

**Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen  
Umweltschutzes**

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Werner Kepplinger

**DIPLOMARBEIT**

Pneumatische Förderung und Befeuchtung von Feuerfest -  
Spritzmasse für das Trockenspritzverfahren

zum

Erlangen des akademischen Grades

**Diplomingenieur**  
(Dipl.-Ing)

Vorgelegt von: Marianne Doletschek

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Weiß

Leoben am, 17. September 2009

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Leoben, am 17. September 2009

Marianne Doletschek

## Danksagung

Herzlich möchte ich mich, an dieser Stelle, bei meinem Betreuer Dipl.-Ing.Dr.tech. Christian Weiß für die tatkräftige und unermüdliche Unterstützung bedanken. Auch die vielen guten Tipps, Anregung und Ideen von Dipl.-Ing. Martin Dopler wollen hier bedankt sein. Natürlich haben auch Mark Read und Fritz Kittinger einen wichtigen Beitrag für dieses Werk geliefert und sollen hier bedankt sein.

Den Mitarbeitern der RHI, Herrn Slamenik, Triessnig, Kammerhofer und Lanzenberger sei für die tatkräftige und rasche Unterstützung gedankt.

Auch allen Unimitarbeitern möchte ich für das Entgegenkommen und die Unterstützung, die mir während meiner ganzen Studienzeit zu teil wurde, danken.

Mein ganz besonderer Dank geht an meinen Freund und meinen Sohn, die mir während meines ganzen Studiums beigestanden sind und natürlich auch an meine Familie.

## **Kurzfassung**

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Förderung von feuerfesten Spritzmassen und deren Befeuchtung mit Hilfe von Zweistoffdüsen. Aufbauend auf die Diplomarbeit von DI Steinwandter wurde das Berechnungsprogramm, welches den Druckverlustverlauf der pneumatischen Förderung von Feuerfest- Spritzmassen berechnet, dokumentiert und validiert. Um das Betriebsverhalten der vorliegenden Zweistoffdüse kennen zulernen, wurden Labor- und Praxisversuche durchgeführt. In den Laborversuchen erfolgte die Quantifizierung der Wasserdispergierung Am erzeugten Wasserspray die Messung der Tröpfchenfeinheit mittels Laserstreulichtmessung. In den darauf aufbauenden Praxisversuchen wurde das Betriebsverhalten für verschiedene Beladungs- und Wasserdispergierungszustände studiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde die Dimensionierung der Zweistoffdüse für weitere Spritzsysteme abgeleitet.

## **Abstract**

Based on the master-thesis of Mr. Steinwandter the calculation program for the pneumatic conveyance system of refractory concrete was enhanced, improved and documented. Furthermore a two-phase atomization nozzle was developed and the nozzle's pneumatic characteristics were investigated. Spraying experiments at operating conditions were done as well, whereby the atomization nozzle was improved. In laboratory experiments the hydraulic characteristics of the nozzle were investigated. The effectiveness of water dispersion was quantified by laser diffraction measurements of the droplet-diameter distribution in the spray. Based on these findings the suggestion for dimensioning of the water injection nozzle is given.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen zur Strömung in Zweistoffdüsen</b>	<b>3</b>
2.1. Bauarten von Zweistoffdüsen . . . . .	3
2.2. Strömungsformen . . . . .	4
2.3. Vorhersage der Strömungsform . . . . .	6
2.4. Sekundärer Tropfenzerfall eines Flüssigkeitstropfens in einer Gasströmungen	9
2.5. Ringströmung und Spritzerströmung . . . . .	11
2.6. Schallgeschwindigkeit im Gas / Flüssigkeits - Zweiphasengemisch . . . . .	13
2.7. Strömungsverteilung bzw. - verzweigung . . . . .	14
<b>3. Berechnungsprogramm zur pneumatischen Förderung der Spritzmasse</b>	<b>16</b>
<b>4. Validierung des Programmes</b>	<b>27</b>
4.1. Einleitung und Zusammenfassung . . . . .	27
4.2. Versuchsübersicht . . . . .	29
4.2.1. Versuche - Veitsch, DA Steinwandter, Juli 2008 . . . . .	29
4.2.2. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, November 2008 . . . . .	29
4.2.3. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008 . . . . .	30
4.2.4. Versuche RHI, Triessnig, 1998 . . . . .	30
4.2.5. Versuche - Veitsch, Lanzenberger, September 2006 . . . . .	32
4.3. Diskussion der Messergebnisse . . . . .	33
4.3.1. Versuche - Veitsch, DA Steinwandter, Juli 2008 . . . . .	33
4.3.2. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, November 2008 . . . . .	33
4.3.3. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008 . . . . .	33
4.3.4. Versuche RHI, Triessnig, 1998 . . . . .	33
4.3.5. Versuche - Veitsch, Lanzenberger, September 2006 . . . . .	37
4.4. Durchführung der Programm - Validierung . . . . .	39
4.4.1. Beschreibung des Berechnungsablaufes . . . . .	39
4.4.2. Diskussion der Berechnungsergebnisse . . . . .	41
4.4.2.1. Versuche - Veitsch, DA Steinwandter, Juli 2008 . . . . .	41
4.4.2.2. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, November 2008 . . . . .	42
4.4.2.3. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008 . . . . .	42
4.4.2.4. Versuche RHI, Triessnig, 1998 . . . . .	42
4.4.2.5. Versuche - Veitsch, Lanzenberger, September 2006 . . . . .	48

4.4.3.	Einführung eines Korrekturterms für den Kanteneffekt . . . . .	49
4.4.4.	Stopferwarnung . . . . .	53
4.4.5.	Eventuell Korrektur im Bereich höherer Beladung (angedacht) . . . . .	53
<b>5.</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Wassereindüsung</b>	<b>54</b>
5.1.	Einleitung . . . . .	54
5.2.	Quantifizierung der Wasserdispersion in der Düse . . . . .	54
5.2.1.	Allgemeine Beschreibung . . . . .	54
5.2.2.	Sprühversuch mit fotografischer Auswertung . . . . .	55
5.2.3.	Optische Vergleiche . . . . .	56
5.2.4.	Vermessung der Tröpfchendurchmesser . . . . .	56
5.2.5.	Versuchsauswertung . . . . .	57
5.2.5.1.	Berechnungen . . . . .	57
5.2.5.2.	Optische Auswertung . . . . .	57
5.2.5.3.	Anteil des abrinnenden Wassers . . . . .	62
5.2.5.4.	Auswertung der Drucksensoren . . . . .	62
5.2.5.5.	Auswertung der Laserstreulichtmessungen . . . . .	63
5.2.6.	Ergebnisdiskussion . . . . .	64
5.3.	Praxistests zur Überprüfung der Spritzmassendurchfeuchtung . . . . .	68
5.3.1.	Versuchsbeschreibung . . . . .	69
5.3.2.	Durchführung . . . . .	69
5.3.2.1.	Versuche 0.1 und 0.2 . . . . .	70
5.3.2.2.	Versuche 1.1. und 1.2. . . . .	71
5.3.2.3.	Versuch 2 . . . . .	73
5.3.2.4.	Versuch 3 . . . . .	74
5.3.2.5.	Versuch 4 . . . . .	75
5.3.2.6.	Versuche 5 und 6 . . . . .	76
5.3.2.7.	Versuch 7 . . . . .	78
5.3.2.8.	Wassergehalt . . . . .	79
5.3.3.	Beurteilung der Versuchsergebnisse . . . . .	80
5.3.3.1.	Spritzmasseneinfluss . . . . .	80
5.3.3.2.	Beladungsfälle . . . . .	80
5.3.3.3.	Wassergehalt . . . . .	81
5.3.3.4.	Auswertung bezüglich der Geschwindigkeitsverhältnisse in der Spritzdüse . . . . .	81
5.3.4.	Schlussfolgerung . . . . .	82
5.4.	Zusammenführung der Versuchsergebnisse und Auswertung . . . . .	83
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>86</b>
<b>A.</b>	<b>Bedingungsanleitung zum VBA - Programm pneumatische Förderung</b>	<b>i</b>
A.1.	Allgemeines . . . . .	i
A.1.1.	Erforderliche Informationen . . . . .	i

A.1.2. Streckenspezifische Daten . . . . .	ii
A.1.2.1. Transportleitung . . . . .	ii
A.1.2.2. Injektor Geometrie . . . . .	ii
A.1.2.3. Spritzmasseeigenschaften . . . . .	ii
A.1.2.4. Temperatur . . . . .	ii
A.1.2.5. Spritzlanze . . . . .	iii
A.1.3. Veränderliche Daten . . . . .	iii
A.1.4. Eintragen der Daten auf dem Eingabeblatt . . . . .	iii
A.1.5. Streckenspezifische Daten . . . . .	iii
A.1.5.1. Transportleitung . . . . .	v
A.1.5.2. Injektor Geometrie . . . . .	vi
A.1.5.3. Spritzmasseeigenschaften . . . . .	vi
A.1.5.4. Spritzlanze . . . . .	vi
A.1.6. Veränderliche Daten . . . . .	vi
A.1.7. Berechnung . . . . .	vi
<b>B. Dimensionierungsvorschlag der Wassereindüsung</b>	<b>viii</b>
B.1. Allgemeine Beschreibung . . . . .	viii
B.1.1. Dimensionierung der Stoppel und Bohrungen . . . . .	ix
B.1.2. Auslegung der Düsenradien . . . . .	x
B.1.3. Formgebungsmaßnahmen . . . . .	xi
<b>C. Listing des Programmes zur pneumatischen Spritzmasseförderung</b>	<b>xiv</b>

# 1. Einleitung

In metallurgischen Öfen sind Spritzverfahren zur Pflege und Reparatur der feuerfesten Ausmauerung gebräuchlich, für die RHI AG stellen feuerfeste Spritzmassen sowie Equipment zur Spritzmassenapplikation ein wichtiges Marktsegment dar.

In der Gruppe der Spritzverfahren unterscheidet man zwischen Nass- und Trockenspritzverfahren. Beim Nassspritzverfahren wird die zu applizierende Masse durchfeuchtet und danach als Dichtstrom durch die Schläuche befördert, beim Trockenspritzverfahren erfolgt der Transport der Spritzmasse durch die Schläuche trocken und erst vor der Lanze wird das Wasser zugefügt. Dabei findet die Durchfeuchtung und Homogenisierung von Spritzmasse mit Wasser auf dem letzten Streckenabschnitt zwischen Wassereindüsung und Strahlaustritt statt. Das Trockenspritzverfahren ist für die Anwendung im diskontinuierlichen Spritzbetrieb vorteilhaft, denn die Schläuche sind stets frei von Feuchtigkeit wodurch eine Reinigung nicht erforderlich ist, zudem gibt es keine ausgehärteten Spritzbetonrestmassen. Hinsichtlich der benötigten Spritzmassenmengen finden verschieden Spritzsysteme ihre Anwendung, das kleinste System ist dabei die Handspritzlanze, gefolgt vom Shooter, Terminator und das größte Spritzsystem stellt das Conrep-System dar.

Für das Einbringen des Wassers in den Spritzbetonstrom sind derzeit Einstoffdruckdüsen in Verwendung. Dabei entsteht häufig ein pulsierender und inhomogener Spritzstrahl, auch kommt es zum Verlegen der Düsenbohrungen, die Düse wird aufgrund der einwirkenden Kräfte stark erodiert.

Ziel des Projektes ist es Verbesserungen im Hinblick auf diese Probleme zu finden.

Im Rahmen dieses Projektes erfolgte die Entwicklung der Zweiphasendüse, welche für den Einsatz in der automatischen Spritzbetonapplikation ausgelegt ist, also die Spritzsysteme Terminator und Conrep. Um die Druckverhältnisse entlang der Förderstrecke besser kennen zu lernen, wurde ein VBA-Berechnungsmodul entwickelt.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit sind die strömungsmechanischen Einflüsse, die in der Düse sowie in der Förderstrecke wirken, dargestellt, siehe dazu Abschnitt 2.

Dem vorliegenden Berechnungsprogramm wurde eine ausführliche Dokumentation beigelegt. Im Zuge dieser Dokumentation erfolgte auch die Erstellung eines Programmablaufplans, in welchem der Berechnungsablauf schematisch dargestellt und die Verknüpfung zur Diplomarbeit von Andreas Steinwandter hergestellt wurde, siehe dazu Abschnitt 3.

Des Weiteren wurde eine Validierung des Programms durchgeführt, welche auf Basis aller vorliegenden Versuche erfolgte, siehe Abschnitt 4. Um die Bedienbarkeit des Programms zu erleichtern wurde auch eine Bedienungsanleitung erstellt, siehe Anhang A.

Der vorliegende Spritzdüsenprototyp wurde einer genauen Untersuchung hinsichtlich seiner quantitativen und qualitativen Wasserdispergierung unterzogen. Zu diesem Zweck

wurden Laborversuche im Verdüsungslabor des VTIU-Technikums durchgeführt, siehe Abschnitt 5.2.

Auf Basis dieser Laborversuche wurde ein Praxistest am 28. Mai 2009 im Werk Veitsch durchgeführt. Dieser diente der Untersuchung des Betriebsverhaltens des Spritzdüsenprototyps hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Spritzstrahlerzeugung mit Spritzmasse, siehe Abschnitt 5.3.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse erfolgte die Ausarbeitung des Dimensionsierungsvorschlages für die Spritzsysteme Handlanze, Shooter, Terminator und Conrep, dem beigefügt sind auch Empfehlungen für die praktische Ausgestaltung der Düsen, siehe Anhang B.

## 2. Theoretische Grundlagen zur Strömung in Zweistoffdüsen

### 2.1. Bauarten von Zweistoffdüsen

Zweistoffdüsen finden dort ihren Einsatz, wo ein feines Tropfengrößenspektrum notwendig ist, auch zur Zerstäubung kleiner Flüssigkeitsvolumenströme sind sie sehr gut geeignet. Zweistoffdüsen benötigen einen Gas- bzw. Dampfvolumenstrom zum Ausbilden eines Sprays, der Begriff pneumatische Zerstäuber ist ebenfalls gebräuchlich. Die Energie für die Zerstäubung liefert vor allem das mit hoher Geschwindigkeit strömende Gas, der zu zerstäubenden Flüssigkeit selbst wird keine große kinetische Energie aufgeprägt.

Bei den Einstoff-Druckdüsen wird die, zum Erzeugen des Sprays benötigte Energie, entweder durch die strömende Flüssigkeit selbst, oder durch eine von außen aufgeprägte mechanische Kraft bzw. Beschleunigung, bereitgestellt. Häufig wird die kinetische Energie also rein durch die Druckdifferenz erzeugt, was zu sehr kleinen Bohrungsdurchmessern führt. Bei den Zweistoffdüsen hingegen können relativ große Bohrungsdurchmesser für den Flüssigkeitsstrom verwendet werden, dadurch besteht eine geringere Verstopfungsgefahr. Jedoch sind Zweistoffdüsen strömungstechnisch und konstruktiv aufwendiger als Einstoff-Druckdüsen. Zudem muss an der Düse eine zusätzliche Versorgung mit Druckgas zur Verfügung gestellt werden, daher sind Zweistoffdüsen vergleichsweise teurer als Einstoff-Druckdüsen.

Der Ort des Zusammentreffens von Gas und Flüssigkeit teilt die Zweistoffdüsen in zwei Gruppen, die eine Gruppe ist jene von Zweistoffdüsen äußerer Mischung und die zweite sind Zweistoffdüsen innerer Mischung. Bei ersterer Gruppe treffen Gas- und Flüssigkeitsstrom außerhalb der Düse aufeinander, bei zweiterer Gruppe passiert dies innerhalb der Düse, siehe Abb. (2.1).

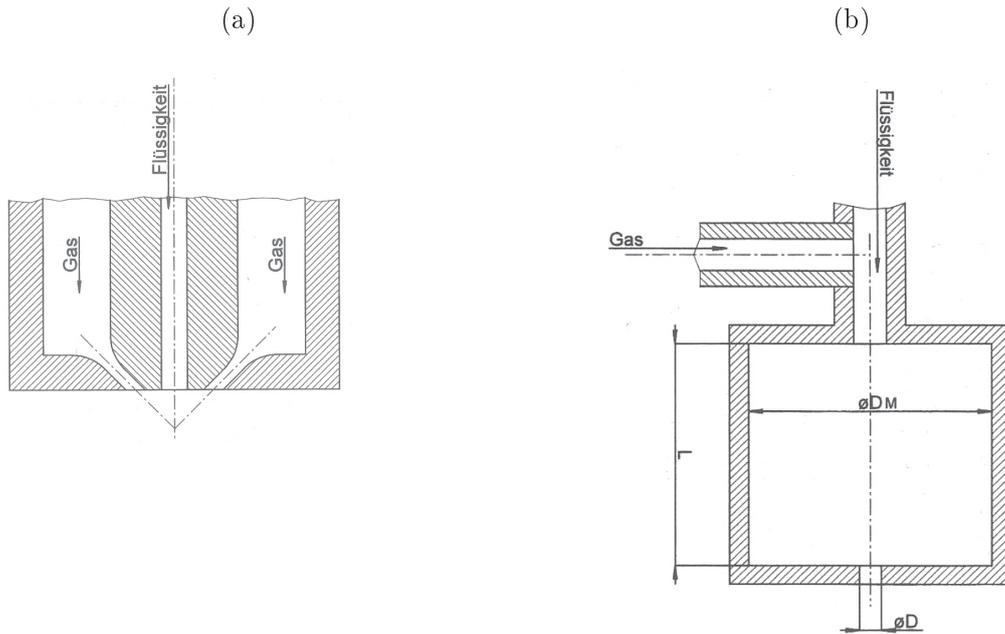


Abbildung 2.1: Düsensbauarten, Zweistoffdüse äußerer Mischung (a), Zweistoffdüse innerer Mischung (b) [1]

Die in Abb. (2.1a) dargestellte Düse wird häufig eingesetzt. Sie ist in der Lage Flüssigkeiten anzusaugen, auch ist es üblich den Gasstrom unter einem Winkel austreten zu lassen. Auf das Zerstäubungsverhalten nehmen maßgeblich die Geometrie und das Massenstromverhältnis Gas / Flüssigkeit Einfluss. Aufgrund der vielen Einflussgrößen existieren keine allgemein gültigen Rechenvorschriften für das erzeugte Tropfenspektrum.

In Abb. (2.1b) ist eine Zweistoffdüse innerer Mischung zu sehen. Hier trifft der Gas- und der Flüssigkeitsstrom bereits in der Düse aufeinander es entsteht ein Zweiphasengemisch, beim Austritt aus der Düsenmündung entsteht ein Spray.

## 2.2. Strömungsformen

Unabhängig von der vorliegenden Zweistoff - Düsenart ist der entstehende Spray eine Zweiphasenströmung von Gas und Flüssigkeit, welcher sich durch eine zeitlich und lokal ändernde Phasengrenze und Wechselwirkungen zwischen den Phasen auszeichnet. Je nach Volumenanteil Gas- und Flüssigphase können sich verschiedene Strömungsformen ausbilden, die Kenntnis über die Verteilung der beiden Phasen ist für die Berechnung notwendig. Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf adiabate Systeme.

Grundsätzlich unterscheidet man diese Strömungsformen über die Lage des Rohres, also senkrecht nach oben und horizontal.

- Aufwärtsgerichtete Zweiphasenströmung

In Abb. (2.2) sind grob die Strömungsformen bei aufwärts gerichteter Zweiphasenströmung dargestellt, von links nach rechts steigt der Luftvolumenanteil.

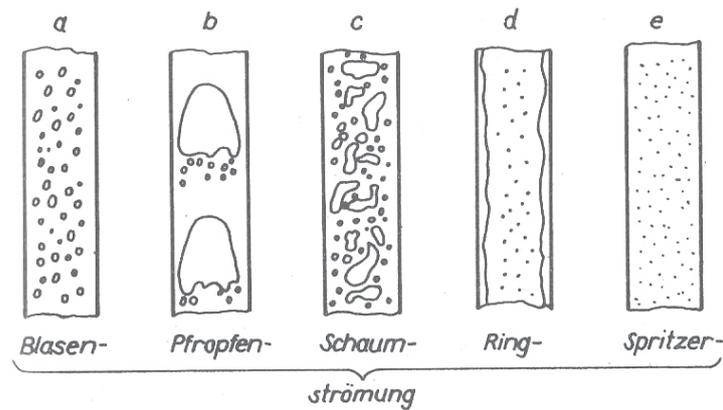


Abbildung 2.2: Strömungsformen der aufwärtsgerichteten Strömung [2]

Für unseren Anwendungsfall ist aufgrund des hohen Luftvolumenanteils vor allem die Ring- und die Spritzerströmung von Interesse. Bei der Ringströmung gibt es einen Wasserfilm, dieser bewegt sich an der Wand entlang noch oben. Im Inneren strömt das Gas mit wesentlich höherer Geschwindigkeit, im Gas wird auch ein Teil der Flüssigkeit in Form von Tröpfchen transportiert.

Bei noch höheren Gasgeschwindigkeiten und Flüssigkeitsvolumenanteilen entwickelt sich aus der Ringströmung die Spritzerströmung. Hier wird die gesamte Flüssigkeit in Tropfenform vom Gas transportiert.

- Waagrechte Zweiphasenströmung

In Abbildung (2.3) sind einige mögliche Strömungsformen in einem waagrechten Rohr zu sehen.

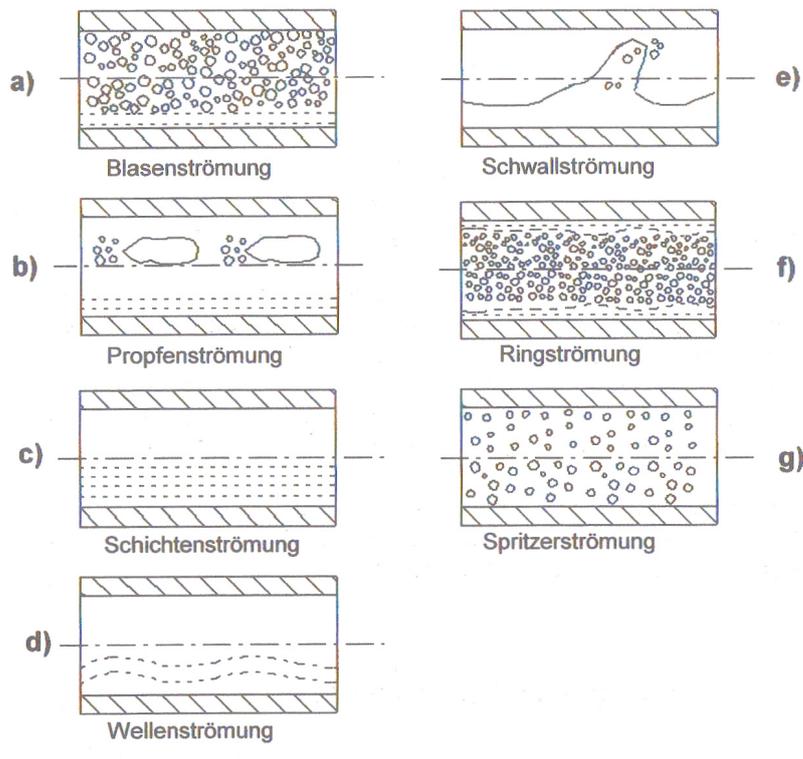


Abbildung 2.3: Strömungsformen zweiphasiger Gemische in einem waagrecht Rohre [2]

Strömen Gas und Flüssigkeit waagrecht führt die Schwerkraft zu einer Phasentrennung, die Flüssigkeit strömt eher unten und das Gas oben. Dieser Effekt ist umso stärker je geringer die Gas- und Flüssigkeitsgeschwindigkeit sind, den dann steigt der Einfluss der Schwerkraft und es bilden sich die waagrecht Strömungsformen aus.

Bei höheren Gasvolumenanteil und Geschwindigkeiten entsteht die Ringströmung, infolge der Schwerkraft ist der Flüssigkeitsfilm in der oberen Rohrhälfte meist dünner als in der unteren.

### 2.3. Vorhersage der Strömungsform

Um eine Vorhersage der entstehenden Strömungsform treffen zu können werden meist Diagramme verwendet, in denen die Strömungsform als Funktion des Gas- und Flüssigkeitsvolumenstroms sowie einiger Stoffdaten dargestellt ist. Diese Diagramme wurden bei niedrigen Drücken sowie für das System Luft - Wasser aufgestellt, die Übergänge zwischen den einzelnen Strömungsformen sind als gleitend zu sehen. In der Praxis weist eine Strömung meist Merkmale verschiedener Strömungsformen auf, es können sogar bei gleichen Parametern, abhängig von der Entstehung der Strömung, verschiedene stabile Zustände auftreten.

- Aufwärtsgerichtete Strömung

Für aufwärtsgerichtete Strömungen im senkrechten Rohr kann das Diagramm von Govier empfohlen werden, es ist bei niedrigen Drücken und für das System Luft / Wasser aufgestellt

worden, siehe Abb. (2.4).

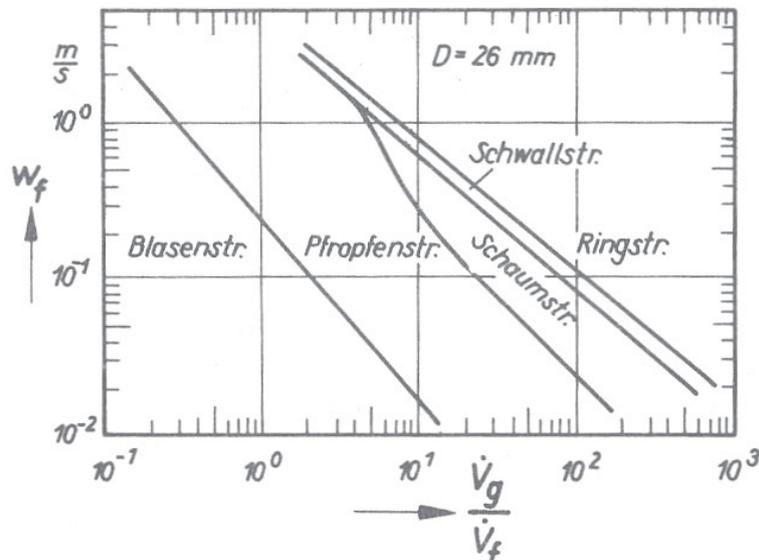


Abbildung 2.4: Diagramm zur Bestimmung der Strömungsform im senkrechten Rohr nach Govier [2]

Sind die im Wasserfilm aufwärts wirkenden Kräfte kleiner als die Schwerkraft, so kann die Flüssigkeit nicht mehr nach oben transportiert werden. Es kommt zur Strömungsumkehr, zur Abschätzung ob eine Strömungsumkehr auftritt liefert die Beziehung (2.1) sie liefert, für kleine Drücke und das System Luft - Wasser, gute Ergebnisse [2].

$$\left(\frac{v_g^2}{g * D}\right)^{0,5} * \left(\frac{\rho_g}{\rho_w - \rho_g}\right)^{0,5} \approx 0,8 \dots 0,9 \quad (2.1)$$

Wird der Term auf der linken Seite von Glg. (2.1) kleiner als 0,8, so kommt es nach und nach zu einer Strömungsumkehr und in deren Folge zu einem Flüssigkeitsstau.

- Waagrechte Strömungsformen

Für die Vorhersage von waagrechten Strömungen wird meist das BAKER- Diagramm verwendet. Auch hier wurde bei atmosphärischem Druck und mit einem Wasser - Luft - Gemisch gearbeitet.

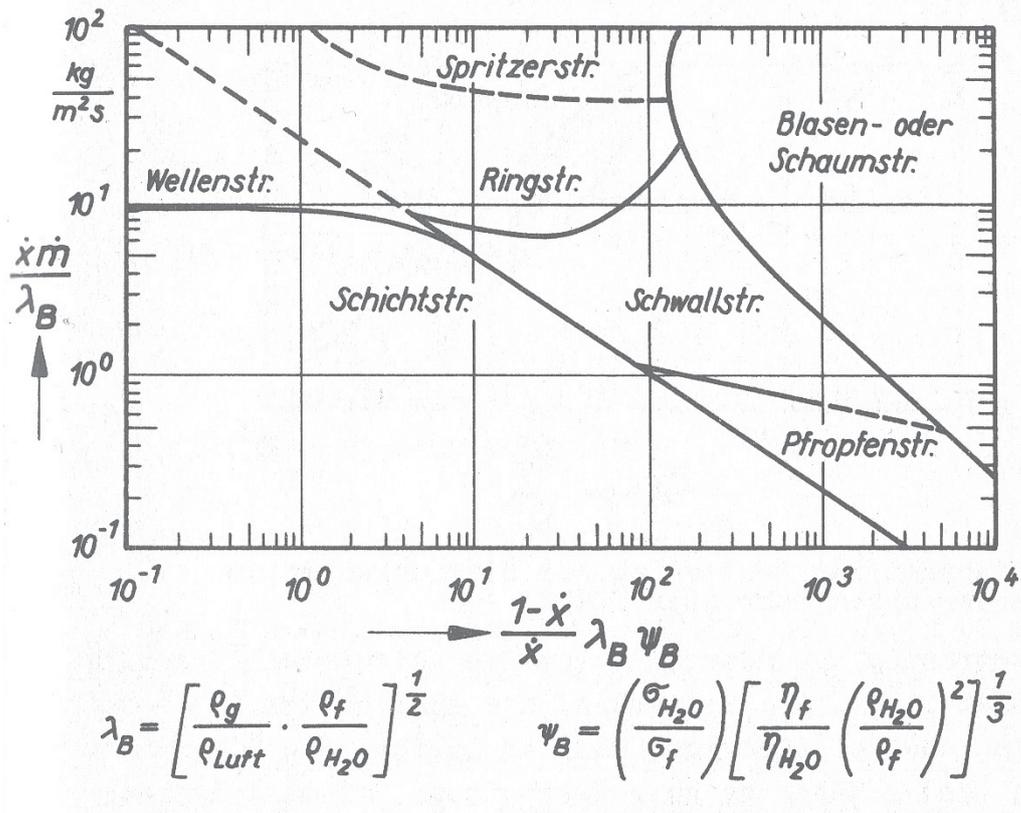


Abbildung 2.5: Diagramm zur Bestimmung der Strömungsform im waagrechten Rohr nach BAKER [2]

Zudem treten bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten nennenswerte Dichteänderungen der kompressiblen Gasphase auf.

Hinzu kommen noch Einflüsse der Kanalgeometrie, Eintrittseffekte und die Beschaffenheit der Kanalwände.

In der Einphasenströmung wird die Zahl der Variablen, durch Zusammenfassen der Einflußgrößen zu dimensionslosen Kennzahlen, verringert. Auch für die Zweiphasenströmung kann aus den Einflussgrößen ein Satz von dimensionslosen Kennzahlen gebildet werden. Die für diesen Anwendungsbereich häufigsten Kennzahlen sind in Tabelle (2.1) angeführt.

Tabelle 2.1: Kennzahlen zur Charakterisierung von Zweiphasenströmungen

Name	Definition
Reynolds - Zahl	$Re = \frac{u_m * D}{\nu}$
Froud - Zahl	$Fr = \frac{u_m^2}{g * D}$
Weber - Zahl	$We = \frac{u_m^2 * \rho_f * D}{\sigma}$
Dichteverhältnis	$\rho_{Gas} / \rho_{Flüssigkeit}$
Zähigkeitsverhältnis	$\eta_{Gas} / \eta_{Flüssigkeit}$
Gasmassenstrom	$\frac{M_{Gas}}{M_{Gas} + M_{Flüssigkeit}}$
Machzahl	$u / c_{Schall}$

Oft ist es nicht möglich alle Kennzahlen zu untersuchen, man muss sich auf die für den Vorgang wesentlichen beschränken. Dies setzt voraus, dass genaue Vorstellungen über den Mechanismus des betrachteten Vorgangs bestehen. Für ähnliche Strömungsbereiche lassen sich auf diese Weise gute Ansätze mit den dimensionslosen Kennzahlen bilden. Da jedoch meist mehrere Einflussgrößen bei der Aufstellung der Beziehungen vernachlässigt werden, sind Übertragungen auf andere Anordnungen mit großen Fehlern verbunden oder überhaupt nicht möglich. Daher muss bei der Anwendung von Kennzahlen auf den Gültigkeitsbereich geachtet werden. Es gibt eine große Vielfalt an Zweiphasenströmungen, daher sind gewonnene Erkenntnisse oft nur für einen kleinen Strömungsbereich anwendbar.

## 2.4. Sekundärer Tropfenzerfall eines Flüssigkeitstropfens in einer Gasströmungen

Bei der Zerstäubung von Flüssigkeiten in Sprays entsteht ein Spektrum von verschiedenen Tröpfchendurchmessern, diese werden in unserem in weiterer Folge in einem Gasstrom transportiert. Überschreitet der Tröpfchendurchmesser eine bestimmte Größe so kommt es zu einem sekundären Tröpfchenzerfall. Für diese Zerstäubung in einer Gasströmung kann auf ein stark vereinfachtes Modell zurückgegriffen werden, dabei wird ein Tropfen mit dem Tropfendurchmesser  $x$  einer konstanten Gasströmung ausgesetzt. Der Tropfen verfügt über keine Geschwindigkeit und ist raumfest. Festgelegt wird auch das der Tropfen durch die Gasanströmung keinerlei Deformation erfährt, siehe Abb. (2.6).

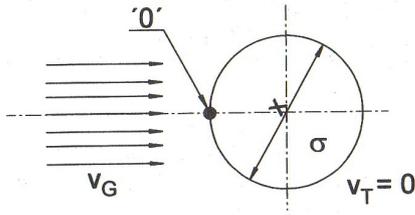


Abbildung 2.6: Ruhender und nicht deformierter Tropfen in einer Gasströmung [1]

An der Stelle "O" befindet sich der Staupunkt, an diesem Punkt entsteht der größte statische Druck, denn hier wird die gesamte kinetische Energie in Druckenergie umgewandelt. Der Flüssigkeitstropfen setzt dem strömenden Gas die aerodynamische Widerstandskraft  $F_W$  entgegen.

$$F_W = \frac{\rho_g}{2} * v_g^2 * \frac{\pi * x^2}{4} * c_w [N] \quad (2.2)$$

Der dimensionslose Widerstandsbeiwert  $c_w$  besteht aus einem Druckwiderstand- und einem Druckreibungsbeiwert. Dieser hängt von der Reynolds-Zahl der Strömung ab, welche aus dem Kugeldurchmesser, der Gasdichte und der dynamischen Viskosität berechnet wird. In Tabelle (2.3) finden sich die Bereiche der Widerstandsbeiwerte für die umströmte Kugel.

Tabelle 2.3: Widerstandsbeiwert für die Kugelumströmung, nach [1]

Strömungsbereich	Gültigkeitsbereich	$c_w =$ Wert
Laminar	$1 * 10^{-4} \leq Re \leq 0,4$	$c_w = \frac{24}{Re}$
Übergangsbereich	$0,4 \leq Re \leq 1 * 10^3$	$c_w = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$
Turbulent	$1 * 10^3 \leq Re \leq 2 * 10^5$	$c_w \approx 0,44$

Im Tropfeninneren entsteht durch die Oberflächenspannung eine Oberflächenspannungskraft  $F_\sigma$ .

$$F_\sigma = \pi * x * \sigma [N] \quad (2.3)$$

Solange die Oberflächenspannungskraft  $F_\sigma$  größer ist als die aerodynamische Widerstandskraft  $F_W$  kommt es zu keiner Topfenzerteilung. Anders formuliert, ein Tropfen in einer Strömung ist also solange stabil, solange

$$\frac{\rho_g}{2} * v_g^2 * \frac{\pi * x^2}{4} * c_w = \pi * x * \sigma [-] \quad (2.4)$$

erfüllt ist. Durch Umformen erhält man

$$We_G = \frac{\rho_g * v_g^2 * x}{\sigma} = \frac{8}{c_w} \quad (2.5)$$

$We_G$  ist die Gas-Weber-Zahl, im Übergangsbereich beträgt die Gas-Weber-Zahl zwischen 0,28 und 20. Der Einfluss der Flüssigkeitsviskosität wurde bei diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt, es ergibt sich für unseren Anwendungsfall eine nur geringfügige Abweichung.

Aus der Kenntnis der Gas-Weber-Zahl lässt sich auf die Zerfallserscheinung schließen, bei großen  $We_G$  treten der Katastrophische- und Explosionszerfall auf während bei niedrigen  $We_G$  - Zahlen meist Taschen-, Staubgefäß-, Übergangs- und Lamellenzerfall auftreten, siehe dazu Abb. (2.7).

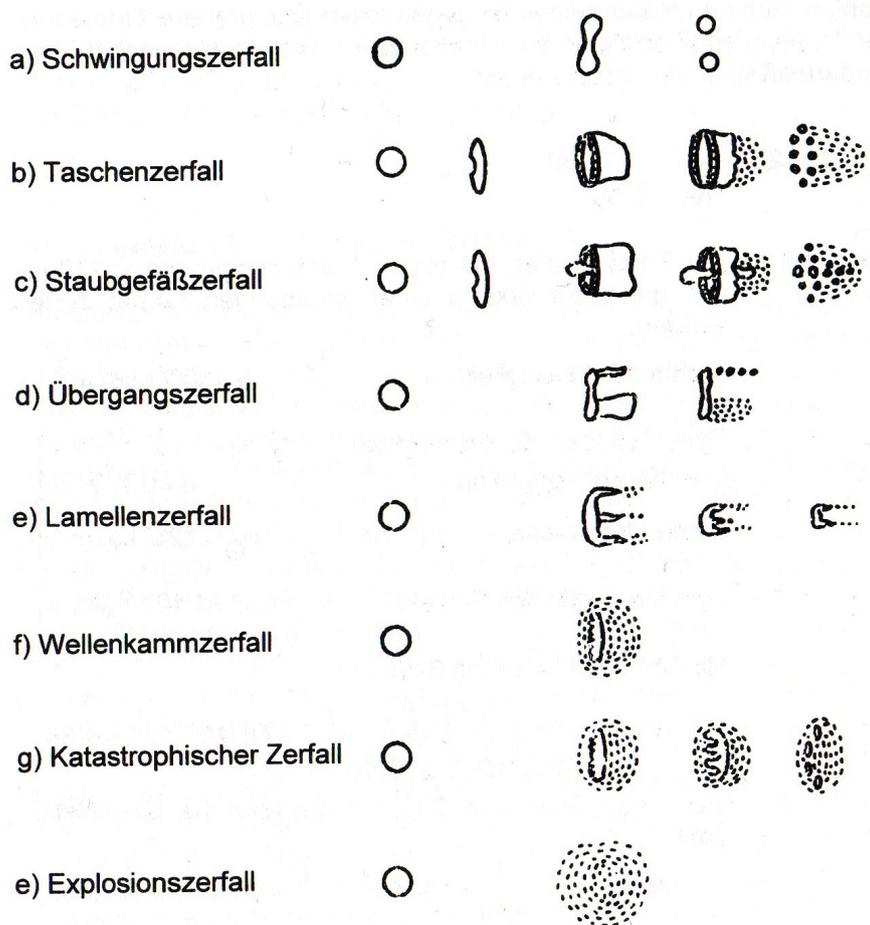


Abbildung 2.7: Sekundäre Tropfenzerfallserscheinungen durch aerodynamische Kräfte [1]

## 2.5. Ringströmung und Spritzerströmung

In adiabaten Systemen tritt die Spritzerströmung kaum auf, denn durch die turbulenten Schwankungsbewegungen im Gaskern werden ständig Tropfen auf die Wand gebracht, welche dort einen dünnen Flüssigkeitsfilm bilden. Dies führt zur Ringströmung welche sehr häufig auftritt, weshalb sie im folgenden detailliert beschrieben wird.

- Struktur des Flüssigkeitsfilms

Auf dem an der Wand strömenden Flüssigkeitsfilm bewegen sich Wellen, dass unterschiedliche Aussehen dieser Wellen ist eine Folge des vom Flüssigkeitsmassenstromes im Film,

der Stoffeigenschaften der Flüssigkeit und der Schubspannung an der Phasengrenze. Diese Wellen können kleine Amplituden und regelmäßiges Aussehen aufweisen oder unregelmäßig sein.

- Entstehung von Tropfen

Strömt der Gasstrom wesentlich schneller als der Flüssigkeitsfilm so werden die Wellenkämme auf dem Film zerstäubt und Tropfen entstehen. Wenn sich im Flüssigkeitsfilm Blasen befinden, zerbersten diese an der Phasengrenzen und schleudern Flüssigkeit in den Gaskern. Im Übergangsbereich zwischen Pfropfen- und Ringströmung bilden sich Tropfen beim Aufreißen der Flüssigkeitswände die sich zwischen den Tropfen ausgebildet haben.

Wird ein Tropfen aus dem Flüssigkeitsfilm herausgerissen, so muss durch Reibungskräfte an der Phasengrenze die Oberflächenspannungskraft überwunden werden, dies wird mit der Gas-Weber-Zahl ausgedrückt. Hernach wird der Tropfen gegen die Schwerkraft transportiert, dies kann die Froude - Zahl beschreiben. Bei dünnen Filmen im Übergangsbereich ist auch die Re - Zahl zu berücksichtigen. Aus diesen Zusammenhängen lässt sich die kritische Gasgeschwindigkeit berechnen. Sie liegt für Luft / Wasser - Gemische in waagrecht und abwärtsgerichteter Strömung bei atmosphärischem Druck in etwa bei 10 - 20 m/s. Diese kritische Gasgeschwindigkeit ist kaum vom Rohrdurchmesser abhängig, steigt der Druck so sinkt sie jedoch deutlich. Auch eine sinkende Oberflächenspannung bewirkt, dass die kritische Gasgeschwindigkeit sinkt.

- Beladung des Gaskerns mit Flüssigkeitstropfen

Es befinden sich umso mehr Flüssigkeitstropfen im Gaskern,  
je größer die Reibungskräfte an der Phasengrenze,  
je turbulenter die Filmoberfläche und  
je kleiner die Kräfte im Film infolge der Oberflächenspannung sind.

- Eigenschaften des Gaskerns

Im Gaskern sind vor allem die Geschwindigkeitsverteilung und die Tropfenverteilung von Interesse. Liegt eine Ringströmung mit geringem Flüssigkeitsanteil vor, so weist das Geschwindigkeitsprofil des Gaskerns eine große Ähnlichkeit mit dem einer einphasigen Gasströmung auf. Steigt der Flüssigkeitsanteil, so wird auch das Geschwindigkeitsprofil immer steiler, dann liegt die maximale Geschwindigkeit in der Rohrmitte höher als bei reiner Gasströmung. Bei niedrigem Flüssigkeitsanteil ist das Geschwindigkeitsprofil ähnlich dem turbulentem Profil einer einphasen Strömung; siehe Abb. (2.8).

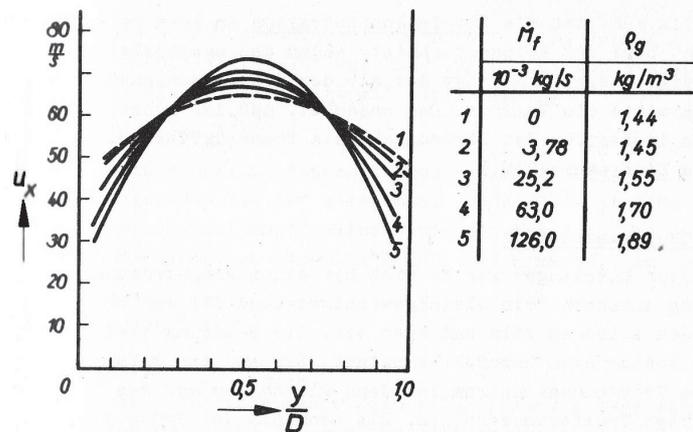


Abbildung 2.8: Geschwindigkeitsprofil im Gaskern einer senkrecht aufwärtsgerichteten Ringströmung mit Beladung, (Luft/Wasser, 1,2 - 1,6 bar, Massenstrom Luft =  $63 \cdot 10^{-3}$  kg/s, Rohrdurchmesser 31,8 mm)

In Abb. (2.8) weist Punkt 1 eine Gasgeschwindigkeit von 55 m/s und Punkt 5, 42 m/s auf. Um den Massestrom an Wasser zu transportieren ist ein höherer Druck erforderlich, welcher wiederum eine Steigerung der Dichte im Gas hervorruft. Dies führt zu einer Senkung der absoluten Gasgeschwindigkeit.

Die Tropfenkonzentration im Gaskern ist in etwa konstant über den Kernquerschnitt. Das Geschwindigkeitsprofil führt dazu, daß ein großer Teil der Tropfen im Zentrum des Strömungskanales befördert wird.

- Einfluss der Strömungserzeugung

Bei der Ringströmung hat die Art der Strömungserzeugung einen erheblichen Einfluß auf die strömungstechnischen Vorgänge. Für bestimmte Düsenarten gibt es Berechnungsmodelle mit denen es möglich ist den Sauterdurchmesser mittels Stoff- und Durchflussdaten sowie Geometriedaten zu berechnen, siehe [1].

## 2.6. Schallgeschwindigkeit im Gas / Flüssigkeits - Zweiphasengemisch

Eine wichtige Besonderheit von Gas / Flüssigkeits - Zweiphasen Strömungen ist die niedrige Schallgeschwindigkeit in einem solchen Zweiphasengebiet. Die Schallgeschwindigkeit von Luft liegt bei 330 m/s und die von Wasser bei 1500 m/s. Die Schallgeschwindigkeit in einem Zweiphasengebiet ist über einen weiten Bereich der Gemischzusammensetzung kaum vom Betrag des Massenstromverhältnisses abhängig und liegt bei etwa 40 - 50 m/s[1].

Aufgrund des hohen Gasanteiles im Fluidgemisch haben Zweiphasengemische eine stark vergrößerte Kompressibilität. Die Gemischdichte ändert sich jedoch nur geringfügig, was zu kleinen Schallgeschwindigkeiten führt.

In Abb. (2.9) ist die Gemisch - Schallgeschwindigkeit gegen die Volumenverhältnisse Luft / Wasser aufgetragen.

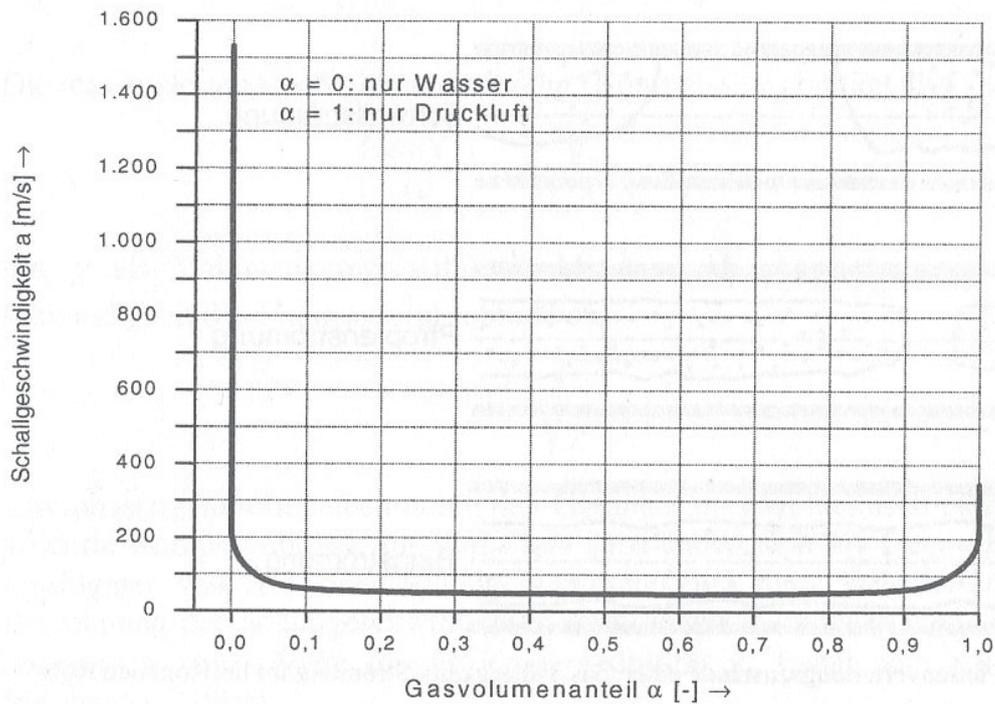


Abbildung 2.9: Schallgeschwindigkeit in einem Zweiphasengemisch Luft / Wasser in Abhängigkeit vom Gasvolumenanteil [5]

In [5] findet sich auch eine Herleitung, die der Berechnung der Schallgeschwindigkeit von Gemischen dient.

## 2.7. Strömungsverteilung bzw. -verzweigung

Die Verteilung oder das Sammeln von Strömungen in Leitungen oder das Ausblasen aus vielen Öffnungen ist in der Praxis von großer Bedeutung. Soll eine Strömung auf mehrere Teilströme gleichmäßig verteilt werden, sodass aus allen Teilströmungsquerschnitten die gleiche Menge austritt, so muss der Zuströmquerschnitt mindestens doppelt so groß sein wie die Summe aller Abstromquerschnitte, siehe dazu Abb. (2.10).

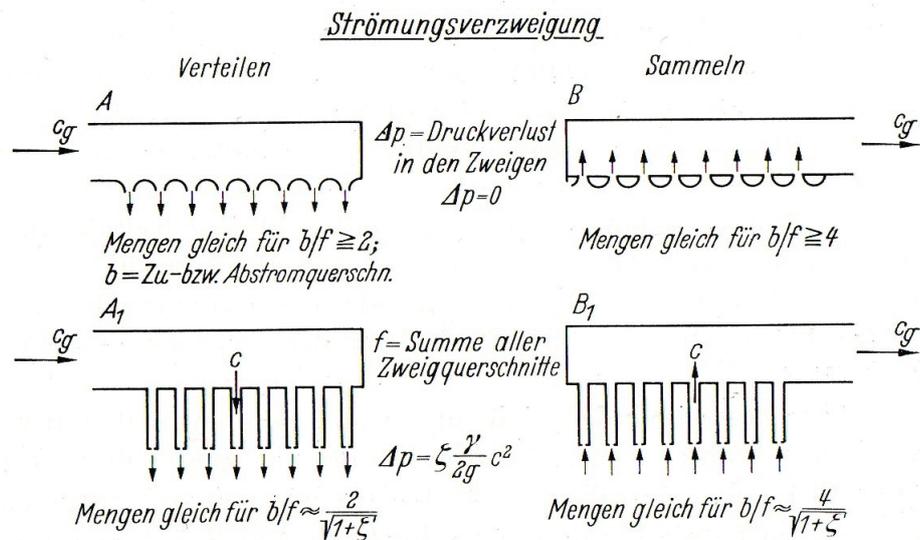


Abbildung 2.10: Strömungsverteilung bzw. -verzweigung [4]

Strömungsverzweiger, siehe Abb. (2.10) A und B, welche abgerundete Zu- und Abläufe aufweisen, haben sehr kleine Verluste, hingegen weisen Strömungsverzweiger der Bauform  $A_1$  und  $B_1$  in Abb. (2.10) wesentlich größer Verluste auf. Für das Verhältnis von Zustromquerschnitt zu Abstromquerschnitt gilt die Beziehung  $\frac{b}{f} \approx \frac{2}{\sqrt{1+\xi}}$  lt. [4]. Mit zunehmendem Widerstandsbeiwert  $\xi$  geht das Flächenverhältnis gegen 1.

### 3. Berechnungsprogramm zur pneumatischen Förderung der Spritzmasse

Zur Beurteilung der Förderbarkeit eines gegebenen Spritzmassestromes durch eine bestimmte Förderstrecke, sowie zur Bestimmung der Betriebszustände in der Förderleitung, die sich an der Position der Wassereindüsung und am Spritzlanzenaustritt einstellen, wurde ein Berechnungsprogramm auf VBA - Basis erstellt.

Das Berechnungsprogramm wurde genau dokumentiert und die Verknüpfung zur DA von Steinwandter Andreas hergestellt.

Zudem hat sich gezeigt, dass für ein rasches Verständnis des Berechnungscodes eine graphische Darstellung des Berechnungsprogramms mit den Verknüpfungen erforderlich ist, was in Form eines Ablaufschemas realisiert wurde. Das Ablaufschema des Berechnungsprogramms wird nachfolgend dargestellt und gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Aktualisierung der Daten, Schreibschutz
- Berechnung des Treibstrahldruckes
- Berechnung der Mischstrecke
- Berechnung der Leitung
- Lanzenteil

## 1. Dimensionen

## 2. Aktualisieren der Daten, Schreibschutz

### 2.1 Allgemeiner Teil

Schreibschutz

Löschen aller Daten der vorigen Berechnung

Einlesen der Daten aus dem Arbeitsblatt Parameter

Kontrolle ob die Anzahl der Rohre  $\geq 1$  ist.  $\longrightarrow$  MsgBox:  
„Die Anzahl der Rohre und Krümmer muss  $\geq 1$  sein. Bitte  
korrigieren“

Festlegen und zuordnen von Variablen.

Kontrolle ob die Eingabewerte positiv sind.

2.2 Krümmer und Rohr den Variablen `kruemmer()` und `rohr()` zuweisen

Kontrolle ob die Beladung  $< 20$  ist  $\longrightarrow$  MsgBox: „Beladung  $> 20$ ,  
Stopferefahr“

### 3. Berechnung des Treibstrahldruckes

3.1 u 3.2 Einlesen u Startwert Treibstrahl

3.3

Glg. 2

Unterscheidung der Druckbereiche

$$\frac{p_{Düse}}{p_T} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow 3.3.1 \text{ Unterschallbereich}$$

Druckbereiche

Glg 3 auf  $0 = A_{Düse} \dots$  umgeformt und  $p_T$  angenähert in Falsi

Annäherer der Ma-Zahl über eine Wertetabelle (Ma zu A/A) Glg 4 (Inkompressibel)

Im AB „Hilfsblatt“

$$M_T = A_{Düse} \left(\frac{p_{Düse}}{p_T}\right)^{1/k} \left\{ p_T \cdot p_T^{\frac{2-k}{k-1}} \left[ 1 - \left(\frac{p_{Düse}}{p_T}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{1/2}$$

$$\frac{A_{Leitung}}{A_{Düse}} = \frac{1}{Ma} \left[ \frac{2 + (k-1)Ma^2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

Ma 0,3 - 1 (Kompressibel)

Ma 1

3.3.2 Überschallbereich

$$\frac{p_{Düse}}{p_T} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow \text{Glg. 7}$$

$$p_T = \frac{M_T}{A_{Düse}} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}}}$$

### 4. Berechnung der Mischstrecke

Beim ersten Durchlauf werden alle Werte für  $\mu = 50$  berechnet  $v_f = 25$  und  $\text{eta}3 = 0,7$

4.1 Einlesen sämtlicher Daten und Berechnung der mittleren Gasgeschwindigkeit

Glg 8 mittlere Gasgeschwindigkeit

$$v_M = \sqrt{v_T \cdot v_T}$$

ANNAHME: Gasgeschwindigkeit  $v_f = 25$  m/s Wird für die verschiedenen Beladungen mit einem Faktor korrigiert.

Berechnung der tatsächlichen Gasgeschwindigkeit.

4.2 Berechnung der Feststoffgeschwindigkeit

Dichte in der Mischstrecke Glg 9:

$$\rho_M = \frac{M_T}{v_M \cdot A_M} = \frac{4 \cdot M_T}{\pi \cdot r_M^2 \cdot v_M}$$

Druck in der Mischstrecke ( $pV = nRT$ ):

$$p_M = \rho_M \cdot R \cdot T$$

Dichtedifferenz in Mischstrecke Glg 14:

$$\Delta \rho_{St} = \rho_S - \rho_M$$

Berechnung der Gasgeschwindigkeiten für die Feststoffgeschwindigkeiten:

$$\text{Glg 10} \quad v_{Max} = 0,6 \cdot (v_T - v_M) + v_M \rightarrow \text{Glg 11} \quad \bar{v} = \sqrt{v_{Max} \cdot v_M}$$

Berechnung von  $\Delta c_M$  und  $c_M$  unter 4.3.

Ma < 0,3 (Inkompressibel)

Glg 5 Geschwindigkeit

$$v_T = \frac{M_T}{\rho_{Sys} \cdot A_{Düse}}$$

Druckabfall in der Düse:

$$\Delta p_{Düse} = p_{r-} - p_{sys}$$

Ma 0,3 - 1 (Kompressibel)

Glg 6

$$v_T = Ma \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T}$$

Glg 6

$$v_T = Ma \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T}$$

Do While Schleife

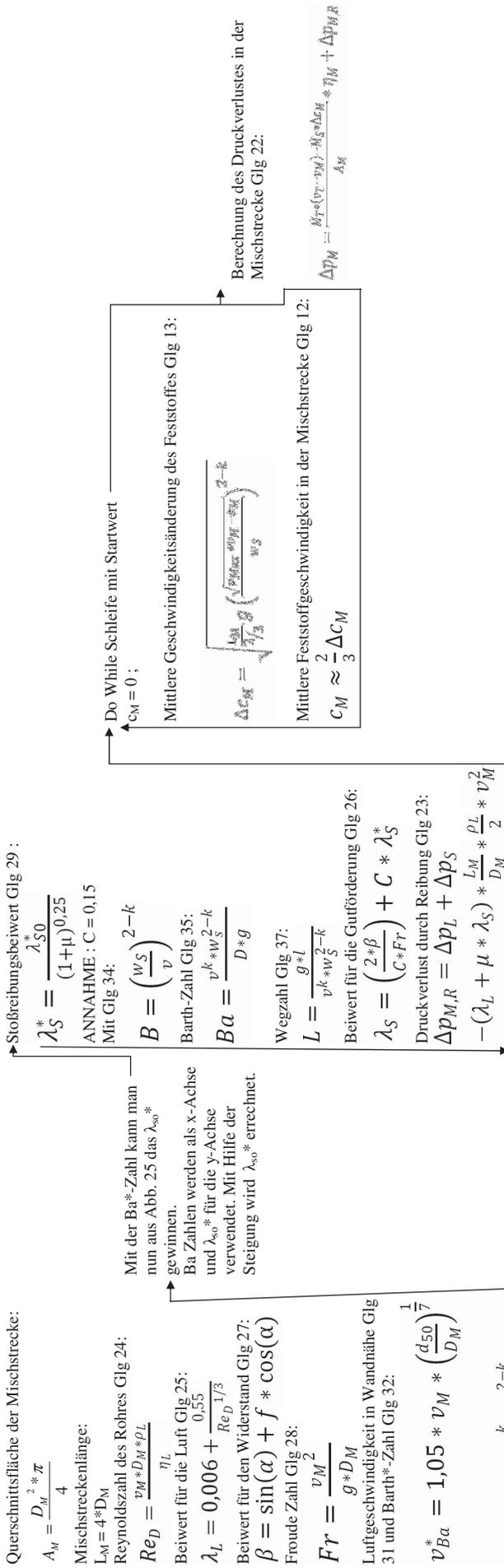
Glg 17  $Re_S = \frac{d_{50} \cdot w_S \cdot \rho_L}{\eta_L}$

Glg 18 und 19

Glg 20

Glg 21  $w_S = w_{St} \cdot [1 + (0,25 + k) \cdot \mu^{0,25}]$

### 4.3 Berechnung des Druckaufbaues in der Mischstrecke (4.2.3)



4.4 Berechnung von  $\mu = 0$ ,  $\mu = 2$  und  $\mu = 4$

$v_F$  ist die Gasgeschwindigkeit in der Förderstrecke (VDI Glg 57)

( $v_F = v_{tr}$  im Programm!!!)

$\mu = 0$ ,  $v_F = 25 * 1,65$ ;  $\eta = 0,9$

$\mu = 2$ ,  $v_F = 25 * 1,35$ ;  $\eta = 0,83$

$\mu = 4$ ,  $v_F = 25 * 1,15$ ;  $\eta = 0,73$

Anpassen der Gasgeschwindigkeit in der Förderstrecke auf die Beladungsfälle

\*  $\mu = 0$ ,  $v_F = 25$ ;  $\eta = 0,9$ ;  $v_F = 25 * 1,65$ ;  $\eta = 2$ ,  $v_F = 25 * 1,35$  und  $\eta = 4$ ,  $v_F = 25 * 1,15$

\*  $\eta$  ist der Mischwirkungsgrad der ebenfalls von der Beladung abhängt (siehe Abb. 24)

Die Zwischenergebnisse werden in Berechnung\_2\_ Teil eingetragen, und im Grafik ausgewertet. In Grafik erfolgt die grafische Darstellung von  $c_F$ ,  $v_F$  und  $\Delta p_M$ . Aus der grafischen Darstellung (Steigung der Kurve und Achsenabschnitt) werden im folgenden Programmteil für die tatsächliche Beladung die Werte ausgelesen.

Berechnung der tatsächlichen Beladung ohne den Umweg über die Grafik, dabei wird Rechenaufwand gespart und Genauigkeit gewonnen. Das  $\eta$  wird für bestimmte Bereiche festgelegt und nach der Berechnung der Beladung zugewiesen.

## 5. Berechnung der Leitung

### 5.1 Rohrabschnitt

Einlesen von  $v_f$  und  $\Delta p_M$  aus Grafik  
Berechnen vom p am Leitungsbeginn:

$$p_L = p_{\text{sys}} + \Delta p_M$$

$$p_M = p_L / (R \cdot \tau)$$

$$v_f = 4 \cdot m \cdot \tau / (D^2 \cdot \pi \cdot \rho_M)$$

$$c_F = v_f \cdot C \quad (\text{ANNAHME } C = 0,15)$$

Sieht nach ob es mehr Rohre oder Krümmer gibt und setzt die Laufvariable qwe auf diesen Wert.

Sieht nach ob mehr Krümmer als Rohre vorhanden sind und Wertet diese aus.

Aus 4.2.3:

Reynoldszahl des Rohres Glg 24:

$$Re_D = \frac{v_M \cdot D_M \cdot \rho_L}{\eta_L}$$

Dient als Startwert für Res.

Beiwert für die Luft Glg 25:

$$\lambda_L = 0,006 + \frac{0,55}{Re_D^{1/3}}$$

Froude Zahl Glg 28:

$$Fr = \frac{v_M \cdot D_M}{g \cdot D_M}$$

Luftgeschwindigkeit in Wandnähe Glg 31:

$$v_{H0}^* = 1,05 \cdot v_M \cdot \left(\frac{d_{50}}{D_M}\right)^{1/7}$$

Dichtdifferenz Glg 14:

$$\Delta \rho_{SL} = \rho_S - \rho_M$$

Stoßreibungsbeiwert Glg 29 :

$$\lambda_S^* = \frac{\lambda_{S0}^*}{(1 + \mu)^{0,25}}$$

Beiwert für den Widerstand Glg 27:

$$\beta = \sin(\alpha) + f \cdot \cos(\alpha)$$

ANNAHME : C = 0,15

Mit Glg 34:

$$B = \left(\frac{w_S}{v}\right)^{2-k}$$

Barth-Zahl Glg 35:

$$Ba = \frac{v^k \cdot w_S^{2-k}}{D \cdot g}$$

Wegzahl Glg 37:

$$L = \frac{g \cdot l}{v^k \cdot w_S^{2-k}}$$

Do While Schleife für Schwarmsinkgeschw.  
Glg 18 und 19:

$$\rightarrow \text{Barth-Zahl Glg 32:}$$

$$Ba^* = \frac{v_M^k \cdot w_S^{2-k}}{D_M \cdot g \cdot \left(1 - \frac{v_{Ba}^*}{v_M}\right)^{2-k}}$$

Die erste Schleife ist für Stahl E=200000

Unter else ist die Schleife für Gummi E=15

Mit der Ba\*-Zahl kann man nun aus Abb.

25 das  $\lambda_{so}^*$  gewinnen.

Ba Zahlen werden als x-Achse und  $\lambda_{so}^*$

für die y-Achse verwendet. Mit Hilfe

der Steigung wird  $\lambda_{so}^*$  errechnet.

$$w_{S0} = \left(\frac{1}{\lambda_S \cdot (D_{Schlauch} \cdot \rho_S \cdot v_f \cdot \tau) \cdot (d_{50} \cdot \rho_M)^{1/7}}\right)^{1/2-k}$$

Glg 20:

$$w_S = w_{S0} \cdot [1 + (0,25 + k) \cdot \mu^{0,25}]$$

Glg 21:

$$w_S = w_{S0} \cdot [1 + (0,25 + k) \cdot \mu^{0,25}]$$

Glg 17:

$$Re_S = \frac{d_{50} \cdot w_S \cdot \rho_L}{\eta_L}$$

Lösen der Bewegungsgleichung Glg 33 in Kutta:

$$\frac{dC}{dL} = \frac{(1-C)^{2-k}}{C} \cdot sgn(1-C) - \frac{B \cdot \beta}{C} - C \cdot Ba \cdot \frac{\lambda_S^*}{2}$$

Rückgabewert ist C.

Beiwert für die Gutförderung Glg 26:

$$\lambda_S = \left(\frac{2 \cdot \beta}{C \cdot Fr}\right) + C \cdot \lambda_S^*$$

Kanteneffekt aus den RHI Versuchen 1998:

$$\zeta_{Kante} = 0$$

If  $D_{Schlauch} = 0,042$  and  $D_{Lanzel} = 0,04$  then

$$F_{\zeta} = (\mu - 2,5792) / 0,2331$$

$$\zeta_{Kante} = F_{\zeta} \cdot 0,5 \cdot (1 - D_{Schlauch}^2 / D_{Lanzel}^2)$$

If  $D_{Schlauch} = 0,048$  and  $D_{Lanzel} = 0,04$  then

$$F_{\zeta} = (\mu - 2,8848) / 0,1108$$

$$\zeta_{Kante} = F_{\zeta} \cdot 0,5 \cdot (1 - D_{Schlauch}^2 / D_{Lanzel}^2)$$

Druckverlust im Rohr Glg 39:

$$\Delta p_{R,R} = -(\lambda_L \cdot \frac{l}{D} + \zeta_{Kante} + \mu \cdot \lambda_S \cdot \frac{l}{D}) \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_f^2$$

Gesamtdruckverlust Glg 44 mit Glg 42:

$$\Delta p_{Tot} = \Delta p_{R,R} + \Delta p_{Hub} + \Delta p_{Bes}$$

$$\Delta p_{Bes} = -\mu \cdot \rho_L \cdot v_L \cdot \Delta C$$

Mit der Geschwindigkeitsdifferenz:

$$\Delta C = C_F - C_E$$

Bei Rohren wird dieser Teil = 0.

Überprüfung ob ein Hubterm benötigt wird, (+90 heben und -90 fallen),  
Druckverlust wird neu berechnet mit Glg 44 und Glg 42 wie zuvor  
mit dem Hubterm Glg 41:

$$\Delta p_{Hub} = -\mu \cdot \rho_L \cdot g \cdot h_{Hub} \cdot \frac{v_L}{C_F}$$

Aktualisieren Dichte ( $\rho$  Änderung), Gasgeschwindigkeit ( $v$  Änderung)  
Der Feststoffgeschwindigkeit ( mit neuem C).

Eintragen der Zwischenergebnisse im Hilfsblatt.

Überprüfung ob noch Krümmer vorhanden sind, wenn ja, wird nun die  
Nächste Krümmer berechnet.  
Sind keine Krümmer vorhanden, wird das nächste Rohr berechnet.

## 5.2 Krümmerabschnitt

Feststoffgesch. nach dem Krümmer Glg 48: Druckverlust im Krümmer Glg 47:

$$C_E = C_F * e^{-f_{Gl} * \epsilon} \quad \Delta p = -\xi * \frac{\rho L}{2} * v_F^2$$

Aktualisieren Dichte ( $\rho$  Änderung)

Zuordnen der  $\xi$  - Werte:

90° = 0,1

120° = 0,12

360° = 0,15

Zuordnen von Bereichen für die  $\xi$  Werte  
nicht nur einzelne Winkel.

Länge des Bogens, für die Wegstrecke:

$S = r_{\text{Krümmer}} * \epsilon$  für die Grafik.

Automatische Bogenberechnung.

Eintragen der Ergebnisse in Hilfsblatt.

Finale:

Beim letzten Durchlauf der Krümmer wird  
 $c_E$  für den Druckverlust im folgenden Rohr  
Glg 48

$$C_E = C_F * e^{-f_{Gl} * \epsilon}$$

Ebenfalls wird der Druckverlust im  
Krümmer neu berechnet Glg 47:

$$\Delta p = -\xi * \frac{\rho L}{2} * v_F^2$$

## 6. Lanzen teil

6.1 Wassereinspritzung  
Einlesen aus Hilfsblatt:  $\rho$  und Gasgeschwindigkeit

Aus dem Lanzeneingabblatt:  
Wassergehalt auf 1 bezogen  
Berechnung des Mengenstromes an Wasser:  
 $m_{\text{Wasser}} = m_{\text{Fest}} * \text{Wassergehalt} * 60$   
 $V_{\text{Luft}} = V_{\text{Luft}} / \text{Abgelesen} * \text{Rotameterfaktor}$   
 $m_{\text{Luft}} = V_{\text{Luft}} * 1,273$   
ALR =  $m_{\text{Luft}} / m_{\text{Wasser}}$

Rotameterfaktor:

Das VTIU Rotameter wurde auf 5 bar  
Kalibriert nachdem bei 2 bar gemessen  
Wird muss der vom Gerätehersteller  
Empfohlene Druckumrechnungsfaktor  
Eingefügt werden.  
Faktor =  $\sqrt{2/5} = 0,632$

Da Dichte und Geschwindigkeit gleich  
Bleiben muss der Rohrdurchmesser  $g_1$   
Werden (siehe 4.4)

$$d_{\text{LanzeNeu}} = d_{\text{LanzeEingabe}} * 1,3^{0,5}$$

Berechnung der neuen Beladung:

$$\mu = \frac{(m_{\text{Fest}} + m_{\text{Wasser}})}{(m_{\text{FestLuft}} + m_{\text{WasserLuft}})}$$

## 6.2 Lanzenrohrberechnung

Druckaufbau in der Lanze:  
Reynoldszahl des Rohres Glg 24:

$$Re_D = \frac{v_M * D_M * \rho_L}{\eta_L}$$

Beiwert für die Luft Glg 25:

$$\lambda_L = 0,006 + \frac{0,55}{Re_D^{1/3}}$$

Froude Zahl Glg 28:

$$Fr = \frac{v_M}{g * D_M}$$

Luftgeschwindigkeit in Wandnähe Glg 31:

$$v_{\text{Wand}}^* = 1,05 * v_M * \left(\frac{d_{50}}{D_M}\right)^{1/7}$$

Neue Dichte des Fest-Flüssig-Phase  $\rho_{\text{Misch}}$ :

$$\rho_{\text{Misch}} = \frac{1}{\left(\frac{1 - \text{wassergehalt}}{\rho_{\text{Gas}}}\right) + \frac{\text{wassergehalt}}{\rho_{\text{Wasser}}}}$$

Do While Schleife für Schwärmsinkgeschw.  
Glg 18 und 19:

$$w_{\text{SG}}^* = \left( \frac{g * D_M * \rho_{\text{Misch}} * \lambda_L * \left(1 + \frac{1}{2 * Fr}\right)}{2 * \eta_L * \rho_{\text{Misch}} * \mu} \right)^{1/2}$$

Glg 21:

$$w_S = w_{\text{SG}} * [1 + (0,25 + k) * \mu^{0,25}]$$

$$\text{Glg 17: } Re_S = \frac{d_{50} * w_S * \rho_L}{\eta_L}$$

Barth\*-Zahl Glg 32:

$$Ba^* = \frac{v_M^k * w_S^{2-k}}{D_M * g * \left(1 - \frac{v_{\text{Ba}}^*}{v_M}\right)^{2-k}}$$

Mit der Ba\*-Zahl kann man nun aus Abb. 25 das  $\lambda_{\text{so}}$  gewinnen.

Ba Zahlen werden als x-Achse und  $\lambda_{\text{so}}$  für die y-Achse verwendet. Mit Hilfe der Steigung wird  $\lambda_{\text{so}}$  errechnet

Lösen der Bewegungsgleichung Glg 33:

$$\frac{dC}{dL} = \frac{(1-C)^{2-k}}{C} \operatorname{sgn}(1-C) - \frac{B \cdot \beta}{C} - C \cdot B a \frac{\lambda_S^*}{2}$$

Rückgabewert ist C.

Beiwert für die Gutförderung Glg 26:

$$\lambda_S = \left( \frac{2 \cdot \beta}{C \cdot Fr} \right) + C \cdot \lambda_S^*$$

Druckverlust im Rohr Glg 39:

$$\Delta p_{R,R} = -(\lambda_L + \mu \cdot \lambda_S) \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_F^2$$

Gesamtdruckverlust Glg 44 mit Glg 42:

$$\Delta p_{Tot} = \Delta p_{R,R} + \Delta p_{Hub} + \Delta p_{Bes}$$

$$\Delta p_{Bes} = -\mu \cdot \rho_L \cdot v_L \cdot \Delta C$$

Mit der Geschwindigkeitsdifferenz:

$$\Delta C = C_F - C_E$$

Bei Rohren wird dieser Teil = 0.

Überprüfung ob ein Hubterm benötigt wird, (+90 heben und -90 fallen), Druckverlust wird neu berechnet mit Glg 44 und Glg 42 wie zuvor, und dem Hubterm Glg 41:

$$\Delta p_{Hub} = -\mu \cdot \rho_L \cdot g \cdot h_{Hub} \cdot \frac{v_L}{c_F}$$

→ Aktualisieren der Dichte (wegen p Änderung), der Gasgeschwindigkeit (wegen der p Änderung) und der Feststoffgeschwindigkeit ( mit neuem C).

Eintragen der Zwischenergebnisse im Hilfsblatt.

### 6.3 Systemdruck Annähern

Senkung des p<sub>sys</sub>:

$$P_{system} = P_{system} - \frac{60000}{q \cdot v_l^{1,25}}$$

Berechnung des neuen Startwertes für den Treibstrahlendruck:

$$P_{Starttreibstrahl} = P_{sys} + \Delta p_{Duse}$$

Abbruchbedingung der Schleife welche die

Gesamte Berechnung beinhaltet:

1. Loop While p<sub>lanze</sub> > Umgebungsdruck

Sobald p am Ende kleiner ist als der Umgebungsdruck wird abgebrochen.

→ 2. Wurde die Schleife 30 x berechnet wird ebenfalls abgebrochen.

Zu niedrigen Systemdruck:

Druck am Anlageneende < 0,7 \* Umgebungsdruck

Anheben des Systemdruckes:

$$P_{system} = P_{system} + \frac{60000}{q \cdot v_l^{1,25}}$$

Berechnung des neuen Startwertes für den Treibstrahlendruck:

MsgBox: „Der Systemdruck wurde zu hoch gewählt. Bitte kleineren Wert eingeben!“

MsgBox: "Der Systemdruck wurde zu niedrig gewählt. Bitte größeren Wert eingeben!"

$$P_{\text{Starttreibstrahl}} = P_{\text{sys}} + \Delta p_{\text{Düse}}$$

Kontrolliert ob Schallgeschwindigkeit erreicht ist:

$$v_{\text{Düse}} = \sqrt{1,4 * R_{\text{diff}} * T}$$

Ist Schallgeschwindigkeit erreicht

MsgBox:

"Schallgeschwindigkeit im Treibdüsenaustritt erreicht!  
Flugförderung evtl. auch bei geringerem Förderdruck möglich  
oder größere Treibdüse einbauen"

Eintragen im Hilfsblatt  $P_{\text{Treibstrahl}}$  und  $P_{\text{Treibstrahl}}$

Bei der Programmbedienung ist folgendermaßen vorzugehen:

In einem ersten Schritt ist die Versuchsstrecke zu analysieren und sämtliche Geometrien wie Treibstrahldüsenquerschnitt, Druckluftleitungsquerschnitt, Rohrlängen, Rohrquerschnitte, Teilchendurchmesser sind zu recherchieren, denn falsch angenommen Querschnitte können zu erheblichen Fehlberechnungen führen.

Die Eingabe aller Daten erfolgt im Eingabeblatt, zusätzlich ist die Anzahl der Rohre und Krümmer im Injektorteil des Eingabeblattes erforderlich.

Im Injektorteil befindet sich auch ein Feld "Startwert Systemdruck". Hier muss ein Startwert zur Berechnung des Systemdruckes vorgegeben werden, welcher ca. 1,4 bar über dem tatsächlichen Systemdruck liegt.

Mit dem "Start - Button" erfolgt der Start der Berechnung.

Die Genauigkeit des Resultates kann an der Übereinstimmung vom Resultat des "Absolutdruck am Ende der Anlage" mit dem "Umgebungsdruck" abgelesen werden. Der "Absolutdruck am Ende der Anlage" sollte nicht mehr als 0,1 bar vom "Umgebungsdruck" abweichen. Ist dies nicht der Fall, so kann die neuerliche Eingabe "Startwert Systemdruck" um diese Differenz korrigiert werden, siehe dazu Anhang A.

## 4. Validierung des Programmes

### 4.1. Einleitung und Zusammenfassung

Dieser Abschnitt stellt eine Zusammenfassung aller Validierungsmaßnahmen im Hinblick auf die Treibstrahl- und Systemdruckberechnung dar.

Nach der Programmerstellung wurden im Werk Veitsch drei Versuchsserien durchgeführt von denen gesicherte Daten über die Druckverhältnisse in der Anlage vorliegen, siehe Abschnitt 4.2.1 bis 4.2.3. Zudem wurde die Versuchsserien welche 1998 von Herrn Triessnig durchgeführt wurden, für diese Validierung herangezogen, vgl. Abschnitt 4.2.4. Es erfolgte, auch eine Auswertung der Versuchsreihe von Herrn Lanzenberger, welche einige interessante Erkenntnisse brachte, vgl. Abschnitt 4.2.5.

Für die Versuche - Veitsch Juli 2008, November 2008 und Dezember 2009 ergeben sich folgende Annäherungen:

Tabelle 4.1: Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Wert des Treibstrahl- bzw. Systemdruckes; angegeben als Prozentanteil des jeweiligen Messwertes

Versuchsreihe	Messpunkt	Beladung [kg / kg]	Treibstrahl- abweichung [%]	Systemdruck- abweichung [%]
Juli 08	2 und 3	7,2	8,4	9,5
Nov. 08	2 und 3	8,8	4,1	3,3
Nov. 08	1	12,1	3,9	6,3
Dez. 08	1 und 3	17,5	5,3	5,1
Juli 08	1	17,7	5,0	18,7
Dez. 08	2	20,1	11,8	9,3

Die Versuchsreihe vom Juli 2008 erfolgte ohne Spritzdüse, mit einem Kugelhahn als Verjüngungsteil. Die Versuche vom November und Dezember 2008 wurden mit dem Spritzdüsenprototyp also der Wasser / Luft -Zweistoffverdüsung vorgenommen, wobei in der Dezembermessreihe, der dritte Versuch mit der herkömmlichen Spritzdüse (Einstoff - Druckverdüsung des Befeuchtungswassers) durchgeführt wurde.

Die berechneten Drücke sind immer niedriger als die gemessenen Drücke. Zudem sieht man, dass die größte Beladung auch die größte Abweichung aufweist, niedrigere Beladungen eine bessere Annäherung von berechnetem zu gemessenem Druck bringen. Mit mehr gesicherten Versuchen wäre eine weitere Verbesserung des Programms mit großer Wahrscheinlichkeit zu erreichen, dies zeigt die Validierung der Versuche von 1998 recht deutlich, vgl. Abschnitt 4.3.4, 4.4.2.4 und 4.4.3.

Den Versuchsreihen von 1998 kommt aufgrund des hohen Detaillierungsgrades große Bedeutung für die Programmvalidierung zu. Die Nachrechnung der Versuchsreihen von 1998 ergab - abgesehen von einzelnen Versuchsreihen, die bereits mit der Originalfassung des Berechnungsprogramms sehr gut nachgebildet werden konnten - relativ hohe Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten des Treibstrahl- und des Systemdruckes (vgl. Abb. (4.8)(4.9)). Diese Abweichungen weisen jedoch eine klare Systematik auf - so dass auch in diesen Fällen die prinzipiellen Trends der Messreihe gut nachgebildet werden konnten. Als Ursache dieser Systemabweichung wurde eine geometrische Besonderheit der Versuchsanordnung erkannt, der als sogenannter "Kanteneffekt" in Abschnitt 4.4.3 analysiert und infolge dessen zufrieden stellend korrigiert werden konnte; vgl. Abb. (4.12).

## 4.2. Versuchsübersicht

Im folgendem sind die alle vorhandenen Versuche beschrieben, d. h. die entsprechenden Geometrien- und Betriebsdaten zusammengestellt, wie sie auch als Eingaben in die später Berechnung benötigt werden.

### 4.2.1. Versuche - Veitsch, DA Steinwandter, Juli 2008

Die in Abbildung (4.1) dargestellte Versuchsstrecke wurde für die Versuche mit einphasiger Luftströmung und verschiedenen Partikelbeladungen herangezogen. Zum Einsatz kam ein Zweikammerkessel der Type "AnkerJet", dieses Gerät wurde auch in den späteren Versuchen eingesetzt. Bei den Versuchen mit verschiedenen Partikelbeladungen ist darauf hinzuweisen, dass hier ebenfalls mit dem Kugelhahn als Verjüngung gearbeitet wurde, und also keine Wasserzugabe erfolgte. In Abbildung (4.1) ist die Versuchsstrecke zu sehen.

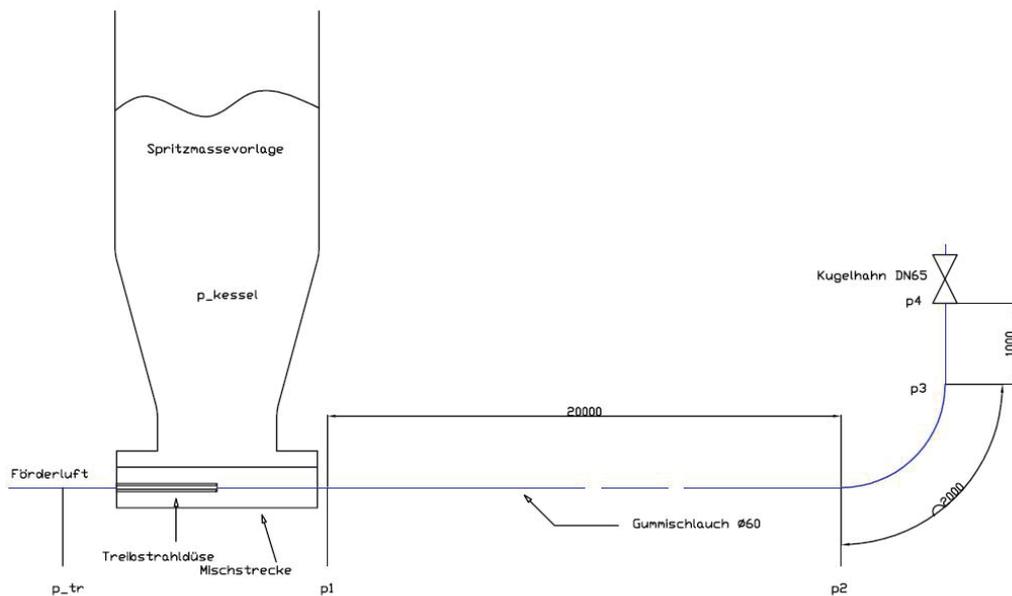


Abbildung 4.1: Skizze der Versuchsstrecke (aus DA Steinwandter, 2008)

### 4.2.2. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, November 2008

Bei diesem Versuch wurde der neu entwickelte Spritzdüsenprototyp mit Wasser / Luft-Zweistoffverdüsung eingesetzt. Des Weiteren wurde bei diesem Versuch eine Spritzmassemischung mit Wasser und Bindemittel eingesetzt. Es wurde eine Spritzmasse NP 12 verwendet, die Wasserzugabe betrug im Mittel 14 %. Die Treibdüse wies einen Durchmesser von 13 mm auf. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung (4.2) zu sehen.

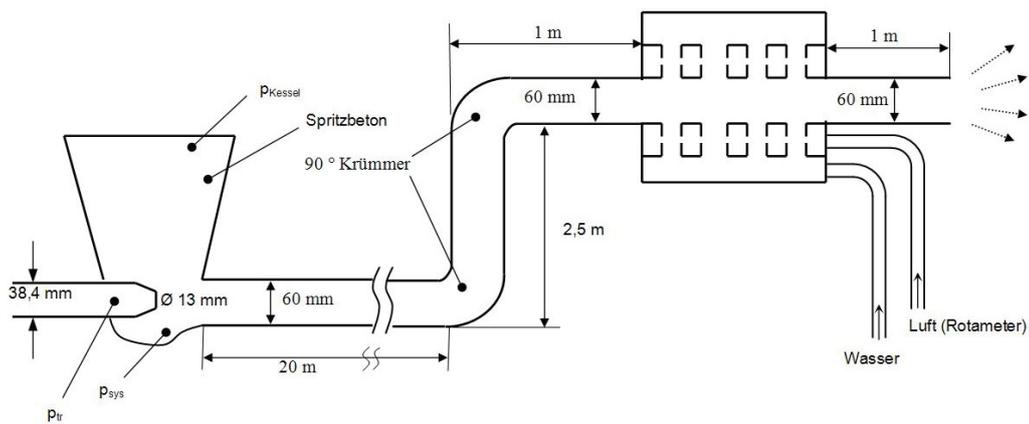


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau November 2008

#### 4.2.3. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008

Bei diesem Versuch wurde der neuen Prototyp (ersten beiden Betriebspunkte) mit der herkömmlichen Wasserdüse (3 Betriebspunkt) verglichen. Um extremere Betriebsbedingungen zu simulieren wurde anstatt der bisherigen 60 mm Schläuche auf 50 mm Schläuche umgestiegen. Zudem sollte der Durchmischungsgrad der Spritzmasse unmittelbar nach der Düse beurteilt werden, daher wurde das Lanzenendstück auf 38 cm gekürzt. Als Spritzmasse kam wieder NP 12 zum Einsatz. Für die Auswertung konnten die elektronisch erfassten Daten herangezogen werden. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung (4.3) zu sehen.

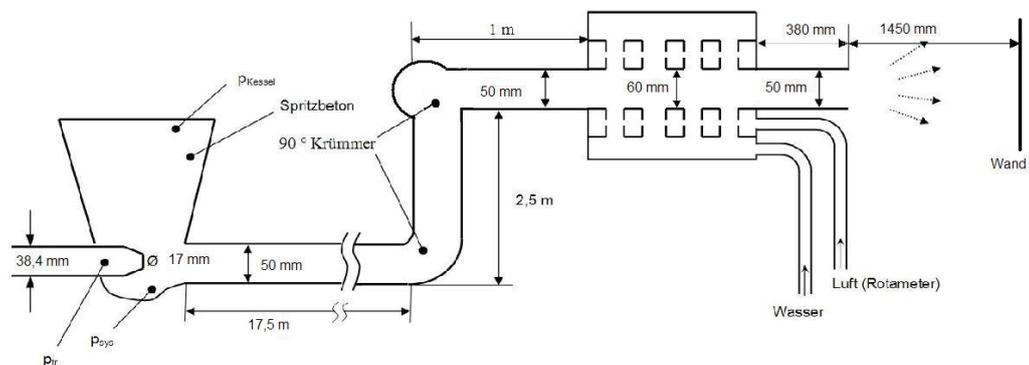


Abbildung 4.3: Versuchsaufbau Dezember 2008

#### 4.2.4. Versuche RHI, Triessnig, 1998

Von Herrn Triessnig wurden Daten von Versuchen übergeben, die 1998 in Leoben und Graz durchgeführt wurden. In Abbildung (4.4) ist der Versuchsaufbau zu sehen.

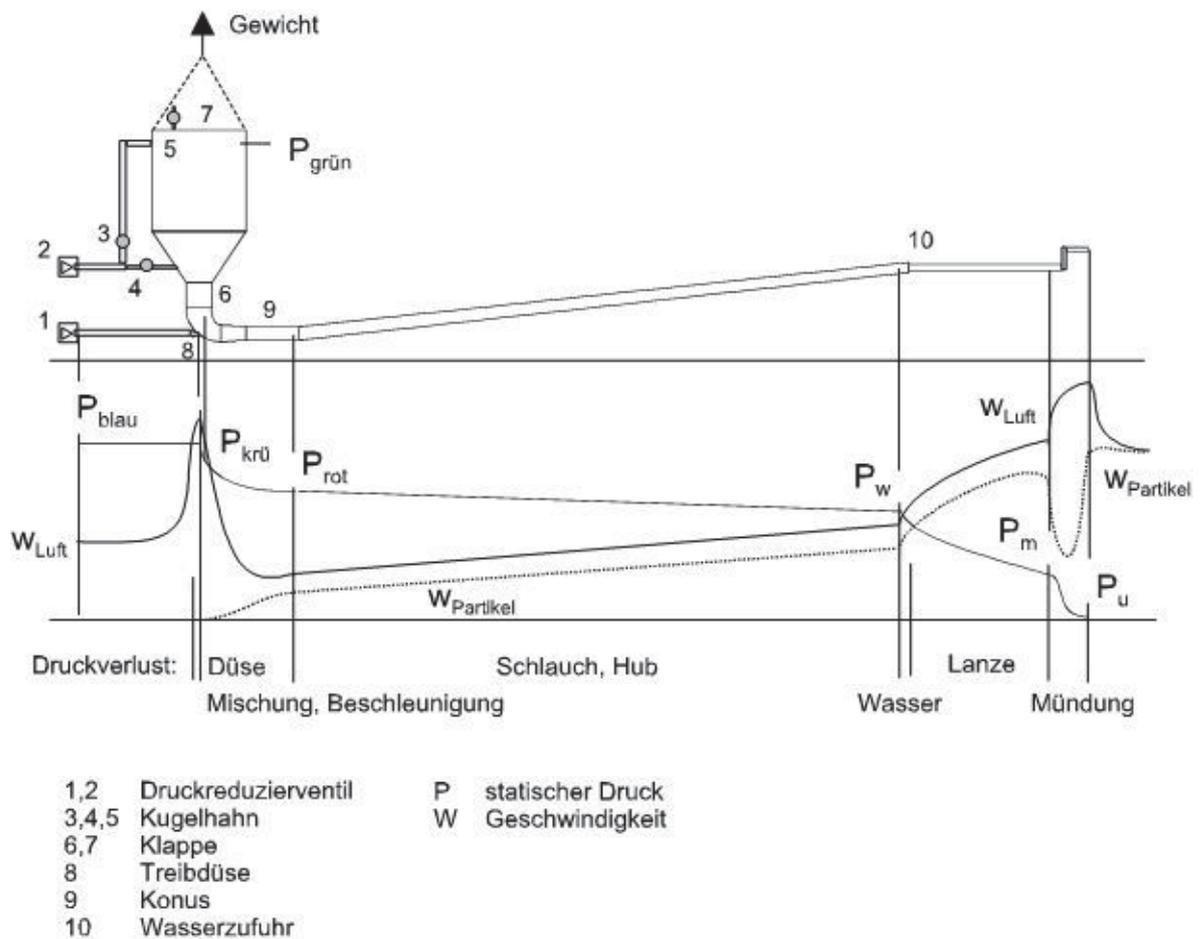


Abbildung 4.4: Versuchsaufbau (aus dem Untersuchungsbericht RHI 187/99 S. 26)

Es wurden sechs Versuchsserien durchgeführt, die Bezeichnungen gemäß folgender Tabelle (4.2):

Tabelle 4.2: Übersicht der Versuchsserien 1998

		Kurzbezeichnung
1.	J18 48/40x20/7,Y	J18Y
2.	J18 48/40x20/7,TT	J18-20TT
3.	J 28 48/40x20/3,5,TT	J28
4.	J18 48/40x10/3,5, TT	J18-10
5.	J 20 42/40x20/3,5, TT	J20-20
6.	J 20 42/40x10/3,5, TT	J20-10
7.	J26 32/35x20/3,TT	J26
8.	B 48/40x20/7TT	B1
9.	B 48/40x20/7Y	B2

Nomenklatur der Versuchsreihen:

J18 48/40x20/7,Y (J18 Y)	
48 ...	Durchmesser der Schläuche [mm]
40 ...	Durchmesser der Lanze[mm]
20 ...	Schlauchlänge [m]
7 ...	Lanzenlänge [m]
Y, TT ...	Mündungsform

Eine Versuchsreihe besteht immer aus mehreren Messpunkten, die sich in Beladung, Fördervolumenstrom, Massentyp und Wassergehalt unterscheiden. Diese Messpunkte wurden jeweils mit fortlaufenden Nummern versehen, um Verwechslungen zu vermeiden.

#### 4.2.5. Versuche - Veitsch, Lanzenberger, September 2006

Bei diesen Versuchen wurde über verschiedene Lanzenstellungen wie Lanzenrotation, Lanzengeschwindigkeit untersucht inwiefern sich diese auf die aufgetragene Schichtstärke auswirkt. Dabei wurden auch der Treibstrahl- und Systemdruck, sowie der Fördervolumenstrom als ca. Wert für alle Versuche angegeben. Die Aufzeichnung der Massendurchsätze erfolgte separat, mit einem Wert je Versuchsreihe.

- Beschreibung der Versuchsstrecke:

Der Treibdüsendurchmesser betrug 14 mm, der Druckluftleitungsdurchmesser 38,4 mm. Die Schläuche wiesen einen Durchmesser von 60 mm auf und waren 40 m lang, der zu überwindende vertikale Förderhöhenabschnitt des Schlauches betrug etwa 1,8 m. Die Spritzlanze war 1 m lang und wies einen Durchmesser von 60 mm auf. Die Wasserzufuhr betrug etwa 14 Gew. %. Als Spritzmasse wurde ein Material mit Korngröße  $< 3$  mm verwendet.

### 4.3. Diskussion der Messergebnisse

Im Folgenden wird auf Zusammenhänge eingegangen, die sich aus den Messergebnissen selbst ableiten; außerdem sind Beobachtungen und Erkenntnisse die sich während der Versuche ergaben hier festgehalten.

#### 4.3.1. Versuche - Veitsch, DA Steinwandter, Juli 2008

- Einphasige Luftströmung

Die Druckverluste bei der einphasigen Durchströmung der Anlage sind erwartungsgemäß niedrig, siehe Tabelle (4.3).

- Verschiedene Partikelbeladungen

Beim zweiten, dritten und vierten Betriebspunkt wurde mit sinkendem Fördervolumenstrom und Materialaustrag eine Beladung von etwa 7 erzielt. Dadurch sinken auch die gemessenen Treibstrahl- und Systemdrücke.

#### 4.3.2. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, November 2008

Die Messwerte sind in Tabelle (4.5) zu sehen. Während des Versuches war immer wieder ein Pulsieren der Schläuche zu erkennen. Ein weiteres Merkmal dieser Versuche sind die hohen Treibstrahl- und Systemdrücke die auf den kleinen Treibstrahldüsendurchmesser (13 mm) zurückzuführen sind. Da die elektronische Datenerfassung nicht funktionierte, wurden die händisch mitnotiert Daten zur Auswertung herangezogen.

#### 4.3.3. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008

Die Messwerte sind in Tabelle (4.6) zu sehen. Trotz der hohen Beladungen und des kleineren Schlauchquerschnittes kam es nur im letzten Versuch, mit der herkömmlichen Spritzdüse, zu einem leichten Pulsieren des Schlauches. Die Senkung der Drücke gegenüber den November - Versuchen, siehe Tabelle (4.5) rühren hauptsächlich vom größeren Treibdüsendurchmesser (17 mm) her. Bei den ersten beiden Versuchen Tabelle (4.6)(Zeile 1 und 2) konnten Mittelwerte aus konstanten Betriebszuständen gebildet werden. Beim dritten Versuch konnte kein konstanter Betriebszustand hergestellt werden, daher wurde für die Berechnung, ein nach Beladung und Volumenstrom ähnlicher Betriebspunkt aus den aufgezeichneten Daten ausgewählt siehe Tabelle (4.6) (Zeile 3).

#### 4.3.4. Versuche RHI, Triessnig, 1998

Bei allen Versuchsreihen wurde ein Anstieg in der Beladung vom ersten bis zum letzten Messpunkt hin erzeugt. Um dies zu erreichen senkte man den Fördervolumenstrom von 425 auf 370 Nm<sup>3</sup>/h bei gleichzeitigem heben des Masseeintrages. Bei den Messreihen J18-10 und J26 wurde ein Fördervolumenstrom von ca. 350 Nm<sup>3</sup>/h eingestellt. Messreihe J26 zeichnet sich zudem durch Beladungen < 10 aus. Im Folgenden werden die einzelnen Messreihen analysiert und miteinander verglichen.

1. Genaue Analyse der einzelnen Messreihen:

- Vergleich von J18 Y mit J18-20 TT

Die beiden Messreihen weisen verschiedene Mündungsformen auf, und sind ansonst von der geometrischen Anordnung gleich. In der Messreihe J18-20TT wurden die Spritzmassen Masse HP10 und NP 12 verwendet.

- Betrachtet man Abb. (4.5a) 1. und Abb. (4.5b) sieht man eine parallel Verschiebung zwischen den beiden Messreihen. Die Mündungsform Y benötigt also gegenüber der Mündungsform TT um etwa 0,3 bar mehr Druck bei einer Beladung von 6,7 -9,6, bei höheren Beladungen reduziert sich dieser Einfluss.
- In Versuchsserie J18-20TT sieht man keine signifikante Abweichung der Kurve, welche Rückschlüsse auf einen Masseeinfluss zuließen.

- Messreihe J28 verglichen mit den Reihen J18Y und J18-20TT

Die Lanze weist bei der Messreihe J28 eine Länge von 3,5 m auf, ansonsten ist die Geometrie gleich wie bei den Versuchreihen J18 Y und J18-20 TT. Spritzmasse war für die Messpunkte 1, 2, 4 und 5 NP 12 und für die Messpunkte 3 und 6 die Spritzmasse Nr. 144.

- Die ersten vier Messpunkte von J28 siehe Abb.(4.5a) und (4.5b) liegen deutlich niedriger als Messreihe J18\_20TT. Dies könnte eine unmittelbare Folge der deutlich kürzeren Lanze sein. Bei den Messpunkten 5 und 6 von J28 steigt jedoch der Druckbedarf deutlich über den der Messreihe J18-20TT. Die kürzere Lanze weist hier einen höheren Druckbedarf auf. Es gibt also keinen klaren Zusammenhang zwischen Lanzenlänge und erhöhten Druckbedarf aufgrund der vorliegenden Versuche.
- Der Einfluss der verschiedenen Massen in J28 kann man anhand von Messpunkt 3 und 4 sowie 5 und 6 überprüfen. Aus den Messpunkten 3 und 4 lässt sich die Aussage formulieren das NP 12 trotz höherer Beladungen einen geringeren Druckbedarf aufweist als Spritzmasse 144. Betrachtet man Messpunkt 5 und 6 so muss man genau die gegenteilige Aussage treffen, Masse NP 12 benötigt trotz geringerer Beladung mehr Druck. Die Differenz beträgt in beiden Fällen etwa 0,1 bar anhand dieser Messreihen kann also keine klare Aussage über den Einfluss der verschiedenen Massen getroffen werden.

- Messreihe J18\_10 (nur ein Messpunkt)

Der Schlauch ist nur halb so lang, wie bei den bisherigen Versuchen. Der Treibstrahl- druck liegt deutlich unter dem der Messreihen J18Y, J18-20TT, J28 und J18-10, während der Systemdruck auf dem zu erwartenden Niveau liegt, siehe Abb. ((4.5)a) und Abb. ((4.5)b).

- Vergleich von J20-20 und J20-10

Das Verhältnis zwischen Schlauchdurchmesser und Lanzendurchmesser (42/40), ist bei diesen Messreihen deutlich geringer als in den Versuchen J18Y, J18-20TT, J28 und J18-10. Die beiden Versuchsreihen weisen unterschiedliche Schlauchlängen auf, Masse war die Nr. 144 mit Ausnahme Messpunkte 1 und 2 der Reihe J20-10 hier wurde NP 12 verwendet.

- Messreihe J20-20 weist einen um etwa 0,3 bar höheren Druckbedarf auf als Messreihe J20-10, siehe Abb. ((4.5)a). Dieser kann auf den längeren Schlauch zurückgeführt werden.
- Aus der Änderung der Masse in J 20-10 ergibt sich kein signifikanter Einfluss.

- Messreihe J 26

Die Geometrie unterscheidet sich wesentlich von den anderen Messreihen. Die Beladungen liegen zwischen 7,3 und 9 und damit gegenüber den anderen Messreihen im untersten untersuchten Bereich.

- B - Messreihe aus Graz

- Aus Geometriegründen müssten die Messergebnisse aus Graz jenen der Messreihe J 18-20 TT ähnlich sein, sind dies jedoch in keinster Weise. Aus diesem Grund wurde die Messreihe die in Graz erstellt wurden nicht in unsere weiteren Betrachtungen einbezogen. Siehe dazu Abb. (4.5).

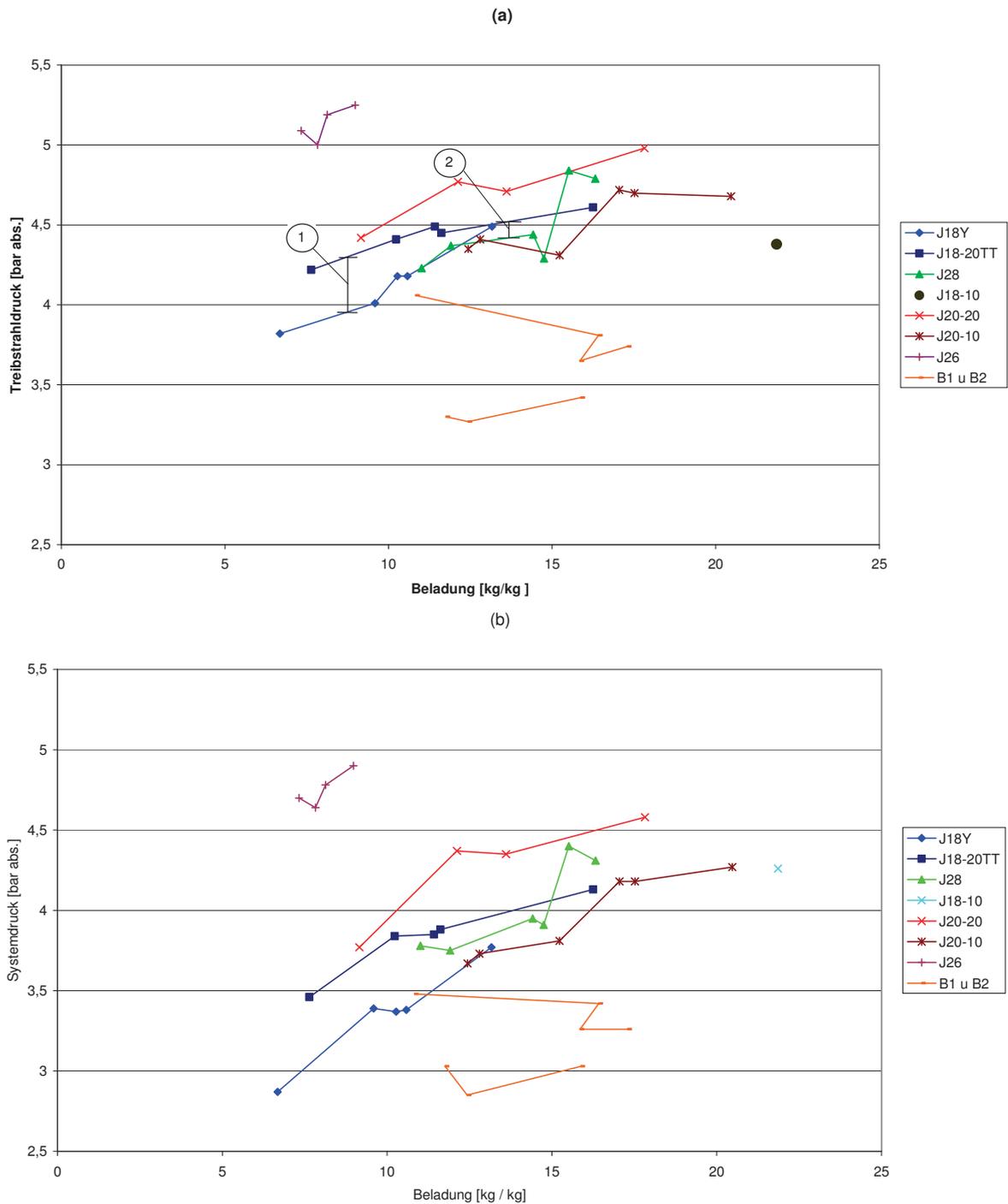


Abbildung 4.5: Messdaten der Messreihe von Triessnig (1998) zum Zusammenhang zwischen Treibstrahl Druck und Beladung (a) bzw. zwischen Systemdruck und Beladung (b)

## 2. Stopfer Problematik

Die Messreihe J18-10 besteht nur aus einem Messpunkt welcher die Grenzbedingungen eines Stopfers widerspiegelt. Daher kann über das Stopfverhalten der Masse 144 eine eindeutige Aussage getroffen werden, diese liegt unter diesen Versuchsbedingungen bei  $> 20$ .

In den Abb. (4.6a), (4.6b) und (4.6c) wurden die Ergebnisse aus den Versuchen von 1998 mittels Treibdruck - Gasgeschwindigkeitsdiagramm ausgewertet. Zusammengefasst sind jeweils die Versuche mit gleichem Schlauch- und Lanzendurchmessern. In Abb. (4.6a) konnte die Stopfgrenze, Anhand des Stopfers von J18-10 und der anderen förderfähigen Zuständen, eingezeichnet werden. Bei den beiden Diagrammen siehe Abbildung (4.6b) und (4.6c) liegt die Stopfgrenze jeweils links von den eingetragenen Versuchspunkten; wo genau lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht sagen.

In der Abb. (4.6d) sieht man zu den Versuchsreihen von (4.6a) berechnete Kurven konstanter Beladung, die Berechnung erfolgte mit der neuen Programmversion, also mit dem Korrekturterm. Mit steigendem Fördervolumenstrom bei konstanter Beladung wurden die jeweiligen Treibstrahlrücke berechnet. Für die Berechnung wurden die geometrischen Einstellungen der Versuchsreihe J18Y verwendet.

Da das Berechnungsprogramm durchaus höhere Beladungen als 20 berechnen kann, erscheint es sinnvoll, eine Warnmeldung im Programm einzufügen, die den Benutzer darauf hinweist, dass es bei Beladungen  $> 20$  zu Stopfern kommen kann, siehe Abschnitt 4.4.4.

Die Stopfer der Messreihen J18-20TT (Messpunkt 3) und J28 (Messpunkt 4) sind beide mit der Masse NP 12 entstanden, dies deutet auf eine Neigung dieser Masse zur Stopferbildung hin. Es könnte sich aber auch um anlagen- bzw. versuchsbedingte Stopfer handeln. Jedenfalls kam es bei den Massen HP 10, 144 sowie OW 72 zu keinerlei Stopfenbildung bei ähnlich hohen Beladungen. Die vermerkten Stopfer in den Messreihen J18-20 TT und J28 werden bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt da in beiden Fällen eine Betrieb mit höheren Beladungen möglich, war.

#### **4.3.5. Versuche - Veitsch, Lanzenberger, September 2006**

Fördervolumenstrom, Treibstrahl- und Systemdruck liegen mit ca. Angaben vor. Die verschiedenen Betriebszustände charakterisieren sich, für unser Rechenprogramm, über den Massedurchsatz.

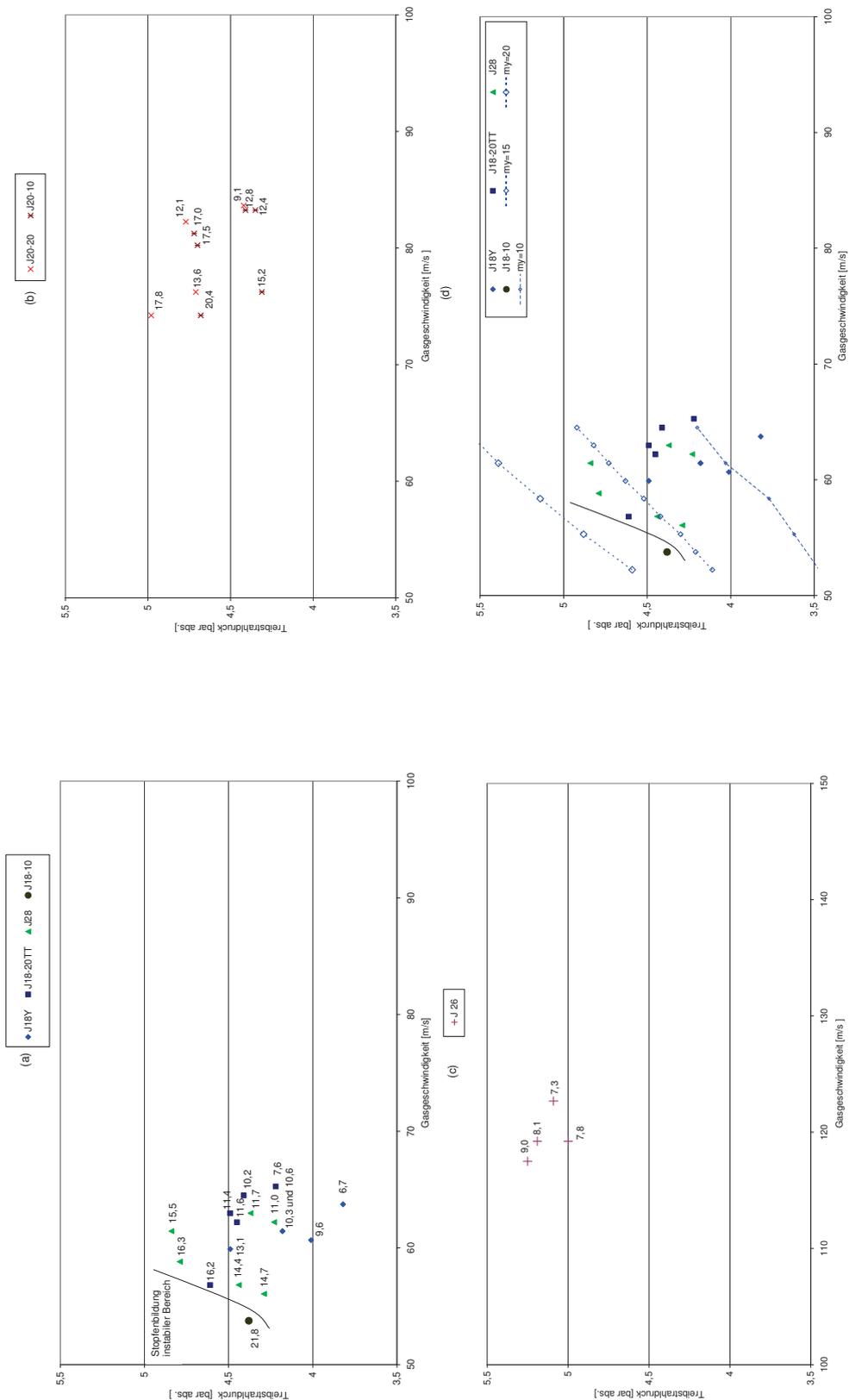


Abbildung 4.6: Messdaten zum Zusammenhang zwischen Treibstrahldruck und Leerrohrgeschwindigkeit des Förderstromes im Schlauch für die Versuchsreihen (a) J18Y, J18-20TT, J28 und J18-10; (b) J20-20 und J20-10; (c) J26; (d) Berechnete Reihen mit Beladungen von 20, 15 und 10 [kg/kg]; Programmversion neu, mit Korrekturterm für den Kanteneffekt

## 4.4. Durchführung der Programm - Validierung

Im Folgenden ist die Durchführung der Validierung näher beschrieben.

### 4.4.1. Beschreibung des Berechnungsablaufes

Der erste Schritt bei der Auswertung der vorhandenen Daten bestand in der Nachbildung der Versuchsstrecke im Programm. Dazu wurden die vorhandenen Daten, wie Schlauchlänge, Hebeabschnitt, Krümmer, Lanzenlänge usw., in das "Eingabeblatt" eingetragen und dann mittels Start die Berechnung ausgeführt. In Abb. 7 ist das "Eingabeblatt" ausgeführt mit den Zahlenwerten der Versuchsreihen J18Y zu sehen.

Zu den jeweiligen Betriebspunkangaben der Versuchseinstellungen (Fördervolumen- und Massenstrom, Wasserzusatz), wurden anschließend die Profile des Druckes, sowie der Gas- und Partikelgeschwindigkeit entlang der Förderstrecke berechnet. Es wird solange iteriert bis der Druck am Ende der Anlage zwischen 0,98 und 1,01 bar beträgt.

Für den Vergleich zwischen Messung und Berechnung wurde die Abweichung der Drücke in Excel wie folgt berechnet:

$$Abweichung[\%] = \frac{(P_{Messwert} - P_{Berechnet}) * 100}{P_{Messwert}}$$



#### 4.4.2. Diskussion der Berechnungsergebnisse

##### 4.4.2.1. Versuche - Veitsch, DA Steinwandter, Juli 2008

- Einphasige Luftströmung

Bei den Versuchen mit Luftströmung waren nur sehr geringe Abweichungen festzustellen, welche als Messungenauigkeit interpretiert wurden siehe Tabelle (4.3).

Tabelle 4.3: Einphasige Luftströmung durch die Versuchsanordnung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte des Treibstrahl- und des Systemdrucks; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3)

	$V_{Luft}$ [Nm <sup>3</sup> /h]	$m_{Part}$ [kg/min]	$\mu$ [kg/kg]	$p_{tr-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{tr-rech}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-rech}$ [bar <sub>bar</sub> ]	$\Delta p_{tr}$ [%]	$\Delta p_{sys}$ [%]
1.	172	-	-	1,26	1,05	1,3	1,02	-3,2	2,8

- Verschiedene Partikelbeladungen

Bei der pneumatischen Förderung siehe Tabelle (4.4) konnten vier Betriebspunkte aufgenommen werden, die Drücke sind in bar<sub>abs</sub> angegeben:

Tabelle 4.4: Vier Betriebspunkte zum pneumatischen Transport durch die Versuchsanordnung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte des Treibstrahl- und des Systemdrucks; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3) .

	$V_{Luft}$ [Nm <sup>3</sup> /h]	$m_{Part}$ [kg/min]	$\mu$ [kg/kg]	$p_{tr-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{tr-rech}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-rech}$ [bar <sub>bar</sub> ]	$\Delta p_{tr}$ [%]	$\Delta p_{sys}$ [%]
1.	200	75	17,7	2,0	1,6	1,9	1,3	5,0	18,7
2.	470	67	6,7	4,5	1,7	4,1	1,5	8,9	11,8
3.	400	64	7,6	3,8	1,5	3,5	1,4	7,9	7,1
4.	300	45	7,1	2,6	1,4	2,6	1,3	0	7,1

- Erster Betriebspunkt

Die vom Programm berechnete Werte des Treibstrahl- und Systemdruckes lagen niedriger, als die gemessenen Drücke. Wobei der berechnete Systemdruck um 0,3 bar zu niedrig liegt.

- Zweiter, dritter und vierter Betriebspunkt

Die Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Werten sinken mit der Förderluftmenge sowie mit der Austragsmenge.

Ursache dieser Abweichung dürfte ein ungleichmäßige Materialeintrag in den Treibdüsentopf und der damit verbundene ungleichmäßige Austrag des Feststoffes aus demselben sein.

#### 4.4.2.2. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, November 2008

In der folgenden Tabelle sind vier händisch mitnotierte Betriebspunkte angeführt.

Tabelle 4.5: Vier Betriebspunkte zur pneumatischen Förderung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Daten von Treibstrahl- und Systemdruck; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3)

	$V_{Luft}$ [Nm <sup>3</sup> /h]	$m_{Part}$ [kg/min]	$\mu$ [kg/kg]	$p_{tr-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{tr-rech}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-rech}$ [bar <sub>bar</sub> ]	$\Delta p_{tr}$ [%]	$\Delta p_{sys}$ [%]
1.	510	132	12,1	6,11	2,21	5,87	2,07	3,9	6,3
2.	505	103	9,5	6,11	2,01	5,81	1,93	4,9	4,0
3.	506	89	8,20	6,01	1,91	5,82	1,86	3,2	2,6
4.	400	170	19,80	4,5	2,6	4,6	2,11	-2,2	18,8

In der Treibstrahldüse wurde laut Programmberechnung Schallgeschwindigkeit an allen Betriebspunkten erreicht.

Die Beladungen der ersten drei Messpunkte sind niedrig und die Genauigkeit der Programmberechnung ist hoch. Der letzte Betriebspunkt weist eine atypische Fehlerabweichung auf, der berechnete Treibstrahl- und Systemdruck liegt geringfügig höher, während der berechnete Systemdruck zu niedrig ist. Auffällig ist auch der geringere Fördervolumenstrom und die sich daraus ergebende hohe Beladung. Die Ursache könnte ein nicht synchrones Ablesen der Daten sein.

#### 4.4.2.3. Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008

Die Werte sind in Tabelle (4.6) zu sehen.

Tabelle 4.6: 1. und 2. Mittelwerte aus konstanten Betriebszuständen und 3. Betriebspunkt (vgl.4.3.3) zur pneumatischen Förderung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Daten von Treibstrahl- und Systemdruck vs Beladung; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3)

	$V_{Luft}$ [Nm <sup>3</sup> /h]	$m_{Part}$ [kg/min]	$\mu$ [kg/kg]	$p_{tr-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{tr-rech}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-rech}$ [bar <sub>bar</sub> ]	$\Delta p_{tr}$ [%]	$\Delta p_{sys}$ [%]
1.	490	185	17,6	4,11	3,11	3,84	2,97	6,6	4,5
2.	433	187	20,1	4,01	3,11	3,54	2,82	11,8	9,3
3.	492	183	17,4	4,01	2,97	3,85	2,81	4,0	5,7

Ein Einfluss aus dem Wechseln der Spritzdüse ist nicht zu erkennen. Hingegen sieht man deutlich die Steigung der Abweichung mit der Beladung.

#### 4.4.2.4. Versuche RHI, Triessnig, 1998

Die Ergebnisse werden anhand der Abb. (4.8), (4.9) und (4.10) diskutiert. Wobei in den Abb. (4.8a, b) sowie (4.10a, b) Absolutwerte für die gemessenen und berechneten Treibstrahl-

bzw. Systemdrücke dargestellt sind, die analogen Abb. (4.9a, b) und (4.10c, d) jedoch die relative Abweichung zwischen Messung und Rechnung wiedergeben.

Aus den Aufzeichnungen der Versuche wurden der Treibstrahl Druck ( $P_{blau}$ ) mit dem berechneten Treibstrahl Druck ( $p_{tr}$ ) und der Systemdruck ( $P_{grün}$ ) mit dem berechneten Systemdruck ( $p_{sys}$ ) verglichen. Um den Einfluss der Beladung und des Fördervolumenstromes zu untersuchen wurden die Absolutwerte der gemessenen und berechneten Drücke sowie die Abweichungen der einzelnen Messreihen in Form von Diagrammen aufgetragen und ausgewertet.

#### 1. Einfluss der Beladung

Die berechneten Absolutwerte stimmen mit den gemessenen Werten zwar nicht überein, jedoch ist deutlich zu sehen, dass die Form der Kurven einen analogen Verlauf zeigt, was auf einen systematischen Fehler hindeutet. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 4.4.3 näher analysiert. In den Abb. (4.9c, d) erkennt man einen tendentiellen Anstieg der Kurven in Richtung höherer Beladungen.

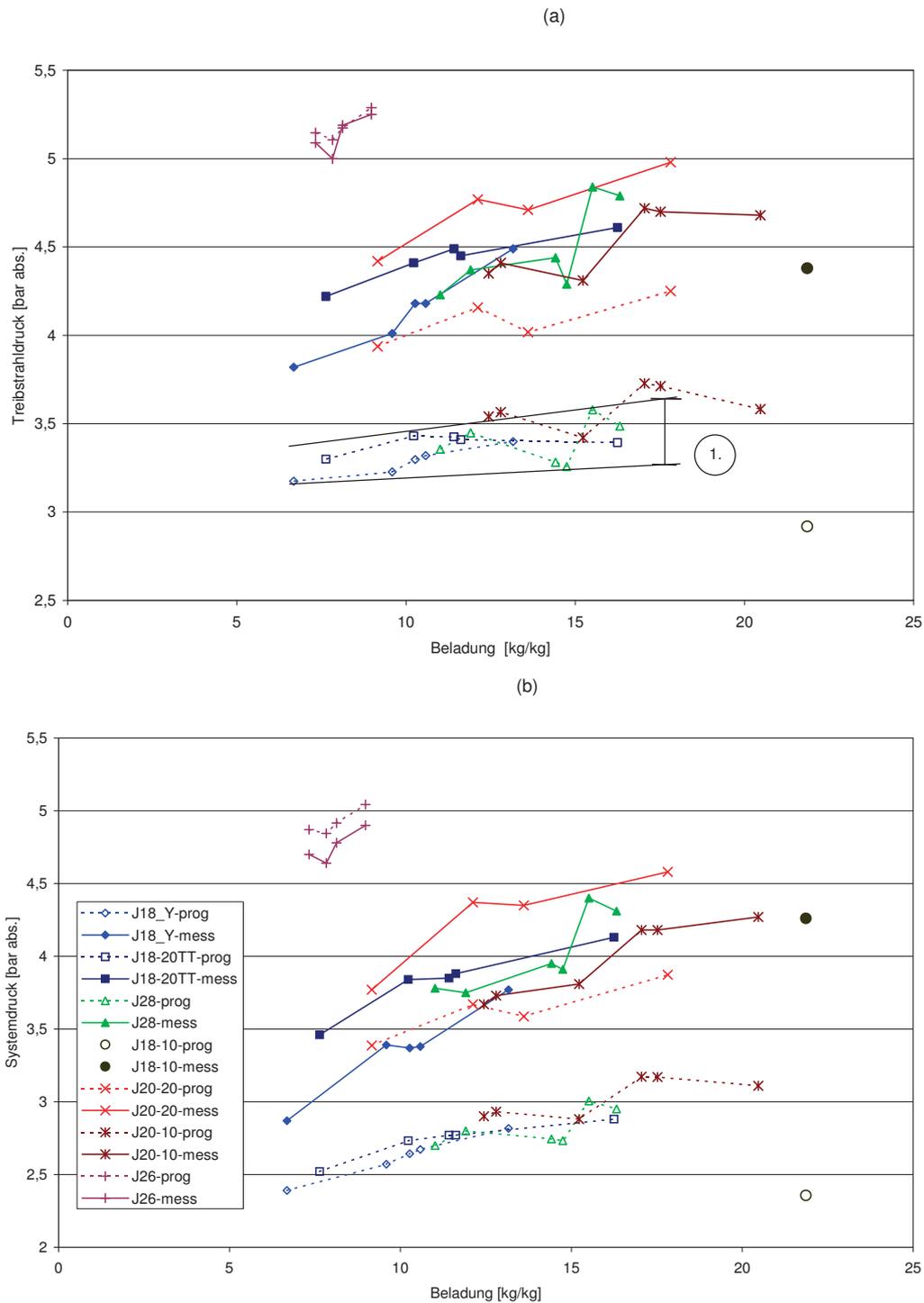


Abbildung 4.8: Versuchsreihen Triessnig (1998); Vergleich gemessener und berechneter Daten von Treibstrahlendruck (a) bzw. Systemdruck (b) als Funktion der Beladung; Programmversion original, d. h. ohne Korrekturterm für den Kanteneffekt (vgl. Abschnitt 4.4.3)

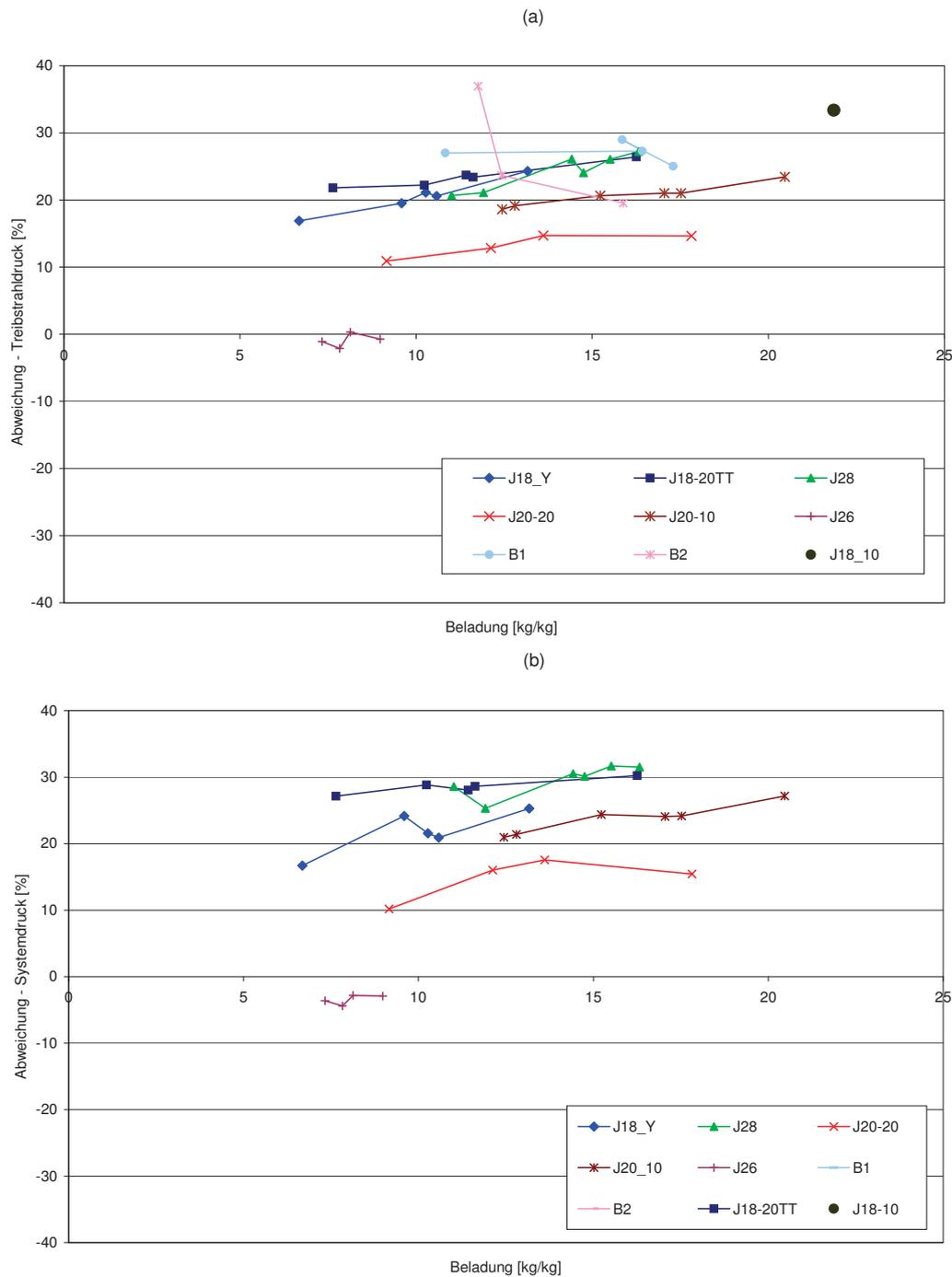


Abbildung 4.9: Versuchsreihen Triessnig (1998); Relative Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Treibstrahl Druck (a) bzw. Systemdruck (b) dargestellt als Funktion der Beladung; Programmversion origina, d. h. ohne Korrekturterm für den Kanteneffekt (vergleiche Abschnitt 4.4.3)

## 2. Einfluss des Fördervolumenstromes

Des Weiteren wurde recherchiert, ob es einen Zusammenhang zwischen Fördervolumenstrom und Druckabweichung gibt. Es ist sofort ersichtlich, dass die relativen

Abweichungen zwischen Messung und Berechnung keine nennenswerte Abhängigkeit vom Fördervolumenstrom aufweisen, sondern annähernd unabhängig vom Fördervolumenstrom konstant verlaufen; siehe Abb. (4.10c, d).

3. Genaue Analyse der Berechnungsergebnisse zu den einzelnen Versuchsreihen:

- Vergleich von J18 Y mit J18-20 TT

Die beiden Versuchsreihen weisen verschiedene Mündungsformen auf, und sind ansonst von der geometrischen Anordnung gleich.

- Das Programm kann zwischen den verschiedenen Mündungsformen nicht unterscheiden. Die höheren Drücke der Messreihe J 18-20 TT gegenüber J18Y ergeben sich hauptsächlich durch den höheren Fördervolumenstrom, der benötigt wird um einen höheren Massestrom bei ähnlicher Beladung zu ermöglichen der Messreihe J 18-20 TT. Da auch der realen Messwert diesem Einfluss unterliegt, siehe Abschnitt 4.3.4 kann der Einfluss der Mündungsform von ca. 0,3 auf ca. 0,2 bar gesenkt werden. Die erhöhte Wasserzugabe in Messreihe J18Y übt auf den Druck keinen signifikanten Einfluss aus.

- Masseinflüsse kann das Rechenprogramm nicht widerspiegeln.

- Messreihe J28 verglichen mit den Reihen J18Y und J18-20TT

Die Lanze weist bei der Messreihe J28 eine Länge von 3,5 m auf, ansonsten ist die Geometrie gleich wie bei den Versuchsreihen J18 Y und J18-20 TT.

- \* Für das Programm errechnet einen Druckunterschied zwischen den Messreihen J 18Y, J18-20TT und J28 in einem Bereich von 0,1 bis 0,2 bar, siehe Abb. (4.8a) 6.. Die kürzere Lanze ergibt keinen signifikant geringeren Druckbedarf. Dies konnte auch bei den realen Messungen nicht nachgewiesen werden, siehe Abschnitt 4.3.4.

- \* Das Sinken und Steigen der Drücke beruht hauptsächlich auf dem Sinken und Steigen des Fördervolumenstromes.

- Messreihe J18\_10 (nur ein Messpunkt)

Der Schlauch ist nur halb so lang, wie bei den bisherigen Versuchen.

Es zeigt sich sowohl beim Treibstrahl- als auch beim Systemdruck eine erheblich größere Abweichungen als bei allen anderen Versuchsreihen, siehe Abb. (4.9c) und (4.9b). Zu berücksichtigen ist, dass es sich bei diesem Messpunkt nicht um einen Förderzustand sondern um einen Stopfer handelt.

- Vergleich von J20-20 und J20-10

Die beiden Messreihen weisen unterschiedliche Schlauchlängen auf.

- \* Der höhere Druckbedarf der Messreihe J20-20 wird auch vom Programm eindeutig nachvollzogen, siehe Abb. (4.8a) und (4.8b). Für die J20-20 Messreihe stimmen die gemessenen mit den berechneten Drücken besser überein als für die J20-10'er Reihe, siehe Abbildung (4.9c) und (4.9d).

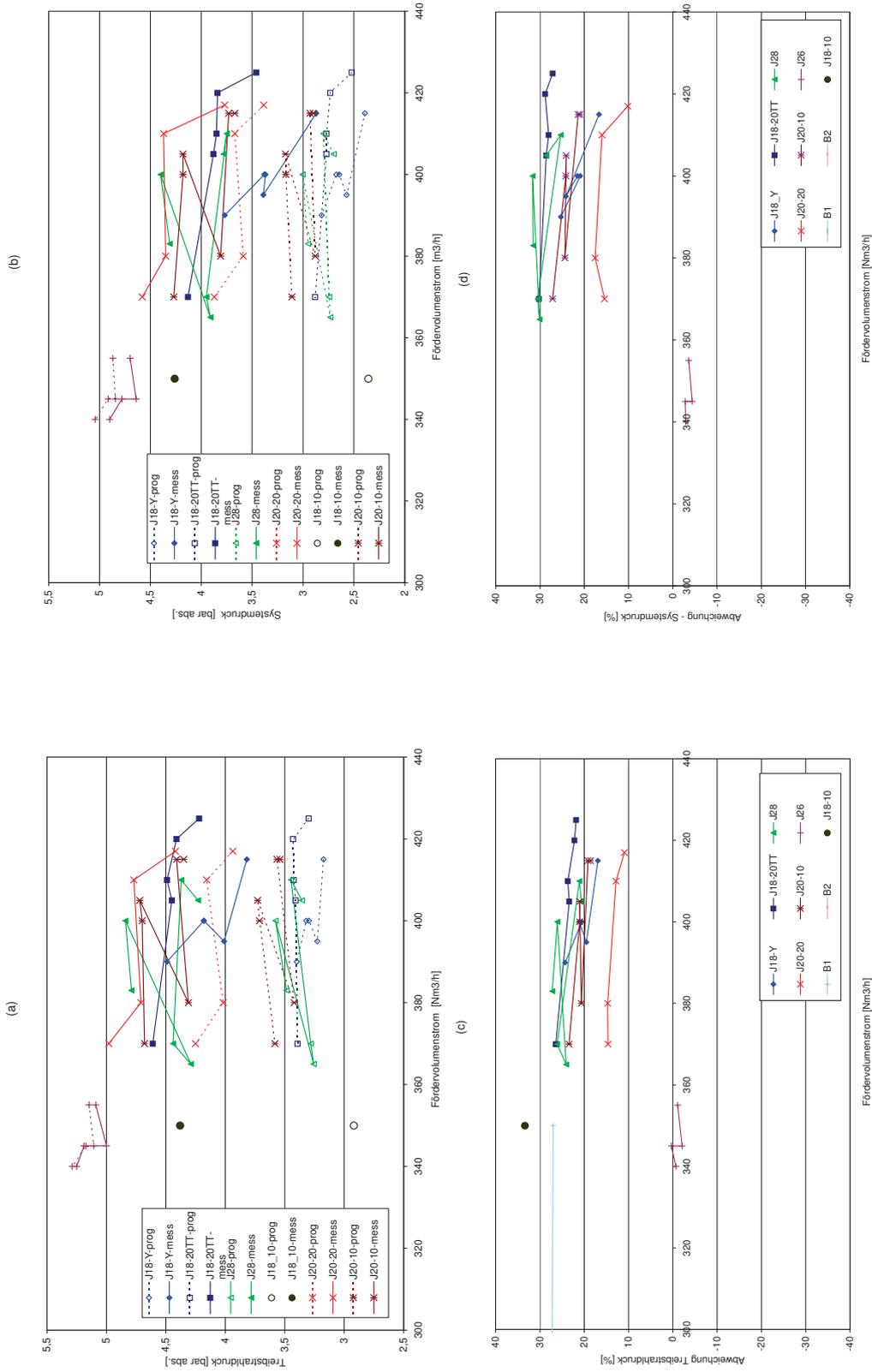


Abbildung 4.10: Versuchsreihen Triessnig (1998); Vergleich gemessener und berechneter Daten von Triebstrahldruck (a) bzw. Systemdruck (b) dargestellt als Funktion des Fördervolumenstromes; sowie deren relative Abweichung zwischen gemessenem und berechneten Daten dargestellt als Funktion des Fördervolumenstromes (c) und (d); Programmversion original, d.h. ohne Korrekturterm für den Kanteneffekt (vgl. Abschnitt 4.4.3).

– Messreihe J 26

Die Messreihe weist keinerlei nennenswerte Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Drücken auf siehe Abb. (4.8) und (4.9).

4. Vergleich von J18Y, J18-20TT, J28, J18-10 mit J20-20, J20-10 und J26

Die Messreihen J18Y, J18-20TT, J28 und J18-10 wurden mit einem Rohrdurchmesser / Lanzendurchmesser von 48 / 40 gefahren, während die Messreihe J20-20 und J20-10 mit 42 / 40 geführt wurde. Die ersten vier Messreihen weisen eine deutlich höhere Abweichung von Treibstrahl- und Systemdruck auf als die 5 und 6 Messreihe. Diese Tendenz setzt sich in J 26 fort, wo es zu einer sehr guten Annäherung zwischen gemessenen und berechneten Treibstrahl- und Systemdruck kommt. Dieser Effekt kann als Folge der unterschiedlich starken Strömungswiderstände an den Kanten zwischen Förderschlauch und Spritzlanze infolge der abrupten Querschnittsänderung interpretiert werden, und wird im Abschnitt 4.4.3 weiterverfolgt.

**4.4.2.5. Versuche - Veitsch, Lanzenberger, September 2006**

Der berechnete Systemdruck steigt mit dem Massendurchsatz, wobei der gemessene Systemdruck immer über diesem berechnetem Wert liegt. Der Treibstrahl- und Systemdruck ist hauptsächlich vom Fördervolumenstrom abhängig und wird nur geringfügig vom Massendurchsatz beeinflusst. Der gemessene Treibstrahl- und Systemdruck liegt immer unter den berechneten Werten; vgl. Tab. (4.7)

Tabelle 4.7: Versuche Veitsch, Lanzenberger (2006); Elf Betriebspunkte zur pneumatischen Förderung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Daten von Treibstrahl- und Systemdruck; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3)

	$V_{Luft}$ [Nm <sup>3</sup> /h]	$m_{Part}$ [kg/min]	$\mu$ [kg/kg]	$p_{tr-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-mess}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{tr-rech}$ [bar <sub>abs</sub> ]	$p_{sys-rech}$ [bar <sub>bar</sub> ]	$\Delta p_{tr}$ [%]	$\Delta p_{sys}$ [%]
1.	ca. 500	70	6,5	ca. 4,8	ca. 3,1	4,96	1,99	-3,3	36
2.		100	9,3			4,95	2,24	-3,1	27,7
3.		100	9,3			4,95	2,24	-3,1	27,7
4.		130	12,1			4,96	2,47	-3,3	20,3
5.		130	12,1			4,96	2,47	-3,3	20,3
6.		200	18,6			5,00	2,95	-4	4,2
7.		180	16,8			4,98	2,82	-3,6	9,0
8.		135	12,6			4,96	2,49	-3,3	19,7
9.		135	12,6			4,96	2,49	-3,3	19,7
10.		190	17,71			4,99	2,89	-3,8	6,8
11.		200	18,6			5,00	2,95	-4	4,8

Aus den Versuchen von November (2008) und Dezember (2008) ist bekannt, dass der Fördervolumenstrom schwankt, diese Schwankungen haben beträchtlichen Einfluss auf die Beladung und damit auch auf die berechneten Drücke, daher wird von einer Einbeziehung dieser Daten in die Validierung abgesehen.

#### 4.4.3. Einführung eines Korrekturterms für den Kanteneffekt

Da ein bedeutender Teil der Messungen eine Querschnittsänderung zwischen Förderschlauch und Spritzlanze und damit einen zusätzlichen Druckverlustbeitrag (Kanteneffekt) wie unter Abschnitt 4.4.2.4, 4 erläutert aufweisen, wurde dieser Effekt im Programm berücksichtigt, durch Einführung eines Korrekturterms folgender Form:

$$\Delta p = \zeta * \frac{\rho}{2} * v_{gas}^2$$

$$\zeta = F_{corr} * 0,5 * \left(1 - \frac{Fläche_{Schlauch}}{Fläche_{Lanze}}\right)$$

$F_{corr}$  hat sich als Funktion der Beladung und des Verhältnisses von Schlauch- und Lanzendurchmesser herausgestellt. Für den Widerstandsbeiwert  $\zeta$  wird damit jener Faktor ermittelt der benötigt wird, um den Fehler für die gegebenen Messdaten auszugleichen. Die im nachstehenden Diagramm ersichtliche Regressionsgerade wurde im Programm verwendet

um die Abweichungen der originalen Programmversion zu korrigieren.

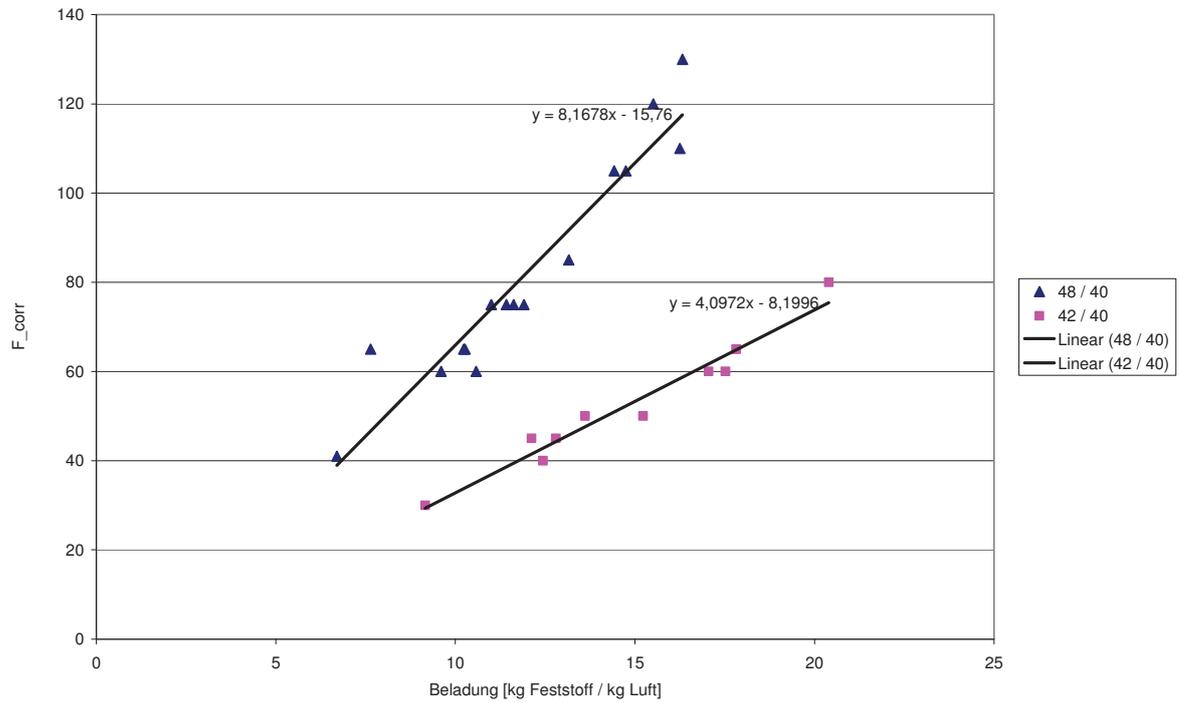


Abbildung 4.11:  $F_{corr}$  vs Beladung für die Schlauch / Lanze- Durchmesserhältnisse 48/40 und 42/40 mit Regressionsgeraden

Um das Ergebnis dieser Anpassung zu kontrollieren, wurden die Werte vom Treibstrahl- und Systemdruck mit dem adaptierten Programm berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. (4.12 a-d) dargestellt.

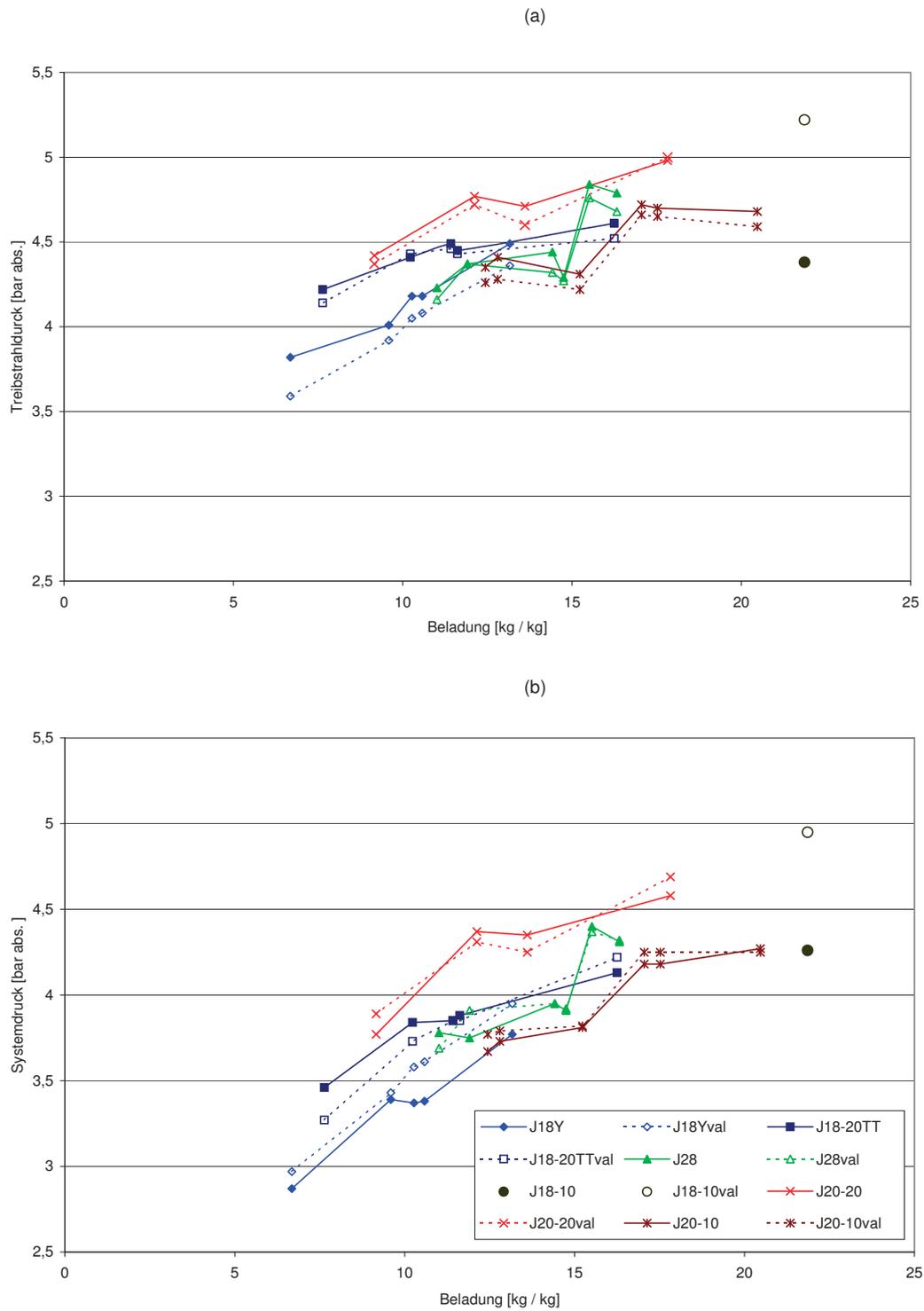


Abbildung 4.12: Vergleich gemessener und berechneter Daten von Treibstrahl Druck (a) bzw. Systemdruck (b) dargestellt als Funktion der Beladung; Programmversion neu; mit Korrekturterm für den Kanteneffekt

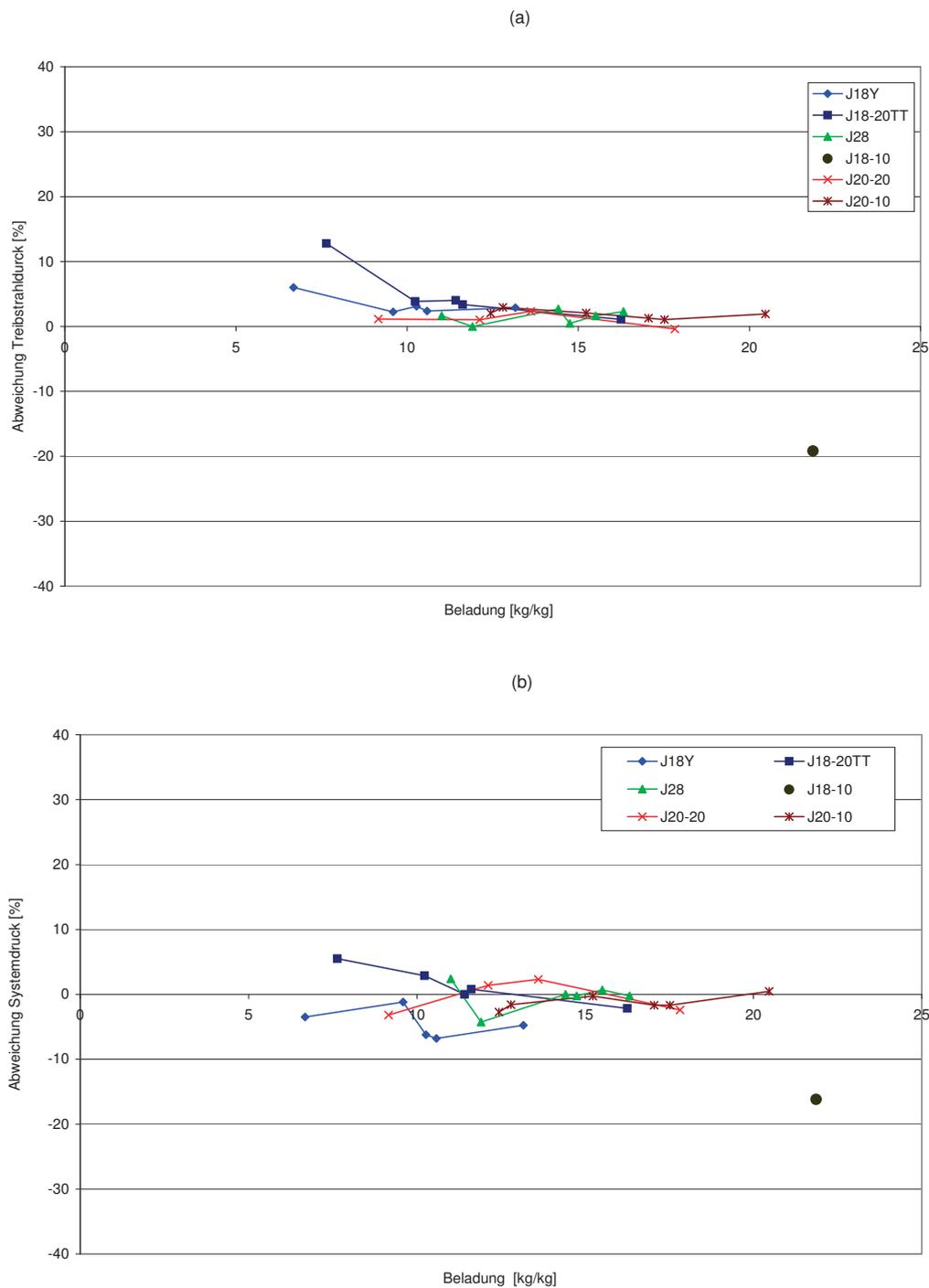


Abbildung 4.13: Relative Abweichung zwischen gemessenem und berechneten Daten dargestellt als Funktion der Beladung (a) und (b); Programmversion neu; mit Korrekturterm für den Kanteneffekt

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Daten. Diese Adaption ist auf die Durchmesser 48 / 40 und 42 / 40 beschränkt. In der Praxis werden derartige Kanten nicht verwendet, daher wird auf eine Weiterverfolgung dieses Effektes verzichtet.

#### **4.4.4. Stopferwarnung**

Wie unter Abschnitt (4.3.4) detailliert erklärt, wird im Programm eine Warnmeldung eingebaut, welche den Benutzer darauf hinweist, dass es bei Beladungen  $> 20$  zu Stopfern kommen kann. Das Programm ist trotzdem in der Lage, die theoretisch erforderlichen Drücke zu berechnen.

#### **4.4.5. Eventuell Korrektur im Bereich höherer Beladung (angedacht)**

Da das Programm generell bei höheren Beladungen eher zu niedrige Drücke berechnet, wäre, unabhängig von der Korrektur des Kanteneffektes, auch eine generelle Anpassung des Programmes für höhere Beladungen zu überlegen. Dazu wären jedoch noch mehr gesicherte Daten aus Versuchen erforderlich.

# 5. Experimentelle Untersuchungen zur Wassereindüsung

## 5.1. Einleitung

Der Spritzdüsenprototyp hat in den durchgeführten Spritzversuchen im Werk Veitsch ein gutes Betriebsverhalten gezeigt, damit der Spritzdüsenprototyp auch in der Praxis eingesetzt werden kann sind noch folgende Fragen zu klären:

- Die minimale notwendige Zerstäubungsluftmenge für diesen Spritzdüsenprototyp.
- Für die industriellen Spritzmasseapplikationen Handlanze, Shooter, Terminator und Conrep sind geeignete Düsenbaugrößen zu ermitteln.

Um diese Aufgaben abdecken zu können, wurden Laborversuche mit dem Spritzdüsenprototyp durchgeführt, siehe Abschnitt 5.2. Bei diesen Versuchen erfolgte die Erzeugung des Wassersprays mittels Düsen- und Förderluftstrom. Im Zuge dieser Laborversuche wurden auch die Tropfendurchmesser im erzeugten Spray mittels Laserstreulichtmessung untersucht. Aus diesen Erkenntnissen erfolgte die Planung der weiteren Spritzversuche, siehe Abschnitt 5.3.

## 5.2. Quantifizierung der Wasserdispergierung in der Düse

### 5.2.1. Allgemeine Beschreibung

Für einen energetisch gesehen, sparsamen Betrieb des Zerstäubungssystems ist die minimal notwendige Zerstäubungsluftmenge festzustellen, die eine für gute Spritzmassendurchfeuchtung hinreichende Sprayfeinheit generiert.

Die Versuche wurden im Verdüsungslabor des VTIU - Technikums in Leoben durchgeführt, sie erfolgten im Zeitraum vom 23. Feber bis zum 4. März 2009. In einem ersten Schritt sollte der Luftbedarf für den Düsenprototyp, wie er im Versuch vom 2. Dezember 2008 im Werk Veitsch, verwendet wurde, nachgestellt werden. In einem weiteren Schritt war geplant das  $ALR_{Duese}$  von  $\sim 0,18$  auf  $0,1$  zu senken. Der erzeugte Wasserspray wurde anhand der Fotos analysiert und dokumentiert. Des weiteren wurde die Vermessung der Tröpfchendurchmesser mittels Laserstreulichtmessung vorgenommen, die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgte mittels Excel.

### 5.2.2. Sprühversuch mit fotografischer Auswertung

Bei den ersten Versuchen musste festgestellt werden, dass der Wasservolumenstrom wie er im Labor zur Verfügung stand zu niedrig war, weshalb auch der Düsenluftstrom gesenkt wurde, um insgesamt das angestrebte  $ALR_{Duesen}$  zu erzeugen. Zudem war auch der zur Verfügung stehende Luftvolumenstrom zu niedrig. Um eine Aussage über den im Anwendungsfall höheren Förderluftvolumenstrom treffen zu können, wurde der Förderluftvolumenstrom in drei Schritten gesteigert, bei jeweils fixem Düsenluftvolumenstrom.

#### 1. Verwendete Geräte

- Spritzdüsenprototyp, 8 Stoppel auf 2 Ebenen, jeder Stoppel weist 4 Bohrungen à 4 mm auf;
- Rotameter, Schwebekörperdurchflussmesser VKN 167-2"-10000;  
60 - 630 Nm<sup>3</sup>/ h, geeicht auf 20 °C , 4 bar, Luft
- Rotameter, Schwebekörperdurchflussmesser KSM 10106P20RO;  
10 -90 Nm<sup>3</sup>/ h, geeicht auf 20 °C , 5 bar, Luft
- Rotameter, Schwebekörperdurchflussmesser KSM 1010HP20RO;  
100 - 1000 l / h, Wasser
- Drucksensor JUMO dTRANS p 30, 1 - 9 bar
- Drucksensor JUMO MIDAS SI, 0,0 - 1 bar abs
- Verdichter, Schraubenkompressor, Firma Kaeser, BSD 81 T, SIGMA,  
max. Betriebsleistung 495 Nm<sup>3</sup>/h bei 7,5 bar Überdruck
- 1 und 3/4 Zoll Kunststoffschläuche SEL Olympos, 2 Zoll Feuerwehrschräuche (Luftdicht)
- Kugelventile, Dichtungsbänder aus Teflon
- Düsenprototyp wie er beim Versuch am 2. Dezember im Werk Veitsch verwendet wurde

#### 2. Versuchsanordnung

Der Versuch wurde wie in Abbildung (5.1) zu sehen aufgebaut.

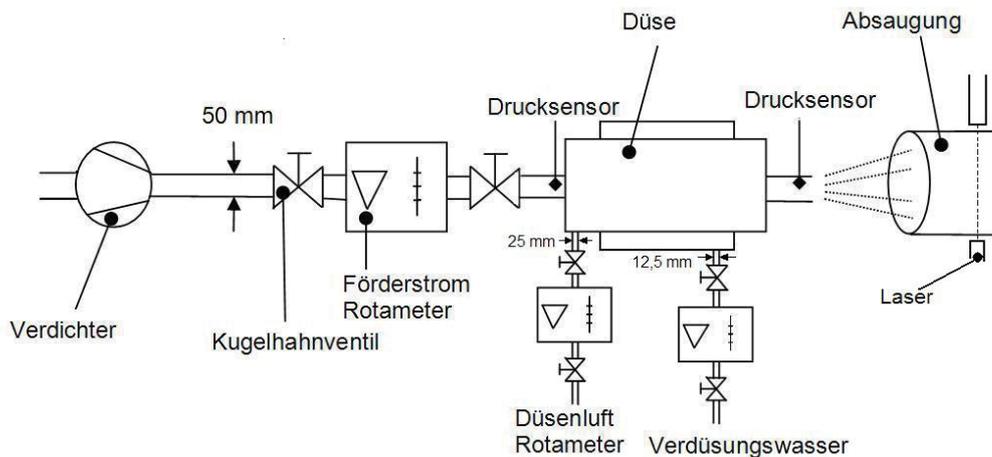


Abbildung 5.1: Schema der Laborversuche

### 5.2.3. Optische Vergleiche

Nach dem Einschalten des Absaugebläses wurde zuerst der Düsenluftvolumenstrom aufgedreht und justiert (Messdruck beträgt 5 bar abs). Hernach erfolgte die Einstellung des Förderluftstromes ( $\sim 4$  bar abs) auf  $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , daraufhin wurde die Wasserzufuhr auf maximale Kapazität geöffnet ( $780 \text{ l}/\text{min}$ ). Bei gleichbleibendem Düsenluft- und Wasserstrom wurde der Förderluftstrom auf  $320 \text{ Nm}^3/\text{h}$  und schließlich auf  $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  erhöht.

Die drei Versuchszustände wurden am Düsenaustritt photographiert und mittels Aufprallwirkung auf der Hand die Tröpfchenfeinheit verglichen.

Der gesamte Ablauf wurde 2-mal durchgeführt und anhand der Photos auf die Reproduzierbarkeit überprüft.

### 5.2.4. Vermessung der Tröpfchendurchmesser

In weiteren Versuchsreihen erfolgte die Vermessung der Tröpfchendurchmesser mittels Laserstreulichtmessung. Der Versuchsaufbau war derselbe wie bereits bei den optischen Vergleichen, der Laser wurde in der Absaugungsröhre installiert, siehe Abb. (5.30). Die Versuchseinstellung erfolgte wie unter Abschnitt 5.2.3 beschrieben, bei den ersten vier Versuchsreihen war geplant, die einzelnen Förderluft / Düsenluft Verhältnisse separat einzustellen und die Tröpfchendurchmesser aufzunehmen. Es zeigte sich jedoch, dass bei hohen Förderluftvolumenströmen die Luftzufuhr sehr rasch aufgedreht werden musste um auf Versuchsbedingungen zu kommen und diese auch zu halten, dies brachte den gesamten Versuchsaufbau ins Wanken. Deshalb wurde wieder auf die bereits oben beschriebene Vorgehensweise zurückgegriffen und der Förderluftvolumenstrom Schrittweise erhöht. Die Daten wurden mittels PC aufgezeichnet und die Auswertung erfolgte mittels Excel.

## 5.2.5. Versuchsauswertung

### 5.2.5.1. Berechnungen

- Volumenstromumrechnung des Rotameters

Der angezeigte Volumenstrom ist auf den tatsächlichen Volumenstrom mit folgender Formel umzurechnen:

$$\begin{aligned}
 \text{Volumenstrom}_{\text{tatsächlich}} [Nm^3/h] &= \text{Volumenstrom}_{\text{lt. Anzeige}} [Nm^3/h] * \\
 &\sqrt{\frac{\text{Messdruck} [\text{bar}]}{\text{Kalibrationsdruck} [\text{bar}]}} \\
 \text{Volumenstrom}_{\text{tatsächlich}} [Nm^3/h] &= 110 [Nm^3/h] * \sqrt{\frac{3,8 \text{ bar}}{5 \text{ bar}}} = 96 [Nm^3/h]
 \end{aligned}$$

Wobei der Kalibrationsdruck bei 5 bar liegt.

- Berechnung des ALR

$$\text{ALR} = \frac{\text{Düsenluftvolumenstrom} [Nm^3/h] * \text{Normdichte} [kg/m^3]}{\text{Wassermenge} [kg/h]}$$

z. B. für die erste Berechnung

$$\text{ALR} = \frac{105 [Nm^3/h] * 1,273 [kg/m^3]}{780 [kg/h]} = 0,171$$

für das  $\text{ALR}_{\text{gesamt}}$  wurde der Förder- und der Düsenluftvolumenstrom addiert.

- Tröpfchendurchmesser

Bei den Tröpfchendurchmessern wurden stabile Betriebszustände herangezogen und daraus Mittelwerte gebildet.

Erläuterung der Abkürzungen, welche in den Abbildungen, verwendet werden, siehe Tabelle (5.1).

Tabelle 5.1: Abkürzungen

FV	Förderluftvolumenstrom
DV	Düsenluftvolumenstrom
ALR	Air to liquid rate; air = Düsenluftvolumenstromes liquid = zu verdüsende Wasserstrom
$\text{ALR}_{\text{gesamt}}$	Air to liquid rate; air = Düsen- + Förderluftvolumenstrom
D 50	Tröpfchendurchmesser bei 50 % der kumulierten Tropfengrößenverteilung
D 10	Tröpfchendurchmesser bei 10 % der kumulierten Tropfengrößenverteilung
SDM	Sauterdurchmesser [ $\mu m$ ]

### 5.2.5.2. Optische Auswertung

Die Förderluftvolumenströme von  $\sim 160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,  $320 \text{ Nm}^3/\text{h}$  und  $490 \text{ Nm}^3/\text{h}$  mit einem ALR von 0,17 sind in den Abb. (5.2), (5.3), (5.4), (5.5), (5.6) sowie (5.7) zu sehen. In gleicher Weise sind auch  $\text{ALR} = 0,15$  und  $\text{ALR} = 0,11$  dargestellt.



Abbildung 5.2: Versuchsserie 1;  
FV=160, DV=105, ALR=0,17

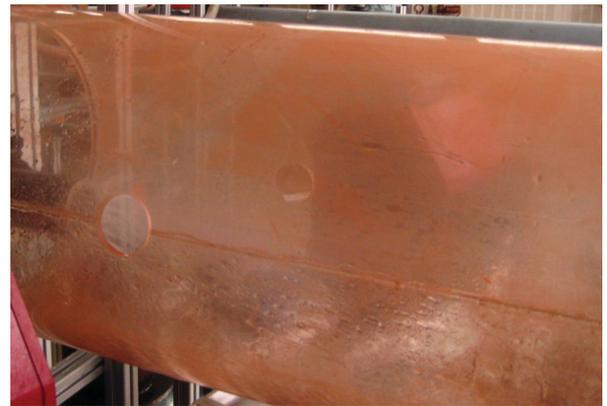


Abbildung 5.3: Versuchsserie 2;  
FV=160, DV=105, ALR=0,17

Vergleicht man den Fördervolumenstrom mit  $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$  mit dem  $320 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , vgl. dazu Abb. (5.2), (5.3) sowie (5.4), (5.5), (5.6), (5.7), sieht man deutlich die große Menge ab-rinnenden Wassers am Düsenausgang. Eine Gegenüberstellung von Abb. (5.6), (5.7) und (5.18), (5.19) zeigt uns den Einfluss des Düsenvolumenstromes auf den Anteil ab-rinnenden Wassers, dieser steigt deutlich an mit sinkendem Düsenvolumenstrom. Der Sprühnebel sowie die Kegelform weisen, in allen Abbildungen, keine signifikanten Unterschiede auf.



Abbildung 5.4: Versuchsserie 1;  
FV=320, DV=105, ALR=0,17

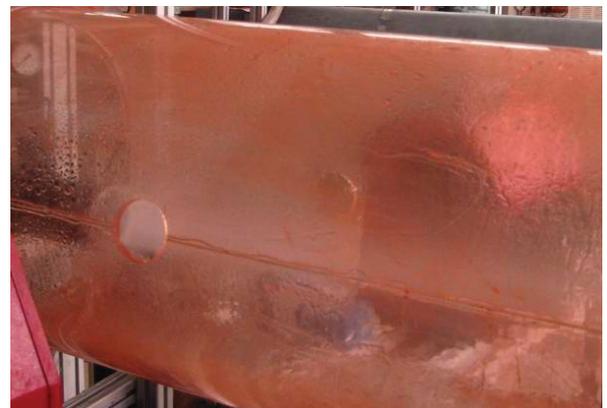


Abbildung 5.5: Versuchsserie 2;  
FV=290, DV=105, ALR=0,17

Das Ansteigen des Fördervolumenstromes bewirkt, daß der Wasseranteil, welcher am Düsenrand als Wandfilm abrinnt, deutlich abnimmt, siehe Abb. 5.5, 5.4 sowie Abb. 5.6, 5.7.

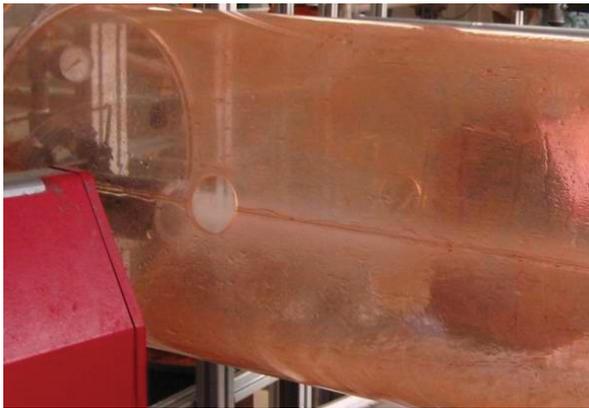


Abbildung 5.6: Versuchsserie 1;  
FV=500, DV=105, ALR=0,17



Abbildung 5.7: Versuchsserie 2;  
FV=500, DV=105, ALR=0,17

Das  $ALR = 0,15$  mit ansteigendem Förderluftvolumenstrom ist in den Abb. (5.8), (5.9), (5.10), (5.11), (5.12) sowie (5.13) beschreiben. Vergleicht man das  $ALR = 0,15$  mit dem  $ALR = 0,17$  bei einem Fördervolumenstrom von  $\sim 160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , vgl. Abb. (5.8), (5.9) sowie (5.3), (5.2) sieht man auch hier einen Anstieg beim abrinneenden Wasser, wobei der Sprühkegel etwas schmaler und inhomogener wirkt.

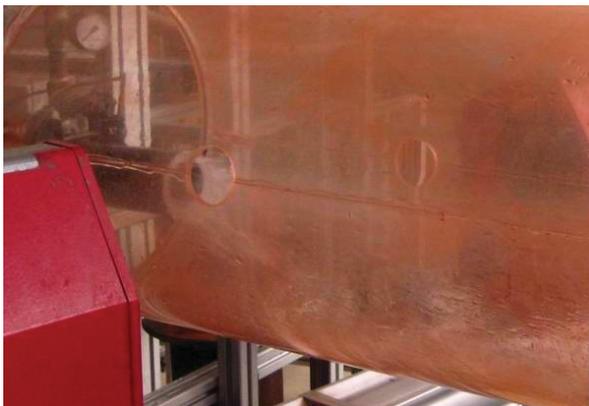


Abbildung 5.8: Versuchsserie 1;  
FV=160, DV=88, ALR=0,14

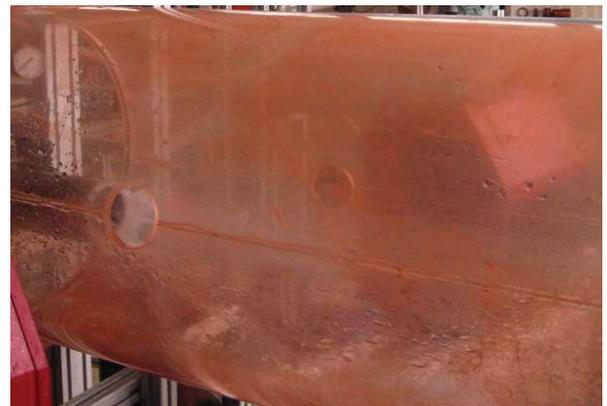


Abbildung 5.9: Versuchsserie 2;  
FV=160, DV=90, ALR=0,14

Der Förderluftstrom von  $320 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , siehe Abb. (5.10) und (5.11), ist mit deutlich weniger abrinneendem Wasser verbunden.

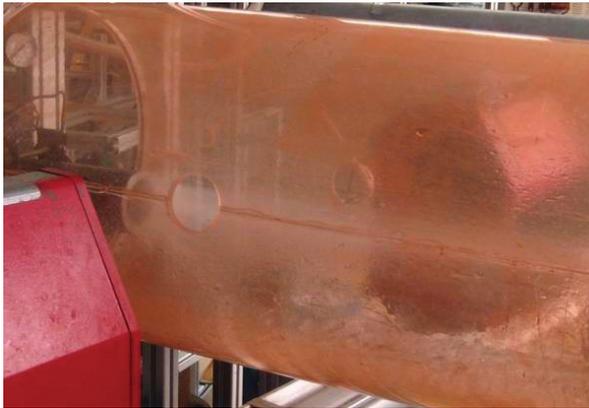


Abbildung 5.10: Versuchsserie 1;  
FV=340, DV=84, ALR=0,15



Abbildung 5.11: Versuchsserie 2;  
FV=320, DV=88, ALR=0,15

In Abbildung (5.12) und (5.13) sieht man schon deutlich, dass der abrinne Wasseranteil sehr gering geworden ist. Der Strahlquerschnitt wirkt schmälern gegenüber jenem von ALR = 0,17, bei gleichem Fördervolumenstrom Abb. (5.7) und (5.6).



Abbildung 5.12: Versuchsserie 1;  
FV=520, DV=84, ALR=0,15



Abbildung 5.13: Versuchsserie 2;  
FV=500, DV=88, ALR=0,15

Das angestrebte ALR = 0,1 mit steigendem Förderluftstrom ist in den Abb. (5.14), (5.15), (5.16), (5.17), (5.18) und (5.19) zu sehen. Abbildung (5.14) und (5.15) zeichnen sich durch einen sehr starken Anteil an abrinne Wasser aus.

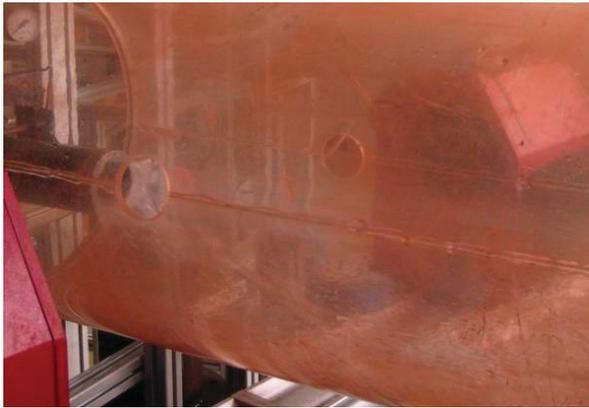


Abbildung 5.14: Versuchsserie 1;  
FV=160, DV=70, ALR=0,11

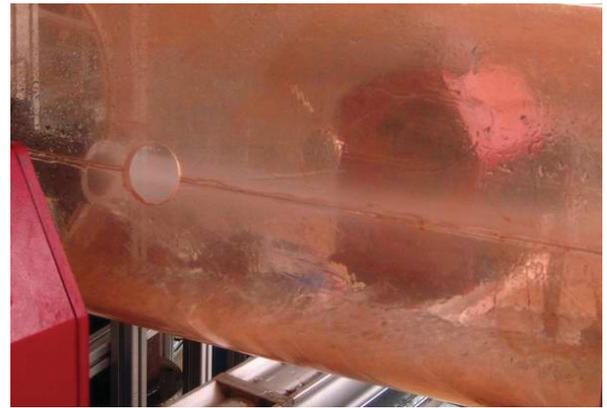


Abbildung 5.15: Versuchsserie 2;  
FV=160, DV=70, ALR=0,11

Der Anstieg des Fördervolumenstromes bewirkt auch hier ein Sinken des abrinrenden Anteils, siehe Abb. (5.16) und (5.17). Im Vergleich zu ALR 0,15 und 0,17 ist der abrinrenden Wasseranteil jedoch bei ALR = 0,1 viel höher, siehe Abb. (5.4), (5.5), (5.10) und (5.11) auch der Sprühkegel wirkt weniger homogen.

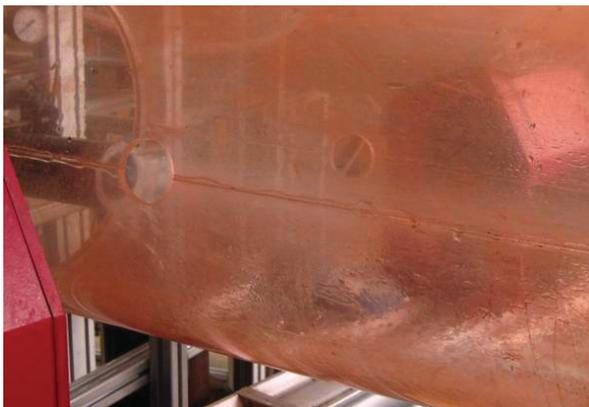


Abbildung 5.16: Versuchsserie 1;  
FV=320, DV=66, ALR=0,11

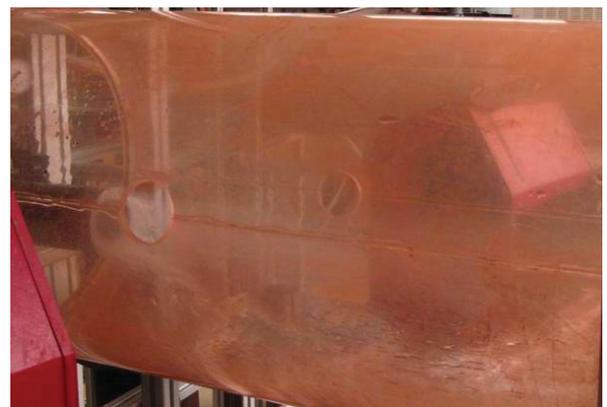


Abbildung 5.17: Versuchsserie 2;  
FV=320, DV=68, ALR=0,11

Auf den Abbildungen (5.18) und (5.19) sieht man nun ein ALR $\sim$  0,11 und einen Fördervolumenstrom von 500 Nm<sup>3</sup>/h, so wie es angestrebt wird. Der abrinrende Wasseranteil hat sich gegenüber den niedrigeren Förderluftvolumenströmen, siehe Abb. (5.14), (5.15), (5.16) und (5.17), stark reduziert, ist jedoch immer noch deutlich höher als bei ALR 0,15 und 0,17.

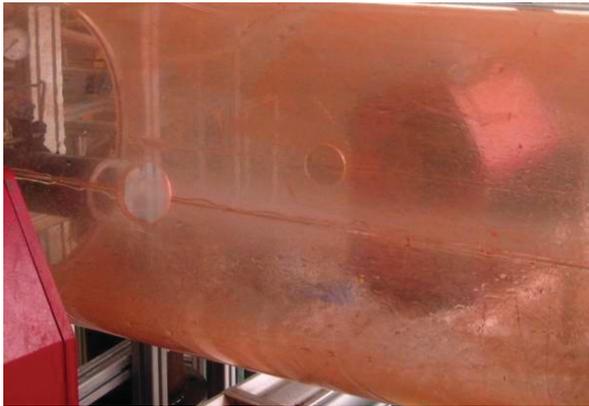


Abbildung 5.18: Versuchsserie 1;  
FV=500, DV=64, ALR=0,11

Abbildung 5.19: Versuchsserie 2;  
FV=500, DV=66, ALR=0,11

- Beurteilung des Aufprallwirkung

Bei einem ALR von 0,17 ist das Aufprallen der größeren Tröpfchen (Handtest) nicht zu spüren, hingegen ist bei einem ALR von 0,11 das Aufprasseln der Tröpfchen im Strahlzentrum deutlich wahrzunehmen.

### 5.2.5.3. Anteil des abrinrenden Wassers

Bei den Versuchsserien wurde , als grobe Abschätzung, der abrinrende bzw. unverdüste Wasseranteil aufgefangen und verwogen. Anhand der Versuchsdauer erfolgte die Berechnung des gesamten, zugelaufenen Wassers, woraus der Prozentsatz abgeronnenen Wassers berechnet wurde.

Tabelle 5.2: Abrinnender d. h. nicht zerstäubter Wasseranteil, der als Wandfilm abfließt

ALR/FV	Zeit [sec]	Gesamtmenge Wasser [l]	Abrinnendes Wasser [l]	Abrinnendes Wasser [%]
0,1/160,320,490	230	49	37,5	77
0,1/160,320,490	196	42,5	31	73
0,14/160,320,490	218	47,2	30	64
0,17/160,320,490	240	52	21	40
0,1/500	180	39	14,5	37
0,17/500	165	35,7	12	34

Der unverdüste bzw. abgeronnene Wasseranteil steigt von etwa 35 % auf 75 % doch recht deutlich an.

Experimentelle Unsicherheiten betreffen dabei die Zeitverzögerung beim Wasserhahn auf- und abdrehen, sowie das eventuell nicht vollständige Auffangen des Wassers.

### 5.2.5.4. Auswertung der Drucksensoren

Der Treibtopf als auch der Spritzdüsenprototyp wurden mit Drucksensoren ausgestattet um dem Druckabfall festzustellen. Während der gesamten Versuche zeigten die Drucksensoren

folgende Werte an:

Drucksensor vor der Düse 0,0 bar über

Drucksensor nach der Düse 0,94 bar abs

Der Druckverlust befindet sich unterhalb der Messgenauigkeit der verwendeten Sensoren, und damit auf, für unsere Auswertungen, nicht mehr relevantem Niveau.

### 5.2.5.5. Auswertung der Laserstreulichtmessungen

In Tabelle (5.3) sind alle Messdaten für die Tropfengrößenbestimmung der Sprühtropfen angeführt:

Tabelle 5.3: Versuchbedingungen - Laserstreulichtmessung

Zeit	FV[Nm3/h]	DV [Nm3/h]	Wasser [l/h]	ALR	ALR ges	D50 [mym]	D10 [mym]	Abschattung[	SauterDM
07:00	500	105	780	0,171	0,987	164,2	44,002	75,73	85,72
07:01	410	95	780	0,155	0,824	219,77	63,853	70,73	120,8
08:24	510	105	780	0,171	1,004	185,65	50,12	74,38	98,35
08:25	400	95	780	0,155	0,808	239,99	65,938	72,1	126,17
	370	66	780	0,108	0,712	248,7	74,164	69,14	140,61
	500	105	780	0,171	0,987	Versuch ausgeschaltet. Daher sind diese beiden Messreihen nicht eindeutig zuordenbar und wurden nicht zur Auswertung herangezogen.			
	500	100	780	0,163	0,979				
	370	60	780	0,098	0,702				
	370	60	780	0,098	0,702				
08:53	175	105	780	0,171	0,457	354,3	115,19	53,94	234,91
08:54	340	105	780	0,171	0,726	251,27	69,527	69,95	137,31
08:55	520	105	780	0,171	1,02	123,55	32,374	78,78	64,06
Ende	440	100	780	0,163	0,881				
09:18	160	105	780	0,171	0,432	399,07	125,91	49,06	255,06
09:19	340	105	780	0,171	0,726	248,54	69,136	70,29	136,19
09:20	500	100	780	0,163	0,979	141,1	37,203	77,8	73,73
Ende	440	95	780	0,155	0,873				
09:35	160	90	780	0,147	0,408	495,16	149,15	40,64	295,32
09:37	290	90	780	0,147	0,62	305,8	93,366	63,96	179,85
09:39	520	88	780	0,144	0,992	137,63	36,042	78,36	71,64
09:51	160	90	780	0,147	0,408	464,01	145,71	37,32	178,03
09:53	320	90	780	0,147	0,669	281,72	82,92	66,47	159,65
09:54	500	90	780	0,147	0,963	138,67	37,06	76,94	72,58
Ende	430	82	780	0,134	0,836				
10:13	160	70	780	0,114	0,375	521,28	161,15	37,58	315,93
10:14	320	70	780	0,114	0,637	317,57	100,61	62,36	191,36
10:15	500	70	780	0,114	0,93	156,24	43,112	76,66	83,2
Ende	430	68	780	0,111	0,813				
10:27	160	70	780	0,114	0,375	533,48	179,06	27,54	343,33
10:29	320	70	780	0,114	0,637	297,51	92,49	64,92	175,71
10:30	520	68	780	0,111	0,96	146,35	40,339	77,09	78
Ende	450	64	780	0,104	0,839				

Die in Tabelle (5.3) angeführten Versuchsdaten wurden graphisch ausgewertet. In gleicher Farbe sind jeweils die Teilchendurchmesser DM10 und DM50 sowie die Abschattung aufgetragen. Dabei wurde in Abb. (5.20a, b und c) der Tröpfchendurchmesser gegen das  $ALR_{Duese}$  aufgetragen. Auf diesen Diagrammen lässt sich der Einfluss des Fördervolumenstromes erkennen, in (5.20a) sieht man über welchen breiten Bereich die Tröpfchendurchmesser streuen, im Vergleich dazu gibt es in (5.20c) kaum mehr einen Unterschied zwischen den verschiedenen Düsenluftvolumenströmen. Dies deutet darauf hin, dass bei einem genügend hohen Fördervolumenstrom die im Strahl befindlichen Tröpfchen sehr ähnlichen Durchmesser aufweisen.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde in einem weiteren Diagramm der  $ALR_{gesamt}$  (also Fördervolumenstrom + Düsenluftvolumenstrom) gegen die Tröpfchendurchmesser aufgetragen. Die Abbildung (5.20d)  $ALR_{gesamt}$  zeigt, dass niedrige  $ALR_{gesamt}$  große Tröpfchendurchmesser bewirken, wobei der Einfluss des Düsenluftvolumenstromes klar zu sehen ist, mit steigendem  $ALR_{gesamt}$  geht dieser Einfluss stark zurück.

### 5.2.6. Ergebnisdiskussion

Der Einfluss des Fördervolumenstromes auf den Tröpfchendurchmesser ist erheblich, siehe Abschnitt 5.2.5.5. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei niedrigerem  $ALR_{Duese}$  insgesamt gesehen weniger Wasser verdunstet wird, siehe Abschnitt 5.2. Der Ringströmungsanteil ist bei niedrigerem  $ALR_{Duese}$  höher, die im Gaskern befindlichen Tröpfchen weisen jedoch bei hohen Fördervolumenströmen eine ähnliche Charakteristik auf.

Die Aufprallwirkung auf der Hand kann folgendermassen interpretiert werden: Ein feiner Sprühnebel hat einen DM50 von etwa  $150 \mu m$ . Spürbar gröberes Spray (Handtest) deutet auf einen DM50 von etwa 350 bis  $550 \mu m$  hin, siehe Abb. (5.20d).

Anhand der Bilder lässt sich keine Aussage über die Tröpfchengröße machen, man würde erwarten einen stärkeren Wasserstrahl zu sehen, wenn die Tröpfchen größer sind. Was diesem Effekt entgegenwirkt, ist, dass bei einem kleineren  $ALR_{Duese}$  auch deutlich weniger Wasser zerstäubt wird, siehe Tab. (5.2), wodurch der verdünnte Strahl gleich dicht erscheint, wie bei großem  $ALR_{Duese}$  mit feineren Tröpfchen.

Mittels Differenzdruckmessung konnte festgestellt werden, dass für den Förderstrom infolge der Wasserbedüsung kein merklicher zusätzlicher Druckverlust (d. h.  $\geq 200$  mbar) entsteht.

Die Tröpfchendurchmesser haben sich mit sinkendem ALR deutlich vergrößert. Was auf eine Verschlechterung der Homogenität des Spritzstrahles bei sinkendem ALR' s auf 0,1 hindeutet. Für den realen Anwendungsfall sind jedoch auch andere Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Unberücksichtigt bleibt bei unseren Versuchen die Wirkung der geförderten Spritzmasse, dieser hat ebenfalls eine zerstäubende Wirkung auf die Wassertröpfchen.
- Durch die Senkung des Düsenluftvolumenstromes sinkt auch die Geschwindigkeit der

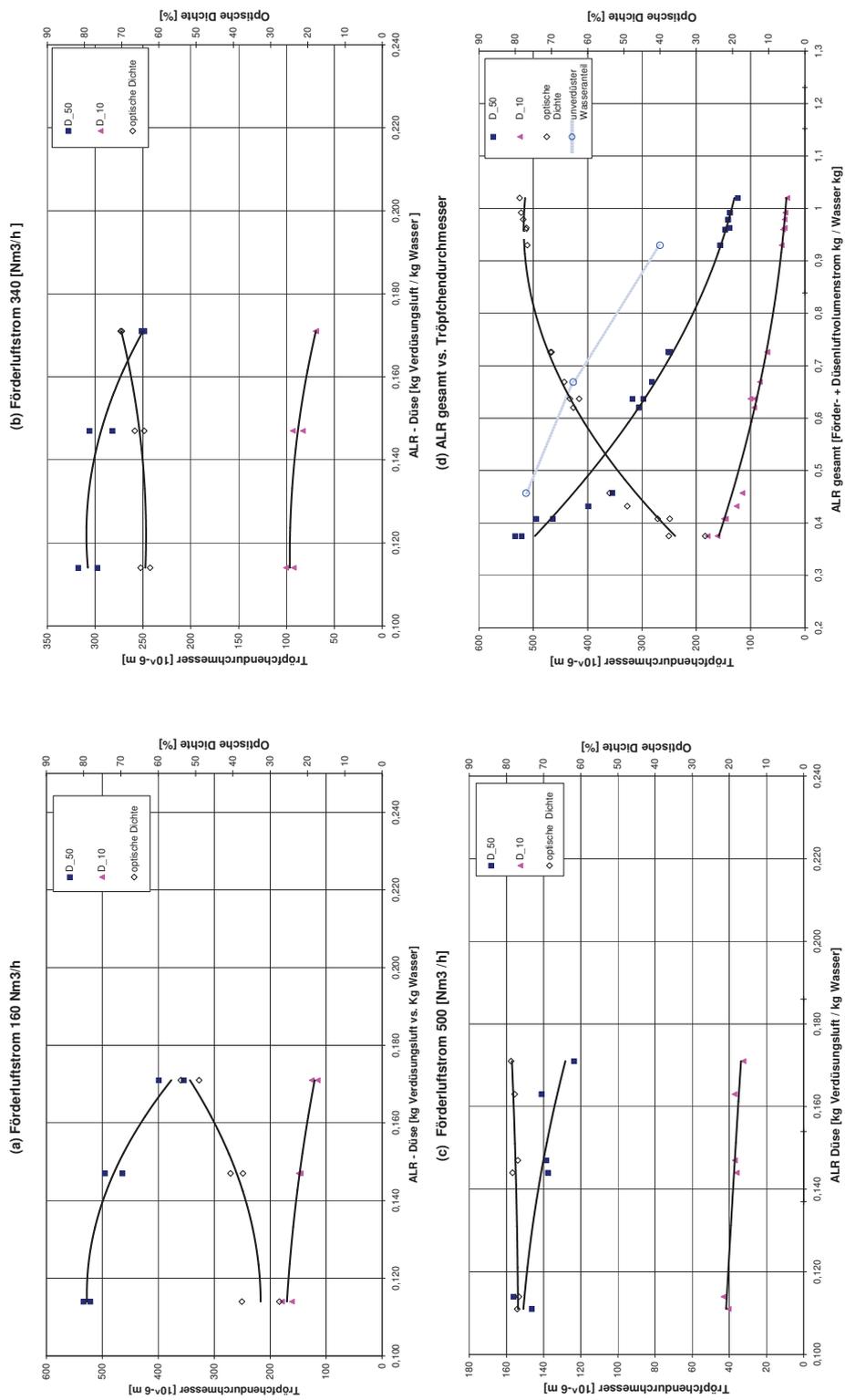


Abbildung 5.20: Laseroptisch gemessene Spritztröpfchendurchmesser für folgende Fördervolumenströme  $FV = 160 \text{ Nm}^3/\text{h}$  (a),  $FV = 340 \text{ Nm}^3/\text{h}$  (b),  $FV = 500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  (c) und  $ALR_{\text{gesamt}}$  (d)

verdüsten Wassertröpfchen wodurch deren Eindringtiefe in den Spritzmasseförderstrom sinken könnte.

Die folgende Übersicht der fotografischen Ergebnisse zeigt, Abb. 5.21 - 5.29, von links nach rechts steigende Förderluftvolumenströme und von unten nach oben steigendes  $ALR_{Duese}$ .

Der abrinnde und somit unverdüste Wasseranteil bei  $ALR_{Duese}$  0,1 ist erheblich größer als bei  $ALR_{Duese}$  0,15 und  $ALR_{Duese}$  0,17. Auf den Abb. 5.21, 5.24 und 5.27 ist bei gleich bleibendem Fördervolumenstrom ( $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) das Sinken des  $ALR_{Duese}$  von 0,17 auf 0,14 hinzu 0,11 dargestellt. Deutlich sieht man den Anstieg des Anteiles an abrinndem Wasser.

Die Abb. 5.22, 5.25 und 5.28 weisen einen Fördervolumenstrom von  $340 \text{ Nm}^3/\text{h}$  auf und die Abb. 5.23, 5.26 und 5.29 einen Fördervolumenstrom von  $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , wobei das  $ALR_{Duese}$  ebenfalls von 0,17 auf 0,14 hin zu 0,11 absinkt. Auch hier ist der Anstieg des Anteils an abrinndem Wassers deutlich zu sehen.

Vergleicht man Abb. 5.27, 5.28 und 5.29 mit 5.24, 5.25 und 5.26 so ist klar der Einfluss des gestiegenen  $ALR_{Duese}$  von 0,11 auf 0,14 zu sehen. Das  $ALR_{Duese} = 0,11$  weist einen wesentlich größeren Anteil abgeronnenen Wassers auf. Das  $ALR_{Duese}$  von 0,17 ist in den Abb. 5.21, 5.22 und 5.23 zu sehen, dies ist die Serie mit dem geringsten Anteil an abgeronnenem Wassers.

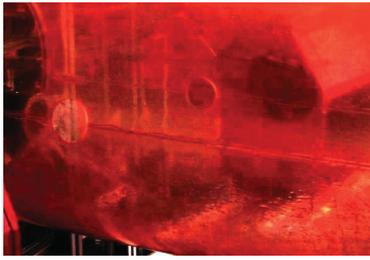


Abbildung 5.21: 1. Versuchsserie; FV=160, DV=105, ALR =0,17



Abbildung 5.22: 1. Versuchsserie; FV=320, DV=105, ALR=0,17

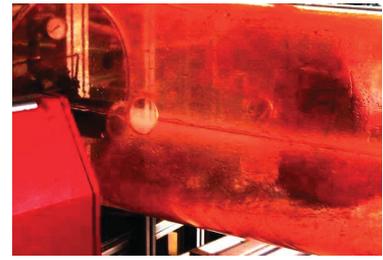


Abbildung 5.23: 2. Versuchsserie; FV=520, DV=105, ALR=0,17

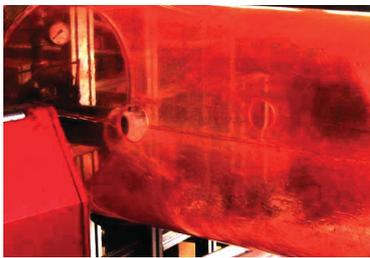


Abbildung 5.24: 1. Versuchsserie; FV=160, DV=88, ALR=0,14

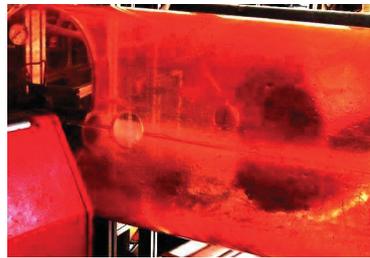


Abbildung 5.25: 1. Versuchsserie; FV=340, DV=84, ALR=0,15



Abbildung 5.26: 1. Versuchsserie; FV=520, DV=84, ALR=0,15

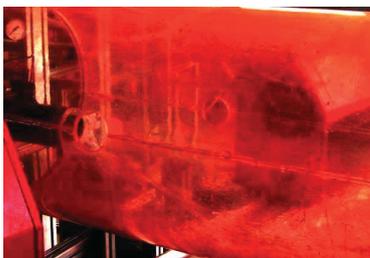


Abbildung 5.27: 2. Versuchsserie; FV=170, DV=70; ALR=0,11

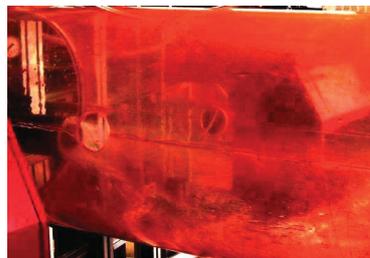


Abbildung 5.28: 2. Versuchsserie; FV=320, DV=68, ALR=0,11

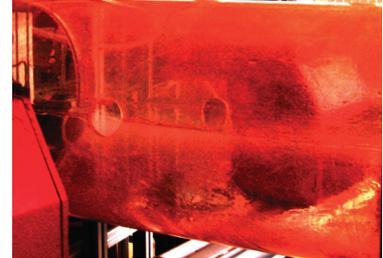


Abbildung 5.29: 2. Versuchsserie; FV=500, DV=66, ALR=0,11

### 5.3. Praxistests zur Überprüfung der Spritzmassendurchfeuchtung

Die Versuche vom 28. Mai 2009 im Werk Veitsch erfolgten einerseits unter dem Aspekt des Übergangs vom reinen Wasserspray hin zur realen Spritzmasseverdüsung, des weiteren sollten die Durchsatzgrenzen des Spritzdüsenprototyps studiert werden.

Ziel dieser Versuchsserie war es, verschiedene Beladungsfälle einzustellen und den minimalen Verdüsungsluftbedarf an der Spritzdüse zu bestimmen. Für die einzustellende Wasserkonzentration waren 10 Gew. % bezogen auf die trockene Spritzmasse für sämtliche Versuche vorgesehen, dem entsprechend wurde die Verdüsungsluftmenge so gewählt das ein  $ALR_{Duese}$  von 0,18, 0,15 sowie 0,1 erzielt wird. In Tabelle (5.4) sind diese geplanten Einstellungen aufgelistet.

Tabelle 5.4: Versuchsplan für den 28. Mai 2009 - Werk Veitsch

	Förderluft V (Nm <sup>3</sup> /h)	Massestrom (kg/min)	Beladung (kg/kg)	Wasserstrom (l/min)	Verdüsungsluft Norm [Nm <sup>3</sup> /h]	ALR Düse
Daten	490	185	17,8	18	160	0,178
vom 2.12.08	490	185	17,8	18	126	0,15
	490	185	17,8	18	95	0,11
für 28.5.09						
1.1.	490	210	20	20,4	171	0,178
1.2.	490	210	20	20,4	145	0,151
1.3.	490	210	20	20,4	107	0,11
2.1.	490	160	15	15,5	133	0,181
2.2.	490	160	15	15,5	108	0,147
2.3.	490	160	15	15,5	76	0,102
3.1.	490	100	9,7	9,7	82	0,18
3.2.	490	100	9,7	9,7	70	0,152
3.3.	490	100	9,7	9,7	45	0,097

Ferner wurden von der RHI zwei verschiedene Spritzmassen zur Verfügung gestellt, NP 12 und NP 12 mit Abbindeverzögerer. Wobei innerhalb dieser Versuche festgestellt werden sollte, ob es, aufgrund der verschiedenen Spritzmasstypen, einen signifikanten Einfluss auf das Spritzbild und die feuchte Spritzmasse gibt.

### 5.3.1. Versuchsbeschreibung

Die Versuchsanordnung entsprach der vom 2. Dezember 2008 und ist in Abbildung (5.30) zu sehen.

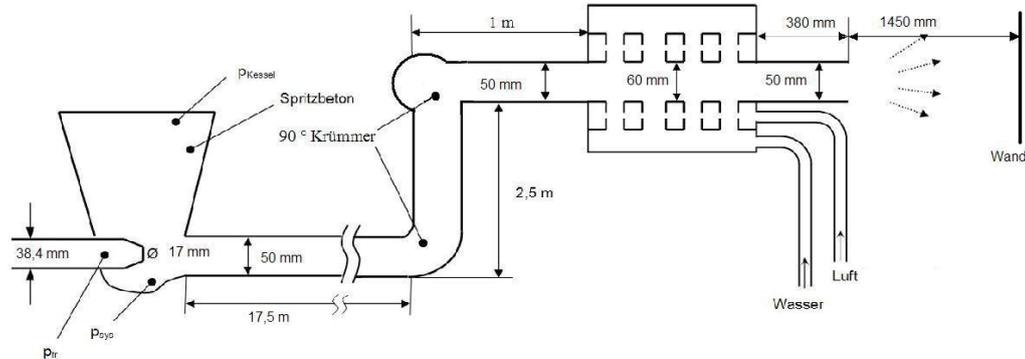


Abbildung 5.30: Versuchsschema

Der Spritzdüsenprototyp war, wie auch bei den Versuchen Abschnitt 5.2, mit 8 Stoppeln versehen, welche auf 2 Ebenen angeordnet waren, jeder Stoppel wies 4 Bohrungen à 4 mm auf.

Der Luftvolumenstrom an der Spritzdüse wurde mittels Prandtl - Rohr gemessen, und zu den jeweiligen Versuchen händisch notiert. Die Erfassung aller anderen Versuchsdaten erfolgte auf elektronischem Weg, ausgewertet wurde mittels EXCEL.

### 5.3.2. Durchführung

In Tabelle 5.5 sind die tatsächlich erreichten Versuchseinstellungen aufgelistet. Diese unterscheiden sich zwar in ihrer Chronologie, aber nicht allzu sehr in den untersuchten Parametern, vom ursprünglichen Versuchsplan. In Tabelle 5.5 bezeichnet FV den Fördervolumenstrom und DV den Düsenvolumenstrom.

Tabelle 5.5: Versuchseinstellungen vom 28. Mai 2009; Farbcodierung der Tabellenzeilen: Gelb: niedrige Beladung, Rosa: mittlere Beladung und Orange: hohe Beladung

Nr.	Versuchszeit [sec]	FV [Nm <sup>3</sup> /h]	Masse [kg/min]	Beladung [kg/kg]	Wasser [%]	DV [Nm <sup>3</sup> /h]	Wasser [l/min]	ALR-Düse	ALR-Ges	Masse	Anmerkung	
0.1	1000	1550	329,19	0	0	115,6	21,25	0,115	0,444			
0.2	2040	2370	350,18	0	0	200,4	21,02	0,202	0,556		reiner Wasserstrahl wenig abrinnen	
1.1.	2610	3400	496,47	157,66	14,8	13,9	200,4	21,87	0,194	0,676	NP12	
1.2.			500,2	184,38	17,2	12,0	170,0	22,12	0,163	0,643	NP12	schönes Spritzbild, wenig abrinnen
2.1.	4150	4670	493,27	166,09	15,7	11,2	170,0	18,68	0,193	0,753	NP12	
2.2.			494,67	166,19	15,7	9,2	111,5	15,32	0,154	0,839	NP12	
3.	5390	5850	494,09	160,83	15,2	11,4	78,9	18,4	0,091	0,661	NP12+	Nebel
4.	6180	6500	501,23	179,75	16,7	10,2	141,4	18,33	0,164	0,744	NP12+	fast zu trocken, gutes Spritzbild
5.	6910	7190	502,16	203,425	18,9	11,1	170,0	22,57	0,160	0,632	NP12+	Masse gut durchfeuchtet, schönes Spritzverhalten
6.	8100	8370	499,04	203,32	19,0	10,1	170,0	20,45	0,176	0,694	NP12+	
7.1.	8640	9170	504,75	79,71	7,4	13,2	68,0	10,55	0,137	1,152	NP12+	Staub
7.2.			499,05	88,15	8,2	10,9	49,0	9,6	0,108	1,211	NP12+	starker Nebel
7.3.			500,01	106,04	9,9	9,6	88,8	10,15	0,186	1,231	NP12+	Nebel verschwindet

### 5.3.2.1. Versuche 0.1 und 0.2

Im Vorversuch (0.1) wurde ein reiner Wasserspray erzeugt, das  $ALR_{Duese}$  betrug 0,11, in Versuch (0.2) betrug das  $ALR_{Duese}$  0,20.

Das Diagramm mit den zeitlichen Verläufen ist in Abb. (5.31) zu sehen.

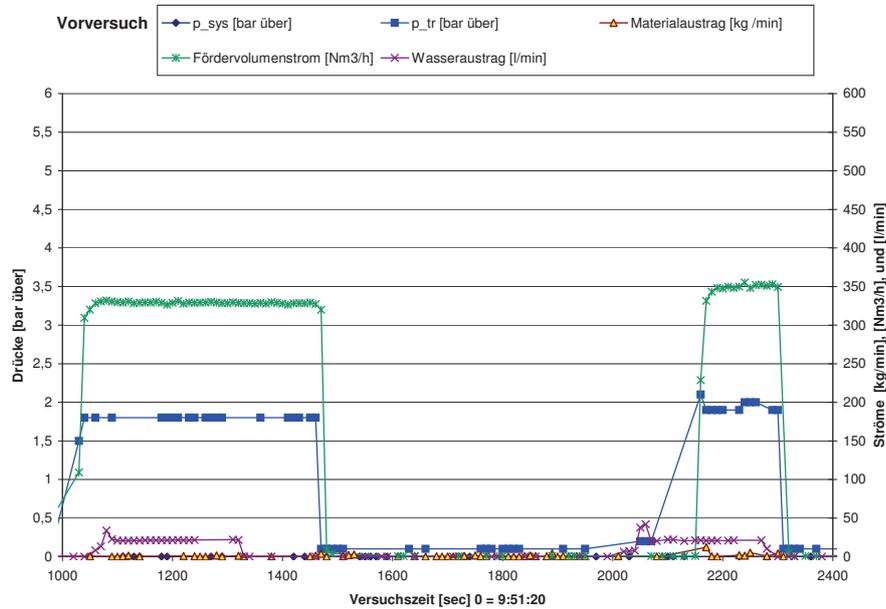


Abbildung 5.31: Diagramm der Vorversuche 0.1 und 0.2

In der Abbildung (5.32) ist der erzeugte Wasserspray des Vorversuches 0.1 zu sehen.



Abbildung 5.32: Wasserspray, Versuch 0.1

Das  $ALR_{Duese}$  beträgt 0,11 wobei 21,2 [l Wasser / min] verdüst wurden. Vom Versuch 0.2 existieren leider keine Bilder, es wurde jedoch vermerkt, dass nur sehr wenig Wasser an der Spritzdüse abgeronnen ist.

### 5.3.2.2. Versuche 1.1. und 1.2.

Als erste Versuchsserie mit Spritzmasse, war jene mit einer Beladung von 20 [ kg / kg ] vorgesehen, das  $ALR_{Duese}$  - und damit auch der Wasseranteil - wurden auf diese Beladung eingestellt. Während des Versuches zeigte sich, dass der Massestrom an Spritzmasse nicht auf die gewünschte Höhe von 200 [kg / min] eingestellt werden konnte, daher wurde ab der zweiten Versuchshälfte das  $ALR_{Duese}$  auf eine Beladung von 15 [kg / kg] gesenkt. Im Folgenden ist das Diagramm mit den Verläufen des ersten Versuches zu sehen.

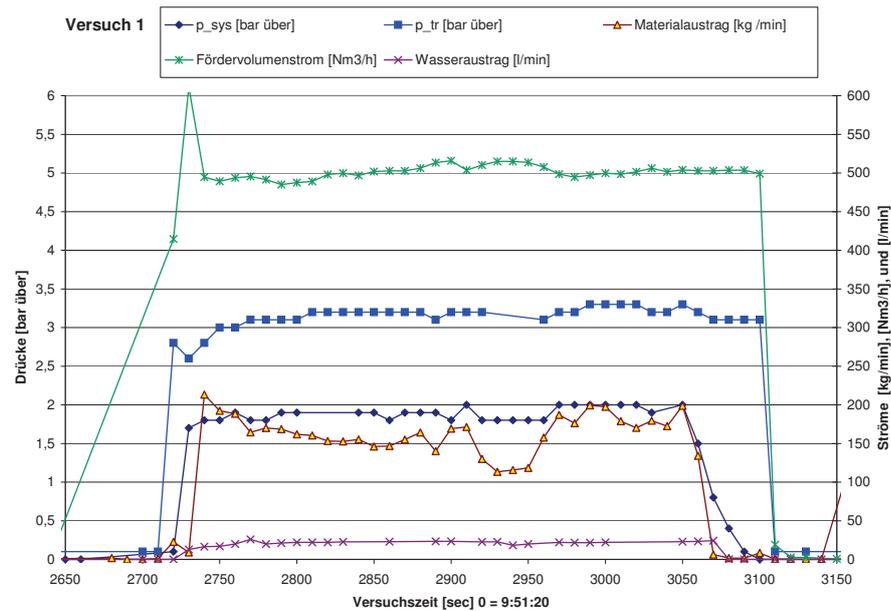


Abbildung 5.33: Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 1

In Abb. (5.34a) ist das Spritzbild dieses Versuches zu sehen, dieses stammt aus dem ersten Versuchsteil. Der Wasseranteil betrug hier 13,6 [Gew. %] auf die trockene Spritzmasse und das  $ALR_{Duese}$  war auf 0,19 eingestellt. In Abb. (5.34b) ist die Spritzmasse am Ende des gesamten ersten Versuches zu sehen.

(a)



(b)



Abbildung 5.34: Versuche 1: (a) Spritzbild erster Versuchsteil; (b) feuchte Spritzmasse des gesamten Versuches (Bild Herr Lanzenberger)

Der gesamte Versuch zeigte einen homogenen Spritzstrahl ohne Nebeln oder übermäßiges Abrinnen der Spritzmasse an der Spritzdüse. Die feuchte Spritzmasse wirkte sehr sämig und feucht.

### 5.3.2.3. Versuch 2

Das vorrangige Ziel war es eine Beladung von zumindest 180 [kg /kg] zu erreichen. Daher das hohe Luft- und Wasserdüsenvolumen am Versuchsbeginn. Im Versuchsverlauf wurde klar, dass auch im zweiten Versuch der geplante Spritzmassedurchsatz von 200 [kg/min] bzw. 180 [kg/min] nicht erreicht werden konnte, daher wurde der stabile Massedurchsatz genutzt um bei einer Beladung von 15 [kg / kg] die Spritzdüsenverhältnisse auf eine  $ALR_{Duese}$  von 0,15 einzustellen. Dies ist in folgender Abbildung zu sehen.

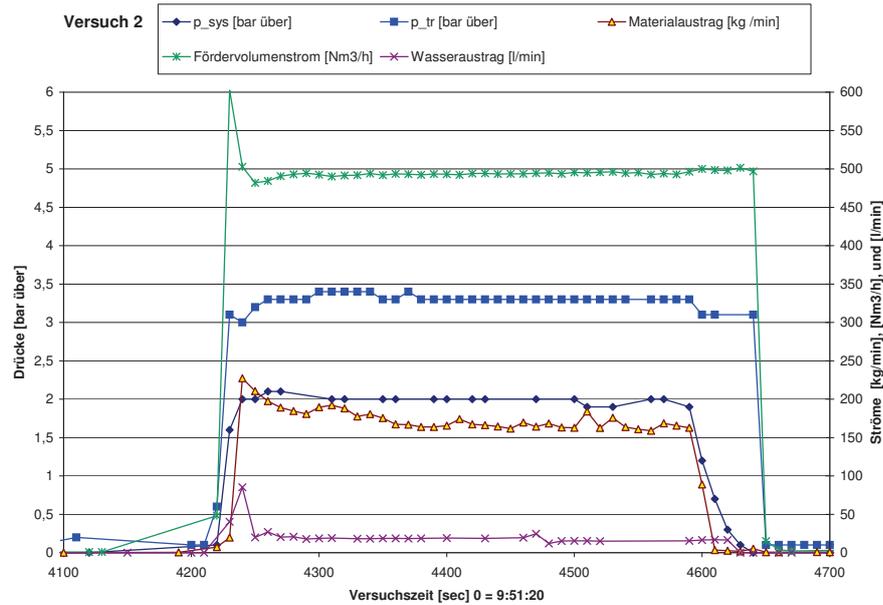


Abbildung 5.35: Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 2

In den Spritzbildern die in Abb. (5.36) ist wiederum kein Nebeln oder übermäßiges Ablaufen an der Spritzdüse festzustellen.

(a)

(b)



Abbildung 5.36: Versuch 2: Spritzbild ; (a) erster Versuchsteil , (b) gegen Versuchsende

### 5.3.2.4. Versuch 3

Die Spritzmasse war ab diesem Versuch NP 12 mit Abbindeverzögerer. Geplant waren dieselben Versuchsbedingungen wie am Ende von Versuch 2 herzustellen, um zu sehen wie sich das Spritzbild durch die neue Spritzmasse verändert.

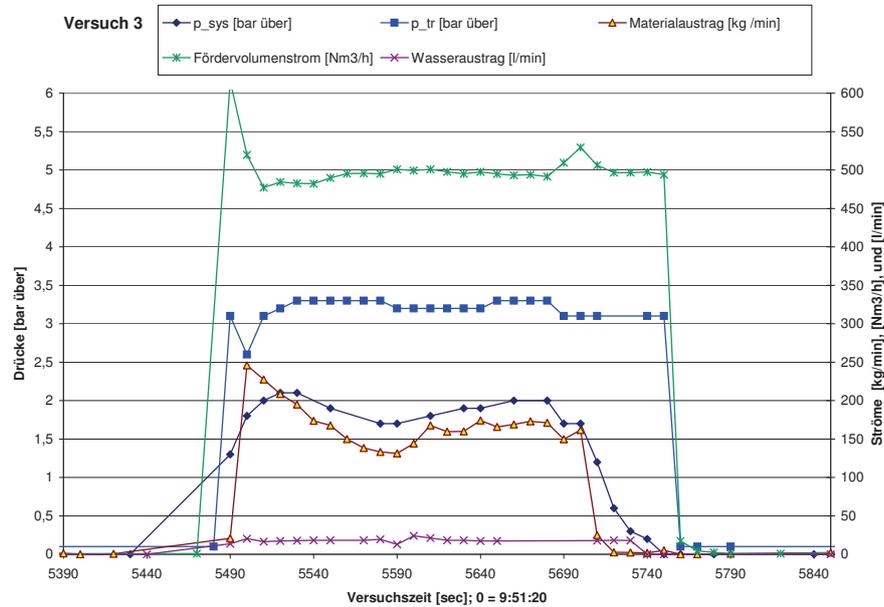


Abbildung 5.37: Diagramm des Versuchsverlaufes 3

Die Spritzbilder sind in Abbildung (5.38) zu sehen.

(a)

(b)

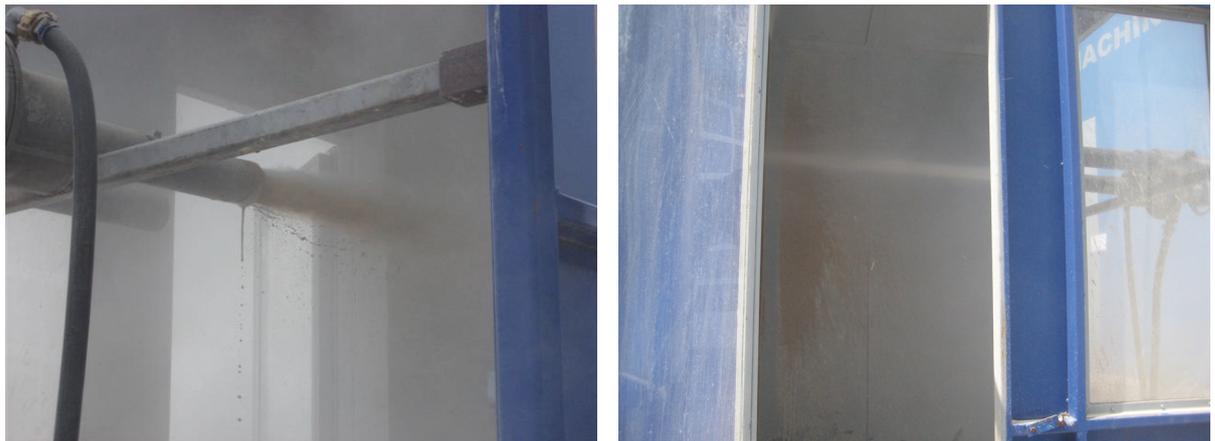


Abbildung 5.38: Versuch 3: Spritzbild (a) aus der Mitte des Versuches ( Bild von Herrn Lanzenberger ) ; (b) gegen Versuchsende

Bei diesem Versuch war ein deutliches Nebeln festzustellen. Das  $ALR_{Duese}$  lag bei 0,09 und damit sehr niedrig, wobei der Wasseranteil mit 11,4 [Gew. %] ziemlich hoch lag, deutlich sieht man das Abrinnen von Wasser am Düsenaustritt.

### 5.3.2.5. Versuch 4

Nachdem letzten Versuch war eine weiterer Versuch in Richtung höhere Beladung geplant, vom  $ALR_{Duese}$  sollte wieder 0,18 angestrebt werden.

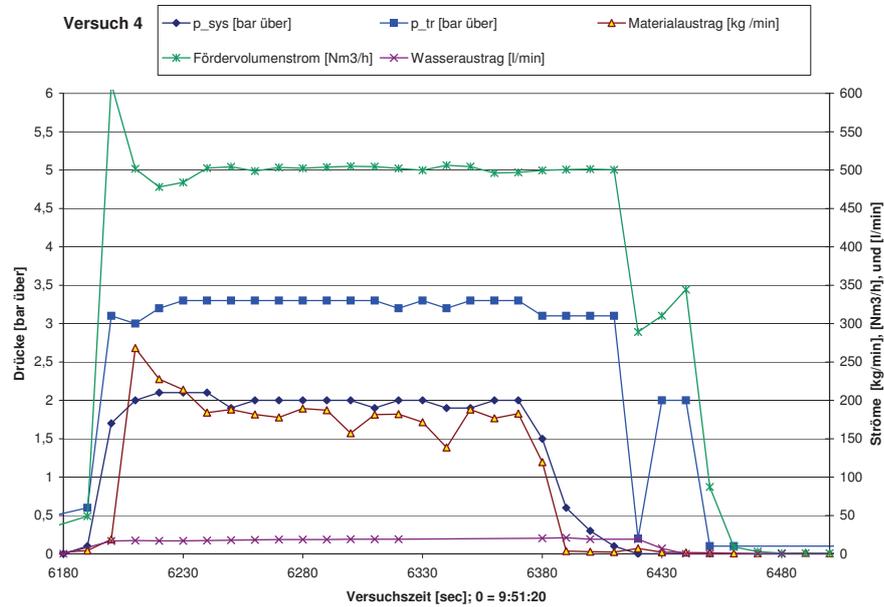


Abbildung 5.39: Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 4

In Abb. (5.40) sind zwei Spritzbilder dieses Versuches zu sehen.

(a)

(b)



Abbildung 5.40: Versuch 4: Spritzbild (a) Versuchsbeginn ( Bild von Herrn Lanzenberger) und (b) Versuchsende

Das Spritzbild wies keinerlei Nebel auf, die feuchte Spritzmasse wurde von Herrn Lanzenberger als etwas zu trocken beschrieben.

### 5.3.2.6. Versuche 5 und 6

Nachdem der letzte Versuch den gewünschten Anstieg des Massendurchsatzes brachte, sollten nun noch weitere Versuche in diese Richtung erfolgen. Wie man aus der Abb. (5.41) sehen kann ist es sehr gut gelungen, eine konstant hohe Beladung zu realisieren. Die SpritzdüsenEinstellungen wurden bewusst über die gesamten Versuchsverläufe konstant gehalten, um den Spritzmassenaufbau auf der Wand besser kennenzulernen.

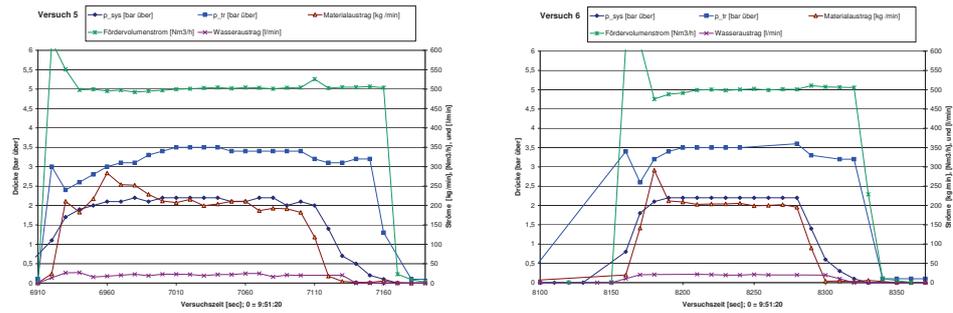


Abbildung 5.41: Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 5 und Nr. 6

Die Spritzbilder weisen in beiden Versuchen ein sehr gutes Verhalten auf, die Spritzmasse war gut durchfeuchtet und baute sich auf der Wand auf. Ein, mit einer Schaufel von der Wand, abgestochener Spritzmassebrocken zeigte einen homogenen Aufbau.

(a)



(b)



(c)



(d)



Abbildung 5.42: Versuch 5: (a) Spritzbild und (b) feuchte Spritzmasse ( Bild von Herrn Lanzenberger); Versuch 6: (c) Spritzbild und (d) Masseaufbau an der Wand ( Bild von Herrn Lanzenberger)

### 5.3.2.7. Versuch 7

Mit diesem letzten Versuch sollte eine Beladung von 10 [kg / kg], sowie das  $ALR_{Duese}$  von 0,18, 0,15 und 0,1 realisiert werden. In Abb. (5.43) sind die die Verläufe zu sehen.

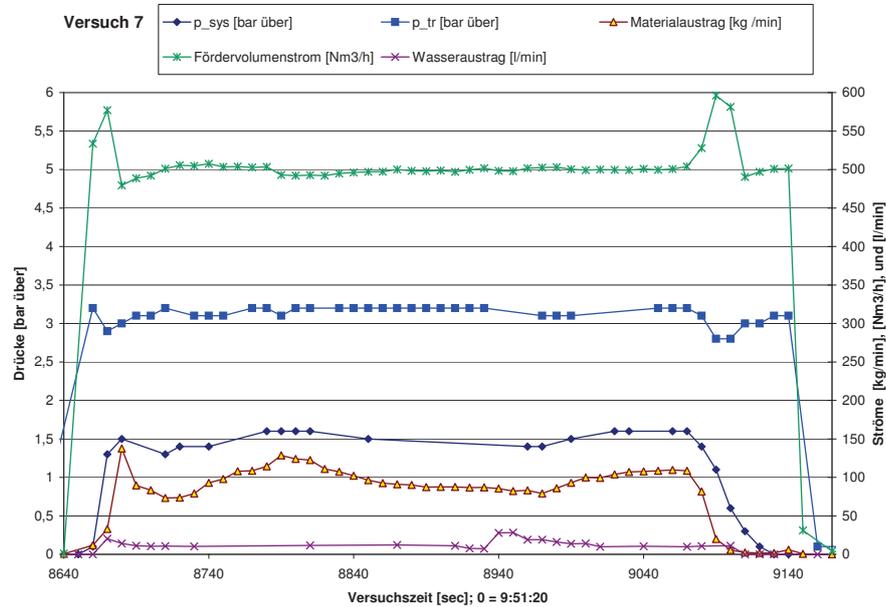


Abbildung 5.43: Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 7

Im ersten Versuchsteil hat sich eine starke Staubentwicklung ausgebildet, diese wurde durch das Absenken des  $ALR_{Duese}$  von 0,14 auf 0,11 deutlich verstärkt. Daher wurde im letzten Versuchsteil das  $ALR_{Duese}$  angehoben, durch steigern des Spritzdüsenluftvolumenstromes. Das  $ALR_{Duese}$  war bis zum Versuchsende auf 0,186 angehoben worden. Aus diesem Abschnitt des 7. Spritzversuches stammt auch das Spritzbild in Abb. (5.44) (a) und (b), vom den  $ALR_{Duese}$  0,14 und 0,11 wurden aufgrund der hohen Staubentwicklung keine Bilder gemacht.



Abbildung 5.44: Versuch 7: Spritzbild letzter Versuchsteil ( Bild von Herrn Lanzenberger)

### 5.3.2.8. Wassergehalt

Etwa 60 g Probenmaterial wurden im Technikum in einem Trockenschrank bei 110 °C getrocknet. Der Gew. % Anteil Wasser ist auf die trockene Spritzmasse bezogen.

Tabelle 5.6: Wassergehalt bezogen auf die trockene Masse

Versuchs Nr.	Wasser lt. Berechnung	Wasser in der Probe	Spritzbild
	[Gew. %]	[Gew. %]	
1.	13,9 - 12,0	11,8	sehr gut
2.	11,2 - 9,2	11,6	sehr gut
3.	11,4	12,2	Nebel
4.	10,2	11,2	sehr gut
5.1	11,1	11,7	sehr gut
5.1	11,1	11,9	sehr gut
6.	10,1	9,4	sehr gut
7.	13,2 - 9,6	9,8	Staub bis gut
Mittelwert [Gew. %]	11,2	11,2	

Die Versuche 4, 5 und 6 waren gekennzeichnet durch konstante Betriebsbedingungen während des gesamten Versuchsverlaufes, daher kann man davon ausgehen, die beste Übereinstimmung von berechnetem und analysiertem Wassergehalt bei diesen Versuchen zu haben. Es ergeben sich Abweichungen von + 1, + 0,7 und - 0,7 [Gew. %] (vgl. (5.6)) zwischen berechnetem Wassergehalt und jenem der Laboranalyse.

Bei den anderen Versuchen fällt auf, dass meist mehr Wasser in der Laboranalyse gefunden wird, als laut Berechnung Zufgeführt wurde.

Der Versuch 3 war jener mit niedrigem  $ALR_{Duese}$  jedoch, absolute gesehen, hohem Wasseranteil, dies führte zu einem sehr hohen Wasseranteil in der Probe.

Versuch 1 welcher eine sehr sämige und weiche Konsistenz aufwies, zeigte sich in der Laboranalyse nicht als die feuchteste Probe.

Im Mittel wurde das gesamte Wasser das der Spitzmasse zugeführt wurde, in der feuchten Spitzmasse wieder gefunden.

### 5.3.3. Beurteilung der Versuchsergebnisse

#### 5.3.3.1. Spritzmasseneinfluss

Die Veränderung der Spritzmasse von NP 12, in Versuch 1 und 2, auf NP 12 mit Abbindev-erzögerer bei den folgenden Versuchen zeigte keinen signifikanten Einfluss auf das Spritzbild oder die Konsistenz der feuchten Spritzmasse.

#### 5.3.3.2. Beladungsfälle

Allgemein kann gesagt werden, dass von allen drei geplanten Beladungszuständen konstante Betriebspunkte hergestellt werden konnten. Unter der Prämisse einen gesicherten stationären Zustand zu erreichen, waren in einer Versuchsserie 2 verschiedene  $ALR_{Duese}$ -Werte, maximal jedoch 3  $ALR_{Duese}$ -Werte, möglich. Außerdem war bei Versuch 5 und 6 die Vorgabe während der gesamten Versuchsdauer das  $ALR_{Duese}$  konstant zu halten, um das Aufbauverhalten der Spritzmasse an der Wand besser kennenzulernen.

##### 1. Hohe Beladung

Der höchste Beladungsfall, von 19 [kg/kg], konnte erst im 5 und 6 Versuch hergestellt werden. Es scheint als wäre für das Erreichen dieser hohen Beladung, unter den Betriebsbedingungen der Anlage, eine Einlaufphase notwendig. Danach waren sehr stabile Versuchsbedingungen bei einer Beladung von 19 [kg/kg] möglich.

Der Anstieg im  $ALR_{Duese}$  von 0,160 im 5. Versuch auf 0,176 im 6. Versuch, sowie die Reduktion des Wassergehaltes von 11,1 auf 10,1 [Gew. %] Wasser, bewirkte keinen signifikanten Unterschied im Spritzverhalten und in der durchfeuchteten Spritzmasse.

Zu den hohen Beladungsfällen sind auch Versuch 4 mit einer Beladung von 16,7 und Versuch 1 am Ende (1.2) mit 17,2 zu zählen.

Auch diese beiden Versuche weisen ein nebel- und staubfreies Spritzbild auf. Das  $ALR_{Duese}$  lag mit 0,164 und 0,163 zwischen den Versuchen 5 und 6.

##### 2. Mittlere Beladung

Der Versuch 1.1 bei einem Wassergehalt von 13,9 [Gew. %] und der Versuch 2.1 mit 11,2 [Gew. %] Wasser mit einem  $ALR_{Duese}$  von jeweils 0,19, sind Beispiele für ein sehr gutes Spritzbild. Bei Versuch 1 sei noch festgehalten, dass der hohe Wassergehalt zu einer sämigen Konsistenz der feuchten Spritzbetonmasse führte, siehe Abb. (5.34).

Das Senken des  $ALR_{Duese}$  auf 0,15 in Versuch 2.2 führte zu keiner Verschlechterung des Spritzbildes und dies obwohl der Wassergehalt auf 9,2 Gew. % abgesenkt worden war.

In Versuch 3 erfolgte eine weitere Absenkung des  $ALR_{Duese}$  auf 0,09, wobei der Wassergehalt in der Masse bei 11,4 [Gew. %] lagen, dies führte zu Nebeln. Aus diesen Erfahrungen kann abgeleitet werden, dass unser Spritzdüsenprototyp, bei einer Beladung von 15 [kg / kg], für eine gute Durchfeuchtung ein  $ALR_{Duese}$  im Bereich  $0,15 \leq ALR_{Duese} < 0,19$  benötigt um ein nebefreies Spritzbild zu erzeugen.

### 3. Niedrige Beladung

Mit der 7. Versuchsserie erfolgte die Austestung des untersten Beladungsfalles. Die Versuchspunkte 7.1 und 7.2 wiesen ein  $ALR_{Duese}$  von 0,14 und 0,11 auf, es zeigte sich starke Staubentwicklung, wobei bei diesen beiden Versuchspunkten die Beladung bei 7,4 und 8,2 [kg/kg] lag.

Das Anheben des  $ALR_{Duese}$  auf 0,19 führte zu einem starken Rückgang der Staubentwicklung, das Spritzbild wurde akzeptabel.

#### 5.3.3.3. Wassergehalt

Geplant war für sämtliche Versuche ein Wassergehalt von 10 [Gew.%].

Im Versuch 1 ergab sich ein Wassergehalt von 13,9 - 12,0, die Spritzmasse des gesamten Versuches ist eine sämig, flüssige Spritzmasse. Mit dem Düsenprototyp ist ein derart hoher Wassergehalt nicht erforderlich um eine komplett durchfeuchtete Spritzmasse zu erlangen.

Auch im Versuch 2 wurde der Wassergehalt im Versuchsverlauf gesenkt, hier von 11,2 auf 9,2, die Spritzmasse war deutlich weniger feucht, verglichen mit Versuch 1.

Der Versuch 3 wies einen relativ hohen Wassergehalt von 11,4 [Gew.%] auf, die Spritzmasse war hier nicht auffällig feucht, wie jene vom Versuch 1.

Die feuchte Spritzmasse des Versuches 4 wurde mit "fast zu trocken" charakterisiert", der berechnete Wassergehalt befindet sich, mit 10,2 [Gew.%], etwas höher als der von Versuch 6. Bei welchem das Spritzbild als auch die feuchte Spritzmasse als sehr gut beschrieben wurde.

Die Versuche 5 und 6 hatten einen eingestellten Wassergehalt an der Düse von 11,1 und 10,1 [Gew.%]. Sowohl das Spritzbild als auch die feuchte Spritzmasse wiesen sehr gute Eigenschaften auf.

Aus diesen Erfahrungen kann abgeleitet werden, dass der einzustellende Wassergehalt zwischen 10 und 11 [Gew.%] liegen sollte, um eine gut durchfeuchtete Spritzmasse zu erlangen. Ein Wassergehalt von 13,9 - 12,0 [Gew.%] führt zu einer sämigen und zu feuchten Spritzmasse.

Der Wasseranteil welcher in der Analyse festgestellt wurde liegt im Mittel gleich hoch wie der berechnete Wert.

Die Ursache für den Unterschied im Wassergehalt zwischen der Laboranalyse und dem berechneten Mittelwert für die einzelnen Versuche, könnte von den Schwankungen im Massestrom herrühren.

#### 5.3.3.4. Auswertung bezüglich der Geschwindigkeitsverhältnisse in der Spritzdüse

Aus den Versuchen ist bekannt, welche Volumenstromverhältnisse ein gutes Spritzbild ergeben und welche zu Nebel- bzw. Staubbildung führten. Von den Volumenströmen kann mit den Querschnittsflächen von Bohrungen, Stoppeln und Förderschlauch mittels Kontinuitätsgesetz auf die genormten Luft- und Wassergeschwindigkeiten in den Bohrungen, Stoppeln und im Förderschlauch rückgerechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind der Tabelle (5.7) zu entnehmen.

Tabelle 5.7: Volumenströme in der Düse für die Versuchspunkte vom 28. Mai 2009; Farb-codierung der Tabellenzeilen: Gelb: Versuche mit gutem bis sehr gutem Spritzbild, Rosa: Versuche mit Nebel oder Staubbildung, Blau: Versuche mit reinem Wasserspray

	V-Luft-Düse [Nm <sup>3</sup> /h]	V-Wasser-Düse [l/min]	V-Förder [Nm <sup>3</sup> /h]	v-Luft-Bohrung [Nm/s]	v-Wasser- Stoppel [Nm/s]	v-Luft-Stoppel [Nm/s]	v-FV-Leitung [Nm/s]	
0.1.	115,6	21,25	329,19	79,894	0,392	35,509	46,594	
0.2.	200,4	21,02	350,18	138,502	0,387	61,556	49,565	
1.1.	200,4	21,87	496,47	138,502	0,403	61,556	70,272	
1.1.2.	170	22,12	500,2	117,492	0,408	52,218	70,800	
2.1.	170	18,68	493,27	117,492	0,344	52,218	69,819	
2.2.	111,5	15,32	494,67	77,061	0,282	34,249	70,017	
3.	78,9	18,4	494,09	54,530	0,339	24,236	69,935	Nebel
4.	141,4	18,33	501,23	97,725	0,338	43,433	70,946	
5.	170	22,57	502,16	117,492	0,416	52,218	71,077	
6.	170	20,45	499,04	117,492	0,377	52,218	70,636	
7.1.	68	10,55	504,75	46,997	0,194	20,887	71,444	Staub
7.2.	49	9,6	499,05	33,865	0,177	15,051	70,637	starker Staub
7.3.	88,8	10,15	500,01	61,372	0,187	27,276	70,773	
	400			276,451		122,867		
	Grenzgeschwindigkeiten:			>61,5	>0,19	>27,5	70,000	

Der Auslegungsvorschlag für die weiteren Düsengeometrien passiert auf diesen Erkenntnissen und ist dem Anhang B zu entnehmen.

### 5.3.4. Schlussfolgerung

- Es erweist sich, dass sich die aufgegebene Wassermenge nahezu zu 100 % in der Spritzmasse als Feuchte befindet (vgl. Tabelle (5.6)).
- Aussage zum optimalen Wassergehalt in Gew.% bezogen auf den trocken geförderten Massestrom:

$$10,5 \pm 0,5 \text{ Gew.}\%$$

- Der Spritzdüsenprototyp weist bei Massendurchsätzen von 150 - 200 [kg/min] ein sehr gutes Spritzverhalten auf. Massendurchsätze von 100 [kg/min] erwiesen sich als untere fahrbare Beladungsgrenze.
- Aussage zum optimal einzustellendem Verdüsungsluftstrom, für Beladungen von 15 [kg/kg] entspricht dieser einem  $ALR_{Duese} 0,15 \leq$ , für Beladungen von 19 [kg/kg] liegt das  $ALR_{Duese}$  bei  $\geq 0,16$ .
- Bei niedrigeren Beladungen (Größenordnung 10 und darunter) ist, bei gegebener Spritzdüsenausstattung, ein überproportionaler Mehraufwand an Verdüsungsluft notwendig; nämlich  $ALR_{Duese} = 0,19$  für Beladungen  $\leq 10$  [kg/kg], um ein staubfreies Spritzbild zu erzeugen.

## 5.4. Zusammenführung der Versuchsergebnisse und Auswertung

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der Quantifizierung der Wasserdispergierung in der Düse, Abschnitt 5.2 und der Praxistests zur Spritzmassedurchfeuchtung Abschnitt 5.3 zusammengeführt werden.

Bei den Verdünnungsversuchen im Technikum standen ein kleiner Luft- und auch ein kleinerer Wasservolumenstrom zur Verfügung. Die durchgeführten Versuche stellen also einen niedrigen Beladungsfall bei verschiedenen  $ALR_{Duese}$  und  $ALR_{gesamt}$  dar.

Die beste Übereinstimmung zwischen den Verdünnungsversuchen im Labor und den Praxistests im Werk Veitsch sind für jene Werte zu erwarten, welche insgesamt ähnliche Betriebsbedingungen aufweisen. Der Fördervolumenstrom wurde bei den Praxistests immer auf  $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  gehalten, daher wurden für den Vergleich auch jene Versuchspunkte verwendet die ebenfalls einen Fördervolumenstrom von  $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  aufweisen. Die weiteren Parameter sind in Tabelle (5.8) angeführt.

Tabelle 5.8: Übereinstimmungskriterien

VersuchsNr.	Laborversuche			2.2	7.1	7.3
$ALR_{Duese}$	0,11	0,14	0,17	0,154	0,137	0,186
$ALR_{gesamt}$	0,96	0,99	1,02	0,839	1,231	1,152
Wasser [l/min]	13	13	13	15,3	10,1	10,5
$v_{Luft-Bohrung}$ [Nm/s]	46,99	60,82	72,57	77,1	47,0	61,4
$v_{Luft-Stoppel}$ [Nm/s]	20,89	27,03	32,25	34,2	20,9	27,3
$v_{Wasser-Stoppel}$ [Nm/s]	0,24	0,24	0,24	0,28	0,19	0,19

Das in Abb. (5.45) dargestellte Diagramm wurde dem Abschnitt 5.2 entnommen, eingetragen sind die Versuchspunkt mit größter Ähnlichkeit, wie bereits in Tabelle (5.8) angeführt.

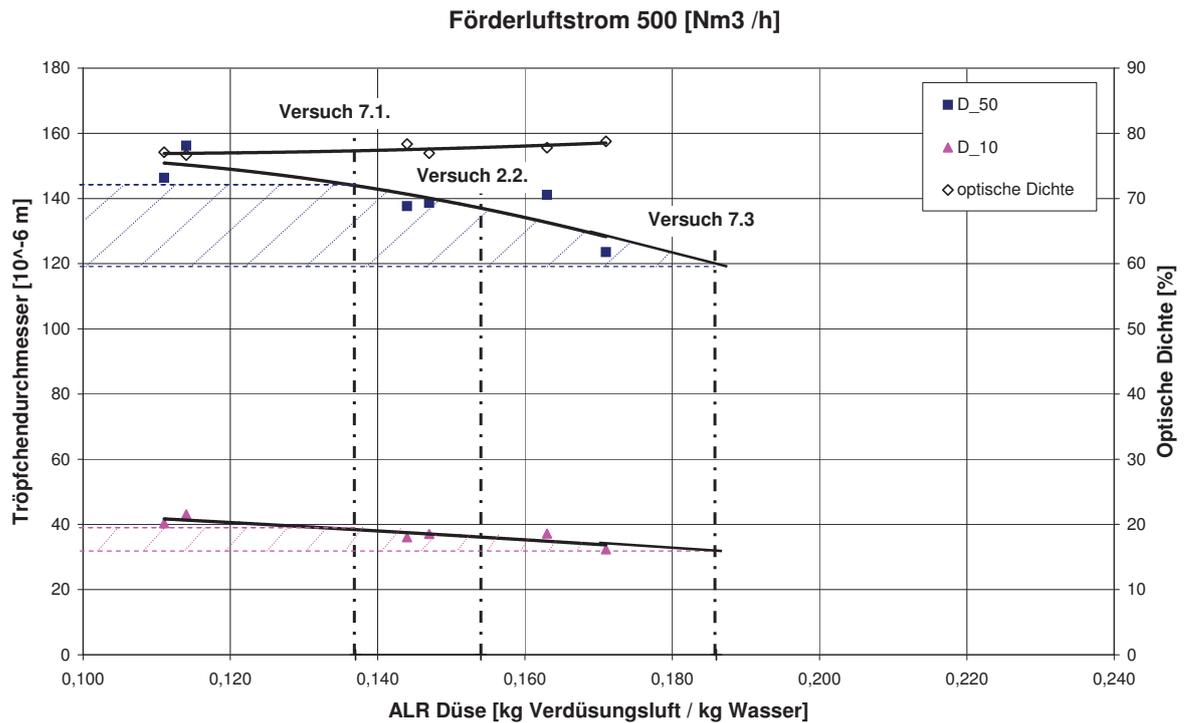


Abbildung 5.45: Fördervolumenstrom 500 Nm<sup>3</sup>/h und ALR<sub>Düse</sub> vs Tröpfchendurchmesser, mit den Versuchspunkten aus den Praxistests im Werk Veitsch vom 28. Mai 2009

Die Versuche 7.1 und 7.3 erfolgten mit niedrigeren Düsen volumenströmen und daher mit niedrigeren Geschwindigkeiten als die Laborverdüsungen, daher würde eine Vermessung des tatsächlichen Sprays im Labor wohl, etwas größere Tröpfchendurchmesser ergeben.

Für Versuch 2.2 verhält es sich genau umgekehrt, hier herrschten höhere Düsen volumenströme und daher auch höherer Geschwindigkeitsverhältnisse, daher würde sich der tatsächlich vermessene Spray in Richtung feinerer Spray befinden.

Insgesamt kann für diese Versuche davon ausgegangen werden, dass eine gute Verdüsung mit der Prototypdüse eine Sprayverteilung erzeugt, die durch die Parameter  $120 \leq D_{50} \leq 140 \mu\text{m}$  und  $30 \leq D_{10} \leq 40 \mu\text{m}$  charakterisiert werden kann. Sinkt das ALR<sub>Düse</sub> bei den gegebenen Wassermengen weiter ab, so kann kein zufriedenstellender Arbeitszustand hergestellt werden.

Werden absolut größere Wassermengen versprüht, so wird der Spray eher in Richtung feinerer Spray gehen, also hin zu kleineren D<sub>50</sub> und D<sub>10</sub>. Wie auch bei der Auswertung können nun die Versuchspunkte auch gegen ALR<sub>gesamt</sub> aufgetragen werden. In Abb. (5.46) ist dies zu sehen.

Aus den Praxisversuchen ist bekannt das die Versuche 2.2 und 7.3 ein zufriedenstellendes Sprühbild ergeben.

Hingegen Versuchspunkt 7.1 offenbar eine unzureichende Wasserbenetzung der Spritzmasse aufweist (Staub- Nebelbildung). Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass ein

$$ALR_{Duese} = 0,15$$

einzuhalten ist.

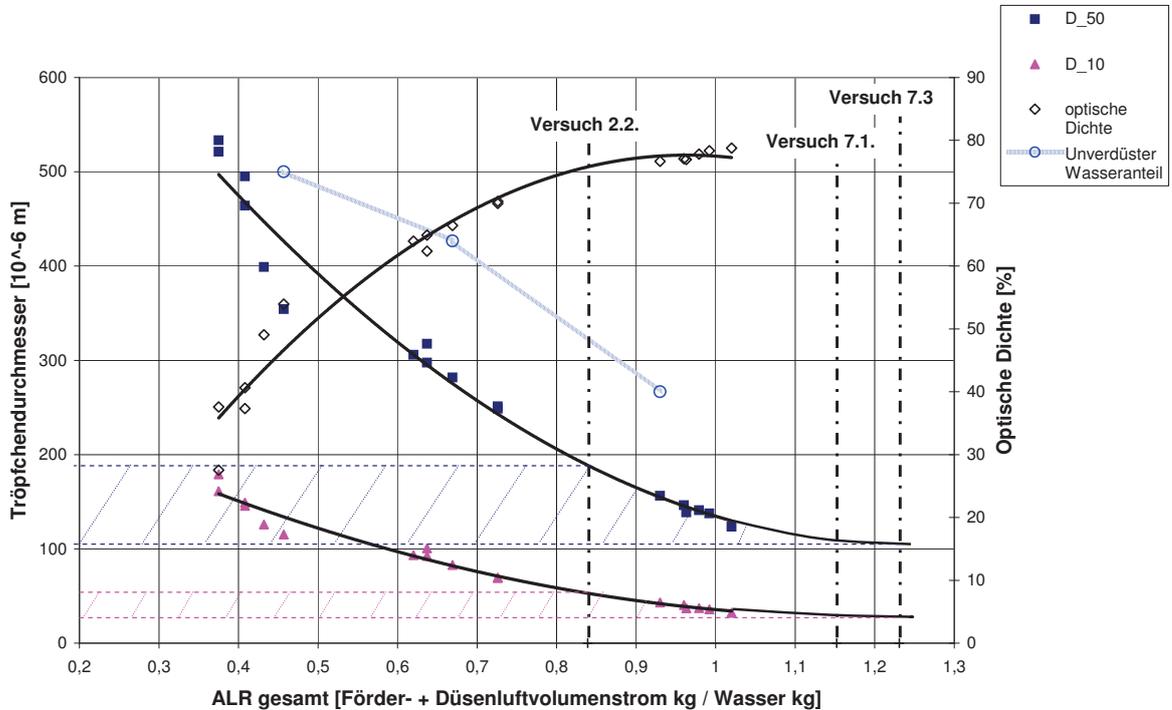


Abbildung 5.46:  $ALR_{gesamt}$  vs Tröpfchendurchmesser, mit den Versuchspunkten aus den Praxistests im Werk Veitsch vom 28. Mai 2009

Die schon oben beschriebene Geschwindigkeitseinflüsse sind auch in Abb. (5.46) zu berücksichtigen. Versuch 2.2 liegt in Richtung größerer Spray, als Punkt 7.1 und 7.3. Der funktionierende Betriebszustand 2.2 weist also größere Tröpfchendurchmesser auf als der nicht funktionierende Betriebszustand 7.1. Dies ist auf die absolut gesehen größere Wassermenge im Betriebspunkt 2.2 zurückzuführen, welche das  $ALR_{gesamt}$  stark senkt, die tatsächlichen Wasser- und Luftgeschwindigkeiten in der Düse liegen jedoch höher.

Bei Versuch 7.1 und 7.3 wurde absolut gesehen weniger Wasser verdüst, was einen geringeren Düsenluftvolumenstrom und damit auch geringere Gasgeschwindigkeit bedeutet. Daher sind die tatsächlichen Tröpfchendurchmesser tendentiell in Richtung größerer Spray anzusiedeln.

Bezüglich des praktischen Düseneinsatzes für D<sub>50</sub> und D<sub>10</sub> aus Abb. (5.46) etwa ein Kenndurchmesserbereich von  $110 \leq D_{50} \leq 190 \mu\text{m}$  und  $30 \leq D_{10} \leq 50 \mu\text{m}$  abgeleitet werden.

Diese D<sub>50</sub>- und D<sub>10</sub>-Bereiche sind etwas breiter aufgefächert als bei der Auswertung mittels dem  $ALR_{Duese}$ . Dies ist eine Folge der zusätzlich zum primären Zerstäubungsmechanismus wirksam werdenden sekundären Dispergiermechanismen (sekundärer Tropfenzerfall, Wasser / Spritzmasse - Wechselwirkung).

## 6. Zusammenfassung

Im Rahmen eines F & E- Projektes das am VTU - Institut für RHI durchgeführt wurde, erfolgte die Entwicklung einer Zweistoffdüse zur Befeuchtung pneumatisch geförderter Spritzmasse. Um die Druckbedingungen entlang der Förderstrecke berechnen zu können, wurde ein Berechnungsprogramm auf VBA - Basis erstellt.

Die Aufgabenstellungen für diese Diplomarbeit waren:

- Dokumentierung und Validierung des Berechnungsprogramms
- Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Spritzdüsenprototyps
- Dimensionierung weiterer Düsenbaugrößen

Im Abschnitt 3 ist das Berechnungsprogramm zur pneumatischen Förderung von Spritzmasse beschrieben.

Nach der Erstellung dieses Ablaufplanes erfolgte die Validierung des Programms. Diese wurde auf Basis sämtlicher vorliegender Versuche vorgenommen, siehe dazu Abschnitt 4.

Die Analyse der Ergebnisse ergab, dass das originale Berechnungsprogramm immer zu niedrige Treibstrahl- und Systemdrucke berechnete; mit steigender Beladung an Spritzmasse im Förderluftstrom stieg diese Abweichung.

Für die Versuche, welche im Werk Veitsch durchgeführt wurden, siehe Abschnitte 4.4.2, ergab sich ein Treibstrahl- und Systemdruck, der im Mittel um 5,4 % niedriger war als der gemessene Treibstrahl- und Systemdruck und ein Systemdruck welcher um 7,3 % niedriger war als der gemessene Systemdruck.

Die Versuchsreihe von 1998, siehe Abschnitt 4.3.4, wies Abweichungen zwischen 10 % und 30 % auf. Diese erheblichen Abweichungen zeigten sich als Folge einer Querschnittsverjüngung der Förderleitung, welche in Kantenform ausgeführt war. Diese Abweichung erwies sich in hohem Maß von der Beladung und vom Verjüngungsmaß abhängig. Aus diesen Zusammenhängen ließ sich eine Korrekturfunktion ableiten, welche im Rechenprogramm integriert wurde. Durch die Integration dieser Korrekturfunktion ergeben sich nur mehr geringe Abweichungen, zwischen dem gemessenen und dem berechneten Treibstrahl- und Systemdruck, siehe Abschnitt 4.4.3.

Der Einfluss der Düsenmündung ist dem gegenüber gering und kann sogar vernachlässigt werden. Auch die Art der Masse hat keinen für diese Druckbereiche nachweisbaren Einfluss.

Die experimentellen Untersuchungen zum Spritzdüsenprototyp sind im Abschnitt 5 erläutert. Um das Betriebsverhalten des Spritzdüsenprototyps zu studieren wurden Labor- und Praxisversuche durchgeführt. Basierend auf diesen Versuchen erfolgte die Dimensionierung der Düsenbaugrößen.

In den Laborversuchen erfolgte die Quantifizierung der Wasserdispergierung, siehe 5.2. Zur Beurteilung des erzeugten Wassersprays wurden folgende Methoden angewendet:

- Optische Beurteilung mittels Fotos
- Messung der Tröpfchenfeinheit mit Laserstreulichtmessung, sowie mit Aufprallwirkung auf die Hand

Die optische Auswertung ergab, dass der unverdünnte Wasseranteil sowohl von  $ALR_{Duese}$  als auch von  $ALR_{gesamt}$  abhängt. Der Anteil unverdünnten Wassers steigt durch sinkende Förder- und Düsenvolumenströme stark an. Eine ausreichende Wasserdispergierung kann also nur dann erreicht werden, wenn sowohl der Förder- als auch der Düsenvolumenstrom eine bestimmte Größe aufweisen. Die Feinheit des Wassersprays lässt sich anhand der Fotos nicht feststellen.

Die Tröpfchenfeinheit wurde daher mittels Laserstreulichtmessung bestimmt und ergab eine deutliche Abnahme der Tröpfchenfeinheit durch die Senkung des  $ALR_{Duese}$  als auch durch des  $ALR_{gesamt}$ . Die Aufprallwirkung auf der Hand kann folgendermaßen interpretiert werden: Ein feiner Sprühnebel hat eine D50 von etwa  $150 \mu m$ , ein spürbarer größerer Spray deutet auf ein von D50 etwa  $350 - 500 \mu m$  hin.

Die Praxistests zur Überprüfung der Spritzmassendurchfeuchtung vom 28. Mai 2009 ergaben folgende Betriebseigenschaften des Spritzdüsenprototyps, siehe Abschnitt 5.3.

- Bei Massendurchsätzen von  $150 - 200 \text{ kg/min}$  weist der Spritzdüsenprototyp ein sehr gutes Spritzverhalten auf, Massendurchsätze von  $100 \text{ kg/min}$  erwiesen sich als untere fahrbare Massendurchsatzgrenze für den inneren Rohrdurchmesser der Prototypdüse von  $50 \text{ mm}$ .
- Das optimale  $ALR_{Duese}$  für Beladungen von  $15 \text{ kg/kg}$  beträgt  $ALR_{Duese} \geq 0,15$ , für Beladungen von  $19 \text{ kg/kg}$  liegt das optimale  $ALR_{Duese}$  bei  $\geq 0,16$ .
- Das optimale  $ALR_{Duese}$  für Beladungen von  $10 \text{ kg/kg}$  beträgt  $ALR_{Duese} \geq 0,19$ .
- Der optimale Wassergehalt beträgt  $10,5 \pm 0,5 \text{ Gew.}\%$  bezogen auf den trockenen geförderten Massestrom.

Die Ergebnisse der Quantifizierung der Wasserdispergierung in der Düse, Abschnitt 5.2 und der Praxistests zur Spritzmassedurchfeuchtung, Abschnitt, konnten für den niedrigen Beladungsfall zusammengeführt werden, siehe Abschnitt 5.4.

Der Tröpfchendurchmesser bei  $50 \%$  der kumulierten Tropfenverteilung (D50) beträgt zwischen  $110 \leq D50 \leq 190 \mu m$  jener für Tröpfchendurchmesser bei  $10 \%$  der kumulierten Tropfenverteilung (D10) zwischen  $30 \leq D10 \leq 50 \mu m$ .

Aus diesen Erkenntnissen wurde ein Dimensionierungsvorschlag für die Spritzsysteme Handlanze, Shooter, Terminator und Conrep erarbeitet. Ausgehend von den Luft- und Wasservolumenströmen erfolgte die Ermittlung der Mediengeschwindigkeiten in den jeweiligen Düsengeometrien. Basierend darauf wurde der Dimensionierungsvorschlag ausgearbeitet, siehe Anhang B.

# Literaturverzeichnis

- [1] Richter, T.: Zerstäuben von Flüssigkeiten; Expert - Verlag, 2004.
- [2] Huhn, J.; Wolf, J.: Zweiphasenströmung gasförmig/flüssig; Fachbuchverlag Leipzig, 1974.
- [3] Wagner, W.; Strömung und Druckverlust; Vogel Fachbuch Kamprath-Reihe, 2006.
- [4] Eck, B.; Technische Strömungslehre - Band 2: Anwendungen 9. überarbeitete Aufl.; Springer Berlin Heidelberg New York, 1991.
- [5] Wozniak, G.; Zerstäubungstechnik, Prinzipien, Verfahren, Geräte; Springer-Verlag, 2003.

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Düsenbauarten, Zweistoffdüse äußerer Mischung (a), Zweistoffdüse innerer Mischung (b) [1] . . . . .	4
2.2. Strömungsformen der aufwärtsgerichteten Strömung [2] . . . . .	5
2.3. Strömungsformen zweiphasiger Gemische in einem waagrechten Rohr [2] . . . . .	6
2.4. Diagramm zur Bestimmung der Strömungsform im senkrechten Rohr nach Govier [2] . . . . .	7
2.5. Diagramm zur Bestimmung der Strömungsform im waagrechten Rohr nach BAKER [2] . . . . .	8
2.6. Ruhender und nicht deformierter Tropfen in einer Gasströmung [1] . . . . .	10
2.7. Sekundäre Tropfenzerfallserscheinungen durch aerodynamische Kräfte [1] . . . . .	11
2.8. Geschwindigkeitsprofil im Gaskern einer senkrecht aufwärtsgerichteten Ringströmung mit Beladung, (Luft/Wasser, 1,2 - 1,6 bar, Massenstrom Luft = $63 \cdot 10^{-3}$ kg/s, Rohrdurchmesser 31,8 mm) . . . . .	13
2.9. Schallgeschwindigkeit in einem Zweiphasengemisch Luft / Wasser in Abhängigkeit vom Gasvolumenanteil [5] . . . . .	14
2.10. Strömungsverteilung bzw. -verzweigung [4] . . . . .	15
4.1. Skizze der Versuchsstrecke (aus DA Steinwandter, 2008) . . . . .	29
4.2. Versuchsaufbau November 2008 . . . . .	30
4.3. Versuchsaufbau Dezember 2008 . . . . .	30
4.4. Versuchsaufbau (aus dem Untersuchungsbericht RHI 187/99 S. 26) . . . . .	31
4.5. Messdaten der Messreihe von Triessnig (1998) zum Zusammenhang zwischen Treibstrahl Druck und Beladung (a) bzw. zwischen Systemdruck und Beladung (b) . . . . .	36
4.6. Messdaten zum Zusammenhang zwischen Treibstrahl Druck und Leerrohrgeschwindigkeit des Förderstromes im Schlauch für die Versuchsreihen (a) J18Y, J18-20TT, J28 und J18-10; (b) J20-20 und J20-10; (c) J26; (d) Berechnete Reihen mit Beladungen von 20, 15 und 10 [kg/kg]; Programmversion neu, mit Korrekturterm für den Kanteneffekt . . . . .	38
4.7. Eingabeblatt des Berechnungsprogrammes, am Beispiel der Versuchsserie J18Y; Farbcodierung des Eingabeblattes: Türkis: einzutragende Daten, Gelb: Ergebnisse der Berechnung . . . . .	40

4.8.	Versuchsreihen Triessnig (1998); Vergleich gemessener und berechneter Daten von Treibstrahldruck (a) bzw. Systemdruck (b) als Funktion der Beladung; Programmversion original, d. h. ohne Korrekturterm für den Kanteneffekt (vgl. Abschnitt 4.4.3) . . . . .	44
4.9.	Versuchsreihen Triessnig (1998); Relative Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Treibstrahldruck (a) bzw. Systemdruck (b) dargestellt als Funktion der Beladung; Programmversion original, d. h. ohne Korrekturterm für den Kanteneffekt (vergleiche Abschnitt 4.4.3) . . . . .	45
4.10.	Versuchsreihen Triessnig (1998); Vergleich gemessener und berechneter Daten von Treibstrahldruck (a) bzw. Systemdruck (b) dargestellt als Funktion des Fördervolumenstromes; sowie deren relative Abweichung zwischen gemessenem und berechneten Daten dargestellt als Funktion des Fördervolumenstromes (c) und (d); Programmversion original, d.h. ohne Korrekturterm für den Kanteneffekt (vgl. Abschnitt 4.4.3). . . . .	47
4.11.	$F_{corr}$ vs Beladung für die Schlauch / Lanze- Durchmesserhältnisse 48/40 und 42/40 mit Regressionsgeraden . . . . .	50
4.12.	Vergleich gemessener und berechneter Daten von Treibstrahldruck (a) bzw. Systemdruck (b) dargestellt als Funktion der Beladung; Programmversion neu; mit Korrekturterm für den Kanteneffekt . . . . .	51
4.13.	Relative Abweichung zwischen gemessenem und berechneten Daten dargestellt als Funktion der Beladung (a) und (b); Programmversion neu; mit Korrekturterm für den Kanteneffekt . . . . .	52
5.1.	Schema der Laborversuche . . . . .	56
5.2.	Versuchsserie 1; FV=160, DV=105, ALR=0,17 . . . . .	58
5.3.	Versuchsserie 2; FV=160, DV=105, ALR=0,17 . . . . .	58
5.4.	Versuchsserie 1; FV=320, DV=105, ALR=0,17 . . . . .	58
5.5.	Versuchsserie 2; FV=290, DV=105, ALR=0,17 . . . . .	58
5.6.	Versuchsserie 1; FV=500, DV=105, ALR=0,17 . . . . .	59
5.7.	Versuchsserie 2; FV=500, DV=105, ALR=0,17 . . . . .	59
5.8.	Versuchsserie 1; FV=160, DV=88, ALR=0,14 . . . . .	59
5.9.	Versuchsserie 2; FV=160, DV=90, ALR=0,14 . . . . .	59
5.10.	Versuchsserie 1; FV=340, DV=84, ALR=0,15 . . . . .	60
5.11.	Versuchsserie 2; FV=320, DV=88, ALR=0,15 . . . . .	60
5.12.	Versuchsserie 1; FV=520, DV=84, ALR=0,15 . . . . .	60
5.13.	Versuchsserie 2; FV=500, DV=88, ALR=0,15 . . . . .	60
5.14.	Versuchsserie 1; FV=160, DV=70, ALR=0,11 . . . . .	61
5.15.	Versuchsserie 2; FV=160, DV=70, ALR=0,11 . . . . .	61
5.16.	Versuchsserie 1; FV=320, DV=66, ALR=0,11 . . . . .	61
5.17.	Versuchsserie 2; FV=320, DV=68, ALR=0,11 . . . . .	61
5.18.	Versuchsserie 1; FV=500, DV=64, ALR=0,11 . . . . .	62
5.19.	Versuchsserie 2; FV=500, DV=66, ALR=0,11 . . . . .	62

5.20. Laseroptisch gemessene Spritztropfendurchmesser für folgende Fördervolumenströme $FV = 160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (a), $FV = 340 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (b), $FV = 500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (c) und $ALR_{gesamt}$ (d) . . . . .	65
5.21. 1. Versuchsserie; $FV=160$ , $DV=105$ , $ALR = 0,17$ . . . . .	67
5.22. 1. Versuchsserie; $FV=320$ , $DV=105$ , $ALR=0,17$ . . . . .	67
5.23. 2. Versuchsserie; $FV=520$ , $DV=105$ , $ALR=0,17$ . . . . .	67
5.24. 1. Versuchsserie; $FV=160$ , $DV=88$ , $ALR=0,14$ . . . . .	67
5.25. 1. Versuchsserie; $FV=340$ , $DV=84$ , $ALR=0,15$ . . . . .	67
5.26. 1. Versuchsserie; $FV=520$ , $DV=84$ , $ALR=0,15$ . . . . .	67
5.27. 2. Versuchsserie; $FV=170$ , $DV=70$ ; $ALR=0,11$ . . . . .	67
5.28. 2. Versuchsserie; $FV=320$ , $DV=68$ , $ALR=0,11$ . . . . .	67
5.29. 2. Versuchsserie; $FV=500$ , $DV=66$ , $ALR=0,11$ . . . . .	67
5.30. Versuchsschema . . . . .	69
5.31. Diagramm der Vorversuche 0.1 und 0.2 . . . . .	70
5.32. Wasserspray, Versuch 0.1 . . . . .	70
5.33. Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 1 . . . . .	71
5.34. Versuche 1: (a) Spritzbild erster Versuchsteil; (b) feuchte Spritzmasse des gesamten Versuches (Bild Herr Lanzenberger) . . . . .	72
5.35. Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 2 . . . . .	73
5.36. Versuch 2: Spritzbild ; (a) erster Versuchsteil , (b) gegen Versuchsende . . . . .	73
5.37. Diagramm des Versuchsverlaufes 3 . . . . .	74
5.38. Versuch 3: Spritzbild (a) aus der Mitte des Versuches ( Bild von Herrn Lanzenberger) ; (b) gegen Versuchsende . . . . .	74
5.39. Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 4 . . . . .	75
5.40. Versuch 4: Spritzbild (a) Versuchsbeginn ( Bild von Herrn Lanzenberger) und (b) Versuchsende . . . . .	75
5.41. Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 5 und Nr. 6 . . . . .	76
5.42. Versuch 5: (a) Spritzbild und (b) feuchte Spritzmasse ( Bild von Herrn Lanzenberger); Versuch 6: (c) Spritzbild und (d) Masseaufbau an der Wand ( Bild von Herrn Lanzenberger) . . . . .	77
5.43. Diagramm des Versuchsverlaufes Nr. 7 . . . . .	78
5.44. Versuch 7: Spritzbild letzter Versuchsteil ( Bild von Herrn Lanzenberger) . . . . .	78
5.45. Fördervolumenstrom $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ und $ALR_{Duese}$ vs Tröpfchendurchmesser, mit den Versuchspunkten aus den Praxistests im Werk Veitsch vom 28. Mai 2009 . . . . .	84
5.46. $ALR_{gesamt}$ vs Tröpfchendurchmesser, mit den Versuchspunkten aus den Praxistests im Werk Veitsch vom 28. Mai 2009 . . . . .	85
A.1. Versuchsaufbau, Dezember 2008 . . . . .	i
A.2. Eingabeblatt, Versuche Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008 . . . . .	iv
B.1. Schema des Spritzdüsequerschnittes mit Bemaßung . . . . .	x

B.2. Stoppelanordnung in der Düse . . . . .	xi
B.3. Zulaufanordnung . . . . .	xii
B.4. Rohreinlaufgeometrien mit der Druckverlustzahl $\zeta$ [4] . . . . .	xiii

# Tabellenverzeichnis

2.1. Kennzahlen zur Charakterisierung von Zweiphasenströmungen . . . . .	9
2.3. Widerstandsbeiwert für die Kugelumströmung, nach [1] . . . . .	10
4.1. Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Wert des Treibstrahl- bzw. Systemdruckes; angegeben als Prozentanteil des jeweiligen Messwertes	27
4.2. Übersicht der Versuchsserien 1998 . . . . .	31
4.3. Einphasige Luftströmung durch die Versuchsanordnung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte des Treibstrahl- und des Systemdrucks; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3) . . . . .	41
4.4. Vier Betriebspunkte zum pneumatischen Transport durch die Versuchsan- ordnung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte des Treibstrahl- und des Systemdrucks; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kan- teneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3) . . . . .	41
4.5. Vier Betriebspunkte zur pneumatischen Förderung; Gegenüberstellung ge- messener und berechneter Daten von Treibstrahl- und Systemdruck; Pro- grammversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3) . . . . .	42
4.6. 1. und 2. Mittelwerte aus konstanten Betriebszuständen und 3. Betrieb- spunkt (vgl.4.3.3 ) zur pneumatischen Förderung; Gegenüberstellung ge- messene und berechneter Daten von Treibstrahl- und Systemdruck vs Be- ladung; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3) . . . . .	42
4.7. Versuche Veitsch, Lanzemberger (2006); Elf Betriebspunkte zur pneumati- schen Förderung; Gegenüberstellung gemessener und berechneter Daten von Treibstrahl- und Systemdruck; Programmversion Original, ohne Korrektur des Kanteneffektes (vgl Abschnitt 4.4.3) . . . . .	49
5.1. Abkürzungen . . . . .	57
5.2. Abrinnender d. h. nicht zerstäubter Wasseranteil, der als Wandfilm abfließt	62
5.3. Versuchbedingungen - Laserstreulichtmessung . . . . .	63
5.4. Versuchsplan für den 28. Mai 2009 - Werk Veitsch . . . . .	68
5.5. Versuchseinstellungen vom 28. Mai 2009; Farbcodierung der Tabellenzeilen: Gelb: niedrige Beladung, Rosa: mittlere Beladung und Orange: hohe Be- ladung . . . . .	69

5.6. Wassergehalt bezogen auf die trockene Masse . . . . .	79
5.7. Volumenströme in der Düse für die Versuchspunkte vom 28. Mai 2009; Farbcodierung der Tabellenzeilen: Gelb: Versuche mit gutem bis sehr gutem Spritzbild, Rosa: Versuche mit Nebel oder Staubbildung, Blau: Versuche mit reinem Wasserspray . . . . .	82
5.8. Übereinstimmungskriterien . . . . .	83
B.1. Durchsatzdaten der Spritzsysteme . . . . .	viii
B.2. Volumenströme in der Düse für die Versuchspunkte vom 28. Mai 2009; Farbcodierung der Tabellenzeilen: Gelb Versuche mit gutem bis sehr gutem Spritzbild, Rosa Versuche mit Nebel oder Staubbildung, Blau Versuche mit reinem Wasserspray . . . . .	ix
B.3. Auslegung der Stoppel und Bohrungen . . . . .	ix
B.4. Radien für die verschiedenen Spritzdüsenaggregate . . . . .	xi

# A. Bedingungsanleitung zum VBA - Programm pneumatische Förderung

## A.1. Allgemeines

Mit Hilfe dieser Anleitung soll es dem Benutzer erleichtert werden, das VBA -Programm zur Berechnung einer pneumatischen Förderstrecke zu bedienen.

Anhand des Beispielfalles Versuche - Veitsch, DA Doletschek, Dezember 2008 wird der gesamte Bedienungsablauf dargestellt.

In einem ersten Schritt ist es sehr Hilfreich, die Versuchsstrecke zu skizzieren, in Abbildung (A.1) ist das Schema für unseren Beispielfall zu sehen.

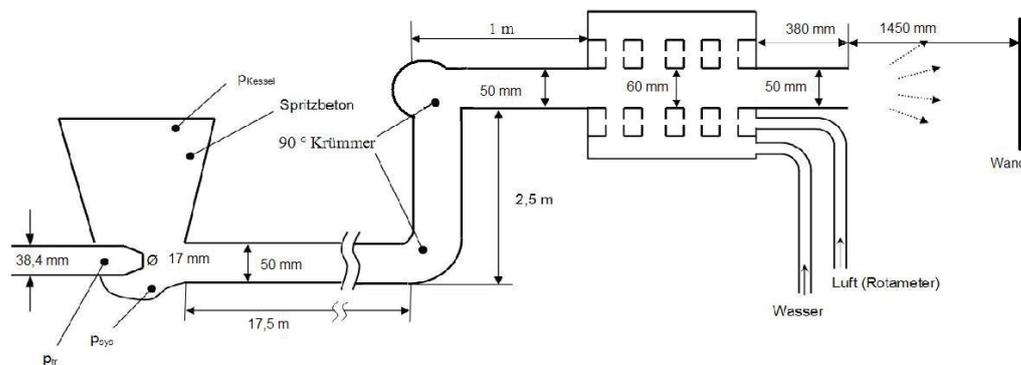


Abbildung A.1: Versuchsaufbau, Dezember 2008

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, in einem ersten Schritt die Versuchsstrecke festzulegen, dabei werden alle Geometrien und Spritzmasse spezifischen Daten eingetragen. Diese bleiben, meist für eine Versuchsreihe gleich und können als eigenes Excel- file abgelegt werden, siehe (A.1.2) und (A.1.5). Die verschiedenen Messpunkte, also die verschiedene Beladungsfälle, Wasserzugaben und Düsenluftvolumenströme, die auf einer solchen Versuchsstrecke gefahren werden, sind unter (A.1.3) und (A.1.6) zusammengefasst.

### A.1.1. Erforderliche Informationen

Hier befindet sich eine Auflistung aller benötigten Daten.

### **A.1.2. Streckenspezifische Daten**

Die hier gesammelten Informationen bleiben in der Regel für alle Messpunkte einer Versuchsserie gleich, es lohnt sich solch eine Versuchsstrecke in einem eigenen Excel- file abzuliegen.

#### **A.1.2.1. Transportleitung**

Die zu berechnete Strecke ist hinsichtlich ihres Aufbaues in Rohre und Krümmer zu untergliedern. Folgende Daten sind dabei aufzunehmen.

- Schlauchlänge
- Schlauchquerschnitte
- Wirksame Hebearbeit am Schlauch; z. B. ob der Schlauch waagrecht oder senkrecht verläuft, aber auch ob der Schlauch kontinuierlich Steigt
- Schlauchmaterial (Gummi oder Stahl)
- Krümmer bzw. Krümmungen des Schlauches
- Winkel des Krümmers und aus welchem Material sind die Krümmer

#### **A.1.2.2. Injektor Geometrie**

Als nächstes sollten alle notwendigen Geometrien am Injektor notiert werden, diese sind im Nachhinein oft nur schwer Erueierbar und von großer Bedeutung für die Berechnung.

- Rohrdurchmesser der Mischstrecke
- Druckluftleitungsquerschnitt
- Düsenquerschnitt (Treibdüsenaustritt)
- Injektorwinkel gegen die Horizontale

#### **A.1.2.3. Spritzmasseeigenschaften**

Diese waren zwar bislang immer dieselben, sie müssen jedoch trotzdem immer wieder kontrolliert werden.

- Dichte des Aufgabegutes
- Teilchendurchmesser  $d_{50}$

#### **A.1.2.4. Temperatur**

Die Umgebungstemperatur hat natürlich einen Einfluss auf den benötigten Druck.

#### **A.1.2.5. Spritzlanze**

Der vorderste Teil der Versuchsanordnung stellt die Spritzlanze dar. Hier sind die Geometrien von Bedeutung

- Lanzenlänge
- Lanzenquerschnitt
- Lanzenmaterial
- Lanzenneigungswinkel

#### **A.1.3. Veränderliche Daten**

Die folgenden Daten sind diejenigen, welche sich innerhalb einer Versuchsserie von Messpunkt zu Messpunkt ändern.

- Volumenstrom Treibstrahlseitig (Förderluftvolumenstrom)
- Massestrom im Guteinlauf
- Wassergehalt in Prozent bezogen auf den Massestrom
- Gemessener Zerstäubungsvolumenstrom (Düsenluftvolumenstrom)

#### **A.1.4. Eintragen der Daten auf dem Eingabeblatt**

In der Abbildung (A.2) ist das Eingabeblatt für den Versuch vom Dezember zu sehen, siehe Abb. (A.2). Das Eintragen der Daten findet ausschließlich auf dem Eingabeblatt statt. Die türkisen Felder sind für die Eingabe vorgesehen, die gelben Felder sind die Berechnungsergebnisse. Der linke Bereich ist der Injektorbereich, ganz links oben befindet sich ein Diagramm mit der Darstellung des Druckverlaufes und Geschwindigkeitsverläufe auf der Strecke. Darunter sind Injektorgeometrien, Spritzmasseeigenschaften und die veränderlichen Daten einzutragen. Am untersten Ende des Injektorbereiches befindet sich der Startknopf mit dem die Berechnung gestartet wird (dieser ist auf der Abbildung (A.2) nicht zu sehen).

In der Mitte des Eingabeblattes befindet sich der Bereich "Transportleitung" hier werden die Daten zu den Rohren und Krümmern eingetragen.

Ganz rechts oben befindet sich der Bereich "Spritzlanze", wo die für die Spritzlanze charakteristischen Daten eingetragen werden.

#### **A.1.5. Streckenspezifische Daten**

Hier sind alle Geometriedaten und Spritzmassedaten zusammengefasst.



#### A.1.5.1. Transportleitung

Die unter A.1.2.1 angeführten Daten werden unter “Transportleitung” eingetragen.

- Rohr 1

Der Rohrdurchmesser und die Rohrlänge sind in [mm] einzutragen. In unserem Beispiel sind das 50 mm für alle Rohr, die Rohrlänge ist mit 17500 mm für das erste Rohr, 2500 mm für das zweite Rohr und 1000 mm für das dritte Rohr einzutragen.

Beim Rohrneigungswinkel wird eine Steigungen ohne Vorzeichen eingetragen, ein Gefälle wäre mit einem negativem Vorzeichen einzutragen. In unserem Beispielfall, ist das zweite Rohr ein senkrecht nach oben, daher wird der Winkel mit 90 ° eingetragen, die beiden anderen Rohr verlaufen waagrecht, weshalb für sie der Winkel 0 eingetragen ist.

In den Folgenden beiden Feldern sind der Gleitreibungsbeiwert und das E-Modul einzutragen. Für Stahl und Gummi sind der Gleitreibungsbeiwert und das E-Modul im “Eingabeblatt” unter “Parameter, Richtwerte für die Parameter E-Modul und Gleitreibungsbeiwert” vorgegeben. Die Eingabe von anderen als den vorgegeben Werten, führt zu einem Programmabsturz oder einer Fehlerberechnung.

- Krümmer 1

Der erste Eintrag ist hier der Krümmungswinkel in °, in unserem Beispiel gibt es zwei Krümmer beide mit einem 90 ° Winkel. Der zweite Eintrag ist jeweils wieder der Rohrdurchmesser in mm.

Für den Krümmungsradius ist der jeweilige Rohrdurchmesser \*10 einzutragen.

Die Eintragung des Gleitreibungsbeiwertes erfolgt wie bereits unter Rohr 1 beschrieben.

- Alle weiteren Rohre und Krümmer sind analog einzutragen. Die Reihenfolge der Berechnung ergibt sich aus der Reihenfolge der Eintragung (Rohr 1 → Krümmer 1 → Rohr 2 → Krümmer 2 → Rohr 3 usw.).
- Sind mehrere Rohre ohne Krümmer aneinander gereiht, so erfolgt der Eintrag Rohr 1, Krümmer 1, Rohr 2, Rohr 3, Rohr 4 usw. .
- Die Anzahl von Rohren und Krümmern ist im “Eingabeblatt” unter “Anzahl der Rohre” sowie “Anzahl der Krümmer” einzutragen. In unserem Beispiel siehe Abb. (A.1) besteht die Versuchsstrecke aus 3 Rohren und 2 Krümmern. Also ist im Eingabeblatt Injektorbereich (A.2) unter “Anzahl der Rohr” und “Anzahl der Krümmer” 3 und 2 einzutragen. Wäre hier 1 und 1 eingetragen, so berechnet das Programm auch nur ein Rohr und einen, egal was unter Transportleitung eingetragen ist!
- Jede zu berechnende Strecke muss zumindest aus einem Rohr und einem Krümmer bestehen, ansonsten erscheint ein Fehlermeldung mit der Aufforderung zur Eingabe zumindest eines Rohres und eines Krümmers.

### A.1.5.2. Injektor Geometrie

Die notwendigen Geometrien am Injektor sind unter “Injektor” einzutragen.

Unter “Handlanze” ist der Rohrdurchmesser der Mischstrecke einzutragen. Dieser hat zumeist denselben Durchmesser wie die Transportschläuche.

Unter Injektor, gleich unterhalb von “Handlanze”, sind der Druckluftleitungsquerschnitt und der Düsenquerschnitt in mm einzutragen. Diese beiden Werte sollten mit großer Sorgfalt recherchiert werden, da sie erheblichen Einfluss auf die Druckverhältnisse im Treibtopf haben. In unserem Beispiel betragen sie 38,4 mm und 17 mm.

Als letzter Eingabewert ist der Injektorwinkel gegen die Horizontale einzutragen, diese war bei allen bisherigen Versuchen 0°.

### A.1.5.3. Spritzmasseeigenschaften

Auch die Spritzmasseeigenschaften sind unter “Injektor” einzutragen. Der Teilchendurchmesser  $D_{50}$  und die Dichte des Aufgabegutes waren bei allen bisherigen Versuchen  $D_{50} = 600 \mu\text{m}$  und  $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$ . Auch die Temperatur ist in °C unter “Handlanze” einzutragen.

### A.1.5.4. Spritzlanze

Der Bereich “Spritzlanze” befindet sich ganz rechts oben. Hier werden die geometrischen Daten wie Lanzenlänge, Lanzenquerschnitt, Neigungswinkel und Gleitreibungsbeiwert analog zu A.1.5.1 eingetragen. Vergleich jeweils die Daten aus (A.1) mit den Eingaben (A.2).

### A.1.6. Veränderliche Daten

Unter “Handlanze” ist der Volumenstrom Treibstrahlseitig (Förderluftvolumenstrom) in  $\text{Nm}^3/\text{h}$  einzugeben, bei unserem Messpunkt sind dies  $490 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Direkt darunter befindet sich der Massestrom im Guteinlauf in  $\text{kg} / \text{min}$ , mit  $185 \text{ kg} / \text{min}$ , siehe (A.2).

Ganz rechts erfolgt die Eingabe des Wassers in Gew. % auf den Massestrom und die Eintragung des Düsenluftvolumenstromes in  $\text{Nm}^3/\text{h}$  laut Rotameteranzeige. Integriert ist zurzeit ein Umrechnungsfaktor von 0,632 der die Rotameteranzeige bei 2 bar abs. auf den tatsächlichen Düsenluftvolumenstrom umrechnet.

### A.1.7. Berechnung

Damit das Programm arbeiten kann benötigt es einen Startwert für den Systemdruck. Mit Hilfe dieses Startwertes iteriert das Programm im Extremfall mit 30 Berechnungsschleifen die gesamte Berechnungsprozedur durch. Berechnungsabbruch ist entweder ein Absolutdruck am Ende der Anlage zwischen  $0,7 >$  und  $< 1,01 \text{ bar}$  oder die Meldung das der Systemdruck zu hoch oder zu niedrig gewählt wurde.

Auch im letzteren Fall lohnt es sich das Ergebnis der Berechnung genauer zu analysieren.

- Wird in unserem Beispiel für den Startwert Systemdruck  $5,2 \text{ bar abs.}$  eingegeben, so erhält man als Absolutdruck am Ende der Anlage  $1,7 \text{ bar abs.}$  und dies bei ei-

nem Umgebungsdruck von 1,01 bar abs. . Der Druck am Ende der Anlage ist, laut Berechnung, also um 0,7 bar höher als der Umgebungsdruck.

- Ein guter neuer Startwert Systemdruck, für unser Beispiel, ist also  $5,2 - 0,7 = 4,5$ .

Zudem ist zu beachten, das der Startwert Systemdruck um ca. 1,4 bar höher liegen muss als der Systemdruck.

Für sämtliche Versuchsauswertungen ist ein Absolutdruck am Ende der Anlage zwischen 0,98 und 1,01 berechnet worden.

## B. Dimensionierungsvorschlag der Wassereindüsung

Das Spritzdüsenystem soll in einem breiten Anwendungsbereich eingesetzt werden, dafür ist es erforderlich den vorliegenden Spritzdüsenprototyp für andere Durchsätze zu dimensionieren. Folgende Aspekte wurden dabei beachtet:

- Um die beim Prototyp erzielte Sprayfeinheit und Penetrationstiefe auch bei anderen Düsenbaugrößen erreichen zu können, werden die errechneten Luft- und Wassergeschwindigkeit im Spritzdüsenprototyp herangezogen und als Basis für die Auslegung verwendet. Die Versuchsreihe vom 28. Mai 2009 liefern hierfür die nötigen Erkenntnisse und Daten.
- Damit die Luft- und Wasserströme auf alle Stoppel und Bohrungen gleich verteilt werden, ist die Verteilerregel einzuhalten, siehe dazu Abschnitt 2.7.

### B.1. Allgemeine Beschreibung

Für die industriellen Spritzmasseapplikationen werden Handlanze, Shooter, Terminator und Conrep eingesetzt. Von der RHI wurden folgende Kenndaten zur Verfügung gestellt:

Tabelle B.1: Durchsatzdaten der Spritzsysteme

	Massenausstrag	Förderleitungsquerschnitt
Spritzsystem	[kg/min]	[mm]
HANDLANZE	40 bis 80	40
SHOOTER	80 bis 150	40
TERMINATOR	100 bis 250	40
CONREP	200 bis 400	60

Aus dem Spritzversuch vom 28. Mai 2009 hat sich für den Prototyp ein optimaler Wasseranteil von  $10,5 \pm 0,5$  Gew. % (bezogen auf trockene Spritzmasse) herausgestellt, daher wird auch für die Dimensionierung von diesem Wert ausgegangen.

Ebenfalls bekannt sind aus den Spritzversuchen jene Leerrohrgeschwindigkeiten in der Spritzdüse sowie im Förderrohr, bei welchen es zu Staub- bzw. Nebelbildung gekommen ist. Diese wurden als Geschwindigkeitsuntergrenzen für die Auslegung herangezogen. Gerechnet wurde mit dem genormten Luft- und Wasservolumenstrom welcher auf die gesamte Stoppel-, Bohrungs- und Förderschlauchfläche bezogen wurde. Weiters ist aus den Versuchen bekannt, daß für Beladungen von 20 und 15 kg/kg die Verdüsung des Wassers mit einem

$ALR_{Duese} = 0,15$  optimal verlief. Die Beladung von 10 kg/kg konnte mit einem  $ALR_{Duese} = 0,19$  erfolgreich gefahren werden. Aufgrund dessen wurden diese Werte als Grundlage für die Auslegung herangezogen. In Tabelle B.2 sind die berechneten Daten für die Versuche vom 28. Mai angeführt. V-Luft-Düse sowie V-Wasser-Düse sind die Volumenströme der Luft und des Wassers in die Düse und V-Förder ist der Fördervolumenstrom in der Leitung. Aus den Volumenströmen bezogen auf die Summe der Flächen der Bohrungen und Stoppel erfolgte die Berechnung der Leerrohrgeschwindigkeit.

Tabelle B.2: Volumenströme in der Düse für die Versuchspunkte vom 28. Mai 2009; Farbcodierung der Tabellenzeilen: Gelb Versuche mit gutem bis sehr gutem Spritzbild, Rosa Versuche mit Nebel oder Staubbildung, Blau Versuche mit reinem Wasserspray

	V-Luft-Düse [Nm <sup>3</sup> /h]	V-Wasser-Düse [l/min]	V-Förder [Nm <sup>3</sup> /h]	v-Luft-Bohrung [Nm/s]	v-Wasser- Stoppel [Nm/s]	v-Luft-Stoppel [Nm/s]	v-FV-Leitung [Nm/s]	
0.1.	115,6	21,25	329,19	79,894	0,392	35,509	46,594	
0.2.	200,4	21,02	350,18	138,502	0,387	61,556	49,565	
1.1.	200,4	21,87	496,47	138,502	0,403	61,556	70,272	
1.1.2.	170	22,12	500,2	117,492	0,408	52,218	70,800	
2.1.	170	18,68	493,27	117,492	0,344	52,218	69,819	
2.2.	111,5	15,32	494,67	77,061	0,282	34,249	70,017	
3.	78,9	18,4	494,09	54,530	0,339	24,236	69,935	Nebel
4.	141,4	18,33	501,23	97,725	0,338	43,433	70,946	
5.	170	22,57	502,16	117,492	0,416	52,218	71,077	
6.	170	20,45	499,04	117,492	0,377	52,218	70,636	
7.1.	68	10,55	504,75	46,997	0,194	20,887	71,444	Staub
7.2.	49	9,6	499,05	33,865	0,177	15,051	70,637	starker Staub
7.3.	88,8	10,15	500,01	61,372	0,187	27,276	70,773	
	400			276,451		122,867		
	Grenzgeschwindigkeiten:			>61,5	>0,19	>27,5	70,000	

Im nächsten Schritt erfolgt die Auslegung.

### B.1.1. Dimensionierung der Stoppel und Bohrungen

Mit den Grenzgeschwindigkeiten wurden nun für die verschiedenen Spritzaggregate jeweils eine Konfiguration - Stoppel- und Bohrungsdurchmesser sowie Stoppel- und Bohrungsanzahl - ermittelt, bei welcher die Geschwindigkeiten immer im idealen Bereich zu liegen kommen. Dabei ergeben sich folgende Konfigurationen:

Tabelle B.3: Auslegung der Stoppel und Bohrungen

Spritzsystem	Stoppel		Bohrungen		Düsendurchmesser [mm]
	Durchmesser [mm]	Anzahl	Durchmesser [mm]	Anzahl je Stoppel	
HANDLANZE	9	6	3,5	3	30
SHOOTER	11	6	4	4	40
TERMINATOR	12	8	4	4	50
CONREP	13	12	4,5	4	60

Bei der Auslegung wurde darauf geachtet, die Anzahl der Bohrungen je Stoppel sowie die Bohrungsquerschnitte nur wenig zu variieren. Die Stoppel sollen ebenfalls maximal auf drei Ebenen angeordnet werden, wobei je Ebene maximal 4 Stoppel anzuordnen sind.

### B.1.2. Auslegung der Düsenradien

Um die gleichmäßige Strömungsverteilung im Luft- und Wasserraum der Spritzdüse zu gewährleisten, wurden die Flächenverhältnisse von Wasserraumquerschnittsfläche /  $\sum$ Stoppelflächen (entspricht Zustromfläche / Abstromfläche =  $\frac{b}{f}$ , siehe dazu 2.7) sowie Luftraumquerschnittsfläche /  $\sum$ Bohrungen des Düsenprototyps, für die Auslegung herangezogen, siehe dazu Abb. (B.1).

Die Wandstärken von Düsen-, Luft- und Wasserraum wurden ebenfalls dem Prototypentwurf entnommen. Abbildung (B.1) enthält ein Schema der Spritzdüse mit allen nötigen Bemaßungen.

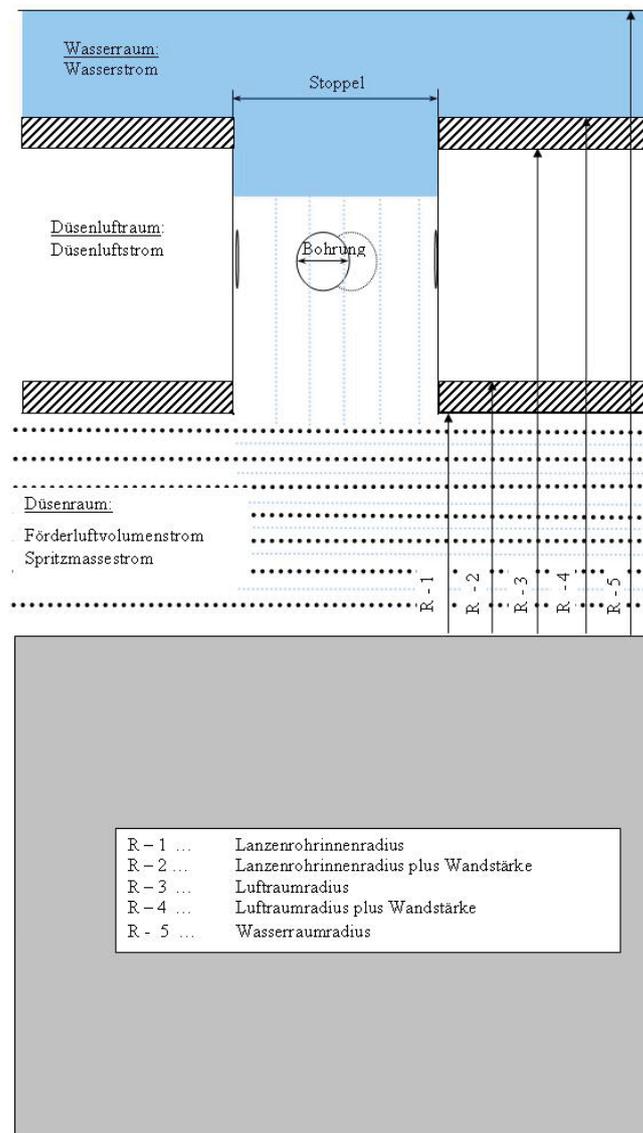


Abbildung B.1: Schema des Spritzdüsequerschnittes mit Bemaßung

Die Wandstärken von Düsen-, Luft- und Wasserraum wurden ebenfalls der Konstruktion des Prototyps entnommen. Im Folgenden ein Schema der Spritzdüse mit allen nötigen

Radien. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle (B.4) angeführt, Zoll  $\hat{=}$  25,4 mm. .

Tabelle B.4: Radien für die verschiedenen Spritzdüsenaggregate

Radius	Lanze	Wand	Luftraum		Wand	Wasserraum		Wand
	innen		innen	außen		innen	außen	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
HANDBLANZE	15	6,5	21,5	30,8	4	34,8	50,1	5
SHOOTER	20	6,5	26,5	39,2	4	43,3	73,5	5
TERMINATOR	25	6,5	31,5	46,5	4	50,0	74,5	5
CONREP	30	6,5	36,5	51,8	4	55,8	108,5	5
	Luftraum		Wasserraum					
Anschlüsse	Zoll $\hat{=}$ 25,4 mm		Zoll $\hat{=}$ 25,4 mm					
HANDBLANZE	3/4 "		1/2 "					
SHOOTER	1 "		3/4 "					
TERMINATOR	1 1/2 "		3/4 "					
CONREP	3 x 1/2"		3 x 1/2 "					

Die Längen von Luft- und Wasserraum sind den jeweiligen konstruktiven Notwendigkeiten anzupassen.

### B.1.3. Formgebungsmaßnahmen

- Anordnung der Stoppel

Die Stoppel sollten so angeordnet werden, dass sie nicht direkt am Düsenboden zu liegen kommen, siehe Abb. (B.2).

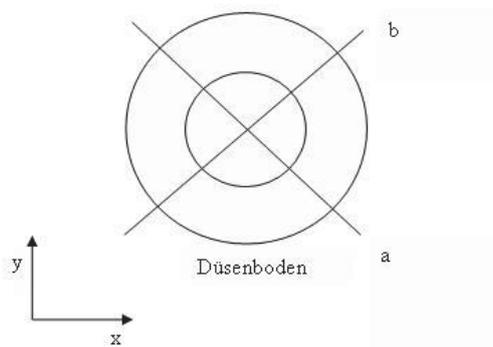


Abbildung B.2: Stoppelanordnung in der Düse

Dies beugt einem Eintreten von Spritzmasse in den Düseninnenraum vor.

- Anordnung der Zuläufe

Eine optimale Verteilung des Zulaufstromes erfordert einen relativ große Querschnittsfläche des Zulaufes, siehe Abschnitt 2.7. Beim Modell Conrep wird ein besonders großer Düsenluft- und Wasserstrom benötigt weshalb ein großer Zulaufquerschnitt erforderlich ist, um die Strömungsverteilung zu gewährleisten. Daher sollte von einem Zulauf für Wasser und einem für die Verdüsungsluft auf jeweils drei Zuläufe übergegangen werden, wobei jeder Zulauf eine Ebene mit vier Stoppel versorgt. Für die Conrep - Ausführung sind insgesamt 12 Stoppel erforderlich, welche auf 3 Ebenen (in Abb. B.3 a, b, und c) à 4 Stoppel angeordnet werden.

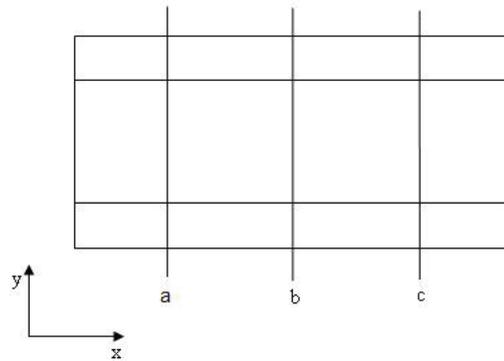


Abbildung B.3: Zulaufanordnung

- Abrundung der Zuläufe

Beim vorliegenden Düsenprototyp wurden aus Gründen der einfachen Bauweise auf Formgebungsmaßnahmen verzichtet. Sollte es zukünftig notwendig sein, den Druckverlust der Düse zu senken, so sollen nachstehend die zur Verfügung stehenden Maßnahmen erläutert werden.

Die in der Düse vorliegenden Bohrungen sind als scharfkantige Rohreinläufe ausgeführt, dies ist eine einfach und billige Variante. Diese Rohreinlaufgeometrie führt jedoch zur Strömungsablösung und zu sehr hohen Druckverlusten, will man diesen Druckverlust senken so ist die Abrundung der Rohreinlaufgeometrie vorzuschlagen, siehe Abb. (B.4).

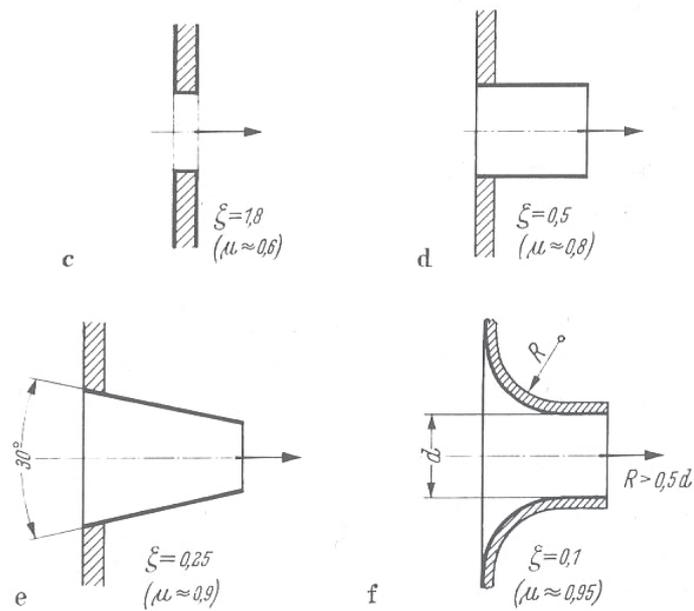


Abbildung B.4: Rohreinlaufgeometrien mit der Druckverlustzahl  $\zeta$  [4]

Verbessert man die Öffnungen hinsichtlich der Abrundung an Zu- und Ablauf, so ist darauf zu achten, dass der Zustromquerschnitt größer sein muß, um eine gleichmäßige Verteilung der Strömung zu garantieren, vgl. hierzu Abschnitt 2.7, andernfalls können sich Rückströme in die Düse entwickeln.

## C. Listing des Programmes zur pneumatischen Spritzmasseförderung

Module1 - 1

```
'1. ++++++Dimensionen ++++++
'Dimensionen werden definiert Anfang
Option Base 1
Option Explicit

Dim zeile, spalte, num As Integer
Dim i, j, y, x, u, qwl, qwe, qw, ri, ii As Integer
Dim wert, xwertk, xwertg, ywertk, ywertg, inpol, lams0, wertl, xwertlk, xwertlg, ywertlk, ywertlg As Double 'Für die Interpolation der Barthzahl
Dim w, vi As Double 'Testwert
Dim rohr(), kruemmer(), v(), anzrohr, anzkruem, durchlauf_rohr, durchlauf_kruemmer, ende As Double 'Durchläufe Rohr, Druchläufe Krümmer
Dim q, s, anz, aus, ausg, aus_x, szeile As Double 'Zählwerte für die Rohrberechnung
Dim v_tr_gew As Double
Dim pi As Double 'Pi
Dim r As Double 'Gaskonstante
Dim g As Double 'Normfallbeschleunigung
Dim m_gu As Double 'Massestrom im Guteinlauf (berechnet)
Dim p_atm As Double 'Atmosphärendruck
Dim p_tr, p_tr_start As Double 'Treibstrahldruck
Dim p_sys, p_ende As Double 'Guteinlaufdruck
Dim m_tr As Double 'Massestrom Treibstrahlseitig
Dim m_s As Double 'Massestrom im Guteinlauf
Dim d_misch As Double 'Rohrdurchmesser der Mischstrecke
Dim t_misch As Double 'Temperatur in der Mischstrecke
Dim rho_tr, rho_tr_start As Double 'Dichte des Treibstrahles & Luftstrom
Dim rho_mm, rho_gu As Double 'Dichte des Aufgabegutes
Dim vol_ts As Double 'Volumenstrom des Treibstrahles
Dim a_duese, a_leitung As Double 'Fläche des Düseaustrittes
Dim v_tr As Double 'Treibstrahlgeschwindigkeit
Dim r_luft As Double 'spezifische Gaskonstante der Luft
Dim Ma As Double 'Machzahl
Dim delta_v As Double 'Nachbeschleunigung im Freistrah
Dim kappa As Double 'Adiabatexponent
Dim mue_tat As Double 'Gutbeladung tatsächlich
'Dim eta1 As Double 'Mischwirkungsgrad ----> werden nicht verwendet!!!!!!!!!!
'Dim eta2 As Double 'Mischwirkungsgrad
Dim eta3 As Double 'Mischwirkungsgrad
Dim vf_gew, v_f_neu, v_d As Double 'Luftgeschwindigkeit im Förderrohr (gewählt), Luftgeschwindigkeit im Rohrabchnitt, Düsegeschwindigkeit
Dim vm_misch As Double 'mittlere Gasgeschwindigkeit in der Mischstrecke
Dim rho_misch, rho_sys As Double 'Dichte in der Mischstrecke und die Systemdichte
Dim p_misch As Double 'Druck in der Mischstrecke
Dim d50 As Double 'mittlerer Korngrössendurchmesser
Dim cw As Double 'Luftwiderstandsbeiwert
Dim f_gl As Double 'Gleitreibungsbeiwert
Dim zeta_u As Double 'Widerstandsbeiwert
Dim mue_gew As Double 'Gutbeladung gewählt
Dim delta_p_hub, h_hub As Double 'Hubterm
Dim mg_luft As Double 'Molare Masse von Luft
Dim konstante_a, konstante_b, konstante_c As Double 'Konstanten der cw-Abhängigkeit
Dim eta_luft As Double 'dynamische Viskosität der Luft
Dim delta_rho_sl 'Mischdichte von Gas-Feststoff
Dim w_sn, w_s, w_sl, k_l, reynoldszahl, w_s0, k_gross, k_klein As Double 'Dient der Berechnung der Schwarmsinkgeschwindigkeit
Dim delta_p_mr, lamda_luft, lamda_s, lamda_s_stern, l_misch, re_d, alpha, beta, f, f_rohr, Froude_zahl, v_Ba_stern, Barth_zahl_stern, gross_c, barth, b, wegzahl As Double 'Dient der Berechnung des Druckverlustes durch Reibung
Dim delta_p_misch, A_misch, delta_c_misch, v_max, v_quer, c_misch, c_misch_start As Double 'Druckverlust in der Mischstrecke
Dim delta_p_real, v_f_real, c_f_real As Double 'Grafikblatt
Dim delta_p_kruemmer, r_kruemmer, epsilon_kruemmer As Double 'Berechnung Krümmer
Dim delta_p_duse As Double 'Druckverlust der Treibdüse
Dim delta_p_rohr, delta_c, cl, delta_p_reibung_rohr, reynoldszahl_rohr As Double 'Berechnung Rohr
Dim m_w, m_luft, d_lanze, l_lanze, d_duse, alpha_lanze, d_tr, wassergehalt, mue_neu, reynolds_lanze, k_kleinl, k_grossl, Froude_lanze, delta_p_reibung_lanze, v_Ba_sternl, gross_cl, rho_tr_lanze, v_f_lanze, c_l, rho_mi, barth_zahl_sternl, delta_p_lanze, p_lanze As Double 'Wassereindüsung
Dim alr As Double 'air to liquid rate
Dim zetaVJ, zetaF As Double
'Dimensionen Ende

'++++++
+++++

'2. Einlesen und zuweisen der Variablen, Löschen der Einträge
'2.1 Allgemeiner Teil
```

Module1 - 2

```
'Schreibschutz, zur Zeit nicht aktiv
Sub Pneum_foerd()
ActiveSheet.Unprotect 'Aktive Blatt ist ungeschützt, ermögliche die Bearbeitung des Programmes
Application.ScreenUpdating = False 'Deaktivierung der Bildschirmaktualisierung
ReDim rohr(10, 5)
ReDim kruegger(10, 5)

'Löschen aller Werte der vorigen Berechnung
Worksheets("Berechnung 1_Teil").Range("f14:f43").Clear
Worksheets("Berechnung 2_Teil").Range("f21:f45").Clear
Worksheets("schwarksinkgeschwindigkeit").Range("f7:f53").Clear
Worksheets("Druckverlust Durch Reibung").Range("f6:f54").Clear
Worksheets("druckaufbau in der mischstrecke").Range("f6:f39").Clear
Worksheets("ergebnis krümmen").Range("d7:d48").Clear
Worksheets("ergebnis rohr").Range("d7:d43").Clear
Worksheets("hilfsblatt").Range("a56:l71").Clear:
Worksheets("hilfsblatt").Range("q55:q71").Clear
'Löschen Ende

'Aus dem Arbeitsblatt Parameter werden die Werte eingelesen, in Parameter sind die Werte direkt ein
zutragen,
'oder es übernimmt die Werte aus dem Handlängen Eingabebrett
Worksheets("Parameter").Activate: f_gl = Cells(8, 4): p_atm = (Cells(28, 4) / 10 ^ 5)
'Anzahl der Rohre und Krümmen auslesen
Worksheets("Parameter").Activate
r_luft = Cells(12, 4)
'Häufigkeit der Durchläufe

'Diese Schleife fordert eine mindest Anzahl von Rohren und Krümmern von 1, ansonsten erfolgt der Au
sstieg!!!!!!
ri = 26
Do While ri < 28
vi = Cells(ri, 4)
If vi < 1 Then MsgBox ("Die Anzahl der Rohre und Krümmen muss >=1 sein. Bitte korrigieren"): Exit S
ub
ri = ri + 1
Loop

anzrohr = Cells(26, 4): anzkruegg = Cells(27, 4)
durchlauf_rohr = anzrohr - 1
durchlauf_kruegger = anzkruegg - 1
a_duese = Cells(11, 4)

pi = 4 * Atn(1) 'Wert von pi berechnet
'eta1 = 0.9: eta2 = 0.83: Wird nicht benützt!!!!
eta3 = 0.7 'eta bei der Beladung 50 --> 4.3 Berechnung des Druckaufbaus in der Mischstrecke (Berec
hnung 2_Teil)
g = 9.81

Worksheets("Eingabe").Activate
m_tr = Cells(39, 4): m_sys = Cells(41, 4): d_misch = Cells(43, 4)
t_misch = Cells(45, 4): rho_gu = Cells(49, 4)

'Kontrolle ob die Werte (p-tr,p-sys,m-tr,m-sys,D-rohr,T(in K),rho-tr,rho-Gut)positiv sind
i = 35
For i = 35 To 49
w = Cells(i, 4)
If w < 0 Then MsgBox "Negativer Eingabewert. Bitte korrigieren " & Chr$(13) & Chr$(13) & "In Zeile:
" & Chr$(13) & Cells(i, 2): Exit Sub
i = i + 2
Next

'2.2 Krümmen und Rohr den Variablen kruegger(,) und rohr(,) zuweisen
'Auslesen der Eingabewerte von den einzelnen Krümmern
zeile = 23
Worksheets("Eingabe Krümmen").Activate
For j = 1 To anzkruegg
For i = 1 To 4
kruegger(j, i) = Cells(zeile, 4)
zeile = zeile + 1
Next
Next
'Ende Auslesen

'Auslesen der Eingabewerte der einzelnen Rohre
zeile = 23
Worksheets("Eingabe Rohr").Activate
```

Module1 - 3

```
For j = 1 To anzrohr 'sind die einzelnen Rohre
  For i = 1 To 5 'einlesen der Werte des einzelnen Rohres; zuordnen jedem Rohr den Durchmesser, Rohrlänge.... aus "Eingabe Rohr"
    rohr(j, i) = Cells(zeile, 4) 'rohr(1,1)=0,05;rohr(1,2)=17,5; rohr(1,3)=0 .... rohr(2,1)=0,05
    zeile = zeile + 1 '
  Next
  zeile = zeile + 1
Next
'Ende Auslesen

Worksheets("Berechnung 2_Teil").Activate
mue_tat = m_s / m_tr: Cells(8, 6) = mue_tat

If mue_tat > 20 Then MsgBox ("Beladung > 20, Stopfergefahr")
```

```
'+++++
+
```

### '3.Berechnung des Treibstrahl Druckes

#### '3.1 Einlesen des p-sys

```
'Start des Programmes mit 4.2.1 Berechnung der Luftgeschwindigkeit
'Der im Lanzeingabeblatt eingetragene Systemdruck ist der Ausgangspunkt für die gesamte Berechnungseinheit
Worksheets("Eingabe").Activate
p_sys = Cells(37, 4) 'Vorgegebener Systemdruck am Beginn
Worksheets("Eingabeblatt").Activate
Cells(55, 4) = p_sys / 10 ^ 5
a_leitung = pi * (Cells(38, 4) / 10 ^ 3) ^ 2 / 4 'Querschnittsfläche
Worksheets("Berechnung 1_Teil").Activate
```

#### '3.2 Startwert für den Treibstrahl Druck

```
'Der tatsächliche p-tr wird angenähert
p_tr_start = p_sys + 50000
rho_tr_start = p_tr_start / (r_luft * t_misch)
Worksheets("Hilfsblatt").Activate
qwl = 1
rho_sys = p_sys / (r_luft * t_misch)
```

#### '3.3 Unterscheidung der drei Bereiche

```
'Unterschall-inkomp. u komp(fall1) sowie Schallgeschwindigkeitsbereich (fall2)
Do
  'If p_sys > p_tr_start Then MsgBox ("Der Systemdruck wurde zu hoch gewählt. Bitte kleineren Wert eingeben!")
  'Exit Do
```

```
If p_sys / p_tr_start > (2 / 2.4) ^ (1.4 / 0.4) Then GoTo fall1 '(Glg 2)
If p_sys / p_tr_start <= (2 / 2.4) ^ (1.4 / 0.4) Then GoTo fall2
```

#### 'Unterschallbereiche

```
fall1:
num = 1
'Call falsi ist das Aufrufen von Public Sub falsi und die Übergabe des p-sys und p-tr
'Die Beschreibung der Berechnung des p-tr befindet sich im Public Sub falsi sowie im Function Funk2 (Ende Programm)
Call falsi(p_sys, p_tr_start)
Worksheets("Hilfsblatt").Activate: p_tr_start = Cells(17, 17)
For ii = 3 To 21
Dim AzuA As Double
```

#### 'Berechnung der Machzahl für Unterschallbereich

```
'Randbedingungen für die Machzahl
If a_leitung / a_duese > 57.87 Then Ma = 0.01 'Querschnittsfläche der Druckluftzuleitung ist sehr viel größer als die Querschnittsfläche der Treibdüse (a_leit = 57,9*a_duese)
If a_leitung / a_duese < 1.01 Then Ma = 0.96 'A Druckluftzuleitung wird kleiner als A Treibstrahldüse
```

```
'Der übliche Fall wird angenähert
```



'4. BERECHNUNG DER MISCHSTRECKE

'Im ersten Durchgang werden sämtliche Werte für eine Beladung von 50 berechnet --> dann 0 --> 2 und --> 4

'Berechnung f Tabelle2(Grafik) Druckaufbau in der Mischstrecke, Sheet4(Berechnung 2\_Teil) die Werte u die Kurve

'Die Werte für die tatsächliche Beladung werden in "frage" berechnet

'Fall 4, Beladung = 50:

zeile = 3

mue\_gew = 50

m\_gu = mue\_gew \* m\_tr

'4.1 Berechnung der Mittleren Gasgeschwindigkeit

'Einlesen der Daten aus AB Parameter

Worksheets("Parameter").Activate

vf\_gew = Cells(14, 4): cw = Cells(15, 4): d50 = Cells(16, 4): k\_1 = Cells(17, 4)

konstante\_a = Cells(19, 4): konstante\_b = Cells(20, 4): konstante\_c = Cells(21, 4): eta\_luft = Cells(22, 4)

alpha = Cells(24, 4): f\_g1 = Cells(10, 4)

Worksheets("Berechnung 2\_Teil").Activate '???? Wie kommt er auf die 25 m/s, wirkt sich auf Luft- Feststoffgeschw. aus

'siehe p-Aufbau-vd-gew.xls

vm\_misch = Sqr(vf\_gew \* v\_d): Cells(21 + zeile, 6) = vm\_misch 'Glg 8 v-d ist die eff Treibstrahlgeschw. u vf-gew Förderleitunggeschw.

'4.2 Berechnung der Feststoffgeschwindigkeit (4.2.2 Sink- und Schwarmsinkgeschw.)

fall123:

'Ausgabe vF

Cells(26 + zeile, 6) = v\_d

'Glg 9 unten; Dichte in der Mischstrecke

rho\_misch = ((4 \* m\_tr) / (pi \* vm\_misch \* d\_misch ^ 2)): Cells(32 + zeile, 6) = rho\_misch

'Druck in der Mischstrecke

p\_misch = rho\_misch \* r\_luft \* t\_misch: Cells(37 + zeile, 6) = p\_misch 'p.V=mR'T --> m/V=p/(R\*T)

Worksheets("Schwarmsinkgeschwindigkeit").Activate

'Mischdichte Glg 14

delta\_rho\_sl = rho\_gu - rho\_misch: Cells(7 + zeile, 6) = delta\_rho\_sl

'Sinkgeschwindigkeit (Glg 15)

'Diese Glg beinhaltet keine Einflüsse der Teilchen untereinander, ist also eine erste Annäherung

w\_sn = Sqr((4 / 3) \* (delta\_rho\_sl \* (g / (rho\_misch \* cw)) \* d50)): Cells(13 + zeile, 6) = w\_sn

'Schwarmsinkgeschwindigkeit (Glg 16)

'k-1 ist der Startwert für k-klein der in den folgenden Durchläufen genauer berechnet wird

w\_s1 = w\_sn \* (1 + (0.25 + k\_1) \* mue\_gew ^ 0.25): Cells(18 + zeile, 6) = w\_s1

w\_s = w\_s1 'w-s ist der Startwert für die folgende Iteration

'über die Reynoldszahl werden k u K berechnet; in jedem Durchlauf wird die Schwarmsinkgeschw. angenäher.

'Glg 16 gilt f reynoldszahl von 50 - 1000

i = 1

Do While i < 100 'Glg 17 unten Glg 18, 19, 20 und 21

reynoldszahl = d50 \* (w\_s \* rho\_tr\_start) / eta\_luft: Cells(25 + zeile, 6) = reynoldszahl:

k\_klein = ((konstante\_a + 0.5 \* konstante\_b \* Sqr(reynoldszahl)) / (konstante\_a + konstante\_b \* Sqr(reynoldszahl) + konstante\_c \* reynoldszahl)): Cells(43 + zeile, 6) = k\_klein 'Glg 18

k\_gross = (konstante\_a / reynoldszahl ^ (1 - k\_klein)) + (konstante\_b / (reynoldszahl ^ (0.5 - k\_klein))) + (konstante\_c \* reynoldszahl ^ k\_klein): Cells(38 + zeile, 6) = k\_gross 'Glg 19

w\_s0 = (((4 / 3) \* (delta\_rho\_sl \* g) \* d50 ^ (1 + k\_klein)) / (k\_gross \* eta\_luft ^ k\_klein \* rho\_misch ^ (1 - k\_klein))) ^ (1 / (2 - k\_klein)): Cells(33 + zeile, 6) = w\_s0 'Glg 20

w\_s = w\_s0 \* (1 + (0.25 + k\_klein) \* mue\_gew ^ 0.25): Cells(50 + zeile, 6) = w\_s

i = i + 1

Loop

Worksheets("Druckaufbau in der Mischstrecke").Activate

'Berechnung von A\_misch

A\_misch = d\_misch ^ 2 \* (pi / 4): Cells(11 + zeile, 6) = A\_misch

'Glg 10 u 11 --> v\_max und v

v\_max = 0.6 \* (v\_tr - vm\_misch) + vm\_misch: Cells(26 + zeile, 6) = v\_max 'Glg 10

v\_quer = Sqr(v\_max \* vm\_misch): Cells(31 + zeile, 6) = v\_quer 'Glg 11

'Die Berechnung der mittleren Geschwindigkeitsänderung Glg 13 und mittleren Feststoffgeschwindigkeit Glg 12 erfolgt unter 4.3



Module1 - 7

```
num = 2 'hier wird num=1 auf num=2 gesetzt
zeile = 0
'????????????????????????????????????????Warum net mit der tatsächlichen Gasgeschwindigkeit????????????????????
????????????????
'Anpassen der Gasgeschwindigkeit in der Förderstrecke auf die Beladungsfälle
'mue = 50 v-tr = 25; mue=0 v-tr = 25*1,65; mue=2 v-tr= 25*1,35 und mue=4 v-tr= 25*1,15
'eta ist der Mischwirkungsgrad der ebenfalls von der Beladung abhängt (siehe Abb. 24)
v_tr = 1.65 * vf_gew
mue_gew = 0: eta3 = 0.9
m_gu = mue_gew * m_tr
vm_misch = Sqr(v_tr * v_d) 'Glg 8 muss für jede Beladung neu berechnet werden, da v-tr sich ändert
Worksheets("Berechnung 2_Teil").Activate: Cells(21 + zeile, 6) = vm_misch
GoTo fall123

'Für Fall 2, Beladung = 2:
nfall2:
num = 3
zeile = 1
mue_gew = 2: eta3 = 0.83
m_gu = mue_gew * m_tr
v_tr = 1.35 * vf_gew
vm_misch = Sqr(v_tr * v_d)
Worksheets("Berechnung 2_Teil").Activate: Cells(21 + zeile, 6) = vm_misch
GoTo fall123

'Für Fall 3, Beladung = 4 :
nfall3:
num = 4
zeile = 2
mue_gew = 4: eta3 = 0.73
m_gu = mue_gew * m_tr
v_tr = 1.15 * vf_gew
vm_misch = Sqr(v_tr * v_d)
Worksheets("Berechnung 2_Teil").Activate: Cells(21 + zeile, 6) = vm_misch
GoTo fall123

'-----
-
'Ende Injektor
'-----
-

'5. ++++++BERECHNUNG DER LEITUNG+++++

'5.1. ++++++Rohrabschnitt+++++
'Werte am Ende der Mischstrecke = Werte am Beginn der Rohre
frage:
aus = 7: 'Zeile für Ausgabe der Rohrergebnisse
ausg = 56: aus_x = 56: x = 25: u = 23: y = 24 'Festlegen der Laufvariablen

'Für 1.Rohr
Worksheets("Grafik").Activate
'Die Berechnung von delta_p_real erfolgt im Arbeitsblatt (AB) Grafik. Der Druckverlust bei verschie-
denen Beladungen
'werden aus dem AB Berechnung 2_Teil eingelesen und als Diagramm dargestellt. Die Berechnung der ta-
tsächlichen Beladung
'erfolgt über die Regressionsgerade (Steigung und Achsenabschnitt).
'c_f_real wird in der selben Weise berechnet

'Feststoffgeschw. und Druck nach der Mischstrecke aus der Interpolation der verschiedenen Beladunge-
n
delta_p_real = Cells(9, 7): c_f_real = Cells(123, 7)

'Beginn Berechnung Rohr:
szeile = 7

'Für 10 Rohre gilt:
'Anz ist Variable für die Rohrschleife
'Berechnet immer Rohr -->Krümmer -->Rohr
'Im folgenden Absatz erfolgt die Berechnung am Beginn der Leitungsstrecke

'Eintragen der Anfangsdaten für die Grafik im Hilfsblatt
Worksheets("Hilfsblatt").Activate
Cells(55, 2) = (p_sys + delta_p_real) / 10 ^ 5 'Druck am Anfang der Leitungsstrecke aus p-sys u dem
```

Module1 - 8

```
delta p_misch
rho_tr = Cells(55, 2) * 10 ^ 5 / (r_luft * t_misch) 'Aus dem aktuellen Druck wird die Dichte berech
net
v_f_real = 4 * m_tr / (rohr(1, 1) ^ 2 * pi * rho_tr) 'über A*v=m/rho erfolgt die Berechnung der Ges
chwindigkeit (rohr(1,1) = D)
Cells(55, 3) = rho_tr

'Cells(55, 1) = 0 'Beginn der Leitungsstrecke habe ich an das Ende der Mischstrecke gesetzt,
'damit das Druck-Abfalldiagramm bei Treibstrahl beginnt!!!!

Cells(55, 4) = v_f_real 'Gasgeschwindigkeit
Cells(55, 5) = v_f_real * gross_c 'Glg 36 berechnung der Feststoffgeschwindigkeit Warum ???????????
????????????????

v_f_neu = v_f_real

'Prüfung ob es mehr Rohr oder Krümmer gibt und demnach werden die Variablen qwe und qw auf die größt
e Zahl gesetzt.
If anzrohr >= anzkruem Then qwe = anzrohr
If anzrohr < anzkruem Then qwe = anzkruem
,
'If durchlauf_rohr > durchlauf_kruemmer Then qw = durchlauf_rohr 'unter 2. zugeordnet --> qw wird
nicht verwendet
'If durchlauf_rohr < durchlauf_kruemmer Then qw = durchlauf_kruemmer --> hat kein
e Funktion!!!!

For anz = 1 To qwe 'anz wird automatisch um 1 erhöht
'Rechnet alle Rohre im letzten Durchlauf springt es in die Krümmerschleifen
If anz > anzrohr And qwe = anzkruem Then GoTo kruemmer
'Sind mehr Krümmer als Rohr vorhanden, übertritt vom Rohr zum Krümmer
'Es werden beliebig viele Krümmer ausgewertet

'ReD und LambdaLuft aus 4.2.3 Druckaufbau
Weiterer_Rohrdurchlauf:
Worksheets("Berechnung Rohr").Activate
reynoldszahl_rohr = (v_f_neu * rohr(anz, 1) * rho_tr) / eta_luft 'Glg 24
lamda_luft = 0.006 + (0.55 / (reynoldszahl_rohr ^ (1 / 3))) 'Glg 25

Worksheets("Hilfsblatt").Activate
Froude_zahl = (v_f_neu * Cells(ausg - 1, 4)) / (g * rohr(anz, 1)) 'Glg 28
v_Ba_stern = 1.05 * v_f_neu * (d50 / rohr(anz, 1)) ^ (1 / 7) 'Glg 31
reynoldszahl = reynoldszahl_rohr
delta_rho_sl = rho_gu - rho_tr 'Mischdichte Glg 14

'annähern der Reynoldszahl
i = 1
Do While i < 100 'in den nächsten Zeilen Glg 18, Glg19, Glg 20 und Glg 21
k_klein = ((konstante_a + 0.5 * konstante_b * Sqr(reynoldszahl)) / (konstante_a + konstante_b * Sq
r(reynoldszahl) + konstante_c * reynoldszahl))
k_gross = (konstante_a / reynoldszahl ^ (1 - k_klein)) + (konstante_b / (reynoldszahl ^ (0.5 - k_k
lein))) + (konstante_c * reynoldszahl ^ k_klein)
w_s0 = (((4 / 3) * (delta_rho_sl * g) * d50 ^ (1 + k_klein)) / (k_gross * eta_luft ^ k_klein * rho
_tr ^ (1 - k_klein))) ^ (1 / (2 - k_klein))
w_s = w_s0 * (1 + (0.25 + k_klein) * mue_tat ^ 0.25)
reynoldszahl = d50 * (w_s * rho_tr) / eta_luft 'Glg 24
i = i + 1
Loop

'Barth_zahl_stern-Zahl neu und Interpolation Glg 32
'rohr(anz,1) wird im unter 2. Einlesen zugewiesen; v-f-real = v-f-neu
Barth_zahl_stern = ((v_f_real ^ k_klein * (w_s) ^ (2 - k_klein)) / (rohr(anz, 1) * g * (1 - (v_Ba_s
tern / v_f_neu)) ^ (2 - k_klein)))

'E-Modul für Stahlrohr
'prüfen ob Ergebnis im Randbereich ist, oder ob es dazwischen liegt
'wenn es dazwischen liegt wird der Wert in ssschleif berechnet
'hier erfolgt die ermittlung der Stoßzahl aus der Barth-Zahl
If rohr(anz, 5) = 200000 Then
For i = 2 To 6
If Barth_zahl_stern < 0.1 Then inpol = 9: GoTo ohne '(Abb. 25) Abhängigkeit Stoßreibungsbe
iwert von Barthzahl
If Barth_zahl_stern < Cells(i, 1) Then GoTo ssschleif
If Barth_zahl_stern > 1000 Then inpol = 2: GoTo ohne
Next
ssschleif:
xwertk = Cells(i - 1, 1): xwertg = Cells(i, 1) 'Interpolation aus Abb. 25
ywertk = Cells(i - 1, 2): ywertg = Cells(i, 2)
```

Module1 - 9

```
Else
'Gummi E-Modul abgeschätzt

  For i = 2 To 6
    If Barth_zahl_stern < 0.1 Then inpol = 12: GoTo oohne
    If Barth_zahl_stern < Cells(i, 1) Then GoTo sschleife
    If Barth_zahl_stern > 1000 Then inpol = 60: GoTo oohne
  Next
sschleife:
  xwertk = Cells(i - 1, 1): xwertg = Cells(i, 1)
  ywertk = Cells(i - 1, 3): ywertg = Cells(i, 3)
End If
wert = (ywertk - ywertg) / (xwertg - xwertk) 'Steigung
inpol = wert * (xwertg - Barth_zahl_stern) + (ywertg) 'lambda so * Interpolation mit konst Steigung

oohne:
'Lambda s* & Lambda s
lams0 = inpol / (10 ^ 3) 'Zuordnen der Interpolation dem Wert lamda-s0-stern
lamda_s_stern = lams0 / (1 + mue_tat) ^ 0.25 'Glg 29
'For i = 1 To 10

alpha = rohr(anz, 3): f_rohr = rohr(anz, 4) 'Rohrneigungswinkel und Gleitreibungsbeiwert
'Berechnung des Geschwindigkeitsverhältnisses
beta = Sin(alpha * pi / 180) + f_rohr * Cos(alpha * pi / 180) 'Glg 27
b = (w_s / v_f_neu) ^ (2 - k_klein) 'Glg 34
barth = (v_f_neu ^ k_klein * w_s ^ (2 - k_klein)) / (rohr(anz, 1) * g) ' Glg 35
wegzahl = g * rohr(anz, 2) / (v_f_neu ^ k_klein * w_s ^ (2 - k_klein)) 'Glg 37

Worksheets("Eingabeblatt").Activate
d_lanze = Cells(10, 24) * 10 ^ -3

'Kutta Lösung für (33)
'Beschleunigung des Feststoffes
Worksheets("Hilfsblatt").Activate
Call Runge_Kutta(0, Cells(ausg, 8), Cells(ausg - 1, 5) / Cells(ausg - 1, 4))
gross_c = Cells(ausg, 17)
lamda_s = ((2 * beta) / (gross_c * Froude_zahl)) + gross_c * lamda_s_stern '26 unten Glg 39

'Zeta - Wert für die Verjüngung
zetaVJ = 0

If rohr(1, 1) = 0.042 And d_lanze = 0.04 Then
zetaF = (mue_tat - 2.5792) / 0.2331
zetaVJ = zetaF * 0.5 * (1 + (rohr(1, 1) ^ 2 / d_lanze ^ 2))
End If

If rohr(1, 1) = 0.048 And d_lanze = 0.04 Then
zetaF = (mue_tat - 2.8848) / 0.1108
zetaVJ = zetaF * 0.5 * (1 + (rohr(1, 1) ^ 2 / d_lanze ^ 2))
End If

delta_p_reibung_rohr = -(lamda_luft * (rohr(anz, 2) / rohr(anz, 1)) + zetaVJ + lamda_s * mue_tat *
(rohr(anz, 2) / rohr(anz, 1))) * (rho_tr / 2) * (v_f_neu) ^ 2
'Aus Abb. 23
If anz = 1 Then c1 = c_f_real 'Im ersten Durchgang wird die Feststoffgeschwindigkeit von Mischstrec
kenende genommen
delta_c = c_f_real - c1

'Nach Krümmern kommt es im folgenden Rohrabschnitt zur Beschleunigung des Feststoffes, dies führt z
um Druckverlust Glg42
delta_p_rohr = -mue_tat * rho_tr * v_f_neu * delta_c + delta_p_reibung_rohr 'Gesamter Druckverlust
Glg 44 mit Glg 42 ohne Hubarbeit

'Hub-Term berechnen, dann wird der gesamte Druckverlust berechnet
If alpha <> 0 Then h_hub = rohr(anz, 2) Else h_hub = 0
'Glg 41 Gibt es eine Höhe zu überwinden bzw. ein gefälle so kommen die nächsten Zeilen zum Einsatz
'alpha < 0 --> neg. Vorzeichen Gefälle; alpha > 0 --> pos. Vorzeichen Steigung
'Glg 44 mig Glg 42 und Glg 41
If alpha < 0 Then delta_p_rohr = -mue_tat * rho_tr * v_f_neu * delta_c + delta_p_reibung_rohr + mue
_tat * rho_tr * (v_f_neu / c_f_real) * h_hub * g * Sin(alpha)
If alpha > 0 Then delta_p_rohr = -mue_tat * rho_tr * v_f_neu * delta_c + delta_p_reibung_rohr - mue
_tat * rho_tr * (v_f_neu / c_f_real) * h_hub * g * Sin(alpha)
'Druckverlust ENDE
```

```
'Eintragen der Werte im Hilfsblatt
Worksheets("Hilfsblatt").Activate

'Glg 45 Neue Dichte wegen Druckverlustes (delta-p-rohr=oben berechnet, Druck am Ende des letzten Ab
schnittes)
rho_tr = (delta_p_rohr * 10 ^ (-5) + Cells(ausg - 1, 2)) * 10 ^ 5 / (r_luft * t_misch)
v_f_neu = 4 * m_tr / (rohr(anz, 1) ^ 2 * pi * rho_tr) 'Glg 46 Geschwindigkeit ändert sich mit der D
ichte
'Glg 36 Berechnung der Feststoffgeschwindigkeit über das C welches im Kutta berechnet wurde
c_f_real = gross_c * v_f_neu
'Ausgabe der Parameter für Ce Berechnung (solver!) & numerische Integration
Cells(ausg, 6) = b
Cells(ausg, 7) = barth
Cells(ausg, 8) = wegzahl
Cells(ausg, 9) = gross_c
Cells(ausg, 10) = k_klein
Cells(ausg, 11) = beta
Cells(ausg, 12) = lamda_s_stern
Cells(ausg, 4) = v_f_neu
Cells(ausg, 5) = c_f_real

Worksheets("Ergebnis Rohr").Activate: Cells(aus, 4) = delta_p_rohr
Worksheets("Eingabe Rohr").Activate: q = Cells(y, 4)
Worksheets("Hilfsblatt").Activate: Cells(aus_x, 1) = q * 1000 + Cells(aus_x - 1, 1)
y = y + 6: aus_x = aus_x + 1
Cells(ausg, 3) = rho_tr
Cells(ausg, 2) = delta_p_rohr * 10 ^ (-5) + Cells(ausg - 1, 2) 'Berechnung des neuen Druckes

ausg = ausg + 1 'Erhöhen der Zeilennr. für den nächsten Durchgang

Worksheets("Ergebnis Rohr").Activate
aus = aus + 4

If anz >= anzkruem And anz < qwe Then 'Wenn mehr Rohre als Krümmer da sind, werden hiermit alle Ro
hr berechnet!

c1 = c_f_real
anz = anz + 1
GoTo Weiterer_Rohrdurchlauf
'Ende Rohrteil

'Krümmer Beginn
Else: GoTo kruemmer

If anzkruem = 0 Then GoTo Weiterer_Rohrdurchlauf

End If

'5.2.  ++++++Krümmerabschnitt+++++
+++++
kruemmer:
c1 = c_f_real * Exp(-kruemmer(anz, 4) * kruemmer(anz, 1)) 'Glg 48 Feststoffgeschwindigkeit nach dem
Krümmer

'????????????????????????????????????????????????????????????Bereiche für Winkel und zeta vorgeben????????????????????
If kruemmer(anz, 1) = pi / 2 Then zeta_u = 0.1 'Finden des passenden Zetawertes anhand des Umlenkun
gswinkel
If kruemmer(anz, 1) = 2 * pi / 3 Then zeta_u = 0.12 '90°=0,1;120°=0,12 und 360°=0,15
If kruemmer(anz, 1) = pi Then zeta_u = 0.15 'wird ein Wert dazwischen eingegeben --> zeta=0, sind a
lle p-verluste

Worksheets("Hilfsblatt").Activate 'der Krümmer = 0
delta_p_kruemmer = -zeta_u * ((rho_tr * v_f_neu ^ 2) / 2) 'Glg 47 Druckverlust
rho_tr = (delta_p_kruemmer * 10 ^ -5 + Cells(ausg - 1, 2)) * 10 ^ 5 / (r_luft * t_misch) 'aktueller
Druck wird berechnet

'Krümmungsradius, Umlenkwinkel ?????????????????????????????????????????????????????????????r-krümmer fix als 10 * D vorgebe
n????????????????????????????????
Worksheets("Eingabe Krümmer").Activate: r_kruemmer = kruemmer(anz, 3): epsilon_kruemmer = kruemmer(
anz, 1)
s = r_kruemmer * 1000 * epsilon_kruemmer 'Länge des Bogens in mm, für die Strecke!

Worksheets("Ergebnis Krümmer").Activate
Cells(szeile, 4) = c1
Cells(szeile + 1, 4) = delta_p_kruemmer
szeile = szeile + 4
```

```
'Eintragen der Ergebnisse der Krümmereberechnung im Hilfsblatt
Worksheets("Hilfsblatt").Activate 'Werte für das Diagramm
Cells(aus_x, 1) = Cells(aus_x - 1, 1) + s 'Länge des Bogens wird zur Gesamtförderstrecke dazugerech
net
aus_x = aus_x + 1
Cells(ausg, 2) = Cells(ausg - 1, 2) + delta_p_kruemmer * 10 ^ (-5) 'Abzug des Druckverlustes im Krü
mmer --> Aktueller Druck
Cells(ausg, 3) = rho_tr
Cells(ausg, 4) = v_f_neu 'Die Gasgeschwindigkeit wird vom Rohrende übernommen
Cells(ausg, 5) = c1
ausg = ausg + 1
```

Next 'nächstes Rohr berechnen falls nicht vorhanden nächster Krümmer

'Übergabe des c-Wertes, weil dieser im nächsten Rohr für die berechnung des Druckverlustes durch di
e Beschleunigung benötigt wird.

finale:

```
Worksheets("hilfsblatt").Activate 'Warum ist hilfsblatt klein geschrieben
c1 = Cells(ausg - 2, 5) * Exp(-kruemmer(anzkruem, 4) * kruemmer(anzkruem, 1)) 'Glg 48
delta_p_kruemmer = -zeta_u * ((rho_tr * v_f_neu ^ 2) / 2) 'Glg 47 Druckverlust im Krümmer
Cells(ausg - 1, 5) = c1
```

```
Worksheets("ergebnis krümmer").Activate
Cells(szeile - 4, 4) = c1
Cells(48, 4) = c1
```

'6.++++++Lanzenteil++++++

'6.1++++++Wassereinspritzung++++++

'Der Prozentsatz an Wasser wird auf den Fördermassenstrom gerechnet. Die Beladung an Austritt wird
neu berechnet.

'Bei den Versuchsaufbauten erfolgte die V-Strom bestimmung mittels Rotameter welcher auf 5 bar kali
briert ist,

'daher ist ein Umrechnungsfaktor  $F = \sqrt{2/5} = 0,632$  nötig.

Worksheets("hilfsblatt").Activate 'Startwerte sind die Ausgangswerte des letzten Rohres bzw Krümmer
s

```
p_lanze = Cells(ausg - 1, 2)
rho_tr_lanze = Cells(ausg - 1, 3)
v_f_lanze = Cells(ausg - 1, 4)
Worksheets("Eingabeblatt").Activate
wassergehalt = Cells(6, 24) / 100
m_w = m_s * wassergehalt * 60: Cells(5, 24) = m_w 'Neue Beladung mit Wasser
'Faktor des Rotameters  $\sqrt{P.gemessen/P.kalibriert}$ =Faktor  $\sqrt{2/5}=0,632$ 
m_luft = Cells(7, 24) * 0.632: Cells(8, 24) = m_luft 'eingetragener Volumenstrom Volumenstrom tatsä
chlich
m_luft = Cells(8, 24) * 1.273 'Volumensstrom in (Nm3) * rho in Massenstrom Luft
```

```
alr = m_luft / (m_w * 60): Cells(9, 24) = alr
m_w = m_w / 60 'auf h umrechnen für mue-neu
m_luft = m_luft / 3600 'auf h umrechnen für mue-neu
```

'?????????????????????Woher kommt  $1,3^{0,5}$  warum nicht  $\sqrt{(m-tr+m-luft)/m-luft}$ wie in 4.4 beschrieb
en

'War eine erste Annäherung, welche realistische Ergebnisse liefert

```
d_lanze = Cells(10, 24) * 1.3 ^ 0.5 / 1000
l_lanze = Cells(11, 24) / 1000
alpha_lanze = Cells(12, 24) 'Winkel
f = Cells(13, 24) 'Gleitreibungsbeiwert
mue_neu = (m_s + m_w) / (m_luft + m_tr): Cells(15, 24) = mue_neu
```

'6.2 +++++Lanzenrohrberechnung++++++

```
' Der folgende Block ist gleich wie bereits im Rohrabchnitt
'Druckverlust im Endrohr
reynolds_lanze = (v_f_neu * d_lanze * rho_tr_lanze) / eta_luft 'Glg 24
lamda_luft = 0.006 + (0.55 / (reynolds_lanze ^ (1 / 3))) 'Glg 25
```

```
Worksheets("Hilfsblatt").Activate
Froude_lanze = (v_f_lanze * Cells(ausg - 2, 4)) / (g * d_lanze) 'Glg 28
v_Ba_stern = 1.05 * v_f_lanze * (d50 / d_lanze) ^ (1 / 7) 'Glg 31
reynoldszahl = reynolds_lanze
```

'Mischdichte des Feststoffes und des Wassers: Anteil Feststoff/Dichte Feststoff + Anteil Wasser /Di

```

chte Wasser und davon der Kehrwert
rho_mi = 1 / ((1 - wassergehalt) / rho_gu + wassergehalt / 1000) 'Dichte der Mischung Luft-Wasser-F
eststoff
delta_rho_sl = rho_mi - rho_tr_lanze 'Dichtedifferenz

'Reynolds
i = 1
Do While i < 100
  k_kleinl = ((konstante_a + 0.5 * konstante_b * Sqr(reynoldszahl)) / (konstante_a + konstante_b * S
qr(reynoldszahl) + konstante_c * reynoldszahl))
  k_grossl = (konstante_a / reynoldszahl ^ (1 - k_kleinl)) + (konstante_b / (reynoldszahl ^ (0.5 - k
_kleinl))) + (konstante_c * reynoldszahl ^ k_kleinl)
  w_s0 = (((4 / 3) * (delta_rho_sl * g) * (d50 ^ (1 + k_kleinl))) / (k_grossl * (eta_luft ^ k_kleinl
) * (rho_tr_lanze ^ (1 - k_kleinl)))) ^ (1 / (2 - k_kleinl))
  w_s = w_s0 * (1 + (0.25 + k_kleinl) * mue_neu ^ 0.25)
  reynoldszahl = d50 * (w_s * rho_tr_lanze) / eta_luft
  i = i + 1
Loop
'Barth_zahl_stern-Zahl neu und Interpolation unten Glg 32
barth_zahl_sternl = ((v_f_lanze ^ k_kleinl * (w_s) ^ (2 - k_kleinl)) / (d_lanze * g * (1 - (v_Ba_st
ernl / v_f_lanze)) ^ (2 - k_kleinl)))
For i = 2 To 6
  If barth_zahl_sternl < 0.1 Then inpol = 9: GoTo oohe
  If barth_zahl_sternl < Cells(i, 1) Then GoTo sscheif
  If barth_zahl_sternl > 1000 Then inpol = 2: GoTo oohe
Next
sscheif:
xwertk = Cells(i - 1, 1): xwertg = Cells(i, 1)
ywertk = Cells(i - 1, 2): ywertg = Cells(i, 2)
wert = (ywertk - ywertg) / (xwertg - xwertk)
inpol = wert * (xwertg - barth_zahl_sternl) + (ywertg)

oohe:
'Lambda s* & Lambda s
lams0 = inpol / (10 ^ 3)
lamda_s_stern = lams0 / (1 + mue_neu) ^ 0.25 'Glg 29
beta = Sin(alpha_lanze * pi / 180) + f * Cos(alpha_lanze * pi / 180) 'Glg 27 Berechnung des Geschwi
ndigkeitsverhältnisses
b = (w_s / v_f_lanze) ^ (2 - k_kleinl) 'Glg 34
barth = (v_f_lanze ^ k_kleinl * w_s ^ (2 - k_kleinl)) / (d_lanze * g) 'Glg 35
wegzahl = g * l_lanze / (v_f_lanze ^ k_kleinl * w_s ^ (2 - k_kleinl)) 'Glg 37

Worksheets("Hilfsblatt").Activate
Call Runge_Kutta(0, Cells(ausg, 8), c1 / v_f_neu)
gross_cl = Cells(ausg, 17)
lamda_s = ((2 * beta) / (gross_cl * Froude_lanze)) + gross_cl * lamda_s_stern 'Glg 26
delta_p_reibung_lanze = -(lamda_luft + lamda_s * mue_neu) * (l_lanze / d_lanze) * (rho_tr_lanze / 2
) * (v_f_lanze) ^ 2 'Glg 23
c_l = gross_cl * v_f_lanze 'Glg 36, C aus Kutta für die aktuelle Feststoffgeschwindigkeit
delta_c = c_l - c1 'Glg 43 Beschleunigung nach dem Krümmer

'Glg 44 mit Glg 42 p-Verlust durch Beschleunigung nach dem Krümmer ohne Hub
delta_p_lanze = -mue_neu * rho_tr_lanze * v_f_lanze * delta_c + delta_p_reibung_lanze

'Hub-Term berechnen
If alpha < 0 Then delta_p_lanze = -mue_neu * rho_tr_lanze * v_f_lanze * delta_c + delta_p_reibung_r
ohr + mue_neu * rho_tr_lanze * (v_f_lanze / c_f_real) * h_hub * g * Sin(alpha_lanze)
If alpha > 0 Then delta_p_lanze = -mue_neu * rho_tr_lanze * v_f_lanze * delta_c + delta_p_reibung_r
ohr - mue_neu * rho_tr_lanze * (v_f_lanze / c_f_real) * h_hub * g * Sin(alpha_lanze)

Worksheets("Hilfsblatt").Activate
rho_tr_lanze = (delta_p_lanze * 10 ^ (-5) + Cells(ausg - 1, 2)) * 10 ^ 5 / (r_luft * t_misch)
v_f_lanze = 4 * (m_tr + m_luft) / (d_lanze ^ 2 * pi * rho_tr_lanze)
c_l = gross_cl * v_f_lanze
'Ausgabe der Parameter für Ce Berechnung (solver!) & numerische Integration
Cells(ausg, 6) = b
Cells(ausg, 7) = barth
Cells(ausg, 8) = wegzahl
Cells(ausg, 9) = gross_cl
Cells(ausg, 10) = k_kleinl
Cells(ausg, 11) = beta
Cells(ausg, 12) = lamda_s_stern
Cells(ausg, 4) = v_f_lanze
Cells(ausg, 5) = c_l

'Einlesen der Daten der Lanze in Hilfsb.
Worksheets("Hilfsblatt").Activate: Cells(aus_x, 1) = l_lanze * 1000 + Cells(aus_x - 1, 1) 'Berechnu

```

ng der Streckenlänge

```
Cells(ausg, 3) = rho_tr_lanze
Cells(ausg, 2) = delta_p_lanze * 10 ^ (-5) + Cells(ausg - 1, 2) 'aktueller Druck
p_lanze = Cells(ausg, 2)
```

```
'6.3. ++++++Systemdruck annäherung+++++
'Systemdruck neu Berechnung
'Anpassung des Systemdrucks über den Druck am Ende der Lanze, hier muß der Umgebungsdruck (Freistrahl) herrschen,
'der p-sys wird solange gesenkt -60 000, bis der Druck am Ende der Lanze (p-lanze) kleiner ist als der Atmosphärendruck,
'für eine Korrekte Berechnung bedeutet das:
' 1) der Startwert immer um min. 60000 Pa über dem tatsächlichen Wert sein muss,
' 2) hat der Startwert p-sys einen Mindestabstand zum Endwert von(ca. 1,4 bar) --> so ist das Ergebnis am genauesten
' 3) Kontrolle des Ergebnis p-sys: Druck am Ende der Anlage sollte 1,01 betragen. Ist der Wert viel niedriger, so
' war der Startwert von p-sys sehr nahe beim tatsächlichen p-sys und die Berechnung sollte wiederholt werden.
```

```
p_sys = p_sys - 60000 / qwl ^ (1.25)
rho_sys = p_sys / (r_luft * t_misch)
p_tr_start = p_sys + delta_p_duse
rho_tr_start = p_tr_start / (r_luft * t_misch)
```

```
'Eintragen der Werte ins Handlanzen Eingabeblatt
Worksheets("Eingabeblatt").Activate
Cells(57, 4) = p_sys / 10 ^ 5
Cells(21, 4) = p_tr_start / 10 ^ 5 'der aktuelle Treibstrahldruck
Cells(31, 4) = (delta_p_real + p_sys) / 10 ^ 5 'Druck am Ende der Mischstrecke = Systemdruck - Druckverlust in der Mischstrecke (Glg 22)
Cells(16, 24) = delta_p_lanze / 10 ^ 5
Cells(41, 4) = v_d
Cells(42, 4) = delta_p_duse / 10 ^ 5 'Druckverlust an der Lanze
Cells(62, 4) = p_lanze 'Absolutdruck am Ende der Anlage
Cells(63, 4) = v_f_lanze
Cells(64, 4) = c_l
qwl = qwl + 1
If qwl >= 30 Then 'Abbrechen der Berechnung nach 30 Durchläufen oder bei unterschreiten
    MsgBox ("Der Systemdruck wurde zu hoch gewählt. Bitte kleineren Wert eingeben!")
    Exit Do
End If
ende = 0
Loop While p_lanze > p_atm 'Endbedingung der Druck am Ende der Anlage < als Umgebungsdruck
Worksheets("Eingabeblatt").Activate
If Cells(62, 4) < 0.7 * Cells(56, 4) Then MsgBox ("Der Systemdruck wurde zu niedrig gewählt. Bitte größeren Wert eingeben!")
p_sys = p_sys + 60000 / qwl ^ (1.25) 'Der Systemdruck wird angehoben

p_tr_start = p_sys + delta_p_duse 'Der Treibstrahldüsenstartdruck wird angehoben um zu verhindern dass er unter den Systemdruck fällt

If v_d = Sqr(1.4 * r_luft * t_misch) Then MsgBox ("Schallgeschwindigkeit im Treibdüsenaustritt erreicht! Flugförderung evtl. auch bei geringerem Förderdruck möglich oder größere Treibdüse einbauen")
'Schreibschutz
'ActiveSheet.Protect contents:=True, Scenarios:=True, DrawingObjects:=True
End Sub
```

```
Function Funk(xn, yn) As Double
Worksheets("hilfsblatt").Activate
Funk = Sgn(1 - yn) * (Abs(1 - yn)) ^ (2 - Cells(ausg, 10)) / yn - Cells(ausg, 11) * Cells(ausg, 6) / yn - yn * Cells(ausg, 7) * Cells(ausg, 12) / 2
End Function
```

```
'Berechnung von Glg 3 für Public Sub falsi
'Startwert für den p_tr ist der eingegebene p_sys + 50 000
'Der Systemdruck wird hier als fix vorgegeben und nicht korrigiert, die Anpassung des Systemdrucks erfolgt in Sub Pneum_foerd() am Ende
'Zurückgegeben wird die Abweichung von Null als y=, die in den folgenden Schritten immer weiter reduziert wird.
```

```
Function Funk2(xp, yp) As Double 'unten Glg 3 auf 0=a-duese... ...-M umgeformt
Funk2 = a_duese * (p_sys / xp) ^ (1 / 1.4) * (2.8 * xp ^ 2 / (0.4 * r_luft * t_misch)) * (1 - (p_sys
```

Module1 - 14

```
/ xp) ^ (0.4 / 1.4))) ^ 0.5 - m_tr
```

```
End Function
```

```
'Bewegungsgleichung
```

```
'Berechnung Glg 33 yn ist die Geschwindigkeit der Luft
```

```
Public Sub Runge_Kutta(xvon As Double, xbis As Double, yvon As Double) 'Berechnung Kutta
```

```
Dim a, b, c, d, dx, xn, yn As Double
```

```
'Startwerte
```

```
xn = xvon
```

```
yn = yvon
```

```
dx = 0.005
```

```
Do
```

```
a = Funk(xn, yn)
```

```
b = Funk(xn + dx / 2, yn + dx * a / 2)
```

```
c = Funk(xn + dx / 2, yn + dx * b / 2)
```

```
d = Funk(xn + dx, yn + dx * c)
```

```
'neue Werte am Intervallende
```

```
yn = yn + dx * (a + 2 * b + 2 * c + d) / 6
```

```
xn = xn + dx
```

```
Loop Until xn >= xbis 'Grenze des auszuwertenden Bereiches erreicht
```

```
Worksheets("Hilfsblatt").Activate: Cells(ausg, 17) = yn
```

```
End Sub
```

```
'Regula Falsi
```

```
'Dies ist eine Sekantenmethode zur Feststellung einer einfachen Nullstelle
```

```
'Berechnung des Treibstrahldurckes, Startwert ist der Systemdruck aus der Eingabe
```

```
Public Sub falsi(ByVal x1 As Double, ByVal x2 As Double)
```

```
Const Max_Iterationen = 100
```

```
Const Genauigkeit = 0.01
```

```
Dim xk, y1, y2, yk, xp, yp As Double
```

```
Dim Fehler As Double
```

```
Dim k As Long
```

```
xp = x1
```

```
y1 = Funk2(x1, yp)
```

```
'Übergabe der p_tr und p_sys, beim ersten Durchlauf aus Eingabe und Schätzung
```

```
'Nächste Durchläufe p_sys und berechneter p_treib
```

```
'p_sys wird erst am Programmende neu berechnet
```

```
xp = x2
```

```
y2 = Funk2(x2, yp)
```

```
k = 0
```

```
Do
```

```
    k = k + 1
```

```
    xk = (y2 * x1 - y1 * x2) / (y2 - y1)
```

```
'Iterationsvorschrift damit wird der neue Wert (p_tr) ausgerechnet und in der nächsten Durchläufen immer weiter verbessert
```

```
    yk = Funk2(xk, yp)
```

```
    Fehler = Abs(xk - x2)
```

```
'Die Abweichung wird errechnet und mit der Vorgabe verglichen.
```

```
    x1 = x2
```

```
    x2 = xk
```

```
    y1 = y2
```

```
    y2 = yk
```

```
Loop Until k = Max_Iterationen Or Fehler < Genauigkeit
```

```
Worksheets("Hilfsblatt").Activate: Cells(17, 17) = xk
```

```
End Sub
```