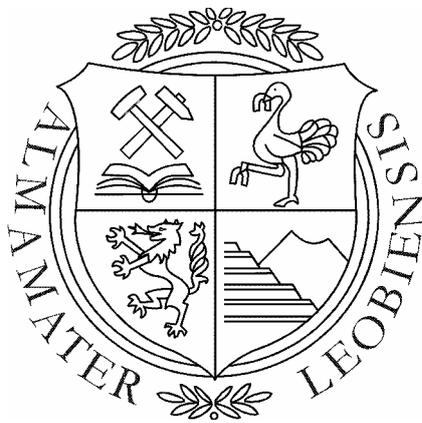


DIPLOMARBEIT

zum Erwerb des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs der Studienrichtung

VERFAHRENSTECHNIK



eingereicht am Institut für Verfahrenstechnik des
Industriellen Umweltschutzes an der Montanuniver-
sität Leoben

von

cand. ing. Franz Steindl

Leoben, November 2004

THEMA DER DIPLOMARBEIT

Modellversuche bei der Mikrogra- nulation von Hochofenschlacke

Im Auftrag der Firma
Tribovent Verfahrensentwicklung G.m.b.H.

Bearbeitungszeitraum von 01.2003 bis 11.2004

In Zusammenarbeit mit



Brunnenfelder Straße 59

6700 Bludenz

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Informationen und Quellen nicht benutzt und die benutzten Quellen, wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen, als solche kenntlich gemacht habe.

Franz Steindl

02. 11. 2004

Danksagungen

Der Verfasser bedankt sich bei der Fa. Tribovent Verfahrensentwicklung GmbH. insbesondere bei Herrn Alfred Edlinger, welcher diese Arbeit erst ermöglichte. Die gesamte Thematik war für mich sehr interessant und bereichernd.

Seitens der MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN bedanke ich mich bei O.Prof., Dr.mont. Dipl.-Ing. W. L. Kepplinger und Dr. Dipl.-Ing Christian Weiß für die fachliche Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit und während des gesamten Studiums.

Besonderer Dank an die Herrn Martin Doppler, Peter, Richard und Florent für ihre wertvollen Anregungen und Hilfestellungen während dieser Arbeit. Durch ihre langjährige Erfahrung wurden die oben genannten Herren für mich zu einer unerlässlichen Quelle während der gesamten Arbeit.

Ich möchte mich auch auf diesem Wege bei meinen Eltern für ihre Unterstützung ganz herzlich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung.....	3
3	Theorie	5
3.1	Allgemeines	5
3.2	Zerstäubungstypen	5
3.2.1	Einstoff- Druckdüsen.....	5
3.2.2	Rotationszerstäuber.....	6
3.2.3	Sonderzerstäuber	7
3.2.4	Zweistoff-Düsen.....	8
3.3	Tropfenbildung.....	10
4	Modellbildung.....	12
4.1	Grundprinzip	12
4.2	Abfließen des Schmelzfilms	13
4.3	Anwenden der Stabilitätsanalyse auf den Zerfall des Flüssigkeitsfilms	17
5	Versuchsbeschreibung	22
5.1	Allgemeines	22
5.2	Versuchsaufbau	22
5.2.1	Zerstäubungseinheit.....	24
5.2.2	Messinstrumente	25
5.2.3	Verwendete Düsen.....	26
5.3	Versuchsmatrix.....	29
5.3.1	Medium Wasser	29
5.3.2	Medium Glykose-Sirup	30
5.4	Versuchsdurchführung	31
5.4.1	Durchführung der Messung – Medium Wasser.....	32
5.4.2	Durchführung der Messung- Medium Glykose-Sirup.....	33
6	Experimentelle Ergebnisse	34
6.1	Auswertung Allgemein.....	34
6.2	Vergleich der Zerstäubungsqualität bei den drei untersuchten Stoffsystemen.....	38
6.3	Wasserversuche mit der konvergenten Düse.....	39
6.4	Wasserversuche mit der Lavaldüse.....	45
6.5	Versuche mit Glykose- Sirup.....	50
6.6	Zinnversuche	53
7	Zusammenfassung und Ausblick	55
8	Verzeichnis der Verwendeten Abkürzungen	58
9	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Zerstäubungseinheit im Schnitt.....	4
Abbildung 3.1	Lamellendüse (a) und Hohlkegeldüse (b).....	6
Abbildung 3.2	Turbulenzdüse.....	6
Abbildung 3.3	Rotationszerstäuber	7
Abbildung 3.4	Zweistoffdüsen (Äußere Mischung).....	8
Abbildung 3.5	Zweistoffdüsen (Innere Mischung)	8
Abbildung 3.6	Plain- Jet Airblast Zerstäuber.....	9
Abbildung 3.7	Airblast- Prefilming Zerstäuber.....	9
Abbildung 3.8	Schichtzerfall durch Wellenbildung [4]	11
Abbildung 4.1	Symmetrische- (a) und sinusförmige (b) Wellenbildung [3]	12
Abbildung 4.2	Kräfte-System für eine Bewegte Flüssigkeit in einer Luftströmung [3]	12
Abbildung 4.3	Einfluss der Weberzahl auf die Wellenwachstumsrate für das System Wasser Luft [3].....	13
Abbildung 4.4	Zähe Filmströmung an einer Schiefen Wand infolge der Schwerkraft.....	14
Abbildung 4.5	Detailansicht der Zerstäubungseinheit.....	15
Abbildung 4.6	Schematische Darstellung eines Teils der Auslaufdüse in Grund- und Aufriss	15
Abbildung 4.7	Verlauf der Wellenwachstumsrate über die Wellenzahl für Wasser (Durchflussmengen 6 und 11 l/min) und Glykose-Sirup	19
Abbildung 4.8	Verlauf der Wellenwachstumsrate von Zinn bei 280°C.....	20
Abbildung 5.1	Versuchsanlage.....	23
Abbildung 5.2	Position des Messinstruments am Versuchsturm in Grund- und Aufriss.....	23
Abbildung 5.3	Zerstäubungseinheit.....	24
Abbildung 5.4	Schematische Versuchsanordnung eines Beugungsspektrometers.....	25
Abbildung 5.5	Abmessungen der konvergenten Primärdüse.....	26
Abbildung 5.6	Abmessungen der Lavalldüse.....	27
Abbildung 5.7	Abmessungen der Auslaufdüse	27
Abbildung 5.8	Abmessungen der Sekundärdüse	28
Abbildung 5.9	Abdeckbleche zur teilweisen Ablenkung des Sprays	31
Abbildung 5.10	Aufbau des Messgeräts am Versuchsturm	32
Abbildung 6.1	Vergleich der berechneten Werte mit den abgelesenen und nach Gl. (6-1) umgerechneten Werten des Schwebekörperdurchflussmessgeräts.....	37
Abbildung 6.2	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für verschiedene Medien (Wasser, Glykose-Sirup, Zinn) bei einem Anstellwinkel der Sekundärdüse von 10°	38
Abbildung 6.3	Auswirkung der vertikalen Position der Primärdüse in der Auslaufdüse auf die Zerstäubungsqualität.....	39
Abbildung 6.4	Zerstäubung bei 2,5bar und 10l/min (linkes Bild) und Zerstäubung bei 6,5bar und 10l/min (rechtes Bild)	40

Abbildung 6.5	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°)	41
Abbildung 6.6	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°).....	42
Abbildung 6.7	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°).....	43
Abbildung 6.8	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +20°)	44
Abbildung 6.9	Auswirkung der vertikalen Position der Primärdüse in der Auslaufdüse auf die Zerstäubungsqualität.....	45
Abbildung 6.10	Lavaldüse bei 3,5 bar und 6l/min; Position der Lavaldüse ist 4mm unterhalb der Auslaufdüse	45
Abbildung 6.11	Lavaldüse bei 3,5bar und 6l/min; Position der Lavaldüse ist 20 mm oberhalb der Auslaufdüse	46
Abbildung 6.12	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die Laval düse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°).....	47
Abbildung 6.13	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die Laval düse in Kombination mit der Sekundärdüse(Anstellwinkel 0°).....	48
Abbildung 6.14	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die Laval düse in Kombination mit der Sekundärdüse(Anstellwinkel -12°).....	49
Abbildung 6.15	Resultat der Zerstäubung.....	50
Abbildung 6.16	Diplomand in Schutzbekleidung.....	50
Abbildung 6.17	Zerstäubung des Glykose-Sirups; Gesamtansicht	51
Abbildung 6.18	Zerstäubung des Glykose-Sirups bei 3,5bar und 8l/min	51
Abbildung 6.19	Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für Glykose-Sirup mit der konvergenten Primärdüse und der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°), Viskosität des Glukose-Sirups 330 mPa*s.....	52
Abbildung 7.1	Verdüsungseinheit "Tribojet"	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1	Geschwindigkeit und theoretische Schichtdicke des Wasser in der Auslaufdüse für $A_s=9,43 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$	17
Tabelle 4.2	Geschwindigkeit und theoretische Schichtdicke des Gykose-Sirups in der Auslaufdüse für $A_s=1,89 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$	17
Tabelle 4.3	Geschwindigkeit und theoretische Schichtdicke des Zinns in der Auslaufdüse für $A_s=6,60 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$ und $\eta_{\text{Zinn}} \approx 2 \cdot \eta_{\text{Wasser}}$	17
Tabelle 4.4	Relativgeschwindigkeit, Wellenwachstumsrate, Weberzahl und die Wellenlängen λ_{max} , $\lambda_{\text{cut-off}}$ für Wasser	18
Tabelle 4.5	Relativgeschwindigkeit, Wellenwachstumsrate und Weberzahl und die Wellenlängen λ_{max} , $\lambda_{\text{cut-off}}$ für Glykose-Sirup	19
Tabelle 4.6	Relativgeschwindigkeit, Wellenwachstumsrate und Weberzahl und die Wellenlängen λ_{max} , $\lambda_{\text{cut-off}}$ für Zinn bei 280°C	19
Tabelle 5.1	Verwendete Düsen.....	29
Tabelle 5.2	Zerstäubungsparameter.....	29
Tabelle 5.3	Zerstäubungsparameter für Glykose-Sirup.....	30
Tabelle 6.1	Durchsätze der eingesetzten Düsen	35
Tabelle 6.2	Vergleich der abgelesenen Werte mit den errechneten Werten der konvergenten-Düse	35
Tabelle 6.3	Vergleich der abgelesenen Werte mit den errechneten Werten der Lavaldüse	35
Tabelle 6.4	Vergleich der abgelesenen Werte mit den errechneten Werten der Sekundär- Düse	36
Tabelle 6.5	ALR- Verhältnisse der konvergenten Düse.....	40
Tabelle 6.6	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel $+10^\circ$)	41
Tabelle 6.7	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°)	42
Tabelle 6.8	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°)	43
Tabelle 6.9	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel $+20^\circ$)	44
Tabelle 6.10	ALR- Verhältnisse der Lavaldüse.....	46
Tabelle 6.11	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die Lavaldüse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel $+10^\circ$)	47
Tabelle 6.12	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die Lavaldüse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°)	48
Tabelle 6.13	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die Lavaldüse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°)	49
Tabelle 6.14	Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für Glykose-Sirup mit der konvergenten Primärdüse und der Sekundärdüse (Anstellwinkel $+10^\circ$)	52
Tabelle 6.15	Parameter zur Zinnzerstäubung.....	53

Tabelle 6.16	Siebanalyse des Zinnversuches	54
---------------------	-------------------------------------	----

Kurzfassung

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde die Mikrogranulation von Hochofenschlacke anhand eines Modells mit den Stoffsystemen Wasser- Luft, Glukose-Sirup- Luft und Zinn- Luft bestmöglich untersucht. Dazu wurden für die Wasserversuche die konvergente Primärdüse mit den Anstellwinkel der Sekundärdüse von (+12°, 0°, 10° und 20°) und die Lavaldüse mit den Anstellwinkel der Sekundärdüse von (+12°, 0° und 10°) vermessen. Die unterschiedlichen Flüssigkeitsmengen (6, 8, 10 und 11 l/min) wurden bei den Drücken (2,5; 3,5; 5; 6,5 bar) zerstäubt und der d_{50} gemessen. Die Messung der Tropfengröße erfolgte über ein HELOS- Vario Laser- Beugungsspektrometer der Firma Sympatec. Die Darstellung des gemessenen d_{50} über die dazugehörigen ALR- Verhältnisse (Massenstromverhältnis Luft zu Wasser) ist ein zentrales Thema dieser Arbeit und gibt über die Qualität der Zerstäubungseinheit Auskunft. Für die Versuche mit Glukose-Sirup und Zinn wurde die konvergente Primärdüse mit der 10° Sekundärdüse vermessen, diese stellte sich bei den Wasserversuchen als beste Kombination heraus. Die Versuche mit Glukose-Sirup (Viskosität 330 mPa*s) zeigen den Einfluss der Viskosität auf die Zerstäubungsqualität, so ist für ein ALR- Verhältnis von 0,66 der d_{50} für Wasser bei 35 μm , der des Zinns bei 80 μm und jener vom Glukose-Sirup bei 160 μm . Die Versuche mit Zinn wurden an der Anlage zur Zerstäubung von Schlacke durchgeführt und sollten zum einen den Einfluss der Dichte vor allem aber jenen der Oberflächenspannung verdeutlichen. In Hinblick auf die Schlacke konnten wichtige Erfahrungen bezüglich des „Einfrierens“ und der Beherrschung der Anlage gewonnen werden. Um die Zerstäubungsvorgänge erklären zu können wurde ein Modell entworfen, mit dem Ziel die Wellenwachstumsrate β über die Wellenzahl n darzustellen, um daraus, die maximal mögliche Wellenlänge $\lambda_{\text{cut-off}}$, also jene, bei der gerade noch- bzw. gerade keine Zerstäubung mehr eintritt, sowie die Wellenlänge λ_{max} , jene mit der größten Wellenwachstumsrate (β_{max}) und höchsten Auftretswahrscheinlichkeit herauszufinden. Dazu musste die Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Auslaufdüse und deren Schichtdicke bestimmt werden, weiters jene Gasgeschwindigkeit die auf die Flüssigkeit einwirkt und schließlich noch die Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Flüssigkeit.

Abstract

In this work it was tried to investigate an atomizer-system for slag with a cold model for the following media; water- air, glykose- syrup- air and tin- air. The tests with the atomizer unit for water and glykose-syrup have been performed with two different primary nozzles, one convergent-, one Laval nozzle and four secondary nozzles with different inclinations against the primary spray. The different liquid mass flows (6, 8, 10 and 11 l/min) were atomized by different air pressures (2.5, 3.5, 5 and 6.5 bar) and the median diameter (d_{50}) were plotted over the air to liquid ratio, called ALR (air to liquid mass flow ratio). The measurement of the drop size was done by an HELOS- Vario Laser- spectrometer from Sympatec. One of the main parts of this work was, to specify the best combination between the primary- and secondary nozzle. The tests with glykose-syrup, with a dynamic viscosity from 330 mPa*s, are done with the convergent primary- in combination with the 10° secondary nozzle. This investigation shows the large influence of the dynamic viscosity on the drop size. As an example, for the ALR value 0,66 the d_{50} for water is 35 μm , for tin 0,80 μm and for glykose-syrup 160 μm . The disintegration of tin was done in the same plant as we used for the slag disintegration. The tin experiment shows the influence of high density and also high surface tension. As additional important experience; we learned from these tests an improved handling of the plant for the tests with slag. For a better understanding what happened in the disintegration process a model was applied. The aim of the model is to show the course of the wave growth rate β over the wave number n , to specify the wave growth rate β_{max} , $\lambda_{\text{cutt-off}}$ and λ_{max} . At β_{max} the fastest growing wave is denoted λ_{max} . Due to surface tension effects the shortest possible deformation wave is $\lambda_{\text{cutt-off}}$. Theoretically the liquid film should be stable for shorter waves. To calculate these values it is necessary to know the velocity of the liquid film and the film thickness δ , also the gas velocity in contact with the film surface as well as the relative velocity u_r between gas and liquid film.

1 Einleitung

Die Firma Tribovent, ein in Bludenz in Vorarlberg ansässiges Unternehmen, wurde am 15. März 2000 als „spin-off“ eines weltweit tätigen, führenden Konzerns der Grundstoffindustrie aus dem Bereich Steine und Erden gegründet. Hauptgegenstand des Unternehmens ist die Konzipierung und Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von anorganischen Bindemitteln, so genannter alternativer Zement, bis zur Pilotstufe. Daneben werden bereits für industrielle Projekte (in Chile, Australien, Belgien, Schweiz, Deutschland und Österreich) Demonstrationsversuche und Machbarkeitsstudien durchgeführt. Im Vordergrund dieser Entwicklungsarbeiten stehen Potenziale im Bereich der Kostenreduzierung, der CO₂-Emissionssenkung und des Ressourcenverbrauchs. Dies wird durch die Ausnutzung der inhärenter „Abfall“ Energieströme aus industriellen Abfall- und Nebenstoffen realisiert. Es sind dies z.B. Stäube und Schlacken aus der Industrie- und Hausmüllverbrennung, Schlämme aus den Bereichen der Metallurgie, aus kommunalen Kläranlagen, aus der Papierindustrie, sowie taubes Material aus dem Erzbergbau[1].

Die Ausnutzung inhärenter Energieströme bedeutet beispielshalber die Umwandlung der, zur Zeit noch nicht genutzten, Hochtemperaturwärme von Schmelzen in Zerkleinerungsarbeit. Dies wird bei dem von der Firma Tribovent entwickelten Verfahren zur Mikro- Granulation von Hochofenschlackenschmelze zu zement- gängigen Feinmaterial angewendet.

Beim konventionellen Verfahren wird die aus dem Hochofen austretende Schlacke in einem Wasserbad zu so genannten Hüttensand abgeschreckt und granuliert. Der feuchte Hüttensand (Wassergehalt ca. 20 %) mit einer Korngröße bis zu 3mm wird gelagert, mechanisch und thermisch entwässert bzw. getrocknet und anschließend mit sehr hohen Energieaufwand (60-100 kWh, mech./t) auf eine Korngröße unter 50 µm gemahlen. Bei der konventionellen Granuliermethode fallen außerdem noch große Mengen an giftigen Schwefelwasserstoff diffus durch die Schlacken- Wasserreaktion an, dies bedingt wiederum eine oxidierende Gaswäsche sowie eine Abwasseraufbereitung. Das Abwasser muss infolge des hohen pH- Wertes zusätzlich neutralisiert werden.

Weiters nutzt dieses Verfahrens nicht den Energie- Inhalt der Schlacke, welcher ca. mit 350 kWh/t (bei einer Abkühlung von 1500 °C auf 300 °C) zu beziffern ist, dies entspricht ungefähr der Energiemenge von 50 kg Kohle pro Tonne Schlacke, oder anders ausgedrückt 185 kg CO₂ pro Tonne Schlacke. Bei einer weltweit anfallenden Menge Schlacke aus der Roheisen Industrie von ca. 300 Mio. t wird es klar ersichtlich wie ineffizient und kostenintensiv dieses Verfahren ist.

Das Dampf- Granulier- Mahl- Verfahren, in der weiteren Diplomarbeit als DGM- Verfahren bezeichnet, macht sich die Tatsache zunutze, dass Flüssigkeiten, in unserem Fall Hochofenschlacken, einen wesentlich geringeren Energieaufwand zur Zerstäubung bzw. zur Zerkleinerung benötigen als dies bei Feststoffen der Fall ist. Bei diesem DGM- Verfahren wird die flüssige Schlacke mit einer Temperatur von ca. 1500 °C in eine vertikal angeordnete Kokille eingeleitet und strömt, geregelt über ein Wehrröhr hin zur Zerstäubungseinheit.

Die Zerstäubungseinheit besteht aus einer zylindrischen Auslaufdüse in deren Mitte sich die Dampfzange (Primärdüse) befindet. Eine zweite Düse in Form einer Ringdüse (Sekundärdüse) befindet sich darunter. Wehrröhr, Primär- und Sekundärdüse sowie die Auslaufdüse sind konzentrisch angeordnet. Die Schlacke tritt in Form eines zylindrischen Hohlfilms in die Auslaufdüse und wird mittels überhitzten Wasserdampfs, mit welchem die beiden Düsen beaufschlagt werden, zerstäubt und gleichzeitig gekühlt.

Da die Primärdüse zentral in der Auslaufdüse positioniert ist, arbeitet dieses Zerstäubungskonzept wesentlich energieeffizienter als andere und führt dadurch zu spezifisch niedrigeren Wasserdampf verbrauchen. Die von der Schlacke abgegebene Wärme wird über Wärmetauscher, welche im Kühlturm in der Form von Kühlschlangen montiert und mit Thermoöl gefüllt sind, wieder zur Dampferzeugung eingesetzt. Das zerstäubte Produkt bzw. Mikro-Granulat kann direkt dem Zement zugemischt werden. Die größeren Partikel, sofern diese auftreten, werden wieder in den Prozess rückgeführt und eingeschmolzen.

Es ist nicht notwendig die Korngröße des Mahlprozesses zu erreichen (also 50 μm), es reicht wenn die Partikel kleiner als 80 bis 90 μm sind. Hauptsächlich liegt dies daran, dass der Wasserdampf eine Vielzahl kleiner Kanäle in die Schlacke reißt und so die notwendige innere Oberfläche erreicht wird. Anders als im herkömmlichen Verfahren finden hier keine Hydratationsreaktionen infolge der Granulierung im Wasserbad statt, diese wirken sich nachteilig auf den zukünftigen Baustoff aus, indem diese die Festigkeit reduzieren.

Die jährliche Produktion an Zement beträgt in etwa 1,5 Milliarden. t, die Menge an anfallender Hochofenschlacke beläuft sich, wie bereits in der vorigen Seite erwähnt, auf 300 Mio. t aus der Roheisenproduktion, sowie 100 Mio. t aus der Nichteisenindustrie. Die Hochofenschlacke könnte bis zu 80% dem Zement zugemischt werden, zur heutigen Zeit wird allerdings von den 400 Mio. t nur knapp ein Viertel dem Zement tatsächlich beigemischt.

Durch den Einsatz des neuen DGM- Verfahrens und der damit verbundenen Kostenreduzierung kann dieser restliche Anteil ebenfalls gewinnbringend eingesetzt werden. Die DGM- Anlage könnten zu jeden beliebigen Hochofen adaptiert werden. Eine Verringerung der Energiekosten, der Kosten für den Transport und die Deponierung der Schlacke und eine erhebliche Verringerung des CO_2 Ausstoßes, vor allem in Hinblick auf eine kommende CO_2 -Steuer verdeutlichen die Vorteile dieses Verfahrens zusätzlich. Betrachtet man die Steinbrüche der Zementindustrie, so gibt es auch hier durch eine Reduzierung des Abbauvolumens und einer damit verbundenen längeren Nutzung der Steinbrüche ein nicht unwesentliches Einsparungspotenzial.

2 Problemstellung

Im Laufe der Entwicklung des DGM- Verfahrens wurden verschiedene Düsentypen, sowohl primär-, (Laval- und Konvergentdüsen mit unterschiedlichen Durchmesser) als auch sekundär (unterschiedliche Bohrungsdurchmesser, Variation der Anzahl der Bohrungen und Neigung zur Achse der Zerstäubungseinheit) zum Einsatz gebracht, zusätzlich wurde noch die horizontale Position der Sekundärdüse variiert.

Ein Vergleich dieser verschiedenen Düsentypen und baulichen Geometrien unter realen Bedingungen mit dem Stoffsystem Schlacke und Wasserdampf ist teuer und aufwendig. Die Schlacke muss erst in den schmelzflüssigen Zustand (1450 °C-1500 °C) versetzt werden und zusätzlich benötigt der Wasserdampf die notwendige Temperatur, daher wurden zum Vergleich der unterschiedlichen Typen folgende drei Stoffsysteme ausgewählt:

- Wasser- Luft; für die Qualitative Untersuchung der Düsen
- Glykose-Sirup- Luft; als Medium hoher Viskosität
- Zinn- Luft; als Medium hoher Dichte und Oberflächenspannung

Da bereits das Auslaufverhalten, die Zerstäubung mit offenen bzw. geschlossenen Wehrröhr und verschiedene Füllstände im Behälter für das Stoffsystem Wasser- Luft eingehend untersucht wurden sollen im Rahmen dieser Diplomarbeit die optimale Düsenkombination herausgefunden werden (d.h. bei minimalen Gasstrom eine maximale Flüssigkeitsmenge in möglichst feine Partikel zu Zerstäuben). Dazu müssen die Einflüsse auf die entstehenden Partikel und deren Größe anhand folgender Parameter und deren Variation bestimmt werden.

Einflußgrößen auf die entstehenden Partikel:

- | | |
|--|-----------------------------|
| • Düsenvordruck an der Primärdüse | $p_{\text{Prim.}}$ [bar] |
| • Düsenvordruck an der Sekundärdüse | $p_{\text{Sek.}}$ [bar] |
| • Neigung der Sekundärdüsen zur Vertikalen | α [°] |
| • Vertikale Position der Primärdüse in der Auslaufdüse | y [mm] |
| • Dynamische Viskosität der Fluida | η [Pa*s] |
| • Dichte der Fluida | ρ [kg/m ³] |
| • Oberflächenspannung | σ [N/m] |

Der prinzipielle Aufbau des Wassermodells für die Zerstäubung von Wasser und Glykose-Sirup ist in Abbildung 1 dargestellt, dieser ist, um eine möglichst große Ähnlichkeit zu erhalten, der Apparatur für die Zinn- und Schlackezerstäubung nachempfunden.

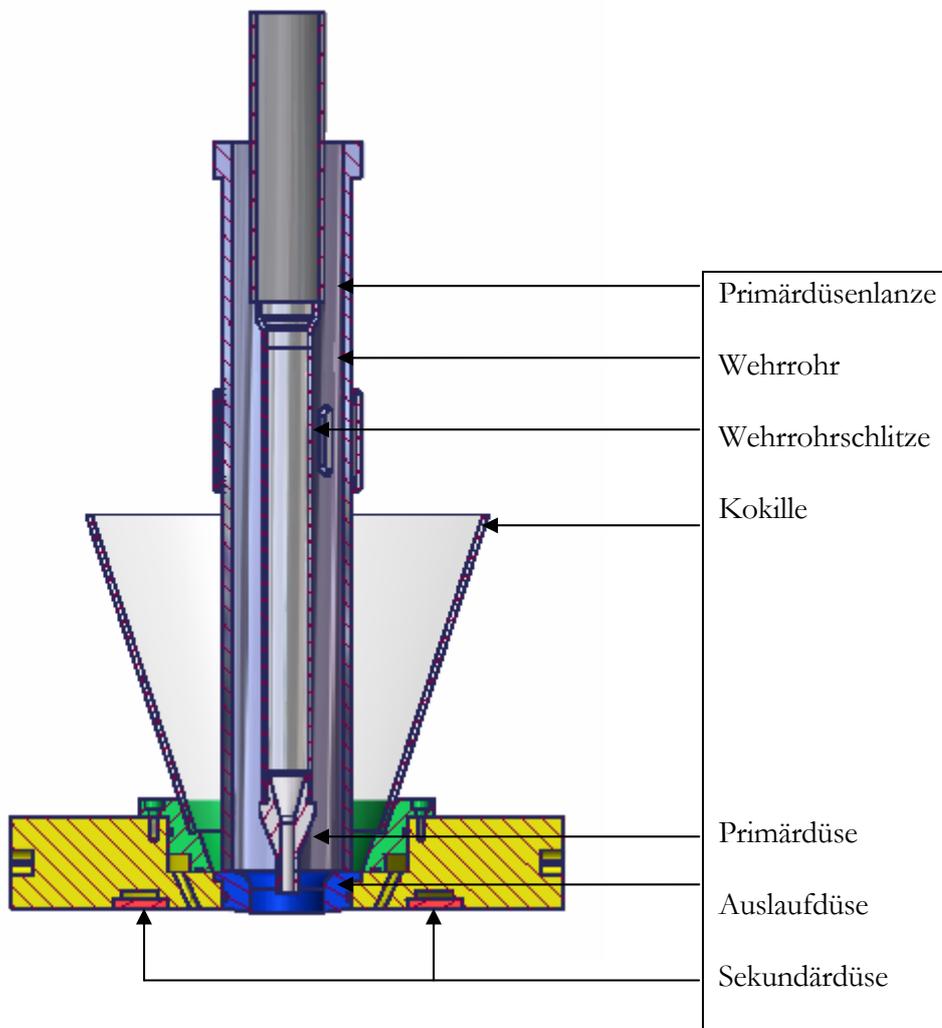


Abbildung 2.1 Zerstäubungseinheit im Schnitt

Die Zerstäubungscharakteristik der verschiedenen Düsenkombinationen soll primär anhand des Air- to- Liquid Verhältnisses, in unserem Falle also kg Luft pro kg Fluida, und des dazugehörigen mittleren Durchmessers der Partikel (d_{50}) dargestellt werden. In Folge soll der Versuch unternommen werden, ein Modell zu erstellen, mit dem Ziel, eine Darstellung der Wellenwachstumsraten, über die Wellenzahl n darzustellen. Daraus lassen sich Aussagen über die maximal mögliche Wellenwachstumsrate β_{\max} , die dazugehörige Wellenlänge λ_{\max} und $\lambda_{\text{cutt-off}}$ als Wert für die kleinste theoretisch mögliche Wellenlänge bei welcher der Flüssigkeitsfilm laut Theorie stabil ist.

3 Theorie

3.1 Allgemeines

Das Zerstäuben ist ein Prozess bei welchem eine Flüssigkeit in eine Vielzahl feiner Tropfen umgewandelt bzw. zerlegt wird. Oberflächlich betrachtet ist Zerstäuben einfach und ohne viel Aufwand zu betreiben, benötigt man doch nur eine ausreichend große Relativgeschwindigkeit zwischen der zu Zerstäubenden Flüssigkeit und der sie umgebenden Gasphase. Bei einer genaueren Betrachtung und dem Versuch den Vorgang der Zerstäubung in Formeln zu fassen wird einem die Komplexität der ablaufenden Prozesse deutlich.

Zerstäuben wird zumeist mit Düsen durchgeführt, hauptsächlich Druckdüsen (Einstoffdüsen) oder Zweistoffdüsen, die auch als pneumatische Zerstäuberdüsen bezeichnet werden. Primär hat dieser Prozess immer eine Vergrößerung der spezifischen Oberfläche der Flüssigkeit zum Ziel, um damit eine Erhöhung des Stofftransports zu ermöglichen, oder bessere Voraussetzungen für Wärmeübergänge und chemische Reaktionen zu Schaffen.

Es ist dies für eine Vielzahl von Verfahren von großer Bedeutung, sei es bei Industrieprozessen, in der Agrarwirtschaft, in der Medizin oder in der Meteorologie um nur einige zu nennen. Je nach Aufgabenstellung können die Anforderungen an Tropfengröße und Tropfenspektrum, sowie die Geschwindigkeit der Tropfen und der Flüssigkeitsdurchsatz von einander mehr oder weniger abweichen. Betrachtet man z.B. das Zerstäuben von Brennstoffen so ist hier eine kleine Tropfengröße und eine intensive Vermischung von Luft und Brennstoff vorteilhaft, für einen Stofftransport ist es hingegen ein enges Tropfengrößenspektrum, welches es zu erreichen gilt[2].

3.2 Zerstäubungstypen

In diesem Abschnitt soll nur eine kurze Übersicht über die gängigen Zerstäubungsarten, deren Funktionsweise sowie Beispiele für die Anwendung gegeben werden. Auf dem in Bludenz verwendeten Typ, eine Zweistoff- Düse aus einer Kombination von Außen- und Innenmischer, wird genauer eingegangen.

3.2.1 Einstoff- Druckdüsen

Bei diesem Zerstäubungstyp wird die auf die Flüssigkeit aufgebrauchte Druckenergie in Geschwindigkeitsenergie umgesetzt und davon ein kleiner Teil in Oberflächenenergie. Daraus resultiert eine mehr oder weniger hohe Relativgeschwindigkeit zwischen der bewegten Flüssigkeit und dem ruhenden Gases. Ist eine Veränderung des Durchsatzes erwünscht, so geschieht dies durch Erhöhung des Düsenvordrucks, was allerdings auch kleinere Tropfen zur Folge hat. In den meisten Fällen wird daher eine Änderung des Durchsatzes durch zu- bzw. abschalten von Düsen erreicht. Der Wirkungsgrad der Zerstäubung wird im Wesentlichen von der Geometrie der der Düse bestimmt. Die Druckdüsen werden zumeist für die Treibstoffeinspritzung in Verbrennungskraftmaschinen, bei Industrieöfen und Gasturbinen verwendet. Die Einstoffdruckdüsen werden je nach Gestalt des austretenden Flüssigkeitsstrahles in zwei Unterarten getrennt [2].

- **Lamellendüsen:** Es werden dünne Flüssigkeitslamellen am Düsenaustritt gebildet, welche erst in einer bestimmten Entfernung zu Tropfen zerfallen.
- **Turbulenzdüsen:** Durch die hohe Strahl­turbulenz zerfällt der Flüssigkeitsstrahl schon kurz nach Düsenaustritt.



Abbildung 3.1 Lamellendüse (a) und Hohlkegeldüse (b)

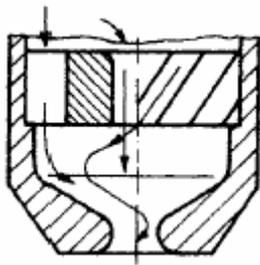


Abbildung 3.2 Turbulenzdüse

3.2.2 Rotationszerstäuber

Im einfachsten Fall wird die Flüssigkeit auf eine rotierende Scheibe zentral aufgebracht und, aufgrund der Zentrifugalkraft, nach außen transportiert. Je nach Größe des Massenstromes können sich Tropfen bereits auf der Scheibe bilden (bei kleinen Massenströmen) oder an der Außenkante (bei größeren Massenströmen). Je nach Art und Eigenschaft der Flüssigkeit kommen die unterschiedlichsten Bauarten zum Einsatz. Für schlecht benetzende Flüssigkeiten wird beispielsweise ein Becherzerstäuber eingesetzt, verursacht die Flüssigkeit einen starken Abrieb (z.B. bei einer Suspension) so kommen Hartmetall oder Keramikbüchsen zum Einsatz. Zum Einsatz kommt diese Zerstäubungspraktik hauptsächlich bei der Sprühtrocknung, sowie in der Landwirtschaft zum Versprühen von Pflanzenschutzmittel [2].

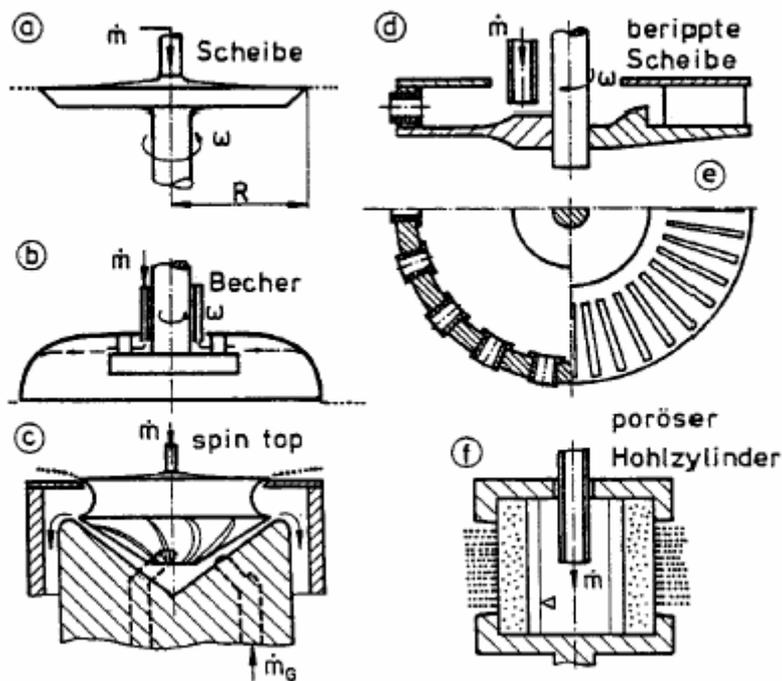


Abbildung 3.3 Rotationszerstäuber

3.2.3 Sonderzerstäuber

Es werden hier Zerstäuber zusammengefasst welche eher selten zum Einsatz kommen, allerdings sind diese für besondere Anwendungen durchaus von Vorteil.

- **Ultraschallzerstäuber:** Schwingungen im Bereich des Ultraschalls (>20 kHz) führen zur Zerstäubung (druckfrei) von meist niedrigviskosen Flüssigkeiten ($\eta < 20$ mPa*s). Als wichtigster gilt der Kapillarwellenzerstäuber.
- **Pulsierendes Abtropfen:** Durch periodisches Ausstoßen und Ansaugen der Flüssigkeit wird das Abtropfen direkt an den Ausgang der Kapillare gelegt, z.B. Tintendruck.
- **Rotierender Linienzerstäuber:** Zwei gegenläufige Walzen, eine mit Nocken ausgestattet, erzeugen ein enges Tropfengrößenspektrum.
- **Tropfenprall:** Zerteilen der Tropfen durch Aufprall auf eine feste Oberfläche, meist bei Rauchgaswäschern als Desintegratoren angewendet.
- **Elektrostatische Zerstäuber:** Hier werden die abstoßenden Kräfte gleichförmiger Ladungen zur Zerteilung angewendet, diese tritt ein wenn die abstoßende Kraft die Kapillarkraft übersteigt.

3.2.4 Zweistoff-Düsen

In Gegensatz zu den Einstoff- Druckdüsen wird bei diesem Typ die zum Zerstäuben notwendige Energie durch das Zerstäubungsgas aufgebracht. Bei all diesen Düsen wird die Flüssigkeit am Austritt durch das Gas beschleunigt, wobei die Relativgeschwindigkeit bzw. der Staudruck des Gases für die Zerteilung verantwortlich ist. Nach A. Lefebvre werden die Zweistoff- Düsen in Air- Assist Atomizer und Airblast Atomizer unterteilt. Beim Erstgenannten wird eine eher geringe Menge Zerstäubungsgas mit hoher Geschwindigkeit (>100 m/s) zum Zerteilen der Flüssigkeit verwendet. Hier wird je nach Bauweise unterschieden in Düsen mit äußerer Mischung und jene mit innerer Mischung.

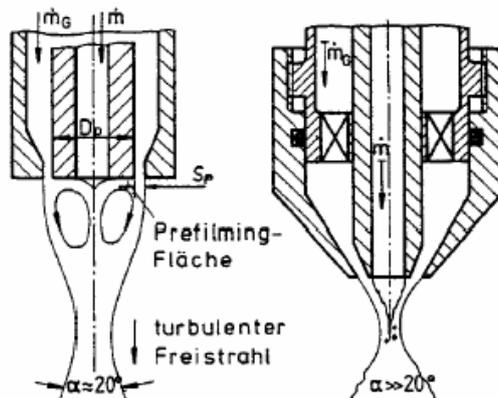


Abbildung 3.4 Zweistoffdüsen (Äußere Mischung)

Düsen mit äußerer Mischung haben den Vorteil, dass keine Interaktion mit der Flüssigkeit in der Düse auftritt, da der Kontakt mit dem Zerstäubungsgas erst am Austritt erfolgt. Im Vergleich mit einer Düse mit innerer Mischung sind die Düsen mit äußerer Mischung allerdings weniger effizient, so muss man, um den gleichen d_{50} zu erhalten, den Gasdurchsatz erhöhen.

Düsen mit innerer Mischung bringen Gas und Flüssigkeit noch vor dem Düsenaustritt in Kontakt, durch die effizientere Umwandlung der vom Zerstäubungsgas eingebrachten Energie in Zerstäubungsleistung, ist der Zerstäubungswirkungsgrad höher.

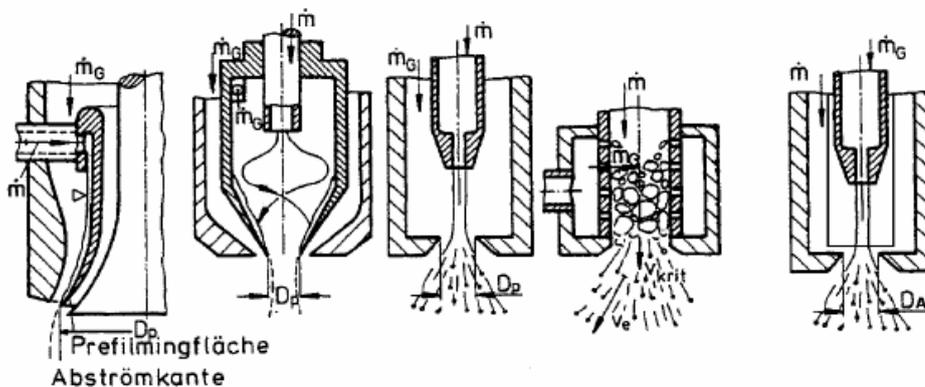


Abbildung 3.5 Zweistoffdüsen (Innere Mischung)

Der Airblast Atomizer verwendet hingegen zur Zerstäubung einen relativ großen Gasstrom mit niedriger Geschwindigkeit (kleiner 100 m/s). Bei dieser Art unterscheidet man zwischen den Airblast- Prefilming Typ und den Plain-Jet Typ. Der Prefilming Typ bildet einen dünnen Flüssigkeitsfilm aus, die damit verbundene Vergrößerung der spezifischen Oberfläche führt zu einem geringeren Energieverbrauch für die Zerstäubung. Im Gegensatz dazu wird beim Plain-Jet Airblast Typ die Flüssigkeit in einen oder mehreren Flüssigkeitsstrahlen zugeführt, dies ist mit einer geringeren Zerstäubungsleistung verbunden.

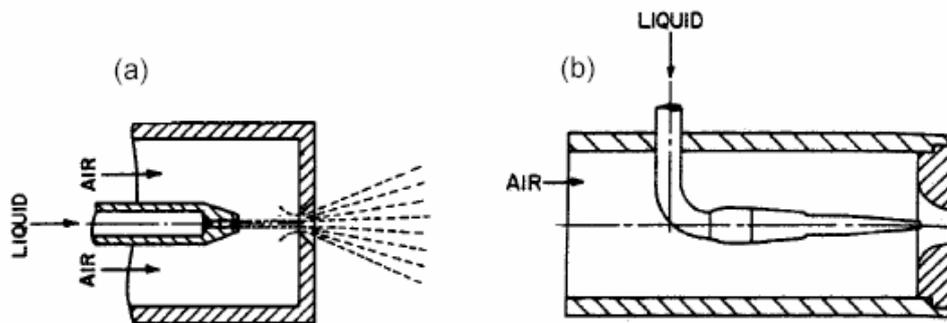


Abbildung 3.6 Plain- Jet Airblast Zerstäuber

Zum Einsatz kommen die Zweistoff- Düsen meistens bei Gasturbinen, Industrieöfen und der Herstellung von Metallstäuben. Sie eignen sich ebenso zum Zerstäuben hochviskoser Flüssigkeiten und produzieren im Vergleich zu den Einstoff-Druckdüsen generell ein feineres Spray [3].

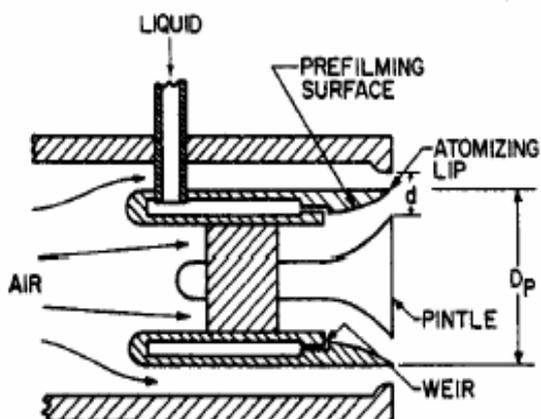


Abbildung 3.7 Airblast- Prefilming Zerstäuber

Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass es keine einheitliche Benennung der Zweistoffdüsen in der Literatur gibt. Der in Bludenz verwendete Zerstäubungstyp wurde aus Gründen der Ähnlichkeit dem Airblast- Prefilming Zerstäuber zugeordnet. Auch dieser Zerstäubungstyp besitzt entlang der Auslaufdüse eine quasi Prefilming- Zone, mit dem Unterschied, dass der Flüssigkeitsfilmdicke hin zum Auslauf leicht ansteigt und nicht wie im Bild 3.7 abnimmt.

3.3 Tropfenbildung

Es gibt die unterschiedlichsten Formen der Tropfenbildung, betrachtet man z.B. einen Wasserfall oder einfacher die Oberfläche eines Sees kann man bei zunehmenden Wind verschiedene Phasen der Tropfenbildung beobachten. Beginnend mit leichten Wellenbildungen bis hin zu starker Gischt. Grundsätzlich muss nur die Oberflächenenergie überwunden werden, durch verschiedenste, auf die Flüssigkeit wirkende, Kräfte (Druck-, Schwingungs-, Gravitations- oder Scheerkräfte).

Die Tropfenbildung kann grundlegend in Primär- und Sekundärzerstäubung eingeteilt werden. Bei der Primärzerstäubung erfolgt eine weitere Unterteilung der Tropfenbildung in Schichtzerfall und Strahlzerfall, wobei im Rahmen dieser Diplomarbeit, vor allem auf den Schichtzerfall, welcher auch bei der in Bludenz verwendeten Zerstäubungseinheit auftritt, eingegangen werden soll.

Unter Sekundärzerstäubung versteht man die Zerlegung von größeren Tropfen in kleinere. Der Prozess beruht auf die, von der hohen Gasgeschwindigkeit hervorgerufenen, Scherkräfte. Die Messungen, der in Bludenz erzeugten Tropfengröße, zeigte eine starke Vergrößerung des Tropfendurchmessers im Falle der Abschaltung der Ring- bzw. Sekundärdüse. Dies zeigt deutlich die Wirkung dieser Düse hinsichtlich der Sekundärzerstäubung.

Des Weiteren kann beim Schichtzerfall in einen freien Schichtzerfall und einen eingeschränkten Schichtzerfall unterschieden werden. Da der Flüssigkeitsfilm an der Auslaufdüse abfließt, handelt es sich, bei der in Bludenz eingesetzten Zerstäubungseinheit, um einen eingeschränkten Schichtzerfall.

In Bild 3.8 sind die zwei verschiedenen Arten der Wellenbildung an der Flüssigkeitsoberfläche dargestellt. Diese, hervorgerufen durch die Gasströmung, kann nun als sinusförmige, bzw. asymmetrische Instabilität und eine symmetrische Instabilität unterschieden werden. Wenn nun die Amplitude der Schwingung einen bestimmten Wert überschreitet zerfällt der Flüssigkeitsfilm zuerst in Segmente, diese in Flüssigkeitsfäden und weiter in Tropfen.

Ob nun eine sinusförmige Instabilität oder eine symmetrische Instabilität für den Zerfall eines Flüssigkeitsfilms verantwortlich ist bestimmt das Impulsverhältnis von Gas zu Flüssigkeit [4]. Dieses wird wie folgt bestimmt

$$MR = \frac{\rho_G * v_G^2}{\rho_L * v_L^2} \quad (3-1)$$

Für geringe Werte ist die symmetrische Wellenbildung die bestimmende Zerfallsart, niedrige Relativgeschwindigkeit lassen aber auf eine schlechte Zerstäubungsqualität schließen. Je höher jedoch der MR- Wert wird um so eher kommt man in den Bereich der sinusförmigen Instabilität und somit einer besseren Zerstäubungsqualität.

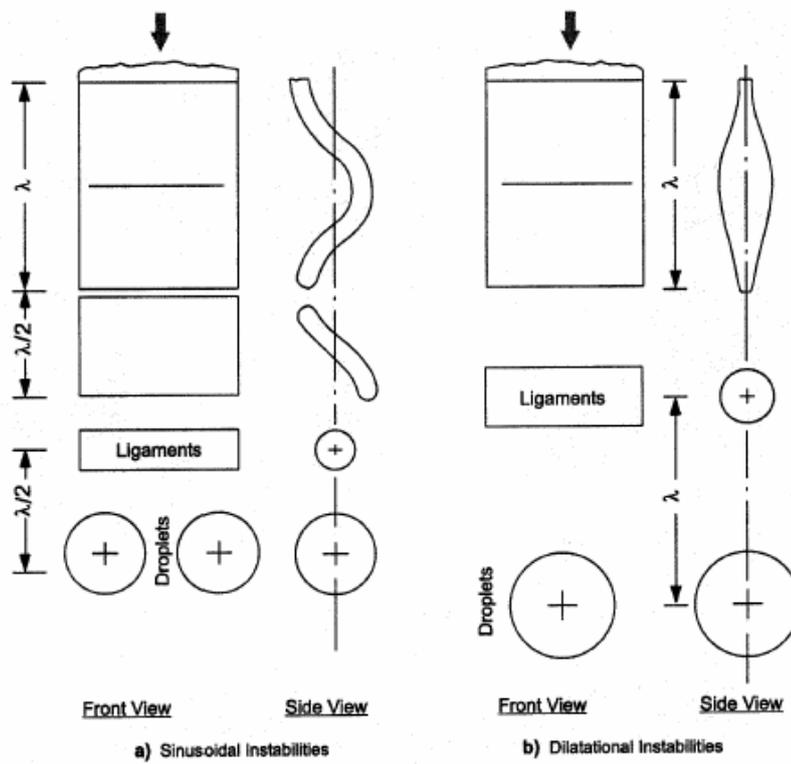


Abbildung 3.8 Schichtzerfall durch Wellenbildung [4]

4 Modellbildung

4.1 Grundprinzip

Nach dem kurzen theoretischen Überblick über die Mechanismen rund um den Tropfenbildungsprozess soll nun die in Bludenz verwendete Zerstäubungseinheit mithilfe eines Modells genauer durchleuchtet werden.

Wie bereits erwähnt sind für die Tropfenbildung aerodynamische Kräfte, hervorgerufen durch die relativen Geschwindigkeitsunterschiede, verantwortlich, diesen Kräften entgegen wirken die Oberflächenkräfte, wie Abbildung 4.2 zeigt. Übersteigen jene Oberflächenkräfte die aerodynamischen so findet keine Zerstäubung statt, im anderen Fall beginnt der Flüssigkeitsfilm, je nach Größe der Relativgeschwindigkeit, immer stärker werdende Wellenberge auszubilden welche zuerst in kleine Fragmente und schließlich in Tropfen zerfallen [3].

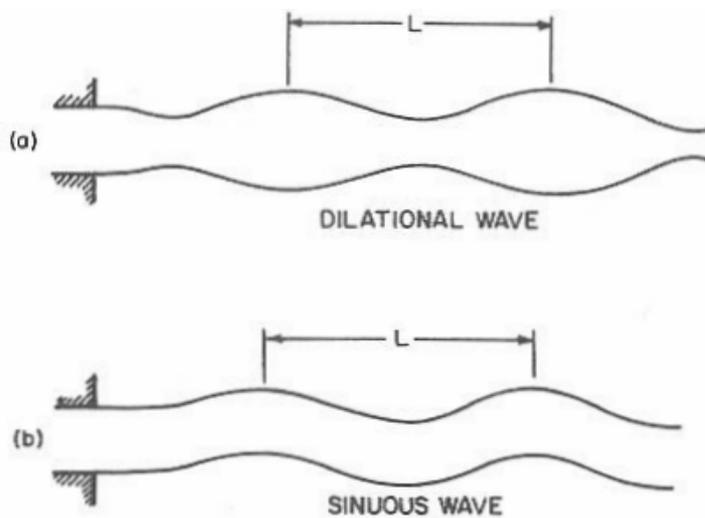


Abbildung 4.1 Symmetrische- (a) und sinusförmige (b) Wellenbildung [3]

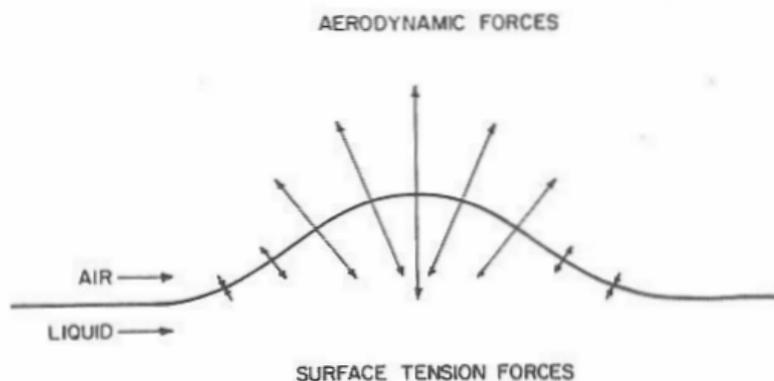


Abbildung 4.2 Kräftesystem für eine bewegte Flüssigkeit in einer Luftströmung [3]

Mit diesem Modell soll nun versucht werden die Geschwindigkeit, mit der unser Flüssigkeitsfilm austritt zu bestimmen, sowie die dazu gehörige Filmdicke. Des Weiteren soll über den Strahlungswinkel der Primärdüse, näherungsweise ein turbulenter Freistrah, jene Gasgeschwindigkeit bestimmt werden, die auf den Film wirkt und die Zerstäubung hervorruft. Daraus resultiert die Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Gas.

Das Ziel des Modells ist die Wellenwachstumsrate β über die Wellenzahl n darzustellen, um daraus die kleinste theoretisch mögliche Wellenlänge $\lambda_{\text{cut-off}}$, also jene, bei der gerade noch- bzw. gerade keine Zerstäubung mehr eintritt, sowie die Wellenlänge λ_{max} , jene mit der größten Wellenwachstumsrate herauszufinden.

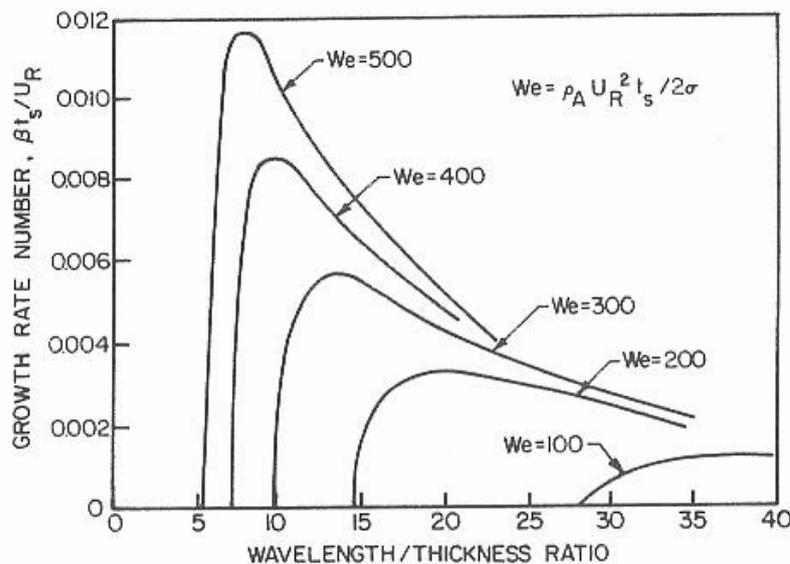


Abbildung 4.3 Einfluss der Weberzahl auf die Wellenwachstumsrate für das System Wasser Luft [3]

In Abbildung 4.3 zeigt für jede Weber-Zahl ein klar definiertes Maximum für die Wellenwachstumsrate β , ganz besonders bei hohen Weberzahlen. Eine Störung dieser Wellenlänge, mit der größten Wachstumsrate, ist die wahrscheinlichste und zerstäubt die Flüssigkeitsschicht am schnellsten. Weiters zeigt sich ein unteres Limit λ/δ , was bedeutet, dass für dicke Schichten und kleine Wellenlänge die Flüssigkeitsschicht stabil ist, es sei denn es herrschen hohe Gasgeschwindigkeiten bzw. Weber-Zahlen vor [3].

4.2 Abfließen des Schmelzfilms

In diesem Abschnitt soll der Versuch unternommen werden das Auslaufen des flüssigen Mediums genauer zu betrachten. Im Bild 4.4 sieht man den Ansatz zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils im Film. Wenn nun, wie bei allen Versuchen, ein konstanter Wehrrohrabstand gehalten wird, so ergibt sich aus einem konstanten Flüssigkeitsstrom auch eine konstante Geschwindigkeit in Wehrrohrspalt, jedoch ist diese nicht gleichzusetzen mit jener in der Auslaufdüse.

Durch die komplexen Strömungsverhältnisse, hervorgerufen von Primär- und Sekundärdüse und die angesaugte Luft über die Wehrrohrschlitze, welche auf den Flüssigkeitsfilm in der Auslaufdüse einwirken, kann keine klare Aussage über die Geschwindigkeit getroffen werden. In der Folge kann auch die Filmdicke der Flüssigkeit nicht genau bestimmt werden

Um diese Problematik zu umgehen wurden folgende Schritte, welche eine ausreichende Näherung darstellen sollten, festgelegt:

- Vernachlässigen der Strömungsverhältnisse im Flüssigkeitsfilms, welche durch das Zerstäubungsgas und Wehrröhr Spaltgas hervorgerufen werden
- Berechnung einer theoretischen Filmdicke in der Auslaufdüse durch Integration über die Geschwindigkeit im Wehrröhrspalt
- Berechnung der Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Auslaufdüse über die theoretische Schichtdicke
- Berechnung der tatsächlichen, auf die Flüssigkeit einwirkenden, Zerstäubungsgas- Geschwindigkeit sowie der Relativgeschwindigkeit
- Ermittlung der Weberzahlen und Erstellung des Diagramms

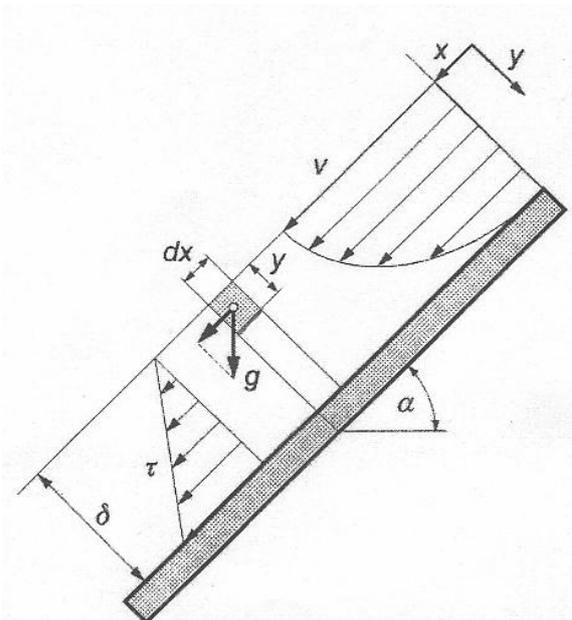


Abbildung 4.4 Zähe Filmströmung an einer Schiefen Wand infolge der Schwerkraft

Die Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils im Film, mit der Breite B des Fluidelements, in unserem Fall ein Kreisring, ergibt sich folgendes Kräftegleichgewicht.

$$yBdx * \rho_L * g * \sin \alpha = Bdx * \tau(y) \quad (4-1)$$

Damit aus

$$\tau(y) = y * \rho * g * \sin \alpha \quad (4-2)$$

und

$$\tau(y) = -\eta_L \frac{dv}{dy} \quad (4-3)$$

durch die Integration von

$$v_y = \frac{\rho_L * g * \sin \alpha}{2 * \eta_L} \int_{y=0}^{y=\delta} y * dy + C \quad (4-4)$$

mit den Randbedingungen $y=\delta, v(\delta)=0$

folgt daraus das Geschwindigkeitsprofil.

$$v_y = \frac{\rho * g * \sin \alpha}{2\eta} * (\delta^2 - y^2) \quad (4-5)$$

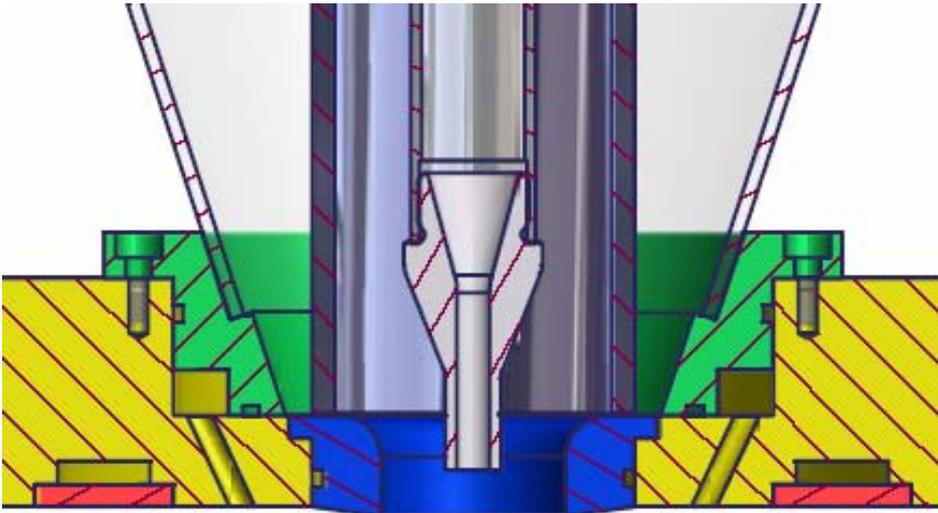


Abbildung 4.5 Detailansicht der Zerstäubungseinheit

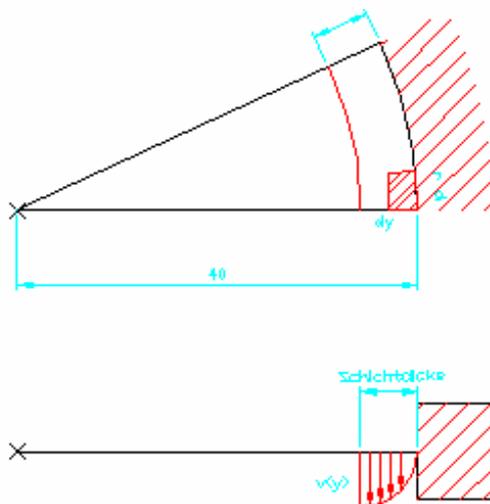


Abbildung 4.6 Schematische Darstellung eines Teils der Auslaufdüse in Grund- und Aufriss

Die Abbildung 4.6 beinhaltet eine schematische Darstellung eines Teils der Auslaufdüse, in Abbildung 4.5 blau dargestellt. Das Fluidelement $r d\varphi * dy$ wird über die Schichtdicke und Umfang nach Gl. (4-8) integriert.

Die theoretische Schichtdicke wurde über den Ansatz, welcher in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt wird, nach Gleichung (4-10) ermittelt. Der Radius der Auslaufdüse beträgt 0,02 m.

$$\dot{V}_L = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{y=0}^{y=\delta} v(y) * dy * r_a * d\varphi \quad (4-6)$$

$$\dot{V}_L = 2 * \pi * r_a \int_{y=0}^{y=\delta} v(y) * dy \quad (4-7)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (4-5) folgt

$$\dot{V}_L = 2 * r_a * \pi \int_{y=0}^{y=\delta} \frac{\rho_L * g}{2 * \eta_L} * (\delta^2 - y^2) * dy \quad (4-8)$$

Durch Integration und einsetzen der Grenzen folgt

$$\dot{V}_L = \frac{\pi * r_a * \rho_L * g}{\eta_L} * \left[\delta^3 - \frac{\delta^3}{3} \right] \quad (4-9)$$

Die theoretische Schichtdicke ergibt sich nun durch Umformen

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3 * \dot{V}_L * \eta_L}{2 * r_a * \pi * \rho_L * g}} \quad (4-10)$$

Die Geschwindigkeit v_L des Flüssigkeitsfilms in der Auslaufdüse errechnet sich nun durch einsetzen der theoretischen Schichtdicke in Gleichung (4-5). Die Tabellen 4.1, 4.2, und 4.3 enthalten die Geschwindigkeit, die theoretische Schichtdicke, sowie die Flüssigkeitsgeschwindigkeit in der Auslaufdüse des jeweiligen flüssigen Mediums.

Die Bestimmung der Geschwindigkeit in der Auslaufdüse erfolgt über die Kontinuitätsgleichung

$$\dot{V} = A_s * v_s \quad (4-11)$$

Wehrrohrspaltfläche bei 0,5 mm Spalthöhe und einen Wehrrohrradius r_w errechnet sich aus:

$$A_s = r_w^2 * \pi * h_w \quad (4-12)$$

Tabelle 4.1 Geschwindigkeit und theoretische Schichtdicke des Wasser in der Auslaufdüse für $A_s=9,43 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$

\dot{V}_L *10E-4 [m³/s]	v_s [m/s]	Theoretische Schichtdicke [mm]	v_L für $y=\delta$ [m/s]
1,0000	1,0610	0,62	1,89
1,3333	1,4150	0,68	2,27
1,6667	1,7680	0,74	2,69
1,8333	1,9450	0,76	2,83

Tabelle 4.2 Geschwindigkeit und theoretische Schichtdicke des Gykose-Sirups in der Auslaufdüse für $A_s=1,89 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$

$\dot{V}_{\text{Glykose-S}}$ *10E-4 [m³/s]	v_s [m/s]	Theoretische. Schichtdicke [mm]	$v_{\text{Glykose-S}}$ für $y=\delta$ [m/s]
1,00	0,53	2,3	0,55
1,33	0,70	2,5	0,65
1,83	0,97	2,8	0,82

Tabelle 4.3 Geschwindigkeit und theoretische Schichtdicke des Zinns in der Auslaufdüse für $A_s=6,60 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$ und $\eta_{\text{Zinn}} \approx 2 \cdot \eta_{\text{Wasser}}$

\dot{V}_{Zinn} *10E-5 [m³/s]	v_s [m/s]	Theoretische Schichtdicke [mm]	v_{Zinn} für $y=\delta$ [m/s]
3,78	0,57	0,3	1,60

4.3 Anwenden der Stabilitätsanalyse auf den Zerfall des Flüssigkeitsfilms

Nachdem die Geschwindigkeit der Flüssigkeit ermittelt wurde muss noch die Gasgeschwindigkeit bestimmt werden. Es wird die Annahme getroffen, dass es sich bei der Gasströmung um einen turbulenten Freistrahel handelt. Die Geschwindigkeitsprofile in allen Ebenen $y = \text{const.}$ sind einander ähnlich und mit der Gaußschen Fehlerfunktion darstellbar. Der Durchmesser des Strahls wächst proportional mit den Abstand y von der Düsenöffnung während die maximale Geschwindigkeit u_m mit $\frac{1}{\sqrt{y}}$ abfällt.

Die Schallgeschwindigkeit ermittelt sich aus der Gl. (4-13), dabei ist $\kappa=1,4$ für Luft, $T=293,15 \text{ [K]}$ und $R=287 \text{ [J/kg K]}$.

$$u_s = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$

Für u_m an der Stelle $y=8$ mm (Abrisskante der Auslaufdüse) und der Schallgeschwindigkeit $u_{Schall}=343$ [m/s] folgt:

$$u_m = u_{Schall} * \frac{1}{\sqrt{y}} \quad (4-14)$$

die maximale Geschwindigkeit u_m in der Ebene $y=8$ mm

$$u_m = 121,3 \text{ [m/s]}$$

Die Geschwindigkeit u folgt aus Gl. (4-15), wobei die halbe Strahlbreite b sich aus Subtraktion von der Schichtdicke δ_m und der halben Düsenaustrittsöffnung $d/2=3,5$ mm vom Radius der Auslaufdüse r_a ergibt. Die gemittelte Schichtdicke beträgt $\delta_m=0,7$ mm und daraus ergibt sich für $b=15,8$ mm.

$$u = u_m * \exp\left[-(\ln 2) * \left(\frac{y}{b}\right)^2\right] \quad (4-15)$$

$$u = 101,5 \text{ [m/s]}$$

Als jener Wert der Gasgeschwindigkeit u , der auf die Flüssigkeit einwirkt. Die Relativgeschwindigkeit u_r für die einzelnen Flüssigkeitgeschwindigkeiten v_L sind in Tabelle 4.4 enthalten, ebenso wird die Wellenwachstumsrate β_{max} sowie λ_{max} und $\lambda_{cut-off}$.

Die Weberzahl lässt sich durch Gl. (4-16) ermitteln.

$$We = \frac{\rho_A * u_R^2 * \delta}{2 * \sigma} \quad (4-16)$$

Für eine sinusförmige Welle errechnet sich die Wellenwachstumsrate β aus der Gl. (4-17), wobei n [1/m] die Wellenzahl darstellt und sich aus $n=2\pi/\lambda$ ergibt.

Für Glykose-Sirup wurde die Relativgeschwindigkeit und die Schichtdicke für die Darstellung von β über n gemittelt.

$$\beta = \left(\frac{n^2 * u_R^2 * \frac{\rho_A}{\rho_L} - n^3 * \frac{\sigma}{\rho_L}}{\tanh n * \frac{\delta}{2}} \right)^{0,5} \quad (4-17)$$

Tabelle 4.4 Relativgeschwindigkeit, Wellenwachstumsrate, Weberzahl und die Wellenlängen λ_{max} , $\lambda_{cut-off}$ für Wasser

\dot{V}_L *10E-4 [m³/s]	v_L für $y=\delta$ [m/s]	u_r [m/s]	Weberzahl	β_{max} [1/s]	λ_{max} [mm]	$\lambda_{cut-off}$ [mm]
1,0000	1,89	99,6	54,6	242149,4	0,055	0,0357
1,3333	2,27	99,3	59,4			
1,6667	2,69	98,8	64,1			
1,8333	2,83	98,7	65,5	235504,4	0,055	0,0364

Tabelle 4.5 Relativgeschwindigkeit, Wellenwachstumsrate und Weberzahl und die Wellenlängen λ_{\max} , $\lambda_{\text{cut-off}}$ für Glykose-Sirup

$\dot{V}_{\text{Glykose-S}}$ *10E-4 [m ³ /s]	v_L für $y=\delta$ [m/s]	u_r [m/s]	We	β_{\max} [1/s]	λ_{\max} [mm]	$\lambda_{\text{cut-off}}$ [mm]
1,00	0,55	101	201,8			
1,33	0,65	100,9	218,9	192853	0,055	0,036
1,83	0,82	100,7	244,2			

Tabelle 4.6 Relativgeschwindigkeit, Wellenwachstumsrate und Weberzahl und die Wellenlängen λ_{\max} , $\lambda_{\text{cut-off}}$ für Zinn bei 280°C

\dot{V}_{Zinn} *10E-5 [m ³ /s]	v_{Zinn} für $y=\delta$ [m/s]	u_r [m/s]	We	β_{\max} [1/s]	λ_{\max} [mm]	$\lambda_{\text{cut-off}}$ [mm]
3,78	1,6	99,92	3,4	3161487	0,0013	0,001

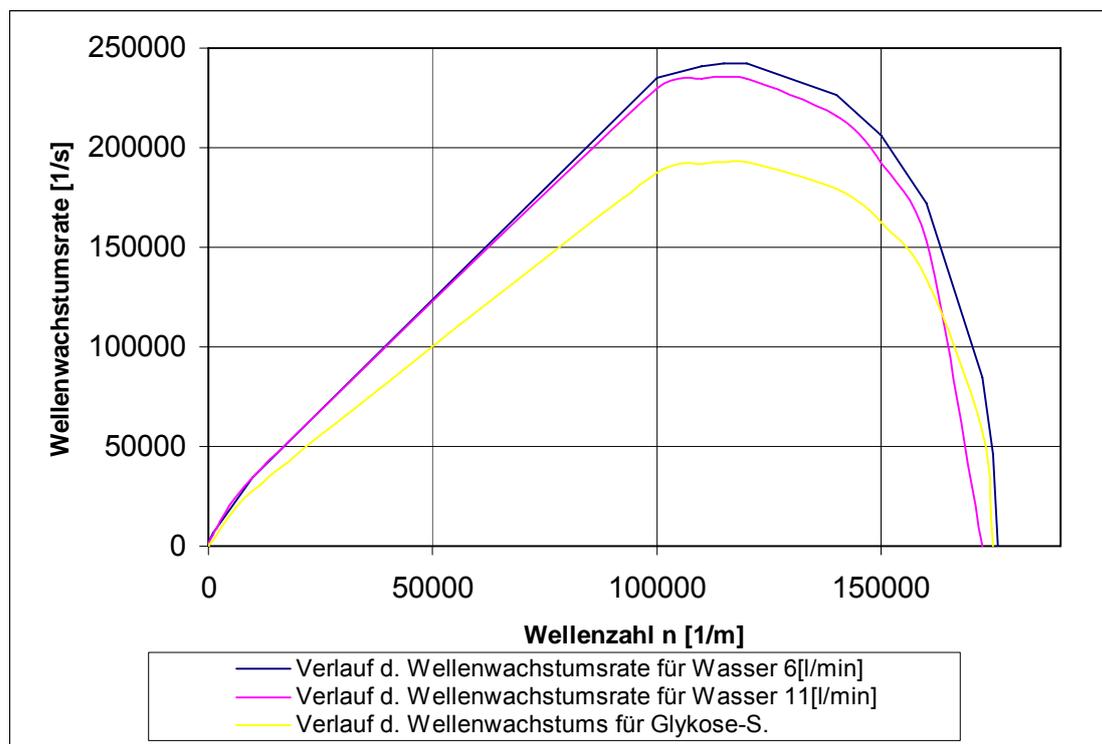


Abbildung 4.7 Verlauf der Wellenwachstumsrate über die Wellenzahl für Wasser (Durchflussmengen 6 und 11 l/min) und Glykose-Sirup

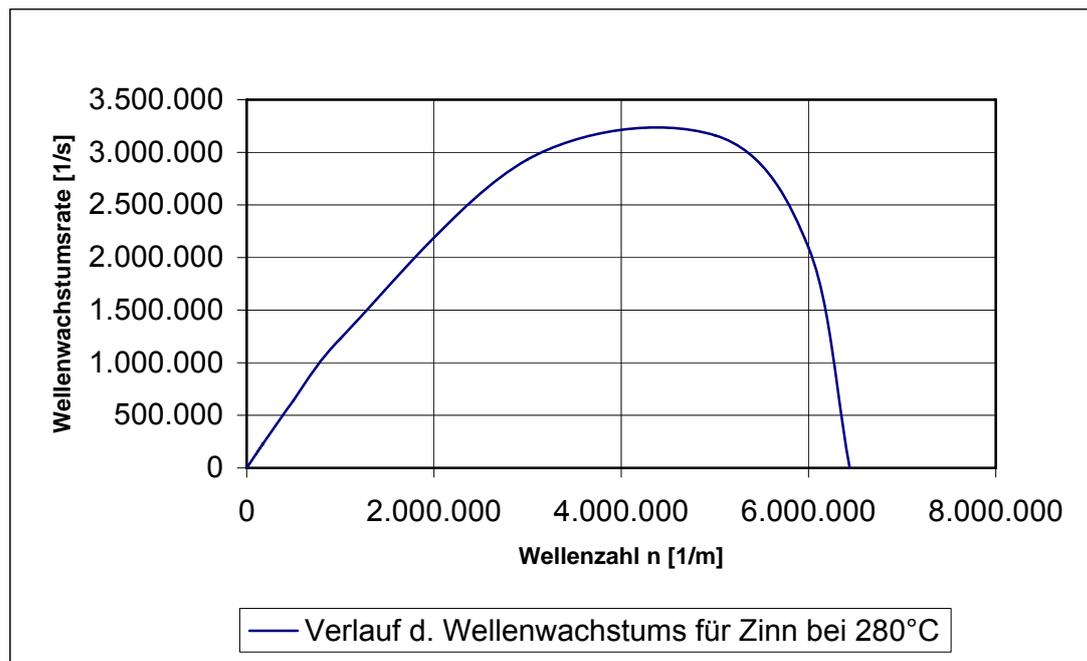


Abbildung 4.8 Verlauf der Wellenwachstumsrate von Zinn bei 280°C

Bei Betrachtung von Abbildung 4.5 und 4.6 zeigen sich, für die unterschiedlichen Wasserdurchflussmengen von 6 und 11 l/min und das Glykose-Sirup, gleiche Werte für λ_{\max} , also jene Wellenlänge mit der größten Auftretswahrscheinlichkeit.

Die Wellenwachstumsraten für Wasser liegen nahe bei einander, so ist β_{\max} bei einer Durchflussmenge von 11 l/min nur etwa 3% unter jener von 6 l/min. Die geringen Unterschiede ergeben sich aus den ähnlichen Filmdicken und Relativgeschwindigkeiten. Für Glykose-Sirup liegt β_{\max} , aufgrund der viermal höheren Schichtdicke, ca. 20% unter den Wert für Wasser.

Laut der Theorie sind für höhere Weberzahlen auch höhere Wachstumsraten β zu erwarten, dies gilt scheinbar nur für geringe Relativgeschwindigkeiten, da in diesem Modell, also bei Relativgeschwindigkeiten von ca. 100 m/s, die höchsten Wachstumsraten bei geringsten Weberzahlen erreicht.

Das Zinn hat z.B. eine Weberzahl von 3,4, jene von Glukose-Sirup liegt bei ca. 200, aber die Wachstumsrate ist bei Zinn 15-mal höher als jene des Glukose-Sirups. Wie Gl. (4-16) zeigt, spielen (in Bezug auf die Weberzahl) nur die Oberflächenspannung sowie die Filmdicke eine große Rolle, da die Relativgeschwindigkeit für alle Media nahezu gleich ist. So ist die Oberflächenspannung des Zinns ca. 8-mal höher als jene des Glukose-Sirups ist, die Schichtdicke allerdings 8-mal kleiner.

Die kleinsten, theoretisch möglichen, Wellenlängen unterscheiden sich bei Wasser und Glykose-Sirup nur minimal um 0,4 μm . Bei Zinn liegen die Wellenlängen λ_{\max} und $\lambda_{\text{cut-off}}$ um mehr als eine Zehnerpotenz unter jenen von Wasser und Glukose-Sirup.

Wenn man die experimentelle Tropfengröße mit der Wellenlänge λ_{\max} vergleicht, so würde man erwarten, dass es normalerweise keine kleineren Wellenlängen als Tropfengrößen geben kann. Hier ist jedoch zu bedenken dass die unterlegte Modellvorstellung nur das Anfangsstadium der Störung am Flüssigkeitsfilm beschreiben kann, wo hingegen der Großteil der vermessenen Tropfen im Spray vermutlich durch Sekundärzerstäubung gebildet wird. Darüber hinaus können die Gründe für das Auseinanderklaffen von experimentell gefundenen Tropfengrößen und deren Wellenlänge λ_{\max} vielfältiger Natur sein.

So wurde bei der Berechnung der Schichtdicke und der Filmgeschwindigkeit die Sogwirkung (durch die Primär- und Sekundärdüse, sowie den Gasstrom über die Wehrröhrschlitze) in der Auslaufdüse nicht berücksichtigt. Des Weiteren kann die Annahme eines turbulenten Freistrahls, für die Primärdüse doch stärker als erwartet von den realen Bedingungen abweichen, was Auswirkungen auf die Relativgeschwindigkeit mit sich bringt. Letztlich ist die Gl. (4-17) für sinusförmige Wellenformen hergeleitet worden, ob sich bei der verwendeten Zerstäubungseinheit wirklich solche sinusförmigen Wellen ausbilden konnte nicht geklärt werden.

Im Rahmen dieser Berechnungen wurde der Öffnungswinkel des turbulenten Freistrahls aus folgendem Grund nicht berücksichtigt.

In der Literatur wurde für den axialsymmetrischen Freistrahls ein halber Öffnungswinkel von 12° ermittelt [8]. Die Geschwindigkeit u , über den halben Öffnungswinkel $\theta=12^\circ$ berechnet, ergibt für die halbe Breite $b=15,8$ mm, durch Einsetzen in Gl. (4-13), einen Abstand $y=74$ mm von der Düsenaustrittsöffnung.

$$b = 2 * y * \tan \theta \quad (4-13)$$

Da aber aus den Abbildungen 6.4 und 6.5 hervorgeht, dass die Zerstäubung ca. 10 bis 20mm unterhalb an der Abrisskante erfolgt und in einem Abstand von 70 mm der gesamte Flüssigkeitsfilm bereits zerstäubt ist, müssen am Ort der beginnenden Deformation des Flüssigkeitsfilms neben der direkten Einwirkung der Scherkräfte des schnell strömenden Gases auf den Flüssigkeitsfilm darüber hinaus noch andere Kräfte, die in der Auslaufdüse z.B. aufgrund der Sogwirkung der Primär- und Sekundärdüsen wirken, verantwortlich sein.

5 Versuchsbeschreibung

5.1 Allgemeines

Im Zuge der Verfahrensentwicklung wurden an der Zerstäubungseinheit immer wieder gewisse Änderungen vorgenommen. Diese resultierten zumeist aus den Zerstäubungsversuchen mit Zinn und den damit auftretenden Problemen; vor allem in Hinblick auf die nachfolgenden Versuche mit Schlacke. So wurde z.B. die Sekundärdüse auf das horizontale Niveau der Auslaufdüse positioniert, die äußere Form der Primärdüse an die Auslaufdüse angepasst („Zumpferldüse“) und die Kokille in einer konischen Form ausgeführt. Letztlich sollte das Wassermodell ein möglichst genaues Abbild der später verwendeten Zerstäubungseinheit sein.

5.2 Versuchsaufbau

Es ist hier eine Gesamtansicht der Versuchsanlage in Bild 5.1 dargestellt. Der Behälter unter dem Turm diente dazu, das Wasser aufzufangen und mittels einer Pumpe wieder in den Vorratsbehälter einzubringen und somit den Verbrauch des Versuchsmediums (Wasser, Glykose-Sirup) so gering wie möglich zu halten. Die für die Versuche benötigte Druckluft lieferte ein Baustellenkompressor hinter der Halle. Der Rechner, im Bild unten rechts, dient zur Auswertung der vom HELOS-Sympatech gemessenen Daten. Um äußere Wetterbedingten Störungen, vor allem Wind, so gering wie möglich zu halten wurde um diesen Turm eine Halle errichtet.

In Abbildung 5.2 ist ein Schema vom Aufbau des Messinstrumentes auf den Versuchsturm dargestellt. Die Entfernung vom Ende der Auslaufdüse (Abrisskante), zum Ort der Messung (Laser-Achse) beträgt 700mm, das zu vermessende Spray hat auf dieser Ebene einen Durchmesserbereich von 300 mm bis 400 mm. Die Distanz zwischen Sendeeinheit und der Empfangseinheit beläuft sich auf 750mm.



Abbildung 5.1 Versuchsanlage

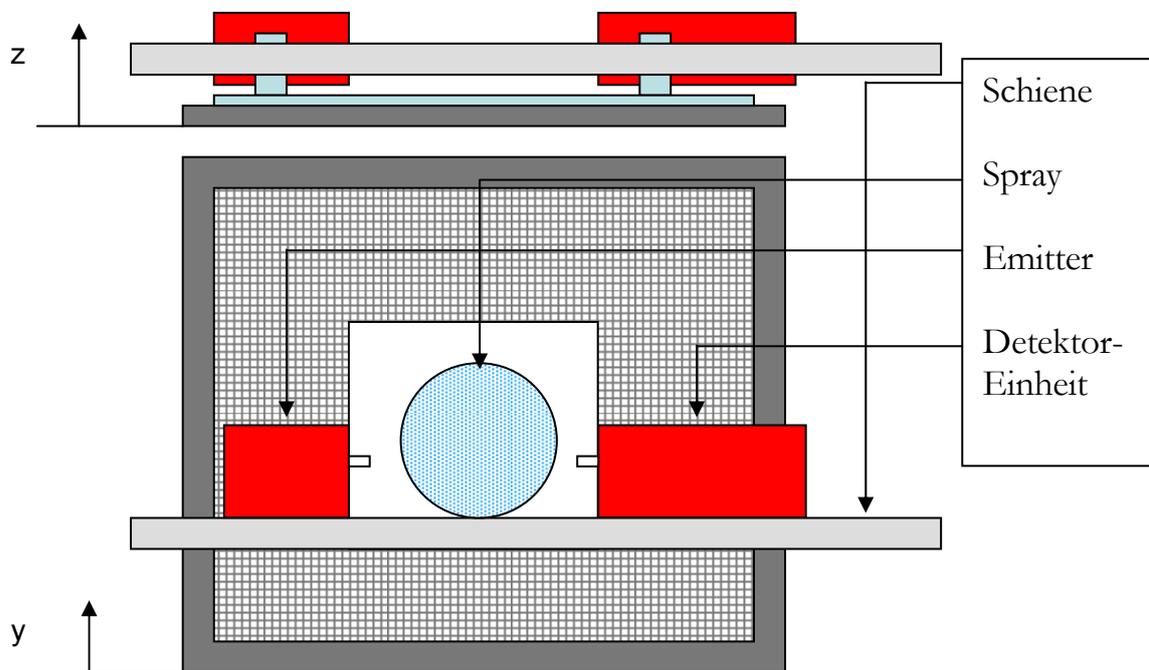


Abbildung 5.2 Position des Messinstruments am Versuchsturm in Grund- und Aufriss

5.2.1 Zerstäubungseinheit

Die Wasser- und Glykose-Sirup-Versuche wurden mit der in Abbildung 5.3 dargestellten Zerstäubungseinheit durchgeführt. Diese wurde mittels Alu- Formrohren auf dem Versuchsturm montiert. Die Druckluft wird von einem Baustellenkompressor (Höllengerät) bereitgestellt und über zwei Einzoll- Schläuche (belastbar bis zu max. 15 bar) zur Primär- und Sekundärdüse geleitet. In diese Leitung wurde die Messstation eingebaut. Die Messstation besteht hin zu beiden Düsen aus einem Schwebekörperdurchflussmessgerät (geeicht auf 6 bar, bei 20°C), einen Kugelhahn zur Regulierung und einen Manometer (0 bis 15 bar). Diese Elemente wurden alle mittels Schnellkupplungen und Holländern mit einander verbunden.

Die Versorgung der Zerstäubungseinheit mit dem Versuchsmedium Wasser erfolgte über eine Membranpumpe, welche auch für die später erfolgten Versuche mit Glukose-Sirup verwendet wurde. Aus dem sich unter dem Versuchsturm befindlichen Auffangbehälter wurde das Wasser zur Kokille gefördert. Die Durchflussmenge wurde über ein Rotameter (Messbereich von 0 bis 20 l/min, bei 20°C) bestimmt und mit einem Kugelhahn geregelt. Die Verbindung der Instrumente und der Schläuche erfolgte auch hier mit Schnellkupplungen. Der Wassereinlauf erfolgte durch eine Ringleitung, rund um den Oberrand der Kokille, die mit Bohrungen versehen wurde. Dies gewährleistet einen sowohl gleichmäßigen Einlauf in die Kokille, als auch eine möglichst gleichmäßige Wasserfilmdicke an der Auslaufdüse. Anfängliche Auslaufversuche zeigten durch die bauliche Enge der Kokille bei nur einem Wassereinlauf eine stärkere Rotation bzw. größere Turbulenzen in der Auslaufdüse.

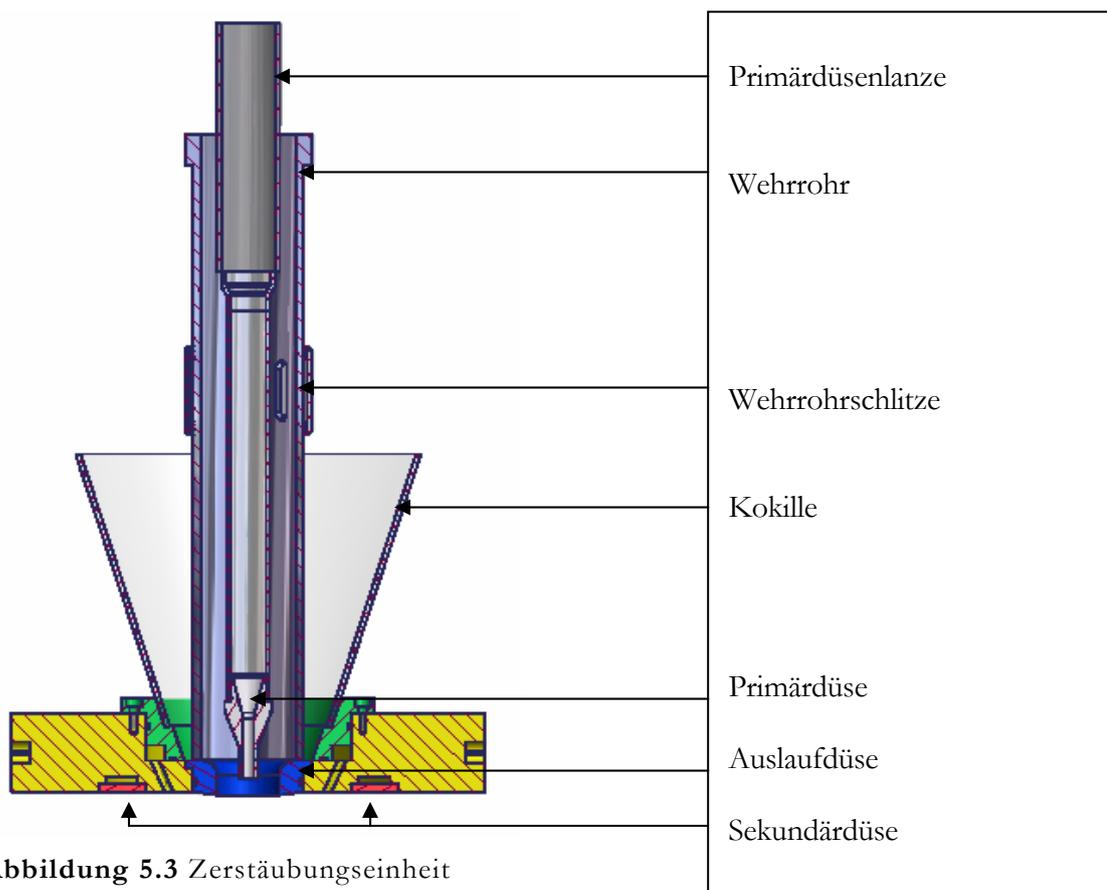


Abbildung 5.3 Zerstäubungseinheit

5.2.2 Messinstrumente

Diese setzen sich aus zwei Schwebekörperdurchflussmessern (auf 6 bar, bei 20 °C geeicht) für die Bestimmung des Gasdurchsatzes, zweier Manometer (0 bis 15 bar) zur Kontrolle des Zerstäubungsgasdrucks, sowie einen Rotameter, für die Bestimmung der Flüssigkeitsmenge, mit einem Messbereich von 0 bis 20 l/min bei 20 °C, zusammen.

Zur Bestimmung der Tropfengröße wurde ein HELOS- VARIO Laser- Beugungsspektrometer der Firma Sympatec verwendet. Dieses Messgerät wird normalerweise zur Bestimmung von festen Partikelgrößen verwendet. Wie jedoch die Versuche zeigten ist es ebenso bestens dazu geeignet die Tropfengröße von flüssigen Medien zu bestimmen. Dazu wurde das Messgerät mit dem Rahmen vom restlichen Aufbau getrennt und mittels einer Folie und zweier Joghurtbecher gegen Spritzwasser geschützt. Der Aufbau ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Dieses Messprinzip ist eine Anwendung der Laserbeugung, da das Licht nicht nur an einen kleinen Spalt, sondern ebenso an kleinen Partikeln oder Flüssigkeitstropfen, in Abhängigkeit von deren Größe, gebeugt wird. Die Anordnung der Optik eines Beugungsspektrometers ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

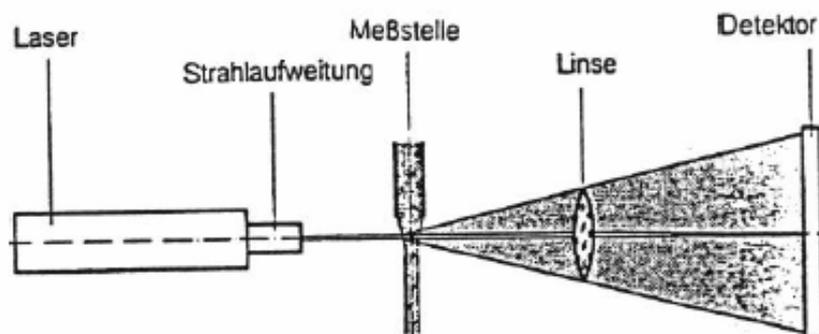


Bild 43: Beugungsspektrometer - Anordnung

Abbildung 5.4 Schematische Versuchsanordnung eines Beugungsspektrometers

Trifft nun das Spray an die Messstelle auf den aufgeweiteten Laserstrahl, so erzeugt dieser, in der Brennebene der nachgeschalteten Linse, ein Beugungsbild. Über den Detektor, mit verbundener Elektronik, werden schließlich die Daten mittels eines Glasfaserkabels zum Rechner transferiert, welcher daraus auf die entsprechende Tropfengrößenverteilung zurückrechnet.

Das System verwendet einen 5 mW He- Ne- Laser und ist in der Lage Tropfengrößen bzw. Partikelgrößen von 0,1 µm bis zu 1,8 mm zu messen. Dafür sind verschiedene Linsen mit unterschiedlichen Brennweiten an einen Revolverhalter montiert, welcher einen automatischen Messbereichswechsel ermöglicht [5].

Die sehr genauen Messungen bringen allerdings eine hohe Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen, wie z.B. Windböen oder Vibrationen mit sich.

5.2.3 Verwendete Düsen

Als Primärdüse kam für die Wasserversuche eine konvergente Düse mit 7mm Innendurchmesser und eine Laval- Düse mit 6 mm Innendurchmesser zum Einsatz. Die Versuche mit Glykose-Sirup und jene mit Zinn wurden gänzlich mit der konvergenten Düse durchgeführt.

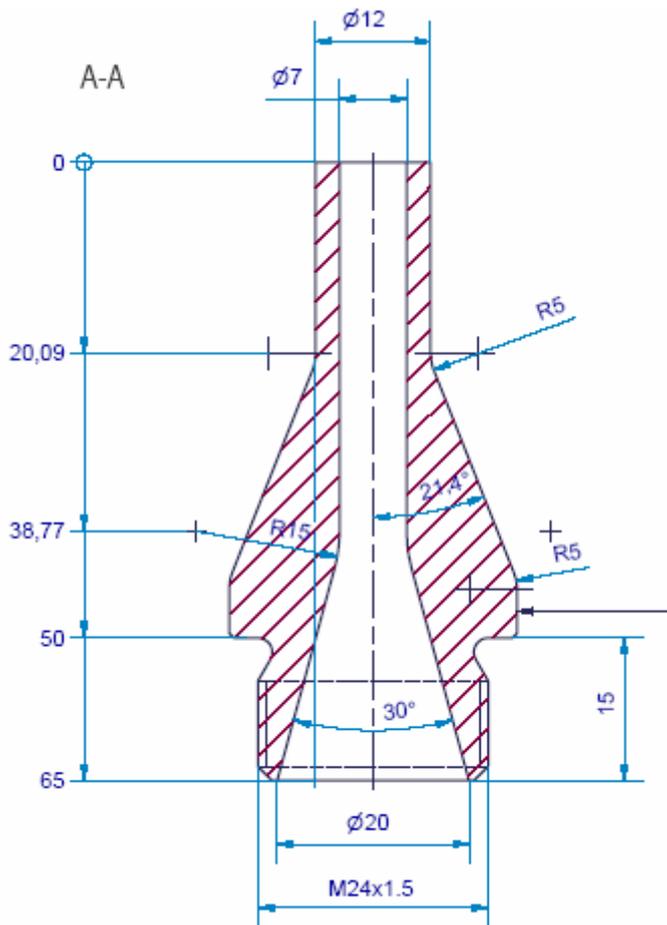


Abbildung 5.5 Abmessungen der konvergenten Primärdüse

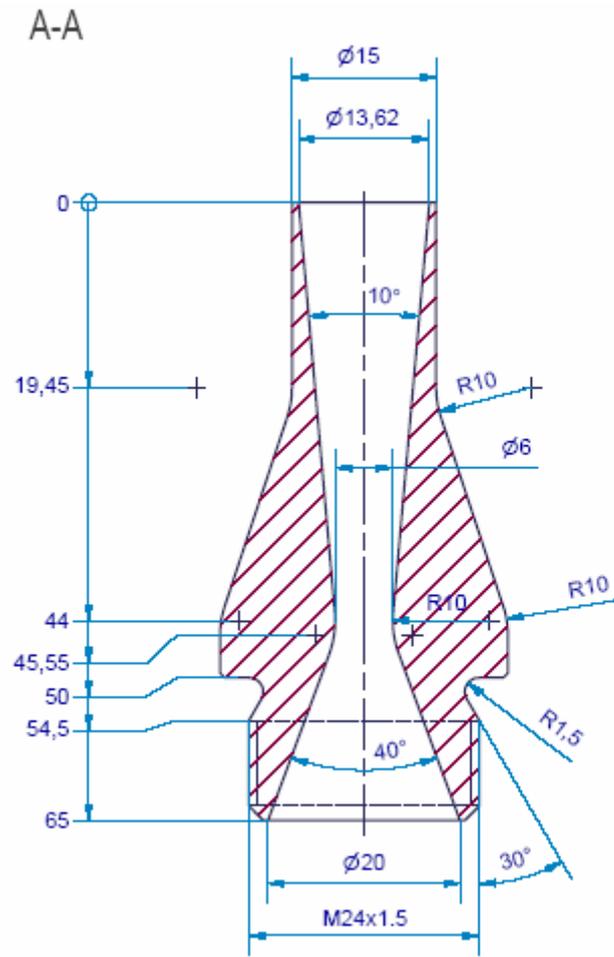


Abbildung 5.6 Abmessungen der Lavaldüse

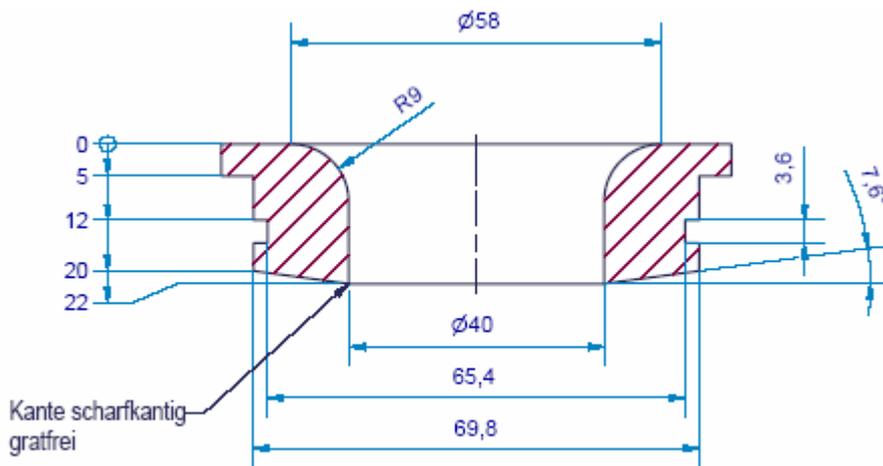


Abbildung 5.7 Abmessungen der Auslaufdüse

Sekundärseitig kam eine Ringdüse (24*1,5mm) zum Einsatz bei der die Neigung der Bohrungen in Zerstäubungsrichtung variiert wurde, dass bedeutet die 24 Bohrungen zeigen senkrecht in Zerstäubungsrichtung, sowie mit $+10^\circ$ und $+20^\circ$ Anstellwinkel hin zur Sprühkegelrichtung und schließlich noch mit einem Anstellwinkel von -12° vom Sprühkegel weg. Es wurde darauf verzichtet alle Sekundärdüsen darzustellen, Abbildung 5.5 zeigt die Düse mit $+10^\circ$ Winkel hin zum Spray. Erste Versuche, die Sekundärdüse aus Plexiglas zu fertigen um eine verbesserte Sicht auf den Zerstäubungsbereich zu haben, schlugen, aus gründen der verminderten Festigkeit, fehl. Die Düsen wurden mittels Innengewinde montiert und mit Teflonband abgedichtet.

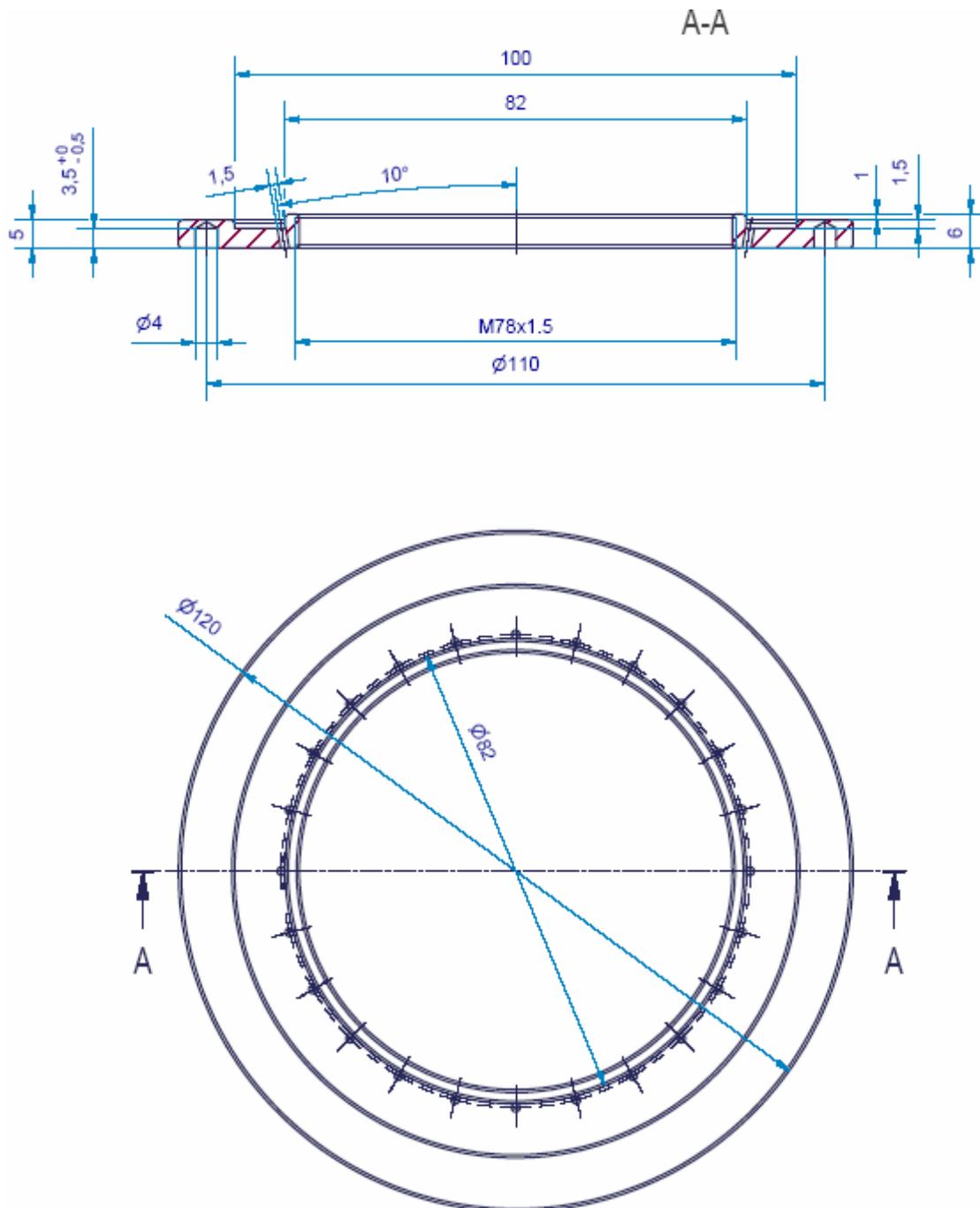


Abbildung 5.8 Abmessungen der Sekundärdüse

5.3 Versuchsmatrix

5.3.1 Medium Wasser

Die Kombination der verschiedenen Primär- und Sekundärdüsen sowie die dazu gehörigen Zerstäubungsparameter, wie Wassermengen und Luftdrücke werden hier darlegt. In Tabelle 5.1 sind die vorher abgebildeten Zerstäubungsdüsen (welche zu den Versuchen herangezogen wurden) und deren Kombination zu so genannten Desintegrationseinheiten dargestellt. Die daraus resultierenden sieben verschiedenen Desintegrationseinheiten, wurden allesamt mit den gleichen Zerstäubungsparametern vermessen, um einen relativen Vergleich zu ermöglichen und in Folge für die Versuche mit der Schlacke die effektivste Kombination zu ermitteln, sofern diese Aussage überhaupt getroffen werden kann. Die Zerstäubungsparameter die in Tabelle 5.2 dargestellt sind geben einen ausreichend großen Bereich hinsichtlich des ALR- Verhältnisses (Massenstromverhältnis Luft zu Wasser) an.

Da es nicht möglich war alle Parameter zu variieren, es wäre dies nicht durchführbar gewesen und hätte den Rahmen gesprengt, wurde der Wehrohrabstand konstant gehalten. Dieser wurde auf 0,5 mm eingestellt und fixiert. Die optimale Position der Primärdüse in der Auslaufdüse wurde am Beginn der Messung bestimmt. Hier wurde, bei jeweils 3,5 [bar] an beiden Düsen und einer Wassermenge von 8 [l/min], über die gesamte Länge der Auslaufdüse, in jeweils einem Millimeterschritt, die Tropfengröße gemessen. Die Position bei der die Tropfengröße den geringsten Wert aufwies wurde auch für die Versuchsreihen herangezogen. Genauer ist in Kapitel 6.2 dargestellt.

Die physikalischen Parameter des Wassers (bei 20°C, 1 bar) sind:

- Oberflächenspannung $\sigma_L = 72,75 \text{ [mN/m]}$
- Dynamische Viskosität $\eta_L = 10^{-3} \text{ [Pa*s]}$
- Dichte $\rho_L = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Tabelle 5.1 Verwendete Düsen

Primärdüsen	Sekundärdüsen			
Konvergent d=7mm	1,5mm*24 0°	1,5mm*24 10°	1,5mm*24 20°	1,5mm*24 +12°
Laval d=6.4mm	1,5mm*24 0°	1,5mm*24 10°		1,5mm*24 +12°

Tabelle 5.2 Zerstäubungsparameter

Luftdruck [bar]	Wassermengen [l/min]			
2,5	6	8	10	11
3,5	6	8	10	11
5	6	8	10	11
6,5	6	8	10	11

5.3.2 Medium Glykose-Sirup

Laut den Angaben des Herstellers (Agrana GmbH, In Wien) handelt es sich bei Glykose-Sirup um eine Mischung von Glukose, Maltose und mit einen Anteil von über 50 Gew.%. Polysacharide.

Da der Hersteller keine physikalischen Angaben zum Glykose-Sirup anführte, wurde in Anlehnung an die Lösungen von Kohlehydraten in Wasser, der Wert für die Oberflächenspannung mit 75 mN/m festgelegt

Die unter 5.4.2 erläuterten Probleme ergaben eine etwas modifizierte Versuchsmatrix. So wurden nur eine Primärdüse und eine Sekundärdüse vermessen, nämlich die konvergente Düse (7mm) und die Sekundärdüse (1,5mm*24; 10°). Die Zerstäubungsdrücke blieben gleich, der Wehrröherspalt wurde auf 1mm vergrößert. Auf den Glykose-Sirup- Strom von 10 [l/min] musste verzichtet werden.

Die physikalischen Parameter des Glykose-Sirup (bei 18 °C, 1bar) sind:

- Oberflächenspannung des Glykose-Sirup $\sigma=75$ [mN/m]
- Dynamische Viskosität des Glykose-Sirup $\eta=0,33$ [Pa*s]
- Dichte des Glykose-Sirup $\rho=1600$ [kg/m³]

Tabelle 5.3 Zerstäubungsparameter für Glykose-Sirup

Luftdruck [bar]	Glykose-Sirup- Volumenstrom [l/min]		
	2,5	6	8
3,5	6	8	11
5	6	8	11
6,5	6	8	11

5.4 Versuchsdurchführung

Nach der Fertigstellung des Versuchsturms und der Zerstäubungseinheit mit den einzelnen Düsen folgte nach einigen Probeläufen, bzw. Funktionstests, der Aufbau des HELOS Messinstrumentes. Die Sende- und die Empfangseinheit des HELOS wurde auf einer Schiene montiert, die Schiene wiederum ist beweglich und so auf einen Rahmen befestigt, dass eine Bewegung in horizontaler Richtung möglich ist, dies wird im Bild 5.8 ersichtlich. Weiters musste noch die Sende- und Empfangseinheit mithilfe einer Folie gegen das Spritzwasser geschützt werden. Bevor jedoch mit den Messungen begonnen werden konnte musste noch ein gravierendes Problem beseitigt werden.

Die relativ großen Wasserströme und der damit verbundenen hohen Optischen Dichte des Sprays überstiegen den Messbereich des HELOS. Das bedeutet es war nicht möglich das HELOS in der Mitte des Sprays zu positionieren. Als Erstes versuchte man einen Teil des Sprays auszublenden bzw. abzulenken. Dies sollte mit zwei Ablenkblechen erreicht werden, wie im Bild 5.7 dargestellt. Wie jedoch erste Versuche zeigten konnte keine klare Aussage über die Entstehung der Tropfen getroffen werden, das heißt es war nicht klar ersichtlich ob die Tropfen von der Zerstäubung her rühren oder durch andere Prozesse an den Ablenkblechen entstanden sind. Da keine andere Möglichkeit bestand, bzw. gefunden werden konnte, einen Teil des Sprays auszublenden wurde, bei einer geringen Wassermenge, der komplette Spray- Kegel vermessen. Dazu wurde das Messgerät durch den Zerstäubungskegel bewegt. Es zeigten sich nur geringste Abweichungen in der Größe der Tropfen bzw. ein nahezu symmetrisches Spray.

Da die HELOS- Software permanent die optische Dichte des Sprays misst, wurde das Messgerät soweit als möglich in den Zerstäubungskegel bewegt, bis die Anzeige am Rechner in etwa 85% (+/- 3%) als Wert für die optische Dichte angab. Da diese die bestmögliche Methode darstellte wurden alle Düsenkombinationen auf die gleiche Art vermessen.



Abbildung 5.9 Abdeckbleche zur teilweisen Ablenkung des Sprays



Abbildung 5.10 Aufbau des Messgeräts am Versuchsturm

Die Entfernung vom Ende der Auslaufdüse (Abrisskante), zum Ort der Messung (Laser-Achse) beträgt 700mm, das zu vermessende Spray hat auf dieser Ebene einen Durchmesserbereich von 300 mm bis 400 mm. Die Distanz zwischen Sendeeinheit und der Empfangseinheit beläuft sich auf 750 mm.

5.4.1 Durchführung der Messung – Medium Wasser

Die einzelnen Schritte zur Versuchsdurchführung sind hier zusammenfassend aufgelistet. Vorher wird noch die entsprechende Düsenkombination eingebaut und der Wehrohrabstand eingestellt.

- Starten des HELOS Messinstruments (Aufheizzeit des Lasers ca. 10 min) und des Rechners
- Kontrolle aller Schnellkupplungen und starten des Kompressors
- Starten der Pumpe für das Zerstäubungsmedium (Wasser, Glukose)
- Einstellen der Flüssigkeitsmenge und warten auf einen konstanten Pegelstand in der Kokille
- Einstellung der Zerstäubungsdrücke an beiden Düsen
- Starten der Messung und warten auf einen relativ konstanten Wert der Tropfengröße das eventuelles nachkorrigieren der Zerstäubungsdrücke.
- Notieren der Messungsnummer für gemessenen d_{50} in das Versuchsdatenblatt

- Einstellen des nächsten Zerstäubungsdruckes; Messen; Aufzeichnen
- Einstellen der nächsten Flüssigkeitsmenge und Wiederholen des obigen Ablaufs

5.4.2 Durchführung der Messung- Medium Glykose-Sirup

Die Messung der Tropfengröße erfolgte grundsätzlich ähnlich jener der Wassermessung. Unterschiedlich war jedoch die Bestimmung der Durchflussmenge. Diese konnte, aufgrund der unterschiedlichen Viskosität und Dichte, nicht mit dem Rotameter gemessen werden. Der Glykose-Sirup- Massenstrom musste mit Stoppuhr und Eimer bestimmt werden und nach genauer Einstellung auf die Durchflussmengen von **6 l/min**, **8 l/min** und **11 l/min** in die Kokille hin zur Zerstäubungseinrichtung geleitet werden. Auf die Durchflussmenge von **10 l/min** wurde verzichtet, da auch so ein entsprechender Trend herauszulesen war.

Die Gründe hierfür waren die sich zu stark ändernden Bedingungen im Zerstäubungsmedium, sowie die immer klebriger werdenden Verhältnisse am Versuchsturm. Hinzu kamen noch die verschiedensten Arten an heimischen Wespen, Bienen und Hornissen, welche sich in immer größer werdender Anzahl versammelten. Die Versuche wurden letztlich in einem Imkergewand durchgeführt und weitere Versuchsreihen konnten unter diesen Bedingungen leider nicht mehr durchgeführt werden. Die Bilder unter Abschnitt 6.5 sollten einen ausreichenden Eindruck vermitteln können.

Die Bestimmung der Viskosität erfolgte direkt vor der Messung indem aus dem Glukosefluss eine Probe gezogen und bestimmt wurde. Dabei war ein gravierender Anstieg des Viskositätswertes, im Laufe der verschiedenen Messungen, von anfänglichen 210 [mPa*s] auf 330 [mPa*s] zu beobachten. Möglichkeiten können zum einen die Anreicherung des Glykose –Sirups mit Luft (zu erkennen an der milchigen Farbe), zum anderen auch durch die teilweise Verdunstung des Wassers aus dem Glykose-Sirup herrühren. Genauer konnte dies jedoch nicht geklärt werden. Um alle Versuche mit der gleichen Viskosität durchzuführen wurden die Versuche mit 6 l/min nochmals wiederholt.

Der Versuchsablauf zur Glykose-Sirup Messung ist nun wie folgt.

- Starten des HELOS Messinstruments (Aufheizzeit des Lasers ca. 10 min) und des Rechners
- Kontrolle aller Schnellkupplungen und starten des Kompressors
- Starten der Pumpe für das Zerstäubungsmedium Glykose-Sirups
- Einstellen der Flüssigkeitsmenge, wie oben beschrieben und warten auf einen konstanten Pegelstand in der Kokille
- Entnehmen eine Probe zur Bestimmung der Viskosität
- Einstellen der Zerstäubungsdrücke an beiden Düsen und starten der Messungen, warten auf einen relativ konstanten Wert der Tropfengröße und eventuelles nachkorrigieren der Zerstäubungsdrücke.
- Notieren der Messungsnummer für gemessenen d_{50} in das Versuchsdatenblatt

6 Experimentelle Ergebnisse

Dieses Kapitel umfasst alle gemessenen und berechneten Größen und deren grafischen Darstellung. Hierzu zählen alle Daten der einzelnen Versuche. Dazu gehört die Bestimmung der Luft- und Flüssigkeitsdurchsätze, die Umrechnung in die ALR- Verhältnisse sowie die Messung der Tropfengröße.

6.1 Auswertung Allgemein

Zur Bestimmung des ALR- Verhältnisses wurden die abgelesenen Werte der Schwebekörper-Durchflussmessgeräte nach der vom Hersteller angegebenen Gleichung (6-1), umgerechnet und mit den theoretischen, verglichen und diese dann über die Dichte der Luft in kg pro Stunde umgeformt. Der Unterschied zwischen den berechneten Werten und den abgelesenen Werten kommt zum einen von etwaigen Messfehlern des Schwebekörperdurchflussmessgeräts, undichten Stellen an den Schnellkupplungen und Leitungsverlusten.

In der Tabelle 6.1 sind die Luftdurchsätze der einzelnen Düsen dargestellt. Hierbei stellen die linken drei Spalten die abgelesenen Werte vom Schwebekörperdurchflussmessgerät und die rechten drei Spalten die, mittels Druckkorrektur (geeicht auf 6 bar; bei 20°C) umgerechneten, realen Werte dar.

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{p}{6}} * \dot{V}_{abgelesen} \quad (6-1)$$

Die Dichte der Luft beträgt bei Normalbedingungen 1,29 [kg/Nm³] und daraus ergibt sich Tabelle 6.5 die Durchsätze der Luft in [kg/h] aus welchen nun die ALR- Verhältnisse bestimmt wurden.

$$ALR = \frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Wasser}} \quad (6-2)$$

Für die Berechnung der theoretischen Luftdurchsätze, um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde Gleichung (6-3), vom Hersteller des Schwebekörperdurchflussmessgeräts, verwendet. Daraus ergeben sich für die Düsen folgende theoretische Massenströme [kg/h], die in den Tabellen 6.2 bis 6.4 dargestellt werden.

$$\dot{m} = K_1 * A * \frac{p_k}{\sqrt{T}} * 3600 \quad (6-3)$$

Zusammenfassend sind in Tabelle 6.5 die verwendeten Düsen mit den dazugehörigen Massenströmen dargestellt.

Tabelle 6.1 Durchsätze der eingesetzten Düsen

Druck [bar]	Konv. Durchfluss Abgelesen [Nm ³ /h]	Laval Durchfluss Abgelesen [Nm ³ /h]	Sek. Durchfluss Abgelesen [Nm ³ /h]	Konv. Durchfluss Umgerechnet [Nm ³ /h]	Laval Durchfluss Umgerechnet [Nm ³ /h]	Sek. Durchfluss Umgerechnet [Nm ³ /h]
2,5	62	53	62	40,0	34,2	40,0
3	75	62	74	53,0	43,8	52,3
3,5	87	73	86	66,4	55,8	65,7
4	98	84	98	80,0	68,6	80,0
4,5	109	94	110	94,4	81,4	95,3
5	120	104	122	109,5	94,9	111,4
5,5	132	115	133	126,4	110,1	127,3
6	142	125	145	142,0	125,0	145,0
6,5	153	134	157	159,2	139,5	163,4
7	165	145	168	178,2	156,6	181,5

Tabelle 6.2 Vergleich der abgelesenen Werte mit den errechneten Werten der konvergenten- Düse

Druck [bar]	Luftdurchsatz errechnet [kg/h]	Abgelesene Werte [kg/h]
2,5	80,9	51,8
3,0	97,1	68,6
3,5	113,3	85,9
4,0	129,5	103,5
4,5	145,6	122,1
5,0	161,8	141,6
5,5	178,0	163,4
6,0	194,2	183,6
6,5	210,4	205,9
7,0	226,5	230,4

Tabelle 6.3 Vergleich der abgelesenen Werte mit den errechneten Werten der Lavaldüse

Druck [bar]	Luftdurchsatz errechnet [kg/h]	Abgelesene Werte [kg/h]
2,5	67,6	44,2
3,0	81,2	56,7
3,5	94,7	72,1
4,0	108,2	88,7
4,5	121,7	105,3
5,0	135,3	122,8
5,5	148,8	142,4
6,0	162,3	161,6
6,5	175,8	180,3
7,0	189,4	202,5

Tabelle 6.4 Vergleich der abgelesenen Werte mit den errechneten Werten der Sekundär- Düse

Druck [bar]	Luftdurchsatz errechnet [kg/h]	Abgelesene Werte [kg/h]
2,5	89,2	51,8
3,0	107,0	67,7
3,5	124,8	84,9
4,0	142,7	103,5
4,5	160,5	123,2
5,0	178,3	144,0
5,5	196,2	164,7
6,0	214,0	187,5
6,5	231,8	211,3
7,0	249,7	234,6

Tabelle 6.5 Massenströme der eingesetzten Düsen in [kg/h]

Konvergente Düse Durchfluss [kg/h]	Laval Düse Durchfluss [kg/h]	Sekundär Düse Durchfluss [kg/h]	Druck [bar]
51,7	44,2	51,7	2,5
68,6	56,7	67,7	3
85,9	72,1	84,9	3,5
103,5	88,7	103,5	4
122,1	105,3	123,2	4,5
141,6	122,8	144,0	5
163,4	142,4	164,6	5,5
183,6	161,6	187,5	6
205,9	180,3	211,3	6,5
230,4	202,5	234,6	7

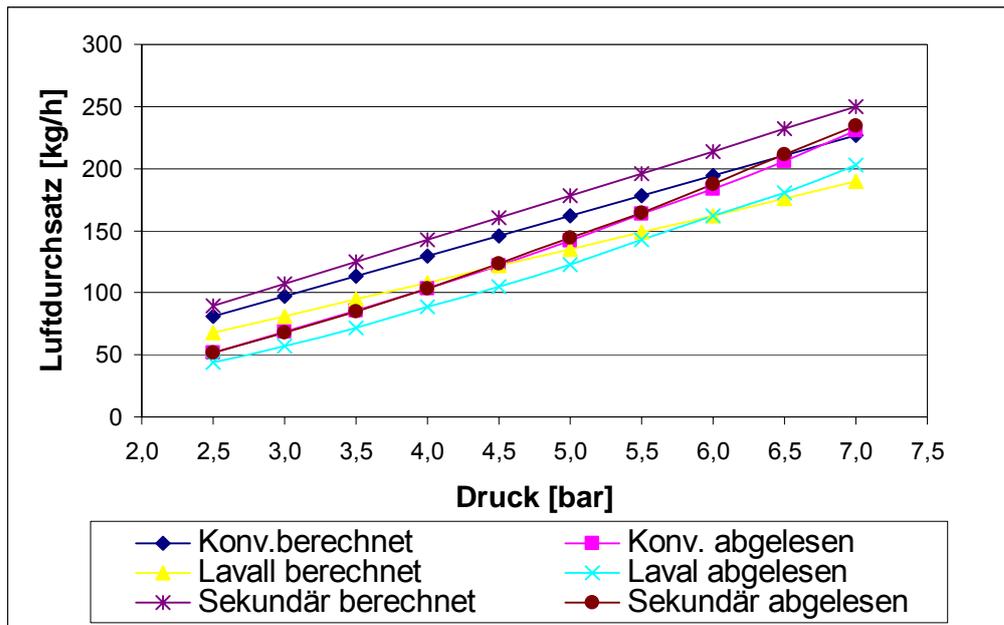


Abbildung 6.1 Vergleich der berechneten Werte mit den abgelesenen und nach Gl. (6-1) umgerechneten Werten des Schwebekörperdurchflussmessgeräts

6.2 Vergleich der Zerstäubungsqualität bei den drei untersuchten Stoffsystemen

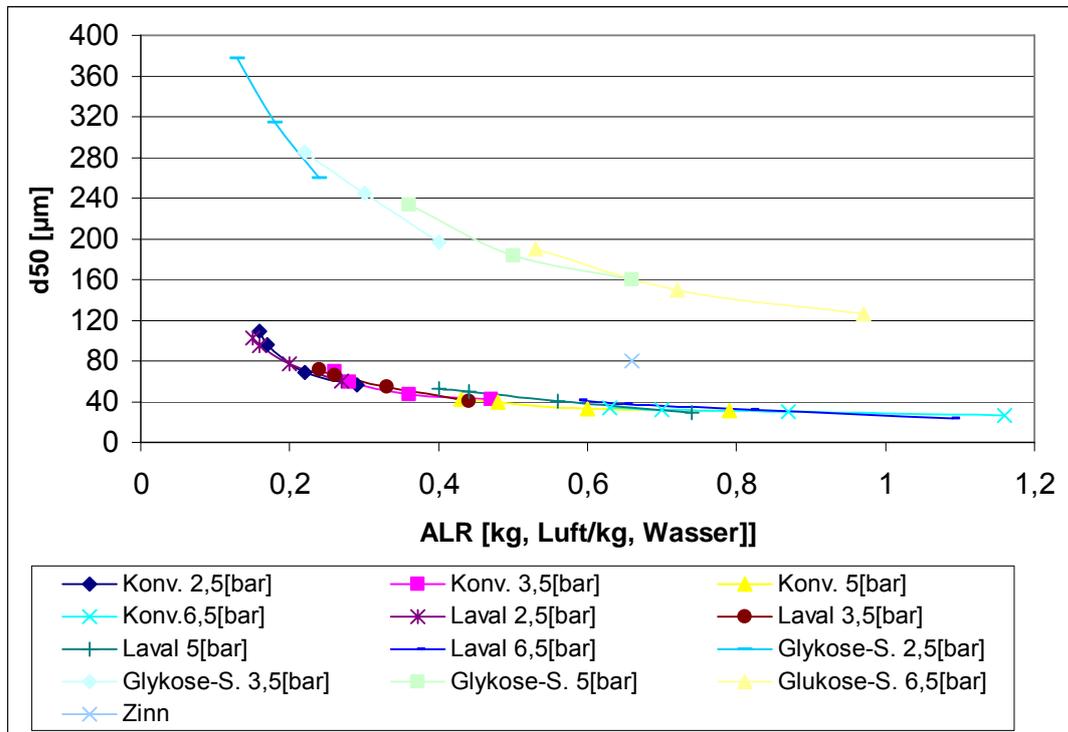


Abbildung 6.2 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für verschiedene Medien (Wasser, Glykose-Sirup, Zinn) bei einem Anstellwinkel der Sekundärdüse von 10°

Bei Betrachtung von Abbildung 6.1 wird ersichtlich, welchen großen Einfluss die Viskosität auf die Größe der entstehenden Tropfen hat, im Gegensatz dazu spielt die Dichte eines Mediums eine eher untergeordnete Rolle, allerdings muss hinzugefügt werden, dass die Viskosität von Zinn mit jener des Wassers vergleichbar ist.

Die wohl wichtigste Aussage aller durchgeführten Messungen ist jedoch jene, dass der Druck, mit welchem die Düsen beschickt werden, nicht den geringsten Einfluss auf das Resultat der Zerstäubung hat. Er spielt nur insofern eine Rolle, dass mit Erhöhung des Drucks auch eine Steigerung des Durchsatzes und damit ein höheres ALR-Verhältnis einhergeht.

Der Unterschied zwischen den Primärdüsen liegt in einem sehr kleinen Bereich, es ist also irrelevant, ob man eine Laval- oder eine konvergente Düse zum Einsatz bringt, erstere macht nur dann einen Sinn, wenn diese auch wirklich auf jene Parameter am Betriebspunkt des Prozesses ausgelegt wurden. Ebenso verhält es sich mit der Position der Primärdüse in der Auslaufdüse (dargestellt in den Abbildungen 6.2 und 6.9.). Diese hat keinen großen Einfluss auf die entstehenden Tropfen, trotzdem sollte sich die Primärdüse hinsichtlich der Schlackenversuche, am unteren Ende der Auslaufdüse befinden.

Der unterschiedliche Anstellwinkel der Sekundärdüsen zeigte, dass eine nach außen oder senkrecht gerichtete Sekundärdüse ($+12^\circ$ und 0°) einen negativen Einfluss auf die Tropfengröße hat, da geringere Gasgeschwindigkeiten auftreten. Zwischen den nach innen gerichteten Düsen (10° und 20°) gibt es keine großen Unterschiede, trotzdem entschied man sich für die Schlackenversuche die 10° Sekundärdüse, welche ein besseres Zerstäubungsbild hatte, einzusetzen.

6.3 Wasserversuche mit der konvergenten Düse

Wie bereits in der Versuchsmatrix unter 5.3 beschrieben konnten nicht alle Parameter variiert werden. So wurde die Position der Primärdüse in der Auslaufdüse nur am Beginn vermessen. Der Druck an beiden Düsen betrug immer **3,5 bar** und bei einer Wassermenge von jeweils **8 l/min** wurde nun in Millimeterschritten Messungen des d_{50} vorgenommen. Als Nullniveau diente die Unterseite der Auslaufdüse.

Die starken, periodisch auftretenden, Schwankungen der Tropfengröße hatten ihren Grund in der Steigung des Gewindes, diese betrug genau 2mm. Das bedeutet das die doch sehr lange Primärdüsenlanze nicht, bzw. nur bei jeweils einer vollen Umdrehung wieder genau in der Mitte der Auslaufdüse positioniert war. Für die weiteren Versuche sollte dies jedoch nicht von Belang sein, da die Position bei 8mm, für die alle Messungen mit der konvergenten Düse, beibehalten wurde. Prinzipiell kann der Schluss gezogen werden, dass eine kleine Variation der Position der Primärdüse in der Auslaufdüse keinen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Tropfengröße hat. Die Tropfengröße im Bereich von 4 mm bis 12 mm ist nahezu konstant. Ein offensichtlich schlechteres Resultat erhält man nur in den oberen und unteren Bereichen, also beim Verlassen der Auslaufdüse nach oben oder unten.

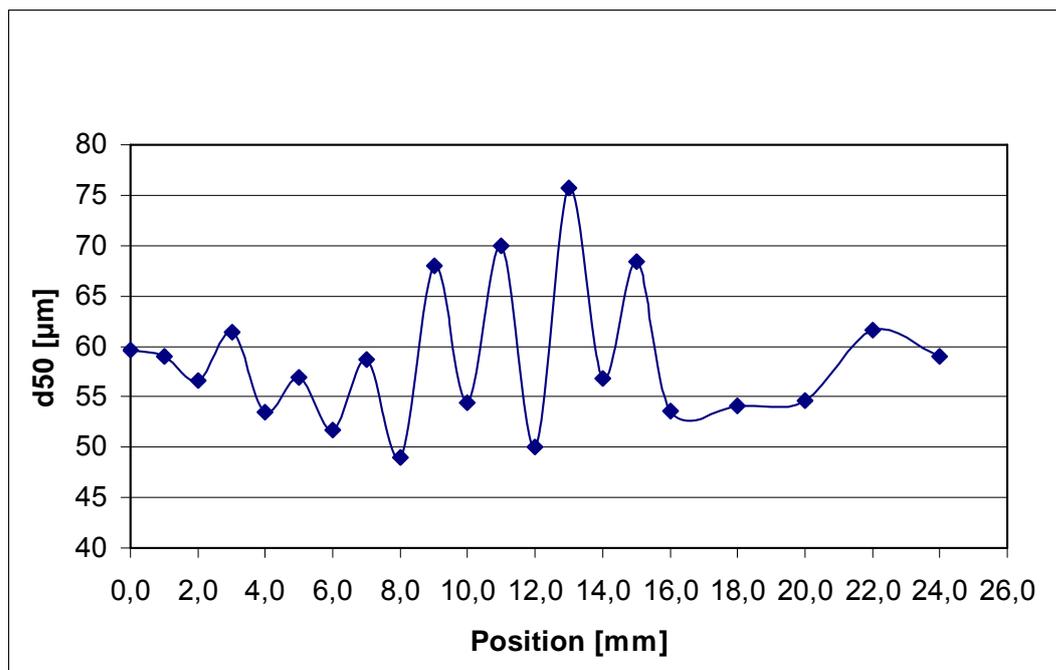


Abbildung 6.3 Auswirkung der vertikalen Position der Primärdüse in der Auslaufdüse auf die Zerstäubungsqualität

Tabelle 6.5 ALR- Verhältnisse der konvergenten Düse

Durchfluss Wasser [kg/h]	ALR	ALR	ALR	ALR
	[kg, Luft/kg,H ₂ O]			
	Für 2,5 [bar]	Für 3,5 [bar]	Für 5 [bar]	Für 6,5 [bar]
360	0,29	0,47	0,79	1,16
480	0,22	0,36	0,60	0,87
600	0,17	0,28	0,48	0,70
660	0,16	0,26	0,43	0,63

**Abbildung 6.4** Zerstäubung bei 2,5bar und 10l/min (linkes Bild) und Zerstäubung bei 6,5bar und 10l/min (rechtes Bild)

Im den Abbildungen 6.3 und 6.4 wird ersichtlich welcher Effekt bei einer Steigerung des Gasdurchsatzes, bei einen gleich bleibenden Flüssigkeitsstrom, eintritt. Durch Erhöhung des ALR-Verhältnisses wird die Sogwirkung der Düse höher, dies ist an der Unterseite der Primärdüse sichtbar. Ebenso klar ersichtlich sind ein wesentlich feineres Spray in Abbildung 6.4, sowie ein kürzerer Bereich des zerwellenden Flüssigkeitsfilms, bevor Zerstäubung eintritt. Die sichtbare Aufweitung des Sprays in Abbildung 6.4 wird von der Sekundärdüse (10° Winkel) hervorgerufen und ist wesentlich stärker als bei 2,5 bar Druck.

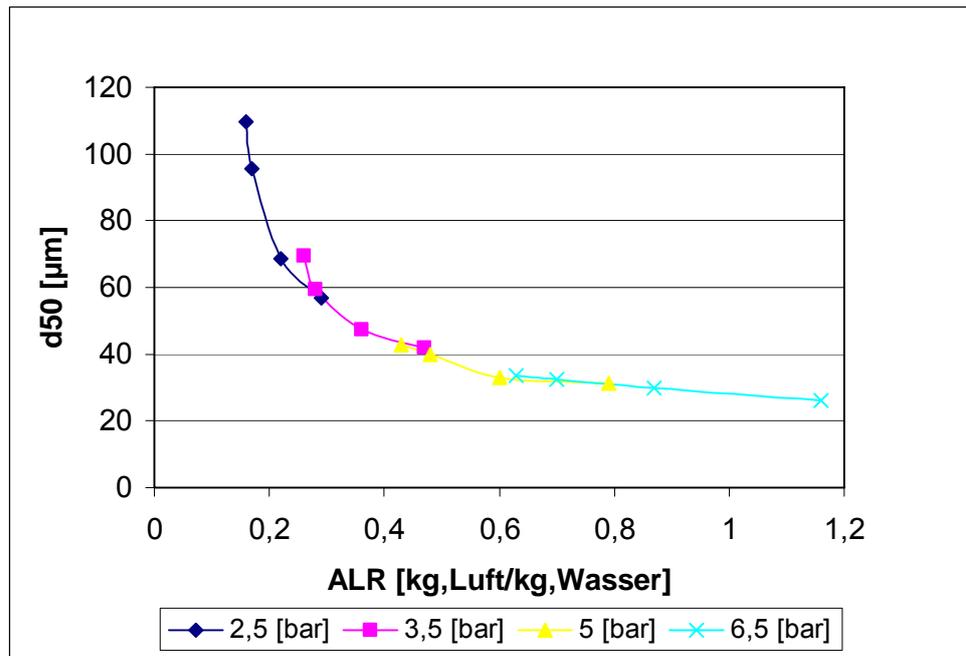


Abbildung 6.5 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°)

Tabelle 6.6 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	103,5	0,29	57
480	2,5	103,5	0,22	69
600	2,5	103,5	0,17	96
660	2,5	103,5	0,16	110
360	3,5	170,9	0,47	42
480	3,5	170,9	0,36	47
600	3,5	170,9	0,28	59
660	3,5	170,9	0,26	69
360	5	285,6	0,79	31
480	5	285,6	0,60	33
600	5	285,6	0,48	40
660	5	285,6	0,43	43
360	6,5	417,2	1,16	26
480	6,5	417,2	0,87	30
600	6,5	417,2	0,70	32
660	6,5	417,2	0,63	34

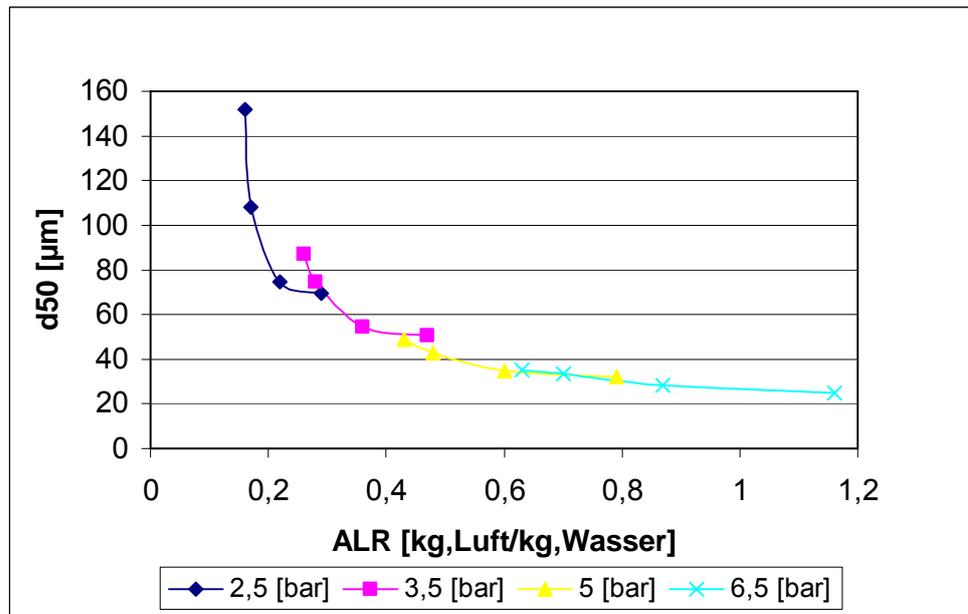


Abbildung 6.6 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°)

Tabelle 6.7 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	103,5	0,29	69
480	2,5	103,5	0,22	75
600	2,5	103,5	0,17	108
660	2,5	103,5	0,16	152
360	3,5	170,9	0,47	51
480	3,5	170,9	0,36	55
600	3,5	170,9	0,28	75
660	3,5	170,9	0,26	87
360	5	285,6	0,79	32
480	5	285,6	0,6	35
600	5	285,6	0,48	43
660	5	285,6	0,43	49
360	6,5	417,2	1,16	25
480	6,5	417,2	0,87	28
600	6,5	417,2	0,7	33
660	6,5	417,2	0,63	34

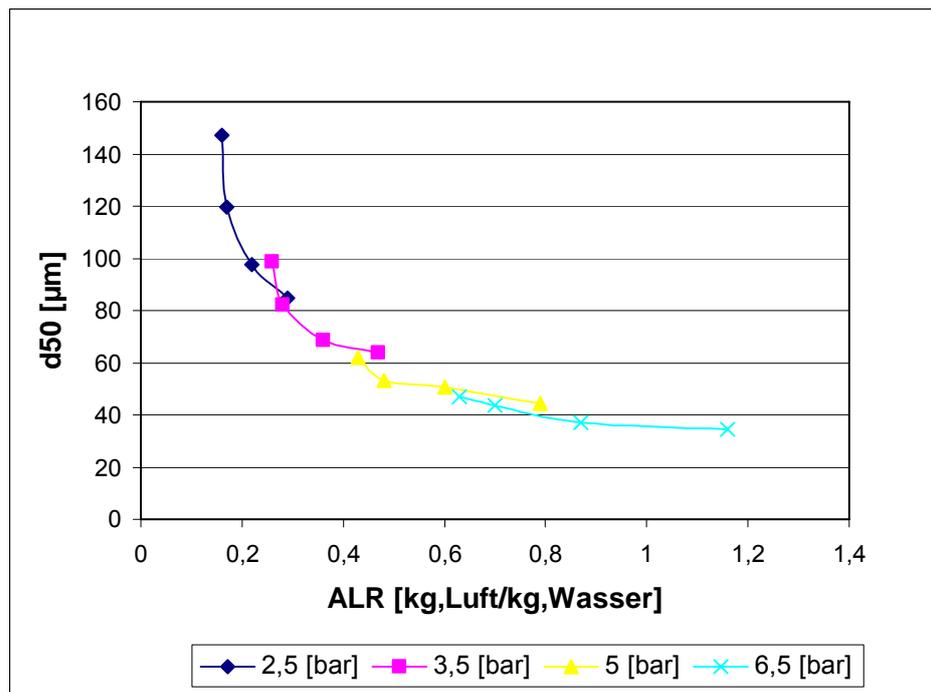


Abbildung 6.7 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°)

Tabelle 6.8 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	103,5	0,29	85
480	2,5	103,5	0,22	98
600	2,5	103,5	0,17	120
660	2,5	103,5	0,16	147
360	3,5	170,9	0,47	64
480	3,5	170,9	0,36	69
600	3,5	170,9	0,28	82
660	3,5	170,9	0,26	99
360	5	285,6	0,79	44
480	5	285,6	0,6	51
600	5	285,6	0,48	53
660	5	285,6	0,43	62
360	6,5	417,2	1,16	35
480	6,5	417,2	0,87	37
600	6,5	417,2	0,7	44
660	6,5	417,2	0,63	47

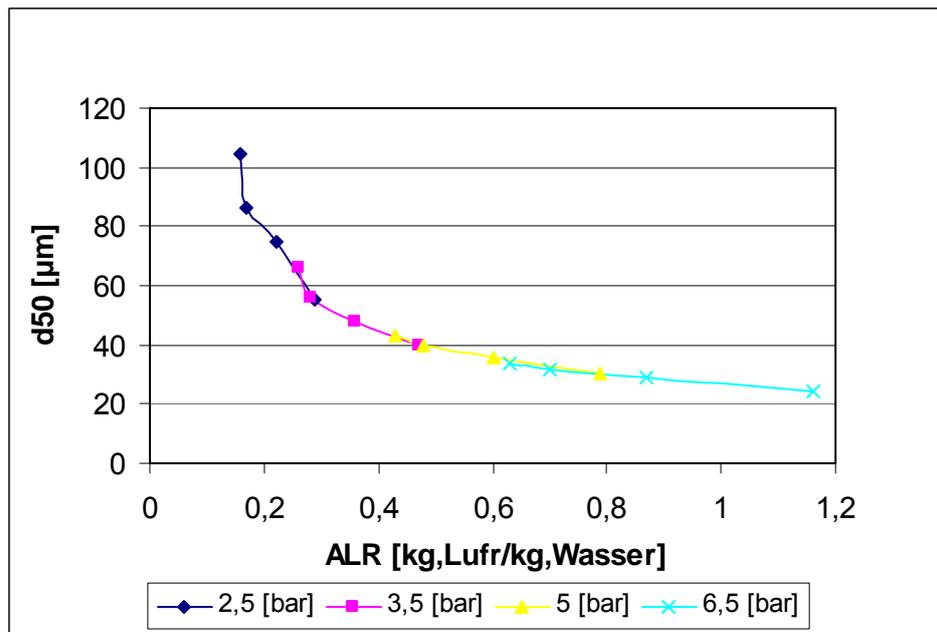


Abbildung 6.8 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die konvergente Primärdüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +20°)

Tabelle 6.9 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die konvergente Düse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +20°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	103,5	0,29	55
480	2,5	103,5	0,22	75
600	2,5	103,5	0,17	86
660	2,5	103,5	0,16	105
360	3,5	170,9	0,47	40
480	3,5	170,9	0,36	48
600	3,5	170,9	0,28	56
660	3,5	170,9	0,26	66
360	5	285,6	0,79	31
480	5	285,6	0,6	36
600	5	285,6	0,48	40
660	5	285,6	0,43	43
360	6,5	417,2	1,16	25
480	6,5	417,2	0,87	29
600	6,5	417,2	0,7	32
660	6,5	417,2	0,63	34

6.4 Wasserversuche mit der Lavaldüse

Wie bei der konvergenten Düse wurde auch die Lavaldüse in der Auslaufdüse vermessen. Die Vorgehensweise war gleich. Der Druck an beiden Düsen betrug immer **3,5 bar** bei einer Wassermenge von jeweils **8 l/min**. Es wurde nun in Millimeterschritten Messungen des d_{50} vorgenommen, als Nullniveau diente die Unterseite der Auslaufdüse, allerdings wurden auch Bereiche außerhalb der Auslaufdüse vermessen. Die periodischen Schwankungen sind hier noch deutlicher zu erkennen. Für die Restlichen Versuche wurde die Position mit 7mm festgelegt.

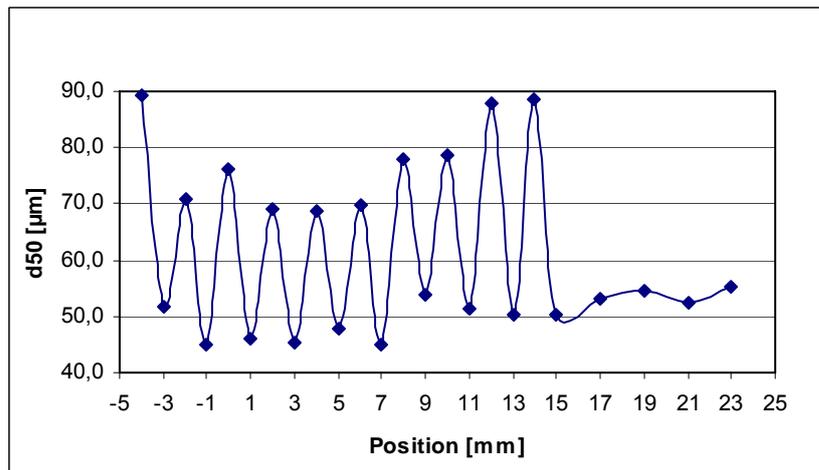


Abbildung 6.9 Auswirkung der vertikalen Position der Primärdüse in der Auslaufdüse auf die Zerstäubungsqualität



Abbildung 6.10 Lavaldüse bei 3,5 bar und 6l/min; Position der Lavaldüse ist 4mm unterhalb der Auslaufdüse



Abbildung 6.11 Lavaldüse bei 3,5bar und 6l/min; Position der Lavaldüse ist 20 mm oberhalb der Auslaufdüse

In den Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigt sich das erzeugte Spray von der Lavaldüse in Kombination mit der Null Grad Sekundärdüse. Die Position der Lavaldüse im Bild 6.8 ist 4 mm unterhalb der Abrisskante der Auslaufdüse, bei einem Druck von 3,5 bar auf beiden Düsen und einer Wassermenge von 6 l/min. Die Lavaldüse ist sehr gut sichtbar, weiters zeigt sich die Bildung von Flüssigkeitsfäden und deren Zerfall in ein Spray bei dem auch die Auswirkungen der Sekundärdüse sichtbar werden. In Bild 6.9 ist die Position der Lavaldüse 20 mm oberhalb der Abrisskante bei gleichen Zerstäubungsparametern. Der Bereich der Zerstäubung ist, wie zu erwarten näher an der Auslaufdüse und auch hier sind, auch aufgrund der geringen Wassermenge, die Flüssigkeitsfäden deutlich sichtbar.

Tabelle 6.10 ALR- Verhältnisse der Lavaldüse

Durchfluss Wasser [kg/h]	ALR	ALR	ALR	ALR
	[kg, Luft/kg,H ₂ O]			
	Für 2,5 [bar]	Für 3,5 [bar]	Für 5 [bar]	Für 6,5 [bar]
360	0,27	0,44	0,74	1,09
480	0,20	0,33	0,56	0,82
600	0,16	0,26	0,44	0,65
660	0,15	0,24	0,40	0,59

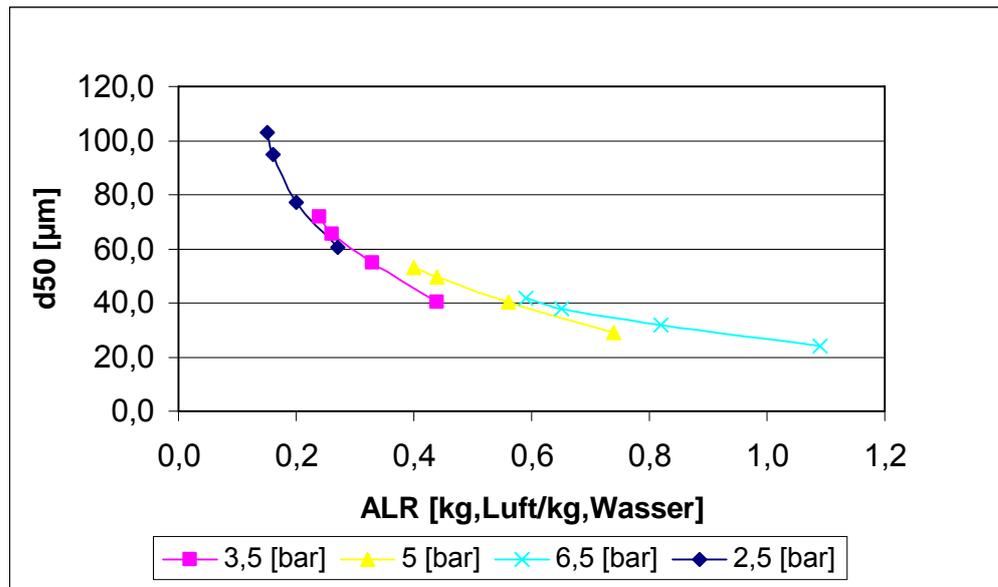


Abbildung 6.12 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die Lavaldüse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°)

Tabelle 6.11 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die Lavaldüse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	96,0	0,27	61
480	2,5	96,0	0,20	77
600	2,5	96,0	0,16	95
660	2,5	96,0	0,15	103
360	3,5	157,0	0,44	40
480	3,5	157,0	0,33	55
600	3,5	157,0	0,26	66
660	3,5	157,0	0,24	72
360	5,0	266,8	0,74	29
480	5,0	266,8	0,56	40
600	5,0	266,8	0,44	50
660	5,0	266,8	0,40	53
360	6,5	391,6	1,09	24
480	6,5	391,6	0,82	32
600	6,5	391,6	0,65	38
660	6,5	391,6	0,59	42

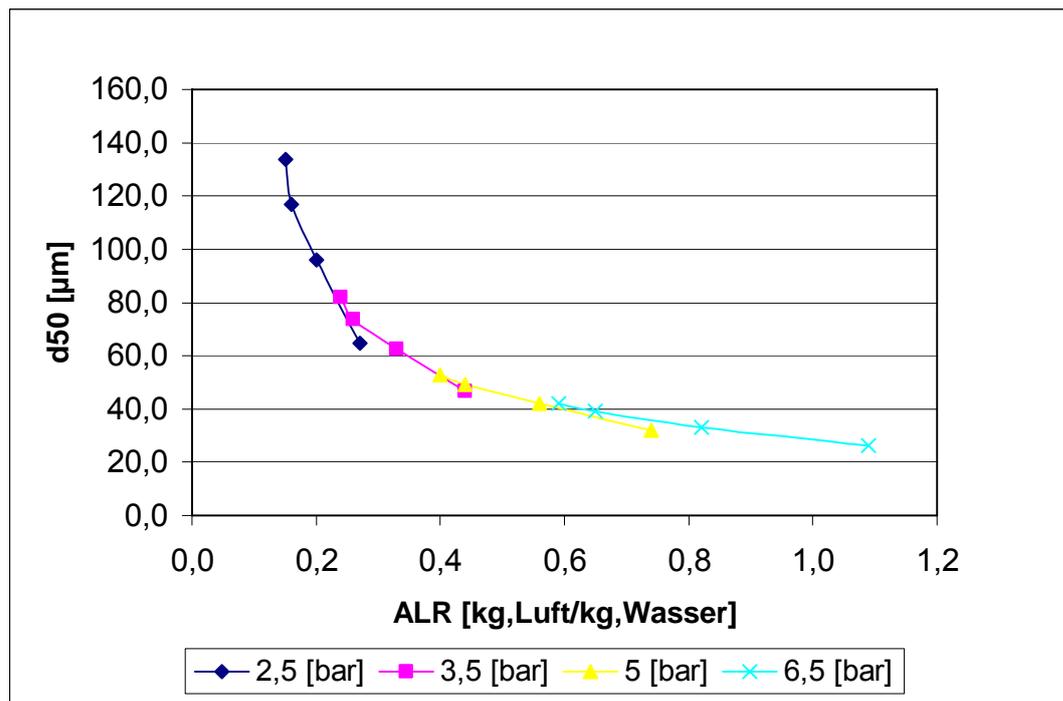


Abbildung 6.13 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die Laval düse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°)

Tabelle 6.12 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die Lavaldüse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel 0°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	96,0	0,27	65
480	2,5	96,0	0,20	96
600	2,5	96,0	0,16	117
660	2,5	96,0	0,15	134
360	3,5	157,0	0,44	47
480	3,5	157,0	0,33	63
600	3,5	157,0	0,26	74
660	3,5	157,0	0,24	82
360	5,0	266,8	0,74	32
480	5,0	266,8	0,56	42
600	5,0	266,8	0,44	49
660	5,0	266,8	0,40	53
360	6,5	391,6	1,09	26
480	6,5	391,6	0,82	33
600	6,5	391,6	0,65	39
660	6,5	391,6	0,59	42

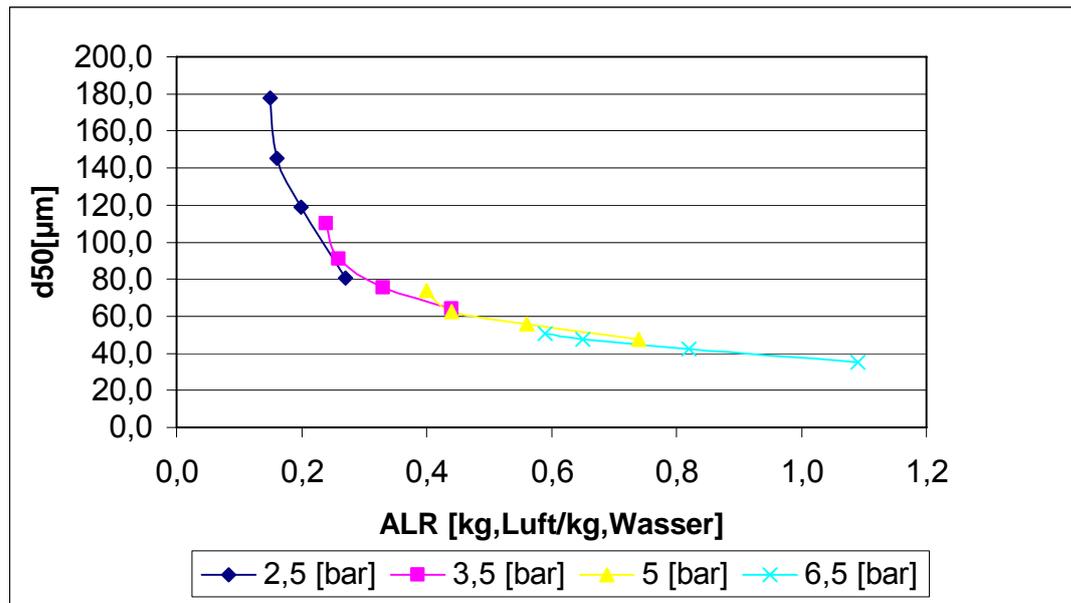


Abbildung 6.14 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für die Laval düse in Kombination mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°)

Tabelle 6.13 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für die Lavaldüse mit der Sekundärdüse (Anstellwinkel -12°)

Durchfluss Wasser [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d ₅₀ [µm]
360	2,5	96,0	0,27	81
480	2,5	96,0	0,20	119
600	2,5	96,0	0,16	145
660	2,5	96,0	0,15	178
360	3,5	157,0	0,44	64
480	3,5	157,0	0,33	76
600	3,5	157,0	0,26	91
660	3,5	157,0	0,24	110
360	5,0	266,8	0,74	47
480	5,0	266,8	0,56	56
600	5,0	266,8	0,44	62
660	5,0	266,8	0,40	74
360	6,5	391,6	1,09	35
480	6,5	391,6	0,82	42
600	6,5	391,6	0,65	47
660	6,5	391,6	0,59	51

6.5 Versuche mit Glykose- Sirup

Wie bereits erwähnt wurden die Versuche mit Glykose-Sirup alle mit der konvergenten Primärdüse durchgeführt, sekundärseitig kam die 10° Düse zum Einsatz. Die Position der Primärdüse wurde beibehalten und betrug 8 mm. Der Wehrrohrspalt wurde auf einen Millimeter vergrößert.

In Bild 6.15 ist die Auswirkung der Versuche auf die heimische Insektenfauna sichtbar.



Abbildung 6.15 Resultat der Zerstäubung



Abbildung 6.16 Diplomand in Schutzbekleidung



Abbildung 6.17 Zerstäubung des Glykose-Sirups; Gesamtansicht



Abbildung 6.18 Zerstäubung des Glykose-Sirups bei 3,5bar und 8l/min

Die Abbildung 6.16 zeigt eine Gesamtansicht der Zerstäubung, der sichtbare „Nebel“ besteht aus sehr feinen Glykose-Sirup Tropfen. Bei Betrachtung von Abbildung 6.17 zeigt sich welchen Einfluss die Viskosität auf das Spray hat. Im Gegensatz zu Wasser bilden sich hier keine Flüs-

sigkeitsfäden aus, vielmehr zieht sich der gesamte Flüssigkeitsfilm hin zur Primärdüse und zeigt ein schönes „Prefilming“. Ein ähnliches Verhalten lässt sich auch für die Schlacke voraussagen, deren Viskosität bei Temperaturen um 1500°C ca. bei 400 [mPa*s] liegt. Wenn man dieselben Zerstäubungsparameter (3,5 bar, bei 8 l/min) von Wasser und Glukose vergleicht so zeigt sich, dass der d_{50} von Wasser bei 60 μm und jener der Glukose bei 200 μm liegt.

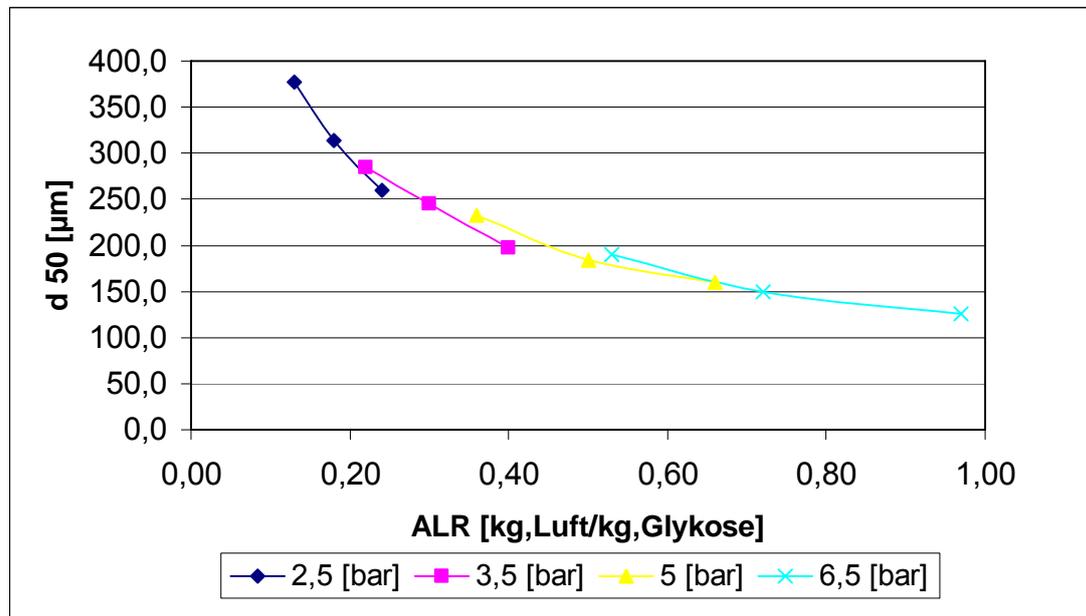


Abbildung 6.19 Tropfengröße in Abhängigkeit vom ALR- Verhältnis für Glykose-Sirup mit der konvergenten Primärdüse und der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°), Viskosität des Glukose-Sirups 330 mPa*s

Tabelle 6.14 Zerstäubungsparameter und gemessener d_{50} für Glykose-Sirup mit der konvergenten Primärdüse und der Sekundärdüse (Anstellwinkel +10°)

Durchfluss Glykose-Sirup [kg/h]	Druck [bar]	Durchsatz Luft [kg/h]	ALR [kg, Luft/kg, H ₂ O]	d50 [µm]
432	2,5	103,5	0,24	260
576	2,5	103,5	0,18	314
792	2,5	103,5	0,13	377
432	3,5	170,9	0,40	197
576	3,5	170,9	0,30	245
792	3,5	170,9	0,22	285
432	5,0	285,6	0,66	160
576	5,0	285,6	0,50	184
792	5,0	285,6	0,36	233
432	6,5	417,2	0,97	126
576	6,5	417,2	0,72	150
792	6,5	417,2	0,53	190

6.6 Zinnversuche

Die Zinnversuche wurden an der DGM- Anlage durchgeführt und unterschieden sich in vielerlei Hinsicht von den Versuchen mit Wasser oder Glukose. So konnte, aufgrund der geringen Versuchsdauer von etwa 4min, nur jeweils ein bestimmter Druck an den Düsen gefahren werden. Dadurch war es auch nicht möglich mehrere ALR- Verhältnisse mit den jeweiligen d_{50} zu bestimmen, daher ist auch nur ein Punkt in Abbildung 6.1 dargestellt.

Nach dem Schmelzen des Zinns (Schmelzpunkt bei 232°C) und weiterer Erwärmung auf ca. 280°C wurde das flüssige Zinn in die aufgeheizte Kokille gegossen, das Wehrröhr auf 0,35 mm eingestellt (Start der Zeitmessung) und das Zinn zerstäubt.

Die Oberflächenspannung von Zinn wurde aus einem Diagramm abgelesen [7]. Für die Viskositätswerte des Zinns bei 280°C wurde ein Wert von 2 mPa*s angenommen. Nach den Versuch wurde das gesamte zerstäubte Zinn homogenisiert und geviertelt und daraus eine Probe von 1kg entnommen und auf ein Rüttelsieb aufgegeben. Tabelle 6.14 veranschaulicht die Maschenweiten der einzelnen Siebe und deren daraus resultierenden Gewichtsprozenten.

Die physikalischen Parameter des Zinns (bei 280°C ,1 bar) sind:

- Dichte von Zinn $\rho=7200$ [kg/m³]
- Verhältnis Gas zu Zinn, entspricht den ALR 0,66
- Oberflächenspannung von Zinn bei 280°C 570 [mN/m]
- Dynamische Viskosität 2 [mPa*s]
- Partikelgröße $d_{50}=80$ [μ m]

Tabelle 6.15 Parameter zur Zinnzerstäubung

Primärdüse	Druck	Durchflussmenge	Durchflussmenge
7mm	[bar]	[Nm ³ /h]	[kg/h]
Sekundärdüse	10	217	280
24*2mm	8,8	282	365
(+10 Anstellwinkel) ^o			
Summe		499	645
Wehrröhrspalt	Versuchsdauer	Zinnmenge	Zinnmenge
	[s]	[kg]	[kg/h]
0,35mm	250	68	979

Tabelle 6.16 Siebanalyse des Zinnversuches

Maschenweite [μm]	1.Probe [g]	%	2.Probe [g]	%
<63	250	25	243	24,3
>63	155	15,5	169	16,9
>90	178	17,8	173	17,3
>125	265	26,5	266	26,6
>200	134	13,4	130	13
>500	15	1,5	14	1,4

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Vergleich der verschiedenen Primär- und Sekundärdüsentypen sowie der baulichen Geometrien unter realen Bedingungen mit dem Stoffsystem Schlacke und Wasserdampf ist teuer und aufwendig. Die Schlacke muss zuerst in den schmelzflüssigen Zustand (1450 °C bis 1500 °C) versetzt werden und zusätzlich benötigt der Wasserdampf die notwendige Temperatur.

Durch die laufende Optimierung der Zerstäubungseinheit im Rahmen der Zinnversuche, welche wichtige Aussagen über die Bereiche der kritischen Temperatur erbrachten („Einfrieren“), wurde schließlich der prinzipielle Aufbau des Wassermodells jenen der Zinn- und Schlackezerstäubung nachempfunden.

Um einen bestmöglichen Vergleich des Modells mit der Schlacke herzustellen wurden die folgenden drei Stoffsysteme ausgewählt:

- Wasser- Luft; für die Qualitative Untersuchung der Düsen
- Glykose- Luft; als Medium hoher Viskosität
- Zinn- Luft; als Medium hoher Dichte und Oberflächenspannung

Neben der optimalen Düsenkombination aus Primär und Sekundärdüse soll auch eine Aussage über die Einflüsse der Flüssigkeitsparameter herausgefunden werden. Diese sind:

- | | |
|--|-----------------------------|
| • Düsenvordruck an der Primärdüse | $p_{\text{Prim.}}$ [bar] |
| • Düsenvordruck an der Sekundärdüse | $p_{\text{Sek.}}$ [bar] |
| • Neigung der Sekundärdüsen zur Vertikalen | α [°] |
| • Vertikale Position der Primärdüse in der Auslaufdüse | y [mm] |
| • Dynamische Viskosität der Fluida | η [Pa*s] |
| • Dichte der Fluida | ρ [kg/m ³] |
| • Oberflächenspannung der Fluida | σ [N/m] |

Den größten Einfluss auf die Größe der entstehenden Tropfen hat die Viskosität. Wenn man dieselben Zerstäubungsparameter (3,5 bar, bei 8 l/min) von Wasser und Glykose vergleicht so zeigt sich, dass der d_{50} von Wasser bei 60 μm und jener der Glykose bei 200 μm liegt. Im Gegensatz dazu spielt die Dichte eines Mediums eine eher untergeordnete Rolle, allerdings muss hinzugefügt werden, dass die Viskosität von Zinn mit jener des Wassers vergleichbar ist.

Die wohl wichtigste Aussage aller durchgeführten Messungen ist jedoch jene das der Druck, mit welchem die Düsen beaufschlagt, nicht den geringsten Einfluss auf das Resultat der Zerstäubung hat. Er spielt nur insofern eine Rolle, dass mit Erhöhung des Drucks auch eine Steigerung des Durchsatzes und damit ein höheres ALR- Verhältnisses einhergeht.

Der Unterschied zwischen den Primärdüsen liegt in einem sehr kleinen Bereich, es ist also irrelevant ob man eine Laval- oder eine konvergente Düse zum Einsatz bringt, erstere macht nur dann einen Sinn wenn diese auch wirklich auf jene Parameter am Betriebspunkt des Prozesses ausgelegt wurde. Ebenso verhält es sich mit der Position der Primärdüse, wie in den Abbildungen 6.2 und 6.9 ersichtlich, diese hat keinen großen Einfluss auf die entstehende Tropfengröße.

Das Ziel des Modells war es die Wellenwachstumsrate β über die Wellenzahl n darzustellen, um daraus, die kleinste theoretisch mögliche Wellenlänge $\lambda_{\text{cut-off}}$, also jene, bei der gerade noch bzw. gerade keine Zerstäubung mehr eintritt, sowie die Wellenlänge λ_{max} , jene mit der größten Wellenwachstumsrate herauszufinden. Dazu musste die Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Auslaufdüse und deren Schichtdicke bestimmt werden, weiters jene Gasgeschwindigkeit die auf die Flüssigkeit einwirkt und schließlich noch die Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Flüssigkeit.

Laut der Theorie sind für höhere Weberzahlen auch höhere Wachstumsraten β zu erwarten, dies gilt scheinbar nur für geringe Relativgeschwindigkeiten, da in diesem Modell, also bei Relativgeschwindigkeiten von ca. 100 m/s, die höchsten Wachstumsraten bei geringsten Weberzahlen erreicht.

Wenn man nun die Tropfengröße mit λ_{max} vergleicht, so kann es normalerweise keine kleineren Wellenlängen als Tropfengrößen geben.

Die Gründe hierfür können vielfältiger Natur sein, so wurde bei der Berechnung der Schichtdicke und der Filmgeschwindigkeit die „Sogwirkung“ (durch die Primär- und Sekundärdüse, sowie den Gasstrom über die Wehrrohrschlitz) in der Auslaufdüse nicht berücksichtigt. Des Weiteren kann die Annahme eines turbulenten Freistrahls, für die Primärdüse, doch stärker als erwartet von den realen Bedingungen abweichen, was Auswirkungen auf die Relativgeschwindigkeit mit sich bringt. Letztlich ist die Gl. (4-17) für sinusförmige Wellenformen hergeleitet worden, ob sich bei der verwendeten Zerstäubungseinheit wirklich solche sinusförmigen Wellen ausbilden konnte nicht geklärt werden.

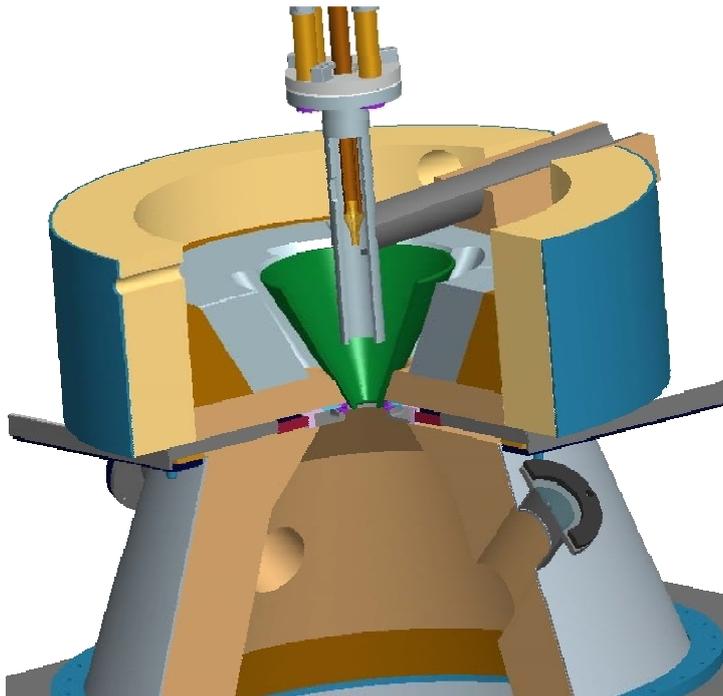


Abbildung 7.1 Verdüsungseinheit "Tribojet"

Das Mikrogranulieren von Hochofenschlacke direkt zu zementgängigen Pulver ist ein Hauptprojekt der Firma Tribovent GmbH. Dabei kommt der Energierückgewinnung, der Senkung der Produktionskosten, Steigerung der Produktivität und der Verfügbarkeit, der CO₂-Bilanz, und der zementtechnologischer Optimierung im Verhältnis zur konventionellen Verfahrenstechnik besondere Bedeutung zu. Ein Wasser-Dampfkreislauf liefert unter Enthalpierückgewinnung aus der Schlackenschmelze das Treibgas zur Zerstäubung.

Die Verdüsungseinheit zeigt Abbildung 7.1, hier wurde auf den Boden der Kokille (im Bild grün dargestellt) verzichtet. Der Grund hierfür lag an den Problemen welche von den Thermo-
spannungen herrührten, da diese die Kokille immer wieder zerstörten [6].

Die Versuche mit Zinn und Zink zeigten zudem die Möglichkeit zur Herstellung von Metall-
stäuben für die Pulvermetallurgie. Eine weitere sehr interessante Variante der Anwendung ist
die reaktive Verdüsung von Metallschmelzen, dabei könnte mit kontrollierten Redoxpotenzial
des Zerstäubungsgases die verschiedensten Verfahren wie Direktreduktion, Frischen, Sprüh-
kompaktierung usw. durchgeführt werden [6].

8 Verzeichnis der Verwendeten Abkürzungen

A	m^2	Fläche, Querschnittsfläche
B	m	Strahlbreite (turbulenter Freistrah)
ALR	-	Massenstromverhältnis
d	m	Durchmesser
g	kg/m^3	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe Wehrrohrspalt
K_1	$kgK^{0,5}/m^2sbar$	Korrekturfaktor
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n	m^{-1}	Wellenzahl
p	bar	Druck
R	J/kgK	Gaskonstante für Luft
r_a	m	Radius der Auslaufdüse
t	s	Zeit
T	K	(absolute) Temperatur
v	m/s	Geschwindigkeit
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
u_R	m/s	Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Flüssigkeit
y	m	Vertikale Position der Primärdüse in der Auslaufdüse

Griechische Symbole

α	$^\circ$	Winkel
β	s^{-1}	Wellenwachstumsrate
δ	m	Schichtdicke bzw. Filmdicke der Flüssigkeit
λ	m	Wellenlänge
ϱ	kg/m^3	Dichte
η	Pa*s	dynamische Viskosität
κ	-	Isentropenexponent
θ	$^\circ$	Öffnungswinkel (Turbulenter Freistrah)
σ	N/m^2	Oberflächenspannung
τ	N/m^2	Schubspannung

Indizes

A	Auslaufdüse
Prim.	Primärdüse
Sek.	Sekundärdüse
W	Wehrrohr
S	Spalt (Wehrrohr)
L	Flüssigkeit (Wasser)
G	Gas
cut-off	kleinste theoretisch mögliche Wellenlänge

9 Literaturverzeichnis

- [1] Edlinger, A.. (2003); Betreff „über Tribovent“ E-Mail Nachricht vom 14. September
- [2] Walzel P. (1990); Zerstäuben von Flüssigkeiten; Chem.-Ing.-Tech.62, Nr. 12 S. 983-994
- [3] Lefebvre, A. H. (1989); Atomization and sprays; Hemisphere Publishing Corporation
pp.40 and pp. 62-64
- [4] Carvalho, I. S., Heitory, M. V., Santos, D. (2002); Liquid film disintegration regimes and proposed correlations; International Journal of Multiphase Flow Vol. 28, pp. 773-789
- [5] Sympatec GmbH. Helos Benutzerhandbuch Kapitel III.1.1
- [6] Edlinger, A., BHM, 149. Jg. (2004), Heft 9 S. 344-345
- [7] Yuan, Z., F., Mukai, K., Takagi, K., Ohtaka, M., Huang, W., L., Lui, Q., S., T., Journal of Colloid and Interface Science; (2002); Surface Tension and its Temperature Coefficient of Molten Tin; Nr. 254 p. 341
- [8] Schlichting, H., Gersten, G. (1997); Berlin, Springer Verlag, 9. Auflage; Grenzschicht-Theorie; Kapitel 5; S 135