

Einfluss von kondensierten Aschedämpfen auf den Wärmeübergang in Biomasse-befeuerten Kesseln

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

an der

Technischen Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau

Vorgelegt von:

Andonov Wili

Betreuer:

Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger

Dr.- Ing. Kai Schulze

Graz, 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources

Graz, am 06.04.2013

.....
(Unterschrift)

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde am Institut für Prozess und Partikeltechnik an der Technischen Universität Graz in Kooperation mit dem Bioenergie Kompetenzzentrum Bioenergy 2020+ GmbH. erstellt. Zuerst möchte ich Herrn Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger danken, der diese Diplomarbeit ermöglicht hat. Ein großer Dank gilt auch meinen Betreuer Herr Dr. -Ing Kai Schulze für seine Unterstützung.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, hier insbesondere meiner Frau und meiner Tochter, die mich während der gesamten Studienzzeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	01
Abstract	02
I.) Einleitung und theoretische Grundlagen	
1. Einleitung	03
1.1 Allgemeines	03
1.2 Nachhaltige Energieträger	03
1.3 Biomasse als nachhaltiger Energieträger	04
1.4 Die Hauptelemente der Biomasse	05
1.5 Aschedepositionen und aschebedingte Probleme	08
1.6 Beschreibung von Kaliumchlorid	09
1.7 Aufgabenstellung	10
1.8 Kondensation von Salzen an gekühlten Oberflächen	11
2. Theoretische Grundlagen	13
2.1 Wärmetransport an umströmten Wärmetauscherrohren	13
2.1.1 Die Wärmeübertragung allgemein	13
2.1.2 Die Wärmeleitung	13
2.1.3 Der konvektive Wärmeübergang	15
2.1.4 Der Wärmeübergang durch Strahlung	17
2.1.5 Rauchgaseigenschaften	18
2.1.6 Der Wärmeübergang am zylindrischen Rohr	20
2.2 Depositionsbildung in Biomassefeuerungen	21
2.2.1 Allgemein	21
2.2.2 Die mathematische Modellierung der Kondensation an gekühlten Oberflächen	23
2.2.3 Der Stoffübergang am zylindrischen Rohr	25
2.3 Thermische Eigenschaften von kondensierten Depositionsschichten	28
2.3.1 Die thermische Wärmeleitfähigkeit von Depositionsschichten	28
2.3.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Komponenten der Depositionsschicht	30
2.3.3 Die Wärmestrahlung von Depositionen	34

II. Methoden

3. Experimentelle Methoden	36
3.1 Versuchsanlage: Aufbau und Beschreibung	36
3.2 Die Gasbrennerregelung der Versuchsanlage	38
3.2.1 Diagramme Gasbrennersteuerung bei einer Rauchgasventilatorleistung von 100%	38
3.2.2 Diagramme Gasbrennersteuerung bei einer Rauchgasventilatorleistung von 65%	39
3.3 Bilanzierung der Wärme- und Massenströme	42
3.4 Entwicklung einer Verdampfungseinheit für Kaliumchlorid	44
3.5 Depositionssonde, Funktionsweise und Beschreibung der Heat Flux Sonde	49
3.6 Die Beschreibung der Kondensationsversuche	50
4. CFD - Simulationen	51
4.1 Gesamtsimulation	51
4.2 Detailsimulation Messbox	52
III.) Ergebnisse	
5. Ergebnisse aus den experimentellen Testläufen	53
5.1 Betriebsparameter	53
5.2 Ergebnisse der Kondensationsversuche bei einer Sondentemperatur von 300°C	55
5.3 Ergebnisse der Kondensationsversuche bei einer Sondentemperatur von 500°C	60
5.4 Die Beschreibung der Depositionsschicht	64
6. Ergebnisse aus den CFD - Simulationen	71
6.1 Randbedingungen der CFD - Simulationen	71
6.2 Ergebnisse der CFD - Simulationen	72
7. Abschätzung des Wärme- und Stofftransportes auf Basis der bekannten Modelle	77
7.1 Berechnung des Wärmeübergangs an der Depositionssonde ohne Kondensationsschicht.	77
7.2 Berechnung des Wärmeübergangs an der Depositionssonde mit Kondensationsschicht	80
8. Vergleich und Diskussion der Ergebnisse	84
9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	90

10.) Literaturverzeichnis	95
Anhang A: Rauchgaszusammensetzung	97
Anhang B: Rauchgaseigenschaften bei unterschiedlichen Temperaturen	97

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Zeichen	Bedeutung	Einheit
t	Zeit	s
T	Temperatur	K, °C
Q	Wärmeleistung	W, kW
q	Wärmestromdichte	W/m ²
d, s	Dicke, Durchmesser, Abstand	m
λ	Wärmeleitkoeffizient	W/(m K)
k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
k, k _d	Wärmeleitkoeffizient der Depositionsschicht	W/(m K)
r	Radius	m
A	Fläche	m ²
h, α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
ρ	Dichte	kg/m ³
u, v	Geschwindigkeit	kg/(m s)
μ, η	dynamische Viskosität	Pa s
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
C, n	Konstante Parameter	-
X _i	Volumenanteil der Spezies	-
c _p	spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
ε	Emissionsfaktor	-
α	Absorptionsfaktor	-
h, α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
σ	Stefan-Boltzmannkonstante	W/(m ² K ⁴)
p	Porosität	-
k _{eff}	Wärmeleitkoeffizient effektiv	W/(m K)
k _c	Wärmeleitkoeffizient der kontinuierlichen Phase	W/(m K)
k _d	Wärmeleitkoeffizient der diskreten Phase	W/(m K)
K _i	gewichtete Fraktion	-
b.l.	Grenzschicht (eng.: boundary layer)	-
c	Stoffmengenkonzentration	mol/m ³
M	molare Masse	g/mol
w _i	Molekülgeschwindigkeit	m/s
Δc	Konzentrationsuntergradient	-
β	Stoffübergangskoeffizient	-
m, n	Exponent Parameter	-
N _{kond}	Kondensationsfluß	mol/m ² s
m _{kond}	Kondensationsmasse	g, kg
m	Masse, Molekülmasse	kg
Nm ³	Normkubikmeter	m ³
Nu	Nusseltzahl	-
Re	Reynoldszahl	-
Pr	Prandtlzahl	-
Sh	Sherwoodzahl	-
Sc	Schmidtzahl	-
Le	Lewiszahl	-
CFD	Computational Fluid Dynamics	-
KCl	Kaliumchlorid	-
TS	Trockensubstanz	-
FM	Festmeter	-

Kurzfassung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit richtet sich auf die Kondensation von Aschedämpfen und die Feinstaubablagerung in Biomasse-befeuerten Kesseln. Zu diesem Zweck wurden in einer Versuchsanlage aschebildende Substanzen verdampft und anschließend auf einer gekühlten Sonde kondensiert. Als Modellsubstanz für die Aschedämpfe der Biomasse wurde Kaliumchlorid verwendet. Das Rauchgas wurde dabei mittels Verbrennung von Erdgas durch einen in der Anlage bereitgestellten Gasbrenner zur Verfügung gestellt.

Es sollten Informationen darüber gewonnen werden, welche Struktur die Depositionsschicht durch Kondensation oder Feinstaubablagerung ausbildet (Porosität, Homogenität, Festigkeit, Struktur) und wie die gebildete Depositionsschicht den Wärmeübergang beeinflusst.

Die Berechnung des Kondensationsmassenstromes der aschebildenden Substanz mittels eines Ähnlichkeitsansatzes zum Wärmeübergang (Lewis-Ansatz) zeigt eine gute Übereinstimmung zu den experimentellen Versuchen. Die Depositionsschicht weist eine sehr hohe Porosität ($p > 0,97$) auf. Das Wärmeleitmodell „k maximum“ berechnet entsprechende Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Depositionsschicht. Die Struktur der gebildeten Depositionsschicht ist von der Oberflächentemperatur der Sonde abhängig. Bei niedriger Sondentemperatur ($T_1 = 300 \text{ °C}$) bildet sich das Gefüge der Kondensationsschicht aus Kaliumchlorid als würfelförmige Kristalle aus, die „turmartig“ aufeinander herauswachsen. Diese Schicht zeichnet sich durch eine höhere Stabilität aus. Bei höherer Sondentemperatur ($T_2 = 500 \text{ °C}$) ist das Gefüge aus kleineren nadeligen und tröpfchenförmigen Kristallen aufgebaut, welche „baumartig“ herauswachsen. Diese Struktur hat eine niedrige Stabilität. Wenn man die Kondensationsschicht am Depositionsring betrachtet wird ersichtlich, dass sich die Verteilung der Depositionsmenge in Abhängigkeit von der Depositionsmasse sehr unterschiedlich ausbildet. Bei geringer Depositionsmenge ($m < 0,01 \text{ [g]}$) ist die Verteilung gleichmäßig um den Ring verteilt, bei höherer Depositionsmenge ($m > 0,01 \text{ [g]}$) befindet sich der Hauptteil der Depositionsmasse hauptsächlich auf der rauchgaszugewandten Seite der Sonde.

Obwohl die Berechnung der Kondensationsmassenströme mit Hilfe des Ähnlichkeitsansatzes eine gute Übereinstimmung zeigt, sind die berechneten Werte stets etwas höher als die gemessenen Ergebnisse. Es wird vermutet, dass die Ursache in der hohen Instabilität der Depositionsschicht liegt, wodurch Erosionsvorgänge durch die vom Rauchgas erzeugten Schubspannungen die Depositionsschichtdicke reduzieren.

Die Wärmeleitfähigkeit der Depositionsschicht ist aufgrund der hohen Porosität (hoher Anteil des fluiden Rauchgasanteils mit geringer Wärmeleitfähigkeit, kleiner Anteil des stark wärmeleitenden festen Kaliumchlorids) sehr niedrig, aber trotzdem deutlich höher als die Wärmeleitfähigkeit des Rauchgases. Sie liegt in der Größenordnung von $k = 0,1-0,2 \text{ [W/mK]}$. Schon geringe Depositionsschichtmassen bewirken eine starke Verringerung des Wärmeüberganges und einen damit verbundenen hohen Temperaturgradienten in der Depositionsschicht.

In dieser Arbeit wurden die für den Aufbau der Depositionsschicht maßgebenden Einflussfaktoren untersucht. Diese sind die Rauchgasgeschwindigkeit, die Salzfreesetzung, die Kondensationsdauer und die Oberflächentemperatur. Die Salzfreesetzung ist maßgebend für die Kondensationsmasse. Eine Verdoppelung der Salzfreesetzungsrate zeigte im untersuchten Wandbereich eine Verdoppelung der Kondensationsrate. Eine Verdoppelung der Rauchgasgeschwindigkeit führte zu einer geringen Abnahme der Kondensationsmasse bei gleichbleibenden Betriebsparametern, welches höchstwahrscheinlich durch Erosionsvorgänge bedingt ist. Die Sondenoberflächentemperatur zeigte im untersuchten Temperaturbereich von $300\text{°C}-500\text{°C}$ bei geringen Kondensationsmassen keinen Einfluss auf die Kondensationsrate. Bei größeren Depositionsschichten hatte die höhere Temperatur eine Verringerung der Kondensationsrate zur Folge.

Abstract

The combustion of biomass causes the formation of large quantities of troublesome ash deposits which contain significant amount of alkali and earth-alkali metals. This work faces on the condensation of ash forming vapours in biomass fired boilers. By using an electrically heated drop tube furnace potassium chloride (KCl) was evaporated and then condensed on an air cooled probe. The heat needed for the evaporation of the salt as well as the flue gas was produced from a gas burner firing methane.

The aim of this thesis was to gain more information about the structure (porosity, homogeneity, strength, structure) of the deposit layer formed by condensation and fine particle deposition. Furthermore, the heat transfer properties of the deposition layer have been investigated.

The calculation of the mass transfer of the ash forming substance by using a mass transfer approach (Lewis correlation) shows good results in comparison to the experiments. The deposit layer has a very high porosity ($p > 0,97$). The heat transfer model “k maximum” shows good results in comparison to the experiments. The deposit structure depends on the probe surface temperature. The structure at lower probe temperatures ($T_s=300$ °C) shows small cubic crystals, which grow on one another like “towers”. At a probe temperature of 500°C the condensed structure shows smaller needles, which form a structure looking like a “tree”. This structure has a lower stability.

The distribution of the deposition mass on the deposition ring depends on the amount of the deposition mass. A small amount shows a uniform distribution over the ring. With increasing amount the condensation rate on the upper side of the ring gets much higher than on the lower ringside.

Although the calculation of the deposition mass transfer is in good approximation with the measured results, the calculated values are always a bit higher. It is assumed that this is caused by the high porosity of the deposition layer, which causes erosion processes.

Because of the high porosity the heat transfer coefficient of the deposition layer is low, but higher than the one of the flue gas. The value determined for the heat transfer coefficient of the deposit layer ranges between 0.1 – 0.2 [W/mK]. Small amounts of deposits cause high temperature gradients in the deposit layer.

Moreover main influencing parameters on deposit formation have been investigated. They are the flue gas velocity, the duration of the experiment, the salt evaporation rate and the surface temperature of the probe. The evaporation rate is the key parameter for the condensation rate. When the evaporation rate got doubled the condensation rate also doubled within the concentration range investigated. The flue gas velocity has an influence on the instable deposition layer. When the flue gas velocity increases by the factor of two, the deposition mass decreases slightly. The surface temperature of the deposit probe has no influence when the amount of deposit is low. When the height of the deposition layer improves condensation rates decrease due to the reduced temperature gradient between deposit surface and flue gas temperature.

I.) EINLEITUNG UND THEORETISCHE GRUNDLAGEN

1. EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Weltweit steigt der Energiebedarf seit Beginn der Industrialisierung sehr stark. Dieser Anstieg wird durch die erwartete bzw. teilweise schon eingetretene wirtschaftliche Entwicklung in den Entwicklungs- und Schwellenländern wie China und Indien noch stärker beschleunigt. Der mit der Verwendung von fossilen Energieträgern verbundene Anstieg der Emissionen von Treibhausgasen in der Atmosphäre und die steigende (Import-) Abhängigkeit von fossilen Energieträgern haben in den letzten Jahren zu einem breiten Umdenkprozess hinsichtlich der Energieaufbringung und –verwendung sowie des Klimaschutzes geführt. Dokumentiert sind die Diskussionsprozesse und deren Ergebnisse in Protokollen der Klimaschutzkonferenzen, in Vorschlägen, Richtlinien, Weiß – und Grünbüchern der Europäischen Union aber auch durch die freiwillige Teilnahme und Unterzeichnung von Klimaschutz- und Energieprogrammen auf nationaler, regionaler und auch auf Unternehmensebene.

Mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger können positive Beiträge zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und zur Senkung der Importabhängigkeit von fossilen Energieträgern geleistet werden. Gleichzeitig kann die heimische Wirtschaft, hier insbesondere im ländlichen Bereich, zusätzliche Einnahmequellen erschließen. Dadurch kann unter bestimmten Umständen die lokale Wirtschaft aufgrund der verstärkten dezentralen Energieaufbringung mit deren Beschäftigungsauswirkungen diesen Regionen wichtige wirtschaftliche Impulse geben.

Motivation zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger:

1. Treibhausproblematik
2. Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist nachhaltig, wenn deren Nutzung nachhaltig erfolgt
3. Die Nutzung von fossilen Energieträgern bedeutet Großteils Importabhängigkeit
4. Internationale, europäische und nationale Verpflichtungen

1.2 Nachhaltige Energieträger

Die auf der Erde insgesamt nutzbaren Energieströme entspringen drei grundsätzlich unterschiedlichen primären Energiequellen. Das sind die Planetengravitation und Planetenbewegung, aus denen die Gezeitenenergie resultiert, die Erdwärme und die Sonnenenergie. Dabei ist die von der Sonne eingestrahlte Energie mit Abstand die größte Quelle des regenerativen Energieangebots. Es folgen die Erdwärme, die im Vergleich dazu eine deutlich geringere flächenbezogene Energiedichte (z.B. die auf einen Quadratmeter Erdoberfläche bezogene Energiemenge im Jahresverlauf) hat, und die Gezeitenenergie, die – bezogen auf die im Energiesystem „Erde“ umgesetzte Energie – die im Abstand geringste Bedeutung hat.

Aus diesen drei Quellen werden durch verschiedene natürliche Umwandlungen innerhalb der Erdatmosphäre eine Reihe sehr unterschiedlicher weiterer Energieströme hervorgerufen. So stellen beispielsweise die Windenergie und die Wasserkraft wie auch die Meeresströmungsenergie und die Biomasse umgewandelte Formen der Sonnenenergie dar.

1.3 Biomasse als nachhaltiger Energieträger

Der Begriff Biomasse: Definition:

... sämtliche Stoffe organischer Herkunft (d.h. kohlenstoffhaltige Materie),
z.B.:

- 1.) Die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere)
- 2.) Die daraus resultierenden Rückstände (z.B. tierische Exkremente)
- 3.) Abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z.B. Stroh)
- 4.) Alle Stoffe, die beispielsweise durch eine technische Umwandlung und/oder eine stoffliche Nutzung entstanden sind bzw. anfallen (z.B. Schwarzlauge, Papier und Zellstoff, Schlachthofabfälle, organische Hausmüllfraktion, Pflanzenöl, Alkohol)



Abbildung 1.1: Erscheinungsformen der Biomasse (Quelle: inmarus.eu).

Insbesondere hat die Biomassennutzung als erneuerbare Energiequelle in Österreich eine wichtige Rolle eingenommen. Wenn man das Energiepotential allein für Biomasse in Österreich betrachtet, wird auch klar warum das so ist. In Österreich sind ca. 48 % der Fläche bewaldet (Stand 2002, Quelle [17]). Der jährliche Brutto-Zuwachs an holzartiger Biomasse beträgt in Österreich ca. 32,3 Mio. Festmeter. Bei einer durchschnittlichen Dichte von 430 [kg TS/FM] und einem durchschnittlichen Brennwert von 18,6 [MJ/kg TS] resultiert daraus ein theoretisches Energiepotential von ca. 258 [PJ]. Hinzu kommen noch andere Arten von Biomasse wie z.B.: Energiehölzer, Kurzumtriebspflanzen welche das gesamte Energiepotenzial noch deutlich erhöhen (Datenquelle [17], [23], [24]).

Biomasse als Energieträger ist CO₂ Neutral:

Biomasse Brennstoffe sind in der unmittelbaren Gegenwart entstanden, das heißt etwa in den letzten 100 Jahren. Die Pflanzen nehmen durch Photosynthese Kohlenstoff auf und speichern diesen, wirken somit in der Wachstumsphase als CO₂ Speicher. Der Kohlenstoff der in der Wachstumsphase aus der Atmosphäre entnommen wurde hat die gleiche Menge, die auch auf natürlichem Wege (z. B. durch Verrotten) in die Atmosphäre zurück gelangen würde. Durch deren Verbrennung stiege also der CO₂-Anteil in der Atmosphäre nicht, sondern bliebe selbst bei leichten Schwankungen um den Gleichgewichtszustand im Wesentlichen stabil, wenn die Verbrennung ähnlich langsam vonstatten gehen würde wie der Prozess der CO₂-Entnahme beim Wachsen der Brennstoffe. Die Verbrennung von Biomasse gilt daher als „CO₂ Neutral“, jedoch nur wenn eine nachhaltige Biomassennutzung gegeben ist. Der Kohlenstoff der fossilen Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) wurde ebenfalls der Atmosphäre entzogen, jedoch vor Millionen von Jahren. Bei der Verbrennung wird dieser in Form von CO₂ frei und trägt zum Treibhauseffekt bei.

1.4 Die Hauptelemente der Biomasse

Die Biomasse besteht aus chemischen Verbindungen vieler Elemente. Abhängig von der Zusammensetzung der Biomasse sind alle physikalischen Eigenschaften. Die Hauptbestandteile der holzartigen Biomasse sind in der Abbildung 1.2 dargestellt.

Ökosystem Baum und die Elementare Zusammensetzung der Pflanzensubstanz

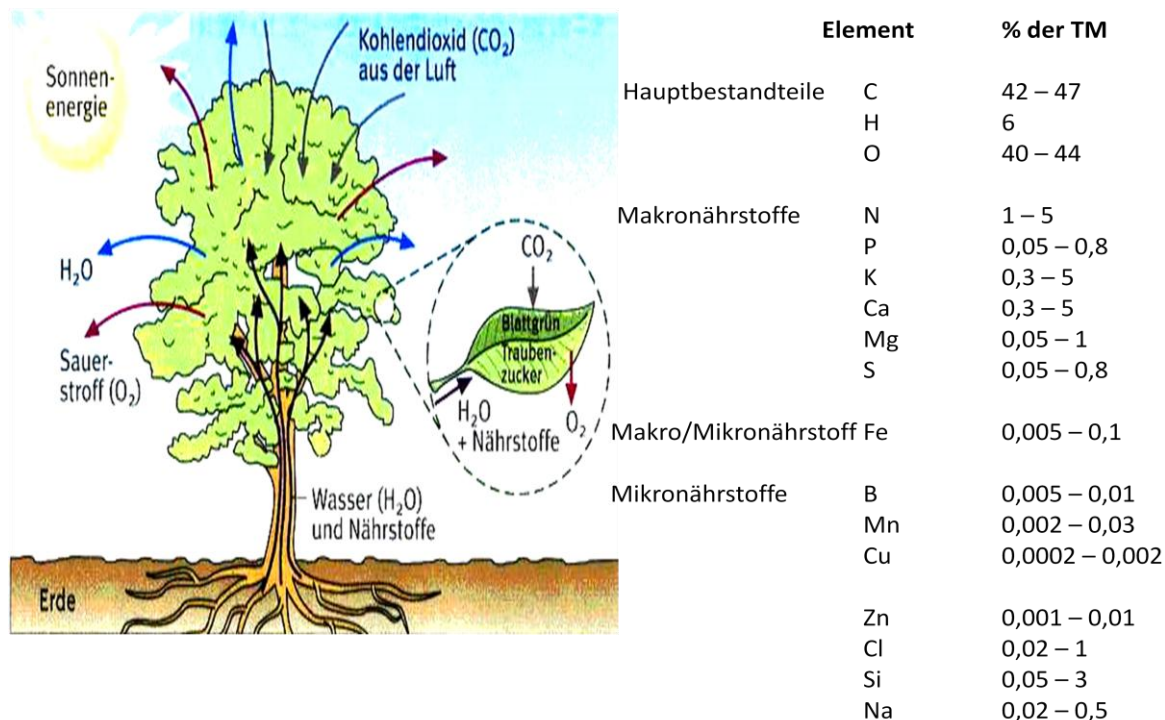


Abbildung 1.2: Elementarzusammensetzung von holzartiger Biomasse (Werte: Datenquelle [1]).

Erklärung der Haupt- und Nebenbestandteile der holzartigen Biomasse:

Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff. Feste pflanzliche Biomasse besteht im Wesentlichen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Die Komponente biogener Festbrennstoffe, durch deren Oxidation die freigesetzte Energie weitgehend bestimmt wird ist der Kohlenstoff. Daneben liefert der Wasserstoff bei der Oxidation ebenfalls Energie, während der Sauerstoff lediglich den Oxidationsvorgang unterstützt.

Mit 42 bis 47 Gew.-% in der Trockenmasse (TM) haben Holzbrennstoffe den höchsten C-Gehalt, während die Mehrzahl der Nicht-Holz-Brennstoffe meist einen C-Gehalt von 43-48 % aufweisen. Der Sauerstoffgehalt liegt zw. 40 und 44 % in der TM und der des Wasserstoffs zw. 5 und 7 %. Da der Kohlenstoff in biogenen Festbrennstoffen in teiloxidiert Form mit einem entsprechend hohen Sauerstoffgehalt vorliegt ist der Kohlenstoffgehalt insgesamt niedriger als bei den Kohle-Brennstoffen, und somit auch der Heizwert.

Stickstoff (0,1 - 2,5%). Stickstoff ist ein Bestandteil von Eiweiß, Enzyme, Vitamine und Chlorophyll und gilt somit als wachstumsfördernd. Der Stickstoffgehalt variiert zwischen verschiedenen Biomassen deutlich. Biomasse mit hohem Eiweißgehalt (Getreide, Ölsaaten, Proteinpflanzen, Halmgüter mit hohem Futterwert) haben höhere Stickstoffgehalte als Lignocellulosematerialien (Holz, Stroh). Fichtenholz: 0,1 – 0,2 % TM, Getreidestroh: 0,5 % TM. Gras: bis 2,5 % TM, Stickstoff bildet bei der Oxidation NO_x , N_2O Emissionen.

Aschebildende: Elemente:

Das sind Bestandteile der Biomasse, welche bei der Verbrennung Asche, Flugasche bzw. Aerosole bilden können: In erster Linie sind das: Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S), Chlor (Cl), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Silizium (Si) und Natrium (Na), Zink (Zn), Blei (Pb). Die wichtigsten asche- und aerosolbildenden Elemente werden nun erklärt.

Kalium (0,2 - 2,5% TM). Kalium spielt bei der Regulierung des Wasserhaushaltes der Pflanze eine wichtige Rolle und fördert den Pflanzenwachstum durch den Aufbau von Makromolekülen (Cellulose, Stärke und Proteine). Ähnlich wie beim Stickstoff kommt es auch beim Kaliumgehalt in der Biomasse zu deutlichen Unterschieden zwischen den regelmäßig gedüngten Feldkulturen und den ungedüngten Holzkulturen. Kalium befindet sich aber meist in den Stängeln und Blättern. Getreidekörner: 0,5 – 0,7 % TM, Getreidestroh: 0,2-2,5 % TM, Holzbrennstoffe: bis ca. 0,35 % TM und niedrige Schwankungsbreite. Kalium ist an Korrosionsvorgängen in den Wärmeübertragern und abgasführenden Bestandteilen von Feuerungsanlagen beteiligt. Die Mitwirkung an Korrosionsvorgängen resultiert bei Kalium (und Natrium) daraus, dass diese Elemente bei der Verbrennung zum Teil gasförmige Alkalichloride bilden können, die bei der Abkühlung an Wärmeübertrageroberflächen oder an Flugstaubpartikeln kondensieren. Auf Wärmeübertragern reagieren sie dann mit Schwefeloxiden aus dem Abgas zu Alkalisulfaten und setzen Chlor frei. Letzteres kann durch die porösen Zunderschichten an die Rohrwand des Wärmeübertrages diffundieren, auf der es wegen der dort vorherrschenden reduzierenden Bedingungen zur Bildung von Eisenchlorid (FeCl_2) kommt. Aufgrund der großen Temperaturunterschiede innerhalb der Ablagerungsschicht auf dem Wärmeübertrager kommt es dabei zu unterschiedlichen FeCl_2 -Partialdrücken. Die in der Nähe der Rohrwand vorherrschenden Bedingungen führen dazu, dass die gasförmige Verbindung wiederum von der Rohrwand wegdiffundiert. In äußeren Schichten ändern sich die Bedingungen und es kommt zur Oxidation. Dabei wird das Eisen oxidiert, so dass ein Teil des freigesetzten Chlors erneut für den Korrosionsprozess zur Verfügung steht (sogenannte **Hochtemperatur – Chlorkorrosion**). Kalium ist in der Gasphase Aerosolbildner z.B. in Verbindung mit Chlor und Schwefeldioxid (KCl und K_2SO_4). Der Kaliumgehalt des Brennstoffes und die Verbrennungstechnologie sind somit maßgebend hinsichtlich der Feinstaubemissionen des Rauchgases. Ein hoher Kaliumgehalt senkt die Ascheerweichungstemperatur und ist somit problematisch in Hinsicht auf die Klebrigkeit und das Schmelzverhalten der Asche. Kalium erhöht den Düngewert der Asche.

Kalzium (0,1 – 2 % TM): Kalzium ist für die Aktivierung einiger Enzyme in der Pflanze verantwortlich und ist ein wichtiger Baustein für das Grundgerüst der Pflanze. Kalzium ist an allen wichtigen Lebensvorgängen der Pflanze beteiligt und regelt die Nährstoffaufnahme. Der Kalziumgehalt wirkt sich auf die Biomasseasche schmelzpunkterhöhend aus. Bei Brennstoffen mit ungünstigem Ascheerweichungsverhalten kann deshalb durch Verwendung von Ca-haltigen Zuschlagstoffen (z.B. Kalk) der Ascheschmelzpunkt erhöht werden. Hohe Alkaligehalte (vor allem Ca) führen u. a. auch dazu, dass Teile des Schwefels in der Asche verbleiben, und sich somit nicht im Abgas als Schwefeldioxid (SO_2) wiederfinden. Kalzium bildet Asche bzw. grobe Flugasche.

Phosphor (0,03 – 0,5% TM). Phosphor fördert das generative Wachstum (Blüten, Samen und Fruchtbildung) und spielt eine wichtige Rolle beim Energiehaushalt der Pflanze. Es ist auch ein wichtiges Bauelement der Zellmembran, Enzyme und Nukleinsäuren. Phosphor erhöht den Düngewert in der Asche.

Magnesium (0,05 – 0,5% TM). Magnesium ist als Zentralatom des Chlorophylls unentbehrlich und aktiviert Enzymreaktionen, die den Aufbau von Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen regeln, und ist auch für die Regulierung des Wasserhaushaltes und des pH-Werts der Pflanze wichtig. Magnesium erhöht so wie Kalzium den Ascheschmelzpunkt und

den Düngewert der Asche. Bei der Biomassefeuerung bildet Magnesium Asche bzw. grobe Flugasche.

Schwefel (0,02 - 0,3% TM). Schwefel ist ein Bestandteil von Aminosäuren, Vitaminen und Enzymen und ist daher wichtig für die Eiweißbildung und den Chlorophyllhaushalt. Schwefel ist ein häufiger Begleitstoff bei Düngemitteln, daher bei den Feldkulturen deutlich höher als bei ungedüngten Waldflächen: 0,02 (holzartig, Kurzumtriebspflazen) – 0,3 % (Rapsstroh) TM. Der Schwefelgehalt bestimmt bei der Verbrennung die Schwefeldioxid Emission. Der Schwefel geht dabei unter Bildung von SO₂, SO₃ und Alkalisulfatstufen größtenteils in die gasförmige Phase über. Wie beim Chlorid kommt es während der Abkühlung der Abgase im Kessel teilweise zu einer Rückkondensation, bei der sich Alkali- und Erdalkalisulfate entweder an den mitgeführten Flugaschepartikeln oder an den Wärmetauscheroberflächen niederschlagen. Bei einem hohen Verhältnis von Schwefel/Chlor wird dem Korrosionsvorgang entgegengewirkt.

Chlor (0,05 - 1% TM). Ist ein Begleitstoff in Kalium-Düngemitteln. Ist also deutlich höher in gedüngten Feldkulturen als im Holz. 0,005 – 0,02 % bei Holzbrennstoffe. 0,2 – 0,5 % bei Getreidestroh, in küstennahen Gebieten sogar bis 1 %. Durch eine Auswaschung kann der Chlorgehalt beim Stroh deutlich (bis zu 80 %) gesenkt werden. Chlor bildet unter anderem HCl und PCDD/PCDF (Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane) und ist bezüglich den Rauchgasemissionen problematisch. Chlor ist im Zusammenspiel mit Alkali- und Erdalkalimetallen und mit Schwefeldioxid (SO₂) an der Oberfläche der Wärmeübertrager korrosiv. Darüber hinaus zählt es zu den aerosolbildenden Elementen, die einen Anstieg der Partikelemissionen bei der Verbrennung bewirken.

Silizium (0,05-3% TM). Silizium reichert sich an den Zellwänden der Pflanze an und sorgt für bessere Festigkeit und somit für die Gesundheit der Pflanze. Bei der Biomassefeuerung bleibt Silizium in der Asche bzw. in der groben Flugasche

Natrium (0,02-0,5% TM). Natrium ist für einige Gemüsesorten Wachstumsfördernd. Natrium reagiert in Verbindung mit Chlor zu Natriumchlorid (NaCl). NaCl ist in der Gasphase problematisch in Hinsicht auf Emissionen (Aerosolbildung) und verursacht bei der Kondensation auf Wärmeübertrageroberflächen Hochtemperaturchlorkorrosion. Natrium senkt die Ascheschmelztemperatur.

Spurenelemente (Cu, Pb, Zn, B, Al, Fe): Die meist in der Asche verbleibenden Elemente (meist Schwermetalle) bestimmen die Qualität und die Verwendbarkeit der Asche z.B. als Düngemittel. Im Allgemeinen hat holzartige Biomasse eine höhere Schwermetallbelastung als jährlich erntbare Kulturen. Zink und Blei sind aerosolbildend.

(Datenquelle: [1], [23]).

1.5 Aschedepositionen und aschebedingte Probleme

Biomasse als Energieträger ist in vielerlei Hinsicht problematisch im Vergleich zu fossilen Brennstoffen. Bei der Verbrennung von Biomasse entstehen große Mengen an Grob- und Feinstaubemissionen, sowie auch Wirkungsgradverluste durch Depositionen an Wärmeübertrageroberflächen. Es liegt nun an der Technik, diese Probleme in den Griff zu kriegen und entsprechende Feuerungstechniken zu entwickeln, damit die Wirtschaftlichkeit des Energieträgers Biomasse noch weiter verbessert wird.

Biomasse enthält vielerlei chemische Verbindungen, die problematisch bei der Feuerung sein können. Diese Elemente können bei der Verbrennung Flugasche (Kalzium, Magnesium, Silizium) und Aersole (Kalium, Natrium, Schwefel, Chlor, Zink und Blei) bilden. Die Aschedepositionen haben eine spezifische Zusammensetzung, die vom Energieträger Biomasse direkt abhängt. Die unterschiedliche Zusammensetzung der Asche hat auch unterschiedliche Eigenschaften der Asche zufolge. Hier sind die Viskosität, das Schmelzverhalten, die Struktur, sowie die Menge der Ascheablagerungen an der Wärmetauscheroberfläche von enormer Bedeutung in Hinsicht auf Effizienz und Lebensdauer. Da Biomasse als Energieträger sehr vielseitig ist und viele Erscheinungsformen hat, sind auch die Aschedepositionen von sehr unterschiedlicher Charakteristik. Eines haben aber fast alle Biomasseenergieträger gemeinsam und das ist eine mehr oder weniger hohe Konzentration an Alkali- und Erd-Alkalimetallen. Kalium zum Beispiel verdampft zum Teil bei der Verbrennung und kann dann mit Chlor oder Schwefel zu KCl , KOH oder K_2SO_4 reagieren. Besonders problematisch ist Kalium in Verbindung mit Chlor in der Gasphase, welches auf gekühlten Wärmeübertrageroberflächen kondensieren kann. Kaliumchlorid verhält sich stark korrosiv und reagiert mit dem Eisen des Wärmeübertragers (Hochtemperaturchlorkorrosion). Einerseits zerstört die korrosive Schicht den Wärmeübertrager, andererseits behindert die Depositionsschicht den Wärmetransport, was zu Wirkungsgradeinbußen führt. Insbesondere ist Stroh-Asche problematisch. Der hohe Kalium- und Chlorgehalt bewirkt eine klebrige Asche schon bei niedrigen Temperaturen. Die klebrige Asche bewirkt eine höhere Ascheansammlung an Wärmeübertragungsoberflächen und eine erschwerte Beseitigung der Asche (Datenquelle: [1], [17], [23]).

1.6 Beschreibung von Kaliumchlorid

KCl (Kalium-Chlorid, auch Sylvin genannt; eng: Potassium-Chloride):

Kaliumchlorid ist ein Mineral aus der Mineralklasse der einfachen Halogenide. Es kristallisiert im kubischen Kristallsystem mit der chemischen Zusammensetzung KCl und entwickelt meist würfelförmige Kristalle, die entweder farblos oder durch Fremd Beimengungen gelblich oder rötlich (seltener bläulich oder violett) gefärbt sein können.

Verwendung:

- Dünger
- Geschmacksverstärker: Lebensmittelzusatz E 508
- Härtesalz in der Metallindustrie
- Streusalz (wegen der tieferen Schmelztemperatur einer Kaliumchlorid-Wasser-Mischung ist es auch bei Temperaturen unter -10 °C wirtschaftlich einsetzbar).
- Rohstoff für die Herstellung fast aller Kaliumverbindungen (beispielsweise Kaliumcarbonat, Kaliumhydroxid)



Abbildung 1.3: Erscheinungsformen von Kaliumchlorid (Quelle: mineralienatlas.de/lexikon).

Charakteristische Eckdaten für KCl:

Mineralklasse: Halogenide – einfache Halogenide

Kristallsystem: kubisch

Mohshärte: 1,5-2

Dichte: $1,98-2\text{ [g/cm}^3\text{]}$

Transparenz: durchsichtig bis durchscheinend

Bruch: uneben

Molare Masse: $74,55\text{ [g/mol]}$

Schmelzpunkt: 773 °C

Siedepunkt: 1500 °C

Dampfdruck: 10 Pa (700 °C)

Löslichkeit: gut: $330\text{g / Liter Wasser } 20\text{ °C}$

Wärmeleitfähigkeit: $6,53\text{ [W/mK]}$

Wärmekapazität: 690 [J/kgK]

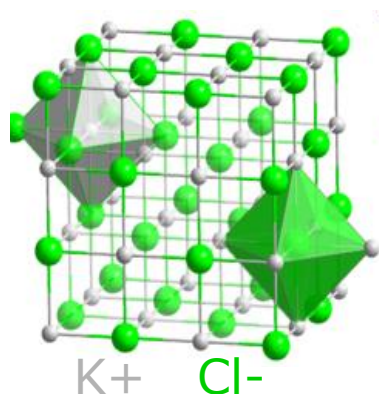


Abbildung 1.4: Gitterstruktur KCl (Quelle: Wikipedia).

1.7 Aufgabenstellung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit richtet sich auf die Kondensation von Aschedämpfen und die Feinstaubablagerung in Biomassefeuerungen. Als Modells substanz für die Aschedämpfe der Biomasse wird in dieser Arbeit **KCl** verwendet, um komplexe thermodynamische Gleichgewichtseinstellungen sowie kinetisch limitierte Reaktionen, die bei Aschedämpfen aus Biomasse auftreten können, zunächst ausschließen zu können. Die Betrachtung soll auf die häufig auftretende Geometrie bei Biomasse-befeuerten Kesseln beschränkt werden: Kondensation und Feinstaubablagerung auf einem querumströmten, gekühlten Rohr.

Es sollte geklärt werden, ob die in der Literatur verfügbaren Modelle in der Lage sind, den Stofftransport von Aschedämpfen an die Wand von Wärmeübertragern sowie den Einfluss der Kondensate und der Feinstaubablagerung auf den Wärmerübergang abzubilden.

Insbesondere sollten Informationen gewonnen werden, welche Struktur die Depositionsschicht durch die unterschiedlichen Mechanismen wie Kondensation oder Feinstaubablagerung ausbildet (Porosität, Homogenität, Festigkeit, Struktur) und wie sich diese in Abhängigkeit von der Temperatur und Konzentration der Aschedämpfe ändern.

Hierzu wurden Experimente an einer Versuchsanlage durchgeführt, wobei die erhaltenen experimentellen Daten mit Modelldaten aus der Literatur verglichen wurden. Für eine orts aufgelöste Betrachtung der relevanten Prozesse wurden CFD Simulationen durchgeführt, wobei die Software ANSYS/FLUENT zum Einsatz kam.

Die Versuche wurden an einer neu konzipierten Versuchsanlage durchgeführt, wobei die experimentellen Daten zum umströmten, gekühlten Rohr mit Hilfe einer Depositionssonde gewonnen wurden.

Um für die CFD Simulationen ein geeignetes Simulationsgebiet festlegen zu können sollte im Vorfeld das Strömungs- und Temperaturfeld der Gesamtanlage mit Hilfe von FLUENT berechnet werden.

Es wurde zunächst der Wärmeübergang ohne den Einfluss von Aschedämpfen berechnet und mit experimentellen Daten validiert. Zur experimentellen Validierung wurde dabei die Versuchsanlage mit einem Gasbrenner betrieben und der Wärmeübertragung sowohl auf der Gas- als auch auf der Wasserseite vermessen.

Hierzu wurden verschiedene Leistungsbereiche (Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur) gewählt und die erhaltenen Ergebnisse mit CFD Simulationen verglichen.

In einem weiteren Schritt wurde ein definierter Massenstrom an Kaliumchlorid im Brennerbetrieb der Anlage freigesetzt. Der zeitlich veränderte Wärmeübergang an der Depositionssonde durch die sich ablagernden Salze wurde als Funktion der Zeit vermessen.

Das Ziel der Arbeit war somit, ein vertieftes Verständnis zu entwickeln, wie sich Aschedämpfe auf den Wärmeübergang in biomassebefeuchten Kesseln auswirken und inwieweit sich diese Prozesse mit vorhandenen mathematischen Modellen abbilden lassen.

1.8 Kondensation von Salzen auf gekühlten Oberflächen

Salzdämpfe im Rauchgas verursachen durch die Kondensation auf gekühlten Wärmetauscheroberflächen Depositionen und Korrosionsschäden. Kaliumchlorid und Natriumchlorid sind eine der wichtigsten Vertreter in diesem Bereich. Die Kondensationsmechanismen von Salzen sind für das Grundverständnis von Depositionsvorgängen und deren Einfluss auf dem Wärmeübergang wichtig. In diesem Kapitel wird kurz zusammengefasst, wie die beiden Salze im Rauchgas auf gekühlten Oberflächen kondensieren, also ob die Salze zusammen in einer Lösung oder ob sie getrennt von einander kondensieren. Dazu wurden in einer Anlage (Datenquelle [4]) Salze verdampft und anschließend auf einer luftgekühlten Depositionssonde kondensiert. Die Sonde hat aufgrund der Luftkühlung entlang ihrer Oberfläche eine unterschiedliche Temperatur, die mit 5 Sensoren erfasst wird. Der Strömungszustand des simulierten Rauchgases ist laminar ($Re = 4$). Zunächst wurde KCl, dann NaCl und dann ein Gemisch der Salze kondensiert. Die Depositionssonde wurde anschließend mikroskopisch untersucht um Informationen über das Depositionsgefüge zu bekommen.

Beim Verdampfen von Salz gelangt KCl und NaCl in das Rauchgas. Bei 800 °C ist etwa die Hälfte des verdampften Salzes in dimerischer Form bei Sättigungsbedingungen vorhanden, also $(KCl)_2$ und $(NaCl)_2$. Beim Abkühlen, wenn die Chloride Sättigungstemperatur erreicht haben, beginnen verdampfte Chlormoleküle Cluster zu bilden (nucleation embryos) in der Größe von ein paar hundert Molekülen. Die Cluster wachsen bis sich flüssige bzw. feste Partikel zu bilden beginnen. Bei typischen Verbrennungsbedingungen ist die Größe solcher homogen gebildeten Partikel ca. 0,1 μm . Ein Übersättigungszustand ist für die homogene Nukleation notwendig. Bei einem Rauchgas mit KCl und NaCl können sich also Embryos beider Salze getrennt von einander bilden, oder beider Salze in einem als Lösung. Für beide Fälle gibt es unterschiedliche Verläufe der Kondensationstemperaturen.

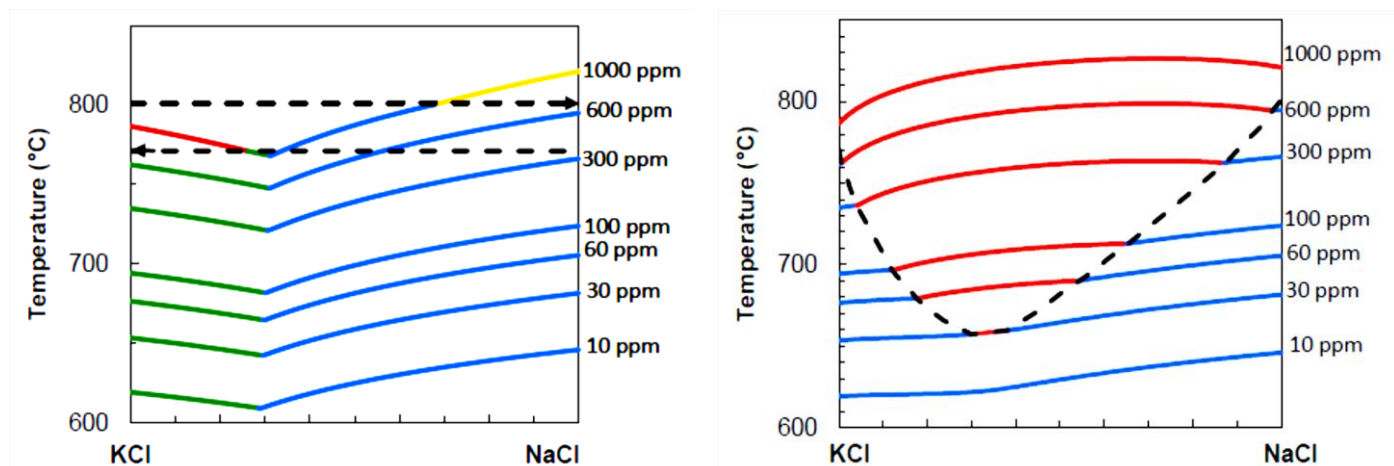


Abbildung 1.5 links: Kondensation von KCl und NaCl bei getrennten Phasen (links) die strichlierte Linie ist die Liquiduslinie (NaCl oben, KCl unten). Die gefärbten Linien sind die primär kondensierten Phasen: Rot: flüssiges KCl, Grün: festes KCl, Gelb: flüssiges NaCl, Blau: festes NaCl. Rechts: Kondensation von KCl und NaCl als Lösung. Die strichlierte Linie ist die Liquiduslinie. Über der Linie ist das Gefüge in geschmolzener Form (Schmelze-Rot), darunter als Mischkristall (Blau). Beide bestehen aus KCl und NaCl abhängig von der horizontalen Achse. (Datenquelle [4]).

Bei typischen Rauchgasen ist aus energetischer Sicht die heterogene Nukleation gegenüber der homogenen bevorzugt. Es sind viele kleine Partikel in solchen Rauchgasen, die als Basis für die heterogene Nukleation dienen. Besteht zum Beispiel die Basis für den Beginn der

Nukleation aus einem Sulfat, bildet sich eine Mischung aus Sulfat und Chlorid mit unterschiedlichen Schmelzeigenschaften als das reine Chlorid. Chloride kondensieren auch an inerten Partikeln wie Oxide. In diesem Fall sind die thermodynamischen Eigenschaften der kondensierten Partikel ähnlich die des reinen Chlorids.

Ergebnisse dieser Studie: Es existieren unterschiedliche Depositionsmechanismen bei verschiedenen Sondentemperaturen. Bei niedrigen Temperaturen ($< 500\text{ °C}$) wird ein kompaktes stark vernetztes Gefüge gebildet, das auf einen Schichtaufbau durch homogene Nukleation und Partikeltransport innerhalb der thermischen Grenzschicht rückschließen lässt. Mit steigender Temperatur wird das Kristall grösser und sieht nadelig aus. Dieses Kristall könnte durch die Wärmeleitfähigkeit des gekühlten Kristalls durch direkte Kondensation gewachsen sein. Bei noch weiter ansteigender Temperatur werden die Enden des Kristalls rundlicher, aufgrund vom Sintereinfluss. Bei höheren Temperaturen sieht das Gefüge noch verschmolzener aus.

Bei NaCl ist die Morphologie der Deposition unterschiedlich. Bei kalten Temperaturen ist es zunächst ähnlich zu KCl, eine weiße kompakt zusammenhängende Depositionsschicht, bei steigender Temperatur wirkt das Gefüge verschmolzener, welches zeigt dass NaCl eine stärkere Unterkühlung bzw. mehr Zeit für die Kondensation benötigt, bzw. stärker zum Sintern neigt.

Beim Salzgemisch ist die Deposition transparent. Bei der mikroskopischen Untersuchung wird erkennbar, dass das Gefüge anders als das von reinen Salzen aussieht. Die Deposition ist unregelmäßig geformt mit Partikelgrößen von etwa $20\text{ }\mu\text{m}$. Partikel dieser Größe sind nicht durch homogene oder heterogene Nukleation geformt, sondern durch Sintervorgänge, die eine Reformation verursachen. Bei der spektralen Untersuchung wurde festgestellt, dass KCl und NaCl als Salze gefrieren ohne sich zu vermischen. Kleinere Mengen stellen eine Lösung dar, welche auf Sublimationsprozesse und Sinterung zurückzuführen sind.

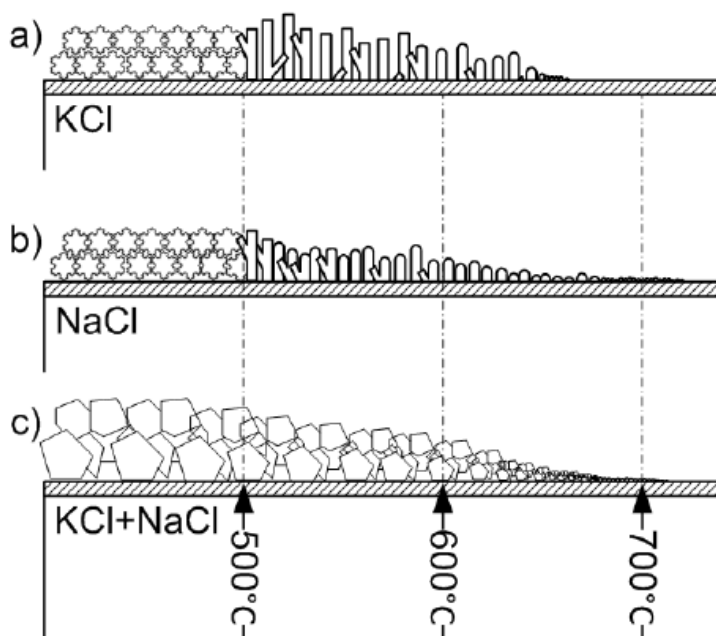


Abbildung 1.6: Aufbau der Depositionsschicht an der Sonde bei verschiedenen Sondentemperaturen für KCl (a) und NaCl (b) und das Gemisch beider Salze (c) (Datenquelle [4]).

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Grundlagen des Wärme- und Stofftransports. Es wird zunächst auf die wichtigsten Wärmeübertragungsmechanismen eingegangen. Danach wird der Stoffübergang behandelt, um schließlich die Kondensation von Salzen sowie deren Wärmeübertragungseigenschaften auf zylindrischen Wärmeübertrageroberflächen zu berechnen.

2.1 Wärmetransport an umströmten Wärmetauscherrohren

In diesem Kapitel wird auf die mathematische Beschreibung der wichtigsten Wärmetransportmechanismen eingegangen.

2.1.1 Die Wärmeübertragung allgemein

Wärmeübertragung ist der Transport thermischer Energie infolge eines Temperaturunterschiedes über mindestens eine thermodynamische Systemgrenze hinweg. Diese transportierte Energie wird als Wärme bezeichnet und ist eine Prozessgröße. Der Wärmeübergang erfolgt in Richtung kälterer Bereiche. Damit verbunden ist ein Wärmeausgleich über die Systemgrenzen hinweg. Physikalische Größe der Wärmeübertragung ist der Wärmestrom Q . Wärmeübertragung an einer Grenzfläche wird charakterisiert durch den Wärmeübergangskoeffizienten.

Wärmeübertragung ist auf drei Arten möglich:

1. Wärmeleitung
2. Konvektion
3. Strahlung

Es folgt die Beschreibung wesentlicher mathematischer Modelle für die unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen.

2.1.2 Die Wärmeleitung

Die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung Q wird durch das Fouriersche Gesetz beschrieben, dass für den vereinfachten Fall eines festen Körpers mit zwei parallelen Wandflächen wie folgt lautet:

$$Q = kA(T_{w1} - T_{w2}) \quad (1)$$

Q : Wärmeleistung, k : Wärmedurchgangskoeffizient, T_{w1}, T_{w2} : Wandtemperaturen, A : Oberfläche.

Der Wärmedurchgangskoeffizient k kann als Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes R angegeben werden. Der Zusammenhang zwischen k und R und λ lautet:

$$k = \frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} \quad (2)$$

k : Wärmedurchgangskoeffizient [W/m^2K], λ : Wärmeleitfähigkeit einer Schicht [W/mK], $h_{1,2}$: Wärmeübergangskoeffizient der Fläche 1 bzw. 2 [W/m^2K], d : Wanddicke [m], R_{ges} : Wärmedurchgangswiderstand.

Das Temperaturprofil auf einer Zylinderoberfläche ohne Wärmeverbrauch bzw. Wärmeerzeugung kann angegeben werden als:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (k \cdot r \cdot \frac{dT}{dr}) = 0 \quad (3)$$

Die Wärmeleitung wird zunächst als Variable behandelt, die Wärmeleitung durch einen Zylinder hat folgende Formulierung:

$$Q_r = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} \quad (4)$$

λ : Wärmeleitfähigkeit einer Schicht, A ist die Fläche normal zum Wärmestrom, dT: Temperaturgradient, dr: Radialer differentieller Abstand, Q_r : Wärmeleistung in radialer Richtung.

Aus Gleichung 3 und 4 folgt, dass die Wärmeleitung in radialer Richtung konstant ist. Die Temperaturverteilung im Zylinder wird mit Gleichung 1 und die passenden Randbedingungen gelöst. Der Wärmeleitkoeffizient wird in jeder Schicht als konstant angenommen:

$$T(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2 \quad (5)$$

Randbedingungen:

$$\begin{aligned} T(r_1) &= T_{s,1} \\ T(r_2) &= T_{s,2} \end{aligned} \quad (6)$$

Mit den Randbedingungen ergibt sich folgender Temperaturverlauf aus:

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (7)$$

Mit dieser Gleichung kann die Temperatur in jeder beliebigen Position in radialer Richtung berechnet werden. Zu beachten ist, dass die Wärmeleitung durch einen Zylinder logarithmisch ist, und nicht linear, wie es bei der Wärmeleitung durch eine Wand ist.

Die Wärmeleitungsgleichung lautet somit:

$$Q_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k \cdot (T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (8)$$

Mit der Wärmeleitungsgleichung und bekanntem Wärmedurchgangskoeffizient k kann die Wärmeleitung durch jede Schicht berechnet werden.

2.1.3 Der konvektive Wärmeübergang

Der konvektive Wärmeübergang von einem Fluid auf eine Wand ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

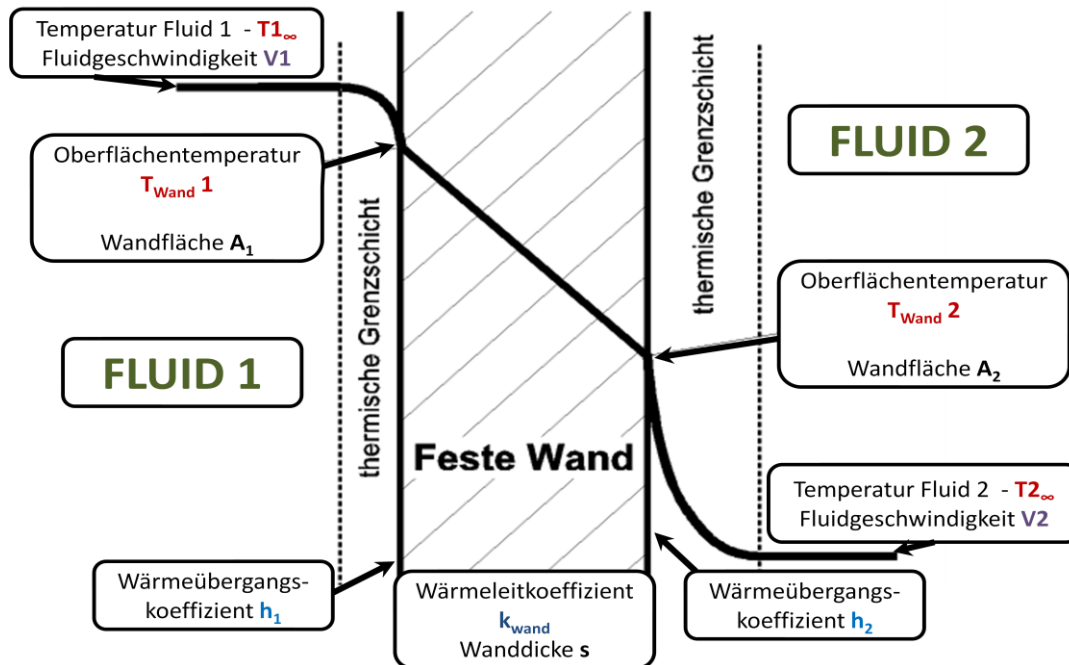


Abbildung 2.1: Temperaturprofil durch Konvektion an fester Wand.

$$Q_{\text{konvektiv}} = h \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_s) \quad (9)$$

h : Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], A : Kontaktfläche [m^2],
 $T_{1\infty, 2\infty, \text{wand2}, \text{wand1}}$: Temperaturen [K].

Im thermischen Gleichgewicht, d.h. im stationären Zustand, an der äußeren Wand folgt, dass der konvektive Wärmeübergang vom Gas auf die Oberfläche gleich der Wärmeleitung von der Oberfläche in das Rohr sein muss.

Der Wärmedurchgang durch ein zylindrisches Rohr mit mehreren Schichten, zum Beispiel eine Sonde mit einer Depositionsschicht ohne Berücksichtigung der Strahlungskomponente, sieht der Wärmetransport wie folgt aus.

$$Q_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1 \cdot h_1} + \sum_i^n \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) + \frac{1}{r_n \cdot h_2}} \quad (10)$$

Q_r : Wärmeübergang in radialer Richtung, L : Länge des Rohres, T_1 : Temperatur des Fluides Innen, T_2 : Temperatur des Fluides Außen, r_i : radialer Abstand, λ_i : Wärmeleitkoeffizient einer Schicht, h_i : Wärmeübergangskoeffizient.

Um den Wärmeübergang vom Gas auf die Wärmetauscheroberfläche berechnen zu können muss der Wärmeübergangskoeffizient h bekannt sein. Dieser wird mit Hilfe des Nusselt Zahl (Nu) für querumströmte Rohre berechnet:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda_g} = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^{1/3} \quad (11)$$

Nu : Nusselt Zahl, Re : Reynolds Zahl, Pr : Prandtl Zahl, C, n : konstante Parameter, h : Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2K], d : Schichtdicke [m], λ_g : Wärmeleitkoeffizient Rauchgas [W/mK].

Falls die Reynolds- und die Prandtlzahl bekannt sind kann mit Hilfe der Tabelle 2.2 die Gleichung (11) berechnet werden und der Wärmeübergang ist bekannt.

Re	C	n
0,4-4	0,989	0,33
4-40	0,911	0,385
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618
40000-400000	0,027	0,805

Tabelle 2.2: Parameter für die Berechnung der Nusseltzahl (Datenquelle [12]).

Die Reynoldszahl ist definiert als:

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot d}{\nu_g} \quad (12)$$

u_{∞} : Geschwindigkeit Rauchgas, d : hydraulischer Durchmesser, ν_g : kinematische Viskosität (Rauchgas).

Die Definition der Prandtl Zahl lautet:

$$Pr = \frac{C_{Pg} \cdot \mu_g}{\lambda_g} \quad (13)$$

C_{Pg} : Wärmekapazität des Gases, μ_g dynamische Viskosität des Gases, λ_g : Wärmeleitfähigkeit des Gases.

2.1.4 Der Wärmeübergang durch Strahlung

Neben dem konvektiven Wärmetransport (Kapitel 2.1.3) kann auch mittels Strahlung Wärme transportiert werden. Der von einem Körper abgestrahlte Wärmestrom \dot{Q} kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz wie folgt berechnet werden:

$$Q_{\text{strahlung}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (14)$$

Der gesamte Wärmestrom (Konvektion und Strahlung) zwischen Gas und einer Oberfläche mit gleichen Emissionsfaktoren kann wie folgt angeschrieben werden:

$$Q_{\text{konvektion+strahlung}} = h \cdot A \cdot (T_g - T_s) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_g^4 - T_s^4) \quad (15)$$

h : Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], A : Übertragungsfläche [m^2], ε : Emissionsfaktor, die Stefan-Boltzmannkonstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$], T_g : Temperatur des Gases, T_s : Temperatur der Wand.

Die Wärmetransportmechanismen bei Wärmetauschern mit Depositionsschicht werden in der folgenden Abbildung dargestellt.

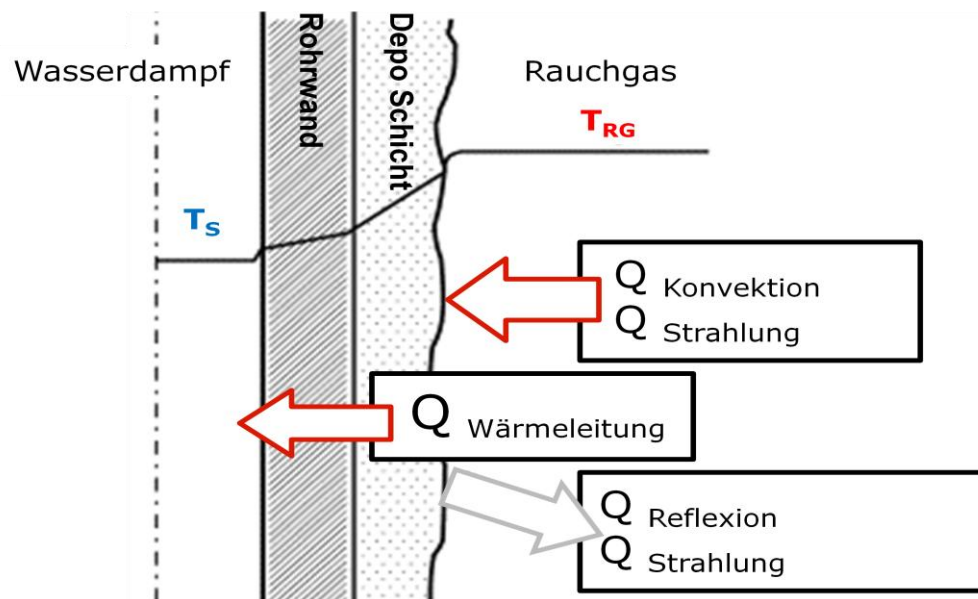


Abbildung 2.3: Wärmeübertragung am Wärmetauscher mit Depositionsschicht

Die auf einer Oberfläche auftreffende Strahlung kann absorbiert oder reflektiert werden. Beim Absorbieren wird die Energie mittels Wärmeleitung durch das Rohr zum Wasserdampf transportiert werden. Wenn man die Reflexion vernachlässigt ist das energetische Gleichgewicht an der Depositionsschicht:

$$Q_{\text{Leitung}} = Q_{\text{Konvektion + Strahlung}} \quad (16)$$

Mit der Wärmeleitungsgleichung (8) und den Ansatz für den Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung aus Gleichung (15) und die noch wegzurechnende abgestrahlte Wärmestrahlung lautet dann der Wärmeübergang im stationären Gleichgewichtszustand mit Gleichung (16):

$$\frac{T_d - T_t}{\frac{d_d}{2\pi k_d} \ln \frac{d_d}{d_w}} = h \cdot (T_g - T_d) + \alpha \sigma T_g^4 - \varepsilon \sigma T_d^4 \quad (17)$$

T_d : Temperatur an der Depositionsschicht (rauchgasseitig), T_t : Temperatur an Wärmetauscheroberfläche, T_g : Temperatur des Rauchgases, d_d : Durchmesser Deposchicht (also Rohr + Depositionsschicht), d_w : Durchmesser Wärmetauscherrohr außen, k_d : Wärmeleitkoeffizient Depositionsschicht [W/mK], h : Wärmeübergangskoeffizient Rauchgas [W/m²K], α : Absorptionskoeffizient der Depositionsschicht, ε : Emissionskoeffizient Depositionsschicht, σ : Stefan Boltzmann Konstante.

2.1.5 Rauchgaseigenschaften

Um den Wärmeübergang bestimmen zu können, muß zuerst die Rauchgasparameter bekannt sein. Um die Rauchgaszusammensetzung bei unterschiedlichen Temperaturen zu bestimmen, wurde die Verbrennungsrechnung für Erdgas herangezogen.



Die adiabate Verbrennungstemperatur lässt sich mit folgender Gleichung berechnen.

$$T = T_u + H_{\text{Reaktion}} / \sum c_{p-i} \cdot n_i \quad (19)$$

T : Temperatur des Abgases, T_u : Temperatur der Verbrennungsluft, H_{Reaktion} : Reaktionsenthalpie, c_{p-i} : Wärmekapazität der Rauchgaskomponenten, n_i : Gewichtung der Komponente im Rauchgas.

Für die Reaktionsenthalpie kann der Wert: $H_{\text{Reaktion}} = 802,3$ [kJ/kMol] eingesetzt werden.

Die Rauchgaszusammensetzung bei unterschiedlichen Temperaturen kann mit der Verbrennungsrechnung bestimmt werden (siehe Anhang: Rauchgaszusammensetzung).

Mit den Daten aus der spezifischen Rauchgaszusammensetzung werden nun die Parameter des Rauchgases berechnet. Die Werte sind in einer Tabelle zusammengefaßt (siehe Anhang: Rauchgaseigenschaften bei unterschiedlichen Temperaturen).

Die Rauchgaszusammensetzung und Rauchgasparameter sind in Tabellen abgebildet (Siehe Anhang A+B) und lassen sich zu besseren Übersicht zusammenfassen:

Sauerstoffgehalt - Lambdazahl - Temperatur, berechneter Zusammenhang

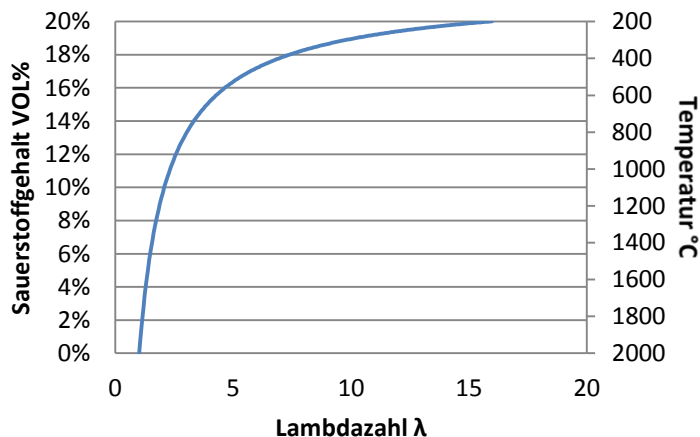


Diagramm 2.4: Lambdazahl λ , Sauerstoffgehalt Vol%, Temperatur $^{\circ}\text{C}$.

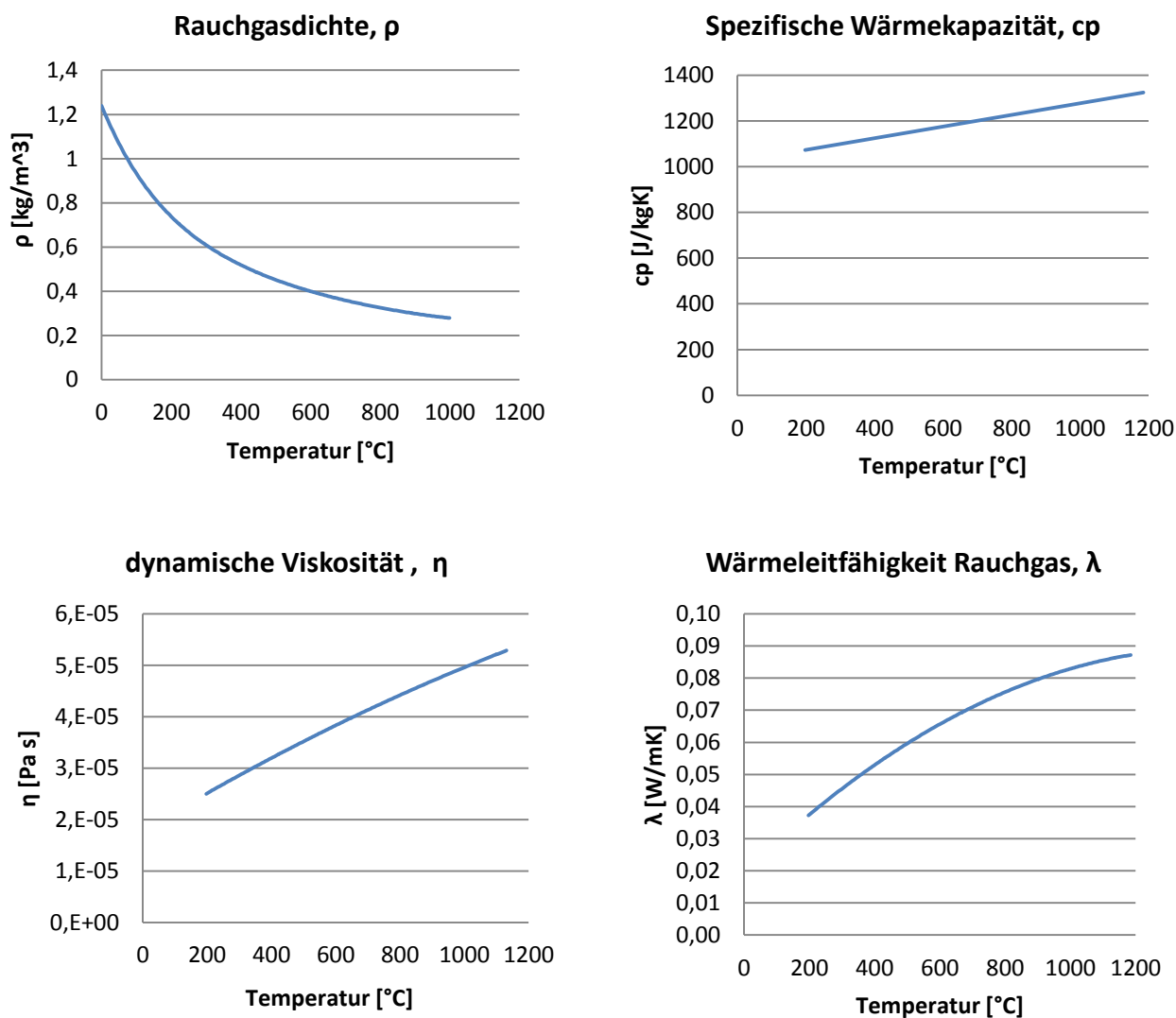


Abbildung 2.5: Temperaturabhängigkeit der Rauchgasdichte (links oben), spezifische Wärmekapazität (rechts oben), dynamische Viskosität (links unten), Wärmeleitfähigkeit (rechts unten).

2.1.6 Der Wärmeübergang am zylindrischen Rohr

Mit den bekannten Rauchgasparameter aus Kapitel 2.1.5 lassen sich die Reynolds-, Prandtl- und Nusseltzahl mit den Gleichungen (11), (12) und (13) berechnen. Mit der Nusseltzahl lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient h am quer zur Strömung liegenden umströmten Zylinder berechnen und somit ist der Wärmeübergang an der Sonde bekannt.

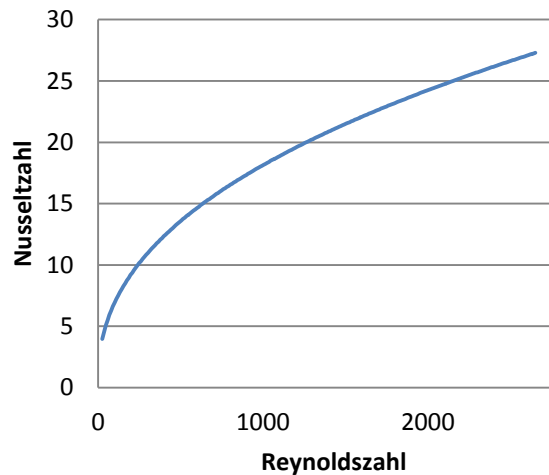


Diagramm 2.6: Nusseltzahl und Wärmeübergangskoeffizient h in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bei: $T_{RG} = 800 \text{ °C}$, $d = 0,038 \text{ m}$, $V_{RG} = 0,5 \text{ bis } 10 \text{ m/s}$. Dieses Diagramm deckt den gesamten Reynoldszahlbereich der experimentellen Versuche ab (Anströmgeschwindigkeit in der Messbox 2,5 bzw. 5 m/s).

2.2. Depositionsbildung in Biomassefeuerungen

2.2.1 Allgemein

Wie bereits im Kapitel 1.5 erläutert ist die Biomassefeuerung in vielerlei Hinsicht problematisch bezüglich Feinstaubemissionen und Depositionen auf Wärmetauscheroberflächen. In diesem Kapitel wird auf das Wesen der Stoffübertragung eingegangen, welche Depositionsmechanismen es gibt, und wie diese zustande kommen.

Stofftransportmechanismen am umströmten Rohr:

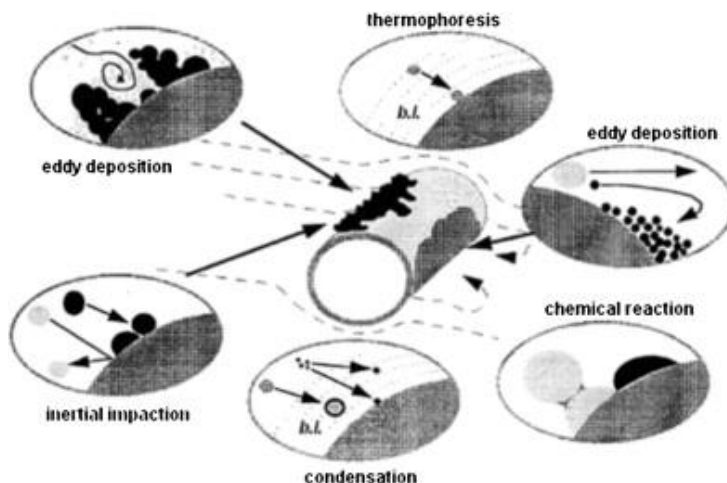


Abbildung 2.7: Arten des Stofftransports am zylindrischen Rohr (Datenquelle [9]).

Die wichtigsten Transportmechanismen für Asche-Partikel sind:

1. Trägheitsablagerung (Inertial Impaction)
2. Eddy Diffusion
3. Thermophorese
4. Turbulente Wirbel-Ablagerung (Turbulent Eddy Impaction)

Die relevanten Partikel-Transportmechanismen hängen von der Partikelgröße ab:

< 1 µm: Eddy Diffusion und Thermophorese.

1-10 µm: Turbulente Wirbel Ablagerung.

>10 µm: Trägheitsablagerung.

Diffusion: ist der Transportmechanismus von Dämpfen und kleinen Partikel hin zu einer Oberfläche auf Grund von lokalen Konzentrationsgradienten. Im Falle von Fick'scher Diffusion bewegen sich die Moleküle zur Oberfläche auf Grund eines bestehenden Konzentrationsunterschieds. Brown'sche Diffusion betrachtet die zufällige Bewegung von kleinen Partikel, und die Eddy Diffusion betrachtet die Diffusion in turbulenten Systemen. Beim Transport zur Rohr-Oberfläche durch die Grenzschicht (eng.: boundary layer (b.l.)) können Dämpfe heterogen an der Wärmeübertragerfläche oder an der bereits gebildeten Depositionsschicht oder innerhalb der porösen Deposition auskondensieren. Heterogene Kondensation ist eine Phasenänderung bei welcher Dämpfe an Oberflächen auskondensieren, die kälter sind als das lokale Rauchgas. Heterogen Kondensation kann auch bei der Grenzschicht vorhanden sein, wo Dämpfe an der Flugasche auskondensieren. Schließlich

können Dämpfe durch große Partialdruckunterschiede auch homogen auskondensieren und somit Feinstaub bilden.

Thermophorese: ist ein Transportmechanismus von kleinen Partikeln auf Grund von vorhandenen Temperaturgradienten. Die Fluidmoleküle haben eine höhere kinetische Energie auf der heißen Seite als auf der kalten Seite. Die Moleküle mit der höheren Energie auf der heißen Seite haben eine größere Geschwindigkeit, als die auf der kalten Seite, welches eine Partikelkraft entgegen dem Temperaturgradienten bewirkt.

Trägheitsablagerung (Inertial Impaction): ist ein Depositionsprozess, welcher Aufgrund der Trägheit der Flugasche entsteht. Beim überqueren der Wärmetauscheroberfläche (Rohre) können die großen und schweren Asche-Partikel ($10\ \mu\text{m}$ und höher) den Stromlinien des Rauchgases nicht folgen, und kollidieren mit der Wärmetauscheroberfläche.

Depositionsbildung durch Diffusion und Thermophorese am rauchgasumströmten Wärmetauscherrohr sind um das ganze Rohr vorhanden, die Trägheitsablagerung ist eher auf der rauchgaszugewandten Seite (Luv-Seite) beschränkt.

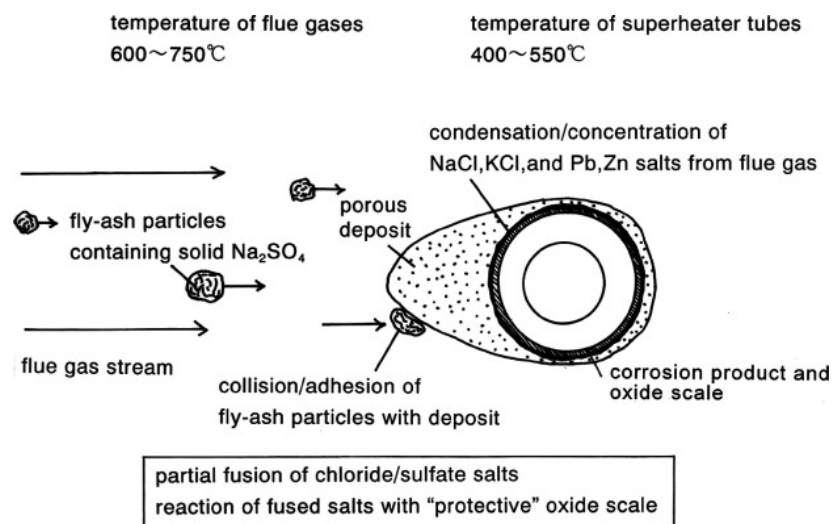


Abbildung 2.8: Schichtaufbau: Kondensation und Flugasche. (Datenquelle [18]).

2.2.2 Die mathematische Modellierung der Kondensation an gekühlten Oberflächen.

Die grundlegenden Ansätze zur Beschreibung der Kinetik der molekularen Austauschvorgänge stammen von Fourier (1768-1830) für einen zu- bzw. abgeführten Wärmestrom einer Fläche mittels Wärmeleitung:

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{ds} \quad (20)$$

Q: Wärmestrom, λ : Wärmeleitfähigkeit, A: Oberfläche normal zum Wärmestrom, dT: Temperaturgradient, ds: Schichtdicke.

Analog zur Wärmeleitungsgleichung hat Fick (1829-1901) für ein System, welches senkrecht durch eine Fläche mittels Diffusion einem zugeführten bzw. entzogenen Komponentenstrom bekommt, folgenden Ansatz formuliert:

$$J_i = -D_{ij} \cdot A \cdot \frac{dc_i}{ds} \quad (21)$$

J_i : Diffusionsstrom, D_{ij} : Diffusionskoeffizient, A: Diffusionsfläche normal zum Diffusionsstrom, dc_i : Konzentrationsgradient, ds: Schichtdicke.

Diffusionsströme selbst können Konvektion auslösen. In diesem Fall wäre der Konvektionsstrom zu berücksichtigen:

$$M_i = J_i + K_i \quad (22)$$

Auf den Konvektionsstrom wird hier nicht näher eingegangen.

Neben dem Ansatz von Fick gibt es noch einen weiteren, in der Verfahrenstechnik bedeutsamen Ansatz, und zwar den von Knudsen (1871-1949):

$$N_i = \frac{1}{4} \cdot A \cdot w_i \cdot \Delta c \quad (23)$$

N_i : Kondensatmassenstrom, A: Fläche normal zu Kondensatstrom, Δc : Konzentrationsgradient, w_i : Molekülgeschwindigkeit.

Dieser Ansatz kommt dann zur Anwendung, wenn die freie Weglänge der Moleküle größer ist als die zurückzulegende Strecke, wenn also der Stofftransport entweder in kleinen Poren oder bei niedrigem Druck stattfindet.

Für praktische Anwendungen ist die Handhabung der oben aufgeführten Gleichungen oft zu aufwändig. Stattdessen führt man Wärme- bzw. Stoffübertragungskoeffizienten h und β ein, mit deren Hilfe Wärme- und Stoffströme mittels der treibenden Temperatur- und Konzentrationsdifferenzen bestimmt werden können:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (24)$$

$$M_i = \beta_i \cdot A \cdot \Delta c \quad (25)$$

Q: Wärmestrom, h: Wärmeübergangskoeffizient, ΔT : Temperaturgradient, M_i : molarer Massenstrom, β_i : Stoffübergangskoeffizient, Δc : Konzentrationsgradient, A: Fläche.

Zur Reduzierung der auf h und β wirkenden Einflussgrößen schreibt man diese meist dimensionslos. Für die Wärmeübertragung verwendet man die Nusselt Zahl, für den Stoffübergang die Sherwoodzahl.

Analoge Beziehung zwischen Nusseltzahl und Sherwoodzahl:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad \text{bzw.} \quad Sh = \frac{\beta \cdot d}{D} \quad (27)$$

β : Stoffübergangskoeffizient, d: hydraulische Länge, D: Diffusionskoeffizient.

In strömenden Medien entstehen häufig folgende Abhängigkeiten:

$$Nu = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \quad \text{bzw.} \quad Sh = C \cdot (Re)^n \cdot (Sc)^m \quad (28)$$

mit

$$Re = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad \dots \text{Reynolds Zahl} \quad (29)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} \quad \dots \text{Prandtl Zahl} \quad (30)$$

$$Sc = \frac{\eta}{D \cdot \rho} \quad \dots \text{Schmidt Zahl} \quad (31)$$

Damit ist grundsätzlich die Möglichkeit gegeben, Wärmeübergangskoeffizienten h aus Stoffübergangskoeffizienten β und umgekehrt zu berechnen, sofern die Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung gültig ist. Es ist nun naheliegend, analoge Potenzansätze für die Wärme- und Stoffübertragung durcheinander zu teilen, so dass man das Verhältnis α/β z.B. mit dem Rohrdurchmesser d erhält:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} = C_1 \cdot \left(\frac{u \cdot d \cdot \rho}{\eta}\right)^n \cdot \left(\frac{\eta \cdot c}{\lambda}\right)^m \quad (32)$$

$$Sh = \frac{\beta \cdot d}{D} = C_1 \cdot \left(\frac{u \cdot d \cdot \rho}{\eta}\right)^n \cdot \left(\frac{\eta}{\rho \cdot D}\right)^m \quad (33)$$

h: Wärmeübergangskoeffizient; d: hydraulischer Durchmesser; λ : Wärmeleitfähigkeit Rauchgas; u: Geschwindigkeit; ρ : Dichte; η : dynamische Viskosität; c: Wärmekapazität; β : Stoffübergangskoeffizient; D: Diffusionskoeffizient; n, m, C_1 : Parameter.

Dividiert man die Sherwoodzahl durch die Nusseltzahl folgt:

$$\frac{Sh}{Nu} = \frac{\beta \cdot d}{\frac{D}{h \cdot d}} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^m = \left(\frac{\lambda}{c_p D \rho} \right)^m = \left(\frac{a}{D} \right)^m = Le^m \quad (34)$$

Der Ausdruck a/D (bzw. $\lambda/c_p \rho D$) wird Lewis-Zahl (Le) genannt. Die letzte Gleichung lässt sich wie folgt umschreiben:

$$\beta = \frac{h}{\rho \cdot c_p} \cdot Le^{m-1} \quad (35)$$

Die Lewiszahl hat einen Wert von 0,5 – 3, kann jedoch für ideale Gase als 1 gesetzt werden. Der Koeffizient m hat den Wert 1/3 (Datenquelle [2]).

Die Kondensation von aschebildenden Dämpfen kann mit folgendem Ansatz modelliert werden:

$$N_{Kond} = \beta \cdot (c_\infty - c_w) \quad (36)$$

N_{Kond} : molarer Kondensationsfluß pro Fläche, β Stoffübergangskoeffizient, c : Konzentration, h Wärmeübergangskoeffizient, c_p : spezifische Wärmekapazität, ρ : Dichte, Le : Lewis Zahl, m : Exponent.

2.2.3 Der Stoffübergang am zylindrischen Rohr

Da der Wärmeübergang an der Depositionssonde ohne Depositionsschicht nun bekannt ist, kann auf den Kondensationsprozess eingegangen werden. Zu diesem Zweck werden die Ansätze für die Berechnung des Stoffüberganges aus Kapitel 2.2.2 verwendet.

Der Stoffübergangskoeffizient β hat für die Strömungsgeometrie folgende Beziehung zur Reynoldszahl und Rauchgastemperatur:

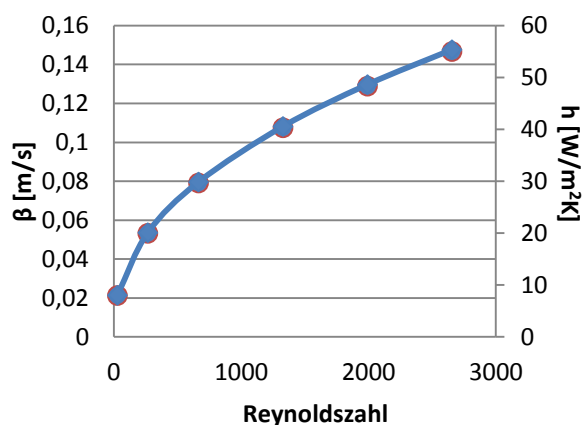


Diagramm 2.9: Stoffübergangskoeffizient β als Funktion der Reynoldszahl und Wärmeübergangskoeffizient h .

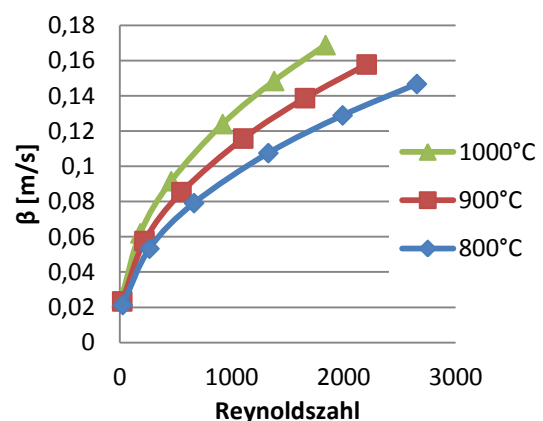


Diagramm 2.10: Stoffübergangskoeffizient β als Funktion der Reynoldszahl bei drei verschiedenen Temperaturen.

Mit dem bekannten Stoffübergangskoeffizienten kann nun der molare Stoffübergangsmassenstrom N_{kond} mit dem Ähnlichkeitsansatz ermittelt werden, wie im Kapitel 2.2.2 erläutert. Dazu müssen jedoch die Partialdrücke des kondensierbaren Stoffes, in diesem Fall KCl, im Rauchgas und an der Oberfläche berechnet werden. Diese werden aus dem Dampfdruckdiagramm für Kaliumchlorid entnommen.

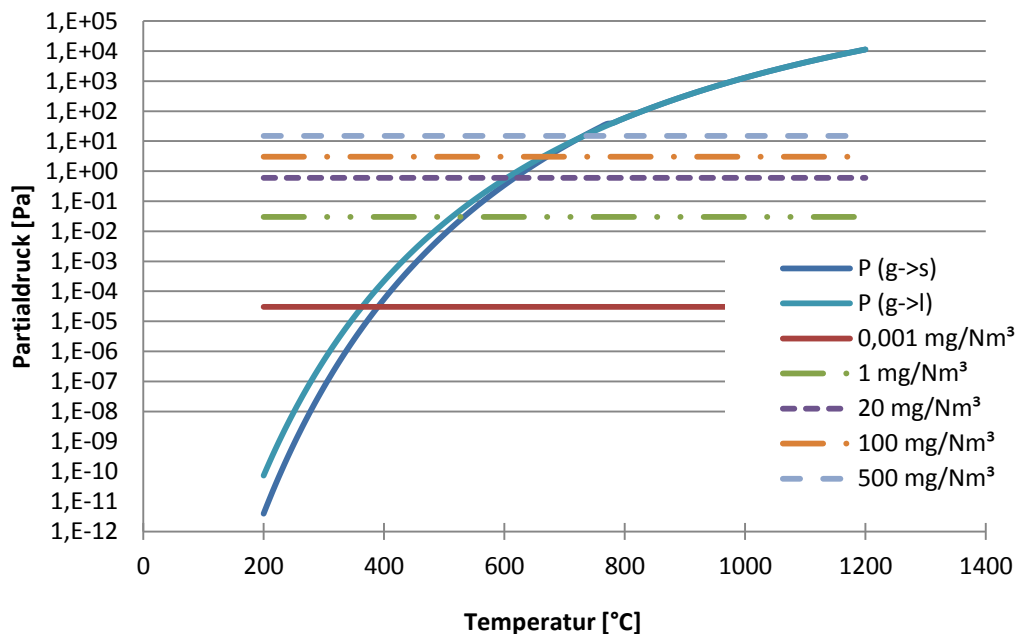


Diagramm 2.11: Dampfdruckkurve von Kaliumchlorid (Datenquelle: [15]).

Aus dem Diagramm 2.11 kann der Sättigungsdruck für KCl bei unterschiedlichen Temperaturen entnommen werden. Man erkennt aufgrund der logarithmischen Darstellung die mit zunehmender Temperatur schnell wachsenden Partialdrücke von KCl und den somit ansteigenden Sättigungsmengen. Zum Beispiel ist der Sättigungsdruck bei einer Temperatur von 300 °C ca. $3 \text{ E}-05 \text{ Pa}$ (das entspricht in etwa $0,001 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$), bei 600 °C ist dieser Druck schon bei ca. $6 \text{ E}-01 \text{ Pa}$, also in etwa $20 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$. Diese Eigenschaft hat zur Folge, dass der Stoffübergangsmassenstrom sehr stark von dem Partialdruck der Wandoberfläche abhängig ist. Dieses wird im folgenden Diagramm dargestellt. Für die Berechnung des Salzgehaltes im Rauchgas wurden hierfür $100 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$ angesetzt.

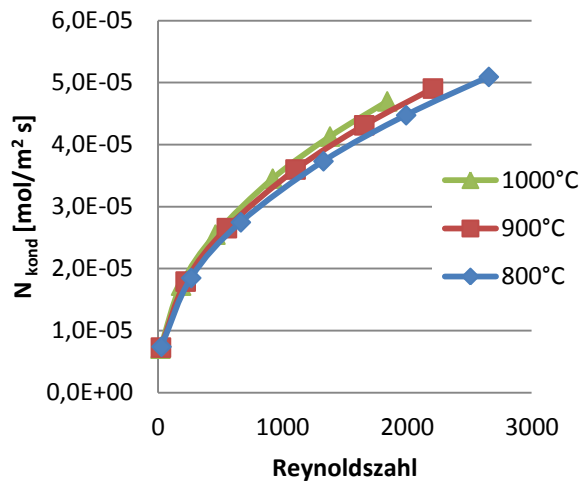


Diagramm 2.12: Beispielhafte Berechnung des Kondensationsmassenstrom N_{kond} bei 3 unterschiedlichen Rauchgastemperaturen.

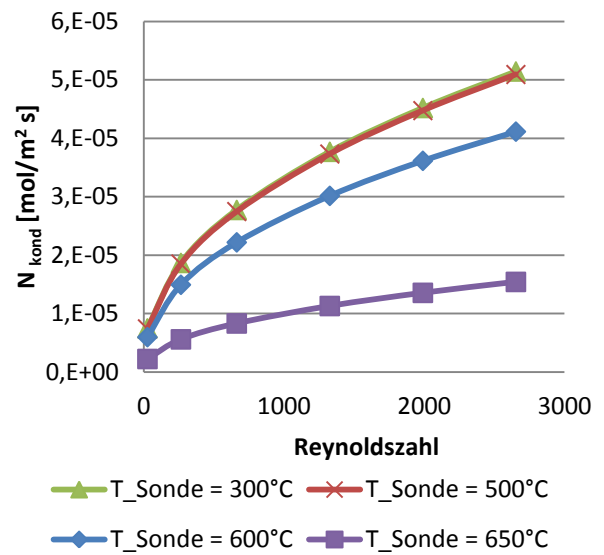


Diagramm 2.13: Beispielhafte Berechnung des Kondensationsmassenstrom N_{kond} bei einer Rauchgastemperatur von 800°C und vier unterschiedlichen Wandtemperaturen.

Bemerkenswert hier ist der starke Rückgang des Kondensationsmassenstromes N_{kond} bei einer Wandtemperaturänderung von 600°C auf 650°C .

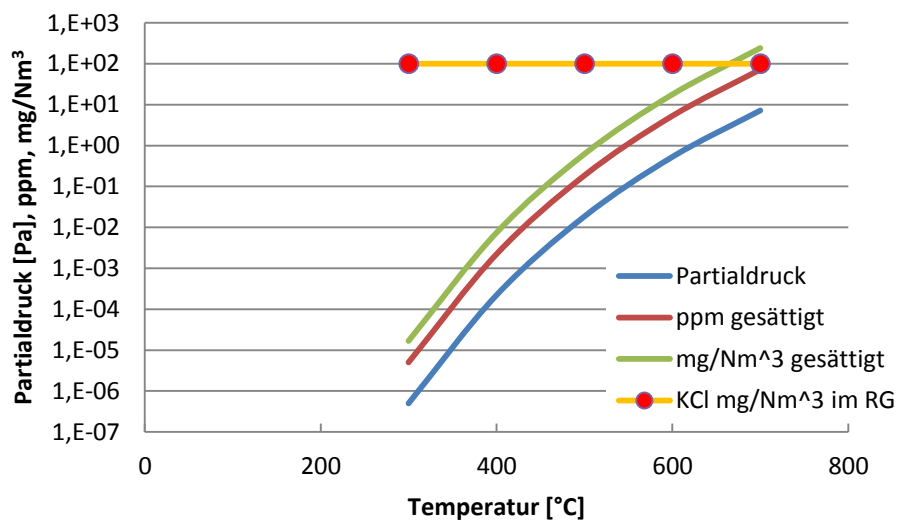


Diagramm 2.14: Kondensationskurve von Kaliumchlorid mit den Sättigungskurven für Partialdruck, Kondensationsmenge und ppm, sowie ein Rauchgasmassenstrom mit einer KCl Konzentration von $100 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$.

2.3 Thermische Eigenschaften von kondensierten Depositionsschichten

Die Wärmeleitfähigkeit von KCl als feste Substanz bei verschiedenen Temperaturen ist bekannt. Ebenfalls ist bekannt, dass die Struktur von KCl beim Kondensieren als poröses Medium auf kalten Oberflächen erscheint und es gibt in der Literatur Erkenntnisse über den strukturellen Aufbau des Kristalls beim Kondensieren bei verschiedenen Temperaturen. Es gibt jedoch hierzu keine Informationen über die genauen Eigenschaften der porösen Struktur und über die Wärmeübertragungseigenschaften. Hierfür gibt es lediglich mathematische Modelle für allgemeine poröse Medien mit unterschiedlichen Ansätzen. Es gibt keine experimentelle Daten über die Verdampfung und Kondensation von KCl hinsichtlich Depositionsmasse, Porosität, und Wärmeübergang der porösen Struktur.

Im Einleitungsteil der Diplomarbeit (Kapitel 1.8) wurde schon erwähnt, wie Salze auf gekühlten Oberflächen kondensieren. Thema dieses Abschnitts ist es zu erläutern, welche Möglichkeiten es gibt, um die Wärmeleitfähigkeit von kondensierten Salzen mathematisch darzustellen. Das Problem dabei ist, dass kein mathematisches Modell existiert, welches das Kristallwachstum beim Kondensieren von Salzen exakt modellieren kann und somit den Wärmeübergang genau berechnen kann. Die Fragestellung lautet somit: Sind die mathematischen Modelle für poröse Schichten in der Lage den Wärmetransport durch eine kondensierte Salzschrift annähernd darzustellen?

2.3.1 Die thermische Wärmeleitfähigkeit von Depositionsschichten

Um den Wärmetransport durch eine Ascheschicht bestimmen zu können, muss die effektive Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schicht bestimmt werden. Die Wärmeleitfähigkeit jeder Schicht hängt von der physikalischen Struktur der Ablagerung ab, also von der Größe der Partikel der Ablagerungen, von der Porosität und des Sintergrades der Schicht ab. Hier sind nun ausgewählte mathematische Modelle aus der Literatur angeführt, die für den Wärmeleitkoeffizient k unterschiedliche Berechnungsansätze haben. Dieser hängt bei allen Modellen ab von:

- 1.) Porosität: p
- 2.) Wärmeleitkoeffizient der kontinuierlichen Phase (Rauchgas): k_c
- 3.) Wärmeleitkoeffizient der diskreten Phase (Kaliumchlorid): k_d

Es gibt Modelle, die den Zusammenhang zwischen Konvektion und Strahlung behandeln. Diese Gruppe beinhaltet also Modelle, die zum effektiven thermischen Wärmeübergang eine Strahlungskomponente hinzufügen (nach Flemming J. Frandsen [12])

$$k_{\text{eff}} = k_{g-s} + k_r \quad (37)$$

mit: k_{eff} : effektive Wärmeleitfähigkeit, k_{g-s} : Wärmeleitfähigkeit der Schicht, k_r : Wärmeleitfähigkeit durch Strahlung.

Die zweite Gruppe umfasst Modelle, die den Strahlungstransport als Widerstand im Netzwerk der Widerstände repräsentierenden Gitterzellen (Datenquelle [12]).

Alternative Modelle: Es gibt auch noch die Möglichkeit, die Strahlung vernachlässigen. Dies kann man bei Ablagerungen niedriger Temperatur anwenden, wo der Wärmetransport hauptsächlich von der Porosität und chemischen Zusammensetzung der Ablagerung abhängt. In diesen Modellen ist der Wärmetransport unabhängig von der Strahlung:

Die maximale Wärmeleitfähigkeit $k_{eff, upper}$ (bei Wärmeübergang normal zur Oberfläche) wird wie folgt angegeben:

$$k_{eff, upper} = p \cdot k_c + (1-p) \cdot k_d \quad (38)$$

Das minimale k_{eff} (bei Wärmeübergang parallel zur Oberfläche)

$$k_{eff, lower} = \frac{k_d \cdot k_c}{p \cdot k_d + (1-p) \cdot k_c} \quad (39)$$

Messungen haben ergeben, dass der thermische Wärmeübergang eher der „unteren“ Grenze folgt (Robinson et al. 2001). Zu diesen beiden Modellen gibt es obere und untere Grenzen für homogene, isotrope zwei Phasen Schichten. Das Modell dieser Schicht besteht aus nicht zusammenhängenden Partikeln der einen Phase in einer Matrix bestehend aus der anderen Phase.

Obere Grenze:

Schwach wärmeleitende nicht zusammenhängende (fluide) Teilchen in einer sehr hoch wärmeleitenden (festen) Matrix.

$$k_{eff} = k_s + \frac{p}{\frac{1}{k_g - k_s} + \frac{1-p}{3k_s}} \quad (40)$$

Untere Grenze:

Einzelnen festen Teilchen in einer fluiden Matrix.

$$k_{eff} = k_g + \frac{1-p}{\frac{1}{k_s - k_g} + \frac{p}{3k_g}} \quad (41)$$

Das Lord Rayleigh Modell:

Modell zur Bestimmung der thermischen Wärmeleitfähigkeit in 2 Phasen System, welches eine kubisch feste Phase umgeben von einer fluiden Phase beinhaltet:

$$\frac{k_{eff}}{k_c} = \frac{(2+r)/(1-r) - 2p}{(2+r)/(1-r) + p} \quad (42)$$

Dieses Modell ist bis zu einem Volumenanteil der diskreten Phase von $p = \pi/6$ (0,52) begrenzt.

Das Russel Modell:

$$\frac{k_{eff}}{k_c} = \frac{rp^{2/3} + (1-p^{2/3})}{r(p^{2/3} - p) + (1-p^{2/3} + p)} \quad (43)$$

Das Russell Modell kann bei jeder Porosität eingesetzt werden.

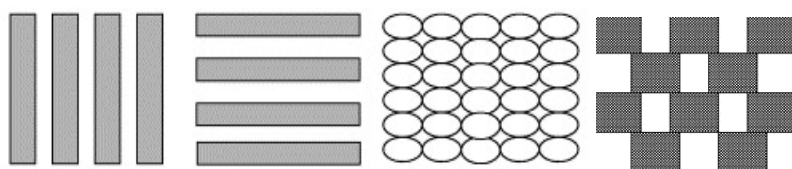
Das Diessler und Eian Modell:

Der thermische Wärmeübergang bei kubischen festen Anteilen erfolgt parallel zur Oberfläche. Dieses Modell ist bis zu einem Anteil der diskreten Phase von $p = \pi/6$ (0,52) limitiert.

$$\frac{k_{eff}}{k_c} = \frac{\pi}{2} \frac{(1/r - 1)R - \ln[1 + (1/r - 1)R]}{(1/r - 1)^2} + 1 - \frac{\pi R^2}{4} \quad (44)$$

$$R = (6p/\pi)^{1/3}$$

Hier eine schematische Darstellung einiger mathematischer Wärmeleitmodelle:



Maximum k Minimum k Rayleigh Modell Russel Modell

Abbildung 2.15: Schematische Darstellung der verschiedenen Modelle für den Wärmedurchgang in einer Depositionsschicht (Datenquelle [14]).

2.3.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Komponenten der Depositionsschicht

Die thermische Wärmeleitung der festen und fluiden Schicht ist von Temperatur, des Sintergrades und der chemischen Zusammensetzung abhängig.

Rezaei et al. (2000) hat folgende Beziehung für die diskrete und die kontinuierliche Phase eingesetzt:

$$k_c = 0.00038 \cdot T^{0.75} \quad (45)$$

$$k_d = 0.0015 \cdot T^{1.1} \quad (46)$$

Rezaei et al. (2000) hat diese Beziehung unabhängig von der chemischen Zusammensetzung der Depositionsschicht verwendet.

Im Weiteren wird hier auf dem Einfluss der chemischen Zusammensetzung näher eingegangen. Für den Temperaturbereich von 300-1000 °C wird für die verschiedenen aschebildenden Elemente folgende Formel verwendet werden:

$$k_i = V_i T + U_i \quad (47)$$

wobei V_i und U_i Konstanten sind, und T die Temperatur ist.

Die thermische Wärmeleitung einer Multi-Komponenten Schicht ist:

$$k_d = \sum_{i=1}^N k_i \cdot X_i \quad (48)$$

Mit der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Komponenten k_i und der gewichteten Fraktion X_i . Einen großen Nachteil hat das oben genannte Modell: es gibt nicht wirklich Daten über den Effekt von Fe_2O_3 , jedoch kann dieses Modell bei Biomasse-Feuerungen verwendet werden, da dort sehr geringe Anteile von Fe_2O_3 anfallen.

Ein Gas mit verschiedenen Komponenten (Mischung) in poröser Struktur ist ähnlich wie die Charakteristik der Luft (Botterill et al 1989). Im Folgenden wird die Leitfähigkeit der Luft nach Touloukian und Rezaei et al. miteinander verglichen.

Daten der thermischen Wärmeleitfähigkeit der Luft (Datenquelle [14]):

$$k(\text{Luft}) = 6 \cdot 10^{-12} \cdot T^3 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 9 \cdot 10^{-5} T + 0.0007 \quad (49)$$

Temperaturbereich: 70-1500 K.

Durchschnittlicher Fehler: 0,78, Max. Fehler: $\pm 3,81$ %.

Die zwei Ansätze für den Wärmeleitkoeffizient k_c der Luft von Rezaei et al. und Touloukian sind im folgendem Diagramm dargestellt.

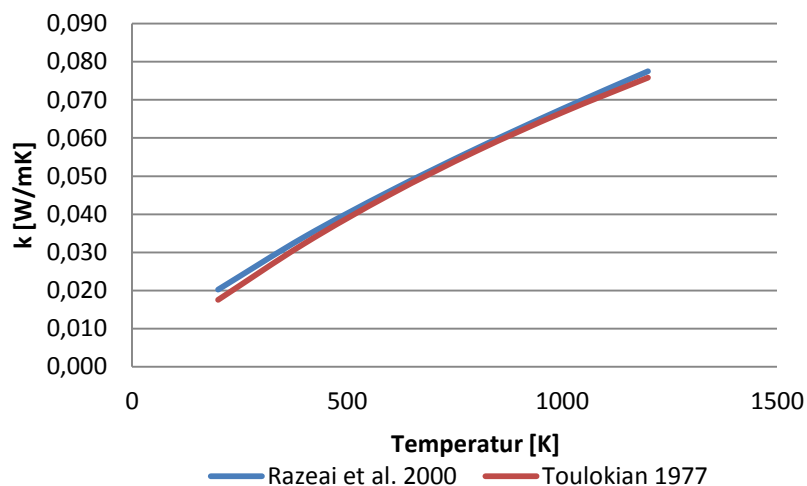


Diagramm 2.16: Wärmeleitfähigkeit der Luft, 2 Ansätze: Rezaei et al. und Touloukian

Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient k von Kaliumchlorid (KCl-Crystal) hat nach Paolini et al. 1996 folgende Beziehung:

$$K(\text{KCl}) = 12460 T^{-1,3276} \quad (50)$$

Temperaturbereich: 300-900 K, durchschnittlicher Fehler: 0,04 %.

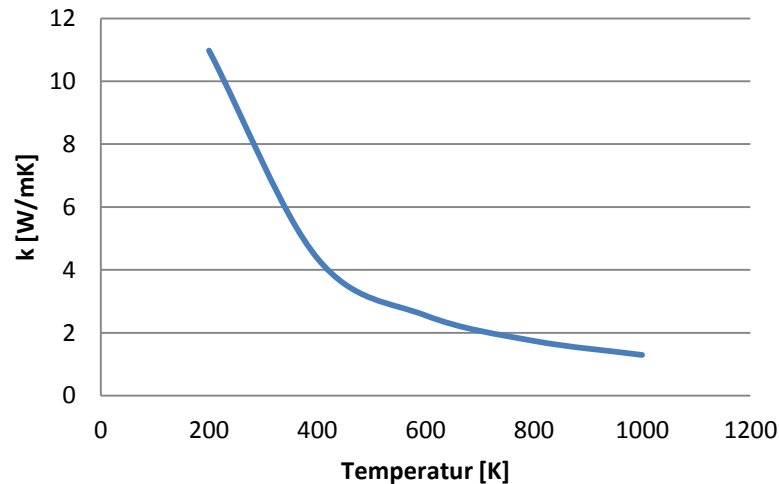


Diagramm 2.17: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient k von KCl, nach Paolini et al. 1996.

Aus den Daten für die Wärmeleitfähigkeit von KCl und des Rauchgases können die Modelle für die Wärmeleitfähigkeit k für poröse Medien in Abhängigkeit von der Porosität in ein Diagramm dargestellt werden.

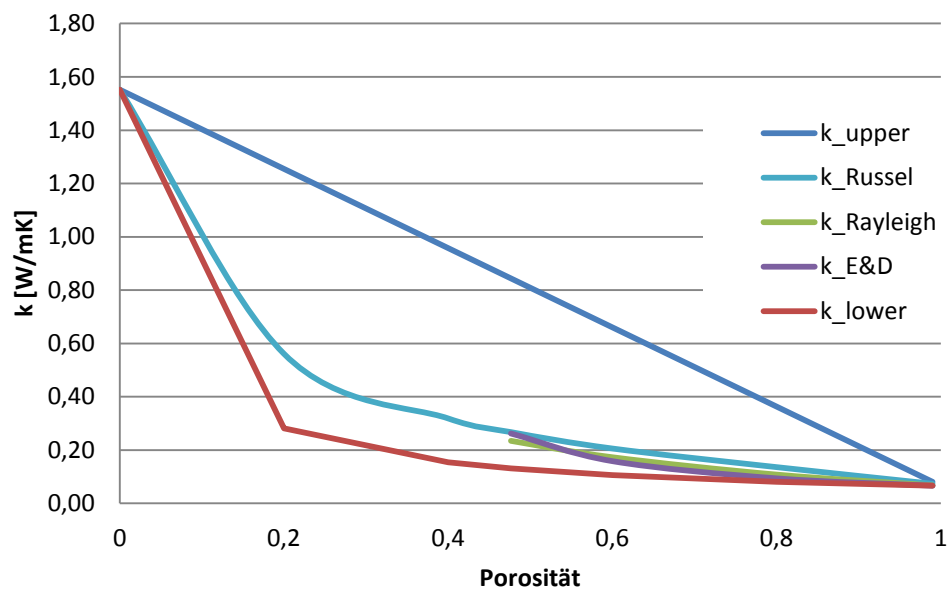


Diagramm 2.18: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient k für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeitsmodelle für poröse Schichten in Abhängigkeit von der Porosität, bei einer Temperatur von 600 °C.

Aus dem Diagramm 2.18 lässt sich gut erkennen, dass der Wärmeleitkoeffizient für die verschiedenen Wärmeleitmodelle sehr ähnliche Werte für KCl aufweist und eher dem minimum k Modell folgt, wie bereits erläutert. Wie in dem Kapitel 2.3.1 erklärt, gibt es einige Wärmeleitmodelle welche hinsichtlich der Porosität eingeschränkt Werte für den Wärmeleitkoeffizienten k berechnen können. Bei den fünf vorliegenden Modellen ist das Modell von Eian&Diessler und Rayleigh hinsichtlich der Porosität mit dem Wert $\pi/6$ beschränkt, es können also nur Wärmeleitkoeffizienten für poröse Schichten mit einer diskreten Phase von bis zu $p=0,52$ berechnet werden.

In den folgenden Diagrammen wird dargestellt, wie sich der Wärmeleitkoeffizient für die unterschiedlichen Modelle mit der Temperatur und der Porosität ändert.

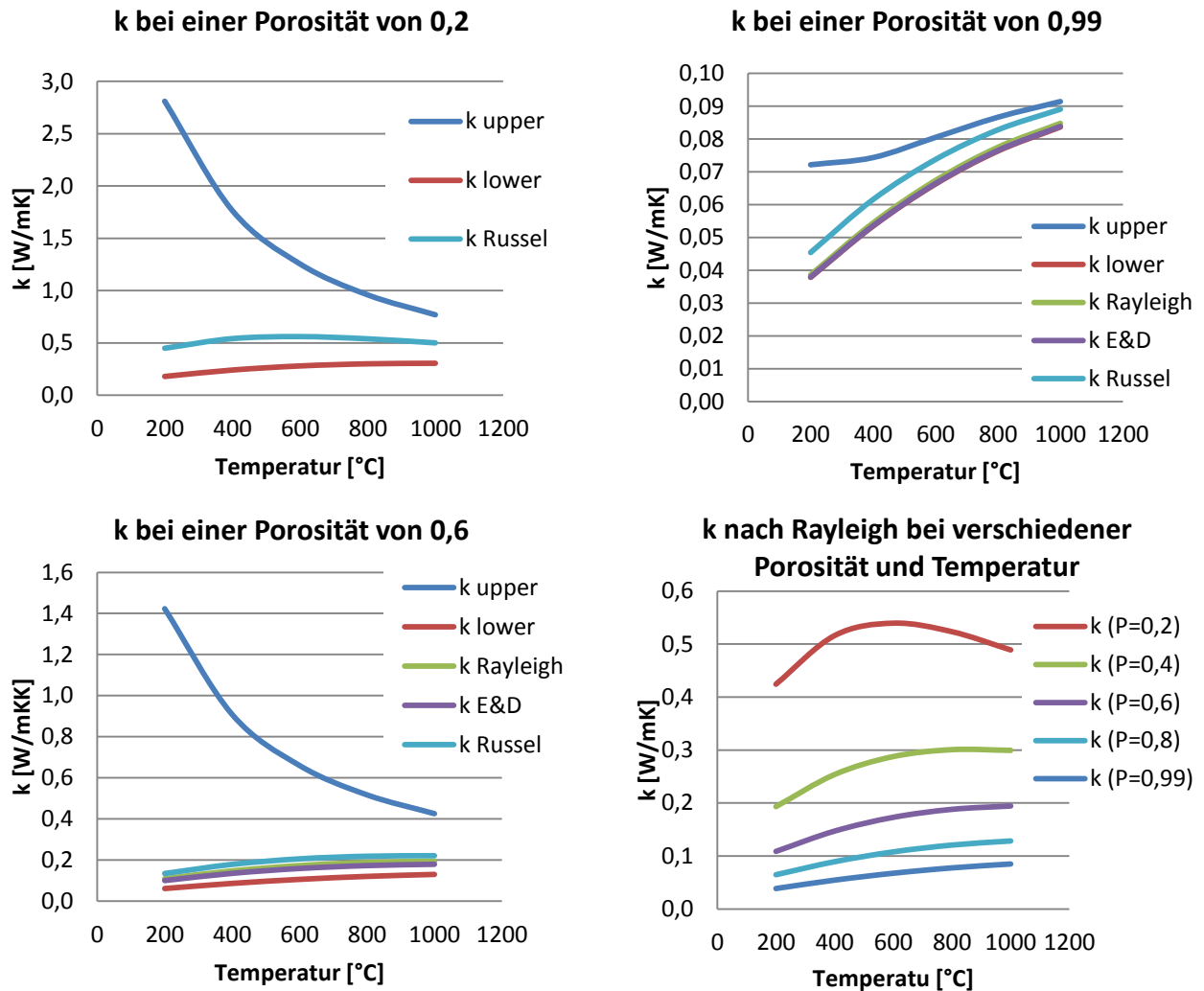


Abbildung 2.19: oben links: Wärmeleitkoeffizient k für verschiedene Modelle bei einer Porosität von 0,2. Das Wärmeleitmodell von Eian&Diessler liefert hierfür keine Werte. Oben rechts: Wärmeleitkoeffizient k für verschiedene Modelle bei einer Porosität von 0,99. Annäherung an der Wärmeleitfähigkeit des Rauchgases. Unten links: Wärmeleitkoeffizient k für verschiedene Modelle, $p=0,6$. Unten rechts: Änderung des Wärmeleitkoeffizienten k für das Wärmeleitmodell nach Rayleigh in Abhängigkeit von Temperatur und Porosität.

2.3.3 Die Wärmestrahlung von Depositionen

Die Strahlungseigenschaften von Aschedepositionsschichten sind von enormer Bedeutung für den Einfluss der Depositionsschicht auf den weiteren Schichtaufbau und auf dem Wärmeübergang. Das Emissionsverhalten einer Schicht ist abhängig von vielerlei physikalischen Eigenschaften. Die Zusammensetzung der Aschedepositionen ist sehr vielseitig was sich auch auf den Strahlungseigenschaften auswirkt, was die Vorhersagekraft bezüglich Strahlungseigenschaften einer Depositionsschicht sehr schwierig macht.

Gasstrahlung:

Für technische Anwendungen ist nur die Gasstrahlung im Infraroten, also bei Wellenlängen über 1 μm von Bedeutung. In diesem Bereich strahlen vor allem CO_2 und H_2O , aber auch andere Gase wie CO , SO_2 , NH_3 , CH_4 und weitere Kohlenwasserstoffe. Dagegen lassen N_2 und O_2 , die Hauptbestandteile der Luft, Strahlung im Infraroten ungeschwächt hindurch; sie absorbieren nicht und senden daher nach dem Gesetz von Kirchhoff auch keine Strahlung aus.

Das Emissionsverhalten einer Depositionsschicht ist von folgenden Faktoren abhängig (Markham et al. 1992):

1. Physikalische Eigenschaften (Morphologie) der Depositionsschicht (geschmolzene, gesinterte, pulverige Partikel).
2. Chemische Zusammensetzung (minimaler Einfluss).

Die unterschiedliche Morphologie der Depositionsschicht hat unterschiedliche Oberflächen:

1. Geschmolzene Partikel (fused) erstarren und haben eine „glasige“ Form, welche hohe Emissionswerte haben. Gemessene Werte (Markham et al. 1992) sind im Temperaturbereich 300-1630 K: $\epsilon > 0,9$. Im geschmolzenen oder flüssigen Stadium ist die spektrale Emission ein bisschen höher.
2. Gesinterte oder pulverige Depositionen (sintered or powdery deposits) bestehen aus individuellen mineralischen Partikeln die geringe Bindungskräfte untereinander haben. Diese haben ein wellenlängenabhängiges Emissionsverhalten.

Die Depositionsmorphologie hängt im Wesentlichen von der Oberflächentemperatur ab, also auch das Emissionsverhalten.

Aschedepositionen sind dielektrisch. Im Vergleich zum Grauen Körper, wo das Absorptions- und Emissionsverhältnis von der Wellenlänge unabhängig sind, sind diese bei den dielektrischen Materialien abhängig von der Temperatur. Bei Aschedepositionen sinkt das Absorptions bzw. Emissionsverhältnis mit steigender Temperatur (sichtbar in Abbildung 2.20).

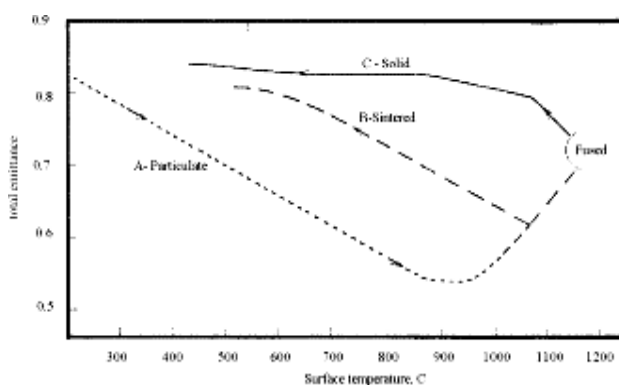


Abbildung 2.20: Emission von Aschedepositionen (Datenquelle [19]).

Wall et. al (1993) hat mit experimentellen Daten das Absorptions- bzw. Emissionsverhalten von Aschdepositionen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und dem Depositionsaufbau untersucht und herausgefunden, dass für das Emissionsverhalten die Aschestruktur maßgebend ist. Für Partikeldepositionen ist das Emissionsverhalten abhängig von der Zusammensetzung und der Temperatur. Grundsätzlich gilt:

1. Das spektrale Emissionsverhältnis ε_t sinkt mit steigender Temperatur bis zum sintern und schmelzen, wo sie dann eher zum Steigen neigt.
2. Das spektrale Emissionsverhältnis ε_t steigt mit der Partikelgröße bis zum sintern.
3. Das spektrale Emissionsverhältnis ε_t steigt durch den Eisen- (Fe_2O_3) und unverbrannten Kohlenstoffgehalt in der Asche.
4. Kleine Partikel (unter $2 \mu\text{m}$) haben ein geringes spektrales Emissionsverhältnis, welches unabhängig von der Zusammensetzung ist. Gemessene Werte sind hier in der Größenordnung von 0,2. Die Abhängigkeit der Partikelgröße auf das spektrale Emissionsverhältnis ε_t ist in der Abbildung 2.9 dargestellt.

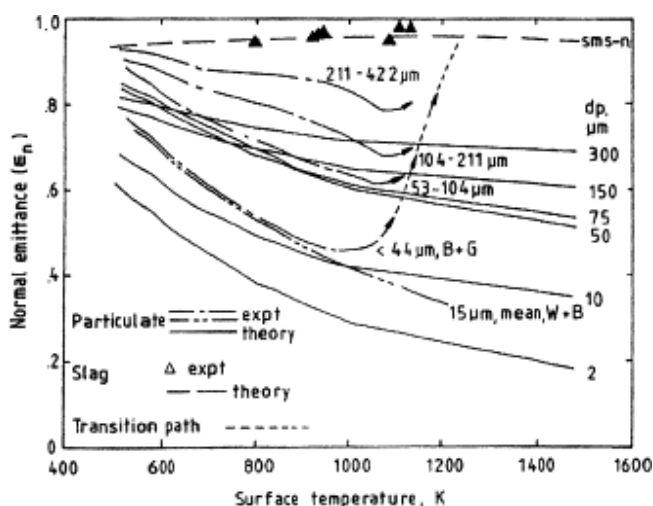


Abbildung 2.21: Emission von Depositionsschichten unterschiedlicher Partikelgröße (Datenquelle [21]).

Eine opaque homogen verschmolzene Schicht gilt dann als strahlungsundurchlässig, wenn die Schichtdicke größer als 1 mm ist (Datenquelle [12]). Bei optisch gleichmäßigem Aussehen ist der Effekt der chemischen Zusammensetzung nicht maßgebend für das Emissionsverhältnis. Für diese Erkenntnis gibt es experimentelle Daten von Wall et al. (Datenquelle [21]) und Mills und Rhine (Datenquelle [22]). Letztere haben für Schlacke mit unterschiedlichem Eisengehalt ein konstantes Emissionsverhältnis von 0,83 für den Temperaturbereich von 1070-1800 K herausbekommen.

II.) Methoden

Im Abschnitt Methoden wird auf die Berechnungsart der Aufgabenstellung eingegangen. Diese Berechnungsarten sind die Simulation und die experimentelle Methode.

3. Experimentelle Methoden

3.1 Versuchsanlage: Aufbau und Beschreibung

Die Versuchsanlage mit der die Versuche durchgeführt werden besteht aus folgenden Sektionen und Komponenten:

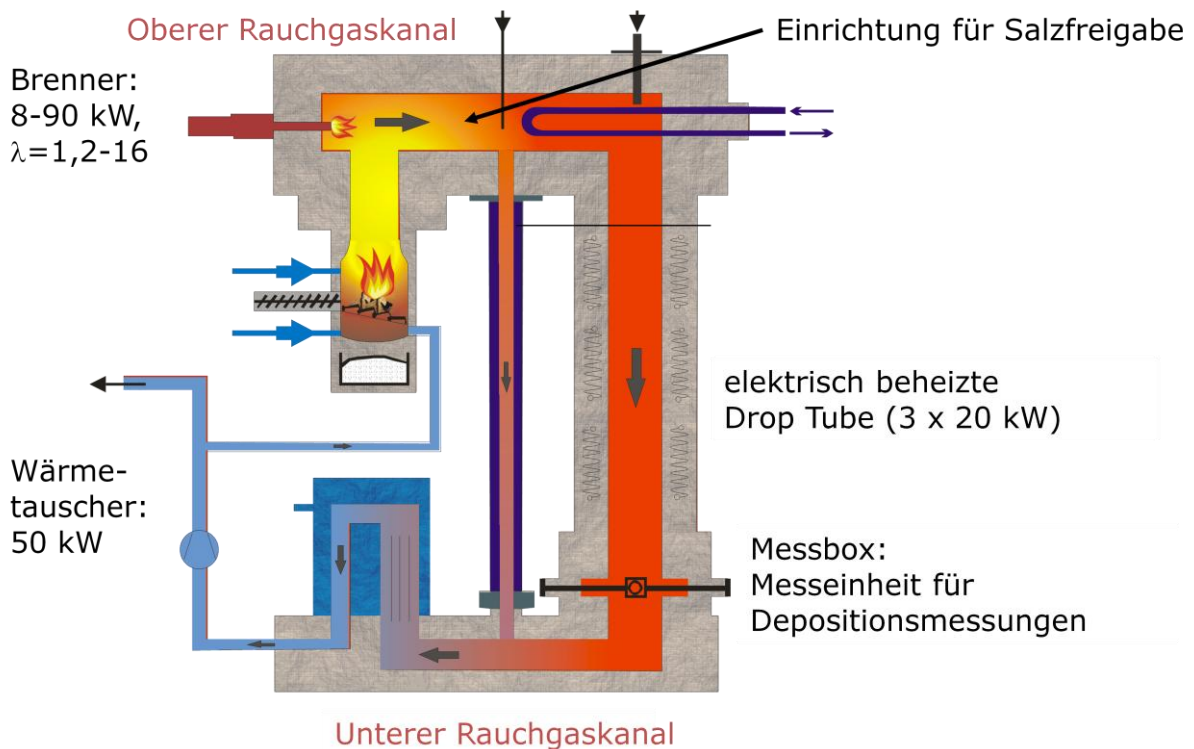


Abbildung 3.1: Aufbau der Versuchsanlage.

Beschreibung der Versuchsanlage:

- 1.) **Oberer Übergang:** Der obere Übergang besteht aus vakuumgeformten Keramikfaserplatten und hat einen Metallmantel. Am oberen Übergang befindet sich der Gasbrenner mit einer Leistung von 8-90 kW. Die Biomassefeuerung befindet sich unter dem Gasbrenner und hat eine Leistung von bis zu 50 kW. Die Öffnung für die Hereingabe der Salzgefäße befindet sich am oberen Übergang.
- 2.) **Drop Tube und Bypass:** Nach dem oberen Übergang gelangt das Rauchgas entweder über die elektrisch beheizte Drop Tube oder über den gekühlten Bypass zum unteren Übergang. Die Drop Tube besteht aus einem Metallmantel, Glaswolle und Keramikfaser für die Wärmedämmung und aus einem Siliciumcarbid-Rohr (SiSiC Rohr, 2000 mm) das von drei Heizelementen umgeben ist. Mit Hilfe der Heizelemente

kann die Drop Tube auf eine definierte Temperatur aufgeheizt werden und dient ebenfalls als Temperaturstabilisator, welcher Rauchgastemperaturschwankungen ausgleichen kann. Der Bypass besteht aus einem hochwarmfesten Stahlrohr, welches wiederum durch ein Rohr umgeben ist. Dazwischen fließt Wasser welches die Kühlung des Bypasses bewerkstelligt.

- 3.) **Messbox:** Nachdem das Rauchgas die Drop Tube passiert hat, gelangt es in die Messbox. Diese besteht aus Keramikfaserplatten und einem Metallmantel und Glaswolle. Die Messbox hat verschiedene Öffnungen für den Einsatz von Sonden für Kondensationsversuche und Rauchgasanalytik. Ein Schauglass ist auch vorhanden, welches einen Einblick auf die Sonde während des Betriebes ermöglicht.
- 4.) **Unterer Übergang:** Nach dem Bypass und die Messbox gelangt das Rauchgas in den unteren Übergang: Er besteht aus Metallmantel, Steinwolle und Vermiculiteplatten.
- 5.) **Wärmetauscher:** Der Wärmetauscher kühlt nun das Rauchgas bevor es in dem Rauchgasventilator gelangt. Die Kühlleistung beträgt maximal 50 kW.
- 6.) **Kühlsystem:** Drop Tube Kreislauf: Interner Kreislauf einzig und allein für die Anlage (Kühlplatte, Bypass, Wärmetauscher)

Messtechnik:

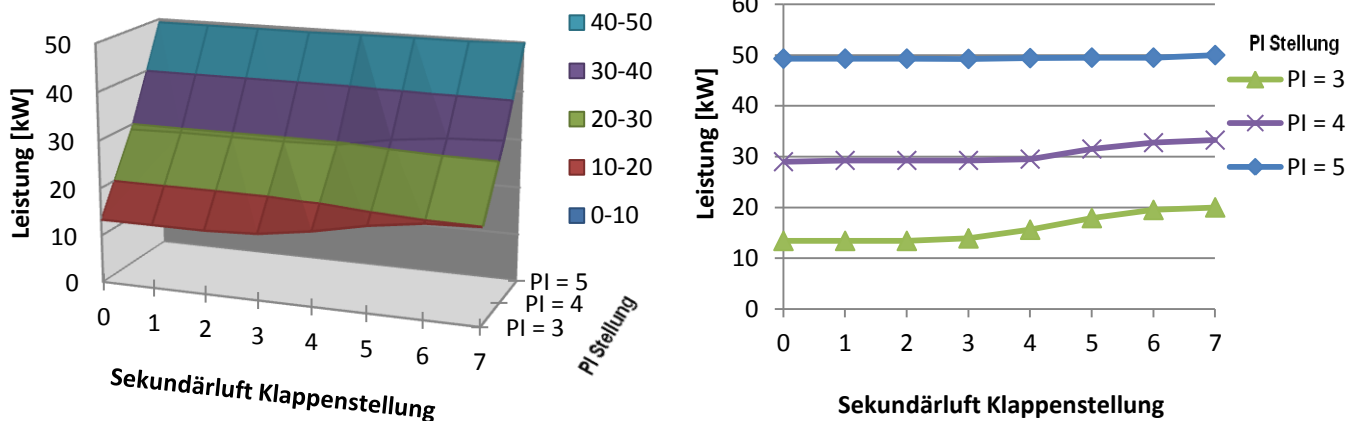
Die gesamte Anlage ist mit zahlreichen Temperatursensoren für das Rauchgas ausgestattet. Diese haben einen Messbereich von 0 – 1200 °C. Es sind auch einige Drucksensoren positioniert, die den Unterdruck im System messen. Im Kühlkreislauf sind ebenfalls Temperaturgeber vor und nach jedem Wärmetauscher positioniert. Prandtlrohre und Heißfilm Luftmassenmesser messen die Massenströme, gute Werte für die Massenstrommessung der Prandtlrohre ab ca. 0,5 Pascal Druckdifferenz. Eine Lambdasonde misst den Sauerstoffgehalt im Rauchgas. Alle relevanten messtechnischen Werte werden erfasst und in der experimentellen Datenaufzeichnung aufgezeichnet.

3.2 Gasbrennerregelung der Versuchsanlage

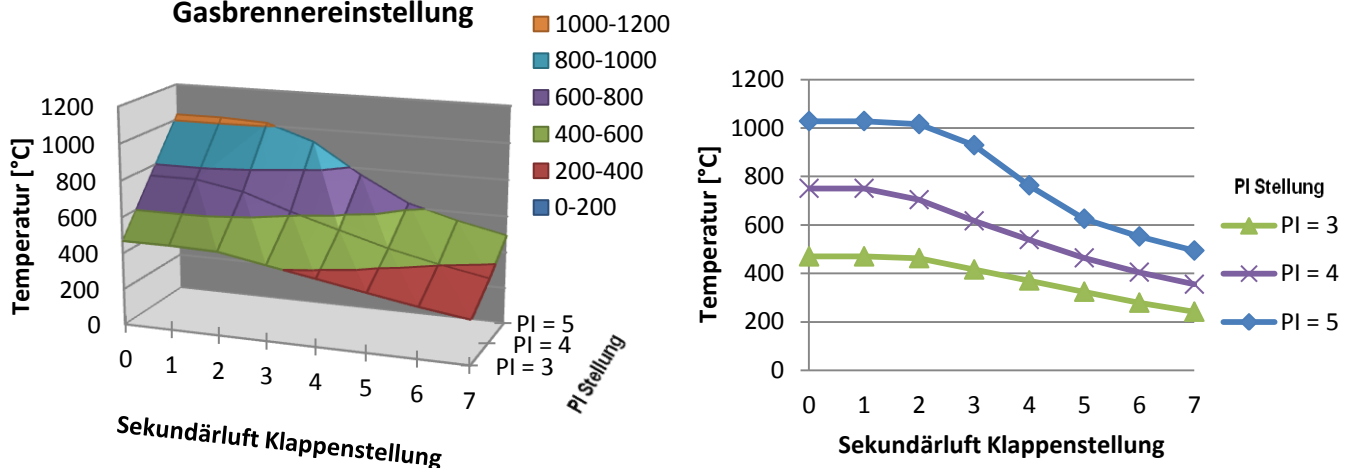
Die Wärmebereitstellung in der Anlage erfolgt durch einen Gasbrenner mit einer einstellbaren Leistung von 8-90 kW. Die Gasbrennerleistung wird durch die Primärluftklappe geregelt. Über die Sekundärluftklappe gelangt zusätzlich Luft zum austretenden Rauchgas, dadurch wird die Temperatur des Rauchgases geregelt. Um zu erfahren welche Rauchgasparameter sich bei den unterschiedlichen Gasbrennerklappenstellungen einstellen ist es nötig die für die Aufgabenstellung notwendigen Leistungsbereiche mit der Primärklappe und der Sekundärklappe abzufahren. Neben der Gasbrennerklappenstellungen spielt der Unterdruck in der Anlage, welcher durch den Rauchgasventilator eingestellt wird, eine wichtige Rolle. Je höher die Rauchgasventilatorleistung eingestellt wird, desto geringer wird der Druck in der Anlage und es wird mehr Luft über die Gasbrennerklappen angesaugt und auch mehr Falschluff über die undichten Stellen. Die Rauchgasparameter sind in Diagramme zusammengefaßt und sehen für die maximale Rauchgasventilatoreinstellung von 100 % wie folgt aus:

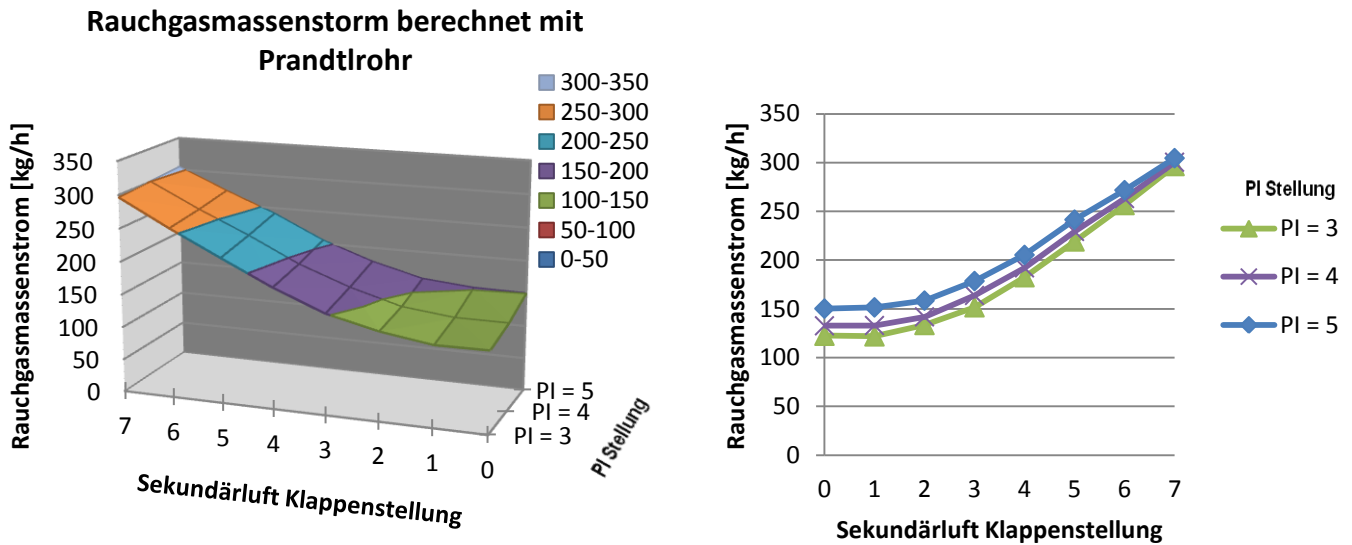
3.2.1 Diagramme Gasbrennersteuerung bei einer Rauchgasventilatorleistung von 100 %

Gasbrennerleistung bei unterschiedlichen Einstellungen



Temperatur im oberen Übergang bei unterschiedlicher Gasbrennereinstellung





3.2.2 Diagramme Gasbrennersteuerung bei einer Rauchgasventilatorleistung von 65 %

Die Rauchgasventilatorleistung von 100 % erwies sich aus mehreren Gründen unpassend für die Aufgabenstellung. Wegen des hohen Unterdruckes in der Anlage in der Größenordnung von 500 Pascal gab es viel Falschluff und einen hohen Massenstrom. Für die experimentellen Versuche wurde zunächst eine Temperatur von 800-1000 °C benötigt. Um diese Temperaturen in der Anlage einzustellen wurde wegen der hohen Massenströme eine höhere Brennerleistung benötigt. Weiters erwies sich der hohe Unterdruck im System als problematisch bezüglich der Herausnahme der Depositionssonden aus der Anlage und auch bei der Hereingabe der Verdampfungsgefäße.

Um eine für die Aufgabenstellung optimale Gasbrennereinstellung zu erhalten wurde die Rauchgasventilatorleistung von 100 % auf 65 % gedrosselt. Somit sank der Unterdruck im System von 500 Pa auf ca. 100 Pa. Der Massenstrom sank um ca. 50 % und damit auch der Energiebedarf, im Vergleich zu vollen Ventilatorleistung.

Im folgenden Diagramm wird der Massenstrom von RGV 100 % und RGV 65 % dargestellt:

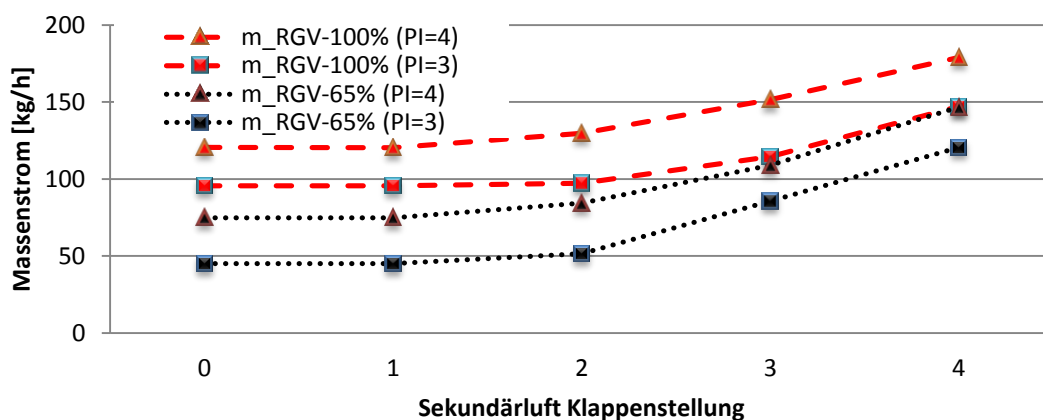
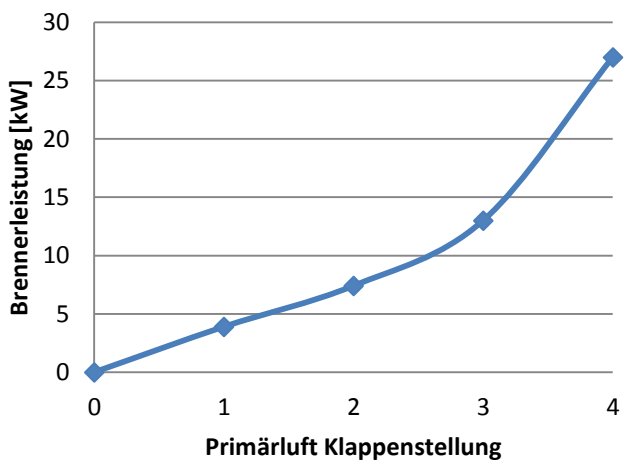
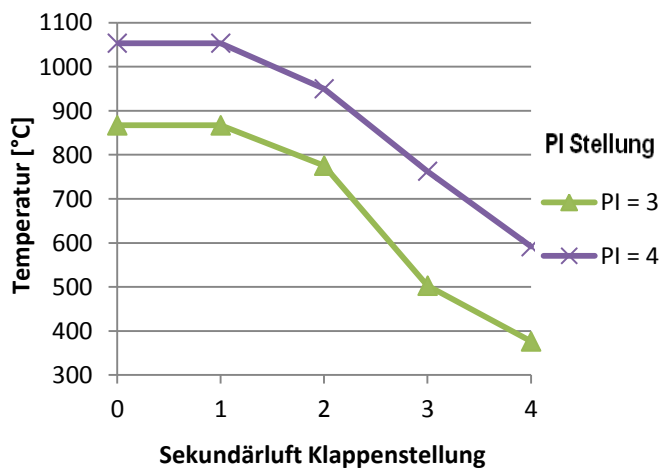
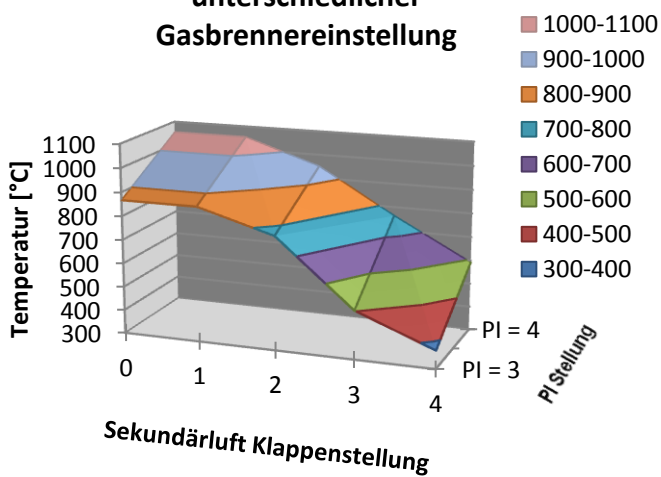


Diagramm 3.2: Vergleich der Massenströme für Rauchgasventilatorleistung 65 % und 100 % (Lambdasondenberechnung).

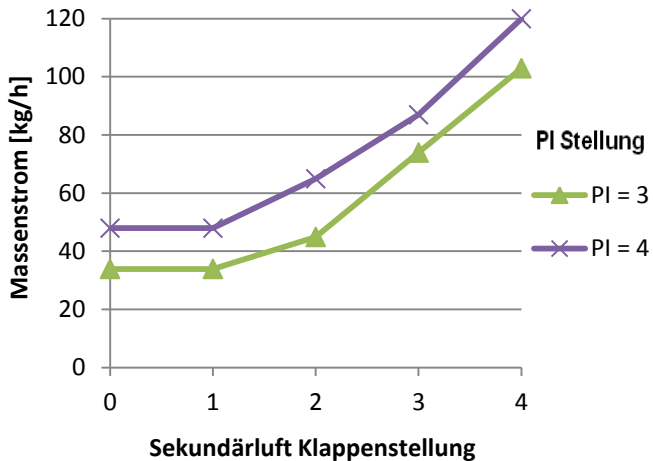
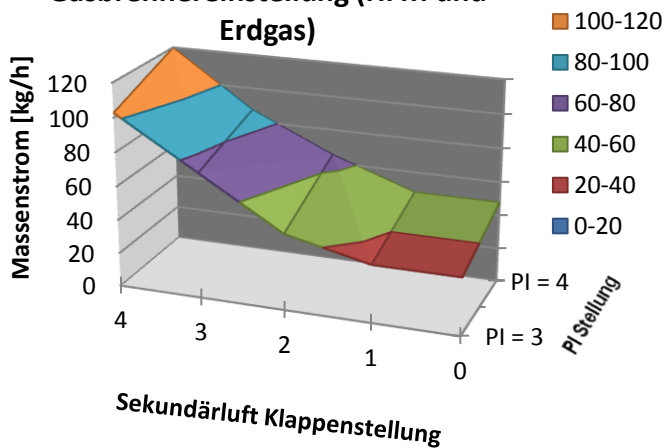
Leistungen bei unterschiedlicher Gasbrenner-Primärluft-Klappenstellung



Temperatur im oberen Übergang bei unterschiedlicher Gasbrennereinstellung



Rauchgasmassenstrom bei unterschiedlicher Gasbrennereinstellung (HFM und Erdgas)



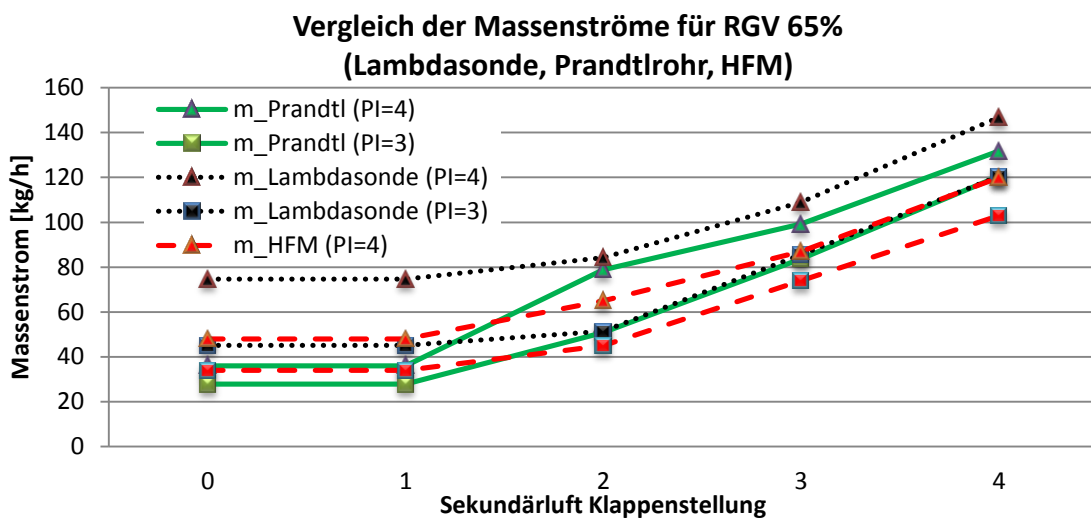
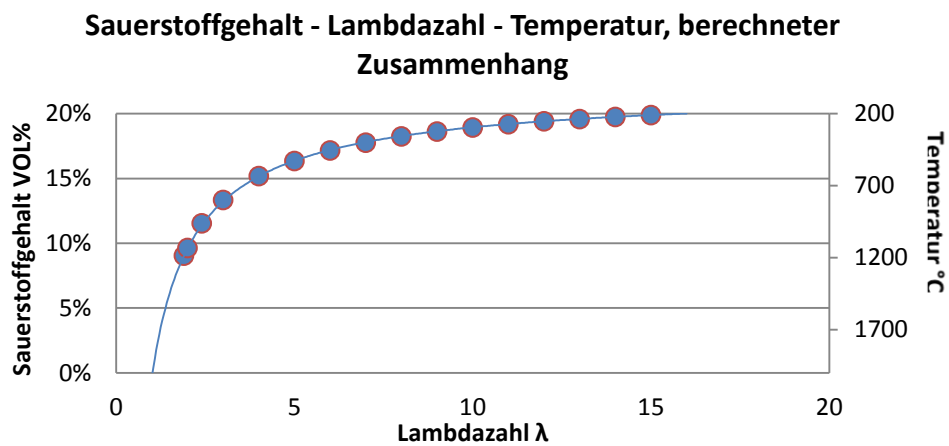
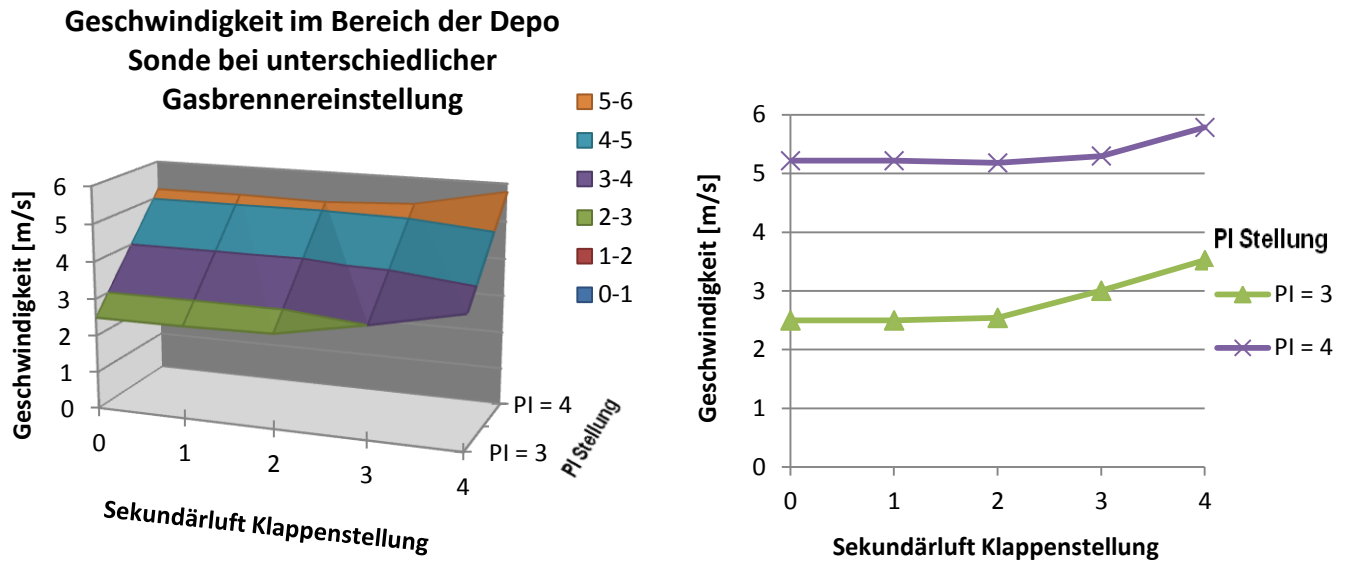


Diagramm: 3.3: Vergleich der Massenströme für verschiedene Klappenstellungen. Dreieck für Primärklappenstellung 4 (PI=4), Quadrat für Primärklappenstellung = 3 (PI=3).

m_{HFM} : Heisfilm Luftmassenstrommessung für Gasbrenner (Gasbrennerluftzufuhr und Brennstoffmassenstrom).

$m_{\text{Lambdasonde}}$: Rauchgasmassenstromberechnung mittels Lambdasondenwerte.

m_{Prandtl} : Rauchgasmassenstrom ermittelt über das Prandtlrohr.

Man erkennt aus dem Diagramm 3.3 gut, dass die Prandtlrohrmessung für kleine Massenströme schlechte (zu geringe) Werte liefert. Die HFM Messung beinhaltet die Primär-, Sekundärluft und Erdgasmassenstrom, also die am Gasbrenner ankommenden Massenströme. Die Differenz von HFM zu Prandtl- bzw. Lambdasondenberechnung für den Massenstrom ergibt die Falschlufft.

3.3 Bilanzierungen der Wärme- und Massenströme

Für die Visualisierung der großen Datenmengen aus der Datenaufzeichnung wurde ein Excel Programm erstellt, welches die maßgebenden Daten wie Temperatur, Massenströme, Geschwindigkeit, Sauerstoffgehalt, Wassertemperaturen auf Diagramme abbildet. Es gibt ein Diagramm welches die Massenbilanzen zeigt. Dort wird auch die Falschlufft sichtbar, welche bis zu ca. 20 % betragen kann, abhängig von der Rauchgasventilatoreinstellung. Um die Falschlufft in der Anlage zusätzlich zu verringern wurde die ganze Anlage an den scheinbar weniger dichten Stellen nochmals abgedichtet. Bei einer reduzierten Leistung des Rauchgasventilators wurde auch weniger Falschlufft gemessen, etwa im Bereich von 10 %. Bei kleinen Massenströmen zeigte die Massenstrommessung über das Prandtl-Rohr schlechte Ergebnisse, zu diesem Zweck wurde zusätzlich ein Luftmassenmesser für die Verbrennungsluft vor dem Gasbrenner eingebaut. Nun hatte man zwei Messinstrumente für die Massenbilanz: die vom Brenner benötigte Luft, die benötigte Erdgasmenge, und mit dem Prandtlrohr gemessene Rauchgasmenge vor dem Rauchgasventilator und man konnte die Falschlufft bestimmen.

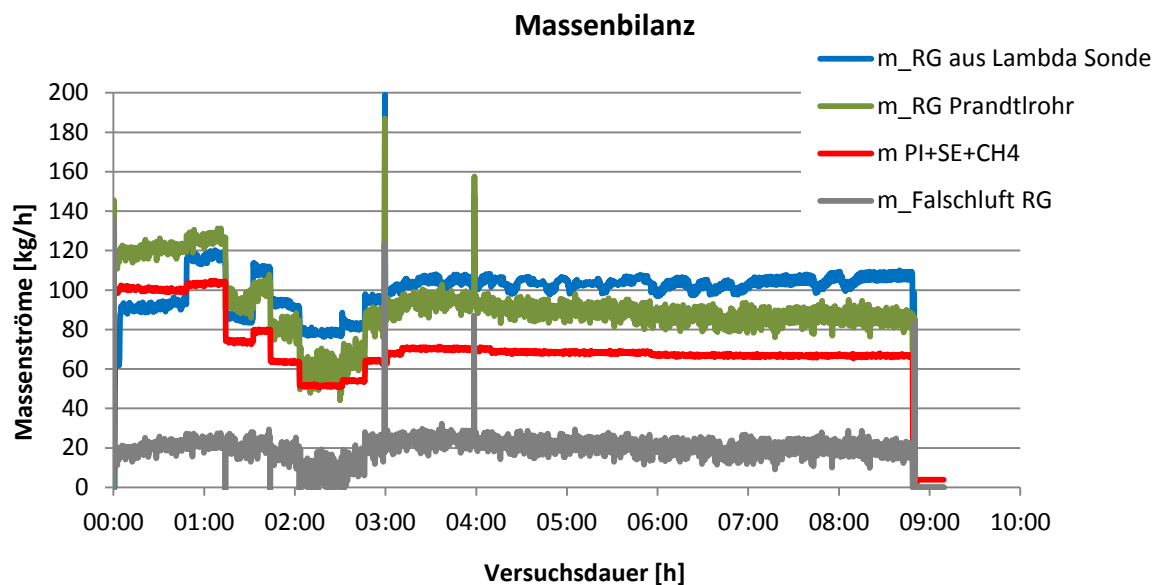


Diagramm 3.4: Darstellung der Massenströme während eines Versuches.

m PI+SE+CH₄: Massenstrom aus der Summe von Gasbrennerprimär- und –sekundärluft und Erdgasmassenstrom.

m_{RG} Prandtl: Rauchgasmassenstrom der durch die Werte des Prandtlrohres resultiert.

m_{RG} Lambda Sonde: Rauchgasmassenstrom berechnet aus den Werten der Lambdasonde

m_{Falschlufft} RG: Falschlufft berechnet aus m_{Prandtl} und dem O₂-Gehalt und der Brennerleistung.

Aus der Wärmebilanz (in der Abbildung 3.5 sichtbar) ist erkennbar wie die Wärmeströme in der Anlage verwendet werden. Bei Aufwärmen der Anlage wird zunächst viel Energie verwendet um die Anlage auf Temperatur zu bringen, erkennbar im Diagramm als Dämmverlust. Dieser Wert nimmt dann bei bereits aufgeheizter Anlage stetig ab, ist dann aber immer noch im Bereich von etwa 20 % der Brennerleistung (bei kleinen Brennerleistungen im Bereich von 25 kW). Der Abgasverlust ist in etwa im Bereich bei 2 kW. Der Großteil der Energie wird im stationären Zustand auf das Kühlsystem übertragen.

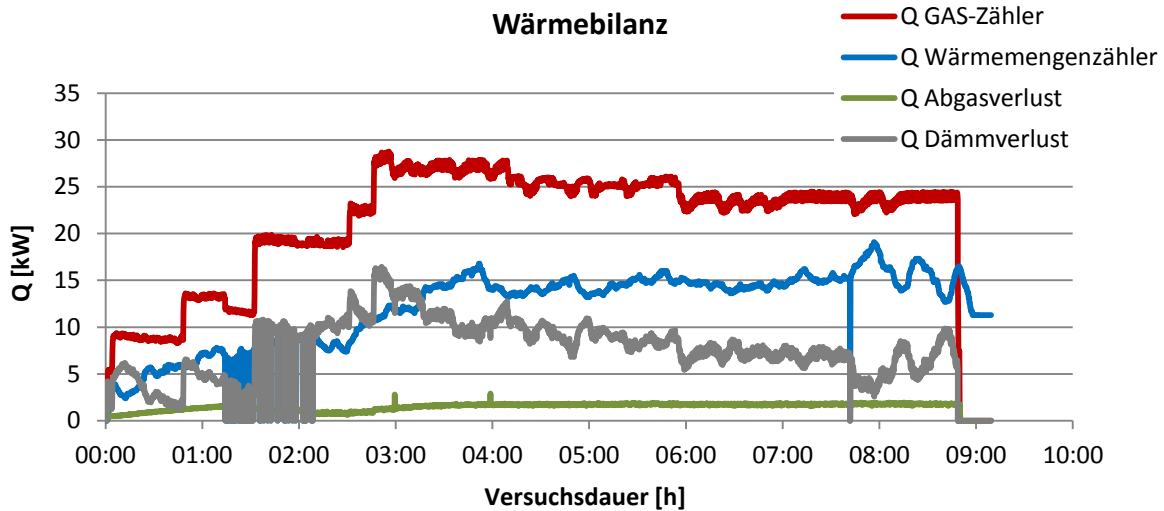


Diagramm 3.5: Darstellung der Wärmeströme während eines Versuchs.

Q GAS-Zähler: Leistung des Gasbrenners, basierend auf den Ergasverbrauch.

Q Wärmemengenzähler: Auf dem Kühlkreislauf abgegebene Wärmemenge.

Q Abgasverlust: Wärmestrom des Rauchgases nach dem Wärmetauscher (Verlust).

Q Dämmverlust: Die Differenz von Energiezufuhr (Gasbrenner) und Energieabfuhr (Wasser, Abgasverlust) ergibt die Dämmverluste der Anlage.

In der Temperaturaufzeichnung (Abbildung 3.6) sind die relevanten Temperaturverläufe während eines Versuchs aufgetragen.

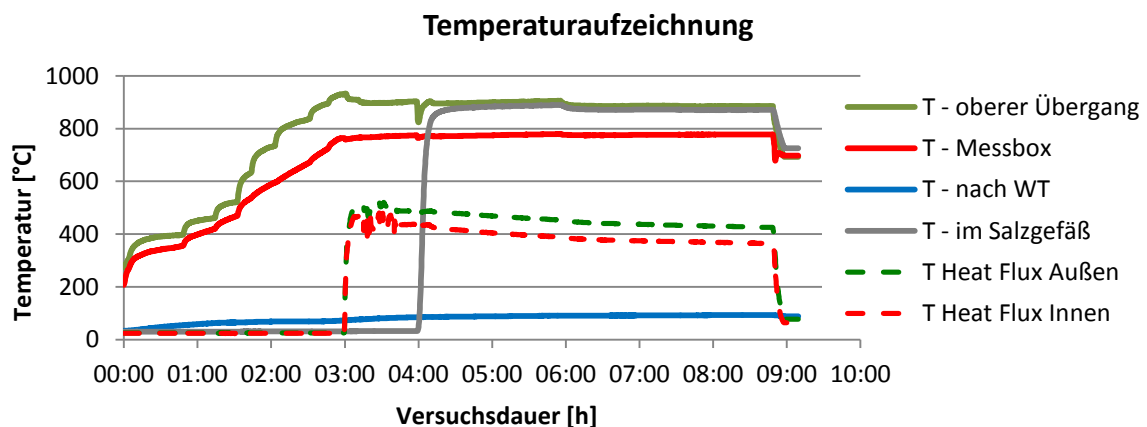


Diagramm 3.6: Darstellung der relevanten Temperaturen während eines Versuchs:

Temperaturen: Rauchgastemperatur im oberem Übergang (**grün**); Rauchgastemperatur in der Messbox (**rot**), Rauchgastemperatur nach dem Wärmetauscher (**blau**); Temperatur im Salzfreisetzungsgefäß (**grau**); Sondentemperatur innen (**rot strichliert**) und außen (**grün strichliert**).

Im Diagramm 3.6 erkennt man die stufenweise Aufwärmung der Anlage. Die strichlierten Temperaturen sind die Temperaturen der Depositionssonde, welche im Kapitel 3.5 genauer beschrieben wird.

3.4 Entwicklung einer Verdampfungseinheit für Kaliumchlorid

Mit den Erkenntnissen aus dem Kapitel 3.3 konnte nun auf die Salzfreesetzung eingegangen werden. Es wurde zunächst ein vorhandenes Salzfreesetzungsgefäß benutzt, wie in Abbildung 3.7 dargestellt:



Abbildung 3.7: Salzgefäß mit teilweise verdampftem Salz.

Das Salz wurde zunächst direkt auf der Stahloberfläche gegeben. Wegen der geringen Freisetzung im Vergleich zur Gesamtmasse, der stark unterschiedlichen Freisetzungsmengen, und den schwierigen Abwiegebedingungen, wurden separate Porzellangefäße in Schiffform benutzt, wie Abbildung 3.8 zeigt:

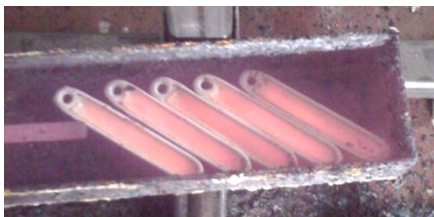


Abbildung 3.8: Schiffchen im Stahlgefäß bei der Herausnahme aus der Anlage.

Durch die hohe Kippgefahr der Schiffchen bei der Hereingabe und Herausnahme aus der Anlage konnte keine definierte Freisetzung erreicht werden. Es wurde daraufhin beschlossen folgende Porzellangefäße zu benutzen:

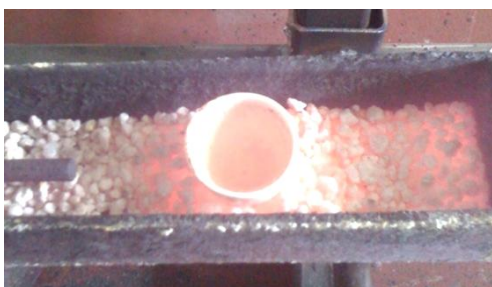


Abbildung 3.9: Porzellantiegel eingebettet mit Quarzsand im Stahlgefäß bei der Herausnahme aus der Anlage.

Damit die Gefahr des Festklebens der Tiegel mit der Stahloberfläche bei unbeabsichtigtem Verschütten zu vermeiden, wurde Quarzsand auf dem Grund des Stahlgefäßes gegeben (siehe Abbildung 3.9).

Die Salzfreesetzung ist im Wesentlichen von der Rauchgastemperatur abhängig. Diese wurde zunächst mit folgenden Werten angesetzt.

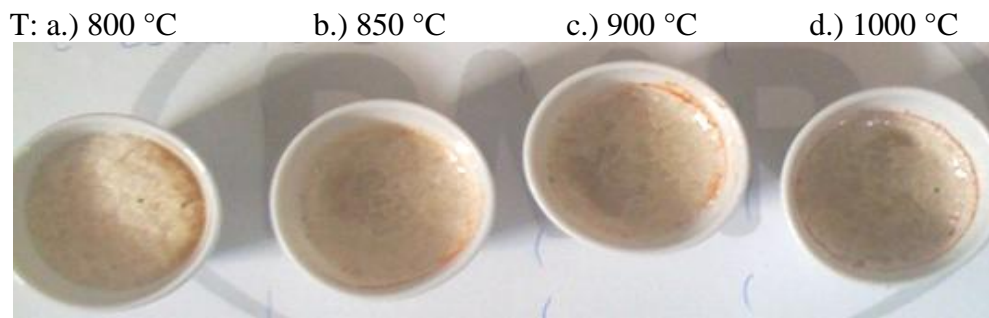


Abbildung 3.10: Salz in Tiegel bei unterschiedlichen Rauchgastemperaturen.

Bei einer Rauchgastemperatur von 800 °C ist das Salz, wie in der Abbildung 3.11 erkennbar, leicht angeschmolzen, jedoch gibt es hier keine nennenswerte Salzfreesetzung. Bei zunehmender Temperatur verdampft mehr Kaliumchlorid, es sieht aber auch so aus, dass mehr Verunreinigungen wie Rost in die Porzellantiegel gelangen. Verunreinigungen verändern die Freisetzungsrates des Salzes massiv. Hinzu kommt, dass das Salz mit dem Porzellantiegel reagiert und es dadurch zu Änderungen bei der Salzfreesetzung kommt, wenn man ein und denselben Porzellantiegel über viele Versuche benutzt. Der Kompromiss zwischen guter, wirtschaftlicher Freisetzungsrates und geringer Menge an Verunreinigungen scheint bei einer Temperatur von ca. 900 °C zu liegen. Im Diagramm 3.11 ist die Salzfreesetzung für die Temperaturen 800 °C, 900 °C und 1000 °C dargestellt.

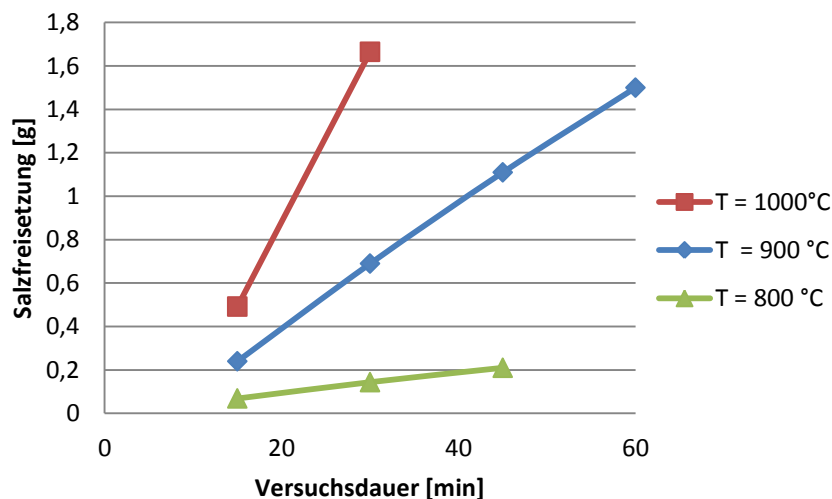


Diagramm 3.11: Salzfreesetzung mit 1 Porzellantiegel bei verschiedenen Temperaturen, geschlossenes Salzfreesetzungsgefäß, Quarzsand umgibt den Porzellantiegel.

Bei der Salzfreesetzung ist die Umströmung des Salzfreesetzungsgefäßes von Bedeutung. Bei der im Diagramm 3.12 dargestellten Salzfreesetzung ist die Drop Tube fallweise zu bzw. offen, welches die Umströmung des Salzgefäßes verändert. Die veränderte Strömung hat eine Veränderung der Salzfreigabe zur Folge. Die Einflussfaktoren der Strömungsgeometrie, des geschlossenen bzw. offenen Stahlbehälters und die unterschiedlichen Temperaturen sind im Diagramm 3.12 dargestellt. Prinzipiell kann man behaupten, dass ein geschlossenes Salzfreesetzungsgefäß zu einer geringeren Salzfreesetzung führt. Bei geschlossenem Bypass, also bei Drop-Tube Strömung des Rauchgases, ergibt sich eine höhere Salzfreesetzung, als wenn nur der Bypass offen ist.

Salzfreisetzung bei 800°C, 900°C, 1000°C; Vergleich zwischen Bypass und Drop Tube, offenes und geschlossenes Stahlgefäß

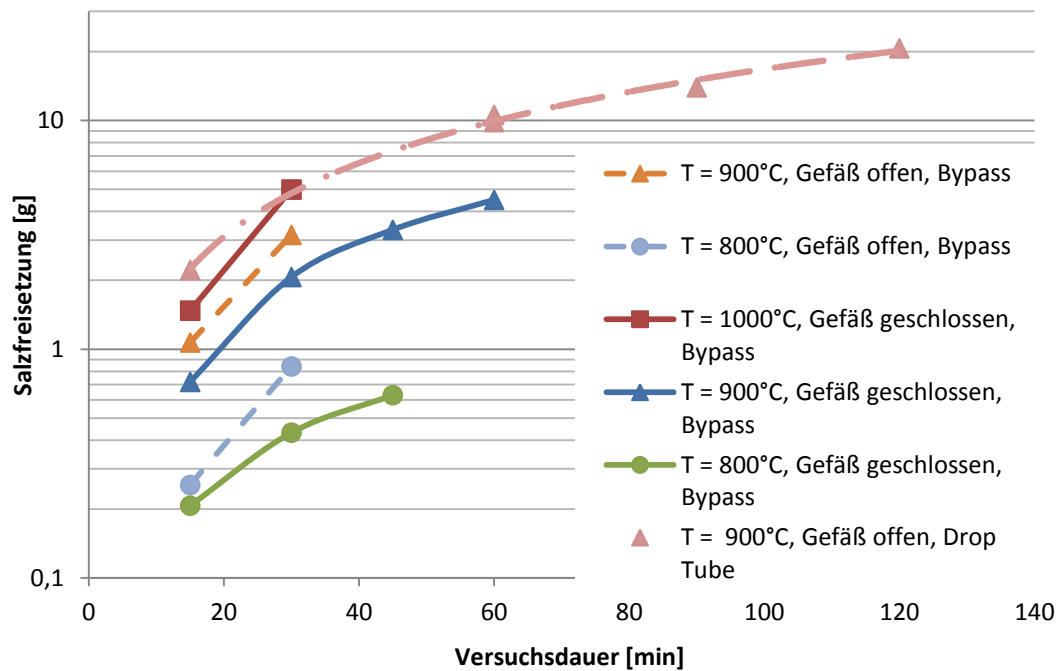


Diagramm 3.12: Vergleich zwischen der Salzfreisetzung von 3 Porzellantiegel bei Rauchgasströmung über Bypass und Drop-Tube. Einfluss des Deckels des Stahlgefäßes auf die Salzfreisetzung: geschlossenes und offenes Stahlgefäß. **Quarzsand** umgibt die Porzellantiegel.

Von großer Bedeutung hinsichtlich der Salzfreisetzung ist neben der Rauchgastemperatur und Strömungsgeometrie auch das Maß an Verunreinigungen des Porzellantiegels sowie der Quarzsand. Der Quarzsand bewirkt bis zu eine Verdreifachung der Salzfreisetzung, was mit der höheren Wärmeleitung des Quarzsandes im Vergleich zum Rauchgas erklärt werden kann. Der Quarzsand, welcher die Porzellantiegel umgibt, bewirkt eine höhere Temperatur am Porzellantiegel und somit eine höhere Salzfreisetzung. Um auf reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich Salzfreisetzung zu kommen, muß daher auf den Quarzsand verzichtet werden. Nach einer gewissen Zeit lagert sich auf dem Porzellangefäß ein weißer Belag ab (Reaktion vom Kaliumchlorid mit dem Porzellan), der auch nicht wieder entfernt werden kann (Ultraschall, Säure, kochendes Wasser, etc...). Dieser Belag und bereits sehr geringe andere Verschmutzungen (Rost, vorhandene Unreinheiten des Salzes, etc.) verursachen eine Vervielfachung (!!!) der Salzfreisetzung. Der Einfluß des Quarzsandes im Stahlgefäß auf die Salzfreisetzung, sowie der Verschmutzungseffekt der Porzellantiegel ist im Diagramm 3.13 sichtbar. Der Rote Kreis weist auf die stark unterschiedliche Salzfreisetzung bei gleicher Versuchsdauer durch Verschmutzung der Porzellantiegel.

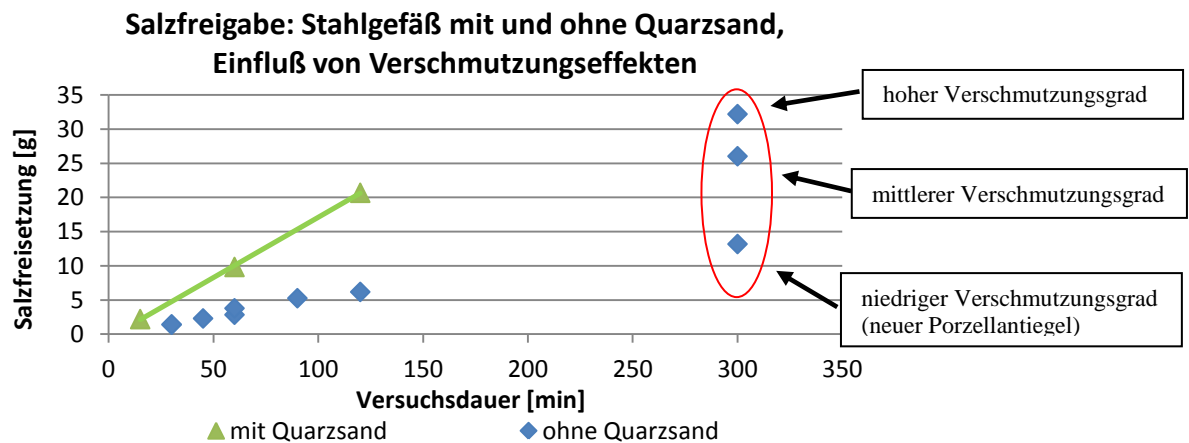


Diagramm 3.13: Einfluß von Quarzsand und Reinheit des Porzellantiegels auf der Salzfreisetzung.

Um eine einheitliche Salzfreisetzung zu ermöglichen, werden alle weiteren Versuche **ohne Quarzsand** und mit Schalen **niedrigen bis maximal mittleren Verschmutzungsgrades** realisiert.



Abbildung 3.14: Ansicht auf Porzellantiegel unterschiedlichen Verschmutzungsgrades: niedrig - neu (links), mittel (mitte) und hoch (rechts).

Aus wirtschaftlichen Gründen werden keine Versuche bei 1000 °C durchgeführt, da das Stahlgefäß sehr starkem Rostbefall bei jeden Aufheiz- und Abkühlzyklus ausgesetzt ist. Es werden auch alle folgenden Versuche ohne Deckel durchgeführt, um den Rostbefall des Stahlgefäßes entgegenzuwirken und die Salzfreisetzung zu verbessern. Da die Freisetzung bei 800 °C viel zu gering ist, wird als **optimale Temperatur des Rauchgases im oberen Übergang bei 900 °C** gewählt.

Da das Stahlgefäß nach den bisherigen wenigen Versuchen schon relativ stark korrodiert war, wurde ein neues Stahlgefäß entworfen und gefertigt, welches eine optimierte Geometrie bezüglich der Aufgabenstellung besaß und mehr Porzellantiegel aufnehmen konnte um die Salzfreigabe besser variieren zu können. Im Zuge dieser Aktualisierung wurden auch neue, etwas größere Porzellantiegel (Höhe: 33 mm, Durchmesser oben: 30 mm, alte Porzellantiegel: Höhe: 28mm, Durchmesser 25 mm) verwendet, da die bisherigen schon relativ stark verschmutzt waren. Nun wurde wieder die Salzfreisetzung überprüft und mit den alten Daten verglichen, wie im Diagramm 3.15 sichtbar.

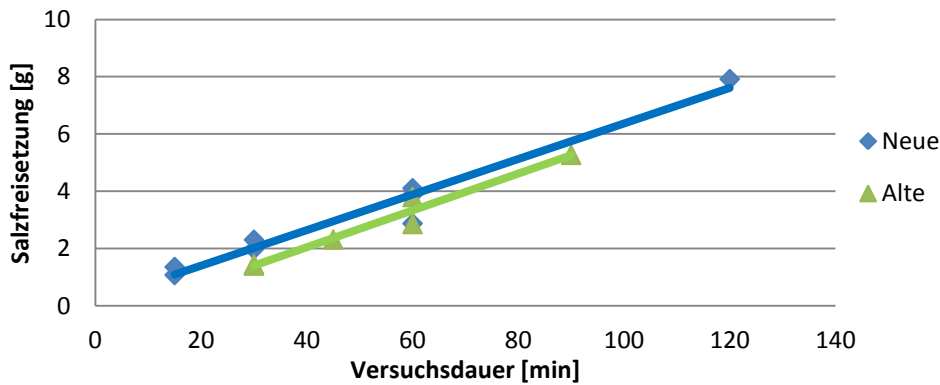


Diagramm 3.15: Vergleich zwischen: alter Porzellantiegelform und altem Salzgefäß und neuer Porzellantiegelform und neuem Salzgefäß.



Abbildung 3.16: Neues Stahlgefäß, und größere Tiegel bei der Herausnahme aus der Anlage mit teilweise noch flüssigem Kaliumchlorid.

Die Salzfreisetzungsraten der neuen Porzellantiegel und des neuen Stahlgefäßes sind mit den alten Gefäßen weitgehend vergleichbar, jedoch können nun sechs Porzellantiegel gleichzeitig zum Verdampfen gegeben werden (beim alten Stahlgefäß waren es maximal drei), welches eine größere Variationsmöglichkeit der Salzfreisetzung möglich macht.

Als nächsten Schritt wurde untersucht, ob ein unterschiedlicher Rauchgasmassenstrom gleicher Temperatur zu einer unterschiedlichen Salzfreisetzung führt. Dazu wurde der Rauchgasmassenstrom von 45 kg/h auf 90 kg/h verdoppelt. Die Ergebnisse im Diagramm 3.17 zeigen keine besonderen Veränderungen der Salzfreigabe.

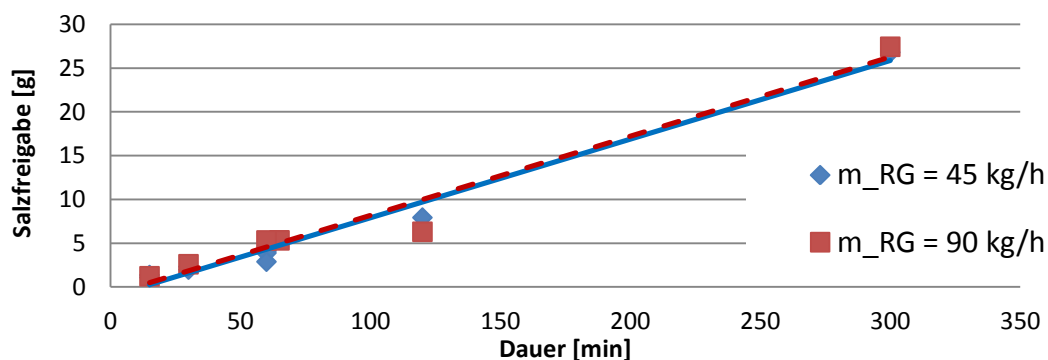


Diagramm 3.17: Salzfreisetzung: Vergleich unterschiedlicher Rauchgasmassenströme. 3 Porzellantiegel, offenes Gefäß, Strömung über Drop Tube, ohne Quarzsand.

Da nun die definierte Salzfreisetzung optimiert wurde, konnte auf den Kondensationsversuch eingegangen werden. Die für die Kondensationsversuche notwendige Depositionssonde wird im folgenden Kapitel erläutert.

Würde man die Salzfreesetzung noch weiter verbessern wollen, müsste man wohl auf Platintiegel umsteigen. Diesen hätten gegenüber den Porzellantiegeln den Vorteil, dass man hier keinen Korrosionseinfluss hätte, und wären somit über eine längere Versuchsdauer einsatzbereit. Eine optimale Salzfreesetzung beinhaltet auch die bereits erwähnte Variationsmöglichkeit der Freigabe. Optimal dazu wäre es, wenn man, ähnlich wie bei den Porzellantiegeln, mehrere Einheiten an Platintiegeln hätte, welche in der Länge in etwa das Abmaß der Breite des Stahlgefäßes haben. Das hätte den Vorteil, dass diese Tiegel dann mehr Salz aufnehmen können und somit noch längere Kondensationsversuche machbar wären.

3.5 Depositionssonde: Funktionsweise und Beschreibung der Heat Flux Sonde

Für die Durchführung der Kondensationsversuche wurde eine Depositionssonde mit integrierter Wärmestrommessung (Heat Flux Sonde) eingesetzt. Der Vorteil dieser Sonde liegt in der Fähigkeit Wärmeströme zu messen. Die Heat Flux Sonde besteht aus einem doppelten Metallrohr und einer Messspitze. Das Doppelrohr ist für den Transport der Kühlluft zuständig. An der Messspitze (Bauplan siehe Abbildung 3.18) befinden sich insgesamt drei Temperatursensoren. In der äußeren Bohrung sind 2 Thermo-elemente angebracht. Einer davon gibt Daten für die Kühlregelung der Depositionssonde. Der zweite Temperatursensor außen und der Temperatursensor im Inneren sind für die Datenaufzeichnung verantwortlich. Das Prinzip der Wärmestrommessung ist nun folgendes: Sobald sich um die Sonde herum eine unterschiedliche Temperatur als im Inneren der Sonde einstellt, ergibt sich ein Temperaturgradient zwischen dem äußeren und inneren Temperatursensor. Das Material aus dem die Messspitze besteht ist ein hochlegierter Stahl mit der Bezeichnung: X15CrNiSi25. Die Wärmeleitfähigkeit dieses Stahls ist bekannt, und somit kann der Wärmestrom berechnet werden. Die Heat Flux Sonde hat an der Messspitze einen abnehmbaren Ring. Im Falle einer Depositionsschichtbildung auf der Depositionssonde kann der Ring für spätere Untersuchungen dieser Depositionsschicht herangezogen werden.

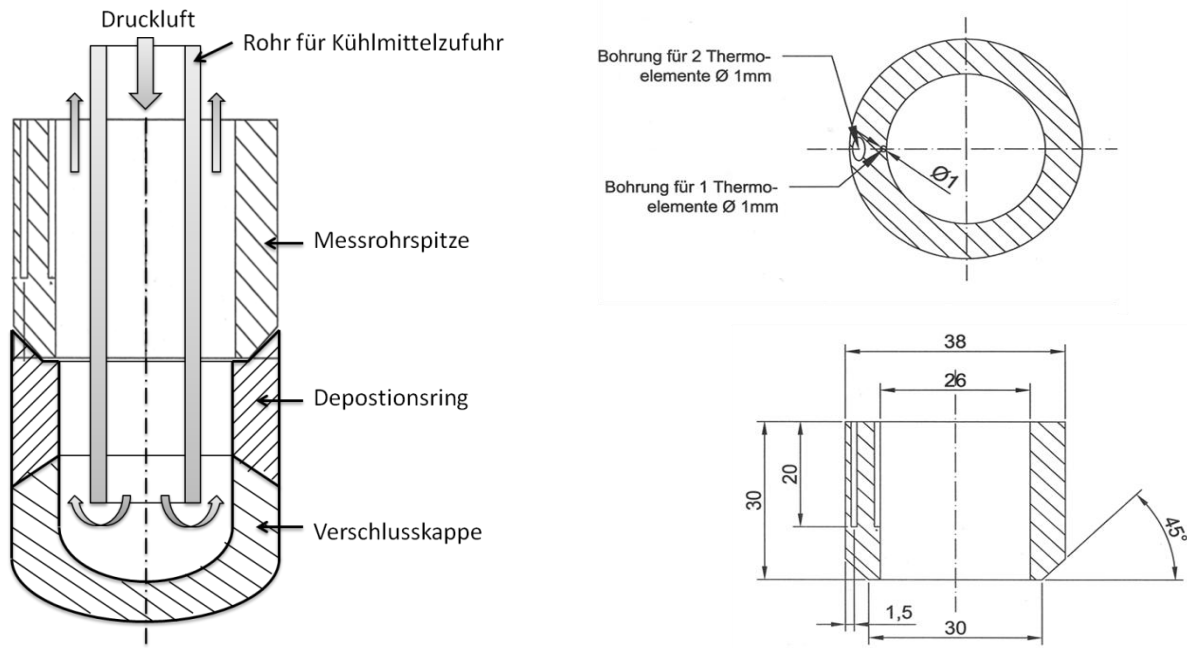


Abbildung 3.18: Bauplan Heat Flux Sonde, Messrohr Spitze im Detail.

Eigenschaften der Depositionssonde (X15CrNiSi25):

Wärmeleitfähigkeit: $k = 15$ [W/mK] (bei 20°C) und 19 [W/mK] ($T=500$ °C),

Strahlung: Emissionskoeffizient $\varepsilon: 0,8$ (Raue Oberflächenbeschaffenheit, Stahl).

3.6 Die Beschreibung der Kondensationsversuche:

Die Anlage wird langsam auf einer Zieltemperatur (900 °C) aufgeheizt. Nachdem die Drop Tube mit den Heizelementen und die gesamte Anlage die Zieltemperatur erreicht haben und es kaum Temperaturänderungen im System gibt (**stationärer Zustand**), führt man die Sonde (hier: Ausführung als Heat Flux Sonde, Kapitel 3.5) im Bereich der Messbox ein und stellt die Regelung für die Kühlung der Sonde auf die gewünschte Zieltemperatur ein. Nachdem die Heat Flux Sonde die gewünschte Zieltemperatur erreicht hat und sich das gesamte System im stationären Zustand befindet, fügt man mit einem speziellen Salzfreisetzungsgefäß (siehe Abbildung 3.16) eine gewisse Menge Salz in die Anlage ein. Das Salz beginnt nun im oberen Übergang zu verdampfen und wandert mit dem Rauchgas durch die Drop Tube zum Bereich „Messbox“ wo sich die gekühlte Sonde befindet. Dort beginnt nun KCl aus dem Rauchgas an der quer umströmten Sonde zu kondensieren. Durch den konstanten Luftvolumenstrom, der für die Kühlung der Sonde sorgt, entsteht zwischen dem inneren und dem äußeren Temperatursensor abhängig von der Außentemperatur (Rauchgastemperatur) und der Kühlungsregelung der Sonde ein Temperaturgradient. Sobald eine Kondensation auf der Depositionssonde stattfindet sinkt dieser Temperaturgradient in der Sonde in Abhängigkeit von der Menge und Struktur der Kondensationsschicht. Die Temperatur an der Sonde nimmt bei unverändertem Kühlluftmassenstrom ab wegen der Abnahme des Wärmestromes durch die wachsende Kondensationsschicht.

Es wurde nun damit begonnen Kondensationsversuche durchzuführen. Die dafür notwendigen Depositionsringe wurden vor den Versuchen im Ultraschallbad gereinigt und mittels Laborwaage (Genauigkeit: 10^{-5} Gramm) abgewogen. Nach dem jeweiligen Kondensationsversuch wurde der „Depositionsring“ mit der Depositionsschicht sofort nach Abkühlen der Sonde abmontiert und abgewogen und es wurde die Schichthöhe abgeschätzt. Da die Kaliumchlorid Depositionsschicht **hydroskopisch** ist, musste dieser Vorgang relativ schnell geschehen. Die Abschätzung der Depositionsschichthöhe wurde mittels Millimeterstab und einer Nahaufnahme gewährleistet und ist dadurch mit einer gewissen Fehlerquote verbunden. Die ersten Versuche zeigten schon eine relativ geringe Depositionsmasse und, im Gegensatz zur Masse, eher hohe Depositionsschichtdicke. Die Porosität der Schicht musste sehr hoch sein, denn die Depositionsschicht war sehr instabil. Schon geringe Luftströmungen waren fähig die Schicht wegzublasen.

Vorversuche und Randbedingungen:

Der Temperaturfühler „T-Messbox“ im Bereich der Depositionssonde wurde mittels Absaugpyromether kalibriert.

Weiters wurde befürchtet, dass sich im etwas kühleren Abschnitt im Bereich des Bypasses im oberen Übergang schon Aerosole bilden könnten, und deswegen wurde mittels Niederdruck-Kaskadenimpactor im Bereich der Messbox das Rauchgas untersucht (2 Versuche jeweils 2 Minuten). Das Ergebnis zeigte, dass sich **keine Aerosole** im Rauchgas vor der Messbox befinden. Es ist davon auszugehen, dass sich die Depositionsschicht mittels Kondensation auf der Sonde ablagert.

4.CFD - SIMULATIONEN

4.1 Gesamtsimulation

Um die verwendete Versuchsanlage hinsichtlich des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes besser abschätzen zu können, werden CFD-Simulationen durchgeführt. In diesem Fall wird zunächst ein Modell des Strömungsfeldes erstellt, dazu wird das Programm Gambit verwendet. Eine Darstellung der vernetzten Strömungsgeometrie ist in der Abbildung 4.1 sichtbar.

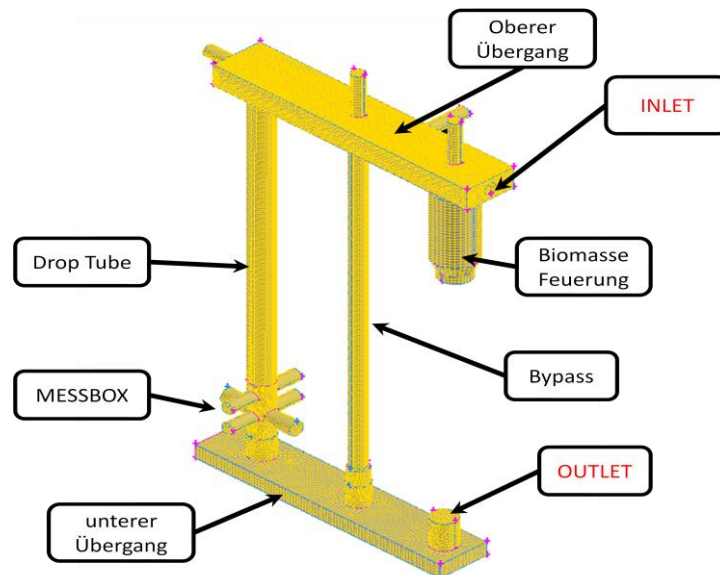


Abbildung 4.1: Darstellung der vernetzten Strömungsgeometrie in Gambit mit Bezeichnung der Strömungsabschnitte sowie Einlass und Auslass.

Das in Gambit erstellte vernetzte Objekt wurde im CFD - Programm Fluent übernommen. Nachdem nun alle Flächen (Wände, Inlet, Outlet, Materialdicke, etc.) und alle strömungsrelevanten Parameter (Turbulenzmodell, Strahlungsmodell, etc.) definiert waren, wurde mit der Simulation des gesamten Systems begonnen. Die Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft den Stromlinienverlauf des Rauchgases durch die Anlage. Konkrete Ergebnisse und eine genaue Erläuterung für die CFD – Simulationen sind im Kapitel 6 beschrieben.

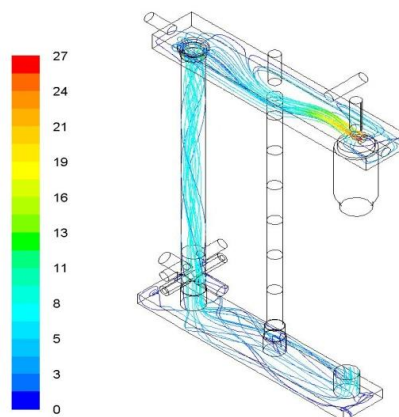


Abbildung 4.2: Simulation in Fluent, Darstellung des Strömungsprofils der Gesamtanlage bei geschlossenem Bypass.

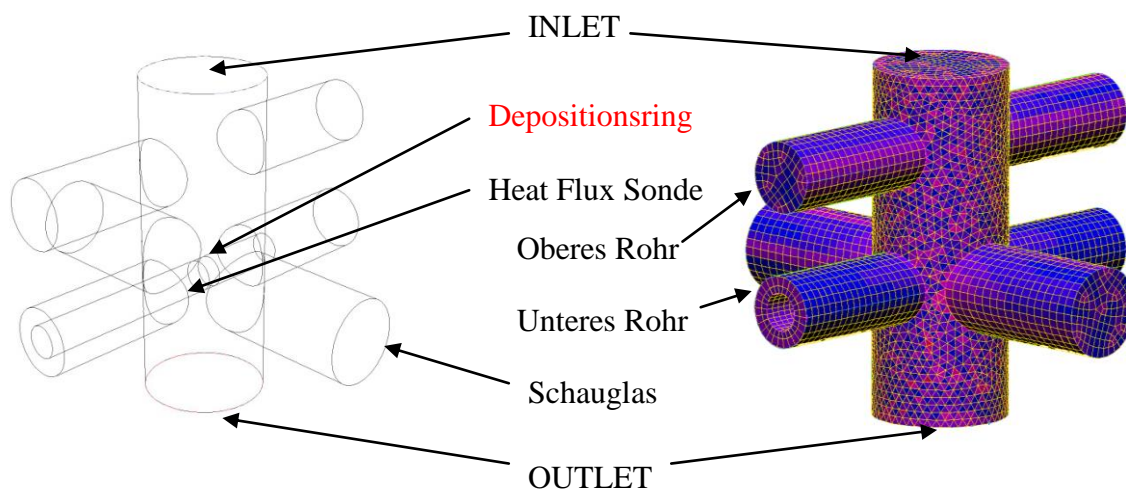
Die Simulation der Gesamtanlage ist unter anderem auch sehr wichtig um abzuschätzen wie groß die Wärmeverluste der Anlage im Betrieb sind.

4.2 Detailsimulation – Messbox:

Um detaillierte Daten des Wärmeüberganges vom Rauchgas auf die Sonde zu erhalten, wurde das Strömungsgebiet optimiert und nur der für die Aufgabenstellung relevante Strömungsabschnitt im Detail simuliert. Man erkennt bei der Gesamtsimulation, dass sich eine leichte Drallströmung im Bereich der Drop-Tube einstellt. Diese Drallströmung ist im Bereich der Messbox für den Wärmeübergang auf die Sonde kaum relevant und wird daher für die Detailsimulation des optimierten Strömungsgebietes Messbox vernachlässigt.

Die bei den experimentellen Versuchen verwendete Heat Flux Sonde wurde ebenfalls in das Strömungsgebiet mit einbezogen um die späteren Ergebnisse aus den Versuchen mit der Simulation vergleichen zu können. Der Depositionsring wurde ebenfalls modelliert um die spätere Datenauswertung einfacher zu gestalten.

Der Abschnitt Messbox sieht so aus:



Abmaße: Durchmesser Inlet = 150 mm
 Durchmesser Schauglas = 100 mm
 Durchmesser oberes und unteres Rohr = 80 mm
 Durchmesser Depositionssonde = 38 mm

Abbildung 4.3: Ansicht und Beschreibung des Detailsimulationsbereichs Messbox.

Sowohl bei der Gesamtsimulation als auch bei der Detailsimulation wurde die Falschlufte in der Anlage vernachlässigt. Ergebnisse der Detailsimulation sowie genaue Erläuterungen sind im Kapitel 6 angeführt.

Versuchsreihe 1

T1 = 300°C	C1	C2
V1	V1C1T1	V1C2T1
V2	V2C1T1	V2C2T1

Versuchsreihe 2

T2 = 500°C	C1	C2
V1	V1C1T2	V1C2T2
V2		V2C2T2

Damit die Darstellung der Ergebnisse übersichtlicher gestaltet werden kann, werden die Versuche in 2 Kategorien eingeteilt: In der Kategorie mit der Depositionssondentemperatur **T1** (300 °C) und **T2** (500 °C).

Die Ergebnisse werden in dem Kapitel 5.2 bzw. 5.3 gezeigt.

5.2 Ergebnisse der Kondensationsversuche bei einer Sondentemperatur von 300°C.

Mit den in Kapitel 5.1 erläuterten Betriebsparameter wurde nun die erste Versuchsreihe durchgeführt. Die Versuchsdauer wurde mit 5 Stunden angesetzt, da sich in diesem Zeitraum eine Depositionsschicht mit gut meßbarer Höhe und Gewicht bildet. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind in der Tabelle 5.1 übersichtlich zusammengefaßt.

Bezeichnung	Einheit	V1C1T1	V1C2T1	V2C1T1	V2C2T1
Versuchsdauer	min	300	300	300	300
Temperatur oberer Übergang	°C	900	900	900	900
Temperatur Messbox	°C	770	770	790	790
SONDENTEMPERATUREN					
<i>Versuchsbeginn</i>					
Temperatur T_{außen} Beginn	°C	292	292	302	302
Temperatur T_{innen} Beginn	°C	235	235	236	236
<i>Versuchsende</i>					
Temperatur T_{außen} Ende	°C	236	218	240	213
Temperatur T_{innen} Ende	°C	195	180	189	163
KCL im Rauchgas	mg/Nm ³	159	275	81	157
Salzfreisetzung	g/Versuch g/min	26,8 0,09	46,5 0,16	27,4 0,09	53,2 0,18
Kondensationsmasse	g/Versuch mg/min	0,044 0,15	0,076 0,25	0,040 0,13	0,075 0,25
Höhe der Schicht Porosität der Schicht	mm	0,75 0,973	1,20 0,971	0,75 0,975	1,20 0,972

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Versuchsreihe 1.

Erkenntnisse aus der ersten Versuchsreihe:

Einfluss Salzfreisetzung: Wenn man die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 betrachtet wird folgendes erkennbar: Die Salzfreisetzung liegt bei ca. 8 Gramm pro Porzellantiegel und Versuch. Die Kondensationsmasse beträgt ca. 40 mg für die Salzfreigabe C1 bzw. 75 mg für C2. D.h.: eine Verdoppelung der Salzfreisetzung hat eine nahezu ebenso hohe Steigerung der Depositionsmasse zur Folge, wie man in Tabelle 5.1 unter dem Punkt „Kondensationsmasse“ bzw. „Salzfreisetzung“ ablesen kann.

Einfluss Rauchgasgeschwindigkeit: Durch die Verdoppelung des Rauchgasmassenstroms kommt es zu einer Verdoppelung der Rauchgasgeschwindigkeit in der Messbox (von 2,5 m/s auf 5 m/s). Wenn man die Ergebnisse in der Versuchsreihe 1 betrachtet wird ersichtlich, dass

eine ähnliche Salzfreesetzung im Vergleich zur geringeren Rauchgasgeschwindigkeit, eine Verringerung der Kondensationsmasse um ca. 10% zur Folge hat.

Wärmeübergang: Die Temperaturänderung in der Sonde während der Kondensationsversuche aus der Versuchsreihe 1 sowie die daraus resultierenden Wärmeübergangseigenschaften werden in den folgenden Diagrammen dargestellt.

Die Temperaturen auf der Innen- und Außenseite der Sonde während der Versuche aus der Versuchsreihe 1 sind im Diagramm 5.2 (für die Rauchgasgeschwindigkeit V1) und 5.3 (für V2) sichtbar.

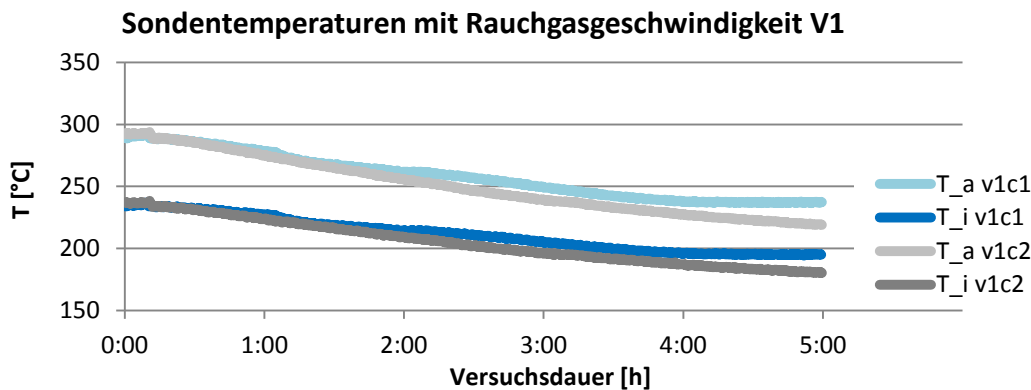


Diagramm 5.2: Ergebnisse Versuchsreihe 1: Temperaturverläufe in der Heat Flux Sonde für Versuche mit der Rauchgasgeschwindigkeit V1 bei den Salzfreesetzungen C1 und C2. T_a: Temperatursensor der Depositionssonde außen. T_i: Temperatursensor innen.

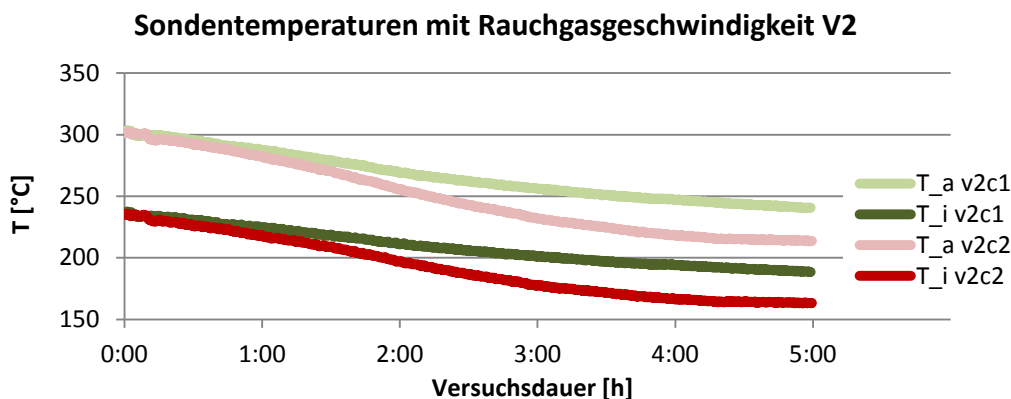


Diagramm 5.3: Ergebnisse Versuchsreihe 1: Temperaturverläufe in der Heat Flux Sonde für Versuche mit der Rauchgasgeschwindigkeit V2 bei den Salzfreesetzungen C1 und C2. T_a: Temperatursensor der Depositionssonde außen. T_i: Temperatursensor innen.

Betrachtet man die Temperaturverläufe in den Diagrammen 5.2 und 5.3 erkennt man zunächst einen zu Beginn der Kondensationsversuche konstanten Temperaturverlauf. Dieser kommt dadurch zustande, weil das gerade zur Salzfreesetzung eingesetzte Salz erst auf Temperatur kommen muß. Außerdem beginnt die Kondensation zunächst nur langsam stattzufinden und beschleunigt sich nach einer gewissen Dauer. Mit steigender Versuchsdauer wird eine stärker abfallende Temperatur in der Sonde beobachtet. Dieser Temperaturabfall hängt zum einen von der Rauchgasgeschwindigkeit ab zum anderen von der Salzfreesetzung. Man erkennt eine viel stärkere Temperaturabsenkung bei den Versuchen mit der jeweils höheren Salzfreesetzung C2. Bei den höheren Salzfreesetzungen gelangt mehr Salz ins Rauchgas, welches wiederum an der Depositionssonde zu höheren Kondensationsraten führt.

Betrachtet man die Temperaturverläufe in den Diagrammen 5.2 und 5.3 erkennt man, dass die Temperatur zu Beginn der Versuche zunächst nur langsam abnimmt mit einem Wert von ca. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der ersten Stunde. Danach setzt ein stärkerer Temperaturabfall ein, der bei der Hälfte der Versuchsdauer ca. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Stunde ausmacht. Nach diesem stärkeren Temperaturabfall flacht dieser gegen Ende des Versuches ab auf einen Wert von ca. $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der letzten Stunde des Versuches. Der langsame Temperaturabfall zu Beginn der Versuche spricht für eine sehr kompakte Schicht mit besserer Wärmeleitfähigkeit, welche dann mit zunehmendem Wachstum instabiler wird und eine höhere Porosität aufweist, welches wiederum zu stärkerem Temperaturabfall führt. Der zum Schluss abflachende Temperaturverlauf lässt sich mit einem stark abnehmenden Kondensationsmassenstrom erklären, welcher durch Erosionsvorgänge an der mittlerweile sehr instabil gewordenen Depositionsaußenschicht und die durch die Schichthöhe höheren Temperaturen an der Depositionsschichtoberfläche. Die Temperaturverläufe lassen sich zusammengefaßt für die gesamte Versuchsreihe Teil 1 in ein Diagramm als Temperaturgradient der Depositionssonde darstellen, siehe Diagramm 5.4.

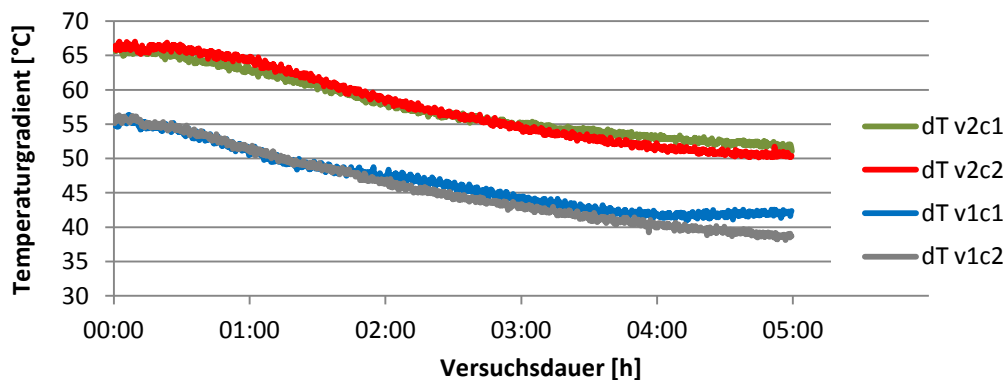


Diagramm 5.4: Temperaturgradient (dT) in der Sonde bei der Versuchsreihe 1.

Mit Hilfe der CFD - Simulationen wurde festgestellt, dass die von der Depositionssonde gemessene Innentemperatur auf Grund strömungstechnischer Gegebenheiten von der Kühlluft mit beeinflusst wird und dadurch zu geringe Werte aufzeichnet. Der Grund dafür ist, dass der Innentempersensor nicht in einer Bohrung liegt, wie es laut Bauplan sein sollte (Abbildung 3.18), sondern in einer Ausfräsung. Dadurch entsteht ein gewisser Abstand zwischen Depositionssonde und Temperatursensor. Diese Vermutung wurde in einem Versuch bei dem der Temperatursensor mit einer Folie vom Kühlluftmassenstrom isoliert wurde bestätigt. Der Abstand zwischen Sensor und Sonde wird mit Hilfe der Werte aus der CFD Simulation berechnet. Der Temperaturverlauf ohne Depositionsschicht für den Versuch VIC1T1 sieht somit wie folgt aus:

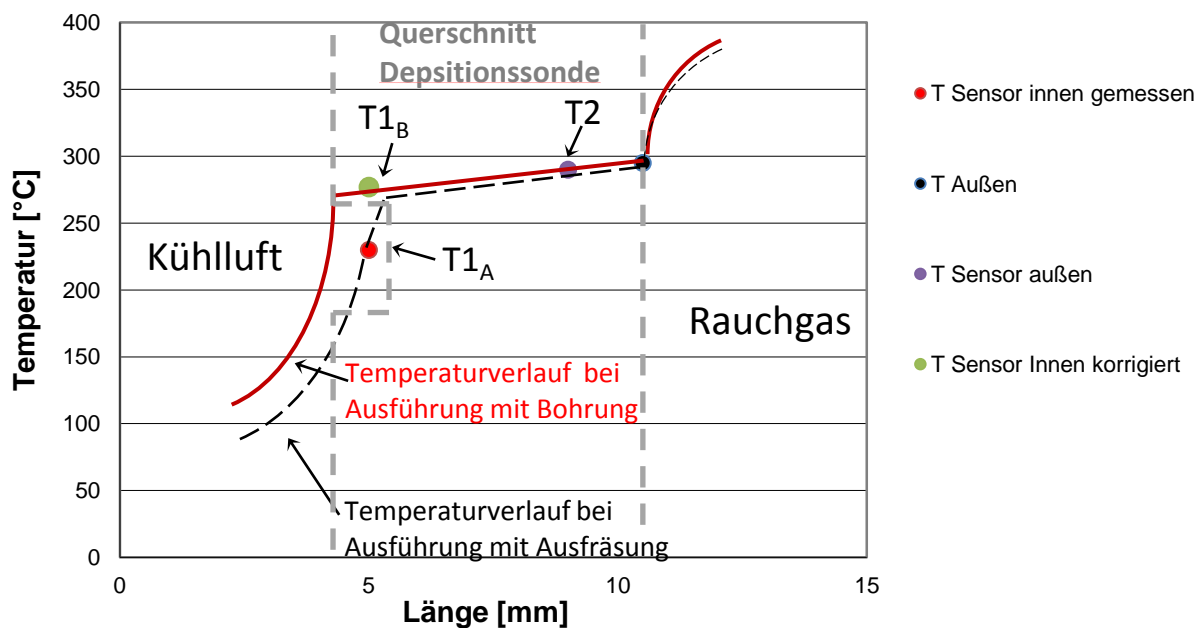


Abbildung 5.5: Temperaturverlauf durch die Depositionssonde (lineare Darstellung der Wärmeleitung durch die Depositionssonde) beim Versuch VIC1T1. Ansicht auf die zwei unterschiedlichen Temperaturverläufe: Der schwarze strichlierte Temperaturverlauf aus den gemessenen Werten wie er tatsächlich ist und der rote Temperaturverlauf wie er eigentlich sein sollte. T_{1A} : Temperatursensor in der Ausfräsung, wie er sich tatsächlich befindet, T_{1B} : Temperatursensor wie er laut Bauplan liegen sollte, nämlich in einer Bohrung. T_2 : Temperatursensor außen ebenfalls in einer Bohrung.

Mit dem korrigierten Temperaturwert sieht der Wärmeübergang am Depositionsring während der Versuchsreihe 1 wie folgt aus:

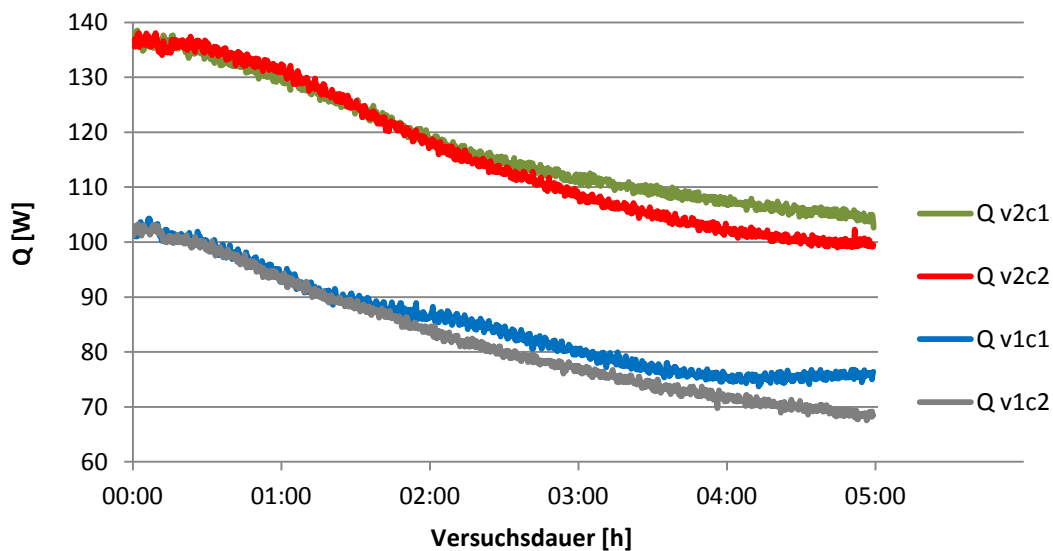


Diagramm 5.6: Versuchsreihe 1, Wärmebilanz Q am Depositionsring.

Die Darstellung der Wärmebilanz am Depositionsring im Diagramm 5.6 zeigt über die Versuchsdauer eine abfallende Tendenz. Ähnlich wie beim Temperaturverlauf zeigt auch die Wärmebilanz zu Beginn der jeweiligen Versuche einen stärkeren Rückgang der Wärmeleistung, der dann allmählich abflacht. Zu Beginn der Versuche fällt die übertragene Wärmeleistung am Ring in etwa mit 10 W/h, am Ende ca. 5 W/h. Insgesamt beträgt der Rückgang der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Salzfregabe und Rauchgasgeschwindigkeit ca. 25 % bei der niedrigeren Salzfregabe C1 und ca. 30 % bei höheren Salzfregabe C2.

5.3 Ergebnisse der Kondensationsversuche bei einer Sondentemperatur von 500°C.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurden die aus der ersten Versuchsreihe bekannten Betriebsparameter verwendet, jedoch wurde die Temperatur der Depositionssonde von 300 °C (T1) auf ca. 500 °C (T2) Außentemperatur erhöht (Untersuchung des Einflusses der Oberflächentemperatur). Die Rauchgasgeschwindigkeiten V1 und V2 wurden gleich gelassen, ebenso die Rauchgastemperatur. Der Versuch mit den Betriebsparameter V1 (2,5 m/s) und C2 (6 Schalen für die Salzfreigabe) bzw. kurzbezeichnet als: V1C2T2 wurde als Versuch mit einer dauer von 10 Stunden gefahren. Es wurden also folgende Versuche im Teil 2 untersucht:

Die Versuche mit der Depositionssondentemperatur $T_2 = 500 \text{ °C}$ haben folgende Betriebsparameter:

1. V1C1: Geschwindigkeit 1, Konzentration 1, Versuchsdauer: 5 Stunden
2. V1C2: Geschwindigkeit 1, Konzentration 2, Versuchsdauer: **10 Stunden**
3. V2C2: Geschwindigkeit 2, Konzentration 2, Versuchsdauer: 5 Stunden

Alle 3 Versuche wurden nur mit neuen Porzellantiegel durchgeführt, dadurch ist die Salzfreigabe geringer (um ca. 50 %) als bei der ersten Versuchsreihe, wo Porzellantiegel mittleren Reinheitsgrades verwendet wurden. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 werden in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Bezeichnung	Einheit	V1C1T2	V1C2T2	V2C2T2
Versuchsdauer	min	300	600	300
Temperatur oberer Übergang	°C	900	900	900
Temperatur Messbox	°C	770	770	790
SONDE				
Versuchsbeginn				
Temperatur T_außen Beginn	°C	502	502	501
Temperatur T_innen Beginn	°C	474	474	464
Versuchsende				
Temperatur T_außen Ende	°C	459	415	445
Temperatur T_innen Ende	°C	433	395	414
KCL im Rauchgas	mg/Nm ³	94	177	134
Salzfreisetzung	g/Versuch g/min	15,8 0,05	59,7 0,10	30,1 0,10
Kondensationsmasse	g/Versuch mg/min	0,025 0,08	0,07 0,12	0,039 0,13
Höhe der Schicht Porosität der Schicht	mm	0,50 0,977	1,50 0,979	0,75 0,976

Tabelle 5.7: Versuchsreihe 2, Darstellung der Ergebnisse.

Einfluss Depositionssondentemperatur: Wenn man die Depositionssondentemperatur von 300 °C auf 500 °C erhöht sieht man zunächst keinen Einfluss auf die Kondensationsmasse (Vergleich Versuch: V2C1T1 und V2C2T2 mit ähnlicher Salzfreesetzung und Rauchgasmassenstrom).

Einfluss Versuchsdauer: Wenn man die Versuchsdauer von 300 Minuten auf 600 Minuten erhöht und dazu die Salzfreesetzungsrate verdoppelt (also insgesamt vier fache Salzfreesetzung) dann bekommt man keine 4-fache Kondensationsrate, sondern eine Erhöhung der Kondensationsrate um den Faktor 2,5. Ein Grund hierfür ist die Zunahme der Depositionsschichttemperatur mit zunehmender Depositionsschichthöhe, die zu einer Abnahme des Kondensationsmassenstromes führt. Hinzu wird die Depositionsschicht mit zunehmender Depositionsschichthöhe instabiler und dadurch nehmen die Erosionsphänomene zu.

Nun die Temperaturverläufe während der zweiten Versuchsreihe:

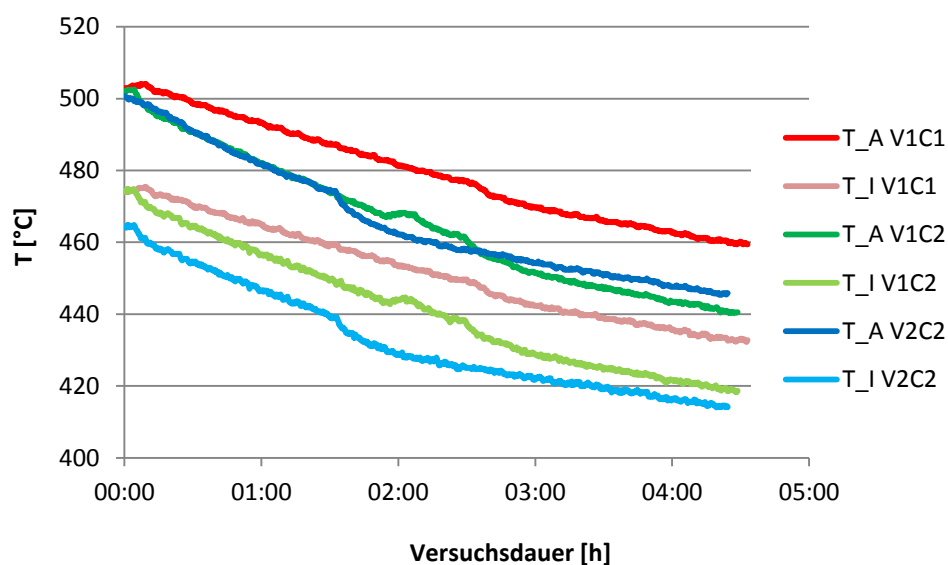


Diagramm 5.8: Versuchsreihe 2: Darstellung der Temperaturverläufe.

Man sieht im Diagramm 5.8 grundsätzlich die mit zunehmender Versuchsdauer langsam abnehmende Temperatur. Der Temperaturgradient in der Depositionssonde ist bei den Versuchen mit der höheren Sondentemperatur deutlich geringer als bei der Versuchsreihe Teil 1. Aufgrund von Druckschwankungen in der Druckluftleitung für die Kühlung der Sonde konnte die Innentemperatur zu Beginn der Versuche nicht exakt eingestellt werden, jedoch ist die Abweichung sehr gering.

Der Versuch V1C2 wurde mit einer Versuchsdauer von 10 Stunden durchgeführt um zu untersuchen, ob es bei der höheren Sondentemperatur (T_2) und die damit verbundenen höheren Depositionsschichttemperaturen zu Änderung der Wärmeübertragungseigenschaften der Depositionsschicht durch Änderung der Struktur, wie sie durch Schmelzvorgänge auftreten, kommt.

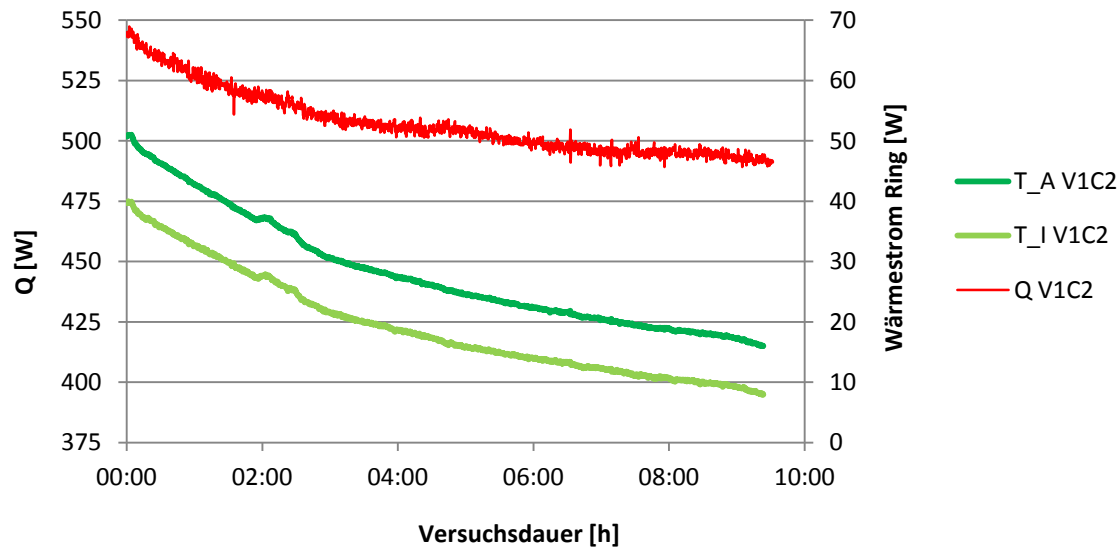


Diagramm 5.9: Temperaturverlauf und Wärmebilanz am Ring während des Versuches V1C2T2 mit einer Versuchsdauer von 10 Stunden.

Die Struktur der Depositionsschicht dieses Versuches hatte im Gegensatz zu den anderen Versuchen aus der Versuchsreihe 2, einen etwas stabileren Aufbau, trotz großer Schichthöhe. Ein Grund dafür ist dass die hohe Depositions sondentemperatur und die höhere Depositionsschichthöhe zu höherer Schichttemperatur führen. Durch die hohe Schichttemperatur hat die Struktur des kondensierten Kaliumchloridgefüges ein verschmolzeneres Aussehen (siehe Mikroskopaufnahmen 5.19 und 5.20). Der Verlauf der Temperaturen während des Versuchs flachten immer mehr ab, sodass sich am Ende des Versuchs ein Gesamttemperaturabfall der Depositions sonde von ca. 100 °C ergeben hat.

Der Wärmeübergang auf dem Ring sieht während den Versuchen der zweiten Versuchsreihe wie folgt aus:

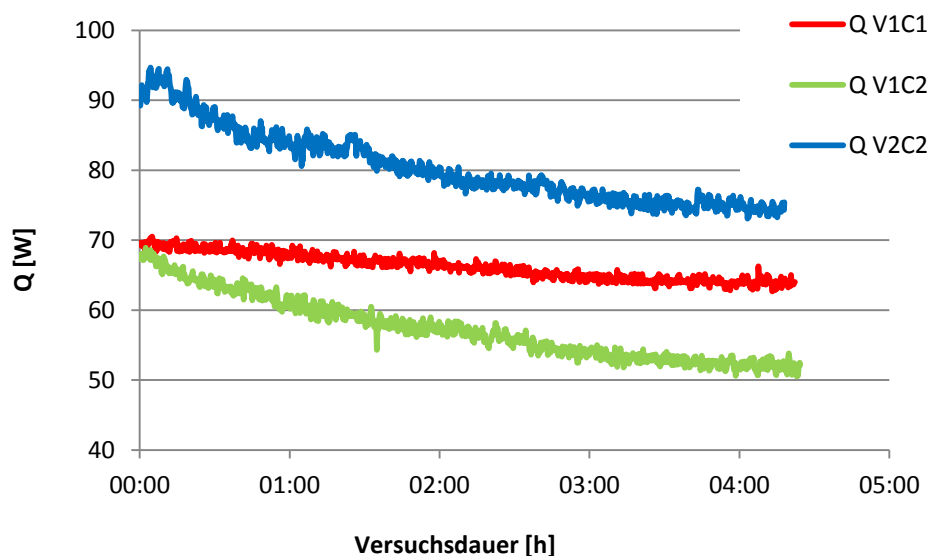


Diagramm 5.10: Versuchsreihe 2: Wärmebilanz am Ring.

Wenn man die Wärmebilanz am Depositionsring während der zweiten Versuchsreihe betrachtet, erkennt man erneut einen stetigen Rückgang der übertragenen Wärmeleistung. Der Rückgang ist, wie auch bei der ersten Versuchsreihe, bei höherer Salzfreesetzung deutlich stärker. Jedoch ist wegen der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Depositionssonde zum ersten die übertragene Wärmeleistung geringer und zum zweiten der Rückgang nicht so stark im Vergleich zu der ersten Versuchsreihe. Betrachtet man die Wärmebilanz am Depositionsring beim Versuch V1C1, also geringer Rauchgasmassenstrom und kleine Salzfreesetzungsrate, erkennt man einen nahezu unveränderten Wärmestrom, in Zahlen ausgedrückt würde das bedeuten einen Rückgang von 69 Watt auf 64 Watt nach einer fünfstündigen Versuchsdauer, also nicht einmal 10 %. Bei gleichen Betriebsbedingungen aber einer höheren Salzfreesetzung ist der Rückgang um einiges höher: von 69 Watt auf 52 Watt, bzw. ca. 25 %. Die Wärmebilanz des Versuches V2C2 zeigt einen Rückgang der übertragenen Wärmeleistung von 92 auf 73 Watt, also in etwa 20 %. Der im Vergleich zu dem Versuch V1C2 geringere Wärmestromrückgang könnte mit einer geringeren Depositionsschichthöhe erklärt werden, welche zum Beispiel durch Erosionsvorgänge an der Depositionsschicht auf Grund der höheren Rauchgasgeschwindigkeit in der Messbox entstehen.

5.4 Die Beschreibung der Depositionsschicht

Grundsätzlich sind die Depositionsschichten bei den zwei unterschiedlichen Sondentemperaturen völlig unterschiedlich. Betrachtet man die Depositionsschicht bei der Sondentemperatur T1 ist folgendes zu beobachten:

Es bildet sich zunächst nach kurzer Zeit, etwa in den ersten 30 Minuten des Kondensationsversuchs, eine gleichmäßig um den Ring verteilte, ganz dünne weiße Kondensationsschicht, die hier sogenannte Schicht 1.

Schicht 1: Größenordnung: Höhe ca. 0,01 mm, Gewicht: ca. 3 mg, mit einer im Vergleich „niedrigeren“ Porosität von ca. 0,9, optisch dichte und kompakte Struktur, brüchig beim Abkühlen des Ringes jedoch sehr stabil, gleichmäßige Verteilung über den gesamten Ring. Diese Schicht hat zunächst trotz geringer Schichtdicke einen sichtbaren Einfluss auf dem Wärmeübergang. Der Aufbau dieser „Grundschrift“ läuft im Schnitt um einiges langsamer als ab, als der danach folgende Schichtaufbau.

Nach ca. 60 Minuten beginnt sich eine Übergangsschicht zu bilden: Schicht 2: Höhe ca. 0,2 mm, eine ungefähre Porosität von etwa 0,95, die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Kondensationsschicht ist abhängig von der Salzfregabe und Depositionssondentemperatur. Bei den gegebenen Versuchsparameter (T1: 300 °C) ist auf der LUV Seite des Ringes (rauchgaszugewandten Seite) die Kondensationsrate höher, als auf LEE Seite. Diese Schicht hat einen deutlichen Wärmeübergangseinfluss wegen der höheren Schichtdicke und hohen Porosität.

Nach 2 Stunden Versuchszeit beginnt sich die Außenschicht aufzubauen: Schicht 3: Höhe ca. 1mm (nach 300 Minuten Versuchsdauer und Salzfregabe C2) und hoher Porosität ($p > 0,97$). Die Schicht ist sehr instabil und hat auf der rauchgaszugewandten Seite des Ringes eine viel stärkere Ausprägung. Diese Schicht hat wegen der hohen Porosität und Höhe einen erheblichen Einfluss auf den Wärmeübergang.

Dadurch, dass die Depositionsschicht im gesamten auf der Luv Seite viel höhere Depositionsmenge und Depositionsschichthöhe aufweist, wird für die Berechnung der Porosität das Volumen auf der Lee Seite vernachlässigt (halbes Ringvolumen).

Nach ca. 5 Stunden bei einer gesamten Salzfregabe von 30 bis 60 Gramm, hat die gesamte Schicht ca. 0,75-1,5 mm Höhe und ca. 40-80 mg Gewicht, eine hohe Porosität mit etwa $p=0,97-0,98$ und somit eine sehr hohe Instabilität. Bei den länger dauernden Versuchen musste man sehr vorsichtig bei der Herausnahme der Sonde sein, da allein der durch den Rauchgasventilator (bei 65 % Leistung) erzeugte eher kleine Unterdruck in der Messbox von ca. 100 Pascal ausreichte, um die oberste Depositionsschicht teilweise wegzusaugen (Abbildung 5.36). Bei der Herausnahme wurde daher die Rauchgasventilatorleistung noch weiter herunter geregelt bis auf ca. 30-40 %.

Wenn man das Gewicht der Schicht und das Volumen abschätzt, bekommt man eine Porosität von über 0,97, also einen überwiegenden Anteil der fluiden Komponente (Rauchgas). Es ist also davon auszugehen, dass sich auch die Wärmedurchgangszahl k der Depositionsschicht in der Größenordnung von der des Rauchgases bei ca. 300 °C, also ca. 0,05 [W/mK] sein muss. Mit der geringen Wärmeleitfähigkeit ergeben sich ein sehr hoher Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenschicht bei relativ geringen Schichtdicken.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Sondentemperaturen T1 und T2 wird sichtbar, dass sich der Schichtaufbau der Depositionsschicht eine völlig unterschiedliche Struktur hat. Bei höherer Depositionssondentemperatur T2 ist die Schicht Aufgrund der höheren Porosität noch instabiler als bei der Sondentemperatur T1, es bilden sich auch keine drei von einander „trennbaren“ Schichten aus wie zuvor bei der Sondentemperatur T1 erwähnt. Der Schichtaufbau bei der Temperatur T2 scheint auch um einiges langsamer abzulaufen als bei der Depositionssondentemperatur T1. Dies kann einerseits am Sättigungsgrad bei der höheren Depositionssondentemperatur liegen und andererseits an den erosionsbedingten Schichtabtrag, der bei der instabilen Schicht maßgebend ist.

Die Depositionsschicht wurde im Elektronenmikroskop untersucht. Man erkennt bei der niedrigeren Temperatur T1 (nachfolgende Abbildungen links) eher einen kubischen-würfelförmigen Kristallaufbau, welcher bei höherer Temperatur (T2) eher nadelig zu sein scheint.

Anschließend werden Aufnahmen der Depositionsschicht mit dem Elektronenmikroskop gezeigt. Die linke Seite hat die Aufnahmen der Depositionsschicht für die Temperatur T1, die rechte Seite die Temperatur T2. Es sind nebeneinander immer ähnliche Vergrößerungsverhältnisse abgebildet, damit der Vergleich des Gefüges vereinfacht wird. Nach den mikroskopischen Aufnahmen werden einige ausgewählte Abbildungen eines Kondensationsversuches dargestellt.

T1 - 300°C Seitenansicht, 200x

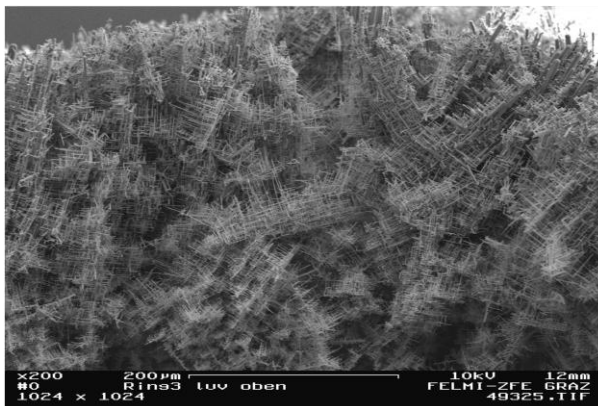


Abbildung 5.11: T1 Seitenansicht LUV Seite, 200x.

T2 - 500°C Seitenansicht, 100x

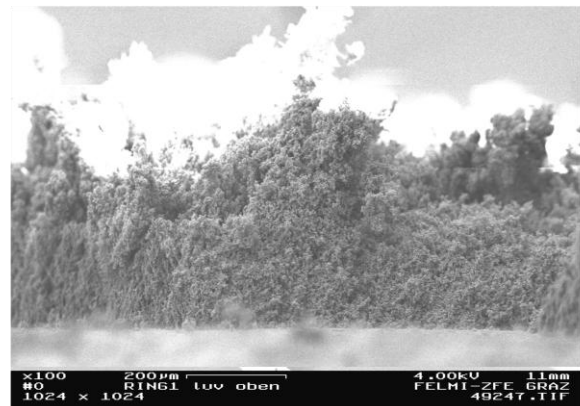


Abbildung 5.12: T2 Seitenansicht LUV Seite, 100x.

T1 Seitenansicht, 500x

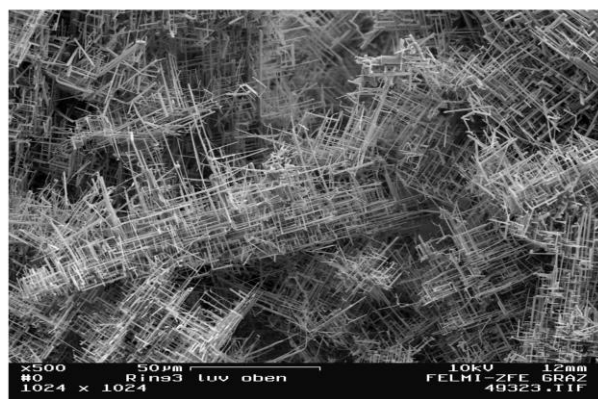


Abbildung 5.13: T1 Seitenansicht LUV Seite, 500x.

T2 Seitenansicht, 500x

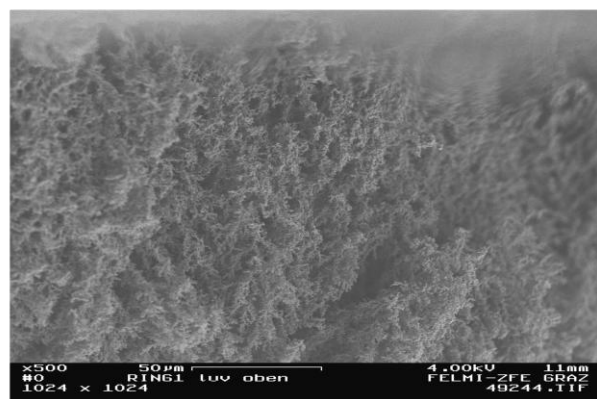


Abbildung 5.14: T2 Seitenansicht LUV Seite, 500x.

Bei der Betrachtung der Abbildungen, die die Seitenansicht der Depositionsschicht bei den zwei unterschiedlichen Depositionssondentemperaturen zeigen, wird der völlig unterschiedliche Aufbau der Depositionsschicht verdeutlicht. Allgemein kann man behaupten, dass der kristalline Aufbau mit zunehmender Depositionsschichthöhe zu größeren bzw. längeren und unzusammenhängenden Kristallen tendiert. In der Nähe der Ringoberfläche ist das Gefüge zunächst sehr fein und kompakt aufgebaut. Bei der Sondentemperatur T1 ist das Gefüge im Vergleich zur höheren Sondentemperatur T2 viel häufiger vernetzt und die Kristalle sind größer. Die Vernetzung und die Größe der Kristalle könnte eine mögliche Erklärung für die höhere Festigkeit der Depositionsschicht bei der niedrigeren Depositionsschichttemperatur sein. Bei der höheren Sondentemperatur besteht das Gefüge aus sehr viel kleineren, baumartigen und Großteils unzusammenhängenden Kristallen.

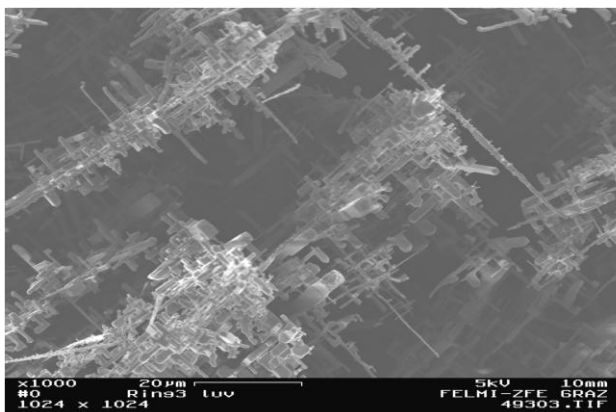
T1 LUV Oberfläche, 1000x

Abbildung 5.15: T1 LUV Oberfläche, 1000x.

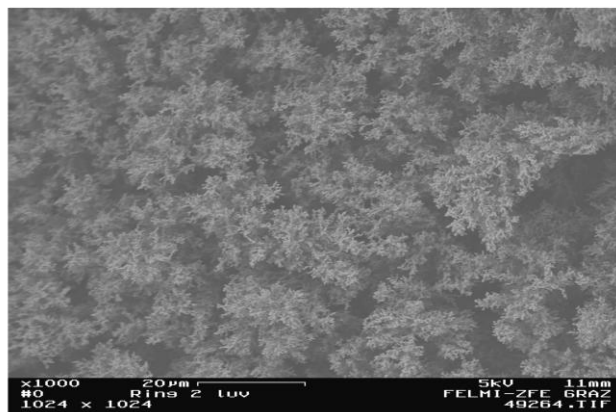
T2 LUV Oberfläche, 1000x

Abbildung 5.16: T2 LUV Oberfläche, 1000x.

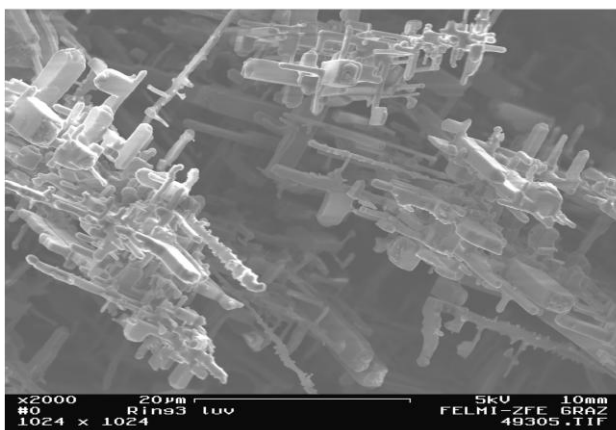
T1 LUV Oberfläche, 2000x

Abbildung 5.17: T1 LUV Oberfläche, 2000x.

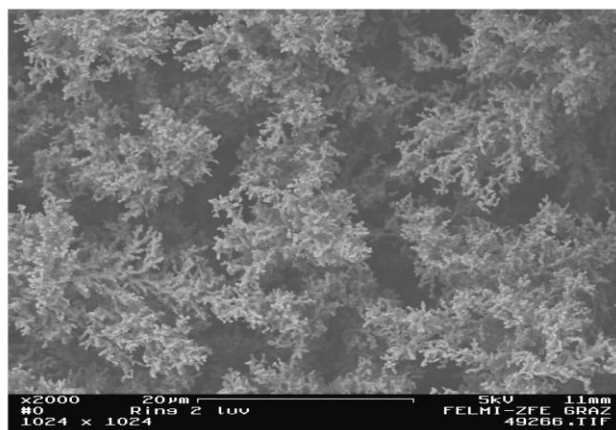
T2 LUV Oberfläche, 2000x

Abbildung 5.18: T2 LUV Oberfläche, 2000x.

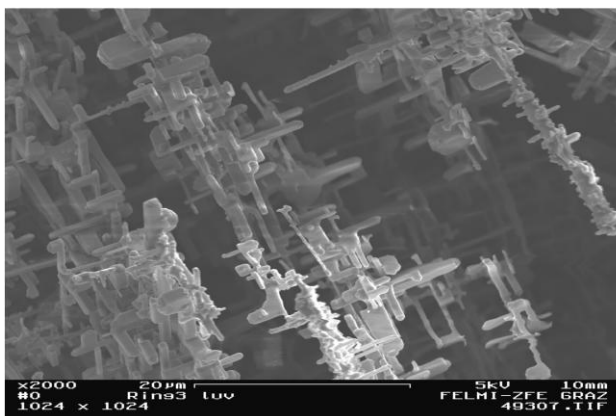
T1 LUV Oberfläche, 2000x

Abbildung 5.19: T1 LUV Oberfläche, 2000x.

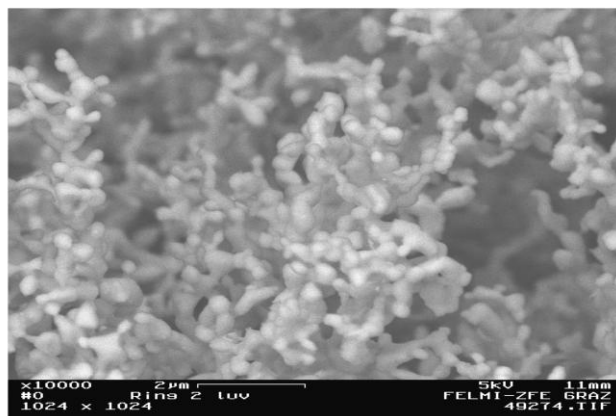
T2 LUV Oberfläche, 10000x

Abbildung 5.20: T2 LUV Oberfläche, 10000x.

T1 LEE Oberfläche, 500x

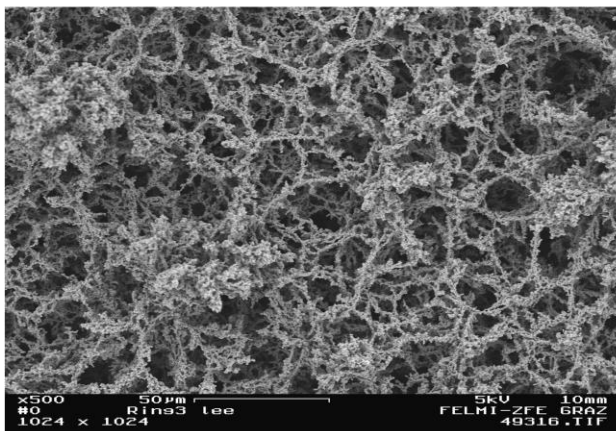


Abbildung 5.21: T1 Lee Oberfläche, 500x.

T2 LEE Oberfläche, 500x

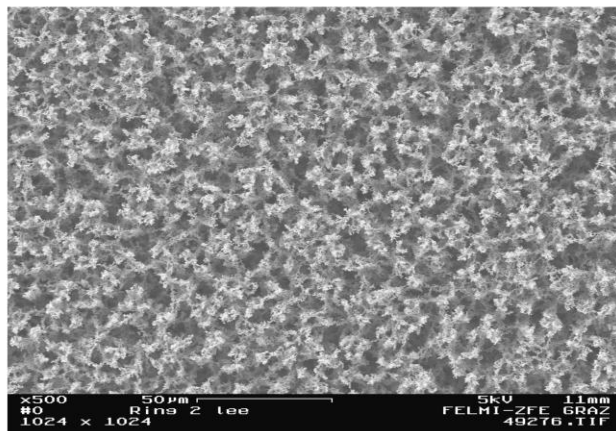


Abbildung 5.22: T2 Lee Oberfläche, 500x.

T1 LEE Oberfläche, 5000x

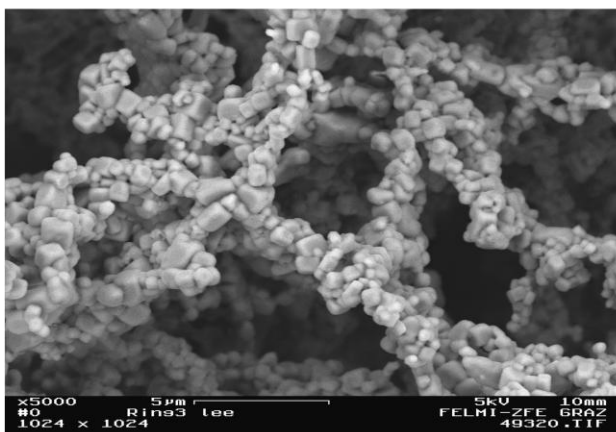


Abbildung 5.23: T1 Lee Oberfläche, 5000x.

T2 LEE Oberfläche, 5000x

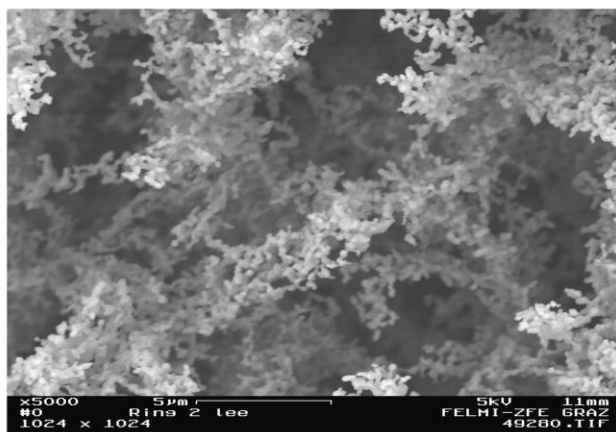


Abbildung 5.24: T2 Lee Oberfläche, 5000x.

T1 LEE Oberfläche, 10000x

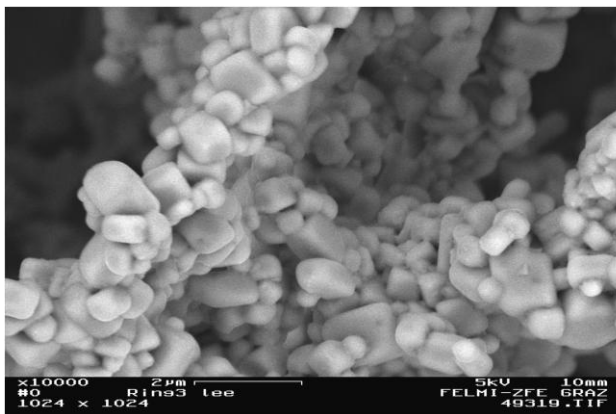


Abbildung 5.25: T1 Lee Oberfläche, 10000x.

T2 LEE Oberfläche, 10000x

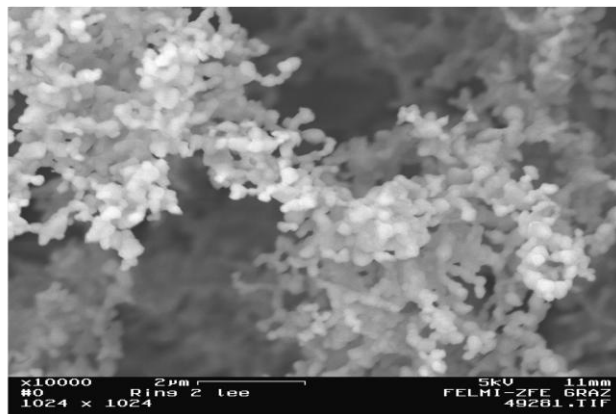


Abbildung 5.26: T2 Lee Oberfläche, 10000x.

Bei der Betrachtung der Oberflächenstruktur der Depositionsschicht auf der rauchgaszugewandten Seite (LUV) wird bei starken Vergrößerungen, wie in der Abbildung 5.19 bzw. 5.20 dargestellt, der Unterschied der Struktur im Detail veranschaulicht. Bei der höheren Sondentemperatur T2 sehen die einzelnen Kristallteilchen, die das Gefüge ausbilden, teilweise angeschmolzen aus. Das könnte durch die zu geringe Unterkühlung an der Depositionsschichtoberfläche kommen.

Wenn man die Abbildungen 5.15 (T1 Luv Oberfläche) und 5.21 (T1 Lee Oberfläche) betrachtet, erkennt man, dass die Kristallstruktur auf der LUV und LEE Seite völlig unterschiedlich aussieht. Die Struktur auf der Lee Seite besteht aus sehr viel kleineren Kristallen als auf der rauchgaszugewandten Seite und die Struktur erscheint viel verflochtener. Eine Erklärung dafür ist, dass auf der Luv Seite die Schichthöhe viel größer ist als auf der Lee Seite und dadurch die Bildung des Gefüges bei anderen Temperaturen geschieht. Wie zuvor erwähnt ist das Gefüge in der Nähe der Sondenoberfläche wegen der stärkeren Unterkühlung einen viel kompakteren Aufbau aufweist als bei höheren Deposchichten. Warum kommt es aber zu einer höheren Depositionsmenge an der rauchgaszugewandten Seite? Erklärungen dafür könnten Turbulenzströmungen auf der Lee Seite sein, welche das Schichtwachstum durch Erosion behindern und sich eben nur die stabile Innenschicht ausbilden kann. Wegen der eher geringen Reynoldszahl ist dies aber eher auszuschließen. Man muss jedoch beachten, dass bei der Umströmung der Sonde die Kaliumchloridmenge im Rauchgas wegen der stattfindenden Kondensation entlang der Sonde abnimmt und dadurch das Partialdruckverhältnis von KCl zwischen Rauchgas und Depositionsschicht auf der Lee Seite geringer ist als auf der Luv Seite, und es somit zu einer Abnahme der Depositionsmenge entlang der Depositionssonde kommt.

Beim Vergleich der vorhandenen Daten mit den Daten aus der Literatur (M. Broström [4]) kann man übereinstimmend behaupten, dass die Struktur der Depositionsschicht bei unterschiedlichen Sondentemperaturen eine unterschiedliche Struktur hat. Jedoch muss man beachten dass M. Broström [4] Versuche mit einer sehr kleinen Reynoldszahl durchführt ($Re=2$) und es somit wesentliche Unterschiede zu den hier durchgeführten Versuchen besteht. Es sind unterschiedliche Depositionsmechanismen für die Depositionsschichtbildung bei unterschiedlichen Temperaturen verantwortlich. Bei Temperaturen um 500 °C deutet das Aussehen des ausgebildeten Gefüges eine Depositionsschichtbildung durch homogene Nukleation und Partikeltransport in der Grenzschicht. Bei höheren Temperaturen hat das Gefüge längere Kristalle, welche wahrscheinlich durch Kühlung durch die Wärmeleitfähigkeit der Sonde gewachsen sind, also durch direkte Kondensation der Dämpfe. Bei höheren Temperaturen haben die Kristalle rundliche Ecken Aufgrund von teilweise einsetzenden Schmelzvorgängen. Bei noch weiter steigenden Temperaturen hat die Struktur durch Sintervorgänge ein geschmolzenes Aussehen.

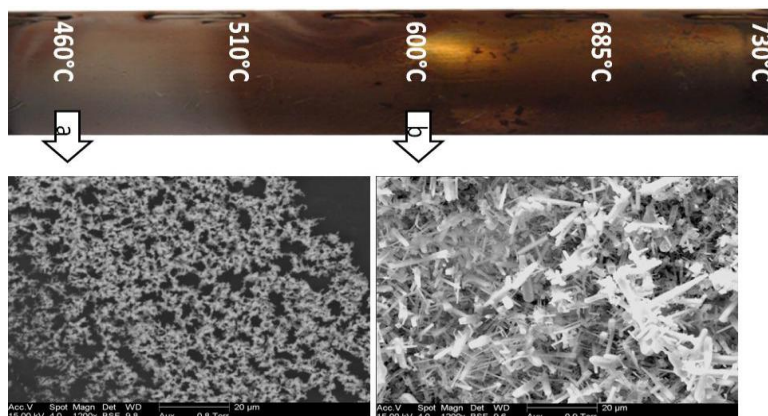


Abbildung 5.27: Depositionsschichten bei unterschiedlichen Temperaturen (Datenquelle [4]).

Im Folgenden werden außerwählte Abbildungen während und nach einem Kondensationsversuch dargestellt:

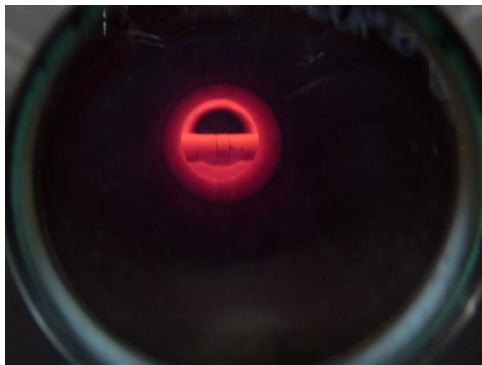


Abbildung 5.28: Depositionsschichtaufbau an der Depositionssonde im Betrieb, Ansicht durch das Schauglas.

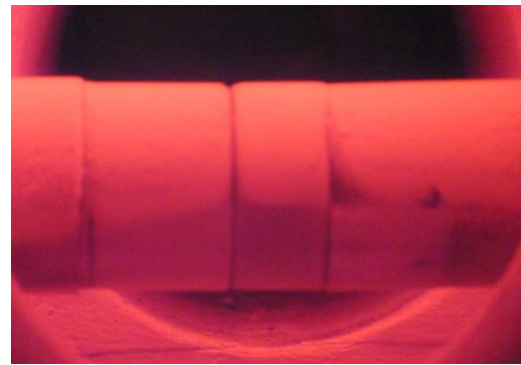


Abbildung 5.29: Depositionsschichtaufbau an der Depositionssonde im Betrieb, Detailansicht durch das Schauglas.

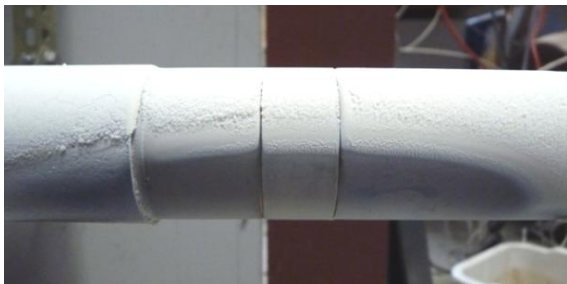


Abbildung 5.30: Depositionssonde mit Depositionsschicht, Seitenansicht.



Abbildung 5.31: Depositionssonde mit Depositionsschicht, Ansicht von oben.



Abbildung 5.32: Depositionsring mit Depositionsschicht, Detailansicht Ring Seitenansicht. Gut erkennbar ist der Übergang von der LUV Seite zur LEE Seite.



Abbildung 5.33: Depositionsring mit Depositionsschicht, Detailansicht LUV Seite.



Abbildung 5.34: Depositionsring mit Depositionsschicht, Detailansicht LEE Seite, 60 min Kondensationsdauer, 3 Schalen (C1).

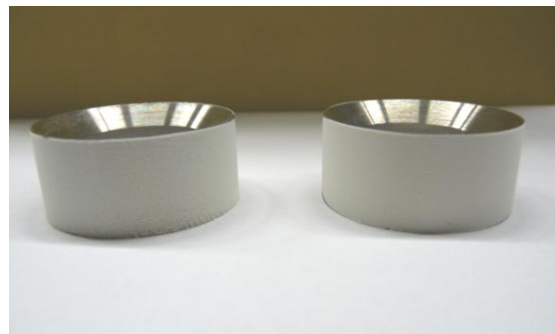


Abbildung 5.35: Ansicht auf Depositionsrings mit Depositionsschicht, LUV-Ansicht des Ringes bei 60 (links) und 120 Minuten (rechts), jeweils 3 Schalen (C1).

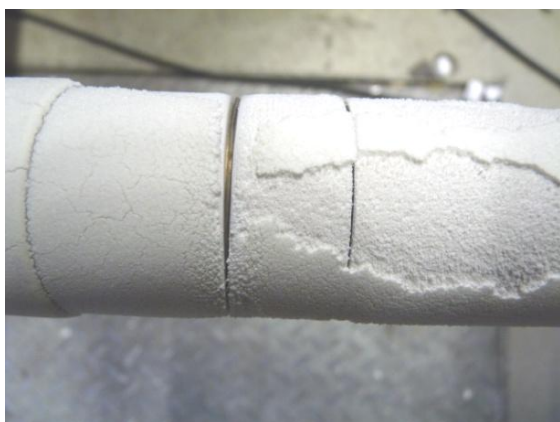


Abbildung 5.36 : Ansicht auf die Depositionssonde mit Depositionsschicht bei T1, Instabile sehr poröse Außenschicht, ca. 1 mm Höhe.



Abbildung 5.37: Detailansicht auf die Depositionsschicht bei der Temperatur T1 am Ring, drei erkennbare Deposchichten Nahaufnahme, mit Millimeterstab.

Bei den Abbildungen, die die Depositionsschicht zeigen, sieht man, dass bei längerer Kondensationsdauer die Schicht sich hauptsächlich auf der rauchgaszugewandten Seite aufbaut. Wie in der Beschreibung der Depositionsschicht bereits erwähnt, ist das der Grund, warum bei der Berechnung der Porosität das Volumen auf der rauchgasabgewandten Seite vernachlässigt werden kann.

6. Ergebnisse aus den CFD - Simulationen

Die Durchführung der CFD Simulation erwies sich als sehr wichtig in Hinsicht auf die Vorhersage des Wärmeübergangs auf der Depositionssonde. Die Ergebnisse der CFD Simulation waren für die Deutung der Ergebnisse der experimentellen Versuche von sehr großer Bedeutung und nicht zuletzt konnte man nur mit der Kombination aus CFD Simulation und experimentelle Versuche auf plausible Ergebnisse kommen.

Im Folgenden werden die Randbedingungen für die Simulation kurz geschildert. Danach werden die Ergebnisse der Simulation dargestellt.

6.1 Randbedingungen der CFD Simulation

Globale Einstellungen	
Solver	Type: Pressure Based Velocity Formulation: Absolute Time: Steady Gravitation: OFF
Mesh:	300 000 Cells
Modelle	
Energy:	ON
Viskosität:	Realizable k-e (2 equations), Wandnähe: Enhanced Wall Treatment
Strahlung:	Discrete Ordinates (DO), no Solar model,
Gaszusammensetzung:	laut Verbrennungsrechnung
Rauchgaseigenschaften:	Cp, λ , Viskosität: polynomische Berechnung für die Einzelkomponenten Dichte: inkompressibles Ideales Gas Wärmekapazität: Mixing Law Wärmeleitfähigkeit: mass weighted mixing law Viskosität: mass weighted mixing law Strahlung: Absorption: wsggm-cell-based
Randbedingungen	
Inlet:	Geschwindigkeit: wahlweise V1 bzw. V2 (2,5 bzw 5 m/s), normal zur Fläche RG-Temperatur: 770°C für V1, bzw. 790°C für V2 Turbulenz spezifikations Methode: Intensität und Hydraulischer Durchmesser Turbulenzintensität: 10% Hydraulischer Durchmesser 1 m Rauchgaszusammensetzung: Laut Verbrennungsrechnung
Deposonde:	Temperatur: laut Versuchsreihe (V1T1, V2T1, V1T1, V2T2) Sondenabmaß: d=0,038m, Rohrdicke: 0,006m, Material: Stahl, k = 16,7 W/mK Emissionskoeffizient: 0,8
Depomantel:	Wärmestrom = 0 W/m ²
Rohre:	Aussentemperatur: 26,8°C Wärmeübergangskoeffizient h=15 W/m ² K Emissionskoeffizient: 0,8 Dicke: 0,003m

Für die verschiedenen Randbedingungen wurden nun folgende Fälle, die bereits aus dem Kapitel experimentelle Ergebnisse bekannt, simuliert:

Bezeichnung	Geschwindigkeit m/s	Rauchgastemperatur °C	Temperatur an der Oberfläche der Sonde (Innen)
			°C
V1T1	2,5	770	280
V1T2	2,5	770	470
V2T1	5	790	290
V2T2	5	790	470

Die Ergebnisse dieser vier Simulationen stellen die Startwerte der experimentellen Versuchsreihen dar, also den Wärmeübergang ohne Kondensationsmasse.

6.2 Ergebnisse der CFD - Simulationen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten CFD Simulationen, mit den in Kapitel 6.1 angeführten Randbedingungen, dargestellt.

Wärmeströme		V1T1	V1T2	V2T1	V2T2
Inlet	[W]	12460	12444	24995	24982
Outlet	[W]	-10835	-11139	-22838	23271
Deponde	[W]	-1078	-683	-1452	-951
Deporing	[W]	-103	-69	-137	-93
Mantel	[W]	0	0	0	0
oberes Rohr 1	[W]	-98	-100	-123	-122
oberes Rohr 2	[W]	-98	-100	-123	-122
Schaurohr 1	[W]	-146	-159	-192	-201
Schaurohr 2	[W]	-146	-159	-192	-201
unteres Rohr 1	[W]	-20	-55	-23	-56
unteres Rohr 2	[W]	-37	-48	-51	-59

Die Beschreibung der einzelnen Bereiche ist dem Kapitel 4 zu entnehmen. Die Wärmeströme sind bei den Depositionssondentemperaturen T1 höher wegen der höheren Temperaturgradienten. Eine Steigerung der Sondentemperatur von 300 auf 500 °C bewirkt eine Verringerung des Wärmestromes um ca. 35 %. Eine Verdoppelung des Rauchgasmassenstromes hat eine Erhöhung des Wärmestromes zufolge, in etwa um 30 %. Die Depositionssonde hat bei den Simulationsergebnissen eine Kühlleistung zwischen 0,7 (V1T2) und 1,5 kW (V2T1). Die Ergebnisse für den Depositionsring sehen dann im Detail folgendermaßen aus:

Daten für den Depositionsring**V1T1**

Wärmestrom	Konvektion	44 [W]
	Strahlung	59 [W]
	Gesamt	103 [W]
Wärmestromdichte	q	47933 [W/m ²]
Gesamter Wärmeübergangskoeffizient	h minimum	115 [W/m ² K]
	h maximum	185 [W/m ² K]
Temperatur Außen Luv Seite	°C	304 [°C]
Temperatur Außen Lee Seite	°C	293 [°C]

V1T2

Wärmestrom	Konvektion	26 [W]
	Strahlung	43 [W]
	Gesamt	69 [W]
Wärmestromdichte	q	32110 [W/m ²]
Gesamter Wärmeübergangskoeffizient	h minimum	40 [W/m ² K]
	h maximum	70 [W/m ² K]
Temperatur Außen Luv Seite	°C	486 [°C]
Temperatur Außen Lee Seite	°C	478 [°C]

Daten für den Depositionsring**V2T1**

Wärmestrom	Konvektion	68 [W]
	Strahlung	69 [W]
	Gesamt	137 [W]
Wärmestromdichte	q	63755 [W/m ²]
Gesamter Wärmeübergangskoeffizient	h minimum	150 [W/m ² K]
	h maximum	230 [W/m ² K]
Temperatur Außen Luv Seite	°C	320 [°C]
Temperatur Außen Lee Seite	°C	306 [°C]

V2T2

Wärmestrom	Konvektion	40 [W]
	Strahlung	53 [W]
	Gesamt	93 [W]
Wärmestromdichte	q_mittel	43279 [W/m ²]
Gesamter Wärmeübergangskoeffizient	h minimum	60 [W/m ² K]
	h maximum	95 [W/m ² K]
Temperatur Außen Luv Seite	°C	490 [°C]
Temperatur Außen Lee Seite	°C	484 [°C]

Nun folgt eine visualisierte Zusammenfassung der Ergebnisse, zuerst den Temperatur und Geschwindigkeitsverlauf für die gesamte Messbox, danach der Wärmeübergang für den Depositionsring.

a.) Temperaturverlauf für die Simulation V1T2:

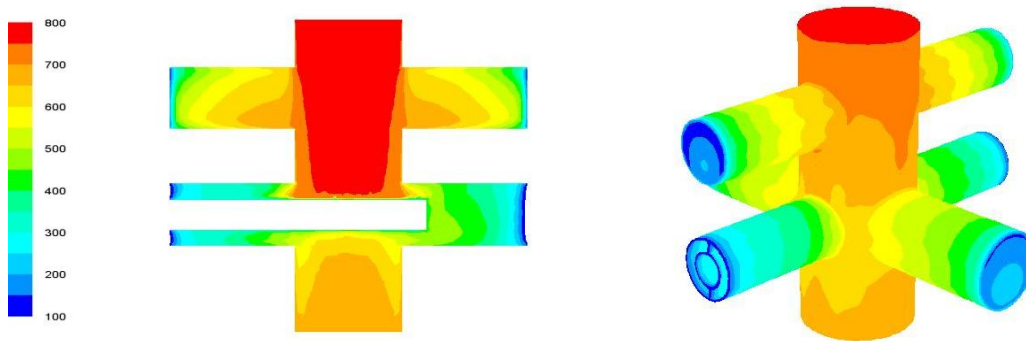


Abbildung 6.1: CFD Simulation: Temperaturverteilung in der Messbox für den Fall: Case 2. Links: Querschnitt. Rechts: Manteloberfläche.

b.) Temperaturverlauf für alle vier Simulationen:

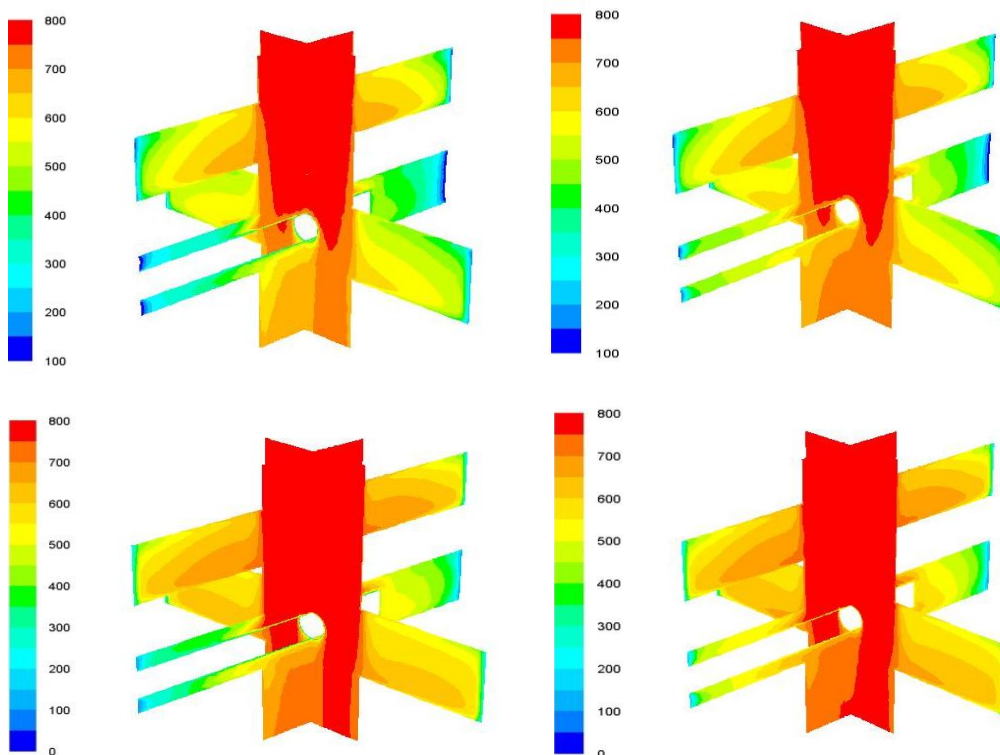


Abbildung 6.2: CFD Simulation: Temperaturverlauf.

V1T1 (oben links), V1T2 (oben rechts), V2T1 (unten links) und V2T2 (unten rechts).

In der Abbildung 6.2 wird veranschaulicht, wie die Temperatur der Depositionssonde das Rauchgas abkühlt. Bei dem Fall V1T1 ist die Abkühlung des Rauchgases am größten. Eine hohe Depositionssondentemperatur und ein hoher Rauchgasmassenstrom bewirken eine geringe Abkühlung.

In der Abbildung 6.3 werden die Geschwindigkeitsfelder für die zwei unterschiedlichen Rauchgasmassenströme abgebildet. Bemerkenswert hier ist die Geschwindigkeit bei der Sonde, welche fast den doppelten Wert der Eintrittsgeschwindigkeit in der Messbox erreicht.

c.) Geschwindigkeitsverlauf V1T1 bzw. V1T2 ($V1=2,5$ m/s) und V2T1 bzw. V2T2 ($V2=5$ m/s):

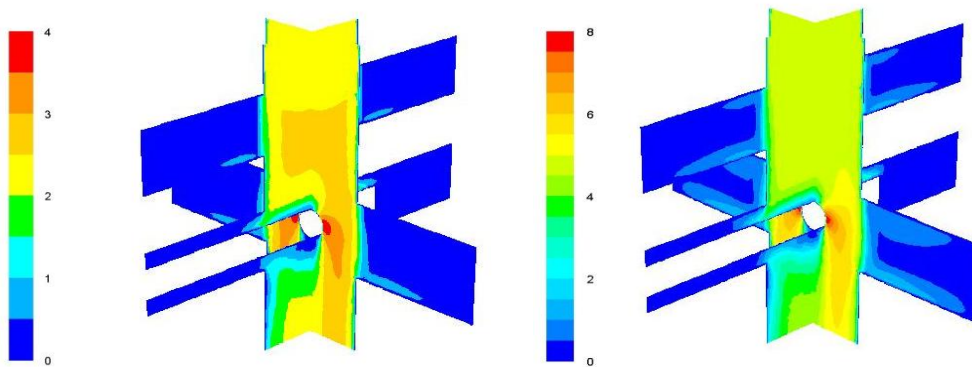


Abbildung 6.3: CFD Simulation: Geschwindigkeitsfeld in der Messbox bei der Rauchgasgeschwindigkeit V1 (links) und V2 (rechts).

d.) Der Wärmeübergang am Depositionsring:

In diesem Abschnitt d.) wird der simulierte Wärmeübergang am Depositionsring veranschaulicht. Zunächst werden die Oberflächentemperaturen dargestellt, danach der gesamte Wärmeübergangskoeffizient (h_{Total}) und schließlich der spezifische Wärmestrom (q).

Die Außentemperatur der Depositionssonde variiert in Abhängigkeit von der Umströmung und Depositionssondeninnentemperatur. Die Außentemperatur des Depositionsrings ist in der CFD Simulation auf der rauchgaszugewandten Seite ca. 10 °C höher als auf der rauchgasabgewandten Seite. Dieses wird in der Abbildung 6.4 veranschaulicht. Die Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen den gesamten Wärmeübergangskoeffizienten und die Wärmestromdichte.

Außentemperaturverteilung am Depositionsring:

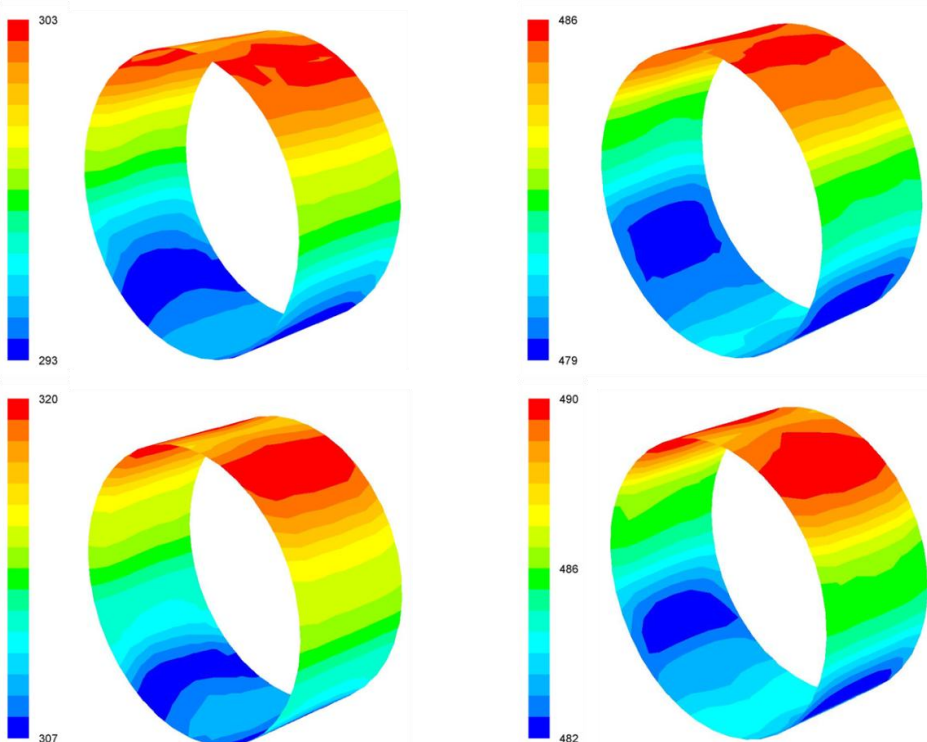


Abbildung 6.4: CFD Simulation: Temperaturverteilung am Depositionsring, V1T1 (oben links), V1T2 (oben rechts), V2T1 (unten links) und V2T2 (unten rechts).

Folgende Abbildung zeigen den Wärmeübergangskoeffizient h_{Total} und die Wärmestromdichte q . Wichtig bei der Betrachtung der Bilder ist dass hier die Werte negative Vorzeichen haben. Das ist wegen der Kühlleistung der Depositionssonde. Es haben somit die Spitzenwerte die blaue Farbkezeichnung, die Minimalwerte die rote. Der gesamte Wärmeübergangskoeffizient h_{Total} [W/m²K] am Depositionsring:

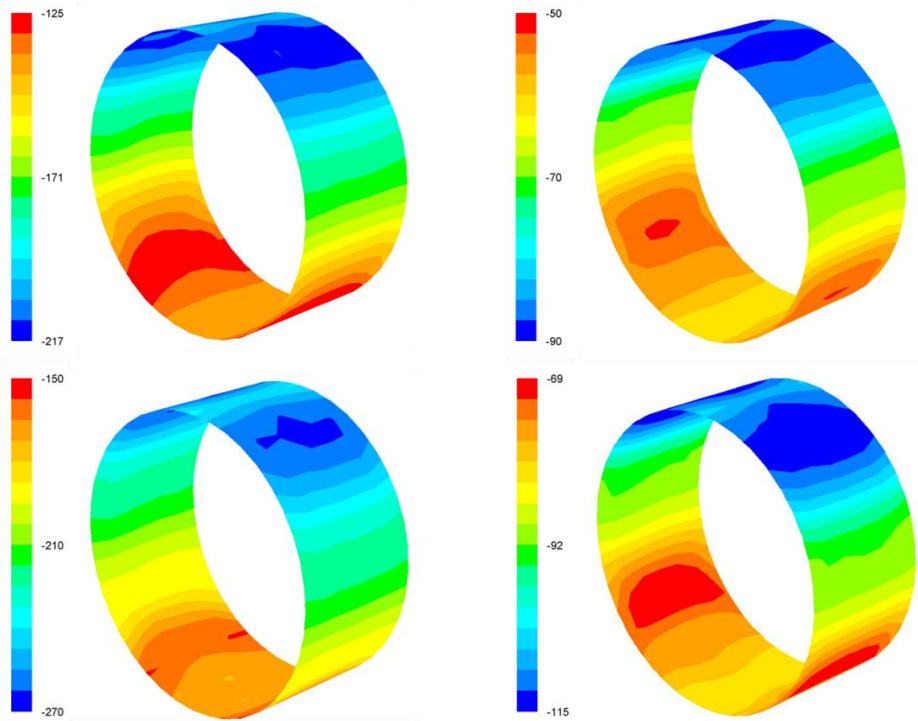


Abbildung 6.5: CFD Simulation, gesamter Wärmeübergangskoeffizient h am Depositionsring, V1T1 (oben links), V1T2 (oben rechts), V2T1 (unten links) und V2T2 (unten rechts).

Die Wärmestromdichte q am Depositionsring:

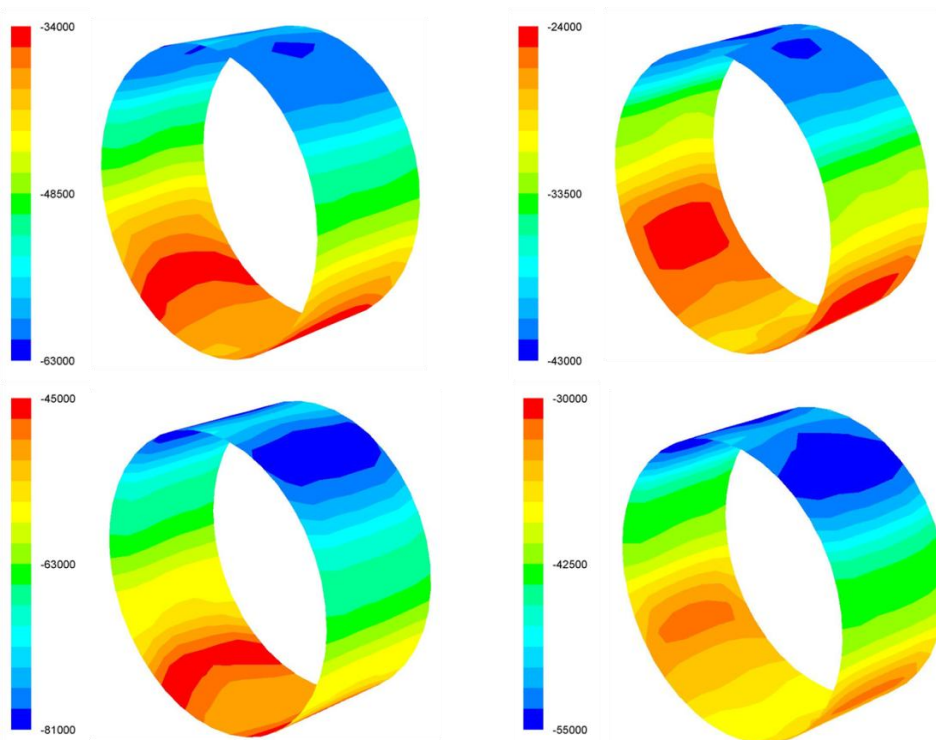


Abbildung 6.6: CFD Simulation, Wärmestromdichte q [W/m²] am Depositionsring, V1T1 (oben links), V1T2 (oben rechts), V2T1 (unten links) und V2T2 (unten rechts).

7. Abschätzung des Wärme- und Stofftransportes auf Basis der bekannten Modelle

In diesem Kapitel wird erläutert, welche mathematische Modelle es gibt um den Wärme- und Stofftransport zu berechnen. Den Wärmetransport kann man, wie im Kapitel 2 beschrieben, berechnen. Man kann auch die Ergebnisse der CFD Simulation heranziehen. Weiters wurde der Wärmetransport bei den experimentellen Versuchen mit der Depositionssonde ermittelt. In diesem Kapitel werden diese drei Quellen miteinander verglichen.

7.1 Berechnung des Wärmeübergangs an der Depositionssonde ohne Kondensationsschicht.

Der Wärmeübergang an umströmten Rohren ist bereits im Kapitel 2 erläutert worden. Wenn man die Daten für den konvektiven Wärmeübergang aus der Berechnung (nach Kapitel 2, Gleichung 11 mit den Parameter aus der Tabelle 2.2) heranzieht und sie mit den Ergebnissen der CFD Simulation vergleicht, stellt sich heraus dass der Wärmeübergang bei der Simulation stets etwas höhere Werte aufweist. Dies lässt sich auf die, durch den Strömungswiderstand bewirkten, höheren Geschwindigkeiten im Bereich der Sonde zurückführen (siehe Strömungsprofil der Rauchgasgeschwindigkeiten: Abbildung: 6.3).

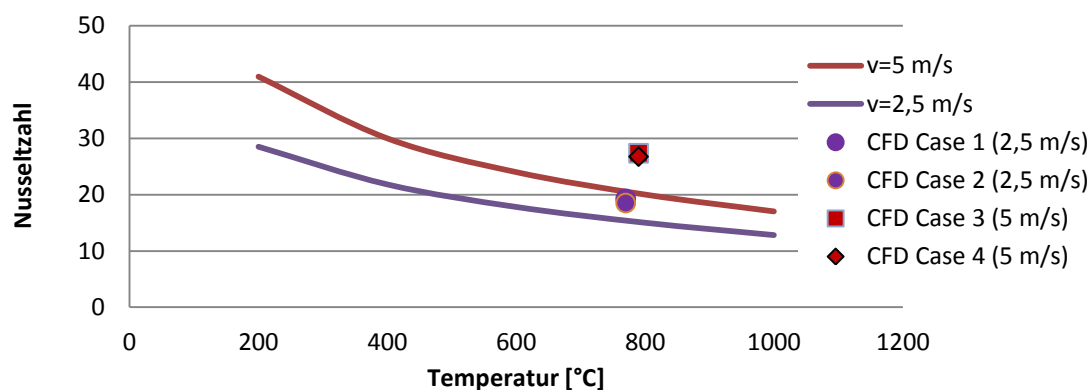


Diagramm 7.1: Nusseltzahlvergleich: Berechnung und CFD Simulation.

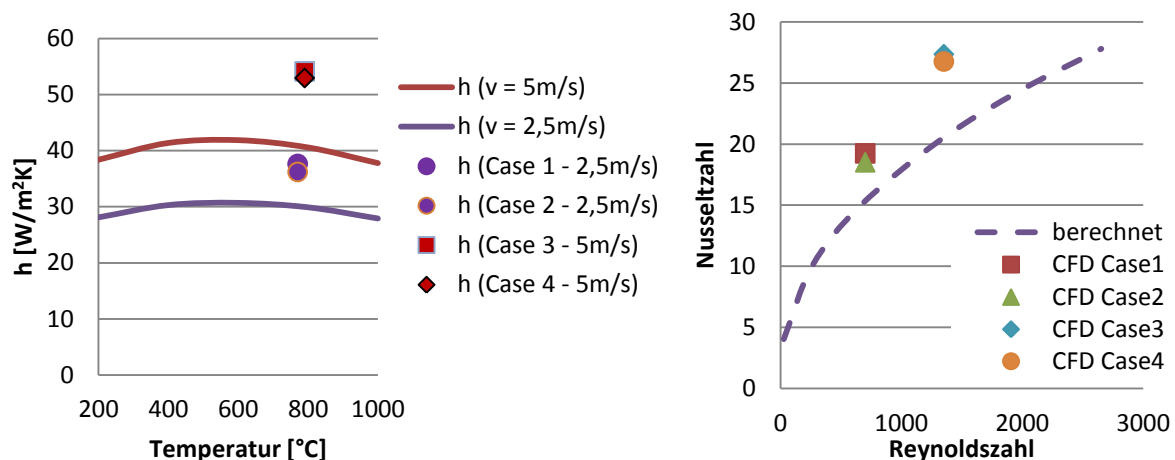


Diagramm 7.2: Links: Vergleich des Wärmeübergangskoeffizienten: Berechnete Werte und CFD Simulation. Rechts: Reynolds-Nusselt Diagramm: berechnete Werte und CFD Ergebnisse.

Das Diagramm 7.3 zeigt den Vergleich der berechneten und simulierten Ergebnisse für den konvektiven Wärmeübergang. Wie bereits in den Diagrammen 7.1 und 7.2 gezeigt, ist auch hier der konvektive Wärmestrom am Depositionsring stets etwas höher als bei der Berechnung. Ein Grund dafür ist der Strömungswiderstand der Sonde, welcher zu höheren Geschwindigkeiten in der Nähe der Sonde führt (siehe Diagramm 6.3).

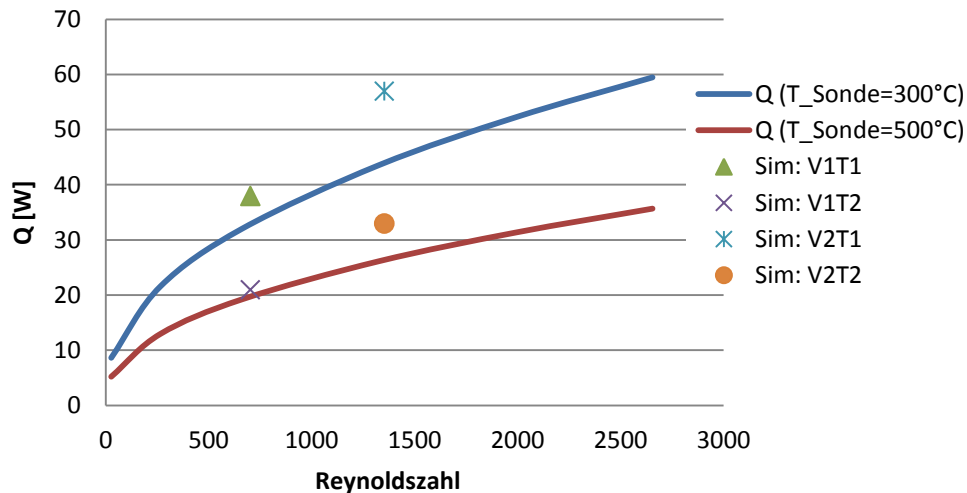


Diagramm 7.3: Konvektiver Wärmestrom Q in Watt durch den Depositionsring an der Depositionssonde ohne Depositionsschicht bei zwei verschiedenen Sondentemperaturen und Reynoldszahlen im Vergleich zu den Simulationsergebnissen.

Der Fehler des konvektiven Wärmestroms beträgt, im Vergleich zur CFD Simulation, bei kleiner Rauchgasgeschwindigkeit V1 etwa 10 %, bei der höheren Geschwindigkeit V2 ca. 20%.

Neben dem konvektiven Wärmeübergang ist der Wärmetransport durch Strahlung ein wichtiger Energietransportmechanismus. Die Berechnung der Strahlungsenergie wurde im Kapitel 2 erklärt, jedoch ist die Anwendung der Theorie in der Praxis sehr schwierig. Die Umgebungstemperatur ändert sich während der Umströmung der Sonde und darf nicht konstant angenommen werden kann. Wenn man die Berechnung mit einer Umgebungstemperatur entsprechend den Versuchen von 770 °C bzw. 790 °C bei der Rauchgasgeschwindigkeit V1 bzw. V2 einsetzt und die Werte mit den Werten aus der Simulation vergleicht, dann sieht das wie in folgender Tabelle dargestellt aus.

Versuch [Index]	RG_Temp [°C]	Depo_Temp [°C]	ϵ	Q Strahlung berechnet [W]	Q Strahlung (CFD) [W]
V1T1	770	303	0,8	105	59
V1T2	770	486	0,8	83	43
V2T1	790	320	0,8	112	69
V2T2	790	490	0,8	91	53

Die großen Unterschiede zwischen den Ergebnissen kommen durch die zu hoch angenommene Umgebungstemperatur. Die Umgebungstemperatur wird wegen Wärmeverlusten durch die Wände und der Kühlleistung der Sonde nicht die Temperatur des Rauchgases annehmen. Ein Abschlag der Umgebungstemperatur um 100 °C bringt mit der CFD Simulation annähernd übereinstimmende Werte. Wenn man die Ergebnisse der CFD Simulation im Kapitel 6 betrachtet wird sichtbar, dass die Temperaturen der Flächen in der Messbox geringer sind als die Rauchgastemperatur beim Eintritt in der Messbox. Somit ist der Abschlag verständlich.

Versuch [Index]	RG_Temp [°C]	Depo_Temp [°C]	ϵ	Q Strahlung [W]	Q Strahlung (CFD) [W]
V1T1	670	303	0,8	66	59
V1T2	670	486	0,8	45	43
V2T1	690	320	0,8	72	69
V2T2	690	490	0,8	51	53

Das Diagramm 7.4 zeigt den Vergleich des gesamten Wärmeübergangs, also konvektiver Wärmetransport mit Strahlungsanteil ($\epsilon=0,8$, $T_\infty=670$ °C bzw. 690 °C), ohne Kondensationsschicht. Für die Berechnung des Strahlungstransports wurde die Umgebungstemperatur vereinfacht konstant angenommen, wie die vorangehende Berechnung zeigt. Das Diagramm zeigt die Daten aus den experimentellen Versuchen, aus der Berechnung und Daten aus der CFD Simulation.

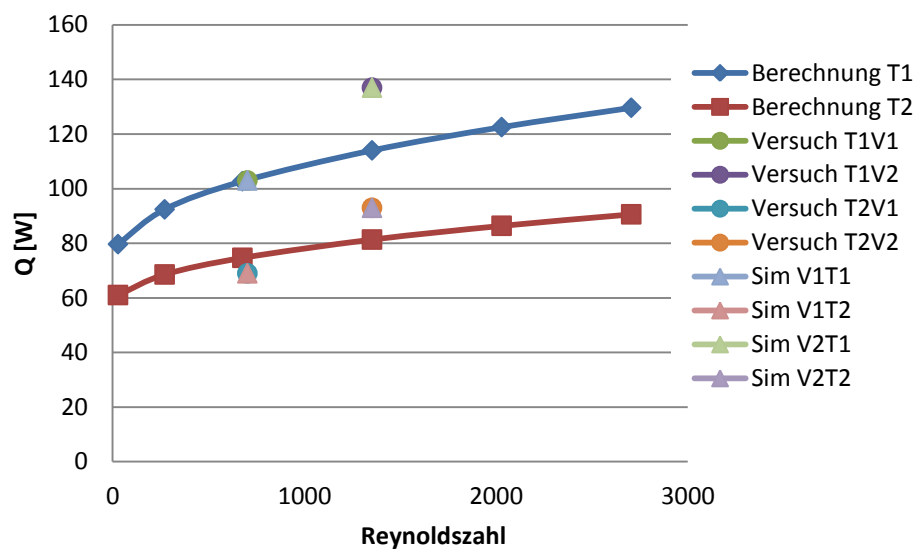


Diagramm 7.4: Vergleich der Ergebnisse für die Wärmeströme am Depositionsring ohne Kondensationsschicht. Darstellung der Ergebnisse aus der Berechnung, Simulation und den Versuchsreihen.

Der in der Abbildung 7.4 dargestellte Vergleich der Wärmeströme ohne Kondensationsschicht zeigt eine gute Übereinstimmung. Die größte Differenz zwischen Berechnung und CFD-Simulation zeigt sich beim Versuch V2T1, der Fehler liegt bei ca. 20 %. Bei steigender Reynoldszahl nimmt die Differenz der Wärmeströme zu, wenn man die Berechnung und die CFD Ergebnisse betrachtet. Dies liegt an den bereits erwähnten konvektiven Fehler durch den Strömungswiderstand der Depositionssonde. Aus diesem Grund wurden für die Berechnung des konvektiven Wärmestromes alternative Modelle für die Nusseltzahl (Whitaker, etc.) untersucht. Eine Verbesserung in Hinsicht auf dem konvektiven Wärmeübergang bringen nur Ansätze für Rohrbündelströmungen. Wegen der Veränderung des Strömungsquerschnitts durch die Rohrbündel wird die Anströmgeschwindigkeit erhöht. Dadurch erhöht sich die Nusseltzahl und es kommt zu einer Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs. Da es sich hier um keine Rohrbündel handelt, wurde dieser Ansatz auch nicht näher untersucht.

7.2 Berechnung des Wärmeübergangs an der Depositionssonde mit Kondensationsschicht

Für die Berechnung des Wärmeübergangs mit Kondensationsschicht wurde zunächst die Depositionsmenge mittels Ähnlichkeitsansatz ermittelt (Erläuterung im Kapitel 2). Für die Berechnung der Kondensationsmasse wurden die in der Tabelle 7.5 abgebildeten Parameter verwendet.

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Wert
Rauchgasmassenstrom	m_{RG}	kg/h	45 bzw. 90
Rauchgasgeschwindigkeit bei Sonde	$V1$ bzw. $V2$	m/s	2,5 bzw. 5
Dichte des Salzes	ρ_{KCl}	kg/m ³	1980
Porosität	q	-	0,97
Emissionskoeffizient Deposchicht	ϵ		0,5 – 0,7
Wärmeübergangskoeffizient	h	W/m ²	32 bzw. 44
Koeffizient	m		0,33
Lewis Zahl	Le		1 bzw. 3
Temperatur Sonde	$T1$ bzw. $T2$	°C	300 bzw. 500

Tabelle 7.5: Parametertabelle für den Ähnlichkeitsansatz.

Der Ähnlichkeitsansatz für die Berechnung der Kondensationsmasse mittels Lewis Zahl rechnet mit einem festen Vorgabewert für die Wandkonzentration c_w (hier **Methode 1** genannt), welche aus der Oberflächentemperatur der Sonde resultiert. Diese Temperatur ändert sich jedoch stetig durch die bereits vorhandene Kondensationsschicht. Um eine höhere Berechnungsgenauigkeit zu realisieren wurde die Kondensationsmasse in einer zusätzlichen Berechnungsmethode iterativ, d.h. in diesem Fall minutenweise, kalkuliert (**Methode 2**). Dies ist besonders wichtig bei hoher Depositionsschicht, da dann stark ändernde Oberflächentemperaturen auftreten. Der Partialdruck von KCl hängt, wie bereits erwähnt, sehr stark von der Temperatur ab und sollte nicht konstant angenommen werden, da dieser sonst zu höheren Depositionsmengen führt. Es wurde also für jede Minute eine eigene Wandtemperatur berechnet aus der sich wieder der jeweilige Sättigungsdruck ergab und damit ein neue Wandkonzentration. Für die Berechnung der Wandtemperatur wurden für die Depositionsschicht die Parameter aus der Tabelle 7.5 verwendet.

Bei der Betrachtung der Abbildung 7.6 kann man feststellen, dass die Berechnung der Kondensationsmasse auf den unterschiedlichen Arten zunächst gleiche Werte liefert. Danach sinkt jedoch die Kondensationsmasse mit der iterativen Berechnungsweise ab wegen des steigenden Partialdruckes von KCl an der Depositionsschichtoberfläche. Die berechnete Kondensationsmasse mit dem Ähnlichkeitsansatz, welcher fixe Vorgabewerte benutzt, haben einen, im Vergleich zu den experimentellen Daten, höheren Kondensatmassenstrom. Das ist ganz besonders bei der zweiten Versuchsreihe der Fall, wo die Oberflächentemperatur der Depositionsschicht sehr hoch ist (siehe Tabelle 7.8). Eine Erhöhung der Lewis-Zahl von 1 (Wert für ideale Gase) auf 3 bringt eine bessere Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen. Die Struktur der Depositionsschicht würde für eine Erhöhung der Lewiszahl, also geringerem Stoffübergangskoeffizienten β , sprechen, denn die hohe Porosität bewirkt eine Erhöhung der Erosionsvorgänge und somit zu geringerer Depositionsmasse.

Als nächstes wurde eine weitere Berechnungsmethode des Ähnlichkeitsansatzes durchgeführt. Die Temperatur der Depositionssonde wurde nicht konstant angenommen, sondern an den Werten, die die experimentellen Versuche ergeben haben, angepaßt (**Methode 3**). Der Wärmestrom am Depositionsring aus den Versuchen wurde für die Berechnung des Kondensationsmassenstroms benutzt. Diese Berechnungsmethode zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zu den experimentellen Ergebnissen.

Die Abbildung 7.6 verdeutlicht die gerade beschriebenen Effekte Anhand der Versuchsdaten mit der Rauchgasgeschwindigkeit V_2 mit unterschiedlicher Versuchsdauer. Die nachfolgenden Tabellen 7.7 und 7.8 zeigen den Vergleich zwischen Kondensatberechnung und experimentelle Versuche beider Versuchsreihen.

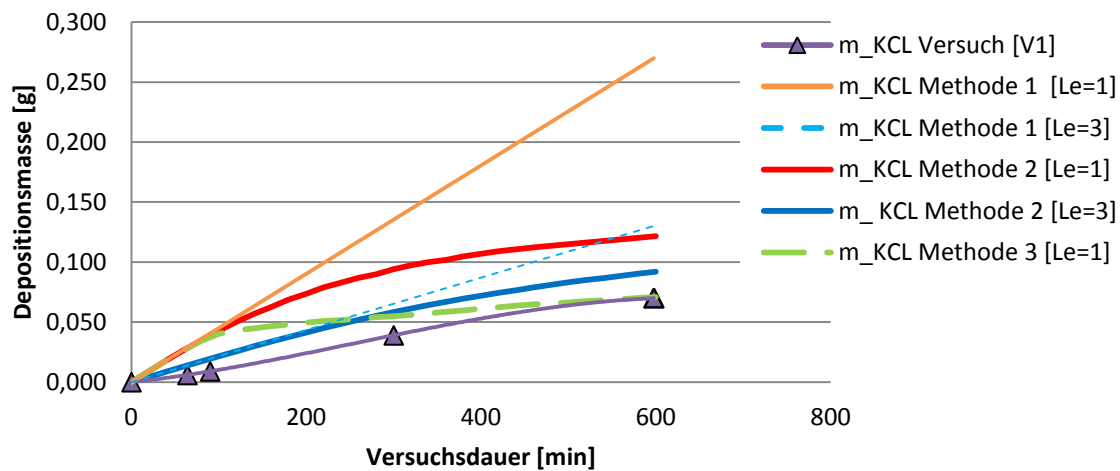


Abbildung 7.6: Berechnung der Depositionsmasse mit Hilfe des Ähnlichkeitsansatzes. Vergleich von iterativer (minutenweise) Kondensationsmassenberechnung (Methode 2: Rote Linie bzw. Blaue Linie für unterschiedliche Lewis Zahlen) und Berechnung mit fixen Vorgabewerten für die Wandkonzentration (Methode 1: Orange bzw. Türkise strichlierte Linie). Vergleich mit den Daten aus dem experimentellen Versuchen für die Versuche mit der Rauchgasgeschwindigkeit $V_2 = 5$ [m/s] (Lila Linie mit dreieckiger Markierung).

Bezeichnung	Einheit	V1C1T1	V1C2T1	V2C1T1	V2C2T1
Experimentelle Versuchsergebnisse					
Versuchsdauer	min	300	300	300	300
Temperatur Messbox	°C	770	770	790	790
Salzfreisetzung	g/min	0,09	0,16	0,09	0,18
Kondensationsmasse	g/Versuch	0,044	0,076	0,040	0,075
KCL im Rauchgas	mg/Nm ³	149	258	76	148
Berechnung mit Ähnlichkeitsansatz					
Methode 1					
m_{cond} c_w fix (Le=1)	g/Versuch	0,121	0,211	0,085	0,165
m_{cond} c_w fix (Le=3)	g/Versuch	0,058	0,101	0,041	0,079
Methode 2					
m_{cond} c_w iterativ (Le=1)	g/Versuch	0,121	0,212	0,084	0,152
m_{cond} c_w iterativ (Le=3)	g/Versuch	0,060	0,105	0,042	0,081
Methode 3					
m_{cond} c_w aus experimentelle Daten (Le=1)	g/Versuch	0,098	0,134	0,06	0,077

Tabelle 7.7: Ergebnisse der Kondensatberechnung mit Ähnlichkeitsansatz. Vergleich Berechnung und experimentelle Versuche (Versuchsreihe 1).

Bezeichnung	Einheit	V1C1T2	V1C2T2	V2C2T2
Experimentelle Versuchsergebnisse				
Versuchsdauer	min	300	600	300
Temperatur Messbox	°C	770	770	790
Salzfreisetzung	g/min	0,05	0,10	0,10
Kondensationsmasse	g/Versuch	0,025	0,07	0,039
KCL im Rauchgas	mg/Nm ³	88	166	84
Berechnung mit Ähnlichkeitsansatz				
Methode 1				
m _{cond} C _w fix (Le=1)	g/Versuch	0,071	0,27	0,093
m _{cond} C _w fix (Le=3)	g/Versuch	0,034	0,13	0,045
Methode 2				
m _{cond} C _w iterativ (Le=1)	g/Versuch	0,058	0,122	0,058
m _{cond} C _w iterativ (Le=3)	g/Versuch	0,033	0,092	0,039
Methode 3				
m _{cond} C _w aus experimentelle Daten (Le=1)	g/Versuch	0,044	0,071	0,041

Tabelle 7.8: Ergebnisse der Kondensatberechnung mit Ähnlichkeitsansatz. Vergleich Berechnung und experimentelle Versuche (Versuchsreihe 2).

Mit den berechneten Kondensationsmassen kann der Wärmeübergang am Depositionsring dargestellt werden. Folgende Abbildung zeigt einen Vergleich zwischen Berechnung und experimentelle Versuch in Hinblick auf den Wärmestrom am Ring und Depositionsmasse Anhand des Versuchs V1C2T2.

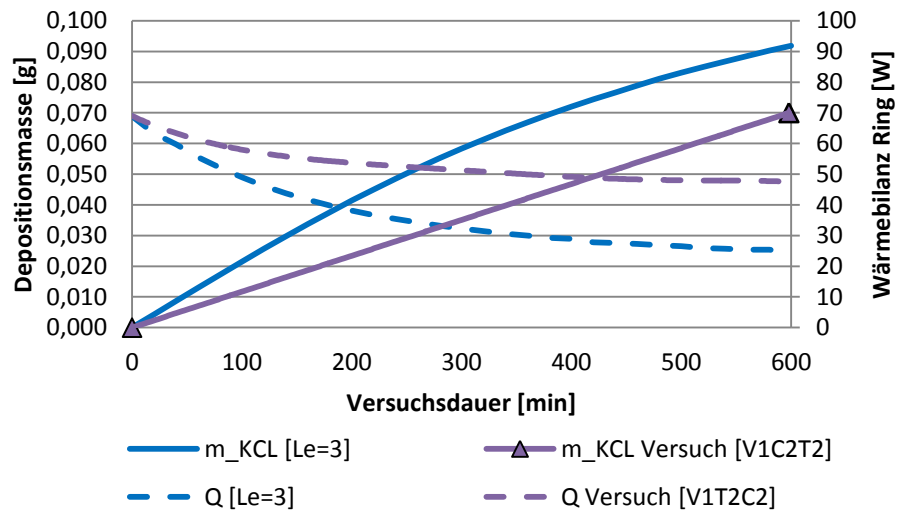


Abbildung 7.9: Berechneter Wärmeübergang mit Kondensationsschicht (Berechnung Depositionsmasse mit Methode 2, $Le=3$) für den Versuch V1C2T2 und Vergleich mit den experimentellen Daten. Strichlierte Linien sind die Wärmeströme (Sekundärachse), durchgehende Linien entsprechen der Depositionsmasse (primärachse).

Der Unterschied beim Wärmestrom kommt einerseits durch die unterschiedliche Depositionsmasse und andererseits dadurch, dass bei der Berechnung der Kondensationsmasse mit der Methode 2 die Sondentemperatur einen konstanten Wert hat (500 °C) und bei den experimentellen Versuchen die Sondentemperatur abnimmt (Startwert: 500 °C, Schlußwert: ca. 400 °C). Dadurch ist der Vergleich der Wärmeströme eher schwierig.

8. Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Um auf die Fragestellung antworten zu können, ob die in der Literatur vorhandenen mathematischen Modelle in der Lage sind, die Kondensatmasse für Kaliumchlorid berechnen zu können, wurde basierend auf den Ähnlichkeitsansatz mit den Versuchsparameter aus den experimentellen Versuchen (Versuchsreihe Teil 1 und Teil 2) die Kondensation nachgerechnet. Die Ergebnisse sind im Diagramm 8.1 für die Versuchsreihe Teil 1 und 8.2 für die Versuchsreihe Teil 2 dargestellt.

In der Tabelle 8.1 werden die Werte aus der experimentellen Versuchsreihe Teil 1 mit den Daten der Berechnung mittels Ähnlichkeitsansatz miteinander verglichen. Für die Berechnung wurden die mathematischen Modelle nach Kapitel 2.2.3 verwendet und mit den 3 unterschiedlichen Methoden, wie in Kapitel 7 beschrieben, realisiert. Die Parameter für die Berechnung sind der Tabelle 7.5 zu entnehmen.

Bezeichnung	Einheit	V1C1T1	V1C2T1	V2C1T1	V2C2T1
Experimentelle Versuchsergebnisse					
Temperatur Messbox	°C	770	770	790	790
Salzfreisetzung	g/Versuch	26,8	46,5	27,4	53,2
	g/min	0,09	0,16	0,09	0,18
Kondensationsmasse	g/Versuch	0,044	0,076	0,040	0,075
	mg/min	0,15	0,25	0,13	0,25
KCL im Rauchgas	mg/Nm ³	149	258	76	148
Höhe der Schicht (abgeschätzt)	mm	0,75	1,20	0,75	1,20
Porosität der Schicht		0,973	0,971	0,975	0,972
Q Verlust	W	27	35	24	28
Berechnung mit Ähnlichkeitsansatz					
Methode 1					
m _{cond} C _w fix (Le=1)	g/Versuch	0,121	0,211	0,085	0,165
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	2,01	3,15	1,54	2,59
m _{cond} C _w fix (Le=3)	g/Versuch	0,058	0,101	0,041	0,079
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	0,990	1,58	0,75	1,29
Methode 2					
m _{cond} C _w iterativ (Le=1)	g/Versuch	0,121	0,212	0,084	0,152
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	2,00	3,17	1,51	2,40
T_Depositionsschicht	°C	633	673	628	671
Q Verlust	%	56	67	44	63
m _{cond} C _w iterativ (Le=3)	g/Versuch	0,060	0,105	0,042	0,081
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	1,01	1,62	0,77	1,31
T_Depositionsschicht	°C	539	601	519	603
Q Verlust	%	37	49	26	46
Methode 3					
m _{cond} C _w aus experimentelle Daten (Le=1)	g/Versuch	0,098	0,134	0,06	0,077
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	1,63	2,06	1,09	1,26
T_Depositionsschicht	°C	689	711	667	659
Q Verlust	%	27	35	24	28

Tabelle 8.1: Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen Teil 1 und die dazugehörige Kondensationsmassenberechnung.

Bezeichnung	Einheit	V1C1T1	V1C2T1	V2C1T1
Experimentelle Versuchsergebnisse				
Temperatur Messbox	°C	770	770	790
Salzfreisetzung	g/Versuch	15,8	59,7	30,1
	g/min	0,05	0,10	0,10
Kondensationsmasse	g/Versuch	0,025	0,07	0,039
	mg/min	0,08	0,12	0,13
KCL im Rauchgas	mg/Nm ³	88	166	84
Höhe der Schicht (abgeschätzt)	mm	0,50	1,50	0,75
Porosität der Schicht		0,977	0,979	0,976
Q Verlust	W	9	32	20
Berechnung mit Ähnlichkeitsansatz				
Methode 1				
m_{cond} C_w fix (Le=1)	g/Versuch	0,071	0,27	0,093
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	1,40	5,3	1,74
m_{cond} C_w fix (Le=3)	g/Versuch	0,034	0,13	0,045
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	0,69	2,71	0,86
Methode 2				
m_{cond} C_w iterativ (Le=1)	g/Versuch	0,058	0,122	0,058
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	1,16	2,55	1,10
T_{Depositionsschicht}	°C	663	708	678
Q Verlust	%	50	71	51
m_{cond} C_w iterativ (Le=3)	g/Versuch	0,033	0,092	0,039
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	0,66	1,96	0,76
T_{Depositionsschicht}	°C	621	700	649
Q Verlust	%	35	64	41
Methode 3				
m_{cond} C_w aus experimentelle Daten (Le=1)	g/Versuch	0,044	0,071	0,041
Depositionsschichthöhe	mm/Versuch	0,88	1,53	0,79
T_{Depositionsschicht}	°C	680	710	676
Q Verlust	%	9	32	20

Tabelle 8.2: Ergebnisse aus der experimentellen Versuchsreihe Teil 2 und die dazugehörige Kondensationsmassenberechnung.

Bei der Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse fällt in erster Linie auf, dass die Werte aus der Nachrechnung mit der Lewis Zahl $Le=1$ hinsichtlich des Kondensationsmassenflusses höher sind, als sie es bei den Versuchen tatsächlich waren. Einzig die Methode 3 mit dem an der Versuchsdaten angepassten Wandpartialdrucks von Kaliumchlorid erreicht man eine gute Übereinstimmung zu den Versuchsdaten bei einer Lewiszahl von 1. Bei den Methoden 1 und 2 bekommt man gute Werte nur wenn man die Lewis Zahl erhöht, also das Verhältnis von konvektivem Wärmeübergang zu Stoffübergang erhöht (siehe Tabelle 8.1 und 8.2). Ein Grund für die höher ausgefallenen Werte des Lewis Kondensationsansatzes könnte die hohe Porosität der Schicht sein, die zu einem hohen Temperaturgradient innerhalb der Schicht führt. Somit sinkt die Konzentrationsdifferenz von Kaliumchlorid im Rauchgas zur Depositionssonde mit wachsender Depositionsschicht, wie im Kapitel 2.2.3 bereits erwähnt. Ein anderer Grund sind durch die hohe Porosität hervorgerufenen kontinuierlichen

Erosionsvorgänge in der Depositionsschicht, welche zu einer Verringerung der Depositionsmasse führen.

Die Porosität der Schicht ist bei den Versuchen tatsächlich sehr hoch ausgefallen. Bei der Berechnung der Porosität wurde nur der Schichtaufbau auf der Depositionssondenoberseite betrachtet und die geringe Menge auf der rauchgasabgewandten Seite vernachlässigt. Aus der Depositionsmasse und der Höhenabschätzung kamen bei den Versuchen durchgehend Werte für die Porosität von ca. 0,97-0,98 heraus (nähere Informationen zur Depositionsschicht sind im Kapitel 5.4 erläutert). Die damit verbunden Schichttemperaturen lassen sich mit den unterschiedlichen Wärmeleitungsmodellen für poröse Schichten berechnen, wie im Kapitel 2 beschrieben. Bei der aktuellen Auswertung wurde das „obere Band“ Wärmeleitmodell für die Temperaturberechnung der Depositionsschicht verwendet, diese sind ebenfalls in der Tabelle 8.1 und 8.2 erkenntlich. Die Depositionsschichttemperaturen sind für die erste Versuchsreihe in dem Diagramm 8.5 dargestellt, zusammen mit den Temperaturen durch die Sonde.

Eine Kernfrage der Diplomarbeit ist, ob die Wärmeleitmodelle für poröse Depositionsschichten in der Lage sind, die Wärmeleitfähigkeit einer Kaliumchlorid Depositionsschicht gut abzubilden. Die hohe Porosität lässt vermuten, dass es auf das Wärmeleitfähigkeitsmodell nicht ankommt und eine Berechnung mit der Wärmeleitfähigkeit des Rauchgases gute Ergebnisse bringen würde. Diese Vermutung wurde nicht bestätigt. Trotz der hohen Porosität ist der Wärmeleitkoeffizient der Depositionsschicht um einiges höher als der des Rauchgases und einige der vorliegenden Modelle, die bei hohen Porositäten ähnliche Werte aufweisen. Das „obere Band“ und das „Russel“ Wärmeleitmodell für poröse Schichten kommen der Wärmeleitfähigkeit von KCl mit der Porosität im Bereich von $p=0,97$ am nächsten.

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit der Depositionsschicht beider Versuchsreihen zusammengefasst. Danach zeigt ein Diagramm den Vergleich der Werte mit den vorhandenen Modellen.

Versuch [Index]	Q [W]	h [W/m ² K]	T_RG [°C]	S_Depo [mm]	T_Schicht [°C]	k [W/mK]
V1T1C1	73,8	42	770	0,75	518	0,091
V1T1C2	70,2	42	770	1,2	541	0,120
V2T1C1	103,1	63	790	0,75	484	0,154
V2T1C2	95,2	63	790	1,2	523	0,175
V1T2C1	64,4	40	770	0,5	551	0,168
V1T2C2	47,9	40	770	1,5	627	0,153
V2T2C2	76,5	58	790	0,75	573	0,212

Tabelle 8.3: Zusammenfassung der Ergebnisse beider Versuchsreihen für die Berechnung des Wärmeleitkoeffizienten k. Q Leitung: Wärmestrom; h: Wärmeübergangskoeffizient (CFD Daten); T_RG: Temperatur Rauchgas; S_Depo: Depositionsschichtdicke; T_Schicht: Temperatur der Außenschicht (Depositionsschicht); k: Wärmeleitkoeffizient Depositionsschicht. Emissionskoeffizient $\epsilon=0,5$ (aus Abbildung 2,21 und Information der Depositionsschichtstruktur).

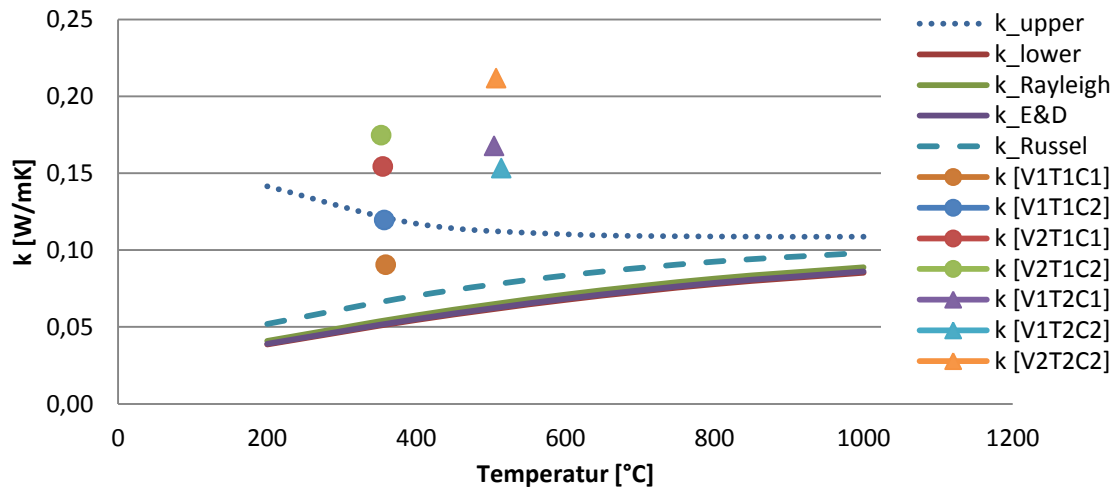


Diagramm 8.4: Wärmeleitfähigkeit für KCl bei einer Porosität von $p=0,97$, Emissionskoeffizienten der Deposchicht $\varepsilon=0,5$.

Der Wärmeleitkoeffizient der Depositionsschicht zeigt im Allgemeinen Werte zwischen $k=0,08-0,22$ [W/mK], also eine große Bandbreite. Aus den Versuchen kann man behaupten, dass der Wärmeleitkoeffizient der zweiten Versuchsreihe etwas höhere Werte hat. Jedoch muss man bei der Darstellung der Ergebnisse beachten, dass der Emissionskoeffizient der Depositionsschicht zwangsläufig mit der Wärmeleitfähigkeit verbunden ist. Der Emissionsfaktor ε ist für Depositionsschichten unter anderem abhängig von der Partikelgröße und der Temperatur der Depositionsschicht, wie bereits im Kapitel 2.3.3 erwähnt, und ist hier mit $\varepsilon=0,5$ angenommen. Wenn man den Emissionsfaktor laut Abbildung 2.21 von 0,5 auf 0,7 erhöht dann sinkt der Wärmeleitkoeffizient k der Depositionsschicht. Dieses wird im folgendem Diagramm dargestellt.

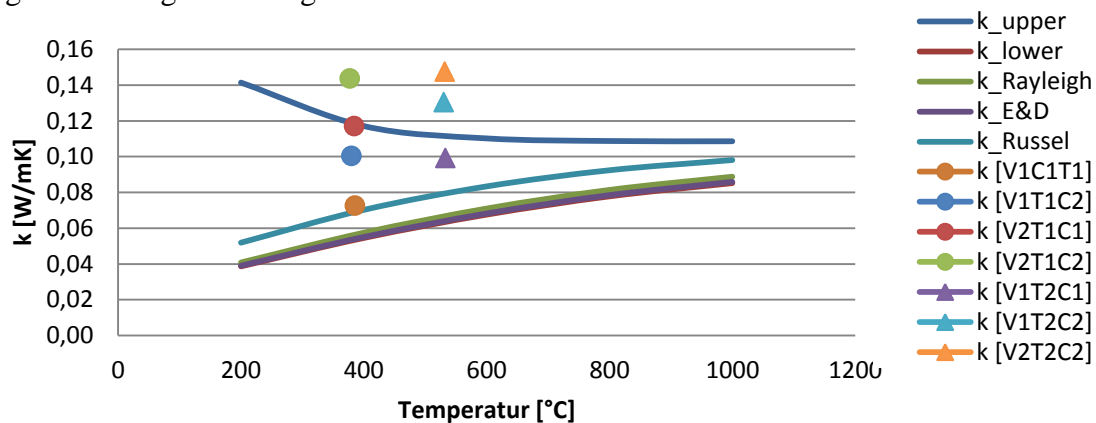


Diagramm 8.5: Wärmeleitfähigkeit für KCl bei einer Porosität von $p=0,97$; Einfluß des Emissionskoeffizienten der Deposchicht: hier Erhöhung von $\varepsilon=0,5$ auf $0,7$.

Wenn man berücksichtigt dass die Abschätzung der Depositionsschichtdicke sehr fehleranfällig ist, dann ist es Verständlich dass die Berechnung des Wärmeleitkoeffizienten der Depositionsschicht eher einer ungefähre Größenordnung darstellt als eine exakte Kalkulation. Wenn man einen Fehlerfaktor bei der Messung der Höhe der Depositionsschicht von 25 % annimmt, dann bekommt man für den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der Depositionsschicht von Kaliumchlorid folgende Werte:

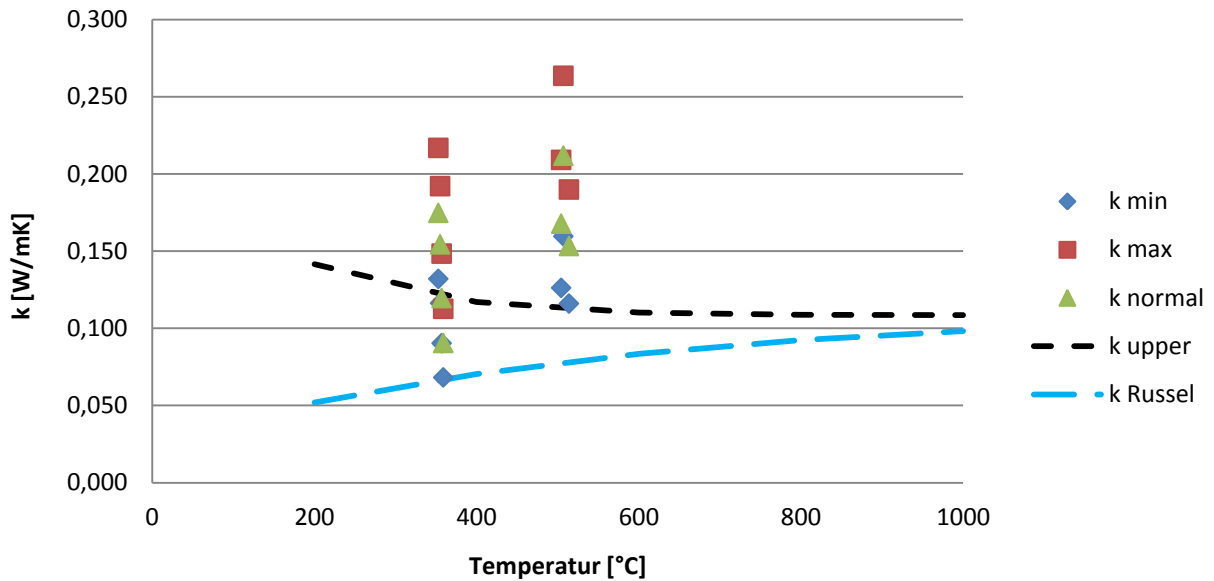


Diagramm 8.6: Wärmeleitfähigkeit für KCl Depositionsschicht unter Berücksichtigung von $\epsilon = 0,5$ und eines Fehlerfaktors bei der Depositionsschichthöhe. Wärmeleitkoeffizient k minimum bezieht sich auf die Berechnung mit einer Korrektur der gemessenen Depositionsschichthöhe um -25% , bei k Maximum ist die Korrektur um $+25\%$.

Das Diagramm 8.6 zeigt für die Berechnung von k Minimum eine gute Übereinstimmung zu den Wärmeleitfähigkeitsmodell: **k Maximum (k upper)**.

Die Tabelle 8.3 zeigt den Wärmeleitkoeffizienten k berechnet nach Gleichung (10) entsprechend der Wärmeleistung am Depositionsring und den Temperaturen während der experimentellen Versuche (siehe Tabelle 8.3). Die Depositionsschichttemperaturen befinden sich zwischen 480 °C und 540 °C bei der Sondentemperatur T_1 und bei etwa $550\text{--}630\text{ °C}$ bei der Sondentemperatur T_2 . Der Temperaturgradient in der Schicht liegt somit im Bereich von $250\text{--}300\text{ °C}$ für T_1 und $100\text{--}200\text{ °C}$ für T_2 .

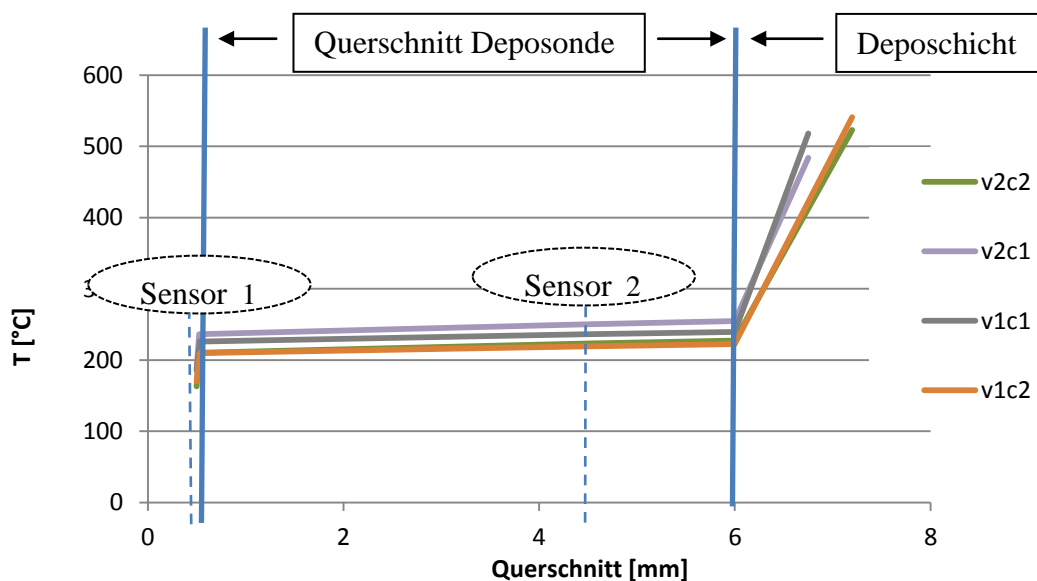


Diagramm 8.7 Temperaturverlauf durch die Heat Flux Sonde und der Depositionsschicht für die Ergebnisse aus der Versuchsreihe Teil 1 (T_1). Die strichlierten Linien deuten die Positionen der Temperatursensoren an. Die blauen Linien deuten die Oberfläche der Depositionssonde an, rechts davon wächst gedanklich betrachtet die Depositionsschicht während der Kondensationsversuche heraus, links der Kühlluftmassenstrom für Sonde.

Das Diagramm 8.7 verdeutlicht den bereits erwähnten hohen Temperaturgradient in der Depositionsschicht bei den verschiedenen Kondensationsversuchen. Der Sensor 1 liegt außerhalb der Sonde. Die Erklärung dafür ist im Kapitel 5.2, Abbildung 5.5.

Eine kurze Überlegung zum Thema Erosion. Wenn man alle Versuchsdaten (k , Q , m_{KCl}) in die Berechnung mit einbezieht, dann ergeben sich sehr viel höhere Kondensationsmassen. Der Grund dafür ist, dass der aus den Versuchen resultierende Wärmeleitkoeffizient höher ist als der in der Berechnung (Methode 1 – 3) angenommene Wärmeleitkoeffizient des „oberen Band“ Wärmeleitmodells. Dadurch ergeben sich geringere Depositionsschichttemperaturen, welches zu einer höheren Partialdruckdifferenzen zwischen Rauchgas und Depositionsschichtoberfläche führt. Die Differenz zwischen der auf dieser Weise berechneten Kondensationsmasse (**Methode 4**) und der Kondensationsmasse der experimentellen Versuche ist dann auf Erosion zurückzuführen. Folgende Tabelle zeigt den berechneten Kondensationsmassenstrom der sich aus Daten der Versuchsreihe ergeben würde.

Versuchsreihe 1 (T1)					
		V1C1T1	V1C2T1	V2C1T1	V2C2T1
Kondensationsmasse Versuch	g/Versuch	0,044	0,076	0,040	0,075
m_{cond} Methode 4 (c_w, k aus Versuch)	g/Versuch	0,072	0,128	0,076	0,119
Erosion	g/Versuch	0,028	0,052	0,036	0,044
Erosionsanteil	%	39	41	47	37

Versuchsreihe 2 (T2)				
Kondensationsmasse	g/Versuch	0,025	0,07	0,039
m_{cond} Methode 4 (c_w, k aus Versuch)	g/Versuch	0,062	0,102	0,074
Erosionsanteil	g/Versuch	0,037	0,032	0,035
Erosionsanteil	%	60	31	47

Tabelle 8.8: Darstellung des Erosionsanteils bei den verschiedenen Versuchen.

9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Schwerpunkt dieser Arbeit richtet sich auf die Kondensation von Aschedämpfen und die Feinstaubablagerung in Biomasse-befeuerten Kesseln. Zu diesem Zweck wurden in einer Versuchsanlage aschebildende Substanzen verdampft und anschließend auf einer gekühlten Sonde kondensiert. Als Modellschicht für die Aschedämpfe der Biomasse wurde Kaliumchlorid verwendet. Das Rauchgas wird dabei mittels Verbrennung von Erdgas durch einen in der Anlage bereitgestellten Gasbrenner zur Verfügung gestellt.

Es sollen Informationen darüber gewonnen werden, welche Struktur die Depositionsschicht durch Kondensation oder Feinstaubablagerung ausbildet (Porosität, Homogenität, Festigkeit) und wie die gebildete Depositionsschicht den Wärmeübergang beeinflusst.

Die Berechnung des Kondensationsmassenstromes der aschebildenden Substanz mittels eines Ähnlichkeitsansatzes zum Wärmeübergang (Lewis-Ansatz, siehe Kapitel 2) zeigt eine gute Übereinstimmung zu den experimentellen Versuchen. Der Lewis – Ansatz rechnet mit einem Stoffübergangskoeffizient β (Ähnlichkeitsansatz weil Bezug zum Wärmeübergangskoeffizient h mit der Le - Zahl) und der Konzentrationsdifferenz der kondensierenden Komponente zwischen Rauchgas und Oberfläche (Partialdruckdifferenz). Bei niedrigen Oberflächentemperaturen (T_s ca. 300 °C) kann man auch mit konstanter Sondentemperatur rechnen, in etwa bis zu einer Depositionsschichtdicke von 1,5 mm, da sich hier die Partialdruckänderung von KCl durch die Erhöhung der Oberflächentemperatur nicht wesentlich ändert (siehe: Diagramm 2.11, Kapitel 2). Bei höheren Sondentemperaturen ($T_s > 450$ °C) bzw. bei höheren Depositionsschichtdicken ($s > 1,5$ mm) ist der Einfluss der Depositionsschichttemperatur auf die Berechnung der Kondensationsmasse maßgebend. In diesem Fall ist die Berechnung der Depositionsmitte mit der iterativen Methode vorzunehmen (Methode 2, Kapitel 7). Es wird vermutet, dass diese Berechnungsmethode gute Ergebnisse bis zu einer Oberflächentemperatur von 650 °C liefert. Es ist jedoch denkbar, dass sich die Depositionsmechanismen von KCl durch Schmelz- und Sintervorgänge bei Temperaturen größer als 670 °C ändern. Hier bedarf es eventuell anderer Modelle für die Depositionsmassenberechnung.

Wenn man die Kondensationsschicht am Depositionsring betrachtet wird ersichtlich, dass sich die Verteilung der Depositionsmenge in Abhängigkeit von der Depositionsmasse sehr unterschiedlich ausbildet. Bei geringer Depositionsmenge ($m < 0,01$ [g]) kann man behaupten, dass die Verteilung gleichmäßig um den Ring erfolgt. Bei höherer Depositionsmenge ($m > 0,01$ [g]) ist die Depositionsmasse hauptsächlich auf der rauchgaszugewandten Seite der Sonde zu finden. Ein Grund dafür könnte die Abnahme an Kaliumchlorid bei der Umströmung der Sonde sein. Zu Beginn wächst die Kondensationsschicht zunächst gleichmäßig. Mit zunehmender Depositionsmenge wächst jedoch auf der rauchgaszugewandten Seite die Oberfläche an unterkühlten Kristallen schneller. Der Hauptgrund dafür liegt wahrscheinlich in der unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Änderung des Stofftransports.

Für die Berechnung der Porosität kann man bei höheren Kondensationsmassen das Volumen der Depositionsmasse auf der rauchgasabgewandten Seite vernachlässigen (Bilder Kapitel 5), da dieses wegen der kaum messbaren Höhe auch keinen relevanten Teil zum Gesamtdepositionsvolumen beiträgt. Es wird also die obere Hälfte des Ringvolumens für die Berechnung der Porosität herangezogen. Die Depositionsschicht weist eine hohe Porosität auf ($p > 0,97$), also einen hohen Anteil an fluider Komponente (Rauchgaskomponente) und einen geringen Anteil der festen Komponente (Kaliumchlorid) an der Gesamtstruktur. Durch die Vernachlässigung des Depositionsschichtvolumens auf der rauchgasabgewandten Seite ist die Porosität somit sogar noch etwas höher. Bei der Höhenabschätzung der Depositionsschicht muss man einen gewissen Fehlerfaktor der Abmessung berücksichtigen (Ablesefehler, Kapitel 3, 5), jedoch haben alle Daten aus den experimentellen Versuchen ähnliche Werte für die Porosität ergeben.

Die Wärmeleitfähigkeit der Depositionsschicht ist wegen der hohen Porosität sehr niedrig. Wie die Daten aus den experimentellen Versuchen gezeigt haben, ist die Wärmeleitfähigkeit aber deutlich höher als die Wärmeleitfähigkeit des Rauchgases, und liegt in der Größenordnung von $k = 0,1-0,2$ [W/mK] (Kapitel 8). Wenn man diesen Wert mit den mathematischen Modellen vergleicht, erkennt man, dass nur das Wärmeleitmodell „k maximum“ für diese hohe Porosität entsprechende Werte für die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Alle anderen Wärmeleitmodelle berechnen geringere Werte. Wenn man die mikroskopischen Aufnahmen der Depositionsschicht betrachtet (Kapitel 5) wird deutlich warum die Wärmeleitfähigkeit, trotz hoher Porosität, einen hohen Wert hat. Das Gefüge kristallisiert jeweils auf vorhandenen Kristallen. Bei starker Unterkühlung wachsen die Kristalle also „turmartig“ aus der Sondenoberfläche heraus. Die „Kristalltürme“ haben untereinander auch Verbindungen, es sind somit sehr viele Wärmeleitbrücken vorhanden. Die schematische Darstellung des „k maximum“ Modells zeigt vereinfacht gesehen einen solchen „turmartigen“ Aufbau. Andere Modelle, die durch Kugelpackungen (Rayleigh Wärmeleitmodell) bzw. versetzte Würfel (Russel Wärmeleitmodell) den Wärmetransport beschreiben, bekommen keine guten Werte für den Wärmeleitkoeffizient k der Depositionsschicht.

Die Struktur der gebildeten Depositionsschicht ist von der Oberflächentemperatur der Sonde abhängig. Bei niedriger Sondentemperatur ($T_{1s} = 300$ °C) bildet sich das Gefüge der Kondensationsschicht aus Kaliumchlorid als würfelförmige Kristalle aus, die jeweils auf bereits vorhandenen Kristallen kondensieren und somit die Depositionsschicht aufbauen. Die Kondensationsschicht zeichnet sich durch eine höhere Stabilität aus als das bei höheren Wandtemperaturen der Fall ist. Bei höherer Sondentemperatur ($T_{2s} = 500$ °C) ist das Gefüge aus kleineren nadeligen und tröpfchenförmigen Kristallen aufgebaut, die eine niedrige Stabilität aufweisen (Abplatzen der Depositionsschicht, Abbildung 5.36). Wenn man die mikroskopischen Aufnahmen betrachtet (Kapitel 5), kann man sehr gut erkennen, welchen Einfluss die Oberflächentemperatur auf die Kristallgröße hat. Bei der niedrigen Sondentemperatur haben die einzelnen Kristalle eine Größe von ca. 2-3 μm . Der Aufbau des Kristalls ist durch exakt gerade Flächen in kubischer Form aufgebaut. Der Grund dafür ist wohl die sehr starke Unterkühlung des Kaliumchlorids. Ein Grund für den „turmartigen“ Aufbau könnte darin liegen, dass das sich im vorbeiströmenden Rauchgas befindliche gasförmige Kaliumchlorid energetisch gesehen günstiger auf bereits vorhandenen Kristallen kondensiert, als auf der Stahloberfläche oder den freien Zwischenräumen der Depositionssonde, da es ja eine Oberfläche gleichem Materials darstellt. Bei der höheren Temperatur sind die einzelnen Kristalle kleiner, in der Größenordnung von ca. 1 μm . Die einzelnen Kristalle haben wegen der geringeren Unterkühlung bereits rundliche Ecken und sehen tröpfchenförmig aus. Die Gesamtstruktur sieht eher baumartig aus, mit vielen Ästen in allen Richtungen. Die Stabilität der Schicht ist bei der höheren Sondentemperatur dadurch auch viel geringer. Das würde sich mit zunehmendem Sintergrad wahrscheinlich ändern, also bei höheren Temperaturen, wenn es zu Verschmelzungen kommt.

Der Wärmetransport durch den Depositionsring wird schon bei geringer Depositionsschichtdicke stark verringert. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit der Depositionsschicht entsteht dort ein hoher Temperaturgradient. Dadurch steigen die Oberflächentemperaturen der Depositionsschicht mit zunehmender Schichthöhe stark an. Diese bewirken einerseits eine Abnahme des Depositionsschichtwachstums durch verringerte Konzentrationsdifferenz zwischen Rauchgas und Oberfläche, und andererseits eine Zunahme an erosionsbedingtem Materialabtrag durch zunehmende Instabilität der Depositionsschicht. Ein Grund für die stets höher berechneten Werte der Depositionsmasse des mathematischen Modells im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen (Ergebnisse Kapitel 8, Tabelle 8.1 und 8.2) könnten erosionsbedingte Phänomene sein. Es wird vermutet, dass die Ursache in der hohen Instabilität der Depositionsschicht liegt, wodurch kontinuierliche Erosionsvorgänge durch die vom Rauchgas erzeugten Schubspannungen die Depositionsschichtdicke reduzieren.

In dieser Arbeit wurden weiters die für den Aufbau der Depositionsschicht maßgebenden Einflussfaktoren: Rauchgasgeschwindigkeit, Salzfreesetzung, Versuchsdauer und Oberflächentemperatur detailliert untersucht.

Die Betriebsparameter waren dabei wie folgt festgelegt:

Rauchgasgeschwindigkeiten Eintritt Messbox: **V1:** 2,5 m/s.

V2: 5 m/s.

Salzfreigabe: **C1:** 3 Schalen mit je 15g Salz wurden im Stahlgefäß verdampft.

C2: 6 Schalen mit je 15g Salz wurden im Stahlgefäß verdampft.

Depositionssondentemperatur : **T1:** 300 °C.

T2: 500 °C.

Versuchsdauer: **t:** Bereich von 15 – 600 Minuten.

Salzfreigabe: In dieser Arbeit wurden bei den experimentellen Versuchen Salzfreesetzungsraten von 80-210 [mg/Nm³] verwendet. Diese Werte liegen in dem Bereich wie sie auch in der energetischen Biomassenutzung vorkommen können. Bei der angewandten Salzfreesetzungsmethode war der Rauchgasmassenstrom für die Salzfreesetzung nicht von Bedeutung. Die Salzfreigabe ist somit für die Kondensationsmenge verantwortlich. Eine Verdoppelung der Salzfreigabe hatte eine Verdoppelung der Kondensationsrate zur Folge.

Rauchgasgeschwindigkeit: Die Rauchgasgeschwindigkeit bezieht sich auf die Eintrittsgeschwindigkeit in der Messbox, also kurz vor der Sonde. Sie ergibt sich aus der Temperatur und dem Rauchgasmassenstrom. Es wurden zwei unterschiedliche Rauchgasgeschwindigkeiten untersucht: 2,5 [m/s] und 5 [m/s]. Diese Werte liegen in dem Bereich wie sie in industriellen Biomassekesseln vorkommen können und wurden aus diesem Grund untersucht. Bei der Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse kann man behaupten, dass die Rauchgasgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Depositionsmasse hat. Wenn man bedenkt, dass die Porosität der Schicht sehr hoch ist und dadurch sehr instabil ist, ist es nachvollziehbar, warum eine Erhöhung der Rauchgasgeschwindigkeit eine Verringerung der Depositionsmasse zur Folge haben muss. Zum Beispiel hat eine Verdoppelung der Rauchgasgeschwindigkeit bei den experimentellen Versuchen gezeigt, dass dies einen Rückgang der Kondensationsmenge um ca. 10 % bei gleichen Betriebsparametern (T1=300°C) zur Folge hat (siehe Kapitel 8).

Oberflächentemperatur: Die Oberflächentemperatur der Depositionssonde wurde über eine Regeleinheit eingestellt. Die Kühlung der Sonde wurde mittels Druckluft gewährleistet (siehe Kapitel 3.5). Der Kühlluftmassenstrom wurde nicht auf konstante Temperatur geregelt, sondern auf konstanten Kühlluftmassenstrom, um den Einfluss von Druckänderungen im System zu verringern und somit einen gleichmäßigen Temperaturverlauf in der Heat Flux Sonde zu bekommen. In dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Oberflächentemperaturen für die Depositionssonde untersucht: T1 = 300 °C und T2 = 500 °C. Beide Temperaturen kommen in typischen Hochtemperatur-Biomassekesseln vor. Die Struktur der Depositionsschicht ist maßgebend von der Oberflächentemperatur abhängig. Eine Erhöhung der Oberflächentemperatur bewirkt zunächst eine höhere Instabilität der Schicht. Das ist der Fall bis zu Temperaturbereichen, wo die ersten Schmelz- und Sinterphänomene auftreten. Es ist anzunehmen dass ab diesem Zeitpunkt sich die Eigenschaften der Depositionsschicht gänzlich ändern. Wie Versuche gezeigt haben, wirkt sich die Depositionssondentemperatur auf die Kondensationsrate bei geringen Schichthöhen zunächst nicht aus. Mit wachsender Schichthöhe verlangsamt sich das Schichtwachstum bei höheren Temperaturen schneller als bei niedrigen Depositionssondentemperaturen. Der Hauptgrund dafür ist die abnehmende KCl-Konzentrationsdifferenz zwischen Rauchgas und

Depositionsschichtoberfläche. Die Verteilung der Depositionsmasse um den Ring ist bei beiden Temperaturen ähnlich.

Versuchsdauer: Die Versuchsdauer der durchgeführten Kondensationsversuche reichte von 15 Minuten bis 10 Stunden bei vordefinierter kontinuierlicher Salzfreesetzung und gleichmäßigen Betriebsbedingungen. Bei der Auswertung der Kondensationsversuche mit geringer Versuchsdauer wurde festgestellt, dass es zunächst eine gewisse Anlauf-Zeit bis sich die Grundstruktur der Kondensationsschicht ausgebildet hat, gab. Dieses geschah zunächst langsamer als die durchschnittliche Kondensationsrate. Das hat den Grund, dass zu Beginn des Kondensationsversuchs das zu verdampfende Salz erst auf Temperatur gebracht werden musste. Ein anderer Grund dafür ist, dass die direkte Kondensation auf der Depositionssonde langsamer vonstatten geht als bei einer bereits vorhandenen KCl - Grundstruktur. Ein schnelleres Kondensationswachstum gibt es bis zu einer Depositionsschichthöhe im Bereich von ca. 1mm, danach verringert sich die Kondensationsrate aufgrund kontinuierlicher Erosion und Erhöhung der Depositionsschichttemperatur.

Empfehlungen: In dieser Arbeit wurden Erkenntnisse über das Kondensationsverhalten von Kaliumchlorid untersucht. Es wurde hierfür in einer bestehenden Versuchsanlage eine Verdampfungseinheit für das zu verdampfende Salz entwickelt und optimiert. Eine weitere Verbesserung für den Gebrauch der Verdampfungseinheit würde wohl der Einsatz von Platin – Tiegeln anstatt herkömmlicher Porzellantiegel bringen. Diese haben zwar den Nachteil bzgl. Anschaffungspreis, haben aber dafür große Vorteile in der Haltbarkeit (siehe Kapitel 3). Das Stahlgefäß sollte durch Montage eines längeren Hebels zum Herausziehen aus der Anlage verbessert werden. Es war in der Praxis sehr schwierig das glühend heiße Stahlgefäß innerhalb von drei Sekunden (mehr Zeit hat man auch mit Doppelhandschuhen nicht) mit dem kurzen Hebel kontrolliert herauszuziehen und auf den Halterungen abzustellen.

Ein großes Optimierungspotential bietet die Depositionssonde. Hier sollte man sich im nächsten Schritt überlegen, wie man den Innentemperatursensor von dem Kühlluftmassenstrom isolieren könnte. Weiters wäre ein Schalldämpfer für die herauskommende Kühlluft der Sonde sinnvoll, da bei stärkerer Kühlleistung der Lärmpegel doch sehr hoch ist. Eventuell könnte man betreffend der Dichtheit des Ringes etwas optimieren. Damit gemeint ist die Auflagefläche zwischen der Verschlusskappe der Heat Flux Sonde und dem Ring, da gibt es keinen Abdichtungsmechanismus, also Stahlfläche auf Ringoberfläche. Hier ist der Einsatz von Gummidichtungen natürlich nicht gegeben, aber vielleicht gibt es andere Möglichkeiten. Im Betrieb ist es öfter passiert dass man mit der Verschlusskappe irgendwo angekommen ist und sofort hat sich alles verschoben, was gleichzeitig zum Austritt von Kühlluft zwischen den Stahlflächen geführt hat. Bei der Heat Flux Sonde ist das alles zwar besser als bei der alten Sonde, jedoch könnte man hier eventuell weitere Verbesserungen vornehmen.

In dieser Arbeit wurden Erkenntnisse betreffend der Kondensation von Kaliumchlorid auf gekühlten Oberflächen gesammelt. Diese wurden bei zwei unterschiedlichen Wandtemperaturen ($T_1 = 300 \text{ °C}$ und $T_2 = 500 \text{ °C}$) untersucht. Das sind typische Temperaturen in Hochtemperatur-Biomassekesseln. Die aus der Arbeit resultierenden Erkenntnisse sind zum einen die Ermittlung des Wärmeleitkoeffizienten k für die poröse Kaliumchlorid Depositionsschicht und der Vergleich mit den mathematischen Modellen aus der Literatur. Ebenso wurde mit Hilfe der Heat Flux Sonde die Wärmeleistung am Ring in Abhängigkeit der Depositionsschicht und den Betriebsparametern ermittelt. Darüberhinaus wurde das bei den unterschiedlichen Temperaturen ausgebildete Gefüge mikroskopisch untersucht und gegenübergestellt. Die wichtigen Einflussgrößen wie Versuchsdauer, Rauchgasgeschwindigkeit und Salzfreesetzungsrate wurden hinsichtlich der Kondensationsrate bewertet. Die experimentell ermittelte Kondensationsmasse wurde mit einem mathematischen Modell (Lewis – Modell) verglichen und bewertet.

Weiterführend in der Thematik wäre es interessant zu wissen, was mit der Depositionsschicht passiert, sobald man in höhere Temperaturbereiche kommt, wo Schmelz- bzw. Sintervorgänge auftreten. Da wäre es interessant zu wissen, wie sich der Wärmeleitkoeffizient k ändert und bei welchen Temperaturen das geschieht. Wie sieht dann die Struktur der Depositionsschicht aus. Welche Eigenschaften hat diese betreffend Stabilität, Gefüge, Porosität und welche Wärmeleitmodelle können hier eventuell für die Berechnung des Wärmetransportes in Frage kommen? Wie sieht es mit der Strahlung aus? Kommt es zu einer Verbesserung oder zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs? Welche mathematischen Modelle für die Berechnung des Depositionsmassenstroms können in diesem Fall in Frage kommen?

IV.) Anhang

10. Literaturverzeichnis

- [1] KALTSCHMITT Martin, HARTMANN Hans, HOFBAUER Hermann. 2009.: Energie aus Biomasse. ISBN 9783540850946, Springer Verlag.
- [2] BAEHR Hans Dieter, STEPHAN Karl 2010: Wärme und Stoffübertragung. ISBN-13: 978-3642055003, Springer Verlag.
- [3] DE BEST C.J.J.M., KEMENADE H.P., OBERNBERGER Ingwald, BRUNNER T. 2008: Particulate Emission Reduction in Small Scale Biomass Combustion Plants by a Condensing Heat Exchanger. *Energy & Fuels* 2008, 22, 587-597.
- [4] BROSTRÖM Markus, ENESTAM Sonja, BACKMAN Rainer, MÄKELÄ Kari.: Condensation in the KCl-NaCl System. *Fuel processing technology* 2013, 105: 142-148.
- [5] PYYKÖNEN Jouni, JOKINIEMI Jorma. 2003: Modelling alkali chloride superheater deposition and its implications. *Fuel Processing Technology* Vol. 80, Issue 13, 15 March 2003, Pages 225-262.
- [6] RICHARDS Galen H., SLATER Peter N., HARB John N. 1993: Simulation of Ash Deposit Growth in a Pulverized Coal-Fired Pilot Scale Reactor. *Energy & Fuels*, 1993, 7, 774-781.
- [7] ROBINSON Allen L., BUCKLEY Steven G, YANG Nancy, BAXTER Larry L. 2001: Experimental Measurements of the Thermal Conductivity of Ash Deposits: Part 2. Effects of Sintering and Deposit Microstructure. *Energy & Fuels*, 2001, 15 (1), pp 75-84.
- [8] MUELLER Christian, SELENIUS Maria, THEIS Mischa, SKRIFVARS Bengt-Johann, BACKMANN Rainer, HUPPA Mikko, TRAN Hanghi. 2004: Deposition behaviour of molten alkali rich fly ashes- development of a submodel for CFD applications. *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 30, Issue 2, January 2005, Pages 2991-2998.
- [9] ZBOGAR Ana, FRANSEN Flemming J., JENSEN Peter Arendt, GLARBORG Peter. 2009. Shedding of ash deposits. *Progress in Energy and Combustion Science*. Volume 35, Issue 1, February 2009, Pages 31-56.
- [10] SCHARLER Robert, KUERTEN J.G.M., SCHULZE Kai, OBERNBERGER. Ingwald: Numerical simulation of ash particle impaction in tube bundles. A case study as a basis for a CFD based ash deposit formation model in convective heat exchangers. BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH.
- [11] SCHARLER Robert, SCHULZE Kai, BRUNNER Thomas, OBERNBERGER. Ingwald: Bioash D15: Ash and aerosol related problems in biomass combustion and co-firing. Deliverable D15, Project no. SES-CT-2003-502679.
- [12] FRANSEN Flemming J., ZBOGAR Ana, 2006: Mechanistic Modelling of Ash Deposit Build-Up on a Horizontal Tube in a Biomass-Fired Grate-Boiler-Heat Transfer in Deposits. DTU 3rd Annual Report, Annex I, July 2006.

-
- [13] FRANDSEN Flemming J., 2007: Modeling Residual Ash Formation in PF-firing. DTU 3rd Annual Report, Annex I, Feb. 2007.
- [14] FRANDSEN Flemming J., ZHOU Haosheng, ZBOGAR Ana. 2006: Mechanistic Modelling of Ash Deposit-Build-Up on a Horizontal Tube in a Biomass-Fired Grate Boiler-Physical Properties of Fly Ash, Deposit, and Flue Gas. DTU 3rd Annual Report, Annex I, June 2006.
- [15] REZAEI H.R., GUPTA R.P., BRYANT G.W., HART J.T., LIU G.S, BAILEY C.W., WALL T.F., MIYAMAE S., MAKINO K., ENDO Y. 2000: Thermal conductivity of coal ash and slags and models used. Fuel Vol. 79, Issue 13, October 2000, Pages 1697-1710.
- [16] JÖLLER M., BRUNNER Thomas, OBERNBERGER Ingwald. 2004: Modeling of Aerosol Formation during Biomass Combustion in Grate Furnaces and Comparison with Measurements. Energy & Fuels, 2005, 19, 311-323.
- [17] LETTNER Friedrich 2006: Biomasetechnologien für eine nachhaltige Energieversorgung. Skriptum für Lehrveranstaltung. Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz.
- [18] OTSUKA Nobuo. 2008: A thermodynamic approach on vapor-condensation of corrosive salts from flue gas on boiler tubes in waste incinerators. Corrosion Science, Volume 50, Issue 6, June 2008, Pages 1627-1636.
- [19] SALJNIKOV Aleksandar, KOMATINA Mirko, MANOVIC Vasilije, GOJAK Milan, GORICANEC Darko. 2009: Investigation on thermal radiation spectra of coal ash. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 52, Issues 11–12, May 2009, Pages 2871-2884.
- [20] ZBOGAR Ana, FRANDSEN Flemming J., JENSEN Peter Arendt, GLARBORG Peter: 2005: Heat transfer in ash deposits: A modelling tool-box. Progress in Energy and Combustion Science, Volume 31, Issues 5–6, 2005, Pages 371-421.
- [21] WALL TF, BHATTACHARYA S.P., ZHANG D.K., GUPTA R.P., HE X., 1993: The properties and thermal effects of ash deposits in coal-fired furnaces. Progress in Energy and Combustion Science, Volume 19, Issue 6, 1993, Pages 487-504.
- [22] MILLS C.K., RHINE J.M. 1989: The measurement and estimation of the physical properties of slags formed during coal gasification. Fuel, Volume 68, Issue 2, February 1989, Pages 193-200.
- [23] OBERNBERGER Ingwald, HAMMERSCHMID Alfred 1999: Dezentrale Biomasse Kraft Wärme Kopplungstechnologien. dbv-Verlag, ISBN 3-7041-0261-X.
- [24] OBERNBERGER Ingwald 1997: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen. ISBN 3-7041-0244-X, dbv-Verlag.

Anhang A: Rauchgaszusammensetzung:

Luftverhältnis	Temperatur	N2	CO2	H2O	O2
λ	°C	kg n2 /kg RG	kg co2/kg RG	kg h2o/kg RG	kg o2/kg RG
1	2067	0,725	0,151	0,124	0,000
2	1132	0,745	0,078	0,064	0,113
3	799	0,752	0,052	0,043	0,152
4	633	0,756	0,039	0,032	0,172
5	528	0,758	0,032	0,026	0,184
6	455	0,760	0,026	0,022	0,192
7	401	0,761	0,023	0,019	0,198
8	357	0,761	0,020	0,016	0,202
9	323	0,762	0,018	0,015	0,206
10	295	0,763	0,016	0,013	0,208
11	272	0,763	0,014	0,012	0,211
12	252	0,763	0,013	0,011	0,212
13	237	0,764	0,012	0,010	0,214
14	222	0,764	0,011	0,009	0,215
15	209	0,764	0,011	0,009	0,217
16	198	0,764	0,010	0,008	0,218

Anhang B: Rauchgaseigenschaften bei unterschiedlichen Temperaturen.

Luftverhältnis	Temperatur	Wärmekapazität	Wärmeleitzahl	Viskosität	Dichte
λ	T [°C]	Cp [J/kgK]	λ [W/mK]	η [Pa s]	ρ [kg/m ³]
2	1132	1311	0,083	5,3E-05	0,210
3	799	1221	0,069	4,4E-05	0,309
4	633	1187	0,061	3,9E-05	0,379
5	528	1157	0,056	3,6E-05	0,433
6	455	1137	0,052	3,4E-05	0,479
7	401	1122	0,049	3,2E-05	0,518
8	357	1111	0,047	3,1E-05	0,554
9	323	1102	0,045	2,9E-05	0,586
10	295	1096	0,043	2,8E-05	0,615
11	272	1091	0,042	2,8E-05	0,641
12	252	1086	0,041	2,7E-05	0,666
13	237	1083	0,040	2,6E-05	0,686
14	222	1080	0,039	2,6E-05	0,706
15	209	1078	0,038	2,5E-05	0,725
16	198	1076	0,037	2,5E-05	0,743