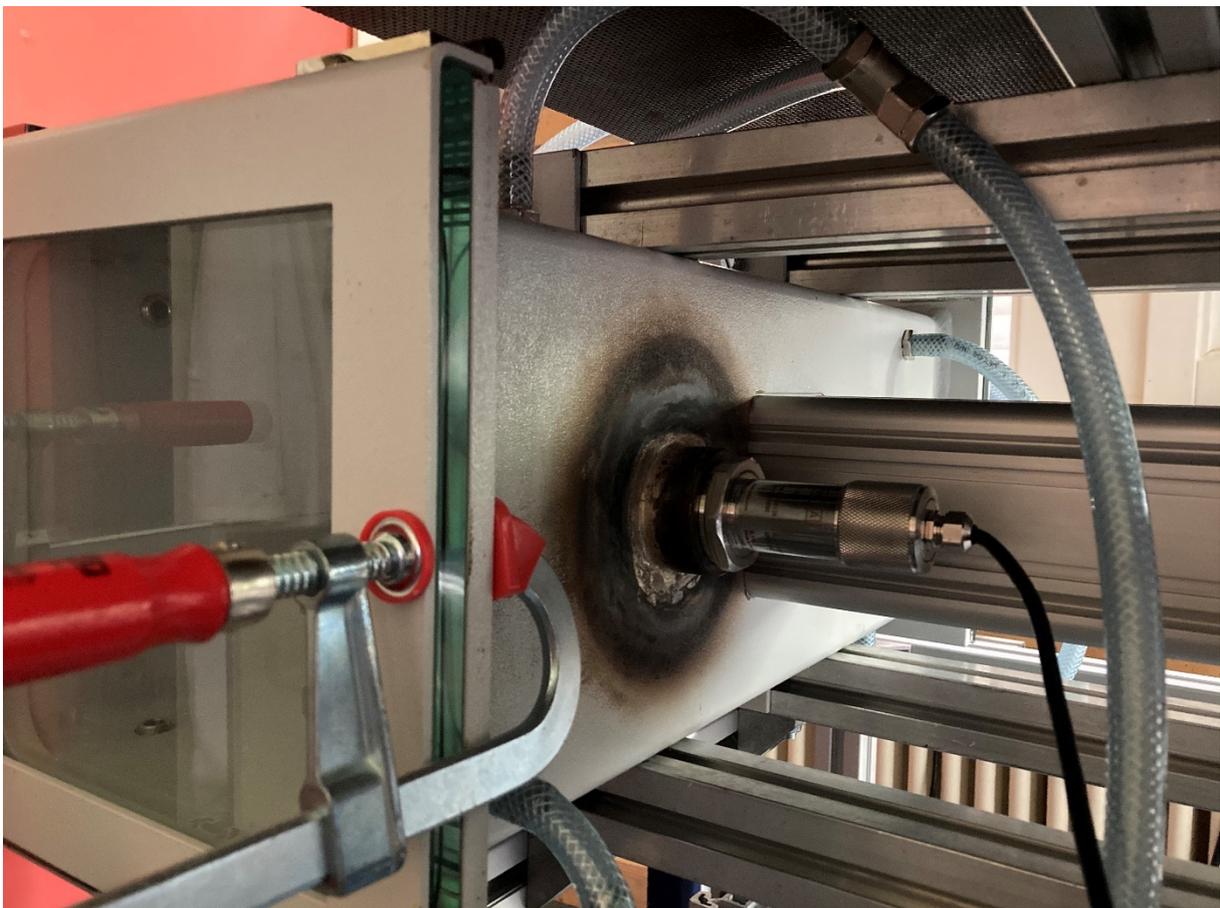


Bild 3-6: Der in der Messkammer eingebaute Drucksensor

Die Software des Druckmessumformers zeichnete den Druck im Inneren der Messkammer mit einer Messrate von bis zu 333 1/s auf. Die Genauigkeit beläuft sich auf 0,1 % des betrachteten Druckbereichs (0 bis 1,6 bar) und beträgt daher $\pm 1,6$ mbar.

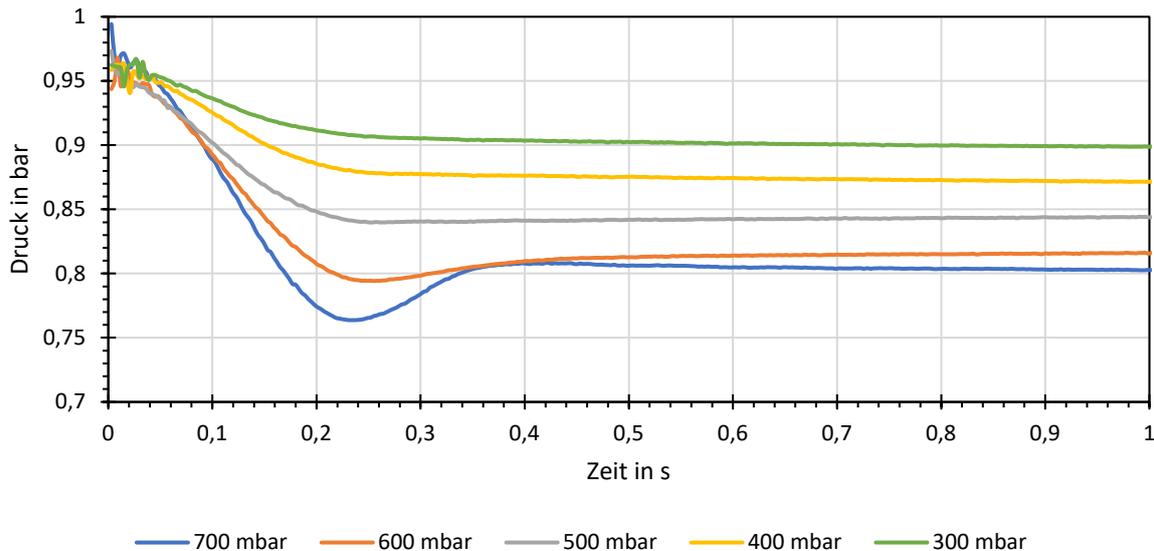


Bild 3-7: Zeitlicher Druckverlauf in der Messkammer bei verschiedenen Unterdrücken hinter dem Kolben

In Bild 3-7 sind einige Messungen des Drucksensors einer Expansion gezeigt. Bei jeder Messung wurde ein anderer Unterdruck auf der Kolbenseite außerhalb der Messkammer eingestellt, die in den verschiedenen Kurven dargestellt sind. Direkt nach Auslösen des Kolbens waren hochfrequente Schwingungen in den Druckverlaufskurven erkennbar. Diese waren auf mechanische Erschütterungen durch die plötzlich beschleunigte Kolbenmasse zurückzuführen. Anschließend fiel der Druck für ca. 0,25 Sekunden. Bei geringerem eingestelltem Unterdruck bremste die Kolbenstange dann ab, und ein nahezu konstanter Druck stellte sich ein. Bei höherem Unterdruck erreichte der Verlauf erst ein Minimum und stieg dann wieder an, bis sich ebenfalls ein nahezu konstanter Druck einstellte. Dieser Überschwinger lässt sich durch die Trägheit der schnellen Kolbenstange erklären, die über die Gleichgewichtslage hinausfuhr und sich erst anschließend aufgrund der Kraftumkehr am Kolben in diese zurückbewegte.

Aus diesen Druckmessdaten ließ sich der zugehörige Verlauf der Dampfsättigung berechnen. Der Ausfahrweg des Kolbens musste daher nicht mehr bestimmt werden. Zur schnellen Berechnung der Sättigung konnte eine erstellte Excel-Applikation (vgl. Kapitel 3.1.4) verwendet werden.

Gerade bei hohen Expansionsverhältnissen wie beim dargestellten Unterdruck von 700 mbar war offen, bei welchem Druck die Partikel tatsächlich aktiviert werden. Bei Messungen, die hohe Genauigkeiten der erzielten Sättigung benötigen, empfahl es sich eine recht hohe Ausgangsfeuchte des Aerosols einzustellen. Dadurch mussten auch für das Herbeiführen hoher Sättigungen nicht besonders hohe Expansionsverhältnisse angesetzt werden, wodurch die resultierende Druckverlaufskurve geringere oder sogar keinen Überschwinger aufwies.

Drift der Laserintensitäten

Wie bereits in den Kapiteln zuvor erwähnt, wurden die Messungen durch Drifts der gemessenen Lichtstrahlintensitäten I der Wellenlängen λ_1 und λ_3 erheblich erschwert. Nach Festlegung der Ausgangsintensität I_0 , wobei das Messvolumen mit reiner Druckluft

durchströmt wurde, sollte sich bei unveränderter Durchströmung der Messkammer das Intensitätsverhältnis $\frac{I}{I_0}$ nicht mehr ändern und daher kontinuierlich den Wert 1 bzw. 100 % anzeigen. Es ergab sich jedoch bei weiterer Beobachtung eine langsame, ungewollte Änderung dieses Intensitätsverhältnisses. Eine besonders starke und häufige Änderung der Messwerte war dabei beim Laser der Wellenlänge λ_3 zu erkennen. Der Drift der Wellenlänge λ_1 war hingegen schwächer ausgeprägt und seltener vorhanden. Die Schwankungen beider Lichtstrahlintensitäten schienen dabei vollkommen zufällig aufzutreten und wiesen auf keinen zeitlichen Zusammenhang mit äußeren Umgebungseinflüssen hin. Die Messungen wurden dadurch erheblich erschwert, da der Drift zwar vor der Messung erkennbar war, es jedoch während der Messung nicht unterschieden werden konnte, ob die Veränderung der Intensitäten durch die Drifts, durch die ins Volumen eingeblasenen Partikel und deren mögliches Tropfenwachstum oder durch eine Kombination von beidem verursacht wurden.

In Bild 3-8 ist die Aufzeichnung des Intensitätsverhältnisses einer mehrtägigen Messung zu sehen. Hierbei wurde der Nullzustand gemessen, d.h. die Abschwächung der Lichtstrahlen durch die Glasscheiben und die in der Messkammer enthaltene reine Druckluft.

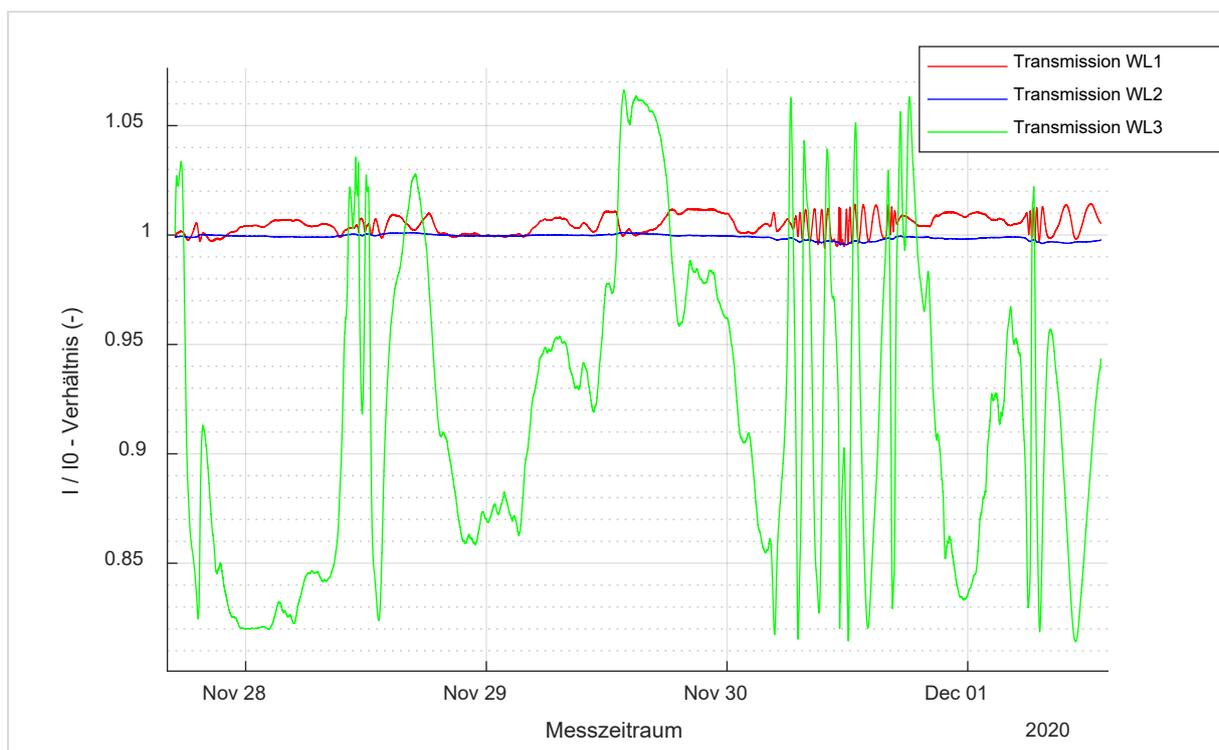


Bild 3-8: Drift der Laserintensitäten – Messung 1

Das Diagramm zeigt beispielhaft über mehr als drei Tage die deutlichen Schwankungen der beiden Wellenlängen 1 und 3 auf. Bei der Wellenlänge 3 (grüne Linie) ergaben sich maximale Schwankungen von fast 26 %, wohingegen die Schwingungsbreite von Wellenlänge 1 (rot) mit maximal ca. 2 % im Vergleich dazu noch als akzeptabel angesehen werden konnte. Es wurden zahlreiche Maßnahmen zu einer möglichen Behebung der Drifts durchgeführt, jedoch konnten alle kein zufriedenstellendes Ergebnis liefern. Aufgrund des ausbleibenden Erfolgs der genannten Maßnahmen, wurde der Hersteller gebeten, den infraroten Laser mit Wellenlänge

λ_3 gegen einen im blauen Bereich auszutauschen. Für dieses Licht war im Gegensatz zum infraroten keine separate Fotodiode erforderlich, welche aller Wahrscheinlichkeit nach zu den Fehlern geführt hatte. Erst nach diesem Schritt konnte seit ca. September 2021 nahezu gänzlich ohne Drift gemessen werden, was zu erheblich belastbareren Messergebnissen führte.

3.1.4 Resultierendes Vorgehen zur Analyse von erforderlichen Übersättigungen von Reinstoffen

Die Herausforderungen am Prüfstand erforderten ein neues methodisches Vorgehen zur Identifikation der erforderlichen Übersättigungen verschiedener Stoffe.

Messverfahren

Aufgrund der angesprochenen zeitlichen Schwankungen der relativen Feuchte beim Aerosoleintritt in die Messkammer, wurde der Luftfeuchte- und Temperatursensor in einem unmittelbar angrenzenden Schlauch der Messkammer platziert. Auf diese Weise war es möglich, die relative Feuchte des Aerosols in dem abgeschlossenen System zu vermessen, wodurch sich eine erheblich genauere Identifikation der Übersättigung bei Kolbenauslenkung eröffnete.

Zusammen mit den zeitlich hochauflösenden Messdaten des Druckmessumformers konnte in einem Berechnungsmodell die tatsächlich resultierende Übersättigung des Aerosols bestimmt werden. Hierfür wurde der Druckabfall bei maximaler Kolbenauslenkung aus den Druckmessdaten ermittelt und dieser in das Tool eingebunden. Zusammen mit den initialen Informationen (vor der Kolbenauslenkung) der Temperatur und Luftfeuchte, wurde die Übersättigung bei vollständiger Kolbenauslenkung unter der thermodynamischen Annahme einer adiabatischen Expansion für geschlossene Systeme berechnet. Der tatsächlich vorliegende Wärmeeintrag während der sehr kurz andauernden Auslenkbewegung des Kolbens (Bruchteil einer Sekunde) wurde als vernachlässigbar eingestuft, wodurch eine akzeptable Genauigkeit der Berechnung erwartet werden konnte.

Für die Analyse, ob ein Kondensationsprozess stattgefunden hat, wurde eine Alternative zu den von der Software des 3WEM berechneten Ergebnissen der mittleren Partikelgröße erfordert. Diese war vor allem bei geringfügigen Kondensationsprozessen mit kleinen Wassermassenströmen und damit kleinen Änderungen der Partikeldurchmesser nicht belastbar. Hintergrund ist die Einstellung der optischen Parameter (z. B. Brechungsindex) auf die Stoffeigenschaften des Wassers. Die Partikel bestanden initial allerdings nicht aus Wasser und hatten meist nur ähnliche optische Eigenschaften. Erst wenn genug Wasser kondensiert war, stimmte der Brechungsindex des entstehenden Tropfens, der den Fremdstoff enthält, mit reinem Wasser überein und erst dann konnte eine Tropfengröße belastbar gemessen werden.

Eine zielführende Alternative stellte die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Laserintensitäten lediglich einer Wellenlänge während aller Expansionsprozesse dar. Jede weitere Wellenlänge liefert also nur wertvolle und verwertbare Ergebnisse, um jeweils eine weitere unbekannte Größe (mittlere Partikelgröße oder die Standardabweichung der Partikelgrößenverteilung) zu identifizieren.

Bei diesem Vorgehen wurden zahlreiche Kolbenauslenkungen hintereinander durchgeführt. Nach jeder Auslenkung wurde der Kolbenhub über zunehmende Unterdrücke hinter dem

Kolben (via Vakuumpumpe) gesteigert, welche in immer höheren Übersättigungen resultieren. Durch die schrittweise Steigerung der Übersättigungen, konnte anhand von Anomalien des zeitlichen Laserintensitätsverlaufes bestimmt werden, ab welchem Wert eine Kondensation stattgefunden hat. Relevant dabei war eine sehr kleine Schrittweite der Kolbenauslenkung (Unterdrucks) im entscheidenden Bereich des potentiellen Kondensationseintrittes und eine generell sehr akkurate Arbeitsweise am Prüfstand.

Im Bild 3-9 sind die Verläufe des Anteils der Laserintensitäten an den initialen und die Druckverläufe einer exemplarischen Messung an MgO dargestellt.

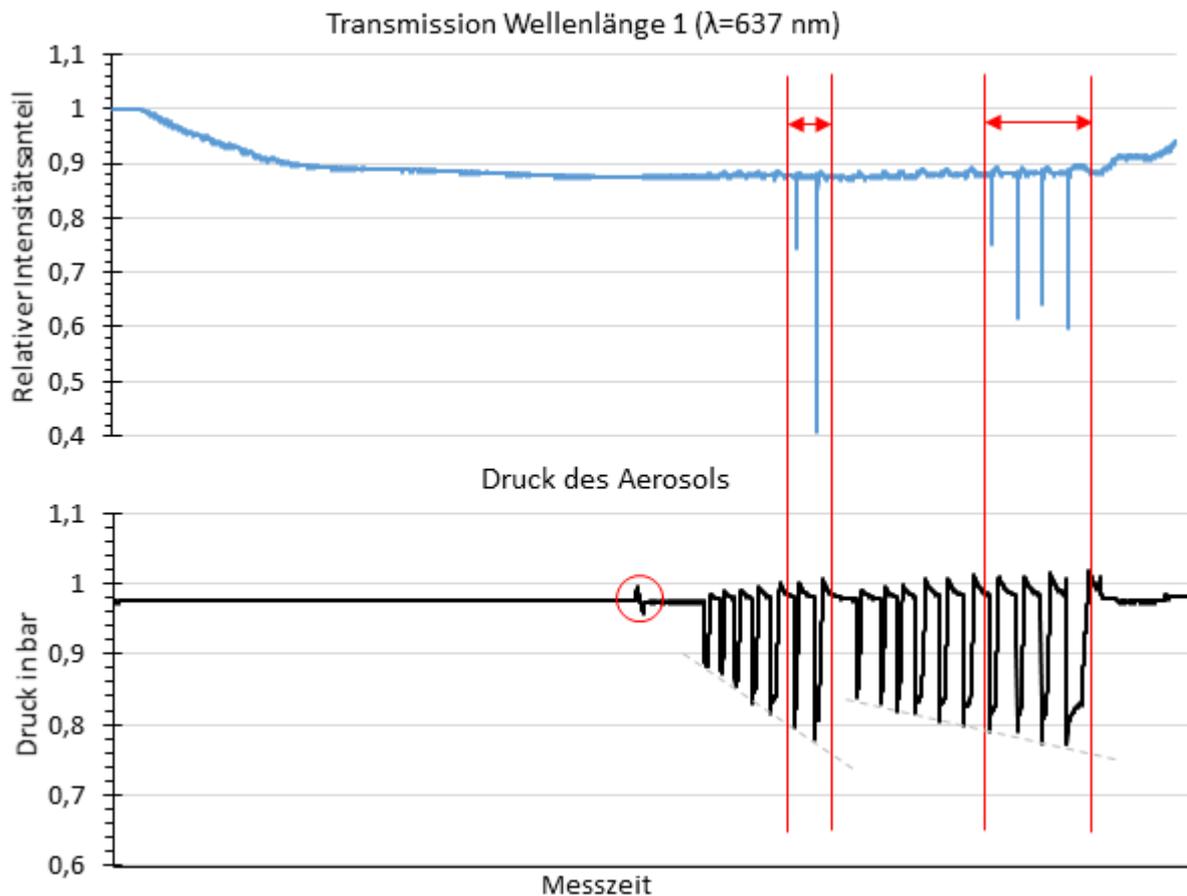


Bild 3-9: Zeitlicher Verlauf der relativen Laserintensität der Wellenlänge 1 (637 nm) und des absoluten Drucks einer Messung

Anhand des Intensitätsverlaufs der Wellenlänge 1 ($\lambda=637$ nm) ist zunächst die Befüllung der Messkammer mit Aerosol erkennbar. Der exponentielle Zerfall hin zu einer stationären Intensität spiegelt die entsprechend exponentiell ansteigende Partikelkonzentration wieder. Um einen wirklich horizontalen Intensitätsverlauf und damit einen stationären Zustand zu erreichen wurde einige Minuten abgewartet. Der erste Druckauschlag (roter Kreis) lässt sich auf das Schließen der Ventile der Messkammer zurückführen. Von da an lag ein geschlossenes System mit einem Aerosol mit vermessenen Initialbedingungen (Temperatur, Aerosolfeuchte, Druck) vor.

Daraufhin folgten die ersten fünf schrittweise gesteigerten Kolbenauslenkungen, während denen der Verlauf der Laserintensität unauffällig war. Während jeder Auslenkung nahm die

Intensität nur sehr geringfügig zu (daher nur undeutlich erkennbar), da eine Volumenerweiterung immer mit einer Abnahme der Partikelanzahlkonzentration (Teilchen pro Volumen) einhergeht und hier folglich noch keine Kondensation stattgefunden hat, welche für einen umgekehrten Effekt sorgen würde. Anhand der grauen gestrichelten Linie lässt sich die Schrittweite der Kolbenauslenkungen, die über den Unterdruck hinter dem Kolben gewählt wurden, erkennen. Die noch betragsmäßig eher hohe (abfallende) Steigung dieser Linie zeigt, dass im ersten Messdurchlauf erst grob identifiziert werden sollte, in welchem Bereich die Kondensation einsetzt.

Ab der sechsten Kolbenauslenkung erfolgte erstmals eine Anomalie im Laserintensitätsverlauf. Trotz, sogar gesteigerter, Volumenerweiterung nahm die Intensität schlagartig ab, anstatt wie zuvor, anzusteigen. Dieser gegenteilige Effekt war auf eine stattfindende Kondensation zurückzuführen. Um die Partikel herum wachsen dabei schlagartig umgebende Tropfen heran. Diese sind so lange in der Lage einen größeren Teil des Lichtes zu absorbieren, bis sie aufgrund des Wärmeeintrags der Umgebung in die nun unterkühlte Kammer durch Wiederverdunstung den Ausgangszustand erreichen. Bei der anschließenden, noch größeren Kolbenauslenkung, ist dieser Effekt noch deutlicher zu beobachten. Die Auslenkungen bei denen eine Kondensation stattgefunden hat sind demnach mit zwei umgebenden vertikalen roten Linien gekennzeichnet.

Im zweiten Messdurchlauf fiel die Steigung der gestrichelten grauen Linie eindeutig flacher aus, was aus der bereits angesprochenen kleineren Schrittweite hervorgeht, die erforderlich war um genauere Ergebnisse als im ersten Durchlauf zu erzielen.

Darüber hinaus zeigen die hier dargestellten Kurvenverläufe eindeutig den wohl größten wissenschaftlichen Vorteil des Prüfstandes auf: Die Reproduzierbarkeit der Experimente. Unabhängig von der Anzahl an Kolbenauslenkungen stellt sich, aufgrund nur sehr geringfügiger Leckagen über die Kolbenringe (die nicht zu 100% vermeidbar sind), nach jedem der Kolbenauslenkungen quasi wieder der Ausgangszustand ein. Mit einem bestimmten Aerosol kann so der Wert der kritischen Übersättigung mehrfach hintereinander gemessen werden, ohne die Messkammer neu zu beladen.

Auswertung der Messergebnisse (Post-Processing)

In eine Excel-Applikation konnten Startdruck, Enddruck, Starttemperatur und Start sättigung eingegeben werden. Über den Druckverlauf kann mit der passenden Adiabatengleichung der Temperaturverlauf berechnen werden (3-4):

$$T_{gas\ nach} = T_{gas\ vor} \cdot \left(\frac{V_{vor}}{V_{nach}} \right)^{\kappa-1} \quad (3-4)$$

$T_{gas\ nach}$ Temperatur der Gasphase nach der Expansion in K

$T_{gas\ vor}$ Temperatur der Gasphase vor der Expansion in K

V_{nach} Volumen der Messkammer nach der Expansion

V_{vor} Volumen der Messkammer vor der Expansion

κ Isentropenexponent

Zudem ist der Partialdampfdruck für die Bestimmung der Sättigung erforderlich. Dieser ist nach dem Gesetz von Dalton ein Bruchteil des Gesamtdruckes gemäß dem vorkommenden Massenanteil des Wasserdampfes. Er kann unter der vereinfachten Annahme eines idealen Gases anhand des initialen und konstanten Wassergehaltes vor der Expansion mit dem idealen Gasgesetz für eine Phase berechnet werden (3-5):

$$p_{vap} \cdot v_{vap} = R_{vap} \cdot T_{gas} \quad (3-5)$$

p_{vap} Partialdruck des Wasserdampfes in Pa

v_{vap} spezifisches Volumen des Wasserdampfes in m³/kg

R_{vap} spezifische Gaskonstante des Wasserdampfes in J/(kgK)

Der Sättigungsdampfdruck kann unter Annahme eines idealen Gases mit der Antoine-Gleichung bestimmt werden (3-6):

$$p_{sat} = \exp \left(B_1 + \frac{B_2}{B_3 + T_{gas}} \right) \cdot Pa \quad (3-6)$$

p_{sat} Sättigungsdampfdruck über einer ebenen Oberfläche in Pa

B_1 Dimensionsloser Parameter der Antoine-Gleichung (23,1946)

B_2, B_3 Parameter der Antoine-Gleichung in K (-3813.98 K bzw. -46.29)

T_{gas} Temperatur der Gasphase in K

Abschließend wird in der Applikation mit der bereits in den Grundlagen vorgestellten Gleichung 2-2 die gesuchte Dampfsättigung berechnet.

3.1.5 Vorgehen bei Stoffgemischen

Bei der Bestimmung kritischer Übersättigungen einzelner Bestandteile aus Stoffgemischen traten Herausforderungen auf. Eine heterogene Kondensation an einem Aerosol mit Partikeln verschiedener Stoffe und damit Größen und Oberflächenbeschaffenheiten ist komplex und mit der vorhandenen Messtechnik nicht im Detail zu analysieren.

Analyse kritischer Übersättigungen bei Stoffgemischen

Im Suspensions- bzw. Lösungszerstäuber lassen sich zwar Partikel aus Stoffgemischen erzeugen, allerdings ist deren Zusammensetzung, aufgrund der ungleichmäßigen Löslichkeit zunächst unbekannt. Da sich der Prüfstand des geschlossenen Systems (IGTE) örtlich entfernt von der Feuerung der Biomasse (IFK) befindet, wurde Asche von halmgutartigen Brennstoffen nachträglich zerstäubt, um ein Surrogat-Aerosol gemäß dem Rauchgas zu erzeugen. Hierbei musste allerdings zunächst geprüft werden, ob die Zusammensetzung beider Aerosole tatsächlich gleich bzw. ähnlich waren.

Bestimmung der Stoffzusammensetzung bei der Surrogat-Aerosolerzeugung

Für eine Analyse der Stoffzusammensetzung des durch Zerstäubung erzeugten Aerosols wurde in einen Schlauch stromabwärts des Aerosolgenerators ein Filterelement eingesetzt. Nach Anreicherung eines Filterkuchens wurde der Filter mehrmals davon befreit und das so entstandene Stoffgemisch in einem Probegefäß gesammelt. Der Prozess wurde so lange wiederholt, bis die für eine Laboranalyse erforderliche Mindestmenge an Stoff erreicht war. Als Referenz wurde im Labor zusätzlich die Stoffzusammensetzung der eigentlichen Asche untersucht.

Beide Proben wurden hierzu in einer Säure vollständig aufgelöst. Anschließend wurde die entstandene Lösung mithilfe der optischen Emissionsspektrometrie [41] untersucht. Diese beruht darauf, dass Atome für sie spezifische elektromagnetische Strahlungen entsenden. Hieraus konnten quantitative Aussagen über die Zusammensetzung der Probe gemacht werden. Aus dieser elementaren Zusammensetzung ließen sich dann die enthaltenen Verbindungen errechnen.

Bestimmung der Übersättigungen einzelner Bestandteile im Stoffgemisch

Mit der in Kapitel 3.1.4 vorgestellten Methodik entstanden bei der Analyse der kritischen Übersättigung in Stoffgemischen einige Herausforderungen. Sobald eine Transmissionssignaländerung einer Wellenlänge messbar war, blieb unklar an welchen Partikeln bzw. an welchem Stoff eine heterogene Kondensation erfolgt war. Offen blieb also, ob es sich bei der Signaländerung bspw. um eine Kondensation an nur einer Stoffkomponente handelte, oder ob diese an mehreren Stoffen allerdings nur mit geringfügigerem Tropfenwachstum geschehen war. Somit konnte nur anhand der Untersuchungen der Einzelstoffe abgeschätzt werden, welcher Stoffbestandteil im Kollektiv bei ähnlichen Übersättigungen aktiviert wurde.

3.2 Heterogene Kondensation im Wäscher

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau und die Versuchsplanung bzw. Versuchsdurchführung am Sprühwäscher beschrieben. Die wesentlichen Ziele dieser Untersuchungen waren dabei die Bestimmung der Staubabscheidegrade im Sprühwäscher an einer realen Biomassefeuerung sowie ein Vergleich des Verfahrens mit einem elektrostatischen Referenzabscheider hinsichtlich Abscheidegrad und Energieeffizienz. Begonnen wird mit der Beschreibung des Prüfstandes.

3.2.1 Versuchsstand Wäscher

Zur Untersuchung des Prinzips der heterogenen Kondensation im Wäscher wurde ein neuer Prüfstand konzipiert, welcher in Bild 3-10 schematisch dargestellt ist. Die wichtigsten Komponenten sind dabei ein Biomassekessel zur Rauchgaserzeugung, der nachgeschaltete Sprühwäscher als Abscheider, der elektrostatische Referenzabscheider sowie die verbaute Messtechnik auf Roh- und Reingasseite.

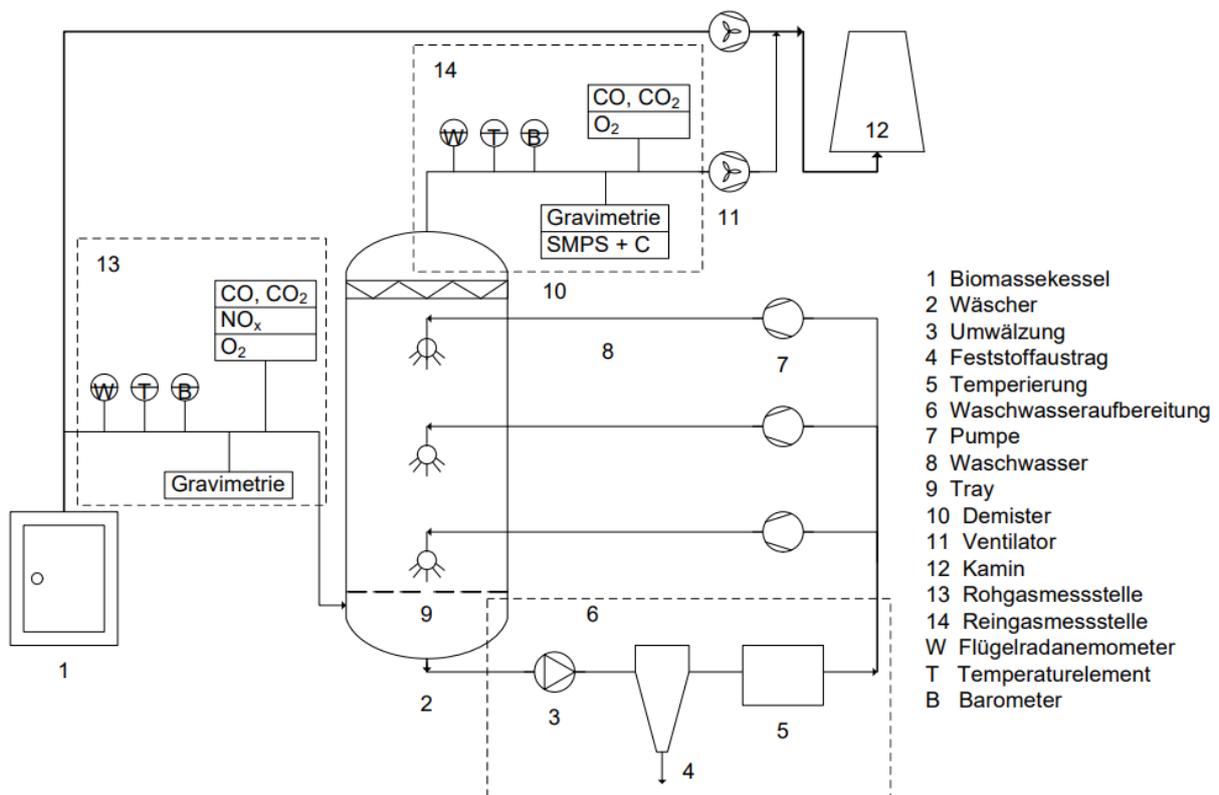


Bild 3-10: Schema des Sprühwäscher-Prüfstands

Zur Rauchgaserzeugung wurde ein kommerziell verfügbarer, automatisch beschickter Biomassekessel mit 24 kW thermischer Leistung in den Prüfstand integriert. Bei dieser Feuerung handelt es sich um eine Vorschubrostfeuerung, welche auch in der Lage ist, neben den üblichen holzartigen Brennstoffen wie Holzpellets und Holzhackschnitzel halmgutartige Biomasse zu verbrennen. In Bild 3-11 ist die Brennkammer des Kessels mit dem Vorschubrost dargestellt.



Bild 3-11: Brennkammer der Feuerung (links); Betrieb der Brennkammer (rechts).

In dieser Studie wurden als Brennstoffe verschiedene holzartige und halmgutartige Brennstoffe getestet. Dabei handelt es sich um Holzpellets (a), Holzhackschnitzel (b), Waldhackschnitzel (c), Stroh- (d) und Miscanthuspellets (e). Diese sind in Bild 3-12 dargestellt.

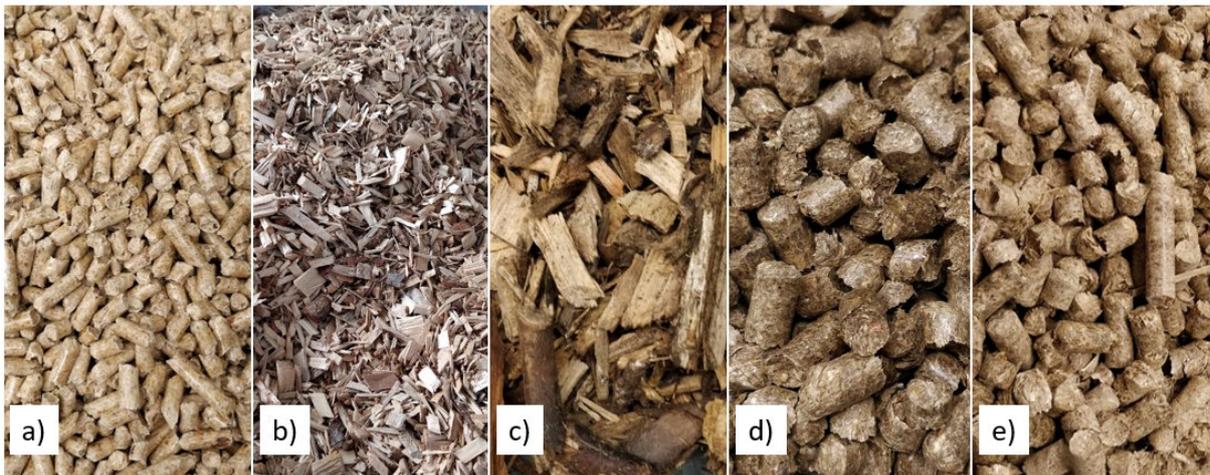


Bild 3-12: Verwendete Biobrennstoffe dieser Studie: Holzpellets (a), Holzhackschnitzel (b), Waldhackschnitzel (c), Stroh- (d) und Miscanthuspellets (e)

Die Brennstoffe wurden hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung im Brennstofflabor des IFK untersucht. Neben der Anwendung von Standardverfahren wie der Kurz- und der Elementaranalyse sowie der Heizwertbestimmung wurden auch die Konzentrationen an Spurenelementen und die Konzentration von bestimmten Ionen bestimmt. Dazu standen

diverse Verfahren wie z. B. Atomspektroskopie und Ionenchromatographie zur Verfügung. Eine genauere Beschreibung der Analyse ist in Kapitel aufgeführt.

Der Kessel wurde in den Versuchen unter Vollast betrieben, um konstante Versuchsbedingungen zu erhalten und somit die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Das Rauchgas strömte zu Versuchsbeginn, beim Anfahren des Kessels, über einen Bypass direkt in den Kamin, bis eine relativ konstante Abgastemperatur am Kesselausgang erreicht wurde. Nach Erreichen der max. Abgastemperatur wurde über eine neu programmierte Regelung ein variabel entnehmbarer Abgasstrom über einen Bypass in den jeweiligen Abscheider geleitet, wobei jeweils vor und hinter dem jeweiligen Abscheider eine Messstelle zur Erfassung der Abgaskomponenten installiert wurde. Die Messstellen vor dem jeweiligen Abscheider werden im Folgenden als Roh-, die Messstellen hinter den Abscheidern als Reingasmessstelle bezeichnet.

Über die Differenz der Staubkonzentration zwischen Roh- und Reingas kann dann über die Gleichung 3-7 der Abscheidegrad berechnet werden:

$$\eta = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3-7)$$

η Abscheidegrad in %

c_0 Rohgaskonzentration in mg/m^3

c_1 Reingaskonzentration in mg/m^3

Nach der ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) sind die gemessenen Emissionen auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 13 % und auf den Normzustand (trockenes Gas, $T_n=273,15 \text{ K}$, $p_n=1013,25 \text{ hPa}$) zu beziehen [42]. Des Weiteren sind zusätzliche Größen wie Druckdifferenz zwischen Abgas und Umgebungsluft sowie die Abgastemperatur zu messen. Daher wurden diverse weitere Messgrößen auf Roh- und Reingasseite messtechnisch erfasst. Neben dem O_2 -Gehalt wurden des Weiteren die gasförmigen Komponenten CO und CO_2 gemessen. Die verwendete Messtechnik ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: verwendete Messtechnik am Prüfstand

Messprinzip	Messgerät	Messgröße	Messbereich	Mess-einheit	Mess-verfahren
Drehzahlmessung des Flügelrads	Flügelrad-anemometer	w	0,3-120	m·s ⁻¹	Diskont.
Thermoelektrischer Spannungsmessung	Thermoelement Typ K (NiCr-Ni)	ϑ	0-1.300	°C	Kont.
NTC	Thermohygrometer	ϑ	0-230	°C	Diskont.
Kapazitive Feuchtmessung		ϕ _L	0-100	%	Diskont.
Absolutdruckmessung	Barometer	p	0-2.000	mbar	Diskont.
Differenzdruckmessung	Differenzdruckmessumformer	p	0-120	kPa	Kont.
Gravimetrie	Planfilterkopfgerät	c	0-50	mg·m ⁻³	Diskont.
Streulichtmessung	SMPS + C	dN/d(logD _p)	10 ⁷	cm ⁻³	Kont.
Infrarot-Fotometrie	NDIR-Sensor	CO	0-1.000	ppm	Kont.
			0-1	Vol.-%	Kont.
		CO ₂	0-20	Vol.-%	Kont.
Paramagnetismus	Thermomagnetischer Sauerstoffanalysator	O ₂	0-25	Vol.-%	Kont.
Chemilumineszenz	Chemilumineszenz-Detektor	NO, NO _x	0-10.000	ppm	Kont.

Der Sprühwäscher wurde bereits in einer vorherigen Studie am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik ausgelegt und entwickelt [43] und wurde für die Untersuchungen im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie umgebaut und der Feuerungsanlage nachgeschaltet. Zuletzt wurden die Roh- und Reingasmessstelle etabliert und die Geräte kalibriert. Der Sprühwäscher hat eine Gesamthöhe von 5,4m und einen Durchmesser von 0,3 m. Der Sprühwäscher verfügt über drei identische Sprühebene, in denen das Waschwasser zugeführt wird. Als Waschflüssigkeit wurde in dieser Studie Leitungswasser verwendet. Das Waschwasser wird dabei über Pumpen im Kreislauf gepumpt und tritt über Düsen in den Wäscher ein. Dabei bildet sich ein Spray aus feinen Tropfen, da die Flüssigkeit aufgrund der Düsengeometrie und der damit verbundenen Druck-Volumenstrom-Verhältnisse zerstäubt wird. Dieser zerstäubte Tropfenschwamm bildet die wesentliche Kontakt- und Stoffaustauschfläche für das Rauchgas.

Jede Sprühebene ist dabei 1,4 m hoch. Über die Wäscherhöhe verteilt befinden sich zudem 13 Druck- und Temperatur-Messstellen. Das System enthält zudem noch eine online pH- und Redox- sowie Dichte-Messung des zirkulierenden Waschwassers. Die graphische Benutzeroberfläche der Software des Sprühwäscherprüfstands ist in Kapitel 6 (Anhang) dargestellt.

Die mittels heterogener Kondensation vergrößerten Feinstpartikel sowie benetzte größere Partikel können sowohl im Waschwasser gebunden vorliegen oder am oberen Ende des Abscheiders mittels Demister abgeschieden/abgefangen werden. Bei dem verbauten Demister handelt es sich um einen LTV 400 der Firma Lechler GmbH [44].



Bild 3-13: Ausgebauter Demister

3.2.2 L/G-Einfluss

In dieser Machbarkeitsstudie wurden in mehreren Messkampagnen verschiedene Einflussfaktoren auf die Staubabscheideleistung untersucht. Ein Einflussfaktor auf die Staubabscheideleistung ist dabei das Verhältnis zwischen zugeführtem Waschwasser und dem im Gegenstrom durch den Wäscher geleiteten Rauchgasvolumenstrom, was im englischen als liquid-to-gas (L/G) bezeichnet wird.

In ersten Untersuchungen wurde durch Variation des L/G-Verhältnisses die Staubabscheidung durch reine Wasserverzugabe untersucht. Das Waschwasser wird am Wäscher im Kreislauf gepumpt und dem Rauchgas im Gegenstromprinzip über Vollkegeldüsen hinzugegeben. Eine Steigerung des L/G-Verhältnisses sollte, bei Auslösen einer heterogenen Kondensation im Wäscher, dabei zu einem steigenden Staubabscheidegrad führen. Eine beispielhafte Berechnung des L/G-Verhältnisses ist schematisch in Bild 3-14 dargestellt.

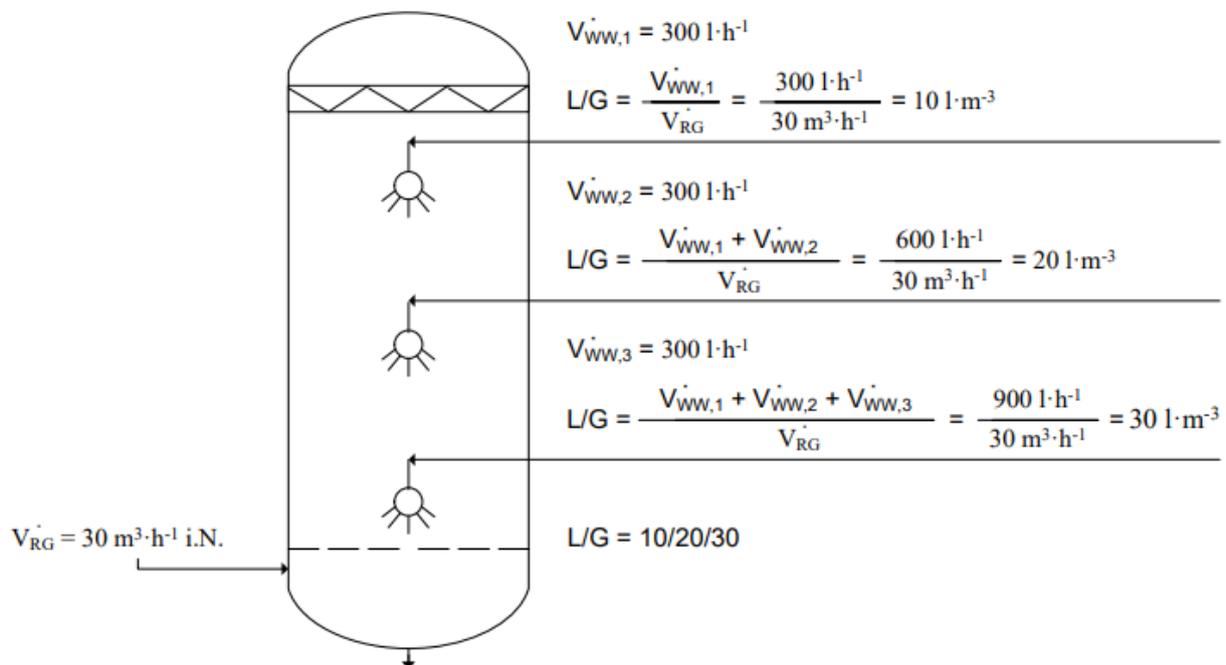


Bild 3-14: Exemplarische Berechnung des L/G-Verhältnisses

Hierbei beträgt der Rauchgasvolumenstrom (V_{RG}) $30 \text{ m}^3/\text{h}$ und die Wasserverzugabe beträgt in allen drei Wäscherstufen 300 l/h . Somit ergibt sich ein L/G-Verhältnis von 10 l/m^3 in der obersten Wäscherstufe, von 20 l/m^3 in der mittleren und von 30 l/m^3 in der untersten Wäscherstufe. Die Pumpenleistung ist dabei über eine Regelungssoftware in LabVIEW manuell einstellbar, der Wasserverzugabe pro Sprühebene kann in einer Spanne von 0 bis 900 l/h variabel eingestellt werden.

Tabelle 3-2: Versuchsplanung zu den L/G-Untersuchungen

Brennstoff	L/G in l/m ³ _{i.N.}	Anzahl Messungen	\dot{V}_{RG} in m ³ /h ¹ _{i.N.}	ΔT in °C
Holzhackschnitzel	0/0/0	2	30	/
	5/10/15	2	30	40
	10/20/30	2	30	40
	15/30/45	2	30	40
Strohpellets	0/0/0	2	30	/
	5/10/15	2	30	40
	10/20/30	2	30	40
	15/30/45	2	30	40

Die Versuchsplanung für die Untersuchungen zum L/G-Einfluss ist in Tabelle 3-2 dargestellt. Wie zu sehen, wurden vier unterschiedliche L/G-Verhältnisse untersucht, wobei stets eine Mindestanzahl von zwei Messpunkten je L/G-Verhältnis angestrebt wurde. Die Variation des L/G-Verhältnisses wurde über die Steigerung der Waschwasserpumpenleistung erreicht, während der Rauchgasvolumenstrom VRG konstant gehalten wurde, um eine vergleichbare Verweilzeit des Rauchgases im Wäscher zu ermöglichen. Der Temperaturgradient zwischen Waschwasser und Rauchgas sollte ebenfalls konstant bleiben. Für die Untersuchungen wurden zwei der fünf verfügbaren Brennstoffe ausgewählt, ein holzartiger (Holzhackschnitzel) und ein halmgutartiger Brennstoff (Strohpellets).

3.2.3 Untersuchungen zum Tray-Einfluss

In einer zweiten Untersuchungsreihe wurde der Wäscher durch einen Trayeinsatz im unteren Bereich des Wäschers, oberhalb der Rauchgaszuführung, ergänzt. Durch diese zusätzliche Wärme- und Stoffaustauschfläche für die Medien Waschwasser/Rauchgas sollte sich der Abscheidegrad zusätzlich steigern lassen. Wie von Schmidt und Karl [45] beschrieben, versteht man unter einem Tray eine Art Lochblech, welches im unteren Bereich von Wäschern installiert wird. Dadurch wird das Wasser, welches von den oberen Sprühebeneen kommt, auf dem Tray aufgestaut, während das zu reinigende Gas von unten durch das Tray strömt. Dadurch entsteht bei ausreichender Waschwasserzufuhr eine Sprudelschicht auf dem Tray, welche einen noch intensiveren Austausch zwischen Waschmedium und Abgas ermöglicht, wodurch sich die Staubabscheidung weiter steigern lässt. Beispiele aus der Praxis, wo Trays in Nasswäschern zur Abgasreinigung genutzt wurden, sind z. B. das Gemeinschaftskraftwerk (GKS) Schweinfurt sowie die Abfallverbrennungsanlage in Mannheim (MVV).

Dabei wurden die Versuche mit Trayeinbauten (ein- und zweistufig) mit den Untersuchungen ohne Tray ins Verhältnis gesetzt, um eine mögliche Steigerung der Staubabscheideleistung durch eine stufenweise Erhöhung der Traystufen zu untersuchen.

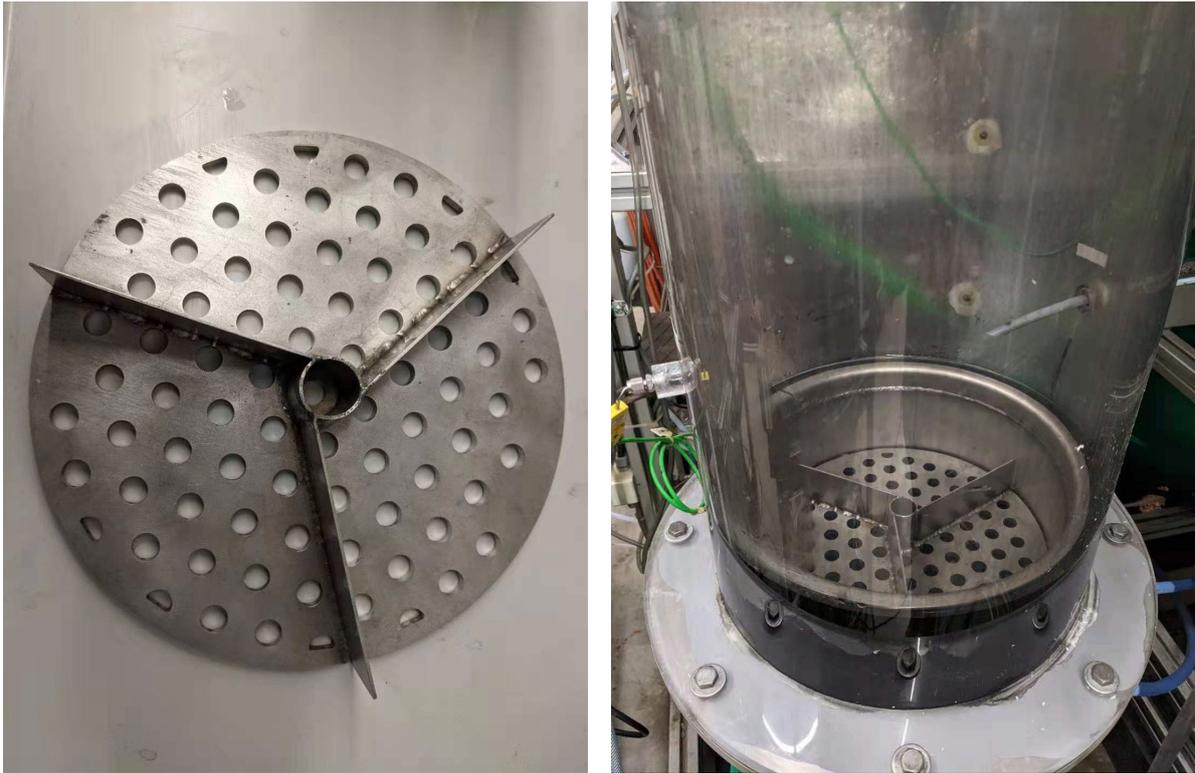


Bild 3-15: ausgebauter Tray (links); im Sprühwäscher eingebauter Tray (rechts)

Von Bedeutung für eine Sprudelschichtbildung auf dem Tray ist dabei der Perforationsgrad P . Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tray aus dieser Studie mit einem Perforationsgrad von 0,25, einem Lochabstand von 29 mm und einer Lochanzahl von 88 verwendet.

Tabelle 3-3: Versuchsplanung zu den Tray-Untersuchungen

Brennstoff	L/G in l m ⁻³ _{i.N.}	Anzahl Messungen	\dot{V}_{RG} in m ³ h ⁻¹ _{i.N.}	ΔT in °C
Waldhackschnitzel	17/47/77	2	30	40
Strohpellets	17/47/77	2	30	40
Miscanthuspellets	17/47/77	2	30	40

Die Versuchsplanung für die Untersuchungen zum Tray-Einfluss ist in Tabelle 3-3 dargestellt. Wie zu sehen, wurden bei den Trayversuchen Messungen mit drei verschiedenen Brennstoffen durchgeführt, wobei wieder mindestens ein holzartiger (Waldhackschnitzel) und mindestens ein halmgutartiger Brennstoff ausgetestet wurden. Die Versuche wurden, wie dargestellt, mit den drei verschiedenen Brennstoffen unter sonst gleichen Betriebsbedingungen durchgeführt.

3.2.4 Untersuchungen zur Düsengeometrie

Zum Erreichen einer Übersättigung im Wäscher und um ein Auswaschen der Staubfraktion im Wäscher zu ermöglichen, wurde dem Wäscher über drei Ebenen Washwasser mittels Pumpen zugeführt. Der Eintritt des Washwassers in den Waschturm erfolgt dabei über Düsen, wobei in dieser Studie Vollkegel- (bzw. Turbulenzdüsen) und Axial-Hohlkegeldüsen verwendet wurden, welche in einer vorherigen Studie am IFK entwickelt wurden. In einer dritten Messkampagne wurde versucht, durch eine Variation der Düsengeometrie eine feine Tröpfchenbildung zu erreichen, was wiederum einen Einfluss auf die Benetzung der Partikel und somit auf die Staubabscheidung haben sollte. Für diese Untersuchungen musste der Wäscher zunächst auseinander- und umgebaut werden.

Dabei wurden die verwendeten Vollkegeldüsen der Untersuchungen, die in Kapitel 3.2.2 und 3.2.3 beschrieben wurden, durch Axial-Hohlkegeldüsen ersetzt. Die Untersuchungen, die in den Kapiteln 3.2.4 und 3.2.5 beschrieben sind, wurden daher mit Axial-Hohlkegeldüsen durchgeführt. Diese Düsen sind an einer runden Kopfplatte aus Edelstahl angebracht, welche eine gleichmäßig druckgeführte Verteilung der Washflüssigkeit zu jeder Düse gewährleistet. Eine jede Kopfplatte enthält dabei 13 Düsen. Ein beispielhafter Düsenkopf, wie er in jeder Waschebene montiert war, ist in Bild 3-16 dargestellt.



Bild 3-16: Exemplarischer Düsenkopf in einer Waschebene

Die Größe der durch Zerstäubung entstehenden Tropfen bestimmt auch die Gesamt-Stoffaustauschoberfläche (Flüssigkeit/Gas) im Wäscher. Des Weiteren hat der entstehende Strahlwinkel des Tropfenregens eine wichtige Bedeutung für die Effizienz des Wäschers. Dabei führen die Vollkegel- bzw. Turbulenzdüsen zu einer Zerstäubung des Flüssigkeitsstrahls in ein Tropfenspektrum mit größeren Tropfen. Axial-Hohlkegeldüsen dagegen erzeugen feinstmögliche Tropfen im Vergleich zu den Vollkegeldüsen unter gleichen Betriebsbedingungen, verursacht durch verbaute Drallkörper mit Wendelnuten. Dadurch

lassen sich mit diesem Düsentyp Strahlwinkel bis zu 130 ° erzeugen. Die Versuchsplanung für die Untersuchungen mit den neu eingesetzten Axial-Hohlkegeldüsen ist in Tabelle 3-4 dargestellt. Da in den Untersuchungen zum Tray-Einfluss kein wesentlicher Einfluss des verwendeten Brennstoffes zu erkennen war, wurde entschieden, sich für die Untersuchungen mit neuer Düsengeometrie auf einen Brennstoff zu beschränken. Die Parameter Rauchgasvolumenstrom sowie Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Waschwasser wurden wie in 3.2.2 und 3.2.3 gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu den vorherigen Untersuchungen herzustellen.

Tabelle 3-4: Versuchsplanung zu den Untersuchungen mit Axial-Hohlkegeldüsen

Brennstoff	L/G in l m ⁻³ _{i.N.}	Anzahl Messungen	\dot{V}_{RG} in m ³ h ⁻¹ _{i.N.}	ΔT in °C
Waldhackschnitzel	17/47/77	4	30	40

3.2.5 Einfluss Wasserdampfzugabe

Zum Erreichen bestmöglicher Übersättigungen im Wäscher ist eine hohe relative Luftfeuchtigkeit vorteilhaft. Daher wurde in einer letzten Messkampagne ein Dampfgenerator in den Versuchsstand integriert, um durch einen erhöhten Wasserdampfgehalt im Rauchgas eine höhere Übersättigung zu erreichen und somit die Staubabscheidung weiter zu optimieren. Für diese Untersuchungen wurde dem Rauchgas vor dem Sprühwäschereintritt ein konstanter Wasserdampfstrom mittels eines Dampfgenerators hinzudosiert, um eine hohe Sättigung des heißen Rauchgases zu erreichen. Bei anschließender schlagartiger Abkühlung im Sprühwäscher lässt sich dann eine Übersättigung erreichen. Zum Erfassen des eintretenden Wasserdampfstromes in den Wäscher wurde dem Zulauf des Dampfgenerators (FlowerW, 6 kW) eine Wasseruhr vorgeschaltet, um aus der verbrauchten Wassermenge den Wasserdampfanteil berechnen zu können.

3.2.6 Waschwasseranalytik

Die Analyse der Staubabscheideleistung des Wäschers wurde neben den gravimetrischen Staubmessungen zusätzlich durch eine Waschwasseranalytik unterstützt. Das Waschwasser wurde bei den dargestellten Untersuchungen im Kreislauf geführt, sodass sich bei einer effektiven Abscheidung im Wäscher wasserlösliche Abgasbestandteile wie die Kaliumsalze über die Zeit im Waschwasser akkumulieren sollten. Als Waschwasser wurde in dieser Studie handelsübliches Leitungswasser eingesetzt, daher wurden als Referenzwerte einer unbelasteten Probe die Analysenergebnisse des Zweckverbandes Bodensee-Wasserversorgung herangezogen [46]. Ziel der Waschwasseruntersuchung nach einer Versuchsdauer von 75 Betriebsstunden war somit, eine mögliche Anreicherung wasserlöslicher Abgaspartikel durch die Messung der Konzentrationen an K⁺, Cl⁻ und Sulfat (SO₄²⁻) nachzuweisen.

Die Konzentrationen der ausgewählten Anionen und Kationen wurden mittels induktiv gekoppelter Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) mit einem Varian Agilent 725-ES, die Konzentration an Chlorid mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 10304-1 bestimmt. Darüber hinaus wurden zusätzlich noch Messungen der Leitfähigkeit und des pH-Werts der Probe nach DIN EN 27888 und DIN EN ISO 10523 im Labor durchgeführt.

3.3 Analyse der Staubabscheidung am Referenzabscheider

Die mit dem neu entwickelten Sprühwäscher erreichbaren Abscheidegrade sollten mit den Abscheidegraden, welche sich üblicherweise an Holzfeuerungen erreichen lassen, verglichen werden. Im Bereich der Kleinfeuerungsanlagen ist der Einsatz von elektrostatischen Abscheidern weit verbreitet. Daher wurde in dieser Studie vom Kooperationspartner Keller Lufttechnik GmbH + Co. KG ein elektrostatischer Abscheider als Referenzabscheider entwickelt. Der Abscheider wurde für Volumenströme $\leq 100 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt, kann aber auch bei niedrigeren Volumenströmen eingesetzt werden. Ziel war es, eine Referenzgröße zu den am Wäscher erzielten Abscheidegraden zu bekommen.

Der ESP, welcher in Bild 3-17 dargestellt ist, wurde als Röhrenabscheider mit Edelstahldrähten als Sprühelektroden konstruiert. Das Abscheidepaket, welches in Bild dargestellt ist, verfügt über 4×6 Kanäle mit einer Durchströmungsfläche von insgesamt $0,24 \text{ m}^2$ und einer Gesamtabseidefläche von $1,54 \text{ m}^2$.



Bild 3-17 a) Elektrostatischer Abscheider b) Abscheidepaket (Innenansicht)

Zum Nachweis der Praxistauglichkeit wurde der Abscheider im Labor von Keller Lufttechnik in einen Prüfstand verbaut und auf seine Abscheideleistung hin vorab untersucht. Dazu wurde ein Testaerosol (Hon- und Schleiföl, CUT-MAX WL SH 10) mittels Druckluft über einen Aerosolgenerator von Topas (Typ ATM 241 Atomizer) auf der Rohgasseite zugeführt und die Roh- und Reingaskonzentrationen vor und hinter dem Abscheider in mehreren Untersuchungen gemessen und daraus die Abscheidegrade bestimmt. Dabei wurde ein mittlerer Abscheidegrad von 68 % bei einem Volumenstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Eingangs-Rohgasbeladung von $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ erreicht. Diese Ergebnisse wurden mit einem Handmessgerät DustTrak II (Artikel-Nr. 8532) von TSI ermittelt.

Nach einer Simulation von Keller Lufttechnik lässt sich dieser jedoch durch Variation der Betriebsparameter wie Erhöhung der Spannung (von z. B. 12 auf 14 kV) oder durch Verringerung des zu reinigenden Volumenstromes auf mindestens 81 % steigern, was einem in der Praxis üblichen Abscheidegrad beim Einsatz an Kleinfeuerungsanlagen darstellt. Durch Optimierung der Parameter Spannung und Volumenstrom kann sich dieser ggf. weiter steigern lassen. Dies sollte in experimentellen Untersuchungen am IFK untersucht werden.

Die Versuchsplanung für die Untersuchungen am elektrostatischen Referenzabscheider zur Eingrenzung des optimalen Spannungsbereiches ist in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5: Versuchsplanung zu den ESP-Untersuchungen (Spannungsreihe)

Brennstoff	U in kV	V in m ³ h ⁻¹	T ₀ in °C	T ₁ in °C
Waldhackschnitzel	0,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Waldhackschnitzel	11,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Waldhackschnitzel	12,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Waldhackschnitzel	12,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Waldhackschnitzel	13,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Waldhackschnitzel	13,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Waldhackschnitzel	14,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	0,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	11,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	12,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	12,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	13,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	13,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Strohpellets	14,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	0,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	11,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	12,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	12,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	13,0	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	13,5	100	110 ± 20	70 ± 20
Miscanthuspellets	14,0	100	110 ± 20	70 ± 20

Für diese Untersuchungen wurden drei der verfügbaren Brennstoffe ausgewählt und dabei jeweils die Spannung in 0,5 kV Schritten variiert. Je Spannungspunkt erfolgte eine simultane Roh- und Reingasmessung, aus der dann der Abscheidegrad bestimmt werden konnte. Weitere Einflussgrößen wie Volumenstrom und Roh- und Reingastemperatur wurden mittels Radialventilator und Heißluftgebläse konstant gehalten, um vergleichbare Versuchsbedingungen zu garantieren.

Mit der dargestellten Versuchsplanung ließ sich der Abscheidegrad hinsichtlich der Gesamtstaubmasse bestimmen. Um einen Einfluss auch auf die Partikelanzahl, im submikronen Bereich, zu analysieren, wurden des Weiteren Messungen mit einem Scanning Mobility Particle Sizer + Condensation Particle Counter (SMPS + C, Modell 5420, Fa. GRIMM) durchgeführt. Die Versuchsplanung für diese Untersuchungen ist in Tabelle 3-6 dargestellt.

Tabelle 3-6: Versuchsplanung zu den ESP-Untersuchungen (Partikelanzahlverteilung)

Brennstoff	ESP Status	U in kV	Anzahl Scans	V in m ³ /h	T ₁ in °C
Waldhackschnitzel	an	13,5	10	100	70 ± 20
Waldhackschnitzel	aus	13,5	10	100	70 ± 20
Strohpellets	an	13,5	10	100	70 ± 20
Strohpellets	aus	13,5	10	100	70 ± 20
Miscanthuspellets	an	13,5	10	100	70 ± 20
Miscanthuspellets	aus	13,5	10	100	70 ± 20

Für die drei ausgewählten Brennstoffe wurde dabei eine konstante Spannung aus dem optimalen Arbeitsbereich ausgewählt, in diesem Fall 13,5 kV. Weitere Einflussgrößen wie Rauchgasvolumenstrom und Temperatur am ESP wurden ebenfalls konstant gehalten, um vergleichbare Bedingungen zu ermöglichen. Um eine ausreichende Datengrundlage zu schaffen, wurde entschieden, ein Minimum von 10 Scans des SMPS pro Versuchsdurchführung zu wählen, um eine ausreichende Datengrundlage zu haben und mögliche Ausreißer aufgrund von z. B. „particle re-entrainment“ zu identifizieren.

Beim „particle re-entrainment“ können Partikel, welche bereits im ESP abgeschieden waren, wieder losgelöst werden und dann zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Reingaskonzentrationen und gleichzeitig zu einem kurzzeitigen Absinken der Abscheideeffizienz führen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden sämtliche relevanten Ergebnisse und Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie vorgestellt.

4.1 Tropfenwachstum

Ein zentraler Untersuchungsgegenstand waren die Prozesse der heterogenen Kondensation an Aerosolpartikeln. Eine detaillierte Analyse war deswegen herausfordernd, weil der Prozess in sehr kleinen Skalen und sehr schnell geschieht. Das 3WEM erlaubt allerdings eine indirekte Messung über die Mie-Streuung des Aerosols in Abtastraten bis 750 Hz. Aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen des Messgerätes ist die Untersuchung des Tropfenwachstums mit gleicher Abtastrate möglich. Das speziell für den Prüfstand entwickelte Simulationsmodell konnte anhand der Messungen validiert werden. Dieses dient als wertvolles Werkzeug, die Zusammenhänge der Teilprozesse der heterogenen Kondensation im Detail zu verstehen. Zudem kann es auch zu Optimierungszwecken eingesetzt werden. Bild 4-1 zeigt eine Gegenüberstellung der Simulation und der Messung am Beispiel von KCl-Partikeln. Zu diesem Zeitpunkt der Messung, waren die Drifts temporär nahezu nicht vorhanden. Neben der Auslenkung des Kolbens (gleichförmige Bewegung ohne Überschwinger) wurden weitere Aspekte in der Simulation vereinfacht angenommen oder bleiben sogar ganz unberücksichtigt (z.B. Wärmeeintrag in die Messkammer). In Anbetracht dessen ist die zeitweise grobe Übereinstimmung der Kurven als ein Erfolg anzusehen.

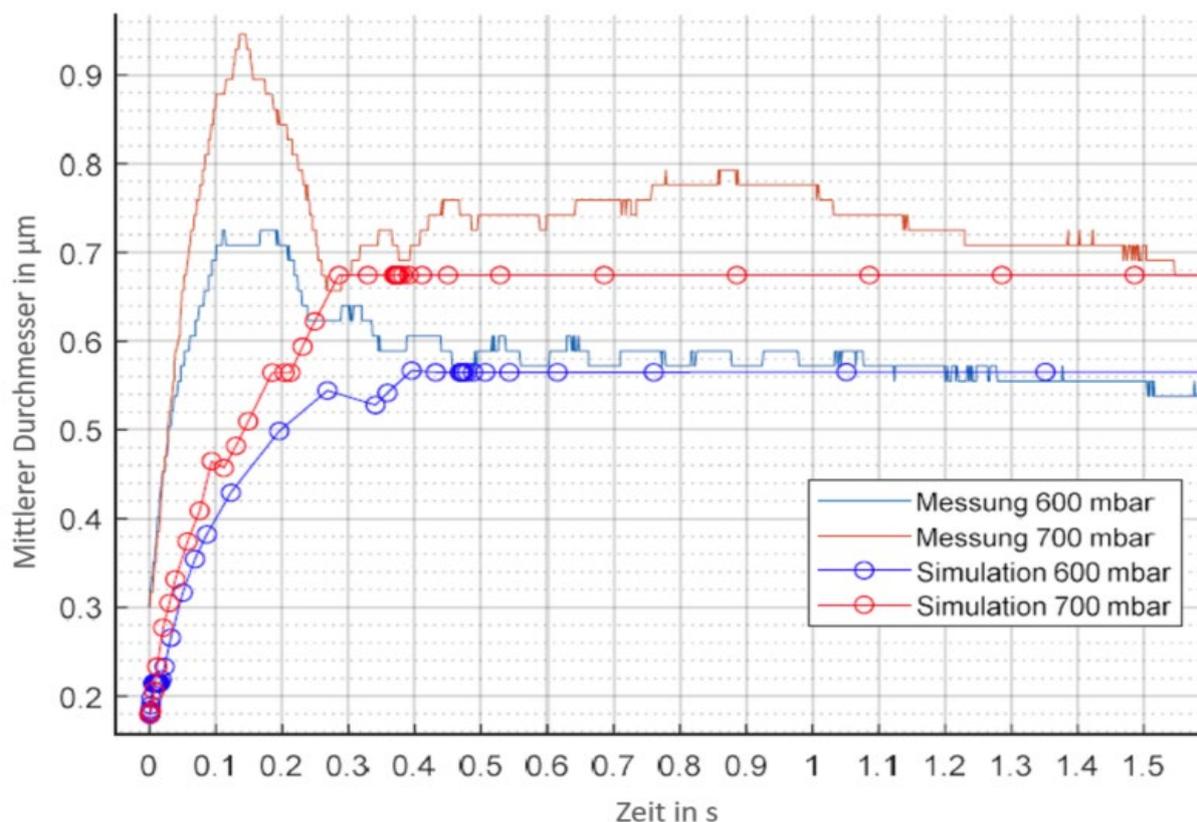


Bild 4-1: Gegenüberstellung einer exemplarischen Messung des Tropfenwachstums an KCl-Partikeln mit dessen Simulation

4.2 Kritische Übersättigungen bei verschiedenen Stoffen

In diesem Unterkapitel sollen die Ergebnisse der kritischen Übersättigungen, klassifiziert nach unterschiedlichen Stoffarten sowie von Stoffgemischen, dargestellt werden.

4.2.1 Lösliche Stoffe

In Tabelle 4-1 sind die ermittelten Sättigungsgrade für in Wasser lösliche Stoffe dargestellt, oberhalb derer eine heterogene Kondensation auf den Partikeln des feuchten Aerosols eingetreten war. Prinzipiell ist zu erwarten, dass die Werte der löslichen Stoffe geringfügig niedriger ausfallen, als die der unlöslichen. Theoretisch können bei diesen Stoffen auch Werte leicht unterhalb 1 auftreten, sofern der Erweichungspunkt überschritten ist und entsprechende Oberflächeneigenschaften der Partikel vorliegen.

Tatsächlich wurden bei KCl und K_2SO_4 kritische Sättigungswerte knapp oberhalb von 1 festgestellt. Zwar neigen auch diese Stoffe dazu, dass bereits unterhalb von 1 Wasserdampf an ihre Oberflächen diffundiert und sich dabei erste Lösungstropfen bilden, allerdings schien dieser Effekt aufgrund der Geringfügigkeit wohl nicht anhand der Lasertransmission erfassbar zu sein.

Bei $NaHCO_3$ hingegen setzten erhöhte Transmissionsverluste erheblich unterhalb von 1 ein. Hier schien nach Überschreitung des Erweichungspunktes ein Teilkondensationsprozess so intensiv auszufallen, dass dieser anhand der Transmissionsmessungen eindeutig zu erkennen ist. Die Belastbarkeit dieses Wertes sollte daher überprüft werden.

Bei einer als idealisiert angenommenen konstanten Übersättigung laufen Kondensationsprozesse erst dann uneingeschränkt ab, wenn die kritischen Übersättigungen erreicht werden. Dies ist bei den Werten von KCl und K_2SO_4 der Fall. Der Unterschied der Sättigungsgrade wird hier durch die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Wechselwirkungen zwischen der Oberfläche der Partikel und dem Wasserdampf und durch die Geometrie und Struktur der verschiedenen Stoffe begründet.

Tabelle 4-1: Kritische Sättigungsgrade löslicher Stoffe

	KCl	K_2SO_4	$NaHCO_3$
S_{kritisch}	1,02	1,00	0,86

4.2.2 Unlösliche Stoffe

Bei unlöslichen (MgO und Fe_2O_3) oder nahezu unlöslichen Stoffen (CaO) sind generell höhere erforderliche Übersättigungen für Kondensationsprozesse zu erwarten. Vor allem der Wert von MgO bestätigte diese Erwartung. Weniger auffallend war dies bei Fe_2O_3 . Die Oberflächeneigenschaften der Partikel scheinen hier nahe an der ideal benetzbaren Kugeloberfläche zu sein, deren kritische Übersättigung anhand der Kelvingleichung (vgl. Gleichung) bestimmt werden kann. Auffällig ist auch hier ein Wert unterhalb von 1 für CaO . Zwar ist dieser Stoff im Gegensatz zu den anderen zumindest etwas löslich, ob diese Eigenschaft allerdings für eine Teilkondensation, um den Erweichungspunkt ausreicht, und ob diese anhand der Lasertransmission detektiert werden konnte ist auch hier fraglich und bedarf

weiterer wissenschaftlicher Bestätigung. Dass besondere Effekte von Wasserdampf an der Oberfläche von CaO ab einem bestimmten Dampfdruck vorherrschen, beschreibt die Arbeit von Fujimori et al. in aller Ausführlichkeit [47].

Tabelle 4-2: Kritische Sättigungsgrade nicht löslicher Stoffe

	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃
S _{kritisch}	1,15	0,91	1,02

4.2.3 Stoffgemische

Die Löslichkeit einzelner Bestandteile in Wasser hat einen wesentlichen Einfluss auf die Zerstäubung dieses Stoffgemisches. Im nachfolgenden Diagramm sind die Laborergebnisse vor und nach der Zerstäubung einer exemplarischen Holzasche zu erkennen.

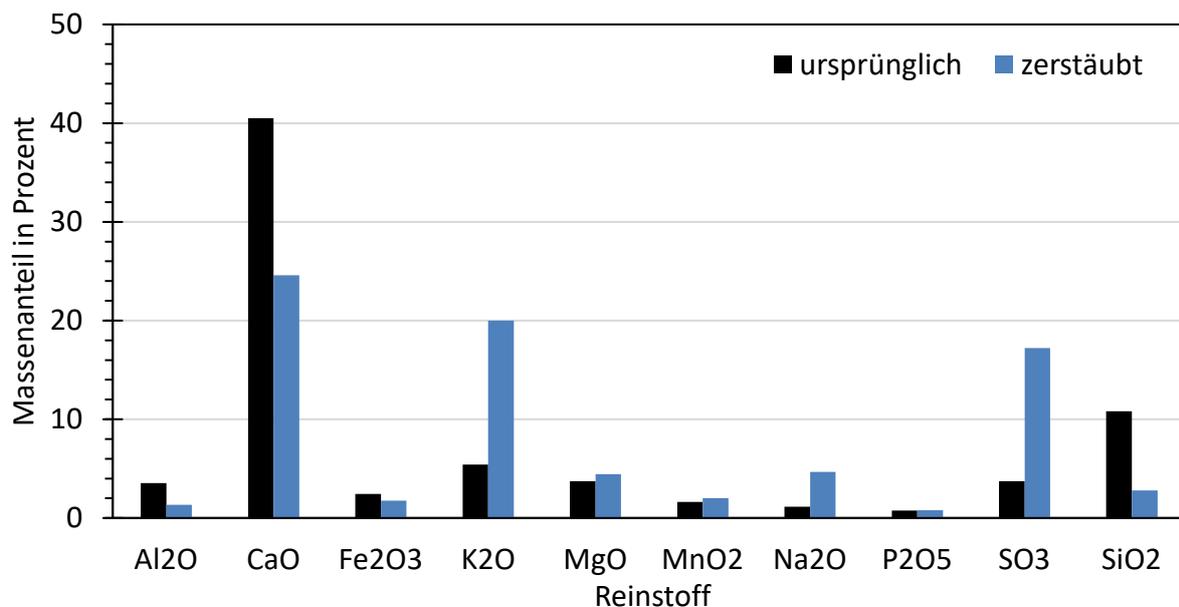


Bild 4-2: Masseanteile einzelner Stoffbestandteile vor und nach der Zerstäubung der Holzasche

Die Änderungen vor und nach der Zerstäubung zeigen sich vor allem in den gesteigerten Anteilen von Kaliumoxid, Natriumoxid und Schwefeltrioxid, sowie im gesunkenen Anteil von Siliziumdioxid und Kalziumoxid. Es ist auffällig, dass die löslichen Bestandteile in der zerstäubten Asche zu- (Kaliumoxid und Natriumoxid) und die unlöslichen Bestandteile eher abnehmen (Siliziumoxid und Kalziumoxid) [48]. Diese Aufteilung ist in Bild 4-3 dargestellt.

Die Hydrolyse bezeichnet eine Reaktion eines Stoffes mit Wasser, beispielsweise reagiert Bariumoxid BaO mit Wasser zu Bariumhydroxid Ba(OH)₂. Es ist allerdings nicht ganz klar, ob diese Hydrolyse auch in der betrachteten Asche stattgefunden hat. Da auch in der zerstäubten Asche das Barium als Oxid vorliegt, schien es nicht so zu sein.

Die gut erkennbare Abnahme der unlöslichen Partikel spricht dafür, dass sich Lösungen besser zerstäuben lassen als Suspensionen. Eine Ausnahme bildete dabei aber beispielsweise das sehr schlecht lösliche MgO. Die Tatsache, dass noch weitere Stoffeigenschaften einen Einfluss auf die Zerstäubung haben, schwächt die Eignung dieses Verfahrens.

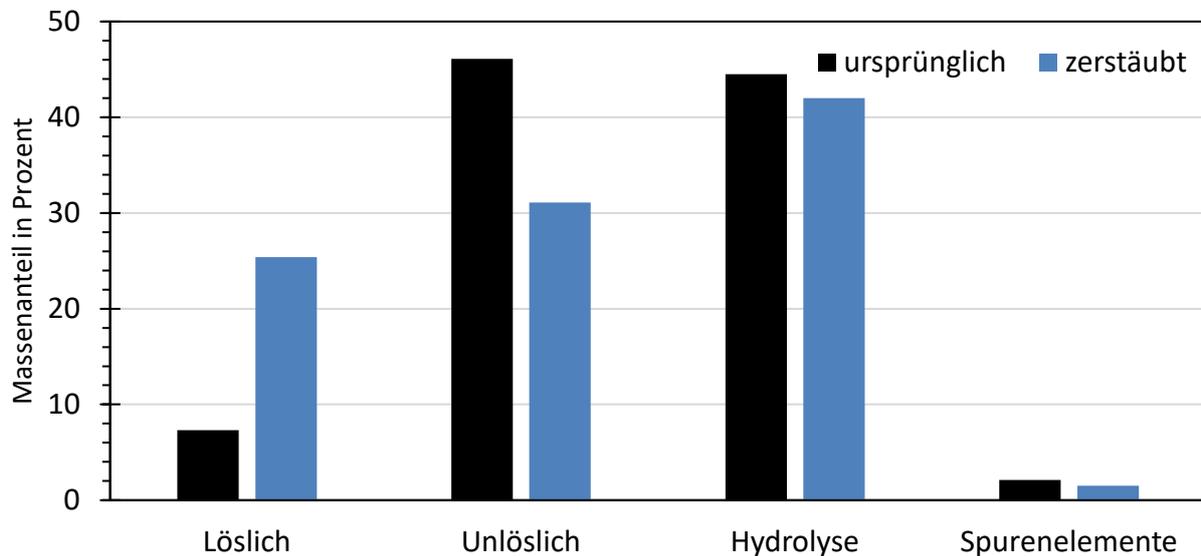


Bild 4-3: Wechselwirkung der Holzasche mit Wasser (vor und nach der Zerstäubung)

Neben der geschilderten Problematik konnte anhand der 3WEM-Messergebnisse nicht analysiert werden, an welchen Partikeln bzw. an welchem Stoff die Kondensation bei welcher Übersättigung in welchem Maße stattgefunden hat. Belastbare Ergebnisse zur kritischen Übersättigung sind mit dieser Messtechnik daher nur für Reinstoffe zu erwarten.

4.3 Staubabscheidung im Wäscher

Ein Ziel des Vorhabens ist es, die in Kapitel 4.2 identifizierten kritischen Übersättigungen auf die Randbedingungen im Wäscher zu übertragen. Die örtlich nahezu gleichmäßig verteilte Übersättigung, die aus einer Expansion eines geschlossenen Systems resultiert, kann in einem Wäscher so nicht zur Verfügung gestellt werden. Komplexe Wärme- und Stofftransporte sorgen für örtlich ungleichmäßig verteilte Sättigungen, welche sich messtechnisch quasi nicht erfassen lassen. Ohne aufwändige numerische Simulationen, ist es daher eingeschränkt möglich, die Erkenntnisse aus Kapitel 4.2 auf vorliegende örtlich aufgelöste Zustände im Wäscher zu übertragen. Dennoch stellen diese Erkenntnisse ein wertvolles Werkzeug dar, um zu bestimmen bei welchen Stoffen im Wäscher mit Kondensationsprozessen zu rechnen ist und welche Mindestübersättigung erforderlich ist, um alle Bestandteile zu aktivieren. Auch die neue Erkenntnis, dass sich die Partikel aller untersuchten Bestandteile aktivieren lassen und zu Tropfen heranwachsen, bestätigt das Potential der heterogenen Kondensation zur Aerosolabscheidung bei Biomassefeuerungen.

4.3.1 Brennstoffanalytik

Wesentliches Ziel der Machbarkeitsstudie war es, die Aktivierbarkeit von Aerosolen aus der Verbrennung halmgutartiger Biomasse zu bestimmen sowie die Abscheideeffizienz bei der Verbrennung dieser Brennstoffe zu untersuchen. Dafür wurde am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik eine neue Feuerung mit thermischer Leistung von 20 kW in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um eine Vorschubrostfeuerungsanlage, welche auch für die Verbrennung von halmgutartiger Biomasse geeignet ist. Bei den in dieser Studie eingesetzten halmgutartigen Brennstoffen handelt es sich um handelsübliche Stroh- und Miscanthuspellets. Des Weiteren wurden neben den Versuchen mit halmgutartigen Brennstoffen auch Versuche bei der Verbrennung von holzartigen Brennstoffen wie Holzpellets, Holz hackschnitzel und Waldrestholz durchgeführt. Diese Brennstoffe wurden vorab im Labor des Institutes für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik auf ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht. Der Wassergehalt der Proben wurde nach DIN EN ISO 18134-3 durch Trocknung bei 105°C im Trockenofen bestimmt. Der Aschegehalt und der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen wurden nach DIN EN ISO 18122 und DIN EN ISO 18123 analysiert. Der Heizwert der Proben wurde mittels Bombenkalorimeter nach DIN EN ISO 18125 bestimmt. Die Konzentrationen der Brennstoffe an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff wurden nach DIN EN ISO 16948 mittels Elementaranalysator bestimmt. Haupt- und Spurenelemente wurden mit einem Varian 725-ES nach DIN EN ISO 16967 und DIN EN ISO 16968 mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Laboranalysen sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Stoffzusammensetzung aus der Laboranalyse

Komponente	Einheit		Holz- pellets	Holzhack- schnittel	Waldhack- schnittel	Stroh- pellets	Miscan.- pellets
Wassergehalt	m.%		6,3	6,5	34,5	11,7	7,0
Aschegehalt	wf	m.%	0,4	1,0	6,0	5,4	3,7
Heizwert	wf	J/g	20159	19932	19320	18454	18969
<i>Elementaranalyse</i>							
C	wf	m.%	50,2	50,1	48,4	46,7	47,7
H	wf	m.%	6,1	6,0	5,7	5,7	5,8
N	wf	m.%	0,098	0,292	0,489	0,744	0,426
O	wf	m.%	43,1	40,7	37,6	40,0	41,0
S	wf	mg/kg	203	393	518	788	426
Cl	wf	mg/kg	260	380	180	840	880
<i>Hauptelemente</i>							
Al	wf	mg/kg	56,4	94,3	1693,0	968,0	350,0
Ca	wf	mg/kg	1060	2192	11517	3347	2621
Fe	wf	mg/kg	75,7	194	1181	734	430
K	wf	mg/kg	532	625	2650	6954	4531
Mg	wf	mg/kg	167	218	1265	1115	306
Mn	wf	mg/kg	85,7	159	197	32,6	30,3
Na	wf	mg/kg	28,9	27,0	233,0	135,0	48,6
P	wf	mg/kg	84	60	367	676	763
Si	wf	mg/kg	450	1844	9603	13118	9297
<i>Spurenelemente</i>							
As	wf	mg/kg	0,87	<0,25	0,441	<0,25	<0,25
Cd	wf	mg/kg	<0,13	0,188	0,388	0,240	0,288
Cu	wf	mg/kg	1,07	1,37	5,47	2,68	2,45
Ni	wf	mg/kg	2,15	7,78	24,3	10,8	7,14
Pb	wf	mg/kg	0,63	<0,5	1,15	1,17	<0,5
Zn	wf	mg/kg	9,0	12,4	20,1	10,3	16,3

Wie zu sehen, unterscheiden sich die eingesetzten Brennstoffe deutlich in ihrer Charakteristik, was eine deutliche Variation der Staubemissionen erwarten lässt. Die Holzpellets und Holzhackschnittel weisen mit 0,4 bzw. 1,0 m-% relativ niedrige Aschegehalte auf, wohingegen die Waldhackschnittel sowie die beiden halmgutartigen Biobrennstoffe mit 3,7 bis 6,0 m-% deutlich höhere Aschegehalte aufweisen. Die Konzentrationen der aerosolbildenden Elemente wie Ca, Na, K, S und Cl sind bei den drei genannten Brennstoffen zum Teil um ein Vielfaches höher, sodass die partikelförmigen Emissionen hier deutlich höher ausfallen sollten.

4.3.2 Rohgasemissionen

Die Abscheideeffizienz des Wäschers wurde bei der Verbrennung der in Tabelle 4-3 dargestellten Biobrennstoffe getestet, wobei die Vorschubrostfeuerung stets unter Vollast betrieben wurde. Die eingesetzten Brennstoffe unterscheiden sich dabei, wie dargestellt, deutlich in ihrer Zusammensetzung. Die Rohgasmesswerte (c_0), welche während der Verbrennung der fünf verschiedenen Biobrennstoffe gemessen wurden, sind in Bild 4-4 dargestellt.

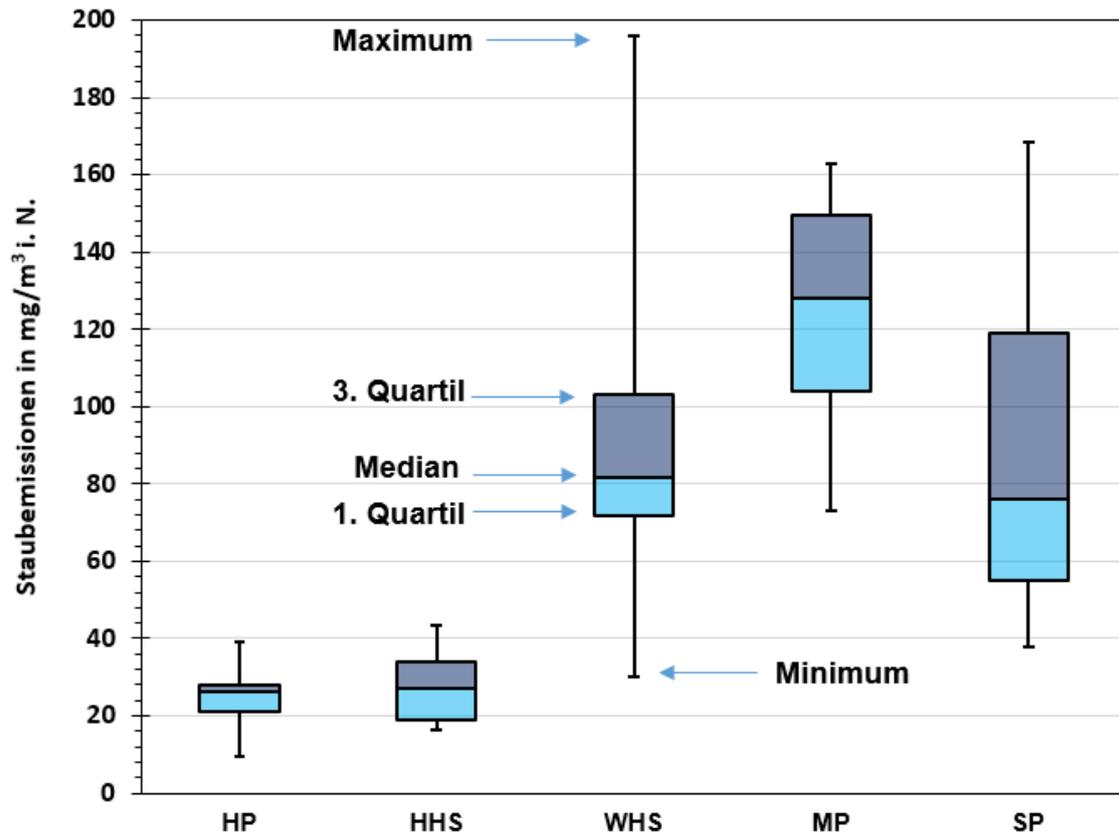


Bild 4-4: Rogasmesswerte verschiedener Biobrennstoffe: Holzpellets (HP), Holzhackschnitzel (HHS), Waldhackschnitzel (WHS), Miscanthuspellets (MP), Strohpellets (SP)

Wie zu sehen, ist die Spannbreite der Einzelmesswerte dabei sehr abhängig vom jeweiligen Brennstoff. Die Verbrennung der Brennstoffe mit niedrigeren Aschegehalten wie Holzpellets (HP) und Holzhackschnitzel (HHS) führte bei den Messungen zu Gesamtstaubkonzentrationen in einem Bereich von ca. 10 bis 40 mg/m³, wohingegen die Verbrennung der Waldhackschnitzel (WHS), Miscanthuspellets (MP) und Strohpellets (SP) zu deutlich höheren Konzentrationen in einem Bereich von 30 bis hin zu 200 mg/m³ führte. Dies ist zum einen durch die deutlich höheren Gehalte an Aerosolbildnern in den drei genannten Brennstoffen zu erklären bzw. bei den Waldhackschnitzeln auch durch den höheren Feuchtegehalt, welcher auch die Verbrennung negativ beeinflussen kann.

4.3.3 Ergebnisse der L/G-Versuche

Um den Einfluss des L/G-Verhältnisses auf die Staubabscheideleistung zu untersuchen, wurden Verbrennungsversuche mit Holzhackschnitzeln und Strohpellets durchgeführt. Hierbei betrug der Rauchgasmassenstrom \dot{V}_{RG} 30 m³/h i.N., welcher auf Betriebsbedingungen bezogen bei etwa 45 m³/h lag. Der Staubabscheidegrad wurde anhand der Gleichung 3-4 ermittelt. Wie in Bild zu sehen ist, nahm der Abscheidegrad bei beiden Biobrennstoffen mit der Erhöhung der L/G-Verhältnisse zu, und zwar von ca. 3 auf 30 %, wenn das L/G-Verhältnis von 0/0/0 auf 15/30/45 l/m³ anstieg. Der Grund dafür war, dass in der Waschzone eine übersättigte Dampfphase vorlag. Hiermit wurden die feinen Partikel durch heterogene Kondensation vergrößert und anschließend aufgrund der gestiegenen Trägheit im Wäscher entfernt. Zudem

lässt sich dem Bild 4-5 entnehmen, dass sich der Wärme- und Stoffaustausch zwischen Waschwasser und Rauchgas mit zunehmendem L/G-Verhältnis verstärkt, wodurch sich der Grad und die Zone der Übersättigung erhöhen, so dass mehr Partikel zum Wachstum aktiviert und der Abscheidegrad verbessert werden kann.

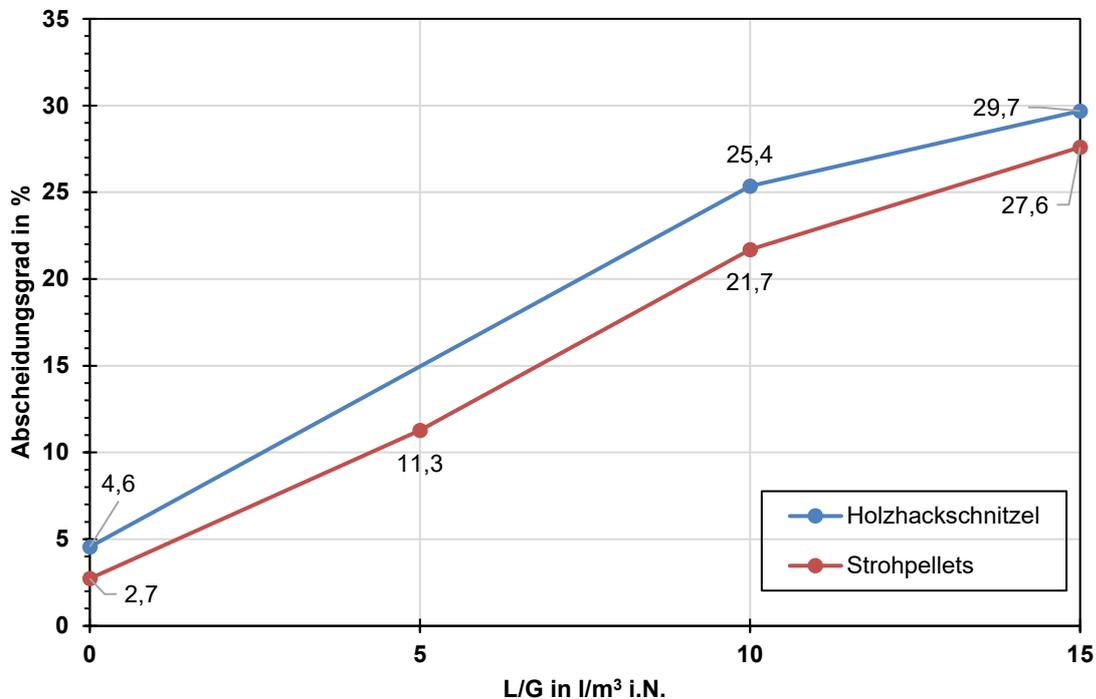


Bild 4-5: Abscheidegrad in Abhängigkeit des L/G-Verhältnisses

4.3.4 Ergebnisse Tray

In einer ersten Versuchskampagne wurde der Sprühwäscher bei der Verbrennung von Holzackschnitzeln und Strohpellets getestet. Jedoch fielen die Abscheidegrade mit den eben dargestellten Werten < 50 % noch relativ gering aus. Deshalb wurde der Wäscher umgebaut und im unteren Bereich des Wäschers, wo das Rauchgas eintritt, das in Kapitel 3.4 dargestellte Tray eingebaut, um eine mögliche Verbesserung der Staubabscheidewirkung durch eine zusätzliche Wärme- und Stoffaustauschfläche zu untersuchen.

In den Untersuchungen mit dem Tray, in Kombination mit den Vollkegeldüsen, wurden als Brennstoffe Strohpellets, Waldhackschnitzel und Miscanthuspellets verwendet. In den Untersuchungen mit dem Tray wurde die Pumpenleistung (Waschwasserzufuhr) deutlich gesteigert, um eine Sprudelschicht auf dem Tray zu erhalten. Dies sollte den Austausch zwischen den Medien Rauchgas, welches von unten nach oben den Wäscher durchströmt, und dem Waschwasser, welches dem Rauchgas entgegengesetzt den Wäscher passiert, intensivieren. Daher wurden in dieser zweiten Messkampagne neben dem Einsatz eines Trays auch die L/G-Verhältnisse erhöht (17/47/77).

Die Ergebnisse aus der ersten Messkampagne, ohne Trayeinsatz, wurden mit den Ergebnissen dieser Kampagne (mit Trayeinsatz, höheres L/G) verglichen. Die mittleren Abscheidegrade in Abhängigkeit des gewählten L/G-Verhältnisses sind in Bild 4-6 dargestellt.

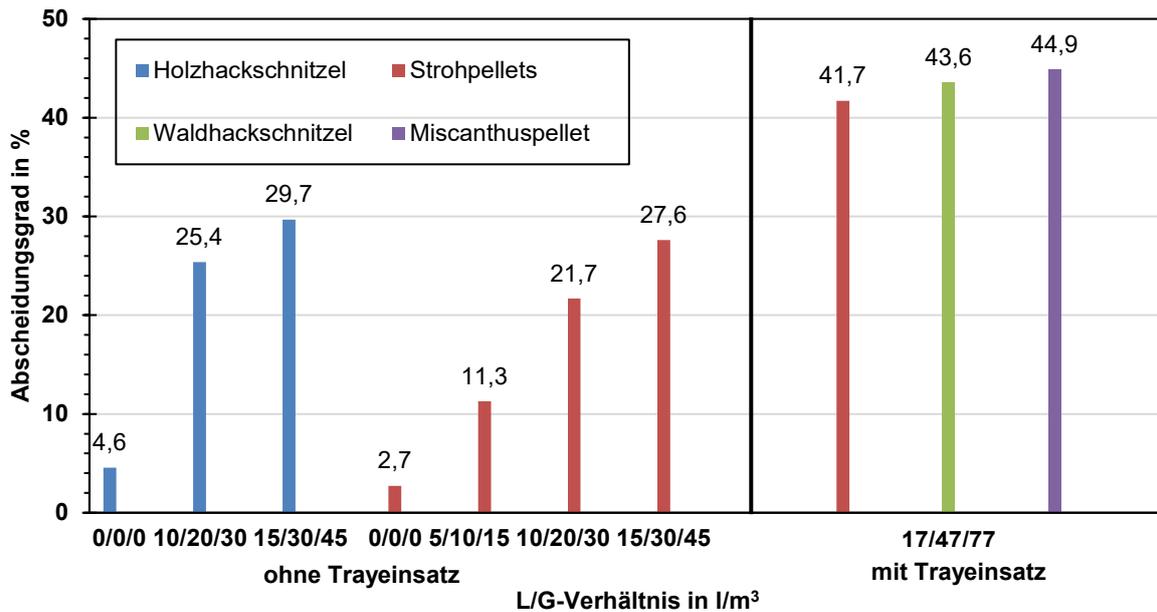


Bild 4-6: Ergebnisse aus Messkampagne 2

Wie zum einen zu erkennen ist, sind die Abscheidegrade relativ unabhängig von der Gesamtstaubkonzentration, für gleiche L/G-Verhältnisse, bei unterschiedlichem Brennstoff lagen die Abscheidegrade vergleichbar. Zum anderen ist zu erkennen, dass durch den Einsatz des Trays die Abscheidegrade von vorher max. 30 % auf bis zu 45 % gesteigert werden konnten. Die Abscheidegrade sind somit noch unter denen konventioneller elektrostatischer Abscheider, jedoch ist ein Einfluss des Trayeinbaus auf die Staubabscheidung erkennbar. Daher wurde entschieden, in der folgenden Messkampagne 3 den Versuchsaufbau mit Trayeinsatz weiter zu optimieren, wobei die Vollkegeldüsen durch sogenannte Hohlkegeldüsen ersetzt wurden, um eine feinere Tröpfchenverteilung im Wäscher zu erreichen und somit durch einen verbesserten Kontakt zwischen Waschflüssigkeit und Rauchgas eine verbesserte Staubabscheidung zu erreichen.

4.3.5 Ergebnisse zum Einfluss der Düsengeometrie

Nach dem erfolgreichen Umbau des Wäschers, wobei die Hohlkegeldüsen in den drei Sprühebeneen installiert wurden, konnte mit den Untersuchungen zum Einfluss der Düsengeometrie begonnen werden. Für diese Untersuchungen wurden als Brennstoff Waldhackschnitzel verwendet und dieselben L/G-Verhältnisse und Volumenströme wie bei den Untersuchungen zum Trayeinfluss, um vergleichbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Die Messungen wurden mit dem eingebauten Tray durchgeführt.

In diesen Messungen mit einstufigem Tray wurde ein durchschnittlicher Abscheidegrad von 65,7 % erzielt (vgl. Tabelle 4-4), was deutlich über den bisherigen Abscheidegraden liegt. Diese Steigerung um ca. 20 % lässt sich auf die feinere Tropfenbildung zurückführen.

Tabelle 4-4: Ergebnisse aus Messkampagne 3

Messung Nr.	c_0 in mg/m^3	c_1 in mg/m^3	η in %
1	75,5	25,4	66,4
2	88,4	28,7	67,6
3	100,1	34,8	65,2
4	99,8	36,4	63,5
Mittelwert	90,9	31,3	65,7

4.3.6 Ergebnisse zum Einfluss der Wasserdampfzugabe und des Einsatzes eines zweistufigen Trays

Um die Wirkungsweise des Wäschers zu optimieren, wurde für weitere Untersuchungen ein Dampfgenerator (Fa. FlowerW, 6 kW) in den Versuchsstand installiert, welcher kurz vor dem Wäschereintritt installiert wurde und in Vollast betrieben wurde. Dieser Dampfgenerator liefert im kontinuierlichem Betrieb eine Wasserdampfmenge von ca. $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ und ermöglicht ein leichtes Erreichen einer Übersättigung im Wäscher.

Für die vierte und letzte Versuchskampagne wurden wie beschrieben weitere Modifikationen am Wäscher vorgenommen und Messungen mit dem Brennstoff Waldhackschnitzel durchgeführt, um wiederum die Ergebnisse zu den Ergebnissen aus Messkampagne 3 in Relation setzen zu können. Für diese Untersuchungen wurde neben dem beschriebenen Dampfgenerator zusätzlich ein zweistufiges Tray in dem Wäscher verbaut, um die Staubabscheidung durch eine zusätzliche Austauschschicht zu begünstigen (vgl. Bild 4-7).



Bild 4-7: Detailaufnahme eines zweistufigen Trays

Die Ergebnisse aus dieser vierten Messkampagne sind mit den Ergebnissen der vorherigen Messkampagnen in Tabelle 4-5 zusammengefasst dargestellt. Die Rohgas- (c_0) und Reingaskonzentrationen (c_1) sowie die Abscheidegrade sind dabei als Mittelwerte angegeben.

Tabelle 4-5: Ergebnisse aus Messkampagne 4

MK Nr.	Brennstoff	L/G	Tray	Düsen- typ	Dampf- zugabe	c ₀ in mg/m ³	c ₁ in mg/m ³	Abscheide- grad in %
1	HHS	15/30/45	---	VKD	---	25,3	18,1	29,7
1	SP	15/30/45	---	VKD	---	73,6	53,1	27,6
2	SP	17/47/77	x	VKD	---	61,7	36,0	41,7
2	WHS	17/47/77	x	VKD	---	227,4	128,4	43,6
2	MP	17/47/77	x	VKD	---	138,4	76,2	44,9
3	WHS	17/47/77	x	HKD	---	90,9	31,3	65,7
4	WHS	17/47/77	xx	HKD	x	110,6	36,1	67,2

Wie zu sehen, konnte die Abscheideleistung in dieser letzten Versuchskampagne, wenn auch nur gering, auf 67,2 % gesteigert werden. Im Vergleich zu der ersten Versuchskampagne konnte somit, durch diverse Modifikationen am Wäscher, die Abscheideleistung insgesamt mehr als verdoppelt werden. Es war durch die vorgenommenen Modifikationen keine wesentliche Druckverluststeigerung über den Wäscher zu vernehmen, der Druckverlust betrug in den Versuchen maximal 163 Pa, was ein bei Sprühwäschern üblicher Druckverlust darstellt. [49]

Die in den dargestellten Untersuchungen erreichte Abscheidegrade betragen somit maximal 67,2 %, wobei noch weitere Optimierungen denkbar sind. Das Abscheidepotential sollte zuletzt noch mit Abscheidepotential des elektrostatischen Referenzabscheiders ins Verhältnis gesetzt und diskutiert werden.

4.4 Staubabscheidung am Referenzabscheider

Begonnen wird in diesem Kapitel mit den Untersuchungen zum Abscheidepotential des ESP, die Energie- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt im nächsten Kapitel.

Der für diese Machbarkeitsstudie von Keller Lufttechnik GmbH + Co. KG entwickelte elektrostatische Referenzabscheider wurde in diversen Untersuchungen mit den gleichen Brennstoffen (Waldhackschnitzel, Strohpellets und Miscanthuspellets) auf seine Abscheideleistung hin untersucht, um einen repräsentativen Vergleich zu ermöglichen. Aufgrund der in Kapitel 4.3.2 dargestellten hohen Rohgasstaubgehalte wurde entschieden, das Rauchgas zu verdünnen, da bei unverdünntem Rauchgasstrom leicht Störungen am ESP auftreten können.

Um eine Kondensation am ESP zu vermeiden, wurde der ESP des Weiteren mittels eines Leister Heißluftgebläses (Electron ST, 3,4 kW) kontinuierlich beheizt. Die ermittelten Staubkonzentrationen am Wäscher und am ESP wurden auf 13 Vol. % O₂ (im Normzustand, T_n=273,15 K, p_n=1013,25 hPa) wie in der 1. BImSchV gefordert, bezogen, um eine Vergleichbarkeit der beiden Verfahren bzw. der Staubemissionen und Abscheidegrade zu gewährleisten.

Der entwickelte elektrostatische Abscheider wurde für einen Volumenstrom von 100 m³/h ausgelegt und kann in einem Spannungsbereich von 11,5 bis 14,0 kV betrieben werden. Daher wurde in ersten Untersuchungen bei einem Volumenstrom von ca. 100 m³/h unter Variation

der Spannung die Abscheideleistung des Versuchsgerätes bestimmt und der optimale Arbeitsbereich des Gerätes identifiziert. Die Ergebnisse sind in Bild 4-8 dargestellt.

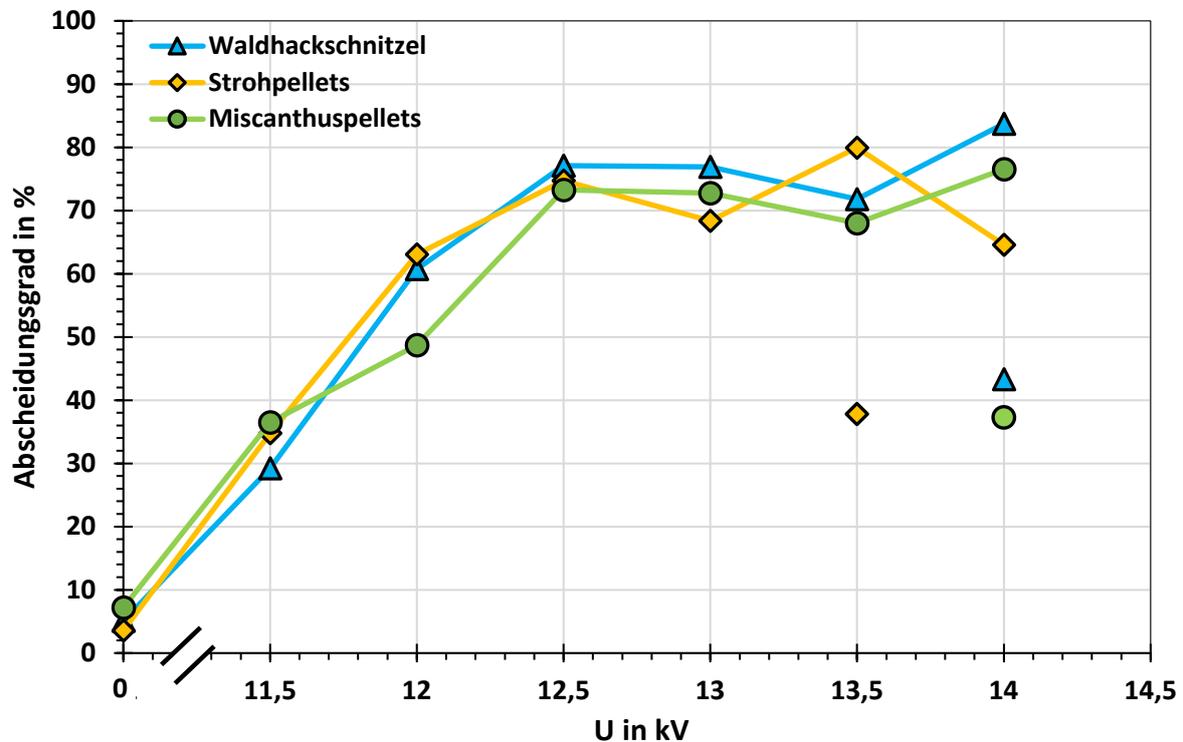


Bild 4-8: Abscheidegrade des ESP in Abhängigkeit der anliegenden Spannung

Wie in Bild 4-8 zu sehen, schwankt die Abscheideleistung in dem vorgegebenen Spannungsbereich deutlich, wobei die erreichbaren Abscheidegrade von der Spannung, nicht aber vom Brennstoff abhängig sind. In einem Spannungsbereich von 12,5 bis 14,0 kV wurden Abscheidegrade zwischen 64,6 und 83,7 % gemessen. In Einzelfällen fällt die Abscheideleistung jedoch auch deutlich niedriger aus, was durch Spannungsüberschläge aufgrund von Verschmutzung oder durch Wiedereintrag von abgeschiedenen Partikeln (re-entrainment) auf die Reingasseite erklärt werden kann. Der durchschnittliche Abscheidegrad für diesen Spannungsbereich liegt bei 74,0 %, mit den drei Ausreißern eingerechnet, bei 67,1 %. Für Spannungen < 12,5 kV fällt die Abscheideleistung stets geringer aus, bei der minimalen Betriebsspannung von 11,5 kV beträgt diese nur noch zwischen 29,2 und 36,5 %. Diese Abnahme in der Abscheideeffizienz ist auf die (zu) niedrige Spannung zurückzuführen, bei welcher die Abscheidung nicht optimal verläuft. Bei Messungen mit ausgeschaltetem ESP (0 kV) beträgt die Differenz (Abscheidung) zwischen Roh- und Reingaskonzentration 3,6 bis 7,2 %, was durch Partikelverluste in den Rohrleitungen, im Wesentlichen aufgrund von Impaktion und Diffusion, zwischen Roh- und Reingasmessstelle erklärt werden kann.

In den hier dargestellten Untersuchungen wurde die Gesamtstaubabscheideleistung untersucht. Um das Staubabschneidepotential auch für feine und ultrafeine Partikel zu analysieren, wurden die gravimetrischen Messungen am ESP durch Messungen der Partikelanzahlverteilung mit einem Scanning Mobility Particle Sizer + Condensation Particle Counter (Fa. GRIMM, SMPS + C) ergänzt. Mithilfe des SMPS kann die Abscheideeffizienz (Partikelanzahl) des ESP in einem Bereich von 7,9 bis 1219 nm, also besonders für

submikrone Partikel, analysiert werden. Da nur ein Versuchsgerät für diese Untersuchungen zur Verfügung stand, wurde die Partikelanzahl kontinuierlich im Reingas gemessen und der ESP nach je 10 Scans alternierend an und ausgeschaltet, um eine ausreichende Anzahl an Scans zur Datenanalyse zu haben. Die Ergebnisse sind in Bild 4-9 dargestellt. Bei ausgeschaltetem ESP wurde die Rohgaskonzentration gemessen, bei eingeschaltetem ESP die Reingaskonzentration. Somit erübrigte sich der Einsatz eines weiteren SMPS bzw. der permanente Wechsel des Gerätes zwischen Roh- und Reingasmessstutzen.

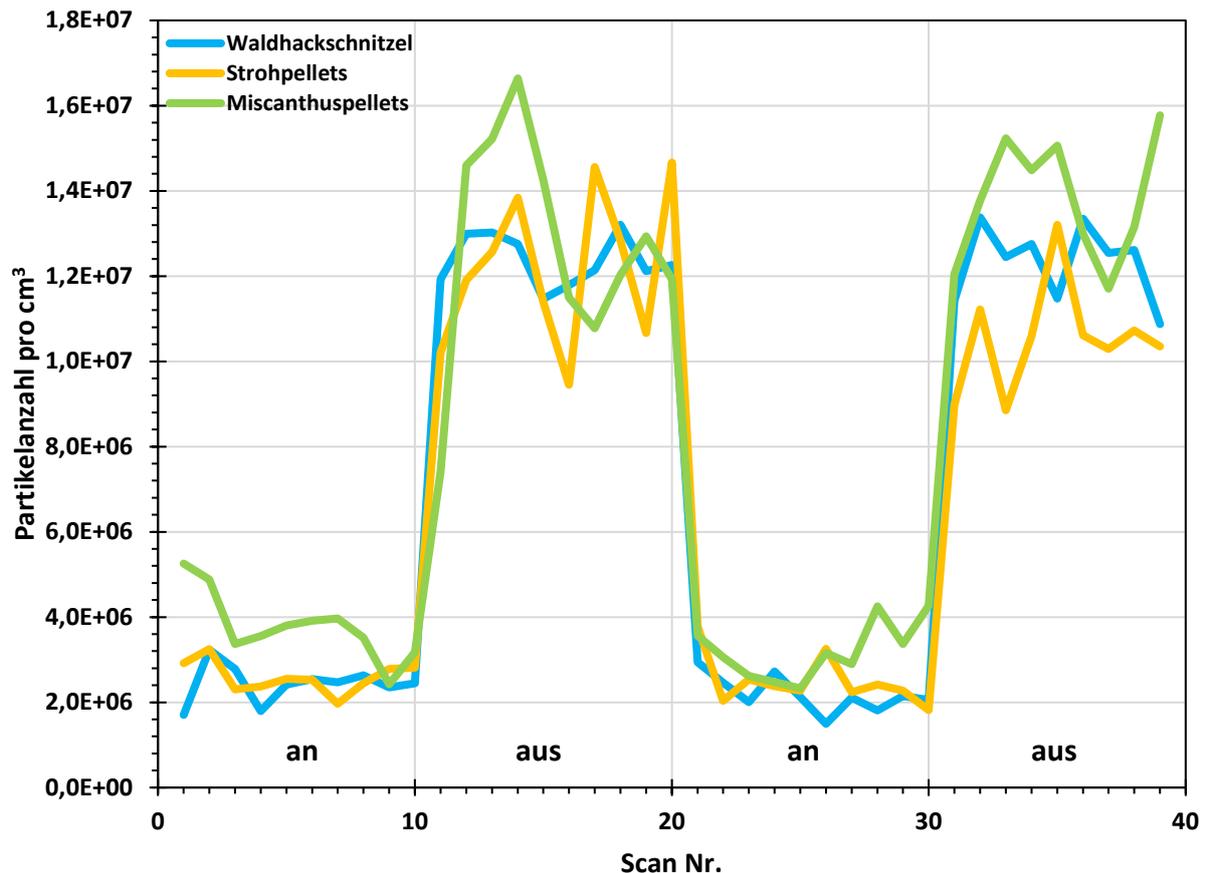


Bild 4-9: Reingas-Partikelanzahlkonzentration bei ein- und ausgeschaltetem ESP

Aus den gemittelten Anzahlkonzentrationen für die beiden Betriebsweisen an- und ausgeschalteter ESP konnte dann ein mittlerer Abscheidegrad berechnet werden. Der alternierende Betrieb am ESP ist in Bild dargestellt. Wie zu sehen, ist unabhängig vom eingesetzten Brennstoff eine deutliche Minderung in der Partikelanzahl bei eingeschaltetem ESP zu beobachten. Über alle drei Brennstoffe gemittelt beträgt der durchschnittliche Abscheidegrad hinsichtlich der Partikelanzahl 79%.

Zusammengefasst konnte am ESP sowohl eine deutliche Staubminderung hinsichtlich der Gesamtstaubmasse als auch eine deutliche Abnahme der Partikelanzahlkonzentration im submikronen Bereich ermittelt werden. Es zeigte sich aber gerade bei den gravimetrischen Messungen unter Spannungsvariation eine inkonsistente Abscheideeffizienz, welche stark von dem Betriebszustand des ESP anhängig ist. So betrug die maximale Abscheideleistung für den ausgelegten Volumenstrom von 100 m³/h zwar 83,7 %. Er konnte aber bei Störungen oder aufgrund von Wiedereintrag bereits abgeschiedener Partikel auch auf Werte < 40 % sinken.

So beträgt der mittlere Abscheidegrad nach den gravimetrischen Staubmessungen 67,1 %, bei den Partikelanzahlmessungen, ermittelt mit Hilfe des SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), im Mittel 79,0 %.

4.5 Waschwasseranalytik

Die Staubabscheideleistung des Wäschers wird in dieser Machbarkeitsstudie im Wesentlichen über gravimetrische Messungen bestimmt. Bei einer effektiven Staubabscheidung sollten sich die wasserlöslichen Bestandteile des Rauchgases jedoch in diesem Waschwasser lösen und anreichern, da das Waschwasser im Kreislauf geführt wird. Daher wurde in dieser Studie zusätzlich eine Analyse des Waschwassers nach einer ausreichenden Betriebszeit des Wäschers durchgeführt.

Die entnommene Probe nach 75 Betriebsstunden des Wäschers, bei Einsatz diverser Biobrennstoffe, ist in Bild 4-10 dargestellt. Wie zu sehen, wies das Waschwasser eine deutlich schwarze Färbung auf und hatte einen rauchigen Geruch, was auf eine Löslichkeit von Rauchgasbestandteilen schließen lässt. Die Ergebnisse der Laboranalyse sind in Tabelle 4-6 dargestellt.



Bild 4-10: Waschwasserprobe

Wie zu sehen, liegen die Gehalte an wasserlöslichen Aerosolbildnern im verwendeten Waschwasser deutlich über denen des handelsüblichen Trinkwassers. Als Vergleichsdaten wurden hier Jahresmittelwerte des Zweckverbands Bodensee-Wasserversorgung herangezogen [50], da als Waschwasser herkömmliches Trinkwasser verwendet wurde, welches in der Region Stuttgart dem Bodensee entstammt.

Tabelle 4-6: Stoffanteile im Waschwasser und im Trinkwasser (Referenz)

	Einheit	Waschwasser	Trinkwasser
Al	mg·l ⁻¹	0,174	< 0,01
Ca	mg·l ⁻¹	123	50
Cd	mg·l ⁻¹	0,948	< 0,05
Cl ⁻	mg·l ⁻¹	249	7,7
K ⁺	mg·l ⁻¹	48,2	1,4
Na	mg·l ⁻¹	5,25	5,6
Si	mg·l ⁻¹	6,46	1,7
SO ₄ ²⁻	mg·l ⁻¹	506	34
Pb	mg·l ⁻¹	26,5	< 0,5
Zn	mg·l ⁻¹	1,11	-
pH-Wert	-	6,83 (20 °C)	8,01 (8 °C)
Leitfähigkeit	μS·cm ⁻¹	2.710 (20 °C)	336

Die anorganischen Abgaskomponenten KCl und K₂SO₄, welche wie beschrieben in Rauchgasen aus der Biomasseverbrennung bei einer vollständigen Verbrennung einen signifikanten Anteil der Feinstaubpartikelfracht im submikronen und ultrafeinen Bereich ausmachen, sind wasserlöslich und können bei einer erfolgreichen Abscheidung im Wäscher im Waschwasser akkumulieren. Ein Nachweis dieser Komponenten ist per IC (Ionenchromatographie) über die Kationen K⁺ sowie der Anionen Cl⁻ und SO₄²⁻ möglich. Wie zu sehen, sind die Konzentrationen dieser Komponenten mit 48,2 mg/l, 249 mg/l sowie 506 mg/l deutlich über den Werten des Trinkwassers mit 1,4 mg/l, 7,7 mg/l und 34 mg/l, welches im Wäscher zum Einsatz kam. Dies ist ein wichtiger Beweis dafür, dass sich die Feinstpartikel aus dem Rauchgas der Biomasseverbrennung mit dem in dieser Studie entwickelten Wäscher abscheiden lassen.

4.6 Energieeffizienz

Neben den Untersuchungen zum Aktivierungs- und Abscheidepotential von Partikeln im Wäscher, sollte in dieser Arbeit auch eine energetische Betrachtung des Wäschers vollzogen werden. Die zum Betrieb notwendige berechnete elektrische Leistung ist mit Literaturdaten herkömmlicher Abscheider ins Verhältnis zu setzen. Der Energieaufwand zum Betrieb des Wäschers setzt sich im Wesentlichen aus dem energetischen Aufwand zum Betrieb der drei Waschwasserpumpen sowie dem Betrieb des Rauchgasventilators zusammen. In dieser Studie wird die Berechnung für zwei Betriebszustände, bei L/G-Verhältnissen von 10/20/30 und 15/30/45 l/m³, dargestellt.

Die hydraulische Leistung P_h der Pumpen und des Ventilators lässt sich nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$P_h = Q \cdot \Delta p \quad (4.1)$$

P_h Hydraulische Leistung in W

Q Waschwasser-/Rauchgasvolumenstrom in m³/h

Δp Druckerhöhung in den Pumpen in bar

Die elektrische Leistung P_{el} wurde nach Gleichung 4.2 berechnet:

$$P_{el} = P_h / \eta_{AG} \quad (4.2)$$

P_{el} Elektrische Leistung in W

P_h Hydraulische Leistung in W

η_{AG} Aggregatwirkungsgrad [-]

η_{AG} ist der Aggregatwirkungsgrad und besteht aus dem hydraulischen Wirkungsgrad, dem Kupplungswirkungsgrad, dem mechanischen Wirkungsgrad und dem Motorwirkungsgrad.

$$\eta_{AG} = \eta_h \cdot \eta_K \cdot \eta_m \cdot \eta_M \quad (4.3)$$

η_{AG} Aggregatwirkungsgrad [-]

η_h Hydraulischer Wirkungsgrad [-]

η_K Kupplungswirkungsgrad [-]

η_m Kupplungswirkungsgrad [-]

η_M Motorwirkungsgrad [-]

Für die Pumpen wurden die folgenden Wirkungsgradbereiche nach einer Studie von D. Surek [51] angenommen:

$$\eta_h = 0,82 \text{ bis } 0,95 \quad (4.4)$$

$$\eta_K = 0,82 \text{ bis } 0,95 \quad (4.5)$$

$$\eta_m = 0,95 \text{ bis } 0,98 \quad (4.6)$$

$$\eta_M = 0,82 \text{ bis } 0,95 \quad (4.7)$$

Für die weiteren Berechnungen wurden die Mittelwerte der Wirkungsgradbereiche angenommen.

Aus den aufgezeichneten Betriebsparametern und dem dargestellten Berechnungsweg ergibt sich zum Betrieb des Wäschers eine benötigte hydraulische Leistung von 17,34 W. Aus der Gleichung 4.2 ergibt sich für die erforderliche elektrische Leistung:

$$P_{el} = \frac{P_h}{0,67} = \frac{17,34 \text{ W}}{0,67} = 25,88 \text{ W} \quad (4.8)$$

Bei höheren L/G-Verhältnissen sind die Waschwasservolumenströme bei gleichbleibendem Rauchgasvolumenstrom höher, was zu einer Erhöhung der hydraulischen Leistung führt. Bei einem L/G-Verhältnis von 15/30/45 l/m³ beträgt die hydraulische Leistung 35,09 W. Somit ist die erforderliche elektrische Leistung nach Gleichung 4.2:

$$P_{el} = \frac{P_h}{0,67} = \frac{35,09 \text{ W}}{0,67} = 52,37 \text{ W} \quad (4.9)$$

Beim elektrostatischen Referenzabscheider wird der Energieverbrauch im Wesentlichen durch das Hochspannungsmodul (HV) sowie den nachgeschalteten Rauchgasventilator bestimmt. Für den Betrieb des HV-Modul wird von Keller Lufttechnik eine elektrische Leistung von 14 W beim Betrieb mit 14,0 kV angegeben. Hinzu kommt die Leistung für den Antrieb des Rauchgasventilators, welche ca. 24,15 W beträgt.

Der Energieverbrauch wird über die Größe der elektrischen Arbeit (W) in Wh/m³ angegeben, also auf das gereinigte Rauchgasvolumen im Normzustand normiert. Aus der bekannten Rauchgaszusammensetzung am Wäscher und am ESP kann diese Größe leicht berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst.

Tabelle 4-7: Leistung und elektrische Arbeit pro gefiltertem m³ Rauchgas je Betrachtungsfall

Abscheider	L/G	Leistung P in W	el. Arbeit W in Wh/m ³
Wäscher	10/20/30	25,9	0,9
Wäscher	15/30/45	52,4	1,8
ESP	---	38,2	1,3

Diese Berechnung ist für drei Betrachtungsfälle dargestellt. Zum einen für den Sprühwäscher bei L/G Verhältnissen von 10/20/30 und 15/30/45. Des Weiteren für den Betrieb des ESP bei dem ausgelegten Rauchgasvolumenstrom von 100 m³/h. Wie zu sehen, ist nur für den Fall mit dem niedrigsten L/G-Verhältnis der Energieverbrauch am Wäscher niedriger als beim ESP, für das Verhältnis von 15/30/45, und somit auch für die Trayversuche mit höheren L/G (17/47/77), ist der Energieverbrauch am ESP zwar niedriger, aber grob gesehen in der gleichen Größenordnung.

Insgesamt lässt sich somit erkennen, dass der konstruierte elektrostatische Abscheider der Firma Keller Lufttechnik im Vergleich mit dem Sprühwäscher bei höheren L/G-Verhältnissen energieeffizienter ist. Jedoch müssen dabei auch andere Faktoren berücksichtigt werden. Zum einen wurden die Abscheider mit hohen Staubkonzentrationen beaufschlagt, die Verbrennung von Waldhackschnitzeln und Halmgütern hatte Emissionen von über 100 mg/m³ bis zu 200 mg/m³ Staub zur Folge. Während beim Wäscher ein unverdünnter Teilvolumenstrom hindurchgesaugt werden konnte, konnte der ESP dagegen nur mit einem Teilvolumenstrom

betrieben werden, da die hohe Beladung zu Spannungsüberschlägen führen konnte. Des Weiteren war eine Beheizung des ESP notwendig um eine Kondensation am Gerät zu vermeiden, da auch dies zu Spannungsüberschlägen führte. Diese externe Beheizung ist in der Berechnung der Energieeffizienz nicht berücksichtigt. Des Weiteren konnte am ESP der Wiedereintrag von bereits abgeschiedenen Partikeln auf die Reingasseite beobachtet werden. Diese Problematik kann bei so hohen Staubbeladungen durchaus auftreten. Dies ist im Wäscher, wo die Partikel mit einem Demister und im Waschwasser/schlamm-Gemisch gelöst abgeschieden werden, nicht der Fall. Des Weiteren hat der Einsatz von Wäschern weitere Vorteile gegenüber von ESPs. Es werden keine Ozonemission freigesetzt, während beim ESP die Ozonemissionen nicht zu vermeiden sind. Zuletzt besteht kein Explosionsrisiko und Brandrisiko beim Wäscher, während beim ESP Überschläge und Durchschläge vorkommen können, wenn die Konzentration hoch wird.

5 Fazit und Ausblick

Kern dieser Machbarkeitsstudie sind Untersuchungen, ob und wenn ja unter welchen Umständen heterogene Kondensationsprozesse in einem Wäscher wirkungsvoll und energieeffizient zur Aerosolabscheidung genutzt werden können. Für ein wissenschaftlich zielorientiertes Vorgehen wurden hierfür an einem separaten Prüfstand geprüft, welche Stoffbestandteile des Rauchgases einer Biomassefeuerung bei welchen Übersättigungen aktiviert werden können. Ziel war es, diese Erkenntnis anschließend in die Betriebsweise eines Wäschers zu transferieren, um somit Randbedingungen zu identifizieren, die sowohl hohe Abscheideraten, als auch einen geringen energetischen Aufwand zur Folge haben.

In einem separaten Prüfstand wurden hierfür in einem geschlossenen System adiabate Expansionen über eine schlagartige Kolbenbewegung ausgelöst. Ein optisches Lasermesssystem registrierte, dann anhand sich ändernder Transmissionssignale, ab wann eine heterogene Kondensation einsetzt und wie schnell dieser Prozess stattfindet. Für Reinstoffaerosole gelang es hierbei die Übersättigungen mit einer akzeptablen Genauigkeit zu bestimmen. Es konnte gezeigt werden, dass an allen Partikeln der untersuchten Bestandteile eine Aktivierung und ein Tropfenwachstum möglich ist. Das hohe Potential der heterogenen Kondensation zur Aerosolabscheidung bei der Biomasseverbrennung konnte durch diese Machbarkeitsstudie bestätigt werden.

Bei Aerosolen aus Stoffgemischen bleibt allerdings unklar, welche Teilkondensation an welchem Stoff eine bestimmte Transmissionsänderung zur Folge hat. Aus diesem Grund wurden anhand von Stoffanalysen bestimmt, in welchen Verhältnissen die Reinstoffe im Rauchgas tatsächlich vorlagen.

Anhand der Messungen konnte gezeigt werden, dass salzhaltige Aerosolpartikel sich allgemein bei geringeren Übersättigungen aktivieren lassen und auch eine ungehemmte Kondensation bei niedrigeren Werten möglich ist. Dieses Phänomen ist auch in der Literatur bekannt und stellt einen großen Vorteil für die Kondensation an Partikeln der Biomassefeuerung dar. Der hier vorliegende hohe Bestandteil an salzhaltigen Stoffen senkt die erforderlichen Übersättigungen und begünstigt den Energieaufwand zur Abscheidung.

Weiterführend sollte die Überführung dieses Prüfstandes (geschlossenes System) auf eine Konzeption eines offen durchströmten Systems in Erwägung gezogen werden. Dieselben grundlegenden Versuche in einem stationär durchströmten Aufbau bewegen sich näher an der Prozessführung im Wäscher und erlauben ggf. einen einfacheren Transfer der Ergebnisse. Die Konzeption eines solchen Prüfstandes ist parallel zu dieser Studie ausgearbeitet worden und könnte in einem Folgevorhaben umgesetzt werden.

In den Untersuchungen am Wäscherprüfstand konnte nachgewiesen werden, dass die Staubabscheideleistung mit zunehmendem L/G-Verhältnis zunahm. Des Weiteren führen sowohl der Einsatz eines Trays sowie der Wechsel von Voll- auf Hohlkegeldüsen zu einer Verbesserung der Staubabscheideleistung. So konnte die Staubabscheideleistung durch diese zusätzlichen Maßnahmen bis auf 67,2 % gesteigert werden, was auch ungefähr der mittleren Staubabscheideleistung des parallel betriebenen ESP entspricht. Somit konnte insgesamt die Machbarkeit einer wirkungsvollen Staubabscheidung im Wäscher nachgewiesen werden. Die Staubabscheideleistung des neu entwickelten Wäschers ist konkurrenzfähig zum elektrostatischen Abscheider, jedoch ist die Staubabscheidung am Wäscher (noch) etwas energieintensiver als am elektrostatischen Referenzabscheider.

In einer möglichen weiteren Stufe könnte die Abscheideleistung des Wäschers durch verschiedene Ansätze weiter gesteigert werden. Zum einen kann eine weitere Optimierung der Düsengeometrie vorgenommen werden, um ggf. eine noch bessere Tröpfchenbildung und -verteilung zu erhalten, was eine effektivere Benetzbarkeit der Partikel bzw. einen besseren Stoffaustausch zwischen Wasserdampf und Partikeln ermöglicht. Zum anderen kann durch eine optimierte direkte Injektion von Wasserdampf in den Wäscher eine erhöhte Übersättigung erreicht werden, was die Staubabscheidung weiter verbessern wird.

Eine Reduzierung des Rauchgasvolumenstromes könnte ebenfalls zu einer weiteren Steigerung der Abscheideeffizienz führen, da dadurch die Verweilzeit der anwachsenden Tropfen im Wäscher erhöht wird, was eine Abscheidung begünstigen kann.

Des Weiteren ist es denkbar, das eingesetzte Tray in Rotation zu versetzen, um den Wärme- und Stoffaustausch am Wäschereintritt zu optimieren, was eine weitere Erhöhung der Staubabscheideleistung zur Folge haben könnte. Zudem wurde in diesem Vorhaben noch keine Verwertung des Waschwassers diskutiert. Durch eine Kombination aus Rauchgasreinigung und Nährstoffrückgewinnung von beispielsweise Kalzium (Ca), Kalium (K) und Phosphor (P) aus dem Waschwasser kann die Attraktivität dieses Verfahrens weiter gesteigert werden.

Für ein vollumfängliches Verständnis der komplexen Wärme- und Stoffaustauschmechanismen im Sprühwäscher wären in einem Folgevorhaben entsprechende Simulationsmodelle erforderlich, um eine exakte Übertragung der kritischen Übersättigungen zu gewährleisten. Zudem bedarf es einer noch tiefergehenden wirtschaftlichen Gegenüberstellung des Wäschers mit herkömmlichen Abscheidern nach Stand der Technik. Bisher war die Datenlage für eine gesamtheitliche Betrachtung nicht ausreichend.

Prinzipiell kann dennoch festgestellt werden, dass die Ziele der beantragten Machbarkeitsstudie zum größten Teil erreicht worden sind. Nur vereinzelt konnten Herausforderungen in Anbetracht der Bearbeitungszeit noch nicht vollständig angegangen werden.

6 Anhang

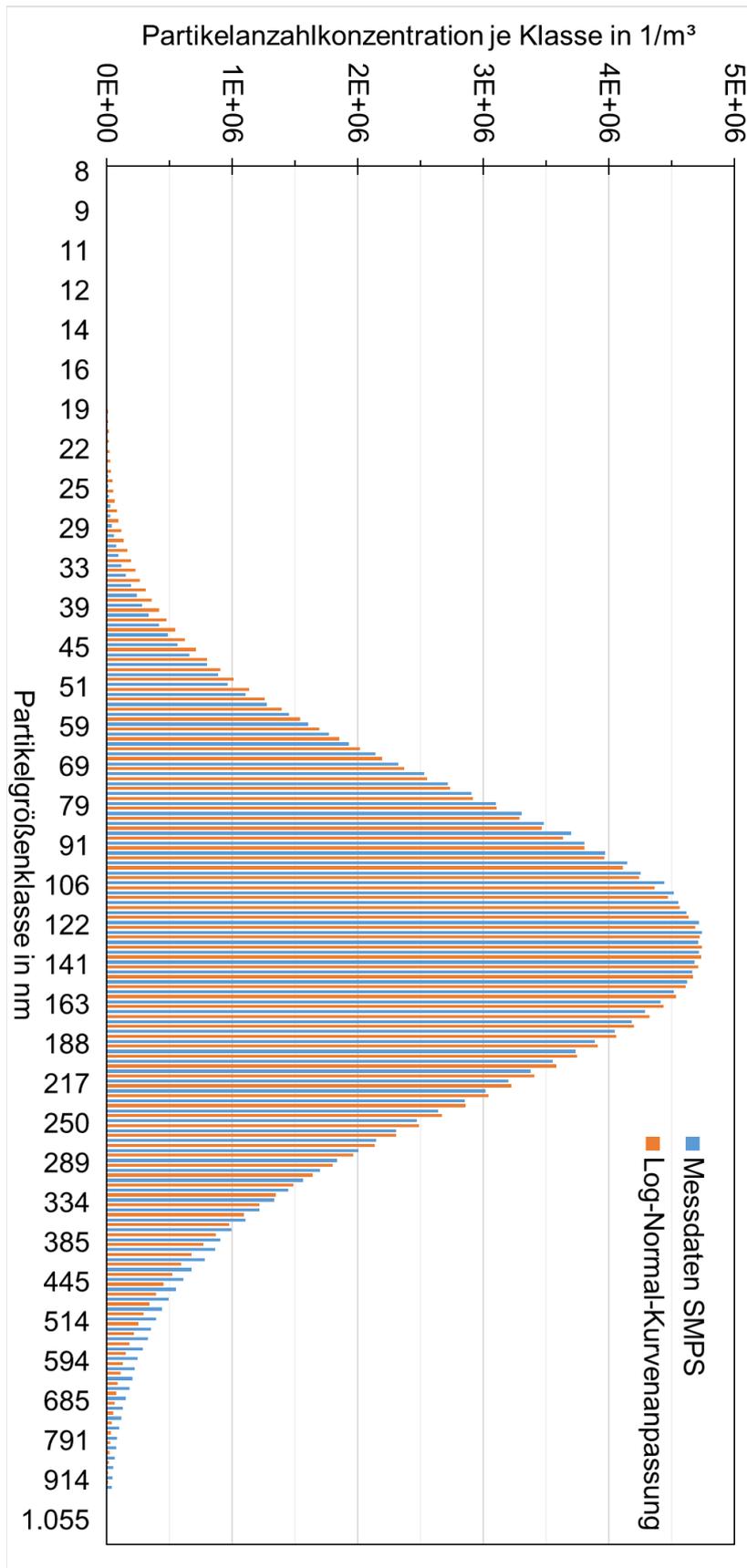


Bild 6-1: Exemplarischen Partikelgrößenverteilung einer zerstäubten KCl-Lösung

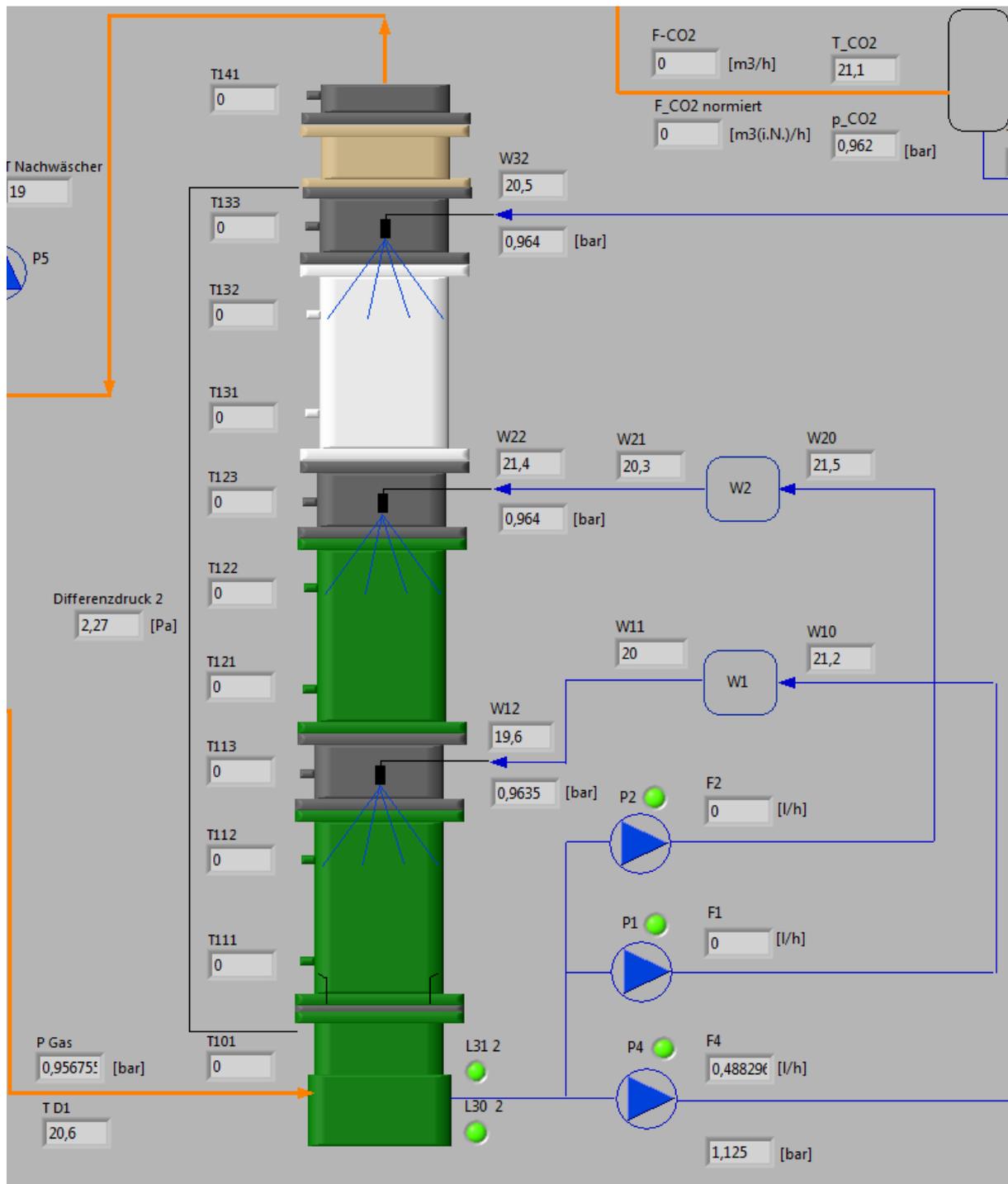


Bild 6-2: Graphischer Benutzeroberfläche des Sprühwäscherprüfstands

7 Literatur

- [1] A. Brosowski, P. Adler, G. Erdmann, W. Stinner, D. Thrän und U. Mantau, *Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen: Status Quo in Deutschland*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/1251/
- [2] F. Fan, L. Yang, J. Yan, J. Bao und X. Shen, „Experimental investigation on removal of coal-fired fine particles by a condensation scrubber“, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Jg. 48, Nr. 8, S. 1353–1360, 2009, doi: 10.1016/j.cep.2009.06.011.
- [3] H. Lamberg, J. Tissari, J. Jokiniemi und O. Sippula, „Fine Particle and Gaseous Emissions from a Small-Scale Boiler Fueled by Pellets of Various Raw Materials“, *Energy Fuels*, Jg. 27, Nr. 11, S. 7044–7053, 2013, doi: 10.1021/ef401267t.
- [4] A. Garcia-Maraver, M. Zamorano, U. Fernandes, M. Rabaçal und M. Costa, „Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler“, *Fuel*, Jg. 119, S. 141–152, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.11.037.
- [5] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Hg., *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1507321>
- [6] J. Bao, L. Yang, W. Sun, J. Geng, J. Yan und X. Shen, „Removal of fine particles by heterogeneous condensation in the double-alkali desulfurization process“, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Jg. 50, Nr. 8, S. 828–835, 2011, doi: 10.1016/j.cep.2011.05.008.
- [7] L. Yang, J. Bao, J. Yan, J. Liu, S. Song und F. Fan, „Removal of fine particles in wet flue gas desulfurization system by heterogeneous condensation“, *Chemical Engineering Journal*, Jg. 156, Nr. 1, S. 25–32, 2010, doi: 10.1016/j.cej.2009.09.026.
- [8] H. Wu, L. Yang, J. Yan, G. Hong und B. Yang, „Improving the removal of fine particles by heterogeneous condensation during WFGD processes“, *Fuel Processing Technology*, Jg. 145, S. 116–122, 2016, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.01.033.
- [9] A. Wang, Q. Song, G. Tu, H. Wang, Y. Yue und Q. Yao, „Influence of flue gas cleaning system on characteristics of PM_{2.5} emission from coal-fired power plants“, *Int J Coal Sci Technol*, Jg. 1, Nr. 1, S. 4–12, 2014, doi: 10.1007/s40789-014-0001-x.
- [10] N. Ebeling, *Abluft und Abgas: Reinigung und Überwachung*. John Wiley & Sons, 2008.
- [11] *Elektrofilter. Prozessgas- und Abgasreinigung*, VDI 3678 Blatt 1:2011, VDI.
- [12] A. Bianchini, M. Pellegrini, J. Rossi und C. Sacconi, „Theoretical model and preliminary design of an innovative wet scrubber for the separation of fine particulate matter produced by biomass combustion in small size boilers“, *Biomass and Bioenergy*, Jg. 116, S. 60–71, 2018, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.05.011.
- [13] Umweltbundesamt, *Erneuerbare Energien in Zahlen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick> (Zugriff am: 24. Januar 2022).

- [14] T. Kaivosoja *et al.*, „Comparison of emissions and toxicological properties of fine particles from wood and oil boilers in small (20–25 kW) and medium (5–10 MW) scale“, *Atmospheric Environment*, Jg. 77, S. 193–201, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.014.
- [15] H. Spliethoff, M. Kaltschmitt und A. Mory, *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/1161977>
- [16] K. Strauß, *Kraftwerkstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [17] P. Turowski, H. Oehler und H. Hartmann, „Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen“, 2014.
- [18] J. Wüest, N. Lohberger und M. Lüscher, „Emissionen von Holzfeuerungen nach elektrostatischen Staubabscheidern“, Bern, 2020.
- [19] F. Ehrler und K. Schaber, „J5 Spontane Kondensation und Aerosolbildung“ in *VDI-Wärmeatlas*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2019, S. 1147–1180, doi: 10.1007/978-3-662-52989-8_67.
- [20] A. Weber, „Keimbildung in übersättigten Gebilden“ (119U), *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, Nr. 1, S. 277–301, 1927. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/zpch-1926-11927/html>
- [21] F. H. MacDougall, „Kinetic Theory of Liquids. By J. Frenkel“ (en), *J. Phys. Chem.*, Jg. 51, Nr. 4, S. 1032–1033, 1947, doi: 10.1021/j150454a025.
- [22] W. Heidemann, *Technische Thermodynamik: Kompaktkurs für das Bachelorstudium*. John Wiley & Sons, 2015.
- [23] S. Heidenreich, *Tropfenbildung und -wachstum in Gasströmungen durch heterogene Kondensation von Wasserdampf*. Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 1997 (Nicht für den Austausch). Düsseldorf: VDI-Verl., 1997.
- [24] S. K. Friedlander, „Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior“ (en), *New York*, 1977.
- [25] H. Gretscher, *Entstehung von Aerosolen durch heterogene Keimbildung bei der Absorption und Kondensation*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2000. Düsseldorf: VDI-Verl., 2000.
- [26] S. E. Mall-Gleißle, *Entstehung von Aerosolen durch homogene Keimbildung bei der Kondensation und Verdampfung*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2008. Düsseldorf: VDI-Verl., 2008.
- [27] K. Schaber, „Aerosol formation in absorption processes“, *Chemical Engineering Science*, Jg. 50, Nr. 8, S. 1347–1360, 1995, doi: 10.1016/0009-2509(95)98846-7.
- [28] A. Schenkel, *Wachstum und Abscheidung von Aerosolen in naßarbeitenden Systemen*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1996. Düsseldorf: VDI-Verl., 1996.
- [29] K. Holzer, „Naßabscheidung von Feinstäuben und Aerosolen“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 51, Nr. 3, S. 200–207, 1979, doi: 10.1002/cite.330510308.

- [30] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. s.l.: Wiley-Interscience, 1999. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1120423>
- [31] G. Gyarmathy und H. Meyer, Hg., „Spontane Kondensation“, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 508, 1965.
- [32] W. Thomson, „4. On the Equilibrium of Vapour at a Curved Surface of Liquid“, *Proc. R. Soc. Edinb.*, Jg. 7, S. 63–68, 1872, doi: 10.1017/S0370164600041729.
- [33] S. K. Friedlander, *Smoke, dust, and haze: Fundamentals of aerosol dynamics*, 2. Aufl. New York, Oxford: Oxford Univ. Press, 2000.
- [34] G. Gyarmathy, „Zur Wachstumsgeschwindigkeit kleiner Flüssigkeitstropfen in einer übersättigten Atmosphäre“, *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*, Jg. 14, Nr. 3, S. 280–293, 1963, doi: 10.1007/BF01601066.
- [35] T. Kochenburger, „Inbetriebnahme und Erprobung eines Versuchsaufbaus zur heterogenen Kondensation in Inbetriebnahme und Erprobung eines Versuchsaufbaus zur heterogenen Kondensation in Aerosolen und Ermittlung von Benetzungsfunktionen“. Diplomarbeit, KIT, Karlsruhe, 2012.
- [36] S. Heidenreich, „Heterogene Kondensation - Ein Konditionierverfahren zur Abscheidung submikroner Partikeln aus Gasströmen“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 77, 1-2, S. 35–45, 2005, doi: 10.1002/cite.200407059.
- [37] *Inline-/Offline-Messung | Glossar der Messtechnik | KEYENCE Deutschland*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.keyence.de/ss/products/measure/measurement_library/basic/in_offline/#:~:text=Die%20Inline%2DMessung%20kann%20auch,der%20Linie%20\(offline\)%20erfolgen](https://www.keyence.de/ss/products/measure/measurement_library/basic/in_offline/#:~:text=Die%20Inline%2DMessung%20kann%20auch,der%20Linie%20(offline)%20erfolgen) (Zugriff am: 25. Januar 2022).
- [38] *Das optische Dispersionsquotienten-Verfahren für die on-line/in-situ Partikelanalyse*, 2000. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wizard-zahoransky.de/witt2000.pdf>
- [39] A. Tremmel, „Elektronenstrahlinduzierte Partikelbildung in Abgasen von Feuerungsanlagen: Einsatz eines optischen In-situ Meßverfahrens“. Dissertation, KIT, Karlsruhe, 1993.
- [40] K. Schaber, A. Schenkel und R. A. Zahoransky, „Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren zur Charakterisierung von Aerosolen unter industriellen Bedingungen“, *tm - Technisches Messen*, Jg. 61, JG, S. 295–300, 1994, doi: 10.1524/teme.1994.61.jg.295.
- [41] J. Nölte, *ICP Emissionsspektrometrie für Praktiker: Grundlagen, Methodenentwicklung, Anwendungsbeispiele*, 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN978-3-527-34658-5/>
- [42] *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)*. *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 4, ausgegeben zu Bonn, 2010*.
- [43] A. Hörner, „Verfahrenstechnische Untersuchungen und Auslegung relevanter Komponenten zur CO₂-Abscheidung mittels Sprühwäscher“. Bachelorarbeit, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017.

- [44] Lechler GmbH, *Lechler Tropfenabscheider: Übersicht Lechler Tropfenabscheidersysteme*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lechler.com/de/produkte/sortiment/umwelttechnik/tropfenabscheidersysteme/lechler-tropfenabscheider> (Zugriff am: 28. Januar 2022).
- [45] *Energie aus Abfall*. Neuruppin: TK Verl. Karl Thomé-Kozmiensky, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.vivis.de/fachbuecher/thermische-abfallb-energie-verwertung/258-aaa8>
- [46] Bodensee Wasserversorgung, *Startseite*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bodensee-wasserversorgung.de/startseite.html> (Zugriff am: 25. Januar 2022).
- [47] Y. Fujimori *et al.*, „Interaction of Water with the CaO(001) Surface“, *J. Phys. Chem. C*, Jg. 120, Nr. 10, S. 5565–5576, 2016, doi: 10.1021/acs.jpcc.6b00433.
- [48] *GESTIS-Stoffdatenbank*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gestis.dguv.de/> (Zugriff am: 25. Januar 2022).
- [49] F. J. Dreyhaupt, Hg., *VDI-Lexikon Umwelttechnik*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1994.
- [50] Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung, *Qualitätsdaten des Trinkwassers aus dem Bodensee: Trinkwasseranalyse 2020*.
- [51] D. Surek, „Pumpen“ in *Handbuch Maschinenbau*, A. Böge und W. Böge, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017.