

Simon ALKIN, BSc

Optimierung der Schlackenverrundung beim Spinning Disc Verfahren

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Verfahrenstechnik

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Beurteiler:
Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Christoph Hochenauer
Institut für Wärmetechnik

Graz, Oktober 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum

Unterschrift

AFFIDAVIT

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

Date

Signature

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Verrundungsprozess von Schlacke mit Hilfe von Trommelwerkzeugen untersucht. Der bestehende Produktionsprozess wird charakterisiert, dabei wird die Temperaturverteilung am Werkzeug, rund um das Werkzeug und des Schlackenstrahls aufgenommen. Die Einflussparameter Durchsatz, Drehzahl, Trommelheizleistung und Werkzeuggeometrie (Trommeldurchmesser, Lochanzahl und -durchmesser) auf die Partikelgrößenverteilung und -qualität werden spezifiziert. Mit Hilfe der dimensionslosen Kennzahlen Weber-, Reynolds- und Ohnesorgezahl wird die Produktionsanlage auf eine Kleinanlage übertragen. Diese wird mit einem Glycerin-Wasser-Gemisch betrieben. Es werden neue Stahltrommelgeometrien entwickelt und analysiert. Die Ergebnisse aus den Kaltversuchen werden auf die Produktionsanlage übertragen. Die Werkzeuggeometrie für die Produktionsanlage wird optimiert und dabei gute Ergebnisse in der Ausbeute an Zielpartikelgröße und Qualität erreicht. Aus der Prozessdatenerfassung wird ein Modell zur Abschätzung der Partikelgröße erstellt. Dieses wird über Produktionsversuche validiert und optimiert. Das Modell wird zusammen mit den Erkenntnissen aus den Technikums- und Produktionsversuchen für eine Trommelauslegung verwendet. Damit kann für eine gewünschte Partikelgröße die erforderliche Werkzeuggeometrie und die erforderlichen Produktionsparameter abgeschätzt werden.

Abstract

In this thesis the production of slag particles with rotating drums is analysed. The production process is characterized. The temperature distribution on and around the drum is measured. The parameters influencing the atomization process, like the flow rate, rotation speed and drum geometry (drum diameter, number and diameter of holes) are observed. The dimensionless numbers Weber-, Reynolds- and Ohnesorge-number are used to scale down the production process into a laboratory size. The experiments are performed by using a glycerol-water mixture. A new drum geometry out of steel is designed for the experiments. The results from the laboratory are transferred to the production plant. The production drum geometry is optimized. Good results by means of yield of desired particle size and quality are achieved. The process data acquisition is used for modeling the atomization process, especially the influence of the production parameters on the particle distribution of the slag particles. The model is optimized and validated by experiments on the production plant. It is used together with the findings of the laboratory and production experiments to build a drum configurator. This tool can predict the optimal drum geometry and process parameters for producing the desired slag particle sizes.

Vorwort

Diese Arbeit wurde im Sommersemester 2017 im Zuge eines Projektes am Institut für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz in Zusammenarbeit mit einem Projektpartner durchgeführt.

Ich möchte mich herzlich bei den zuständigen Personen, Herrn Dipl.-Ing. Peter Tomazic, Frau Ing. Marlene Mühlböck, MSc und Herrn Markus Göbl für die kollegiale Zusammenarbeit, die zahlreichen interessanten Diskussionen und die Unterstützung während der Arbeit bedanken. Der Dank gilt außerdem deren Mitarbeitern für die gute Zusammenarbeit.

Ich möchte mich herzlich für das Angebot zur Durchführung der Diplomarbeit und deren Beurteilung bei Herrn Univ.-Prof. Christoph Hochenauer bedanken. Auch möchte ich mich bei seinem Team am Institut für Wärmetechnik, besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Hannes Gerhardter und Herrn Dipl.-Ing. Mario Knoll für die Unterstützung während der Arbeit bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, meinen beiden Brüdern und meinen Freunden für die Unterstützung während der gesamten Studienzeit.

Graz, im Oktober 2017

Simon Alkin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Modelltheorie	2
2.1.1	Dimensionslose Kennzahlen	2
2.1.2	Anwendung auf den Spinning Disc Prozess	3
2.2	Spinning Disc Prozess	4
3	Beschreibung der Stoffsysteme	15
3.1	Aluminiumsilikatschlacke	15
3.2	Glycerin-Wasser-Gemisch	16
4	Charakterisierung des Produktionsprozesses	19
4.1	Werkzeuge	20
4.2	Temperaturverteilung	20
4.3	Strahlenbildung und Partikelablösung	26
4.4	Partikelgrößenverteilung	28
4.5	Partikelgeometrie	28
5	Versuchsdurchführung Technikum	30
5.1	Aufbau der Technikumsanlage	30
5.1.1	Schleudertrommeln für die Technikumsanlage	31
5.2	Tropfengrößenmessung	32
5.3	Abbildung der Produktionsanlage durch die Ähnlichkeitstheorie	35
5.4	Ergebnisse	36
5.4.1	Nebelversuche	36
5.4.2	Auswertung der Tropfengrößenmessung	38
5.4.3	Beschreibung der Einflussparameter	41
5.5	Fehlerbetrachtung	46
6	Versuchsdurchführung Produktion	47
6.1	Probenahme an der Produktionsanlage	47
6.2	Produktionsversuche	48
6.2.1	Trommel 342: D110, 32x0,3	48
6.2.2	Trommel 345: D80, 32x2,1	48
6.2.3	Trommel 323: D60, 32x0,7	48
6.2.4	Trommel 351: D60, 32x0,9	49
6.2.5	Trommel 348: D60, 32x2	49
6.2.6	Trommel 347: D60, 32x2,7	49
6.3	Validierung der Technikumsversuche	50
6.4	Verwendung neuer Werkzeuggeometrien und Optimierung der Prozessparameter	50
6.4.1	Optimierte Werkzeuggeometrien	50
6.4.2	Produktionsversuche mit optimierten Werkzeuggeometrien	51
6.5	Ergebnisse	52

6.6 Fehlerbetrachtung	54
7 Modellierung des Produktionsprozesses anhand der Prozessdatenerfassung	56
7.1 Werte aus der Prozessdatenerfassung	56
7.2 Umrechnung: Motorfrequenz in Trommeldrehzahl	59
7.3 Modellerstellung	59
7.3.1 Kräftebilanzmodell	59
7.3.2 Spinning Disc Modell	62
7.3.3 Berechnung des Trommelüberlaufens	63
7.4 Ergebnisse	65
7.5 Fehlerbetrachtung	68
8 Überprüfung der Modellierung durch die Produktionsversuche	70
8.1 Ergebnisse	70
9 Anwendung des Modells zur Trommelauslegung	72
10 Zusammenfassung	76
11 Ausblick	79
12 Anhang	80
12.1 ImageJ Makro zur Auswertung der Tropfenfotos	80
12.2 Octave Code für das Prozessdatenfitting	83
12.3 Octave Code für das Spinning Disc Modell	90
12.4 Octave Code für die Trommelauslegung	93
12.5 Octave Code der Zusatzmodule	95
12.6 vba-Excel Code für das Spinning Disc Modell	101
12.7 vba-Excel Code für die Trommelauslegung	105
12.8 vba-Excel Code der Zusatzmodule	107
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	112
Abbildungsverzeichnis	114
Tabellenverzeichnis	116
Literaturverzeichnis	117

1 Einleitung

Die Produktion von Partikeln aus Hochofenschlacke dient als Maßnahme zur Abfallminimierung und CO₂-Reduktion in der Stahlindustrie. Die Schlackepartikel können beispielsweise an die Zementindustrie weiterverkauft werden. Als Prozess zwischen Hochofen und verkaufsfähigen Partikeln kommt in den allermeisten Fällen der Spinning Disc Prozess zur Anwendung.

Im Spinning Disc Prozess dient eine rotierende Scheibe als Schleuderwerkzeug. Die flüssige Schlacke trifft auf die rotierende Scheibe auf und wird beschleunigt. Dadurch kommt es zu einer flächigen Verteilung auf der Scheibe. Am Scheibenrand zerfällt der Schlackefilm in Strähnen, die immer weiter ausgezogen werden und schließlich in Einzeltröpfchen zerfallen. In der Flugphase erstarren die Tropfen. Die Schlackepartikel werden gesammelt, abtransportiert und können danach als fertiges Produkt verkauft werden.

Statt flacher Schleuderteller können auch Schleuderbecher und -trommeln verwendet werden. Diese unterscheiden sich vom Schleuderteller in einer zusätzlichen Begrenzung am Tellerrand. Die Wand dient zur gleichmäßigeren Verteilung der Schlacke. Bei der Schleudertrommel kommen zusätzlich Bohrungen zur Anwendung, durch die die Schlacke austreten kann. Schleudertrommeln sind daher aufwendiger in der Fertigung, der Auslegung und der Bestimmung der optimalen Prozessparameter. Bei deren Verwendung kann die Qualität der Partikel und die Streuung der produzierten Partikelgrößen aber verbessert werden. Je nach Produktionsanforderung kann daher die Verwendung von Trommeln hilfreich sein.

Der Projektpartner hat den Verrundungsprozess mit Trommeln erfolgreich in seine Produktion integriert und stellt aus einer dünnflüssigen Schlacke Partikel in der Größe von 150 µm bis 1,2 mm her. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Prozessoptimierung durchgeführt werden, da verschiedene Trommeln qualitativ sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Zusätzlich soll die Ausbeute an Zielkorn erhöht werden, da teilweise sehr breite Partikelgrößenverteilungen produziert werden. Durch eine gezieltere Produktion kann die Nachfrage an bestimmten Partikelgrößen besser abgebildet werden.

In der Produktion werden die Prozessparameter und Produktionsergebnisse laufend in eine Prozessdatenerfassung eingetragen. Diese wird zwar punktuell für neue Trommeln ausgewertet, eine umfassende Analyse der Prozessdaten wurde aber noch nie durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Modell erstellt werden, um die produzierte Partikelgröße in Abhängigkeit der Prozessparameter abschätzen zu können. Dieses Modell soll in Zukunft für die Auslegung optimierter Trommelwerkzeuge und die Bestimmung der optimalen Prozessparameter dienen.

2 Grundlagen

2.1 Modelltheorie

„Die Dimensionsanalyse liefert einen vollständigen Satz von Kennzahlen, die einen physikalisch-technischen Vorgang beschreiben und aufzeigen, unter welchen Bedingungen sich dieser Vorgang im Modell und in der technischen Ausführung „ähnlich“ verhält: Die Dimensionsanalyse ist die einzige gesicherte Grundlage der Modellübertragung.“ (Zlokarnik, 2005)

Die Dimensionsanalyse liefert die dimensionslosen Kennzahlen für die Anwendung in der Modelltheorie, die für ein Scale-up bzw. Scale-down zwischen Labor- und Großanlage verwendet wird. Als Bedingung für die „Ähnlichkeit“ gilt das Gleichsetzen der dimensionslosen Kennzahlen. Die Basis für die Maßstabsübertragung von der Produktions- zur Technikumsanlage und umgekehrt, die in dieser Arbeit durchgeführt wird, liefert die Dimensionsanalyse von Kitamura und Takahashi (1992). (siehe auch Kap. 2.1.2 und Kap. 5.3)

2.1.1 Dimensionslose Kennzahlen

Reynolds-Kennzahl

Die Reynolds-Kennzahl stellt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Zähigkeitskräften dar. Sie beschreibt den Strömungszustand und lässt eine Unterteilung in laminaren und turbulenten Strahlzerfall zu. Die allgemeine Definition der Reynolds-Kennzahl ist in Glg. 2-1 angeführt.

$$Re = \frac{\rho u l}{\eta} \quad (2-1)$$

Im Spinning Disc Prozess wird eine abgeänderte Definition der Reynolds-Kennzahl verwendet. In Wozniak (2013) wird eine Definition nach Glg. 2-2 und in Dhirhi et al. (2016) nach Glg. 2-3 aufgestellt. In dieser Arbeit wird die Definition nach Glg. 2-3 verwendet, wobei sich die beiden Definitionen nur um einen konstanten Faktor unterscheiden. In den beiden Gleichungen werden als charakteristische Längen der Außendurchmesser D bzw. der Außenradius R_{disc} des Schleuderwerkzeugs verwendet.

$$Re = \frac{\dot{V} \rho}{D \pi \eta} \quad (2-2)$$

$$Re = \frac{4 \dot{V} \rho}{R_{disc} \pi \eta} \quad (2-3)$$

Weber-Kennzahl

Die Weber-Kennzahl charakterisiert den relativen Einfluss von Trägheitskräften im Vergleich zu Kapillarkräften. Mit Hilfe dieser Kennzahl lässt sich der Zerfallsmodus und die Zerfallsintensität der Tropfen darstellen. (Wozniak, 2013)

Die Weber-Kennzahl ist in Glg. 2-4 (Wozniak, 2013) allgemein und in Glg. 2-5 (Dhirhi et al., 2016) für den Spinning Disc Prozess definiert. Die charakteristische Länge wird mit dem Außenradius des Schleuderwerkzeugs R_{disc} gebildet.

$$We = \frac{\rho u^2 l}{\sigma} \quad (2-4)$$

$$We = \frac{\rho \omega^2 R_{disc}^3}{\sigma} \quad (2-5)$$

Ohnesorge-Kennzahl

Die Ohnesorge-Kennzahl charakterisiert den Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf den Tropfenzerfall bzw. die Deformation der Tropfen. Die allgemeine Definition der Ohnesorge-Kennzahl ist in Glg. 2-6 dargestellt. Für die Verwendung im Spinning Disc Prozess wird die charakteristische Länge l mit dem Außenradius des Schleuderwerkzeugs R_{disc} gebildet (siehe Glg. 2-7). (Dhirhi et al., 2016)

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma l}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (2-6)$$

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma R_{disc}}} \quad (2-7)$$

2.1.2 Anwendung auf den Spinning Disc Prozess

Dhirhi et al. (2016) beschreiben das Scale-Up einer Spinning Disc Anlage mit Kolophonium-Paraffin-Gemisch (Erstarrungstemperatur: 105 bis 130 °C) auf eine Anlage mit Hochofenschlacke (Erstarrungstemperatur: 1400 bis 1500 °C). Dabei wird ein flaches Schleuderteller mit 30 mm Durchmesser als Schleuderwerkzeug verwendet. Das Scale-Up wird mit Hilfe von drei dimensionslosen Kennzahlen, der Reynolds- (Glg. 2-3), Weber- (Glg. 2-5) und Ohnesorgezahl (Glg. 2-7) durchgeführt. Aus diesen drei Kennzahlen können der Durchsatz, die Umdrehungsgeschwindigkeit und der Tellerradius zwischen Groß- und Kleinanlage ins Verhältnis gesetzt werden und damit das Scale-Up durchgeführt werden (siehe Kap. 5.3). Diese Vorgangsweise wird ursprünglich von Kitamura und Takahashi (1992) vorgeschlagen.

2.2 Spinning Disc Prozess

Der Spinning Disc Prozess wird für die Verrundung von unterschiedlichen Materialien eingesetzt. Die mengenmäßig größte Anwendungsgruppe ist die Verrundung von Schlacke, um Schlackepartikel im Größenbereich von etwa 0,5 mm bis zu einigen Millimetern herzustellen. Die Hochofenschlacke wird aus dem Hochofen entnommen und direkt auf ein Schleuderwerkzeug zur Verrundung aufgebracht. Die hohe Energie, die in der heißen Schlacke gespeichert ist, wird damit sehr gut genützt und dient als Maßnahme zur CO₂-Reduktion in Stahlwerken. Die Schlackepartikel werden vorwiegend in der Zementindustrie weiterverwendet. (Kashiwaya et al., 2010a), (Kashiwaya et al., 2010b)

Weiters wird der Prozess für flüssige Medien, meist auf Wasserbasis, in der Lebensmittel- und Chemieindustrie verwendet. Zur Verrundung verschiedenster Metalle (Zhao, 2006) und Glas (Schaeffer und Langfeld, 2013) dient der Prozess ebenfalls. Der Prozessablauf beginnt bei festen Materialien mit dem Aufschmelzen in einem Schmelzofen. Bei flüssigen Medien wird nur ein Düsenbehälter benötigt. Das Medium fließt durch die Düse aus. In einigen Zentimetern Abstand von der Düse ist das rotierende Schleuderwerkzeug angeordnet. Es wird über eine Werkzeugaufnahme, teilweise eine thermische Entkoppelung (Xie et al., 2004) und eine Werkzeugachse durch einen Elektromotor angetrieben. Das Medium trifft auf die Oberseite des Schleuderwerkzeugs auf und wird sowohl in radialer, als auch in tangentialer Richtung beschleunigt. Dadurch bildet sich bei ausreichender Benetzung der Oberfläche ein dünner Film, der abhängig von der Werkzeuggeometrie, des Durchsatzes und der Drehzahl in unterschiedlichen Regimen zerfällt. Beim gewünschten Ligamentregime zerfällt der Film an der Außenkante des Schleudertellers bzw. -bechers oder an den Bohrungen einer Schleudertrommel in einzelne Strähnen. Die Anzahl der Strähnen ergibt sich bei Trommeln durch die Anzahl der Löcher, bei Tellern und Bechern durch den Durchfluss, die Drehzahl und den Außendurchmesser. Die abgeschleuderten Strähnen dehnen sich durch die Drehbewegung des Werkzeugs immer weiter aus. Abhängig vom Medium reißen diese in gewissem Abstand vom Werkzeug ab, um Einzeltröpfchen zu bilden. Die Einzeltröpfchen werden im heißen Prozess in der Flugphase abgekühlt und erstarren. Die Partikel werden in einem Auffanggefäß gesammelt und abtransportiert. (Wozniak, 2013), (Prüße et al., 2002)

Der Spinning Disc Prozess wird durch mehrere Einflussgrößen bestimmt. Einerseits besitzen die Stoffeigenschaften des Mediums, andererseits die Werkzeuggeometrie und -drehzahl großen Einfluss auf den Prozess. Die Zielgröße ist immer die Partikelgröße. Als Qualitätsparameter gelten die Breite der Partikelgrößenverteilung und

die Qualität der Partikel, vor allem die Rundheit. Abhängig vom Anwendungsgebiet werden unterschiedliche Qualitäten gefordert. (Wozniak, 2013)

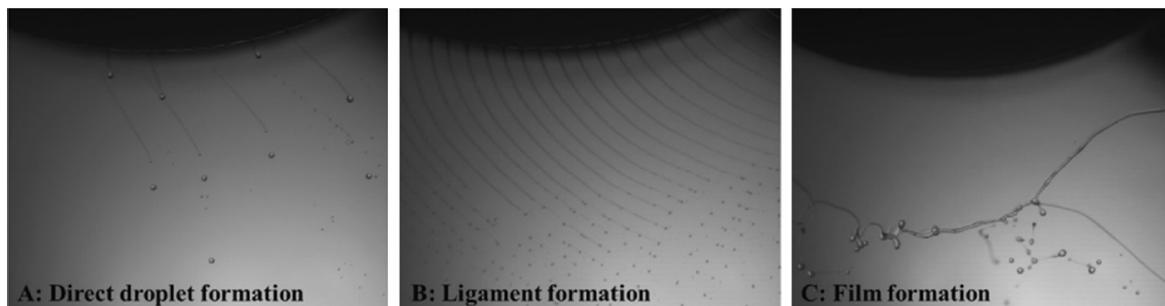


Abb. 2-1: Darstellung der Tropfenbildungsregime bei Verwendung eines Schleudertellers bei einer Drehzahl von 1200 U/min und unterschiedlichen Volumenströmen eines Glycerin-Wasser-Gemisches: A: Tropfenregime ($\dot{V}=5$ l/h), B: Ligamentregime ($\dot{V}=20$ l/h), C: Filmregime ($\dot{V}=60$ l/h) (Bilder aus Wu et al. (2015))

Der Mechanismus der Tropfenablösung kann in drei unterschiedliche Regime (siehe Abb. 2-1) eingeteilt werden.

Bei geringem Durchsatz bilden sich direkt am Werkzeugrand Einzeltropfen. Dieses Regime wird Tropfen- oder Abtropfregime genannt. Es entstehen relativ große Primärtropfen, welche beim Ablösen dünne Flüssigkeitsfäden ausziehen, die dann zu wesentlich kleineren Sekundärtropfen zerfallen. Deshalb zeichnet sich dieses Zerfallsregime durch eine ausgeprägte bimodale Tropfengrößenverteilung aus. Aufgrund des geringen Durchsatzes und der schlechten Partikelgrößenverteilung ist dieses Regime in technischen Anwendungen kaum relevant. (Wozniak, 2013)

Bei höherem Durchsatz erfolgt ein Übergang auf das Ligamentregime bzw. Fadenbildungsregime, bei dem am Werkzeugrand einzelne Strähnen gebildet werden und in einer Entfernung von einigen Millimetern bis Dezimetern in Einzeltropfen zerfallen. Dieses Regime produziert eine geringere Streuung als das Tropfenregime. Durch den erhöhten Durchsatz ist es auch wirtschaftlicher. Ein Problem stellt der relativ enge Durchsatzbereich dar. Im heißen Spinning Disc Prozess muss der Verrundungsprozess abgeschlossen sein, bevor eine Erstarrung aufgrund des Abkühlvorganges stattfindet. (Wozniak, 2013)

Als drittes Regime geht das Ligamentregime bei sehr hohen Durchsätzen in das Filmregime oder Lamellenzerfallsregime über. Der Durchmesser des Schleuderwerkzeugs reicht nicht mehr aus, um den Film in Einzelsträhnen zu zerreißen. Der durchgängige Film wird erst außerhalb des Werkzeugdurchmessers zerstört und zerfällt in eine Mischung aus Einzeltropfen und Strähnen. In diesem Regime wird eine sehr große Streuung in der Partikelgröße produziert. Auch die Qualität der Partikel nimmt stark

ab. Deshalb soll dieses Regime verhindert werden. Durch den hohen Durchsatz wird es aber aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen trotzdem angewendet. (Wozniak, 2013)

Die Unterscheidung der Regime wird in Qin et al. (2013) behandelt. Ursprünglich wurde diese Methodik in Champagne und Angers (1980a), (1980b) und (1984) entwickelt. In Abb. 2-2 werden die Verrundungsregime dimensionslos dargestellt. Die Geraden zur Trennung zwischen den Regimebereichen werden durch Glg. 2-8 beschrieben, worin $X = 0,07$ die Trenngerade zwischen Tropfen- (DDF) und Ligamentregime (LF) und $X = 1,33$ die Gerade zwischen Ligament- (LF) und Filmregime (FF) beschreibt. X stellt die Steigung der Trennungsgerade dar.

$$X = \frac{\frac{\dot{V} \omega^{0,6}}{D^{0,68}}}{\frac{\sigma^{0,88}}{\eta^{0,17} \rho^{0,71}}} = \frac{\dot{V} \omega^{0,6} \eta^{0,17} \rho^{0,71}}{D^{0,68} \sigma^{0,88}} \quad (2-8)$$

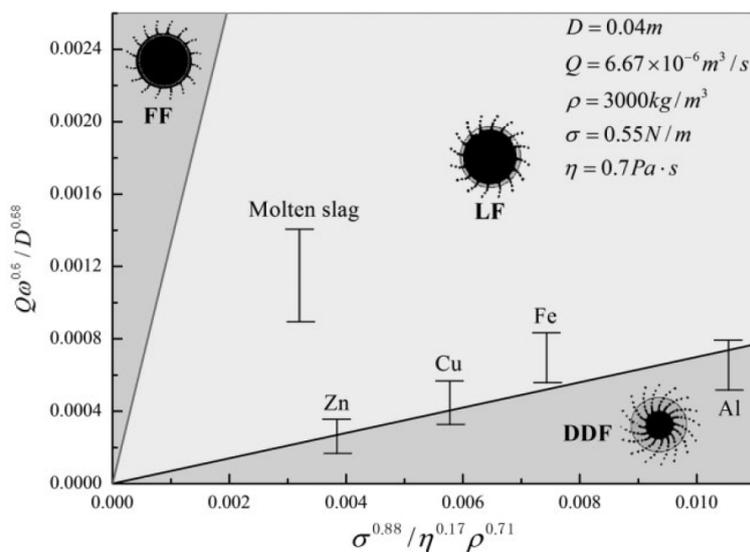


Abb. 2-2: Dimensionslose Darstellung der Regime im Spinning Disc Prozess: Tropfenregime (DDF), Ligamentregime (LF) und Filmregime (FF); (Volumenstrom \dot{V} ist als Q bezeichnet) (aus Qin et al. (2013))

Als Schleuderwerkzeuge kommen im Wesentlichen drei verschiedene Geometrien zum Einsatz, das Schleuderteller, der Schleuderbecher und die Schleudertrommel. In Abb. 2-3, 2-4 und 2-5 sind diese drei Typen dargestellt. Die einfachste Geometrie stellt eine flache rotierende Scheibe, das Schleuderteller dar. Die nächste Stufe stellt der Schleuderbecher dar, der aus einer flachen rotierenden Scheibe mit einer Wand am Außendurchmesser besteht. Der große Vorteil ist die einfachere Handhabung schlecht benetzender Materialien. Variationen gibt es hier sowohl in der Wandhöhe, als

auch im Wandwinkel. Während sich bei Tellern und Bechern die Anzahl an Strähnen selbst einstellen kann, wird sie bei der Schleudertrommel durch die Anzahl der Löcher bestimmt. Die Schleudertrommel ist ein Schleuderbecher mit senkrechter oder gewölbter Wand, in die die passende Anzahl an Löchern mit passendem Durchmesser gebohrt wird.

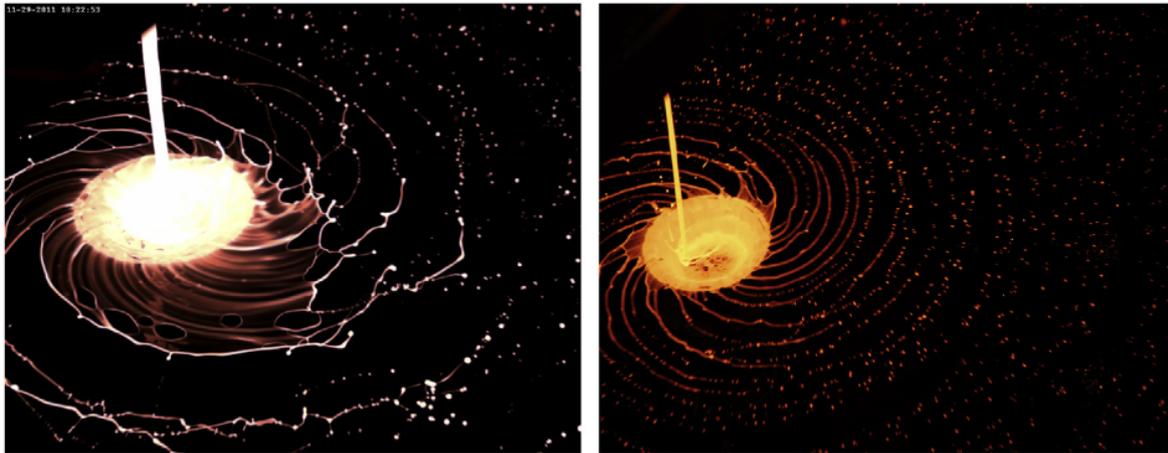


Abb. 2-3: Verrundung von Hochofenschlacke mit einem Schleuderteller. Der Schlackestrahл trifft auf das rotierende Teller auf, wird beschleunigt und wird am Teller verteilt. Rechtes Bild: Der Schlackefilm zerreißt an der Außenkante des Tellers fast ausschließlich in Einzelsträhnen, die in weiterer Folge in Einzeltropfen zerfallen (Ligamentregime). Linkes Bild: Der Tellerdurchmesser reicht nicht für eine vollständige Strähnenbildung aus. Der Schlackefilm dehnt sich über die Tellerkante aus und zerreißt in weiterer Folge in Einzelsträhnen und -tropfen (Filmregime). (Bilder aus Liu et al. (2014))

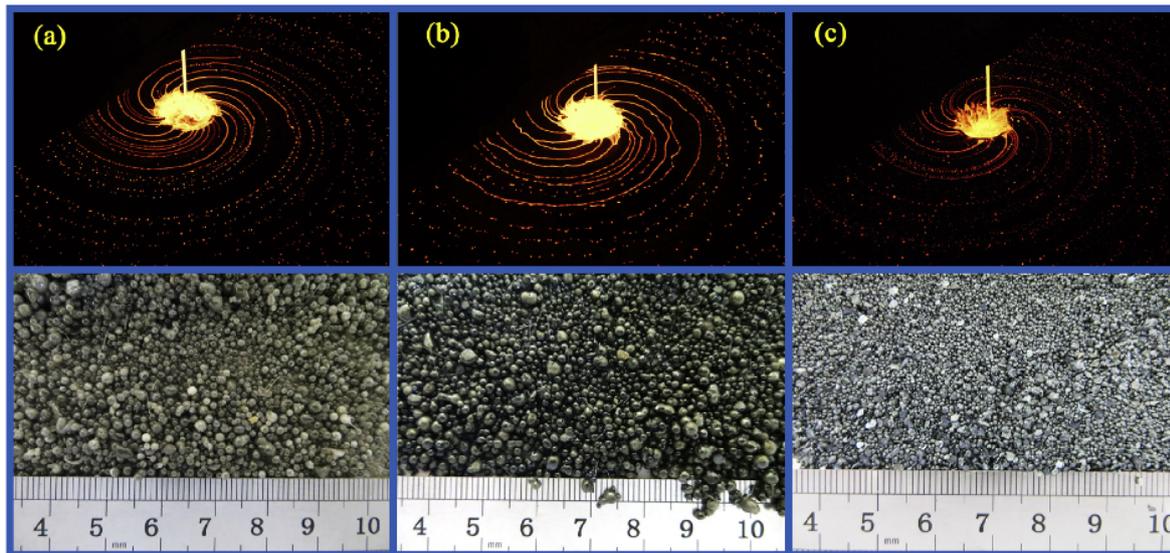


Abb. 2-4: Verrundung von verschiedenen Schlacken mit einem Schleuderbecher. Der Schlackenstrahl trifft jeweils von oben auf die Schleuderbecher auf. Es bildet sich ein Schlackefilm im Becher, der an der Becheroberkante in Einzelstrahlen und in weiterer Folge in Einzeltropfen zerfällt. Die Strahlen sind alle unterschiedlich dick, was sich in der breiten Partikelverteilung in den unteren Bildern zeigt. Es treten sowohl große, als auch kleine Partikel auf. (Bilder aus Liu et al. (2016))

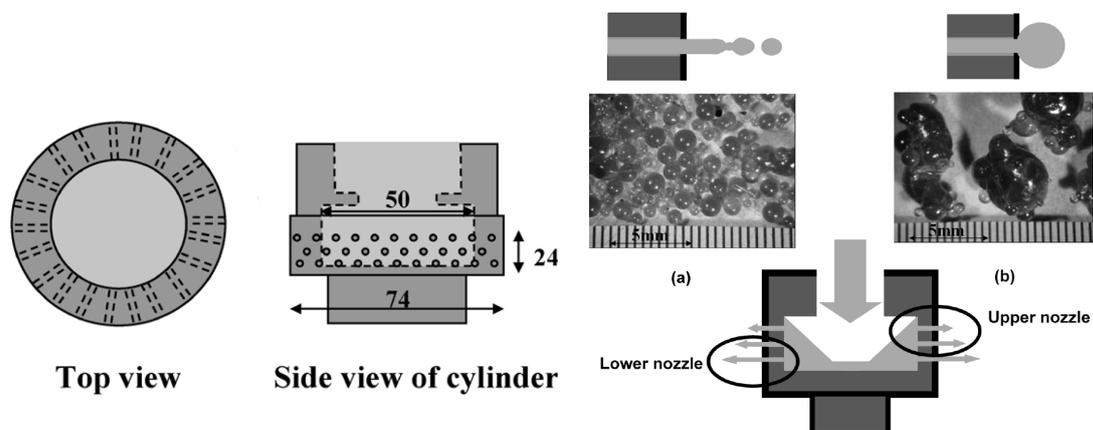


Abb. 2-5: Schlackenverrundung von Hochofenschlacke mit einer Schleudertrommel. Linkes Bild: Darstellung der Trommel mit jeweils 21 Löchern auf 3 Ebenen mit einem Bohrungsdurchmesser von 1,3 mm. Rechtes Bild: Unterscheidung der Partikel, die von der obersten und der untersten Lochreihe produziert werden. Die Austrittsgeschwindigkeit der Schlacke ist in der untersten Lochreihe höher, als in der obersten. Es werden kleinere, qualitativ hochwertigere Partikel hergestellt. In der obersten Lochreihe ist die Lochaustrittsgeschwindigkeit so langsam, dass aus den Löchern große Einzeltropfen austreten, die zu großen, qualitativ schlechten Partikeln erstarren. (Bilder aus Kashiwaya et al. (2010a))

Literaturstellen für Glycerin-Wasser-Gemische

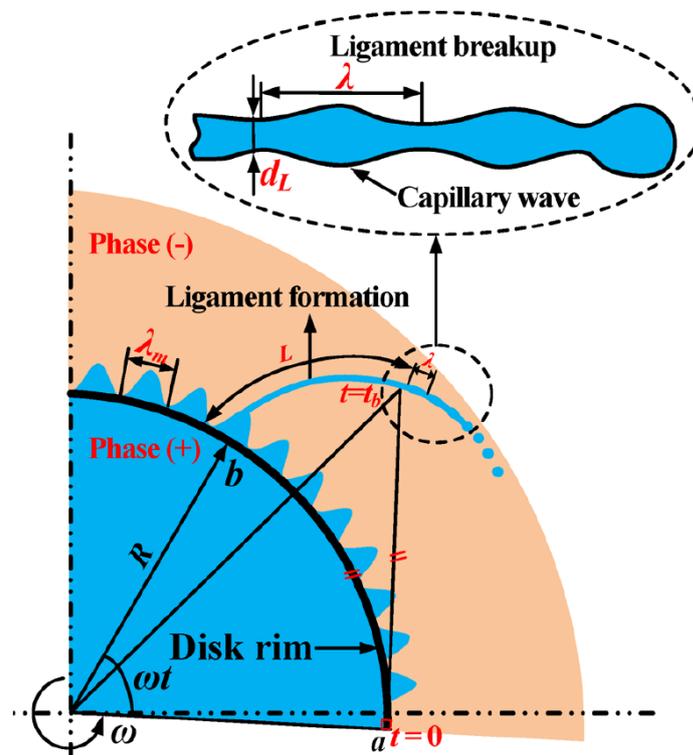


Abb. 2-6: Skizze des Tropfenabreißmechanismus im Ligamentregime (aus Wang et al. (2016))

In Wang et al. (2016) wird die Strahlenbildung und deren Abreißmechanismus zweier Glycerin-Wasser-Gemische bei Verwendung eines Schleudertellers im Strahlenbildungsregime beschrieben (siehe Abb. 2-6 und Abb. 2-7). Folgender Ablauf wird vorgeschlagen. Die Strähne wird durch die Drehbewegung des Tellers auseinander gezogen. Dadurch verringert sich der Durchmesser, und es bildet sich am Ende der Strähne ein Tropfen aus, der abgelöst wird. Durch die Ablösung entsteht eine Kapillarwelle, die sich über die Strähne in Richtung des Tellers ausbreitet. Durch die Druckunterschiede, hervorgerufen durch die Kapillarwelle, entstehen Anhäufungs- und Verarmungsstellen in der Strähne. Die Bereiche zwischen den Anhäufungsstellen ziehen sich immer weiter zusammen und brechen im weiteren Verlauf ab. Die verbleibenden Verbindungen bilden hantelförmige Gebilde aus. Die beiden Hantelenden bilden große, die Verbindungen kleine Tropfen. Wenn die Verbindung der Hantel lang genug ist, durchläuft diese den gesamten Tropfenbildungsmechanismus erneut. Aufgrund dieses Mechanismus entsteht immer eine Mischung aus großen Haupttropfen und kleinen Satellitentropfen.

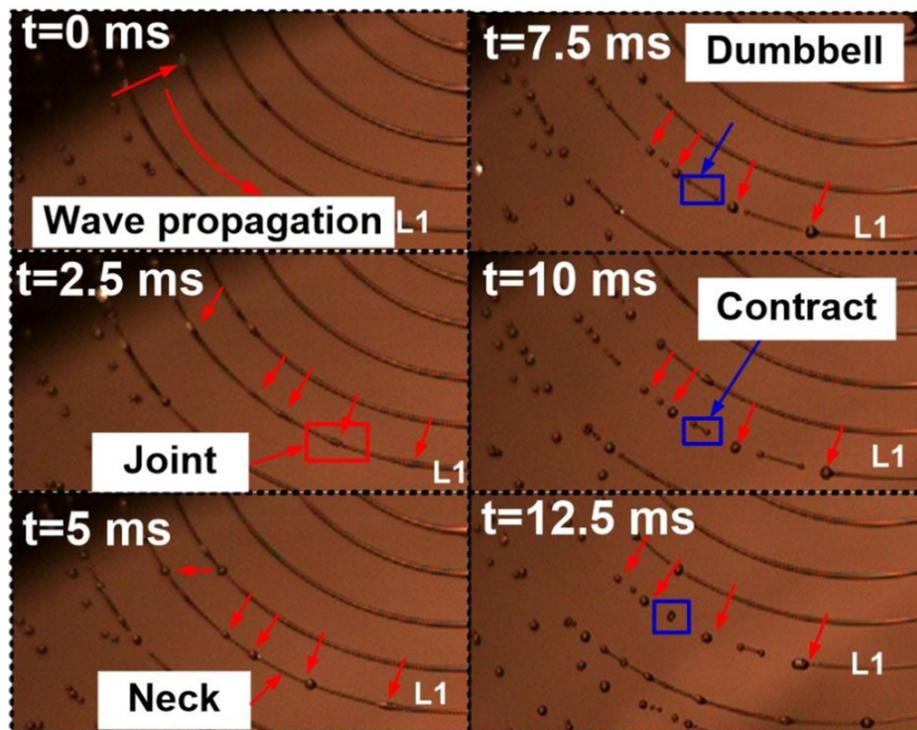


Abb. 2-7: Ablauf des Tropfenabreißmechanismus für ein Glycerin-Wasser-Gemisch ($\rho = 1170 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,0175 \text{ Pa s}$, $\sigma = 0,073 \text{ N/m}$) bei Verwendung eines Schleudertellers mit Außendurchmesser $D=0,05 \text{ m}$, Volumenstrom $\dot{V} = 7,1 \text{ ml}$ und einer Umdrehungsgeschwindigkeit $\omega = 62,8 \text{ rad/s}$. Jede Einzelsträhne bildet aufgrund einer Kapillarwelle Anhäufungs- (=Joint) und Verarmungsstellen (=Neck) aus, die im ersten Schritt zu Hanteln (=Dumbbell), dann zu Einzeltropfen zerfallen. Die Hantelenden zerfallen zu großen Haupttropfen, die Hantelverbindungen zu kleinen Satellitotropfen. (aus Wang et al. (2016))

In Liu et al. (2012) wird ein Schleuderbecher mit Hilfe von einem Glycerin-Wasser-Gemisch analysiert und in allen drei Tropfenbildungsregimen betrieben. Es wird berichtet, dass wenig Schlupf zwischen Fluid und innerer Becherwand auftritt. Es werden Gleichungen für die Übergänge zwischen den Regimen aufgestellt. Der Strähnenenddurchmesser, also der Durchmesser einer Strähne kurz vor dem Abreißvorgang, wird mit $0,629 \text{ mm}$ als konstant bestimmt.

In Wu et al. (2017) werden verschiedene Geometrien von Schleuderbechern analysiert. Es wird sowohl die Becherhöhe, als auch der Wandwinkel variiert. Die Experimente werden mit Wasser durchgeführt. Der Übergang vom Ligamentregime zum Filmregime kann durch die Verwendung eines Bechers statt eines Tellers zu höheren Durchsätzen und höheren Drehzahlen verschoben werden. Somit werden feine Tropfen mit enger

Verteilung produziert. Der innere Wandwinkel hat einen vernachlässigbaren Einfluss. Dagegen besitzen der äußere Wandwinkel und die Wandhöhe einen wesentlichen Einfluss auf den Tropfendurchmesser. Ein Außenwinkel von 90° , also eine senkrechte Wand, und eine geringe Wandhöhe helfen dabei den Tropfendurchmesser zu verringern. Der erforderliche Durchmesser für ein Verbleiben im Ligamentregime kann durch das Verwenden eines Schleuderbechers im Vergleich zum Schleuderteller verringert werden.

Literaturstellen für Schlacke und Metallschmelzen

Xie et al. (2004) beschreiben die Verrundung von Zinn bei Verwendung einer flachen Scheibe und eines Bechers als Schleuderwerkzeug. Es wird besonders auf die Wichtigkeit der Werkzeugbenetzung hingewiesen, um eine große Beschleunigung und somit gute Verteilung des Zinns zu erreichen. Dies wird durch Vorverzinnen des Werkzeuges bewerkstelligt. Die Filmdicke soll für eine gute Benetzung möglichst dünn sein. Dies wird durch Verringerung des Durchflusses oder Erhöhung der Umdrehungsgeschwindigkeit erreicht. Weiters wird über eine Rückstandsbildung in der Mitte des Werkzeugs bei der Inbetriebnahme aus dem kalten Zustand berichtet. Dies wird durch eine thermische Entkoppelung des Motors zur Minimierung des Wärmeleitungsverlustes und durch eine Vorwärmung des Werkzeugs mittels Heißluft erreicht. Bei Verwendung eines Bechers werden feinere Partikel im Gegensatz zur flachen Scheibe produziert, da der Zinnfilm auf die Becherwand gedrückt wird und daher eine größere Beschleunigung erfährt.

Derselbe Effekt wird von Zhao (2006) für mehrere Metalle beschrieben. Weiters wird beschrieben, dass der Schlupf zwischen Werkzeugoberfläche und flüssigem Metall verringert werden soll. Als Einflussfaktoren auf den Schlupf werden die Werkzeuggeometrie, die Umdrehungsgeschwindigkeit, der Durchsatz und die Benetzung genannt. Für die Verringerung der Oberflächenabrasion wird ein ca. 0,1 bis 2 mm dicker, fester Metallfilm vorgeschlagen. Ein zu dicker Film verschlechtert die Ausbeute und erhöht die Instabilitäten. Ein zu dünner Film schmilzt durch Fluktuationen auf.

In Kashiwaya et al. (2010a) wird die Verrundung von Hochofenschlacke unter Verwendung eines Becherwerkzeugs (rotating cup atomizer, Wandwinkel ca. 45°), eines Bechers mit zwei Düsen (two-nozzle rotary cylinder) und einer Trommel mit 63 Löchern, die in 3 Ebenen angeordnet sind (multi-nozzle rotary cup atomizer) beschrieben. Es wird das Benetzungsproblem beim Becherwerkzeug und die daraus resultierende ge-

ringe Effizienz des Verrundungsprozesses beschrieben. Das Düsenwerkzeug wird mit Düsendurchmessern von 1, 1,3 und 2 mm verwendet. Abhängig vom Düsendurchmesser werden verschieden große Partikel produziert. Bei größerem Lochdurchmesser werden größere Partikelgrößen hergestellt. Der maximale Partikeldurchmesser liegt immer unterhalb des Düsendurchmessers. Bei einer Düsenöffnung von 2 mm ergibt sich eine deutlich breitere Partikelgrößenverteilung, als bei Düsengrößen von 1 und 1,3 mm. Bei geringerer Umdrehungsgeschwindigkeit, also größeren Partikeln, ergibt sich auch eine breitere Streuung der Partikelgrößen. Grundsätzlich wird berichtet, dass bei kleineren Partikeln eine bessere Rundheit erreicht wird, als bei größeren. In der Folgeveröffentlichung Kashiwaya et al. (2010b) wird die Verrundung mittels einer Trommel (siehe Abb. 2-5) beschrieben. Die Trommel besitzt einen Innendurchmesser von 50 mm, einen Außendurchmesser von 74 mm und eine Anordnung von jeweils 21 Löchern auf drei Ebenen (ergibt 63 Löcher) bei einem Lochdurchmesser von 1,3 mm. Die Trommelwand steht senkrecht. Es wird der Unterschied im Abreißmechanismus zwischen den Lochebenen beschrieben. Während die unterste Ebene lange Strähnen bildet, die in einzelne runde Partikel zerfallen, bilden sich in der obersten Ebene große Tropfen direkt an den Bohrungen, die als große, unrunde und opake Partikel erstarren. Die Austrittsgeschwindigkeit aus den Löchern der unteren Ebene ist viel größer, als die der oberen. Der Einfluss der Lochgrößen und der Umdrehungsgeschwindigkeit bleibt gleich zum Düsenwerkzeug.

In Qin et al. (2013) wird mit Hilfe einer Schleudertrommel die Verrundung von Schlacke durchgeführt. Die Löcher sind in mehreren Ebenen übereinander angeordnet und besitzen Durchmesser von 2 und 3 mm. Es wird beschrieben, dass sich die Trommel automatisch auf den Durchsatz anpassen kann, da die Trommel eine viel zu große Anzahl an Löchern besitzt, als dass die Trommel überlaufen könnte. Schlackepartikel mit einer sehr breiten Streuung und einem Durchmesser von einigen Millimetern werden hergestellt. Die auf die Tropfen wirkenden Kräfte, Zentrifugal- (Glg. 2-9), Oberflächen- (Glg. 2-10) und Widerstandskraft (Glg. 2-11) werden beschrieben.

$$F_z = m_p \omega^2 \left(\frac{D}{2} \right) = \frac{\rho d_p^3 \pi}{6} \omega^2 \left(\frac{D}{2} \right) \quad (2-9)$$

$$F_s = \sigma d_p \pi \quad (2-10)$$

$$F_w = \frac{8 u \eta l^2}{r_{loch}} = \frac{8 \left(\frac{\omega D}{2} \right) \eta l^2}{r_{loch}} \quad (2-11)$$

Purwanto et al. (2005) beschreiben die Produktion von transparenten Schmelzpartikeln mit Hilfe des Spinning Disc Prozesses. Es wird zusätzlich eine Simulation des Schleudertellers hinsichtlich Strähnenbildung und Wärmeübergang am Einzeltropfen durchgeführt. Eine hohe Abkühlrate eines Partikels wird als Hauptkriterium für das Erreichen des transparenten Zustands berichtet. Daraus kann die schwierige Herstellung großer transparenter Partikel aufgrund der langen Abkühlzeit bzw. geringen Abkühlrate abgeleitet werden. Zusätzlich wird eine Abschätzungsformel (Glg. 2-12) für die Anzahl K der Strähnen bei der Verwendung einer flachen Scheibe als Schleuderwerkzeug vorgestellt. Diese ist aus Kitamura et al. (1976) entnommen.

$$K = 0,31 We^{0,44} Z_R^{-0,36} \quad (2-12)$$

$$We = \frac{\rho \omega^2 R_{disc}^3}{\sigma} \quad (2-13)$$

$$Z_R = \frac{\eta}{\sqrt{\rho R_{disc} \sigma}} \quad (2-14)$$

Dhirhi et al. (2016) stellen eine Abschätzungsformel für die mittlere produzierte Partikelgröße für Hochofenschlacke und Verwendung einer flachen Scheibe als Schleuderwerkzeug bereit (Glg. 2-15 bis 2-18). Zusätzlich wird die Entstehung von Fasern erwähnt. Dies wird damit erklärt, dass sich bei zu geringem Durchfluss wenig Schlacke auf der Scheibe befindet. Dadurch bilden sich sehr dünne Strähnen, die schnell abkühlen und verfestigen. Die Erstarrung findet also vor der vollständigen Verrundung statt.

$$Re = \frac{4 \rho \dot{V}}{\pi \eta R_{disc}} \quad (2-15)$$

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma R_{disc}}} \quad (2-16)$$

$$We = \frac{\rho \omega^2 R_{disc}^3}{\sigma} \quad (2-17)$$

$$\frac{d_p}{R_{disc}} = 6,28 Re^{0,21} Oh^{0,92} We^{-0,26} \quad (2-18)$$

Von Mizuochi et al. (2001) wird die Produktion von großen Schlackepartikel (0,8 mm bis 10 mm) mit Hilfe von Becherwerkzeugen mit unterschiedlich hohen Becherwänden untersucht. Zusätzlich wird ein Düsenring um das Schleuderwerkzeug angeordnet, aus dem heiße Luft ausströmt und die Tropfenbildung fördern soll. Die Becherhöhe soll gering gehalten werden. Bei Erhöhung des Gasflusses werden kleinere Partikel produziert. Es wird berichtet, dass Partikel mit weniger als 6 mm eine deutlich höhere Sphärizität aufweisen. Eine Erhöhung der Umdrehungsgeschwindigkeit, also eine

Produktion von kleineren Partikeln, produziert eine engere Partikelgrößenverteilung. Die Form der Partikel kann über die Parameter Schlackenviskosität, Umdrehungsgeschwindigkeit und Gasfluss kontrolliert werden.

Im Patent von Emile (1970) werden Werkzeuge für die Herstellung von Glasperlen mit Durchmessern von 280 μm bis 3 mm vorgeschlagen. Eine hohe Sphärizität kann nur mit Gläsern mit dynamischen Viskositäten kleiner als 100 P (= 10 Pa s) erreicht werden. Die Auftrefftemperatur des Glasstrahls muss ausreichend hoch sein, um eine Erstarrung am Werkzeug verhindern zu können. Außerdem muss die Viskosität beim Abreißen der Strähnen noch ausreichend niedrig sein, um den Verrundungsprozess, hervorgerufen durch die Oberflächenspannung, nicht zu unterbinden.

3 Beschreibung der Stoffsysteme

3.1 Aluminiumsilikatschlacke

Die Schlacke, die für die Herstellung der Schlackepartikel verwendet wird, ist eine Aluminiumsilikatschlacke. Die temperaturabhängigen Stoffdaten, Oberflächenspannung und Dichte der Schlackenschmelze werden mit Modellen abgeschätzt. Die dynamische Viskosität wird abgeschätzt und gemessen.

Die Dichte und die Oberflächenspannung werden mit dem Modell nach Priven (2000) abgeschätzt. Die dynamische Viskosität wird durch ein Modell nach Shaw (1972) abgeschätzt. Die abgeschätzten Werte sind in Tab. 3-1 und die Messkurve in Abb. 3-1 dargestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Messwerte verwendet, die durch eine Gerade angenähert werden. Die Modellberechnungen und die Messungen wurden durch den Projektpartner durchgeführt und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Tab. 3-1: Übersicht der berechneten Stoffdaten der Schlackenschmelze (Daten vom Projektpartner bereitgestellt)

Temperatur [°C]	Dichte [kg/m ³]	Oberflächenspannung [N/m]	dyn. Viskosität [Pas]
1200	2791		0,397
1300		0,3926	0,220
1400	2753	0,3887	0,120



Abb. 3-1: Messung der dynamischen Viskosität der in dieser Arbeit verwendeten Schlacke als Funktion der Temperatur (Messdaten vom Projektpartner bereitgestellt)

3.2 Glycerin-Wasser-Gemisch

Ein Gemisch aus Glycerin und Wasser wird als Flüssigkeit am Versuchsstand verwendet, um den Schleuderprozess im kalten Zustand beobachten und Einflussparameter beschreiben zu können.

Propan-1,2,3-triol mit dem Trivialnamen Glycerin ist ein dreiwertiger Alkohol (siehe Abb. 3-2), der komplett mischbar mit Wasser und Ethanol, aber unmischbar mit Kohlenwasserstoffen ist. Die Dichte und die dynamische Viskosität sinken mit steigender Temperatur und Zugabe von Wasser. Die Oberflächenspannung ist leicht geringer als die von Wasser. Der Siedepunkt von reinem Glycerin liegt bei 290 °C. (Takamura et al., 2012)

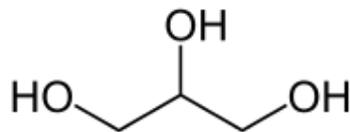


Abb. 3-2: Strukturformel Glycerin

Das in dieser Arbeit verwendete Glycerin stammt vom Lieferanten Brenntag Austria GmbH und besitzt eine Reinheit von 99,5 w%. (Brenntag, 2017)

Die Stoffdaten für das Glycerin-Wasser-Gemisch, die Dichte (Abb. 3-3), die Oberflächenspannung (Abb. 3-4) und die dynamische Viskosität (Abb. 3-5) werden in Takamura et al. (2012) für verschiedene Temperaturen und Zusammensetzungen beschrieben. Für die Technikumsversuche werden die experimentell ermittelten Stoffdaten verwendet. Zwischen den Messwerten wird linear interpoliert.

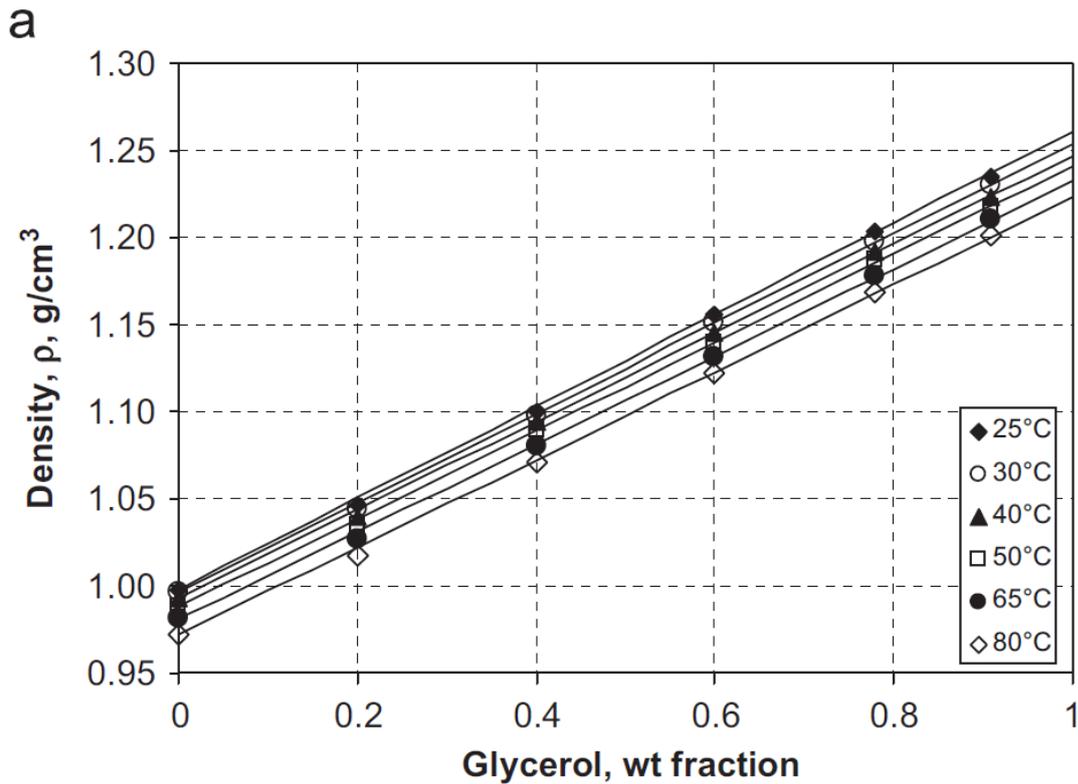


Abb. 3-3: Dichteverlauf eines Glycerin-Wasser-Gemisches als Funktion des Glyceringehaltes in w% (Takamura et al., 2012)

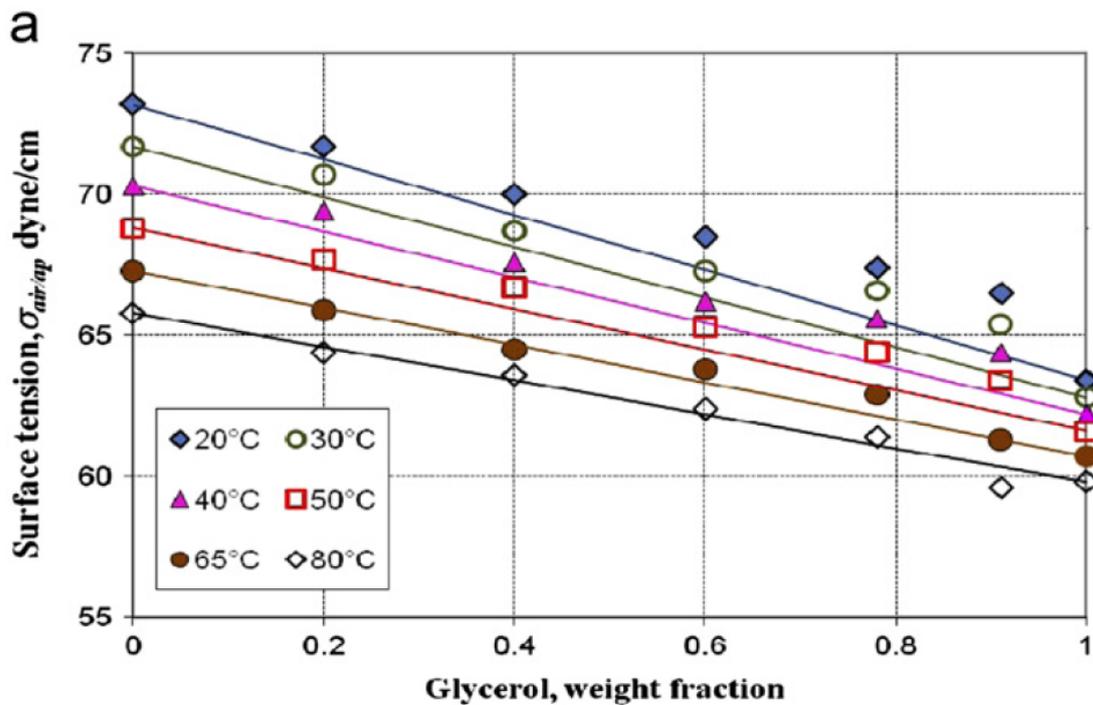


Abb. 3-4: Oberflächenspannungsverlauf eines Glycerin-Wasser-Gemisches als Funktion des Glyceringehaltes in w% (Takamura et al., 2012)

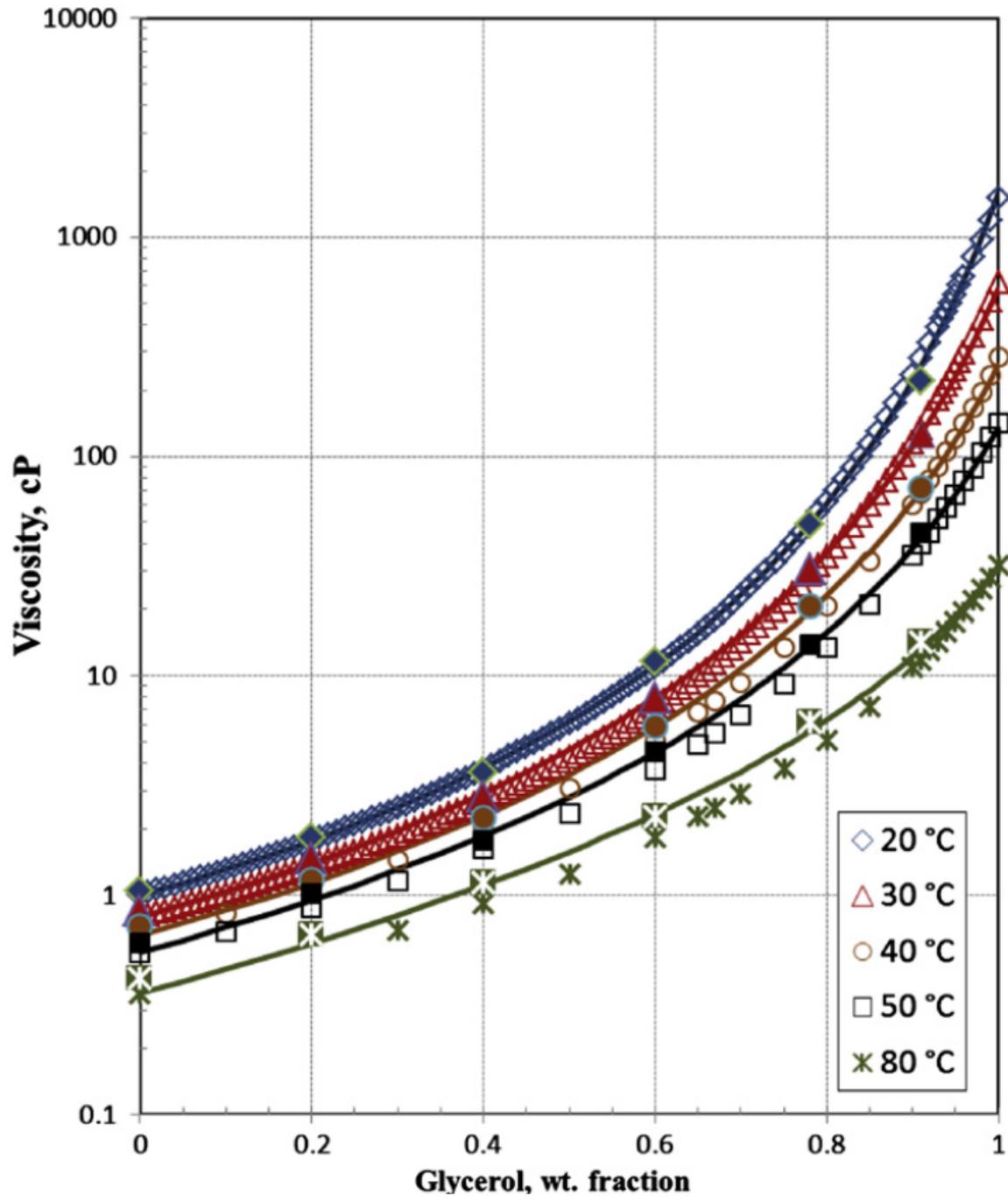


Abb. 3-5: Verlauf der dynamischen Viskosität eines Glycerin-Wasser-Gemisches als Funktion des Glyceringehaltes in w% bei 20, 30, 40, 50 und 80 °C. Offene Symbole sind Literaturwerte, ausgefüllte Symbole sind gemessene Werte. (Takamura et al., 2012)

4 Charakterisierung des Produktionsprozesses

In diesem Kapitel wird der Produktionsprozess charakterisiert. Die Schleuderwerkzeuge, die Temperaturverteilung am und rund um das Werkzeug, der Temperaturverlauf des Schlackenstrahls, die Strahlenbildung am Schleuderwerkzeug und die Einflüsse auf die Partikelqualität werden beschrieben.

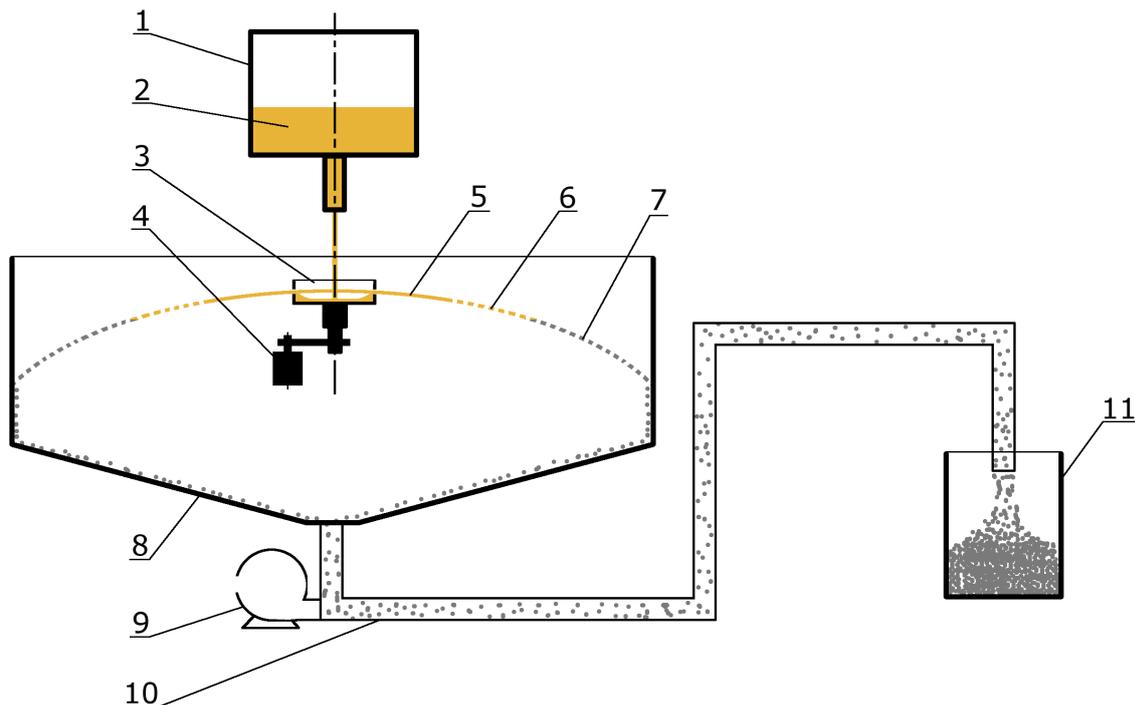


Abb. 4-1: Schematische Darstellung der Produktionsanlage

1) Ofen, 2) Schlacke, 3) Schleudertrommel, 4) Antriebsmotor, 5) Schlackeligamente, 6) Schlacketrophen, 7) Schlackepartikel, 8) Auffangwanne, 9) Gebläse, 10) pneumatisches Transportsystem, 11) Sammelbehälter

Die Produktion der Schlackepartikel erfolgt auf zwei Öfen, Ofen 3 und Ofen 4. Der Aufbau ist in Abb. 4-1 schematisch dargestellt. Die Unterschiede der beiden Öfen sind hauptsächlich der Durchsatz und die Größe der Auffangwannen. Der Ofen 3 wird mit einem Durchsatz von ca. 2000 g/min, der Ofen 4 von ca. 3000 g/min betrieben. Die Auffangwanne des Ofen 4 ist erheblich größer. Jedoch ist der Abtransport der Partikel schwieriger, da der Wannenboden eingebault ist und Partikel darin liegen bleiben. In der Auffangwanne des Ofen 3 werden die Partikel sehr gut ausgeschleust. Die Partikel werden aus beiden Auffangwannen über ein pneumatisches Fördersystem abtransportiert. Dieses System ist bei Ofen 4 deutlich länger im Vergleich zu

Ofen 3. Die Zeit zwischen der Produktion der Partikel am Schleuderwerkzeug und der Probenahmestelle ist somit bei Ofen 4 deutlich länger. Daraus lässt sich eine exaktere Probenahme an Ofen 3 feststellen.

Im Gegensatz zum Standardprozess wird die Trommel angewärmt, um diese auf einer ausreichend hohen Temperatur zu halten. Die Anwärmung erfolgt hauptsächlich an der Trommelwand.

4.1 Werkzeuge

Als Schleuderwerkzeuge kommen Schleudertrommeln (siehe Abb. 4-2) mit unterschiedlichen Außendurchmessern, Lochdurchmessern und Anzahl an Löchern zur Anwendung. Auf eine Scheibe wird ein 10 mm langes U-förmiges Rohr aufgeschweißt, in das die Löcher gebohrt sind. Die Trommelaußendurchmesser reichen von 60 bis 120 mm. Die Anzahl der Löcher ist mit 32, bei einer einzigen mit 64 festgelegt. Zur Anwendung kommen Bohrungsdurchmesser von 0,3 bis 2,7 mm. Die Löcher sind händisch und ohne Führung gebohrt. Jede Trommel ist mit einer Werkzeugnummer versehen.

Die Kennzeichnung der verschiedenen Trommeln erfolgt in dieser Arbeit in einheitlicher Form. Als Beispiel wird folgende Bezeichnung erklärt: „D60, 32x0,9“ bedeutet: Trommelaußendurchmesser (=Außendurchmesser der Trommelwand) von 60 mm, Bohrungsdurchmesser von 0,9 mm bei 32 am Umfang gleichverteilten Löchern (Teilung 32 entspricht $11,25^\circ$ zwischen den Löchern).

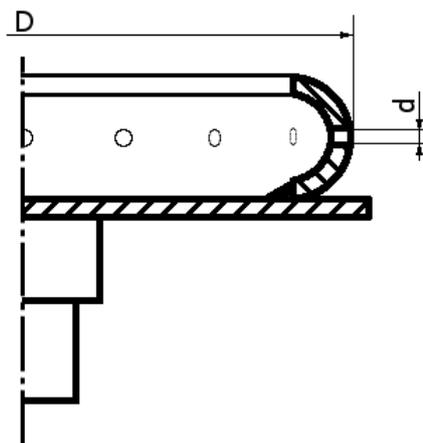


Abb. 4-2: Skizze einer Schleudertrommel für den Produktionsprozess.
(D = Trommelaußendurchmesser, d= Lochdurchmesser)

4.2 Temperaturverteilung

Die Temperaturen im Schlackenstrang und am Werkzeug werden mit verschiedenen Messverfahren gemessen. Ein Platin-Rhodium Thermoelement wird für die Tempera-

turmessung im Strang nach dem Austreten aus dem Ofen durch die Düse eingesetzt. Mit Hilfe einer Wärmebildkamera Optris PI 640 G7 (Datenblatt: Optris (2016)) mit einem 15°x11°-Objektiv wird die Temperaturverteilung am Werkzeug und im Schlackenstrang aufgenommen. Die gemessenen Werte können mit der kontinuierlichen Temperaturmessung mit Thermoelementen im Ofensystem verglichen werden.

Die Temperaturmessungen mit Hilfe des Thermoelements ergeben am Düsenaustritt des Ofen 3 1325 °C und des Ofen 4 1347 °C. Diese Messwerte stimmen gut mit der Ofentemperatur 1 im Ofensystem überein. Da der Schlackenstrang einen Durchmesser von ca. 2 bis 3 mm und das Thermoelement einen Durchmesser von ungefähr 1 mm besitzt, kann eine große Beeinflussung durch das Messsystem festgestellt werden. Die gemessenen Temperaturen sind somit mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Wärmebildkamera Optris PI 640 G7 nimmt Wärmebilder im Temperaturbereich von 200 bis 1500 °C mit einer Auflösung von 640x120 px bei einer Bildfrequenz von 125 Hz auf (Optris, 2016). Um den heißen Schlackenstrang auch von größerer Entfernung aufnehmen zu können, wird ein 15°x11°-Objektiv verwendet. Mit diesem Objektiv wird eine Brennweite von 41 mm und dadurch eine ausreichend hohe Auflösung bis zu einer Entfernung von 3 bis 4 m erreicht. Die Wärmebilder (Abb. 4-4, 4-7 und 4-8) wurden von der Oberkante der Auffangwanne (siehe dazu Abb. 4-3) aufgenommen, was einem Abstand zum Schlackenstrang von ungefähr 3 m entspricht. Die Temperaturprofile des Schlackenstrangs sind in Abb. 4-4 bis 4-6 ersichtlich. Die maximale Schlackentemperatur im Strang beträgt 1319 °C. Zum selben Zeitpunkt wird eine Ofentemperatur 1 von 1339 °C gemessen. Das legt eine geringe Abweichung der Wärmebildkamera zur kontinuierlichen Messung im Ofensystem nahe.

Aus dem Temperaturlängsprofil (Bild 4-5) kann eine Abkühlung entlang des Strömungsverlaufs beobachtet werden. Der Temperaturverlauf ist nicht kontinuierlich. Es kann ein Pulsieren festgestellt werden. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass im Strangverlauf eine Tropfenbildung auftritt. Dadurch entstehen Wellen, die Druckminima und -maxima hervorrufen und zu Anhäufungs- und Verarmungsstellen führen. Die Verarmungsstellen kühlen schneller aus, was sich in den Temperaturminima im Profil erkennen lässt. Dieser Effekt ist ähnlich dem Tropfenbildungsmechanismus beim Abschleudern von Strähnen am Rand eines Schleuderwerkzeugs. Der Tropfenbildungsmechanismus von abgeschleuderten Strähnen ist in Kap. 2.2 und in Wang et al. (2016) beschrieben.

Aus dem Temperaturquerprofil an der Düse (Abb. 4-6) ist die maximale Temperatur von 1319 °C ersichtlich. Die Temperatur nimmt kontinuierlich bis zum Radius von ca. 5 mm ab, wo eine Abflachung beobachtet werden kann. Außerhalb eines Radius von 7 mm fällt die Temperatur wieder kontinuierlich ab.

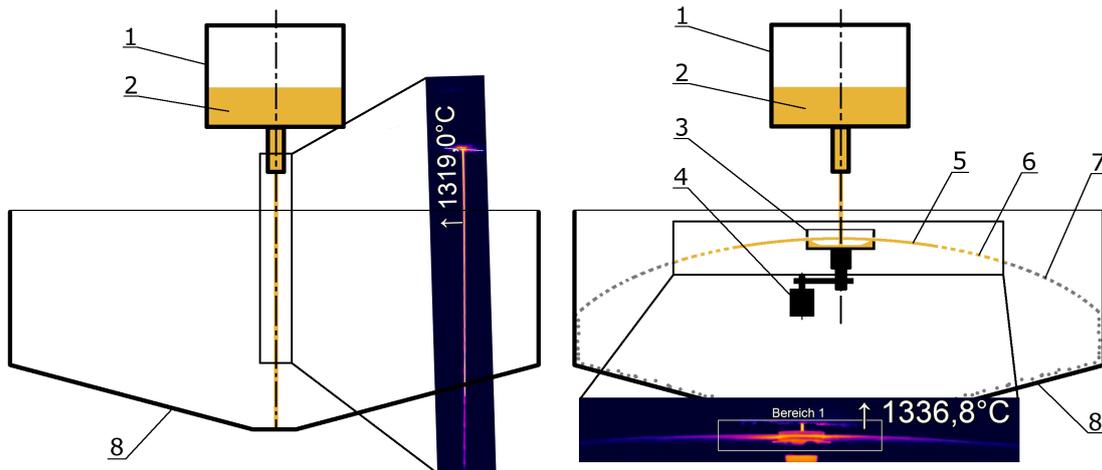


Abb. 4-3: Schematische Darstellung der Position der Wärmebildaufnahmen.
linkes Bild: Position der Aufnahme des Schlackenstrangs in Abb. 4-4,
rechtes Bild: Position der Trommelaufnahmen in Abb. 4-7 und 4-8
 1) Ofen, 2) Schlacke, 3) Schleudertrommel, 4) Antriebsmotor, 5) Schlackeligamente, 6) Schlacketrophen, 7) Schlackepartikel, 8) Auffangwanne

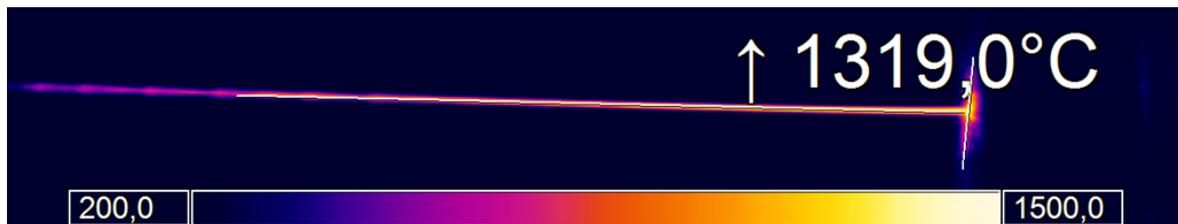


Abb. 4-4: Wärmebild des Schlackenstrangs mit Kennzeichnung des Stranglängsprofils und Querprofils an der Düse, eingezeichnet als weiße Linien (Positionsskizze der Aufnahme siehe Abb. 4-3)

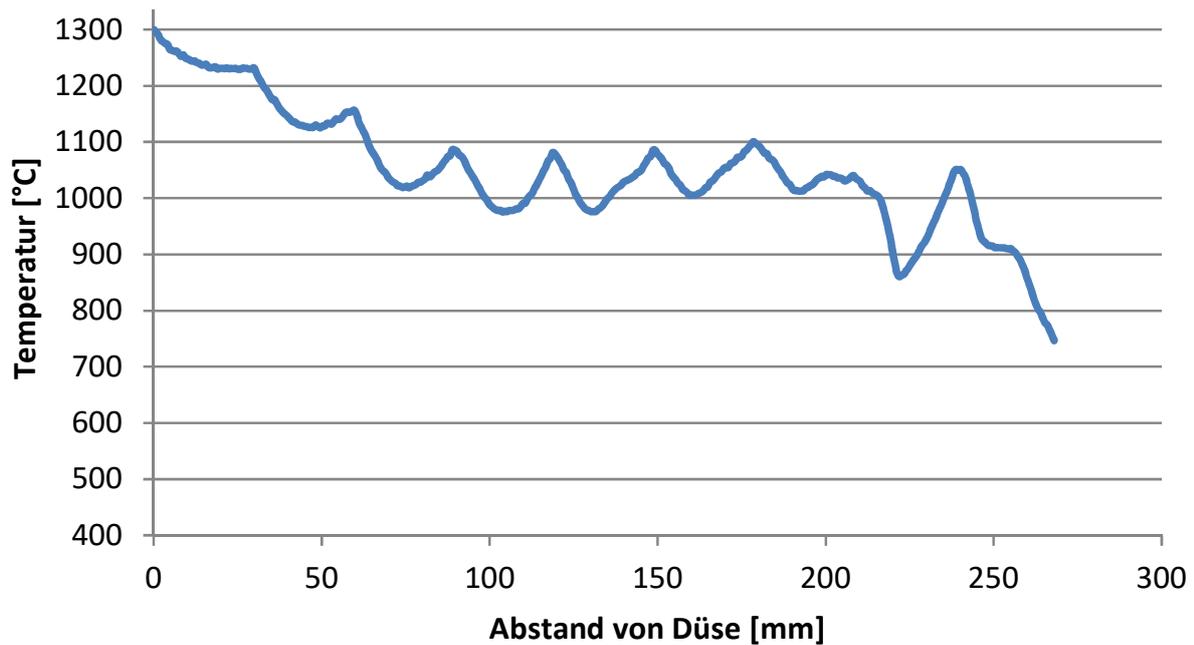


Abb. 4-5: Temperaturprofil am Schlackenstrang: Längsprofil (Positionsskizze des Profils siehe Abb. 4-4)

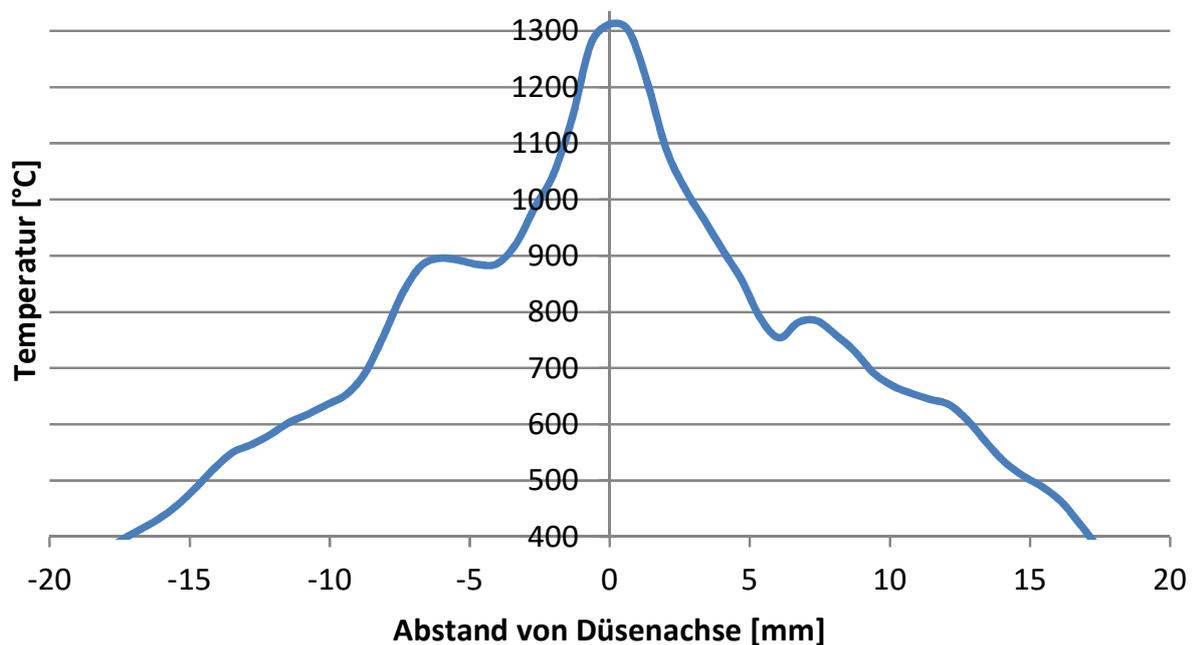


Abb. 4-6: Temperaturprofil am und neben dem Schlackenstrahl: Profil quer zur Strangachse an der Düse (Positionsskizze des Profils siehe Abb. 4-4)

Die Wärmebilder der Schleudertrommeln sind in Abb. 4-7 und Abb. 4-8 dargestellt. Daraus ist erkenntlich, dass der heißeste Punkt mit über 1330 °C der Schlackenstrang

direkt an der Düse ist. Bei der in Abb. 4-7 dargestellten gewölbten Trommel ist eine relativ homogene Temperaturverteilung über die gesamte Trommel erkennbar. Im Gegensatz dazu ist die Temperatur, bei der in Abb. 4-8 dargestellten neuen Trommelgeometrie mit Überstand und senkrechter Wand (siehe auch Kap. 6.4.1), sehr inhomogen. Oberhalb und unterhalb der Lochreihe ist eine Temperatur von ungefähr 800 °C feststellbar. Die Temperatur, der aus den Löchern austretenden Schlacke, ist für beide Trommelgeometrien in etwa gleich.

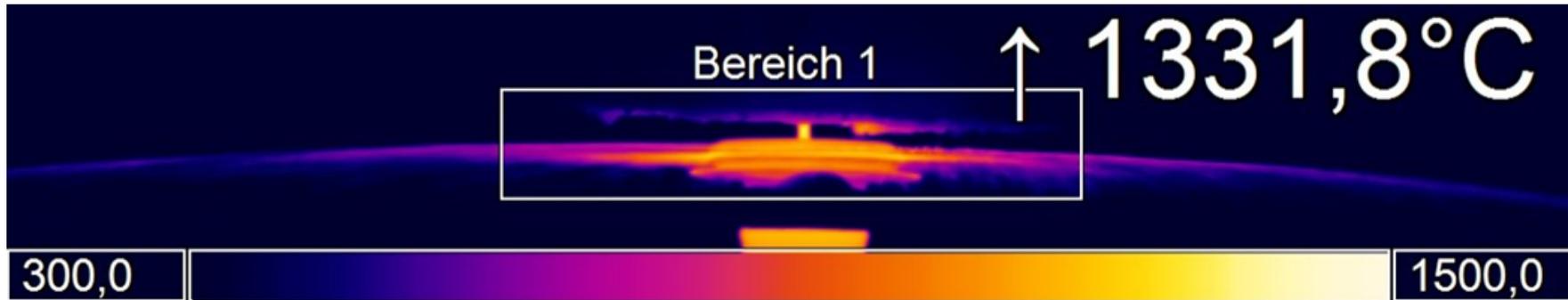


Abb. 4-7: Wärmebild der Trommel 347 (D60, 32x2,7; alte Geometrie) (Positionsskizze der Aufnahme siehe Abb. 4-3)

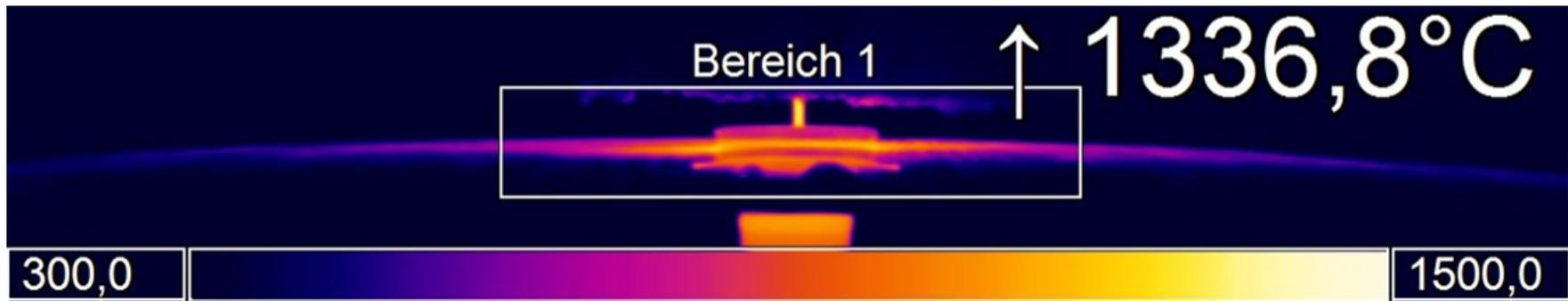


Abb. 4-8: Wärmebild der Trommel 350 (D58, 36x1; neue Geometrie) (Positionsskizze der Aufnahme siehe Abb. 4-3)

4.3 Strahlenbildung und Partikelablösung

Die Strahlenbildung und Partikelablösung im Produktionsprozess ist in Abb. 4-10 ersichtlich. Der Mechanismus erfolgt in denselben Schritten, wie von Wang et al. (2016) für Wasser und Verwendung eines Schleudertellers (siehe auch Kap. 2.2) beschrieben. Es kann beobachtet werden, dass für die Schleudertrommel die Anzahl der Strahlen durch die Anzahl der Löcher festgelegt ist. Das Austreten der Strahlen aus den Löchern ist abhängig vom Lochdurchmesser und dem Durchsatz bzw. der Füllmenge der Trommel. Der Prozess wird durchgängig im Ligamentregime betrieben, solange kein Überlaufen der Trommel auftritt.

Bei wenig Durchsatz und großen Löchern können die Löcher nicht vollständig benetzt werden. Die Schlacke läuft aus den Löchern heraus, und die Strahlen setzen hinter oder unter dem Loch an. In manchen Fällen bildet ein Loch auch zwei Strahlen aus, die ober- und unterhalb des Loches ansetzen.

Bei steigendem Durchsatz können immer mehr Löcher vollständig gefüllt werden. Diese Löcher benetzen vollständig und bilden genau eine Strähne im Lochmittelpunkt aus. Die Unterscheidung zwischen vollständig und nicht vollständig benetzten Löchern kann aufgrund der Strahlenform erfolgen. Strahlen aus nicht vollständig benetzten Löchern besitzen einen kleineren Austrittswinkel (ca. 40 bis 60°) als Strahlen aus vollständig benetzten Löchern (ca. 80 bis 90°). Der Unterschied ist in Abb. 4-9 dargestellt.

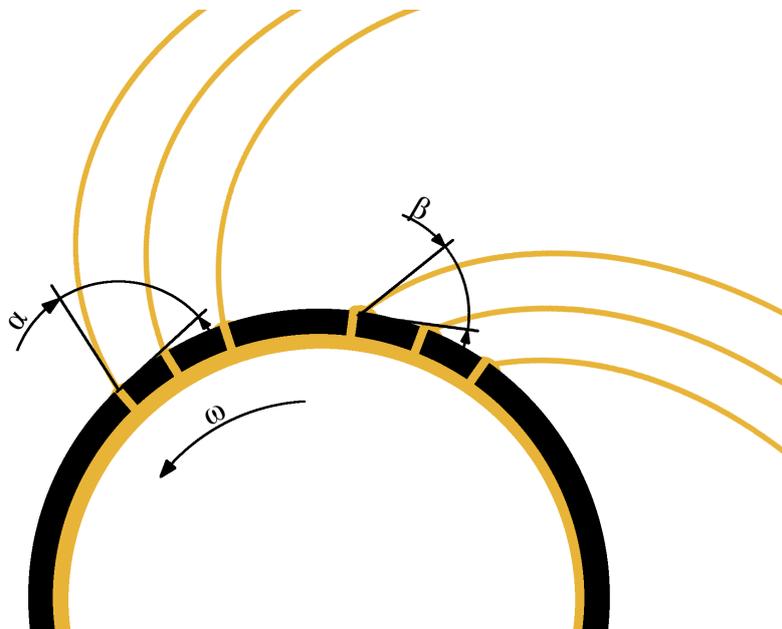


Abb. 4-9: Skizze der Austrittswinkel der Schlackestrahlen bei vollständig benetzten Löchern ($\alpha = 80^\circ$ bis 90°) und nicht vollständig benetzten Löchern ($\beta = 40^\circ$ bis 60°).

Bei weiter steigendem Durchsatz füllt sich die Trommel immer weiter bis zu dem Punkt, wo die Löcher die Schlacke nicht mehr vollständig aufnehmen können und die Trommel überläuft. Beim Überlaufen entstehen zusätzliche Strähnen an der Oberkante der Trommel. Da an diesem Punkt bereits eine Abkühlung der Schlacke erfolgt ist, sind die Stoffparameter verändert. Es tritt somit auch eine veränderte Strähnenbildung auf. An der Trommeloberkante bestimmen nicht die Löcher die Anzahl der Strähnen. Die Ablösung erfolgt, abhängig vom Durchsatz, der Drehzahl und vom Trommeldurchmesser, in den verschiedenen Tropfenbildungsregimen (siehe Kap. 2.2). Für den Tropfenbildungsmechanismus an der Trommeloberkante ist auch der Rundlauf der Trommel maßgeblich. Ein schlechter Rundlauf verursacht ein einseitiges Überlaufen. Die dadurch produzierten Partikel besitzen äußerst schlechte Qualität.

Die Bohrungen in der Trommel bestimmen die Position und den Austrittswinkel der Strähnen. Bohrungen, die nicht in derselben Ebene angeordnet sind, erzeugen einen unruhigen Tropfenschirm, da die Strähnen in unterschiedlicher Höhe gebildet werden. Der Bohrungswinkel beeinflusst den Austrittswinkel der Strähnen und somit den Tropfenschirm. Zusätzlich wird der Tropfenbildungsmechanismus beeinflusst, da das Austreten der Schmelze in unterschiedlichen Zuständen erfolgt. Die Unterschiede in den Strähnen beeinflussen die produzierten Partikel, vor allem die Breite der Partikelgrößenverteilung.

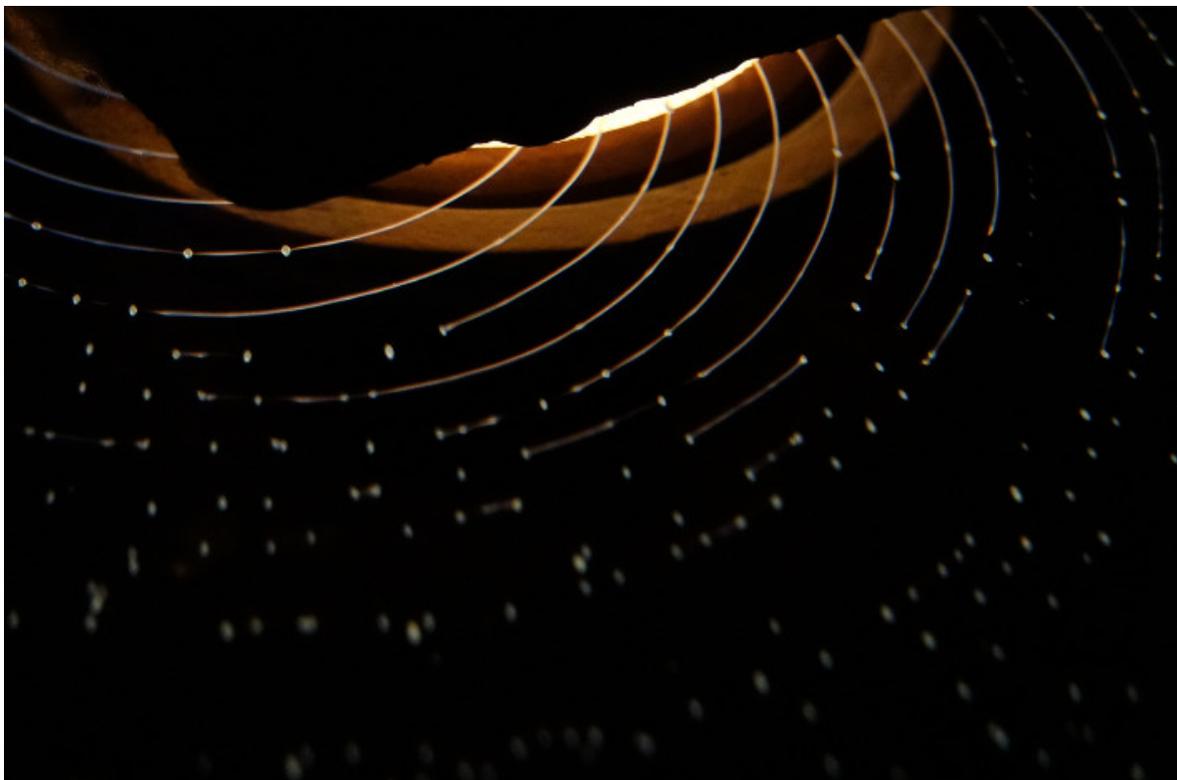


Abb. 4-10: Strähnenbildung bei Trommel D60, 32x2

4.4 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung der produzierten Schlackepartikel stellt mit ihrem mittleren Durchmesser d_{50} die eigentliche Zielgröße im Prozess dar. Zusätzlich ist das Ziel eine möglichst einheitliche Größe herzustellen, was gleichbedeutend mit einer möglichst engen Partikelgrößenverteilung ist. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die absolute Streuung abhängig von der mittleren Partikelgröße ist. Bei der Produktion von großen Partikeln wird immer eine breitere Verteilung erhalten.

4.5 Partikelgeometrie

Die Partikelqualität (Abb. 4-11) lässt sich durch unterschiedliche Parameter charakterisieren. Das wichtigste Qualitätsmerkmal ist die Rundheit der Partikel, zusätzlich kann die Oberflächenbeschaffenheit herangezogen werden.

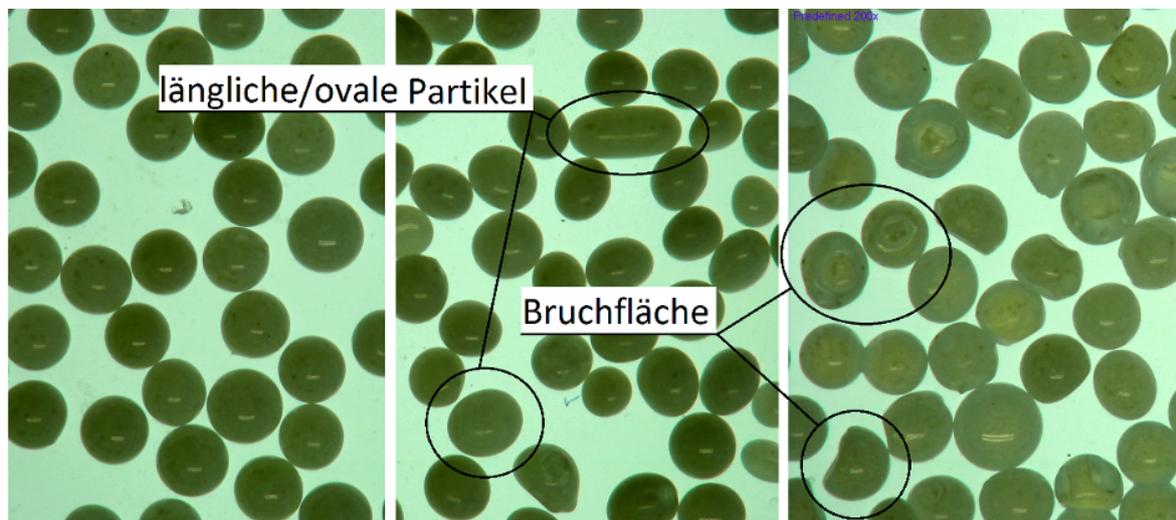


Abb. 4-11: Beschreibung der verschiedenen Partikelfehler

Die Rundheit der Partikel ist ein wichtiges Qualitätskriterium. Als Kennzahl wird die Sphärizität (Glg. 4-2) oder das Verhältnis von Partikelbreite zu -länge verwendet. Die Sphärizität $\psi (= SPH)$ ist als Verhältnis der Oberfläche einer volumsäquivalenten Kugel zur Oberfläche des Körpers definiert. Eine perfekte Kugel besitzt die Sphärizität $\psi = 1$ und das Verhältnis $b/l = 1$, was als Idealqualität angesehen werden kann.

$$d_{V,Partikel} = \sqrt[3]{\frac{6 V_{Partikel}}{\pi}} \quad (4-1)$$

$$\psi = \frac{d_{V,Partikel}^2 \pi}{A_{Partikel}} = \frac{\pi^{1/3} (6 V_{Partikel})^{2/3}}{A_{Partikel}} \quad (4-2)$$

Im Prozess werden kugelförmige, scheibenförmige und nadelförmige Partikel produziert. Scheibenförmige Partikel entstehen, wenn noch weiche Tropfen an der Wand der Auffangwanne anstoßen. Nadelförmige Partikel treten auf, wenn der Verrundungsprozess nicht abgeschlossen werden kann, da die Abkühlung der Strähnen den Prozess vor der vollständigen Verrundung einfriert. Derselbe Mechanismus ist Grund für Bruchflächen an der Partikeloberfläche. Es bleibt am Partikel ein dünner Schwanz hängen, der abbricht und eine Bruchstelle zurücklässt. Diese Bruchstelle kommt in unterschiedlichen Ausprägungen vor und kann von kaum sichtbar bis zur gesamten Partikelgröße auftreten (siehe dazu Abb. 4-11, rechtes Bild).

5 Versuchsdurchführung Technikum

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung im Technikum beschrieben. Die Ergebnisse und Folgerungen für den Produktionsprozess werden diskutiert.

5.1 Aufbau der Technikumsanlage

Der Versuchsstand zur Durchführung der Glycerin-Wasser-Experimente ist, wie in Abb. 5-1 dargestellt, folgendermaßen aufgebaut: Ein Elektromotor treibt über einen Riementrieb die Werkzeugachse an. Diese ragt über das Auffangbecken, wo das Schleuderwerkzeug aufgeschraubt wird. Über die Antriebsfrequenz des Elektromotors wird die Werkzeugdrehzahl eingestellt. Zusätzlich kann über ein Drehzahlmessgerät die Drehzahl des Werkzeugs gemessen werden.

Oberhalb des Schleuderwerkzeugs ist die Zuführung des Glycerin-Wasser-Gemisches angebracht. Aus einem 25 l Vorratsbehälter fließt über einen Kugelhahn das Gemisch in den Düsenbehälter mit ca. 2 l Volumen. Über eine Düse, die ebenfalls mittels Kugelhahn reguliert werden kann, fließt das Gemisch zentrisch auf das Schleuderwerkzeug. Der Durchfluss wird über das Einlegen von Plättchen in die Düse eingestellt. Die Plättchen besitzen verschieden große Bohrungen ($\varnothing 1,8$ mm bis $\varnothing 3$ mm). Der Flüssigkeitsstand im Düsenbehälter wird konstant gehalten. Dafür ist die Einstellung des Kugelhahns am Vorratsbehälter anzupassen.

Sobald die Flüssigkeit auf das Schleuderwerkzeug auftrifft, wird sie zerstäubt und landet im Auffangbecken. Von dort fließt das Gemisch in Auffangkübel, um für einen neuen Versuchsdurchlauf in den Vorratsbehälter umgefüllt werden zu können. Im Auffangbecken ist die Kamera für die Tropfenfotografie mittels Stativ fest aufgestellt. Für die Aufnahme von Bildern des Schleuderwerkzeugs und der Strähnenbildung wird die Kamera schräg auf das Werkzeug gerichtet. Zusätzlich wird für die Erhöhung des Kontrastes eine Papierscheibe mit aufgedruckten Abstandsringen auf dem Schleuderwerkzeug angebracht (siehe Abb. 5-1, oben). Für die Aufnahme von Tropfenbildern für die Tropfengrößenverteilung wird die Kamera senkrecht zur Tropfenflugbahn in möglichst geringem Abstand zum Werkzeug und zu den Tropfen angeordnet. Um bei kurzer Belichtungszeit eine ausreichende Helligkeit und Kontrast der Tropfen erreichen zu können, wird der Bildhintergrund mit weißem Papier ausgelegt und eine zusätzliche Beleuchtung installiert.



Abb. 5-1: Bilder der Technikumsanlage und der eingespannten Schleudertrommel, unteres Bild: Schleudertrommel aus Stahl für die Versuche an der Technikumsanlage

5.1.1 Schleudertrommeln für die Technikumsanlage

Neben den vorhandenen Schleudertrommeln für die Produktionsanlage wurden für die Technikumsversuche neue Schleudertrommeln (siehe Abb. 5-1, unteres Bild) aus nichtrostendem Stahl hergestellt. Diese lassen sich einfacher, genauer und sehr viel günstiger produzieren. Vier verschiedene Stahltrommeln wurden in den Versuchen verwendet. Die Geometrie wurde als Schleudertrommel mit senkrechter Wand und Überstand zur Verhinderung des Überschwappens ausgeführt. Die Werkzeuge

wurden an einer Drehbank hergestellt, was einen ausgezeichneten Rundlauf gewährleistet, und mit Hilfe eines Teilapparates gebohrt. Damit konnte die Position und der Winkel der Bohrungen gleichmäßig hergestellt werden. Die Bohrungen wurden im 90°-Winkel zur Außenwand, also radial, ausgeführt. Folgende Stahltrommeln wurden verwendet: (angegeben als Außendurchmesser, LochanzahlxLochdurchmesser, Wanddicke)

- D60 mm, 30xd1 mm, l1,5 mm
- D60 mm, 30xd1 mm, l3,0 mm
- D60 mm, 30xd0,7 mm, l1,5 mm
- D60 mm, 15xd0,7 mm, l1,5 mm

Zusätzlich wurden Schleudertrommeln von der Produktionsanlage verwendet. Hier konnten nur Versuche mit unbenutzten Trommeln oder benutzten Trommeln mit großen Löchern durchgeführt werden, da kleine Bohrungen nach Einsetzen in der Produktionsanlage durch erstarrte Schlacke verstopft sind.

5.2 Tropfengrößenmessung

Die Fotografie der Tropfen wird mit Hilfe der Kamera Sony DSC-RX10M3 (Datenblatt: Sony (2017)) durchgeführt. Es werden folgende Parameter eingestellt:

- Brennweite: ca. 50 mm
- Blende: F5
- Lichtempfindlichkeit: ISO1600 - ISO2000
- Belichtungszeit: 1/20000 s bis 1/32000 s

Es wird auf die Flugbahn der Tropfen fokussiert.

Ein Objektmikrometer (Länge: 10 mm, Teilung: 0,1 mm) wird als Skala verwendet. Dazu wird das Objektmikrometer auf Position der Tropfenflugbahn gehalten und fotografiert. Damit ist es möglich in ImageJ einen Maßstab zu bestimmen und eine Umrechnung von Pixel auf Mikrometer durchzuführen.

Um eine ausreichende statistische Genauigkeit der Tropfengrößenverteilung erhalten zu können, sollten pro Messung einige hundert Tropfen fotografiert werden. Dazu wird die Kamera auf Serienbildaufnahme eingestellt.

Die Auswertung der Tropfenbilder erfolgt mit Hilfe des Bildbearbeitungstools ImageJ (ImageJ, 2017), in dem ein Makro (siehe Anhang Kap. 12, Programmierung nach Bailer (2006)) erstellt wurde. Dieses Makro führt folgende Schritte aus:

- Zuschneiden der Bilder auf die gut ausgeleuchteten Bereiche

- Komprimierung auf 8-bit Farbtiefe
- Speichern der komprimierten Dateien in einem eigenen Ordner
- Erhöhen des Kontrastes
- Umwandeln in Schwarz-Weiß-Bilder
- Erstellen einer Maske des ausreichend ausgestrahlten Bereichs
- Löschen der zu wenig ausgestrahlten Bereiche
- Öffnen des Skalenfotos und bestimmen der Umrechnung $px \rightarrow \mu m$
- Analysieren der bearbeiteten Bilder auf Tropfengröße und –form
- Ausgabe einer csv-Datei mit Einzeltropfenauswertung

Die Auswertung der Einzeltropfen wird verwendet, um in einer Excel-Datei eine Tropfengrößenverteilung zu erstellen. Dabei wird sowohl eine Summenverteilung Q , als auch eine Dichteverteilung q der Tropfen berechnet. Zusätzlich wird jede Verteilung basierend auf der Tropfenanzahl (Q_0 bzw. q_0), der projizierten Tropfenfläche (Q_2 bzw. q_2) und der Tropfenmasse (Q_3 bzw. q_3) ausgewertet und dargestellt. Der gesamte Auswertungsvorgang in ImageJ und in Excel ist in Abb. 5-2 dargestellt.

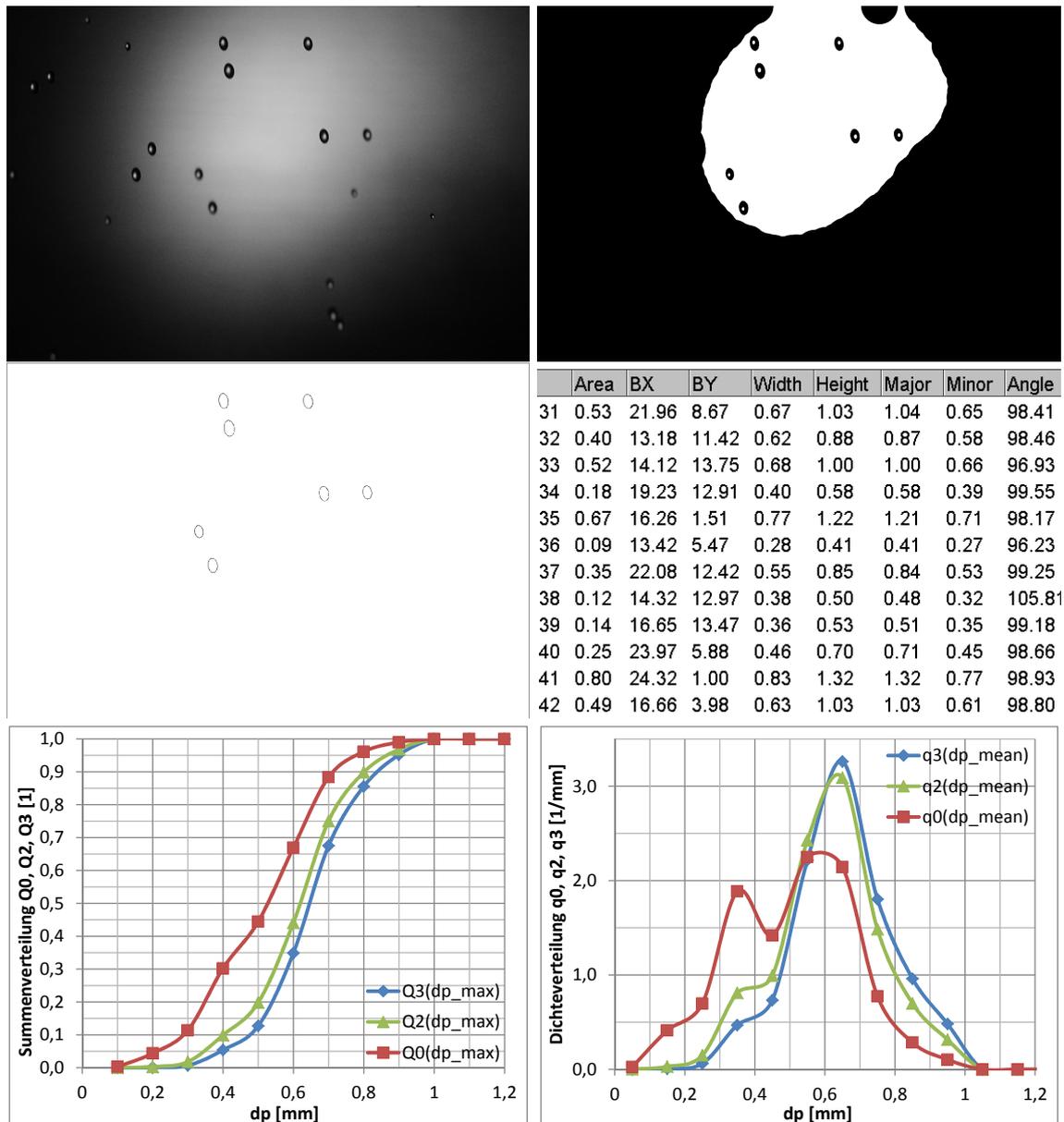


Abb. 5-2: Auswertevorgang der Tropfenbilder:

Jedes Tropfenfoto (oben links) wird in ImageJ in ein Schwarz-Weiß-Bild (oben rechts) umgewandelt. Dazu ist die richtige Einstellung des Kontrastes bzw. des Unterscheidungspunkts zwischen schwarzen und weißen Bereichen wichtig. Aus dem Schwarz-Weiß-Bild wird jeder Tropfen erkannt und als Ellipse gefittet (mitte links). Anschließend wird jeder Tropfen automatisch vermessen, sowohl in der tatsächlichen Form, als auch in der gefitteten Ellipsenform. Die Vermessung liefert eine Tabelle, in der jeder Tropfen mit seinen Abmessungen einzeln eingetragen ist. Aus dieser Einzeltropfenauswertung (mitte rechts) wird in Excel eine Summenverteilung Q (unten links) und eine Dichteverteilung q (unten rechts) der Tropfen erstellt. Die Verteilungen werden basierend auf der Tropfenanzahl (Q_0 bzw. q_0), der projizierten Tropfenfläche (Q_2 bzw. q_2) und der Tropfenmasse (Q_3 bzw. q_3) ausgewertet.

5.3 Abbildung der Produktionsanlage durch die Ähnlichkeitstheorie

Die Ähnlichkeitstheorie lässt die Abbildung der Produktionsanlage auf die Technikumsanlage zu. Dies geschieht durch Anpassung der dimensionslosen Kennzahlen. Die Werte für die beiden Anlagen müssen dabei gleich sein. In Kitamura und Takahashi (1992) werden dafür drei Kennzahlen, die Reynolds-, Weber- und Ohnesorge-Zahl genannt. Angewendet werden diese in Dhirhi et al. (2016) bei der Abbildung von Schleudertellern als Schleuderwerkzeuge. In dieser Arbeit wird diese Vorgehensweise auf Schleudertrommeln ausgeweitet.

Die drei dimensionslosen Kennzahlen Re , We und Oh (Definitionen siehe Kap. 2.1.1) werden für den Produktionsprozess (Index $prod$) und Technikumsprozess (Index $tech$) gleichgesetzt. Daraus können die Verhältnisse der Radien, Umdrehungsgeschwindigkeiten und Volumenströme berechnet werden.

$$Re_{prod} = Re_{tech} \quad \Rightarrow \quad \frac{\dot{V}_{prod}}{\dot{V}_{tech}} = \frac{\rho_{tech} \eta_{prod} R_{prod}}{\rho_{prod} \eta_{tech} R_{tech}} \quad (5-1)$$

$$We_{prod} = We_{tech} \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega_{prod}}{\omega_{tech}} = \sqrt{\frac{\rho_{tech} \sigma_{prod}}{\rho_{prod} \sigma_{tech}} \left(\frac{R_{tech}}{R_{prod}} \right)^3} \quad (5-2)$$

$$Oh_{prod} = Oh_{tech} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_{prod}}{R_{tech}} = \frac{\eta_{prod}^2 \rho_{tech} \sigma_{tech}}{\eta_{tech}^2 \rho_{prod} \sigma_{prod}} \quad (5-3)$$

Als Voraussetzung für die Abbildung gilt die Gleichheit der Trommelradien ($R_{tech} = R_{prod}$), um die Produktionstrommeln auch auf der Technikumsanlage verwenden zu können. Daraus kann die Bedingung für Glg. 5-3 mit $\frac{R_{prod}}{R_{tech}} = 1$ abgeleitet werden. Mit Hilfe des Excel-Solvers werden die Technikumsbedingungen, also die erforderliche Stoffzusammensetzung des Glycerin-Wasser-Gemischs bei gegebener Temperatur auf diese Nebenbedingung angepasst. Die erforderlichen Werte für den Volumenstrom und die Umdrehungsgeschwindigkeit können anschließend aus den Verhältnissen $\frac{\omega_{prod}}{\omega_{tech}}$ (Glg. 5-2) und $\frac{\dot{V}_{prod}}{\dot{V}_{tech}}$ (Glg. 5-1) berechnet werden. In Tab. 5-1 können diese Werte abgelesen werden. Die Stoffwerte für die Produktionsanlage sind dabei mit $\rho_{prod} = 2753 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{prod} = 5E - 02 \text{ Pa s}$ und $\sigma_{prod} = 0,3887 \text{ N/m}$ angenommen. Die Stoffdaten für das Glycerin-Wasser-Gemisch stammen aus Takamura et al. (2012). Sowohl auf der Produktionsanlage, als auch auf der Technikumsanlage wird ein

Massenstrom anstatt eines Volumenstroms gemessen. Daher wird das Verhältnis der Volumenströme in ein Massenstromverhältnis umgerechnet. (Glg. 5-4)

$$\frac{\dot{m}_{prod}}{\dot{m}_{tech}} = \frac{\dot{V}_{prod} \rho_{prod}}{\dot{V}_{tech} \rho_{tech}} \quad (5-4)$$

Tab. 5-1: Stoffwerte Glycerin-Wasser-Gemisch bei verschiedenen Zusammensetzungen (Stoffdaten aus Takamura et al. (2012)) und berechnete Verhältnisse für Trommelradius, Umdrehungsgeschwindigkeit, Volumenstrom und Massenstrom

	Glycerin [w%]	ρ [kg/m ³]	η [Pa s]	σ [N/m]	$\frac{R_{prod}}{R_{tech}}$ [1]	$\frac{\omega_{prod}}{\omega_{tech}}$ [1]	$\frac{\dot{V}_{prod}}{\dot{V}_{tech}}$ [1]	$\frac{\dot{m}_{prod}}{\dot{m}_{tech}}$ [1]
T=20 °C	60,94	1158,5	1,361E-02	6,84E-02	1	1,546	1,546	3,67
T=23 °C	61,66	1158,9	1,357E-02	6,80E-02	1	1,551	1,551	3,68
T=24 °C	61,95	1159,2	1,356E-02	6,79E-02	1	1,552	1,552	3,69
T=25 °C	62,26	1159,5	1,355E-02	6,78E-02	1	1,554	1,554	3,69
T=30 °C	64,47	1162,7	1,350E-02	6,71E-02	1	1,564	1,564	3,70

Für die Versuche wurde ein Glycerin-Wasser-Gemisch mit einem Glyceringehalt von 61,66 w% hergestellt. Das Glycerin mit 99,5 w% wurde dazu mit Leitungswasser auf die erforderliche Zusammensetzung verdünnt.

Beispielhaft wird eine Übertragung für Ofen 4 (Durchsatz: 3000 g/min) bei einer Drehzahl von 2000 U/min durchgeführt. Die Umrechnung erfolgt mit den Umrechnungswerten für 23 °C und 61,66 w% Glyceringehalt laut Tab. 5-1. Die Trommelradien sind auf der Produktions- und Technikumsanlage gleich.

$$\frac{\omega_{prod}}{\omega_{tech}} = 1,551 = \frac{n_{prod}}{n_{tech}} \rightarrow n_{tech} = \frac{n_{prod}}{1,551} = \frac{2000 \text{ U/min}}{1,551} = 1289,5 \frac{\text{U}}{\text{min}} \quad (5-5)$$

$$\frac{\dot{m}_{prod}}{\dot{m}_{tech}} = 3,68 \rightarrow \dot{m}_{tech} = \frac{\dot{m}_{prod}}{3,68} = \frac{3000 \text{ g/min}}{3,68} = 815,2 \frac{\text{g}}{\text{min}} \quad (5-6)$$

Die Technikumsanlage muss für die Ähnlichkeit zu Ofen 4 mit einem Massenstrom von $\dot{m}_{tech}=815,2 \text{ g/min}$ und einer Drehzahl von $n_{tech}=1289,5 \text{ U/min}$ betrieben werden.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Nebelversuche

Mit Hilfe einer Nebelmaschine kann die Strömung rund um die Schleudertrommel beobachtet werden. In den Abb. 5-3 bis 5-4 sind die Unterschiede zwischen den Be-

triebspunkten dargestellt. Die Strömung verläuft entlang der Trommelwand bis zu den Löchern, wo die gleichmäßige Strömung durch die Strähnen gestört wird. Solange die Trommel nicht überläuft, kann keine Ablösung an der Trommeloberkante festgestellt werden. Nur wenn die Trommel überläuft (Abb. 5-4), also eine Strähnenbildung an der Trommeloberkante auftritt, wird die Strömung bereits dort gestört.

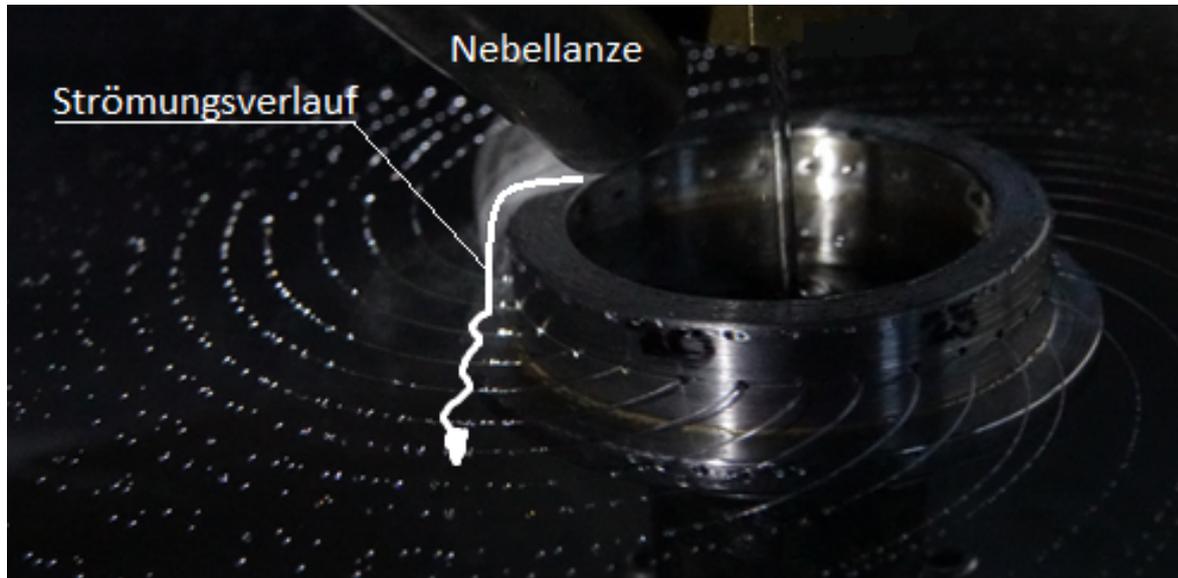


Abb. 5-3: Strömungsverlauf dargestellt mit Hilfe von Nebel. Die Strömung wird auf Höhe der Löcher durch die Strähnen gestört.

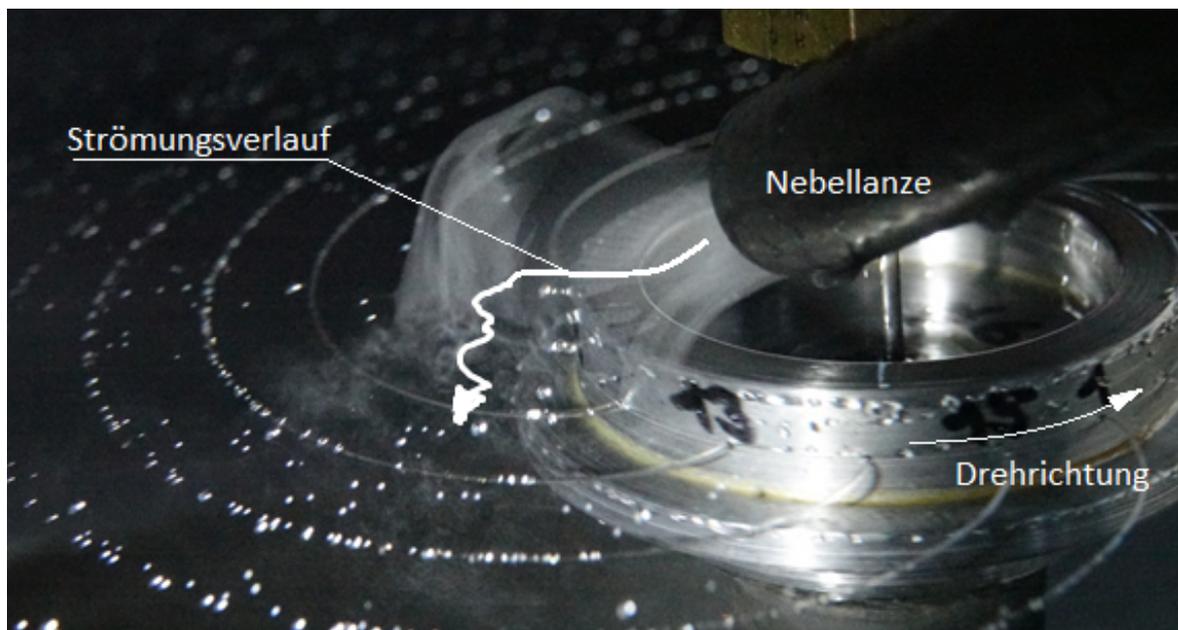


Abb. 5-4: Strömungsverlauf beim Trommelüberlaufen dargestellt mit Hilfe von Nebel. Die Strömung wird an der Trommeloberkante durch die Strähnen, die durch das Überlaufen dort gebildet werden, gestört.

5.4.2 Auswertung der Tropfengrößenmessung

Mit Hilfe der in Kap. 5.2 beschriebenen Tropfengrößenmessung wurden verschiedene Versuche mit den Stahltrommeln durchgeführt, um den Verlauf der Tropfengröße in Abhängigkeit der Drehzahl, des Durchsatzes und der Trommelgeometrie zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5-5 bis 5-8 als mittlerer Tropfendurchmesser und als Verteilungsbreite dargestellt.

Es konnte die Verringerung der Tropfengröße bei Erhöhung der Umdrehungsgeschwindigkeit und bei Verringerung des Durchsatzes beobachtet werden. Aus der Streuung der Verteilungen kann beobachtet werden, dass ein Überlaufen der Trommel zu vermeiden ist. Die produzierte Tropfengröße variiert stark zwischen Lochsträhnen und Überlaufsträhnen.

An der Technikumsanlage wird knapp über dem Überlaufpunkt die kleinste Streuung in der Verteilung erreicht. Bei weiterer Erhöhung der Drehzahl bei gleichzeitiger Verringerung der Tropfengröße steigt die Streuung an. Dieser Effekt deckt sich nicht mit den Literaturrecherchen in Kap. 2.2, wo eine reduzierte Streuung bei kleineren Partikeln berichtet wird.

Die Schleudertrommel mit einer Wandstärke von 3 mm produziert bei geringer Drehzahl unbrauchbare Ergebnisse. Das Fluid tritt zu langsam aus den Löchern aus. Deshalb läuft das Fluid von den Löchern an der Außenwand hinab bzw. gegen die Umdrehungsrichtung nach hinten. Die Ligamente setzen entweder unter oder hinter den Löchern an. Die Streuung der Tropfengrößenverteilung steigt damit enorm. Es kann keine enge Verteilung erreicht werden.

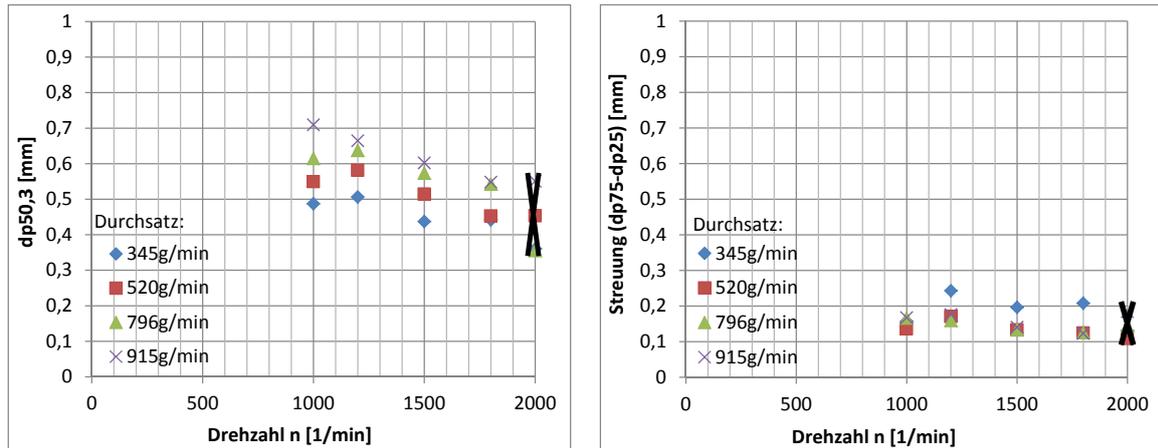


Abb. 5-5: Tropfengrößenauswertung für die Stahltrommel D60mm, 30x1 mm, 11,5mm, dargestellt als mittlere Tropfengröße $d_{p,50}$ bzw. als Streuung der Tropfengrößenverteilung $d_{p,75} - d_{p,25}$ als Funktion der Trommeldrehzahl n und dem Massendurchsatz an Glycerin-Wasser-Gemisch. Die Versuche bei einer Drehzahl von 2000 U/min sind als nicht repräsentativ gekennzeichnet (siehe dazu Kap. 5.5). Die Tropfengröße nimmt mit steigender Trommeldrehzahl und sinkendem Massendurchsatz ab.

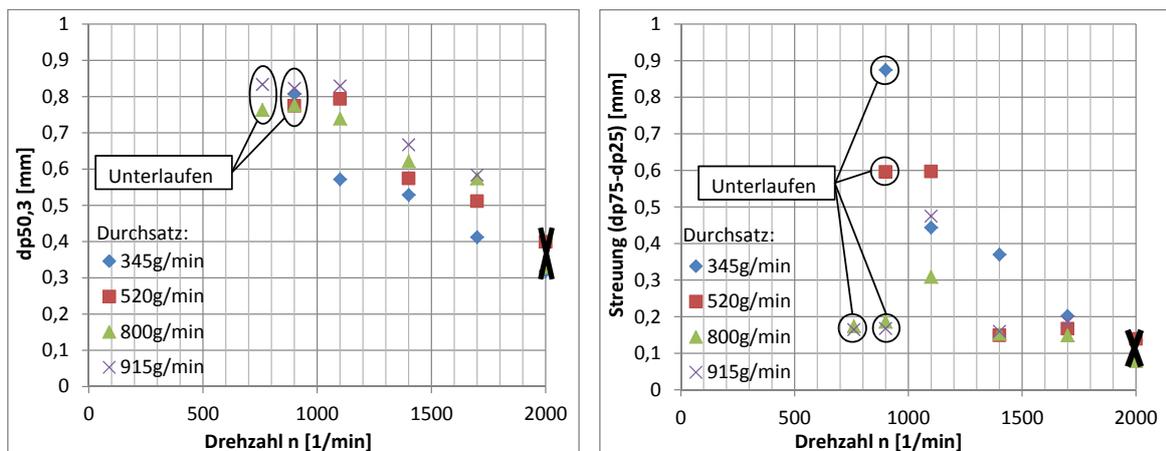


Abb. 5-6: Tropfengrößenauswertung für die Stahltrommel D60mm, 30x1 mm, 13mm, dargestellt als mittlere Tropfengröße $d_{p,50}$ bzw. als Streuung der Tropfengrößenverteilung $d_{p,75} - d_{p,25}$ als Funktion der Trommeldrehzahl n und dem Massendurchsatz an Glycerin-Wasser-Gemisch. Die Versuche bei einer Drehzahl von 2000 U/min sind als nicht repräsentativ gekennzeichnet (siehe dazu Kap. 5.5). Die Tropfengröße nimmt mit steigender Trommeldrehzahl und sinkendem Massendurchsatz ab. Bei geringen Drehzahlen reicht die Zentrifugalkraft nicht aus, um Strahlen in der Lochmitte zu bilden. Es kommt zum Unterlaufen. Beim Unterlaufen der Trommel wird eine stark erhöhte Streuung erreicht.

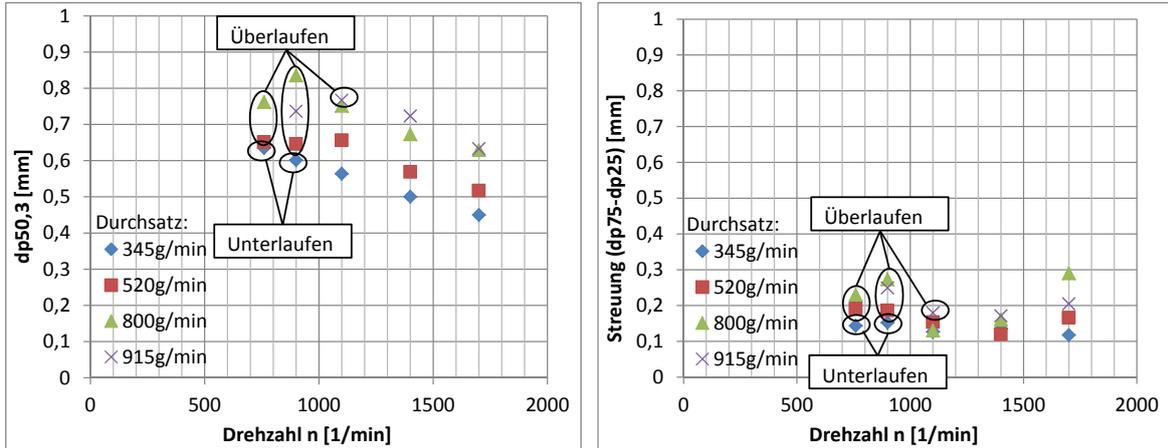


Abb. 5-7: Tropfengrößenauswertung für die Stahltrommel D60mm, 30x0,7mm, l1,5mm, dargestellt als mittlere Tropfengröße $d_{p,50}$ bzw. als Streuung der Tropfengrößenverteilung $d_{p,75} - d_{p,25}$ als Funktion der Trommeldrehzahl n und dem Massendurchsatz an Glycerin-Wasser-Gemisch. Die Tropfengröße nimmt mit steigender Trommeldrehzahl und sinkendem Massendurchsatz ab. Bei geringen Drehzahlen tritt, abhängig vom Massendurchsatz, entweder Trommelüberlaufen oder Trommelunterlaufen auf.

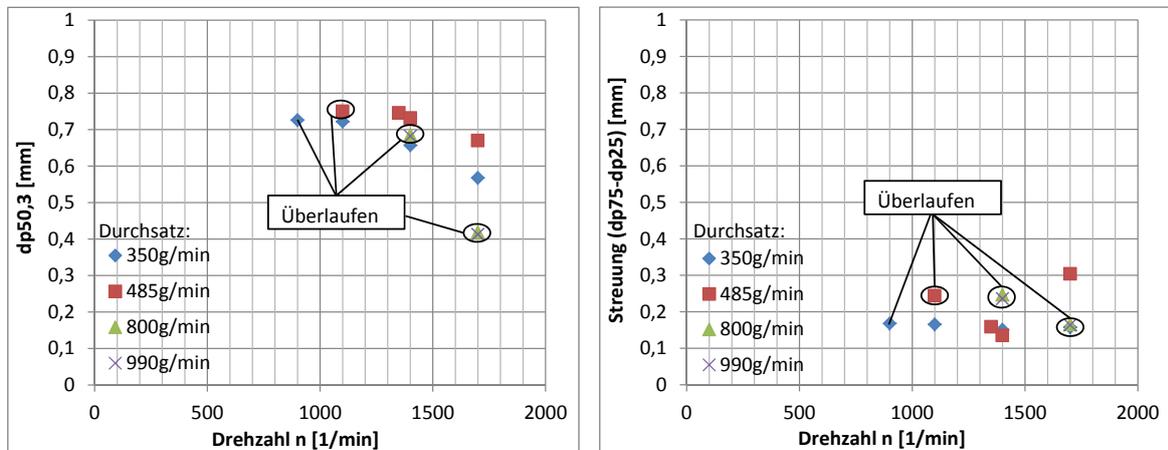


Abb. 5-8: Tropfengrößenauswertung für die Stahltrommel D60mm, 15x0,7mm, l1,5mm, dargestellt als mittlere Tropfengröße $d_{p,50}$ bzw. als Streuung der Tropfengrößenverteilung $d_{p,75} - d_{p,25}$ als Funktion der Trommeldrehzahl n und dem Massendurchsatz an Glycerin-Wasser-Gemisch. Die Tropfengröße nimmt mit steigender Trommeldrehzahl und sinkendem Massendurchsatz ab. Bei geringen Drehzahlen oder hohen Massendurchsätzen tritt Trommelüberlaufen auf. Bei überlaufender Trommel wird eine breitere Tropfengrößenverteilung (=höhere Streuung) im Gegensatz zum normalen Trommelbetrieb erreicht.

5.4.3 Beschreibung der Einflussparameter

Aus der Literatur (siehe Kapitel 2.2) sind einige Parameter, die Einfluss auf die Partikelgröße haben, bekannt. Diese sind die Stoffparameter Dichte, dynamische Viskosität und Oberflächenspannung, die Drehzahl des Schleuderwerkzeugs, der Durchfluss und die Werkzeuggeometrie. Diese Parameter wurden an der Technikumsanlage überprüft und für das Glycerin-Wasser-Gemisch spezifiziert. Die Versuchserkenntnisse können mit Hilfe der Modelltheorie auch auf die Produktionsanlage übertragen werden. Diese Beobachtungen wurden unter Verwendung der Stahltrommeln und verschiedener Trommeln aus der Schlackenpartikelproduktion aufgestellt.

Stoffparameter: Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung

Der Einfluss der Stoffparameter wurde nur in geringem Ausmaß spezifiziert, da nur eine Zusammensetzung des Glycerin-Wasser-Gemisches verwendet wurde, um die Abbildung der Produktionsanlage nach der Modelltheorie möglichst einzuhalten. An der Technikumsanlage konnten jedoch leichte Temperaturschwankungen festgestellt werden, die die Stoffparameter in unterschiedlicher Stärke verändern. Vor allem die Viskosität wird bereits bei leichter Temperaturerhöhung verändert. Dabei kann ein großer Einfluss auf das Überschwappen beobachtet werden. Eine Temperaturerhöhung verschiebt das Überlaufen, bei konstantem Massendurchsatz, zu niedrigeren Drehzahlen, da ein dünnflüssigeres Fluid leichter durch die Löcher austreten kann. Die Einflussparameter Dichte und Oberflächenspannung ändern sich nur sehr wenig, deshalb konnte deren Einfluss im Verlauf der Versuche nicht untersucht werden.

Drehzahl

Die Drehzahl bestimmt maßgeblich die Abschleudergeschwindigkeit der Strähnen am Werkzeugrand. Bei Tellern und Bechern wird zusätzlich die Anzahl der Strähnen beeinflusst, die bei Trommeln fest vorgegeben ist. Eine Erhöhung der Drehzahl bewirkt eine Verringerung der Tropfengröße. Dieser Zusammenhang wird sowohl in der Literatur, als auch in den durchgeführten Versuchen beobachtet. Die Versuchsergebnisse und der Einfluss der Drehzahl auf die Tropfengröße sind in Kap. 5.4.2 ersichtlich.

Durchfluss

Der Volumenstrom bzw. der Massenstrom durch die Düse auf das Schleuderwerkzeug hat einen relativ geringen Einfluss auf die produzierte Tropfengröße. Bei starker Erhöhung des Durchsatzes erhöht sich auch die Tropfengröße. Dieser Effekt wird auch in der Literatur beschrieben. Einen starken Einfluss hat die Durchsatzerhöhung

auf das Überschwappen der Trommel. Der Überlaufpunkt verschiebt sich dabei stark in Richtung höherer Drehzahlen.

Benetzung der Werkzeugoberfläche

Die Benetzung der Werkzeugoberfläche ist bei der Verwendung von Schleudertellern und Schleudertrommeln mit großem Lochdurchmesser wichtig, da die Beschleunigung des Fluids bereits am Teller erfolgen muss. Beim Glycerin-Wasser-Gemisch konnte eine gute Benetzung festgestellt werden. Die Beschleunigung konnte bereits an der Bodenplatte der Trommel fast vollständig abgeschlossen werden. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Trommelwand konnte daher als vernachlässigbar festgestellt werden.

Werkzeuggeometrie

Bei einfachen flachen Tellern kann nur der Tellerdurchmesser, bei Bechern zusätzlich die Wandhöhe und der Wandwinkel und bei Trommeln zusätzlich die Lochanzahl, der Lochdurchmesser und die Lochlänge (=Wandstärke) verändert werden. Bei Trommeln ist die Fertigung mit Überstand möglich.

Somit ergeben sich sehr viele unterschiedliche Geometrien, die nur mit sehr großem Aufwand alle zufriedenstellend beschrieben werden können. Die Versuchsdurchführung dieser Arbeit beschränkt sich auf die Verwendung von Trommeln. In der Literatur sind hauptsächlich Teller und Becher beschrieben.

Der große Vorteil bei Verwendung einer Trommel ist der verminderte Einfluss der Benetzung. Das Fluid trifft in der Mitte der Trommel auf und strömt nach außen. An der Innenwand sammelt sich das Fluid, beschleunigt auf Trommelgeschwindigkeit und tritt durch die Löcher aus.

Ein großer Unterschied konnte bei Verwendung von Trommeln mit großen Löchern ($d \geq 2$ mm) und kleinen Löchern ($d \leq 1$ mm) beobachtet werden.

Große Löcher verhindern das Sammeln des Fluids an der Wand, da der Austrittsquerschnitt zu groß ist. Das Fluid erfährt dadurch keine Beschleunigungs- bzw. Beruhigungsphase und strömt in undefiniertem Zustand aus den Löchern aus. Die Ligamente werden an unterschiedlichen Stellen am Lochumfang gebildet, was einen unruhigen Tropfenschirm zur Folge hat. Dies kann mit der fehlenden Benetzung des Lochquerschnitts erklärt werden. Teilweise konnte beobachtet werden, dass das Fluid erst an der Außenwand Ligamente bildet, also durch die Löcher durch und an der Außenwand entlang fließt. Erst dort findet die Ligamentbildung statt. Manche Ligamente wurden sogar erst am nächsten Loch gebildet. Dieser Zustand tritt bei geringer Drehzahl und bei dicker Außenwand, also großer Lochlänge (Stahltrommel mit $l=3$ mm) auf. (siehe Abb. 5-9)

Bei Verwendung kleiner Löcher kann das Fluid den Lochquerschnitt vollständig benetzen, was eine Ligamentbildung in der Lochmitte hervorruft. Dieser Zustand ist gewünscht, da die Ligamente die definierteste Form, der Tropfenschirm ein ruhiges Aussehen und die Tropfen eine enge Verteilung aufweisen.

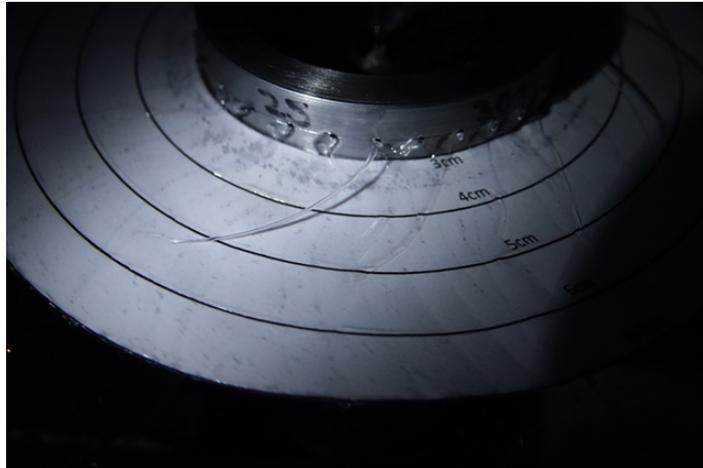


Abb. 5-9: Darstellung des Unterlaufens an einer Stahltrommel. Bei geringer Drehzahl und dicker Trommelwand ($l=3\text{ mm}$) reicht die Zentrifugalkraft nicht aus, um die Strahlen in der Lochmitte abzulösen. Das Fluid läuft an der Trommelaußenwand hinab, es kommt zum Unterlaufen.

Überschwappen

Das Überschwappen der Trommel tritt auf, wenn die Summe der Lochquerschnitte für den aktuellen Durchsatz und gegebener Umdrehungsgeschwindigkeit zu gering ist. Bei Verringerung der Drehzahl wird die Austrittsgeschwindigkeit aus den Löchern verringert, was ein stärkeres Überlaufen der Trommel zur Folge hat. Eine Erhöhung des Durchsatzes verstärkt das Überlaufen ebenfalls.

Das Überschwappen resultiert in einer undefinierten Ligamentbildung an der Trommeloberkante. Dieser Effekt wirkt wie die Ligamentbildung an einem Schleuderbecher. Nur bei perfektem Rundlauf werden die Ligamente gleichmäßig über die Oberkante gebildet. Ansonsten kommt es zur einseitigen Bildung großer Ligamente, die sogar bis ins Filmregime reichen kann.

Beim Überschwappen kann ein Unterschied zwischen den Trommelgeometrien beobachtet werden. Bei gewölbter Außenwand fließt das Fluid bis auf den größten Außendurchmesser hinab und löst dort in Ligamenten ab. Es kann dadurch zu einer Beeinflussung der Lochstrahlen kommen, da sich das von der Oberkante nach unten fließende Fluid mit den Lochstrahlen vereinigt. Diese werden beim Austreten gestört. Die Flugbahn und deren Durchmesser werden verändert.

Bei senkrechter Außenwand (siehe Abb. 5-10) lösen die Strähnen direkt an der Oberkante ab. Somit tritt keine Beeinflussung der Lochsträhnen auf.

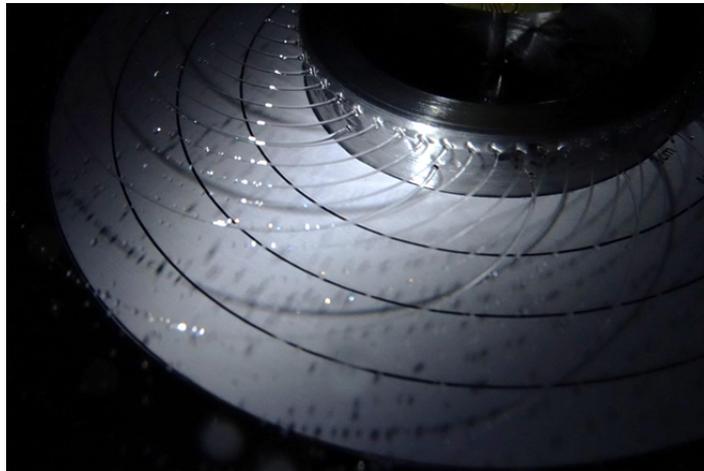


Abb. 5-10: Darstellung des Trommelüberlaufens an einer Stahltrommel. Bei hohem Massendurchsatz, geringer Drehzahl und dünner Trommelwand ($l=1,5\text{ mm}$) reicht die Lochanzahl nicht für einen ausschließlichen Fluidaustritt durch die Löcher aus. Daher läuft die Trommel über. Aufgrund der senkrechten Trommelwand werden die Überlaufsträhnen an der Trommeloberkante gebildet.

Düsenposition und Auftreffposition des Strahls

Die Düsenposition relativ zum Schleuderwerkzeug hat großen Einfluss auf die gleichmäßige Ligamentbildung. Bei exakt mittigem Auftreffen (siehe Abb. 5-11) des Glycerin-Wasser-Strahls kann ein gleichmäßiger Tropfenschirm beobachtet werden. Im Gegensatz dazu kann bei außermittigem Auftreffen auf dem Werkzeug eine charakteristische Form des Tropfenschirms beobachtet werden. Diese ist in Abb. 5-12 dargestellt. Durch die außermittige Zuführung kommt es zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Fluids auf der Schleuderplatte, also im Inneren der Schleudertrommel. Diese Verteilung bleibt bis zur Außenwand bestehen und resultiert in unterschiedlich hohen Lochdurchsätzen. Die Unregelmäßigkeit bleibt bezogen auf den Speiser immer an der gleichen Position,

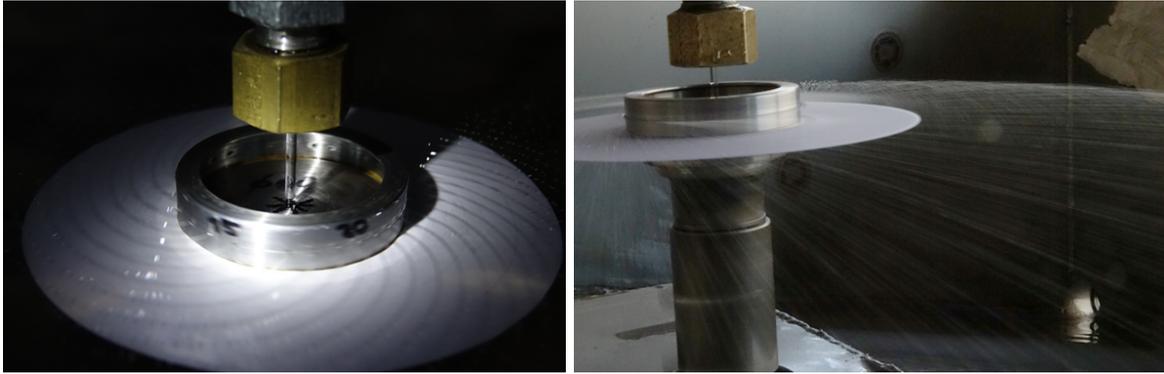


Abb. 5-11: Mittiges Auftreffen des Glycerin-Wasser-Gemisches auf die Schleudertrommel resultiert in einem gleichmäßigen Tropfenschirm.

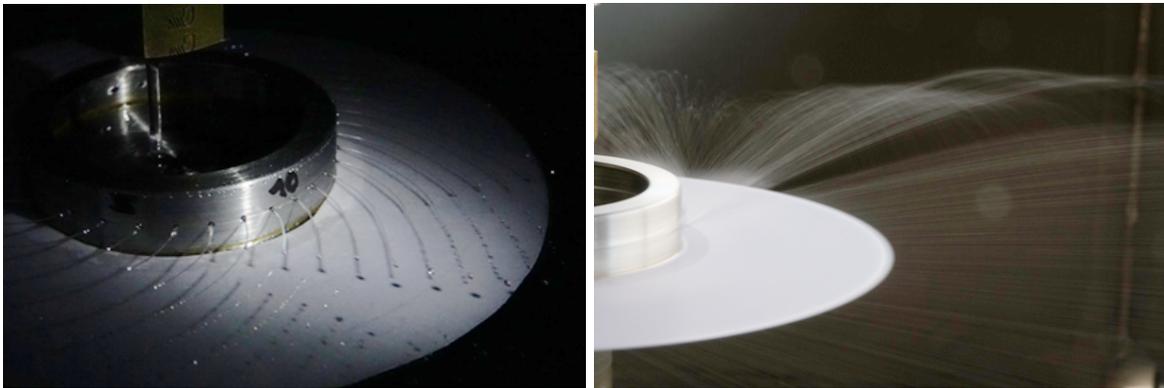


Abb. 5-12: Einfluss des außermittigen Auftreffens des Glycerin-Wasser-Strahls auf den Tropfenschirm. Es entsteht eine, bezogen auf den Speiser, örtlich gleich bleibende charakteristische Form des Tropfenschirms. Es entsteht kein gleichmäßiger Tropfenschirm.

Ligamentlänge

Die Einflussparameter auf die Ligamentlänge konnten durch die Verwendung der verschiedenen Stahltrommeln untersucht werden. Bei einer Erhöhung des Durchsatzes und Verringerung der Lochanzahl werden die Ligamente verlängert. Die Ligamentlänge ist unabhängig von der Umdrehungsgeschwindigkeit. Der Einfluss des Lochdurchmessers konnte aufgrund der Verwendung von 0,7 mm und 1 mm Bohrungsdurchmessern nicht ausreichend genau untersucht werden. Im Vergleich dieser beiden Lochgrößen konnte kein Unterschied in der Ligamentlänge festgestellt werden. Es müssen weitere Versuche durchgeführt werden, um den Einfluss des Lochdurchmessers genau spezifizieren zu können.

$$l_{lig} = f \left(\dot{m}, \frac{1}{n_{loch}} \right) \quad (5-7)$$

5.5 Fehlerbetrachtung

Die Technikumsversuche wurden mit Glycerin-Wasser-Gemisch durchgeführt und mittels Modelltheorie von der Produktionsanlage übertragen. Prinzipiell lassen die Versuche aufschlussreiche Beobachtungen zu. Die produzierten Tropfengrößen lassen sich jedoch nur in begrenztem Ausmaß mit den Schlackepartikeln vergleichen. Deshalb kann die Übertragung zwischen Technikum und Produktion als fehlerbehaftet angesehen werden. Die Vorgangsweise wird grundsätzlich für Schleuderteller vorgeschlagen. In dieser Arbeit wird sie auf Schleudertrommeln angewendet. Dabei gehen die Parameter für die Größe und Anzahl der Löcher verloren. Sie haben keinen Einfluss bei der Übertragung, womit die Abweichung der Tropfen- auf die Partikelgröße erklärt werden kann.

Die Tropfengrößenmessung beinhaltet mehrere große Fehlerquellen. Das Scharfstellen der Kamera auf die Tropfen lässt sich nicht mittels Autofokus durchführen, weshalb manuell fokussiert werden muss. Dieser Vorgang wurde mit größter Sorgfalt durchgeführt, jedoch konnten immer wieder schlecht fokussierte Aufnahmen beobachtet werden. Dieser Umstand erklärt auch die Probleme der Messung beim Überlaufen der Trommel. Da die Ligamente bzw. Tropfen in zwei Ebenen auftreten, ist die perfekte Fokussierung unmöglich. Auch beim Auftreten des Unterlaufens bei der Trommel mit 3 mm Wandstärke lassen sich die unbrauchbaren Ergebnisse mit diesem Effekt erklären.

Die verwendete Kamera kann mit bis zu $1/32000$ s belichten. Trotz dieser kurzen Belichtungszeit konnten bei der Aufnahme die Tropfen bei großen Drehzahlen nur mehr verschwommen aufgenommen werden. Deshalb wurden die Versuche bei hohen Drehzahlen ($n \geq 2000$ U/min) gestrichen. Dieser Effekt tritt nicht schlagartig auf, weshalb auch die Versuche zwischen 1500 und 2000 U/min fehlerbehaftet sind.

Der Durchfluss wird über Düsenplättchen mit unterschiedlichen Bohrungsdurchmessern eingestellt. Der Durchfluss wurde mehrmals kalibriert, er ist jedoch stark vom Füllstand des Düsenbehälters abhängig. Der Füllstand konnte zwar einigermaßen konstant gehalten, ein Absinken aber nicht in allen Fällen verhindert werden. Der Durchfluss soll daher nur als ungefähre Wert (Schwankungsbreite $\pm 10\%$) angesehen werden.

6 Versuchsdurchführung Produktion

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Versuche an der Produktionsanlage beschrieben. Der Ablauf der Probenahme und die Analyse sind in Kap. 6.1 beschrieben. Dieser Probenahmeprozess soll eine höhere statistische Genauigkeit garantieren, als der von den Produktionsmitarbeitern für die Prozessdatenerfassung durchgeführte (siehe Kap. 7 und 7.5). Weiters wurden die jeweiligen Betriebszustände fotografisch festgehalten, um Rückschlüsse auf die Strähnenbildung und das Trommelüberlaufen ziehen zu können. Die Partikelproben wurden teilweise mittels Mikroskop genauer untersucht.

Die Versuche können in die Verwendung der unterschiedlichen Trommelgeometrien unterteilt werden. Als Trommelgeometrien wurden die bisher verwendete Trommelgeometrie (siehe Kap. 4.1), eine Trommelform mit hoher Wand und die optimierte Trommelgeometrie mit Überstand (siehe Kap. 6.4) verwendet.

6.1 Probenahme an der Produktionsanlage

Die heißen Partikel werden in einer Wanne aufgefangen und mittels Druckluftsystem in einen Container geblasen. Die Probenahme kann daher nur am Ende des pneumatischen Fördersystems erfolgen. Die Probenahmedauer wird auf mehrere Minuten ausgedehnt, um eine ausreichende statistische Genauigkeit erreichen zu können. Anschließend wird die gesamte Probe in mehreren Durchläufen mittels eines Riffelteilers auf eine geeignete Probengröße geteilt. Der Riffelteiler halbiert die Probe in jedem Durchlauf. Die Partikelgrößenverteilung und Partikelformverteilung wird mittels eines Partikelanalysators CAMSizer P4 (Datenblatt: Retsch (2014)) erhalten. Die Proben werden teilweise durch eine Mikroskopanalyse genauer betrachtet.

Während der Probenahme wird der Betriebszustand der Schleudertrommel fotografisch festgehalten, um Rückschlüsse auf die Strähnenbildung und das Trommelüberlaufen ziehen zu können.

Der Durchsatz wird durch die Zeitdauer der Probenahme und das Abwiegen der Partikelprobe bestimmt. Zusätzlich können durch die kontinuierliche Temperaturmessung im Ofen Rückschlüsse auf den Schlackendurchsatz gezogen werden. Eine hohe Temperatur im Ofen bedeutet dabei einen erhöhten Schlackendurchsatz.

Die Produktionsversuche wurden sowohl an Ofen 3, als auch Ofen 4 durchgeführt. Die beiden Wannen unterscheiden sich in der Höhe des Durchsatzes, in der Größe der Auffangwanne und im pneumatischen Fördersystem zum Abtransport der Partikel. Im Ofen 3 lassen sich statistisch genauere Proben ziehen, als im Ofen 4. Dies lässt sich mit der verbeulten Auffangwanne 4 erklären. Durch die Verbeulung bilden sich Rückstände, die einen kontinuierlichen Abtransport aller Partikelgrößen

erschweren. Sehr feine, unrunde und angeschlagene Partikel bleiben mit höherer Wahrscheinlichkeit in der Wanne liegen, was eine repräsentative Probenahme nach der pneumatischen Förderung erschwert.

6.2 Produktionsversuche

In diesem Kapitel soll eine Übersicht über die durchgeführten Versuche gegeben werden.

6.2.1 Trommel 342: D110, 32x0,3

Mit dieser Trommel werden mit einer Motorfrequenz von 60 bis 65 Hz ($n=2100$ bis 2275 U/min) und einer hohen Trommelheizleistung von $11,5$ kW feine Partikel mit $d_p \leq 300 \mu\text{m}$ produziert. Überhalb der Trommel ist eine Strahlplatte installiert, um die Faserproduktion möglichst zu minimieren. Dieser Effekt tritt aufgrund der sehr dünnen Strähnen, die vor der Verrundung erstarren, auf. Die Ausbeute an Zielpartikelgröße ($150 \mu\text{m}$ bis $300 \mu\text{m}$) variiert im Bereich von 10 bis 15 w%. Das lässt sich mit der viel zu kleinen Lochanzahl und des damit verbundenen Trommelüberlaufens erklären. Dadurch wird der Einfluss der geringen Lochgröße auf die Partikelentstehung verringert. Alle durch das Überlaufen entstehenden Partikel besitzen einen Durchmesser außerhalb des Zielbereichs. Die Partikelgrößenverteilung ist dadurch sehr breit und reicht von $150 \mu\text{m}$ bis über 1 mm, wobei die Partikel mit $d_p \geq 800 \mu\text{m}$ eine sehr schlechte Qualität besitzen.

6.2.2 Trommel 345: D80, 32x2,1

Mit dieser Trommel werden Partikel im Größenbereich von 500 bis $1000 \mu\text{m}$ bei einer Motorfrequenz von 58 Hz ($n=2030$ U/min) und einer Heizleistung von 7 kW produziert. Es befinden sich vereinzelt größere, qualitativ schlechte Partikel darunter. Diese sind sowohl längliche, als auch viele scheibenförmige Partikel. Besonders auffällig ist die Ligamentbildung an den Löchern. Die Löcher sind nicht vollständig benetzt und es werden je Loch zwei Strähnen, eine ober und eine unter dem Loch, gebildet. Dieser Effekt resultiert in der doppelten Anzahl an Strähnen im Vergleich zu den Löchern in der Trommel. Dadurch werden dünnere Strähnen gebildet, als der große Lochdurchmesser von $2,1$ mm vermuten lässt.

6.2.3 Trommel 323: D60, 32x0,7

Die Trommel 323 produziert Partikel im Größenbereich von 400 bis $900 \mu\text{m}$ bei einer Motorfrequenz von 68 Hz ($n=2380$ U/min) und einer Heizleistung von $6,1$ kW. Im Betrieb sind alle Löcher vollständig benetzt und die Trommel läuft nicht über. Eine Verringerung der Motorfrequenz führt jedoch sehr schnell zum Trommelüberlaufen.

Der Betriebsbereich ist daher stark begrenzt. Bis auf vereinzelte große und längliche Partikel wird eine durchwegs hohe Qualität hergestellt. Die Partikelverteilung besitzt eine relativ geringe Streuung, was die gezielte Herstellung von Partikelgrößen erleichtert. Die Löcher sind händisch gebohrt. Deshalb treten die Strähnen in unterschiedlichen Winkeln aus den Löchern aus. Eine weitere Verbesserung in der Verteilungsbreite sollte durch eine exaktere Herstellung der Löcher möglich sein.

6.2.4 Trommel 351: D60, 32x0,9

Die Trommel 351 wurde bereits im Verlauf dieser Arbeit hergestellt. Die Erkenntnisse der vorherigen Versuche konnten dadurch bereits einfließen. Die Bohrungen sind deshalb unter Verwendung eines Teilapparates hergestellt, was eine exakte Positionierung der Löcher ergibt. Diese Trommel produziert Partikel im Bereich von 400 bis 900 μm bei äußerst geringer Streuung. Die Partikelqualität ist hochwertig. Diese Trommel wurde bei Motorfrequenzen zwischen 41,9 und 66,3 Hz ($n=1467$ bis 2320 U/min) und einer Heizleistung von 6,3 kW betrieben. Dabei wurden mittlere Partikelgrößen von 832 bis 627 μm erhalten. Da die Trommel ab einer Frequenz von 55 Hz ($n=1925$ U/min) überläuft, wird erst bei höherer Frequenz eine enge Verteilung und hohe Partikelqualität erreicht.

6.2.5 Trommel 348: D60, 32x2

Diese Trommel produziert bei einer Motorfrequenz von 62,3 Hz ($n=2181$ U/min) und Trommelheizleistung von 6,3 kW eine mittlere Partikelgröße von 698 μm . Die Streuung ist gering, jedoch werden vereinzelt große längliche Partikel hergestellt. Ansonsten ist die Qualität sehr gut. Die Ligamentbildung erfolgt nicht einheitlich. Ein Teil der Löcher ist benetzt und produziert Ligamente in der Lochmitte, der andere Teil bleibt unbenetzt und produziert Ligamente hinter den Löchern. Diese Teilung der Ligamentbildung könnte der Grund für die großen länglichen Partikel sein. Obwohl die Breite der Verteilung bereits relativ eng ist, könnte eine einheitliche Ligamentbildung eine weitere Verbesserung bringen.

6.2.6 Trommel 347: D60, 32x2,7

Diese Trommel wird für die Produktion von groben Partikel verwendet. Bei einer Motorfrequenz von 34,3 Hz ($n=1201$ U/min) und Trommelheizleistung von 5,3 kW wird eine mittlere Partikelgröße von $d_{p,50} = 1000 \mu\text{m}$ hergestellt. Die Verteilungsbreite reicht von 700 bis über 1600 μm . Die Qualität der kleineren Partikel mit $d_p \leq 1150 \mu\text{m}$ ist gut, die meisten größeren Partikel sind Schrott, da sie in Nadel- oder Scheibenform keine ausreichende Rundheit besitzen. Die meisten Löcher in der Trommel sind aufgrund ihrer Größe nicht vollständig benetzt. Es können auch einige vollständig benetzte

Löcher beobachtet werden. Die Strahlenbildung erfolgt bei vollständig benetzten Löchern in der Mitte des Lochs und bei nicht vollständig benetzten Löchern unter dem Loch. Es wird eine Strähne pro Loch gebildet. Es tritt kein Trommelüberlaufen auf.

6.3 Validierung der Technikumsversuche

Die in den Technikumsversuchen gefundenen Zusammenhänge sollen in diesem Abschnitt mit den Produktionsversuchen in Zusammenhang gebracht werden.

Der Einfluss der Drehzahl auf die mittlere Partikelgröße und die Streuung in der Partikelgrößenverteilung kann teilweise bestätigt werden. Eine höhere Drehzahl produziert kleinere Partikel. Die absolute Streuung wird durch eine Erhöhung der Drehzahl verringert. In den Technikumsversuchen wurde eine optimale Streuung kurz oberhalb des Überlaufpunktes gefunden. In den Produktionsversuchen wurde dieser Effekt nicht bestätigt. Es konnte die in der Literatur beschriebene Abhängigkeit der Streuung - kleinere Partikel erzeugen eine geringere Verteilungsbreite, bestätigt werden.

Der große Einfluss des Trommelüberlaufens, der in den Technikumsversuchen gefunden wurde, kann auch an der Produktionsanlage bestätigt werden. Das Überlaufen produziert eine unregelmäßige Ligamentbildung, was sich meist in großen, unrunder Partikeln zeigt.

Das exakt mittige Auftreffen des Schlackenstrahls kann, ähnlich zur Technikumsanlage, als wichtiger Parameter für die Gleichmäßigkeit des Tropfenschirms gefunden werden. Bei außermittigem Auftreffen kann eine örtlich konstante Unregelmäßigkeit in der Ligamentbildung beobachtet werden.

6.4 Verwendung neuer Werkzeuggeometrien und Optimierung der Prozessparameter

Die aus den Produktionsbeobachtungen und -versuchen gefundenen Zusammenhänge wurden für das Design einer neuen Werkzeuggeometrie verwendet.

6.4.1 Optimierte Werkzeuggeometrien

Optimiertes Trommelwerkzeug mit hoher Wand, ohne Überstand

Ein konisches Rohr (57,5 mm bis 58 mm Außendurchmesser bei Höhe von 20 mm) ist mit dem kleineren Durchmesser auf der Basisplatte mit Werkzeugaufnahme aufgeschweißt. Auf einer Höhe von 6 mm sind Löcher mit Teilapparat gebohrt. Diese Trommelgeometrie ist in Abb. 6-1 im linken Bild dargestellt.

Optimiertes Trommelwerkzeug mit Überstand

Die optimierte Werkzeuggeometrie (siehe Abb. 6-1, rechtes Bild) besteht aus einer Werkzeugaufnahme mit runder Platte, einem aufgeschweißten konischen Rohr mit Löchern und Überstand. Das konische Rohr ist mit dem kleineren Durchmesser an der Platte angeschweißt und öffnet sich nach oben hin. Die Schweißnaht befindet sich an der Außenseite des Rohrs, um eine Beeinflussung der Schlackenströmung zu verhindern. Darum muss die runde Platte einen größeren Außendurchmesser besitzen als das Rohr. An der Oberkante des Rohrs ist ein Ring aufgeschweißt, der das Überlaufen der Trommel verzögern bzw. verhindern und die Strahlungsverluste vermindern soll. Die Löcher im Ring sind auf einer Ebene angeordnet und sind unter Zuhilfenahme eines Teilapparates gebohrt. Das soll möglichst exakte Bohrungen gewährleisten. Der Bohrerwinkel muss 90° zur Trommel betragen.

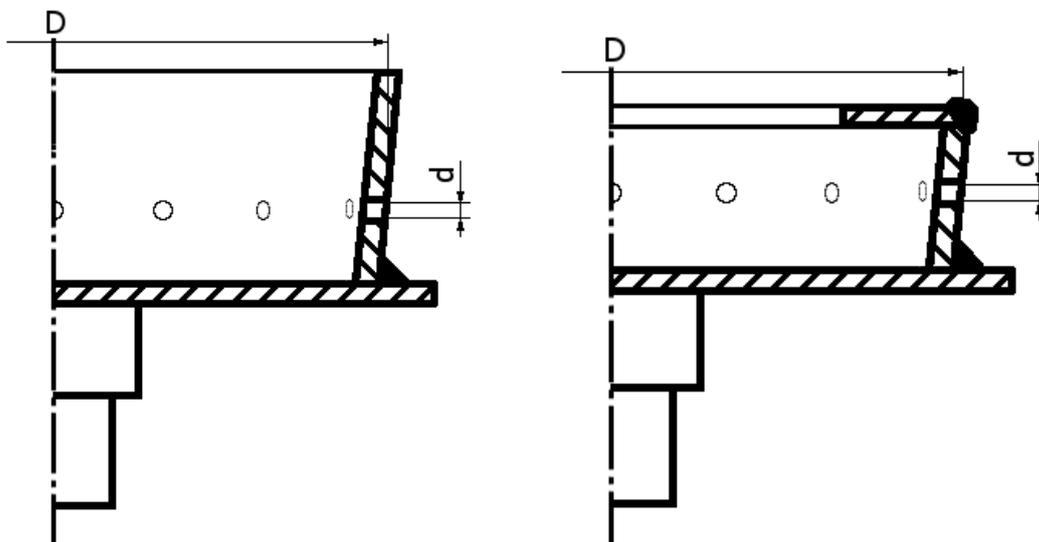


Abb. 6-1: Skizzen der optimierten Trommelgeometrien

linkes Bild: Optimiertes Trommelwerkzeug mit hoher Wand, ohne Überstand

rechtes Bild: Optimiertes Trommelwerkzeug mit Überstand

6.4.2 Produktionsversuche mit optimierten Werkzeuggeometrien

Trommel mit hoher Wand, D58 mit 9, 18 und 36x1

Die Schleuderversuche an der Produktionsanlage wurden bei einer Motorfrequenz von 40 bis 60 Hz ($n=1400$ bis 2100 U/min) und einer Trommelheizleistung von $6,4$ kW durchgeführt. Bei geringer Drehzahl liefert die Trommel mit 9 Löchern die breiteste Verteilung, da am wenigsten Schmelze durch die Löcher durchdringen kann, und da-

her der Großteil an der Trommeloberkante als Strähnen austritt. Die Strähnenbildung an der Oberkante ist nicht einheitlich. Es werden viele große und längliche Partikel produziert. Das Überlaufen der Trommel kann in keinem Versuch der verschiedenen Konfigurationen verhindert werden. Da aber der Anteil an Schmelze, der durch die Löcher austritt, bei Erhöhung der Lochanzahl und Vergrößerung der Drehzahl zunimmt, wird der Einfluss des Überlaufens geringer. Eine Vergrößerung der Lochanzahl und Drehzahl resultiert daher in einer engeren, aber immer noch breiten Verteilung.

Trommel 350: D58, 36x1

Diese Trommel in der optimierten Geometrie (siehe Abb. 6-1, rechtes Bild) kann für Partikelgrößen von 550 bis 1100 μm verwendet werden. Ab einer Motorfrequenz von ungefähr 40 Hz ($n=1400$ U/min) kann die Trommel ohne Überlaufen betrieben werden. Dies stellt auch die Grenze dar, ab der eine hohe Partikelqualität produziert werden kann. Das Überlaufen produziert große längliche und scheibenförmige Partikel. Im Betrieb ohne Überlaufen können nur vereinzelt scheiben- und nadelförmige Partikel mit $d_p \geq 1200$ μm beobachtet werden. Die Partikelqualität ist sehr gut. Die Breite der Partikelgrößenverteilung ist mit über 400 μm relativ groß. Diese passt jedoch genau in den Zielkornbereich von 600 bis 1000 μm .

Trommel 355: D58, 72x0,6

Die Trommel 355 in der optimierten Geometrie (siehe Abb. 6-1, rechtes Bild) kann für Partikelgrößen von 370 bis 730 μm bei einer Motorfrequenz $f \geq 66$ Hz ($n=2310$ U/min) verwendet werden. Darunter läuft die Trommel über. Die Trommelheizleistung liegt dabei bei 6 kW. Der regelmäßige Tropfenschirm erzeugt zwar eine relativ große Verteilungsbreite von 350 μm , die Qualität der Partikel ist jedoch ausgezeichnet.

6.5 Ergebnisse

Die Produktionsversuche mit den verschiedenen Werkzeuggeometrien liefern verschiedene Ergebnisse. Der größte Unterschied zwischen den Trommeln ist die Größe der Bohrungen. Die Bohrungsgrößen reichen von 0,3 mm bis zu 2,7 mm. Sie beeinflussen maßgeblich den Austrittsquerschnitt und den Überlaufpunkt, vor allem bei der alten Trommelgeometrie, wo die Lochanzahl mit 32 festgelegt ist. Diese Lochanzahl wurde für die optimierte Trommelgeometrie an das Trommelüberlaufen angepasst. Kleinere Löcher benötigen eine größere Anzahl, um das Überlaufen zu verhindern. Grundsätzlich konnten mit kleineren Löchern bessere Ergebnisse erzielt werden. Für Bohrungen mit $d \geq 1,5$ mm ist eine Benetzung schwierig zu erreichen. Bei gegebenem Durchsatz müsste die Lochanzahl stark verringert werden, um solche Größen benetzen zu können. Dabei sind aber sehr lange Ligamente, die schwierig handzuha-

ben sind, und eine schlechte Partikelqualität zu erwarten.

Die Partikelqualität konnte durch die optimierten Trommeln verbessert werden. Dies konnte vor allem durch die Verhinderung der Entstehung von Spritzern erreicht werden. Dafür kann die Einführung des Überstandes verantwortlich gemacht werden. Dieser verzögert das Überlaufen und verringert den Einfluss des Rundlaufes. Ein geringer Rundlauffehler kann durch den Überstand ausgeglichen werden.

Die Streuung der Partikelgröße ($d_{p,90} - d_{p,10}$) kann aus Abb. 6-2 in Abhängigkeit der mittleren Partikelgröße $d_{p,50}$ abgelesen werden. Jeder Punkt im Diagramm stellt die Partikelgrößenverteilung für einen Produktionversuch vereinfacht dar. Grundsätzlich nimmt die Streuung mit zunehmender Partikelgröße zu (entspricht einer breiteren Partikelgrößenverteilung). Dies kann auch an der steigenden Regressionsgerade abgelesen werden. Die Nichtidealitäten, wie das Auftreten von Trommelüberlaufen, einer Strähnenbildung hinter dem Loch oder nicht vollständig benetzter Löcher vergrößern die Streuung überproportional. Damit müssen zum Erreichen einer möglichst engen Partikelgrößenverteilung die Nichtidealitäten verhindert werden.

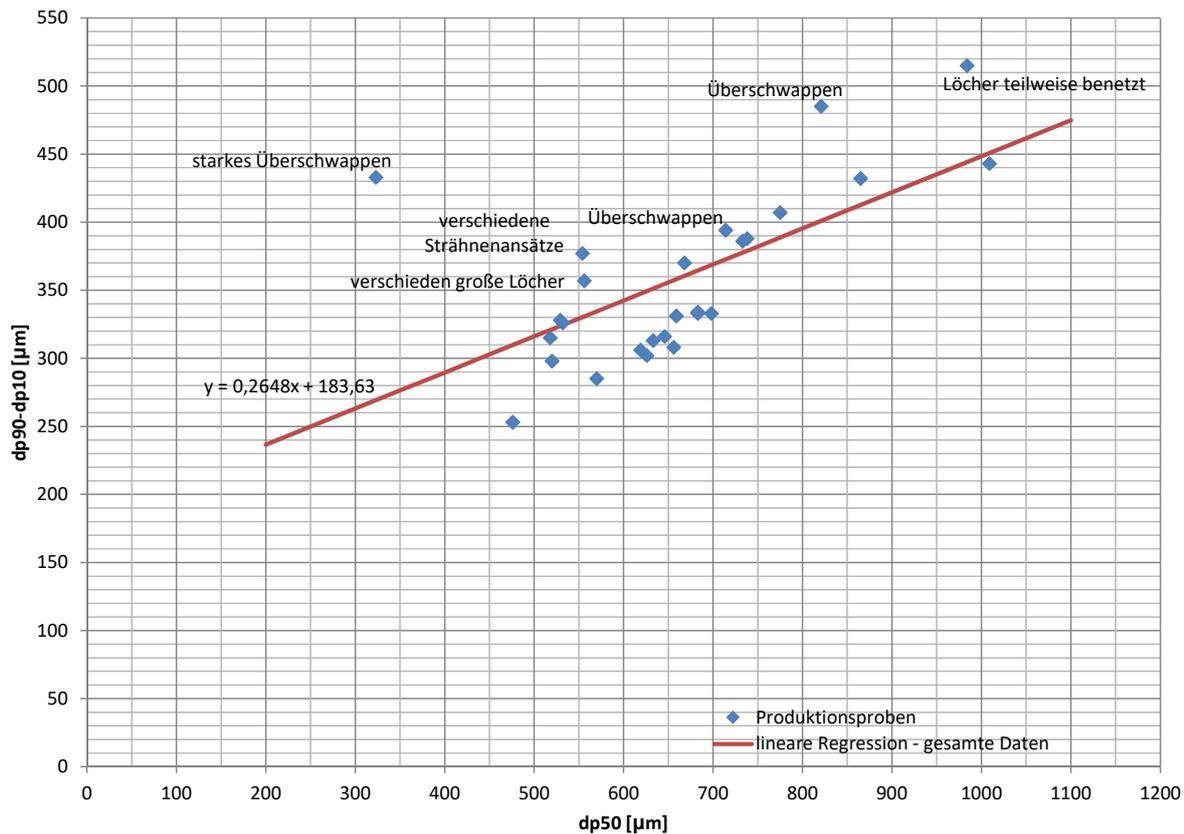


Abb. 6-2: Vergleich der Produktionsproben: Die Streuung der Partikelgrößen ($d_{p,90} - d_{p,10}$) (=Breite der Partikelgrößenverteilung) ist als Funktion der mittleren Partikelgröße $d_{p,50}$ dargestellt. Jeder Punkt stellt einen Produktionsversuch und dessen Ergebnis in der Partikelgrößenverteilung vereinfacht dar. Bei der Produktion von größeren Partikeln wird eine breitere Verteilung (=höhere Streuung) erreicht. Das Auftreten von Nichtidealitäten führt zu einer überproportionalen Erhöhung der Verteilungsbreite

6.6 Fehlerbetrachtung

Die Produktionsversuche und deren Auswertung und Interpretation sind maßgeblich durch den Probenahmeprozess beeinflusst, der einige Fehlerquellen beinhaltet. Bei der Durchführung der Experimente darf aufgrund der zeitlichen Begrenzung nicht jede Einstellung über lange Zeit gehalten werden. Deshalb kann durch die Partikelrückstände in der Wanne eine Vermischung zwischen den jeweiligen Versuchen nicht ganz ausgeschlossen werden. Die Wahrscheinlichkeit der Vermischung wurde durch ein möglichst vollständiges Ausblasen der Auffangwanne zwischen den Versuchen verringert.

Die Partikel kommen größenabhängig schneller oder langsamer zur Probenahmestelle, da die Rückstandsbildung in der Wanne und die Fördergeschwindigkeit größenab-

hängig ist. Dieser Effekt erschwert die Aufnahme einer repräsentativen Probe. Dieser Einfluss auf die Probenahme ist vor allem bei Ofen 4 von erheblicher Bedeutung, da dort die Auffangwanne stark verbeult ist und der Transportweg von der Wanne zur Probenahmestelle länger ist, als bei Ofen 3.

Die Temperaturschwankungen im Ofen führen zum Trommelüberlaufen während des laufenden Betriebs. Die Aufnahme der Fotos und die Probenahme der Partikel erfolgen durch die Verzögerung des pneumatischen Fördersystems nicht zum gleichen Zeitpunkt. Deshalb kann der fotografierte Betriebszustand und der Betriebszustand, mit dem die gezogene Partikelprobe produziert wurde, voneinander abweichen. Dieser Fehler sollte durch die verzögerte Probenahme, einige Minuten nach der Aufnahme der Fotos verhindert werden.

7 Modellierung des Produktionsprozesses anhand der Prozessdatenerfassung

Die Prozessdatenerfassung dient der Dokumentation des Prozesses. In jeder Produktionsschicht, also dreimal am Tag wird von den Produktionsmitarbeitern eine Partikelprobe gezogen und mittels Siebanalyse untersucht. Zusätzlich wird der Durchsatz gemessen. Diese Daten werden zusätzlich zu den Prozessparametern Trommelgeometrie, -heizleistung und -drehzahl in eine Excel-Datei eingetragen, aus welcher ein Modell erstellt wurde.

7.1 Werte aus der Prozessdatenerfassung

Die Prozessdatenerfassung enthält folgende Werte:

- Datum und Schicht
- Soll- und Istdurchsatz
- Werkzeugnummer
- Motorfrequenz
- Trommelheizleistung
- Siebkurve
- Rundheit

Die genaue Uhrzeit der Durchsatzmessung und der Partikelanalyse wird nicht dokumentiert und kann auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden. Deshalb kann die kontinuierliche Temperaturaufzeichnung nicht mit der Prozessdatenerfassung korreliert werden. Aus der eingetragenen Siebkurve kann die Partikelgrößenverteilung vereinfacht als mittlerer Partikeldurchmesser $d_{p,50}$ dargestellt werden.

In Abb. 7-1 und 7-2 sind die Daten aus der Prozessdatenerfassung dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt genau eine Eintragung in der Prozessdatenerfassung dar, was einem Punkt pro Schicht (=3 Punkte pro Tag) gleichkommt. Es ist jeweils die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ in Abhängigkeit der Prozessparameter, in Abb. 7-1 die Motorfrequenz f (Umrechnung Motorfrequenz in Trommeldrehzahl siehe Kap. 7.2) und der Trommelaußendurchmesser D , in Abb. 7-2 nur die Motorfrequenz f bei konstantem Trommelaußendurchmesser $D=60$ mm, dargestellt. In beiden Diagrammen stellt die Größe der einzelnen Punkte die Größe des Lochdurchmessers an der Trommel dar - kleine Punkte stellen Trommeln mit kleinen Bohrungen, große Punkte stellen Trom-

meln mit großen Bohrungen dar. Die Lochdurchmesser variieren dabei von 0,3 bis 2,7 mm. In den Diagrammen kann daher eine Abhängigkeit der Partikelgröße vom Lochdurchmesser abgelesen werden.

In Abb. 7-1 ist die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ in Abhängigkeit der Motorfrequenz f und des Trommelaußendurchmessers D dargestellt. Es kann eine Verringerung der Partikelgröße bei steigender Motorfrequenz, was einer Erhöhung der Trommeldrehzahl entspricht, und steigender Trommelgröße abgelesen werden. Im Diagramm sind Trommelgrößen von $D=60$ mm bis $D=120$ mm dargestellt. Eine kleinere Trommel produziert bei gleicher Motorfrequenz größere Partikel. Zusätzlich muss der Einfluss des Lochdurchmessers berücksichtigt werden. Trommeln mit kleineren Bohrungen (kleine Punkte im Diagramm) produzieren bei gleicher Trommelgröße und Motorfrequenz kleinere Partikel, als Trommeln mit größeren Bohrungen. Dieser Effekt kann einfacher aus Abb. 7-2 herausgelesen werden.

In Abb. 7-2 ist die Schnittebene aus Abb. 7-1 für einen Trommelaußendurchmesser $D=60$ mm abgebildet. Die Abhängigkeit der Partikelgröße von der Motorfrequenz lässt sich, wie bereits für Abb. 7-1 beschrieben, erkennen. Eine Steigerung der Trommeldrehgeschwindigkeit führt zur Produktion kleinerer Partikel. Mit einer Trommelgröße von $D=60$ mm können mittlere Partikelgrößen von 400 bis 1050 μm hergestellt werden. Unter Berücksichtigung der Verteilungsbreite (250 bis 450 μm) kann dieser Partikelgrößenbereich auf 275 bis 1275 μm erweitert werden.

Aus dieser Abbildung kann auch die Abhängigkeit der Partikelgröße von der Bohrungsgröße abgelesen werden. Die kleinen Punkte bei Motorfrequenzen zwischen 45 und 55 Hz stellen alle dieselbe Trommel mit Bohrungsdurchmesser $d=0,5$ mm dar. Diese Trommel produziert abhängig von der Motorfrequenz mittlere Partikelgrößen zwischen 400 und 650 μm . Beim Vergleich dieser kleinen Punkte mit größeren Punkten bei vergleichbaren Motorfrequenzen, die bei mittleren Partikelgrößen zwischen 600 und 850 μm liegen, lässt sich die deutlich kleinere Partikelgröße bei der Verwendung von Trommeln mit kleinen Bohrungsdurchmessern erkennen.

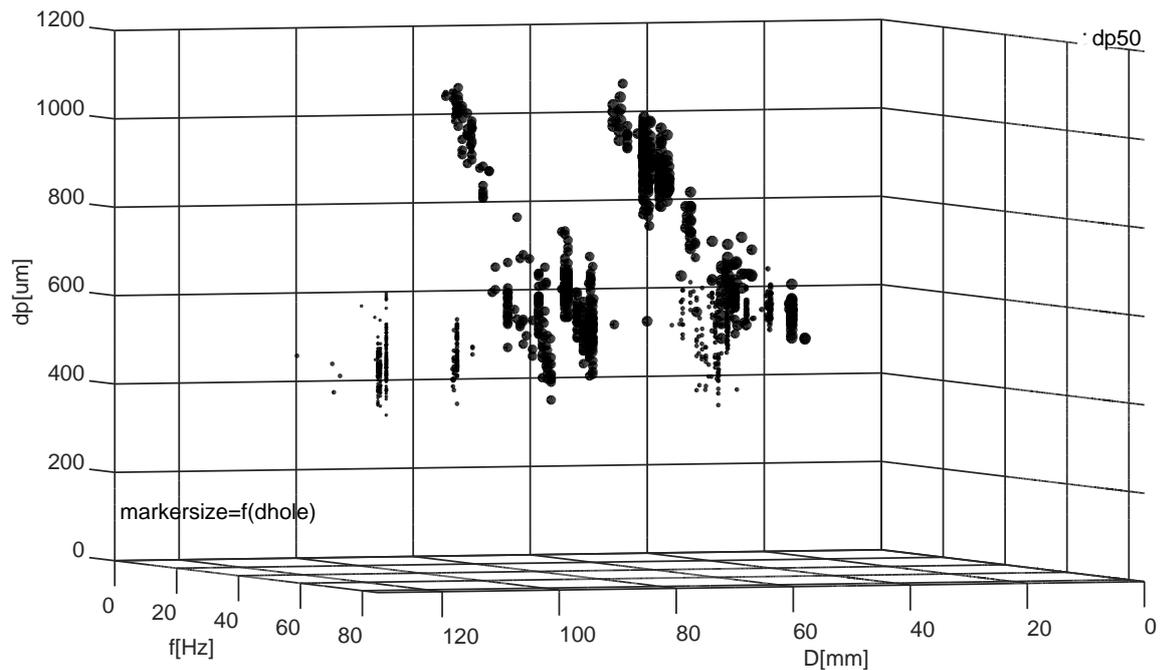


Abb. 7-1: Daten aus der Prozessdatenerfassung in 3D-Darstellung; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [μm] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz f [Hz] und des Trommeldurchmessers D [mm]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

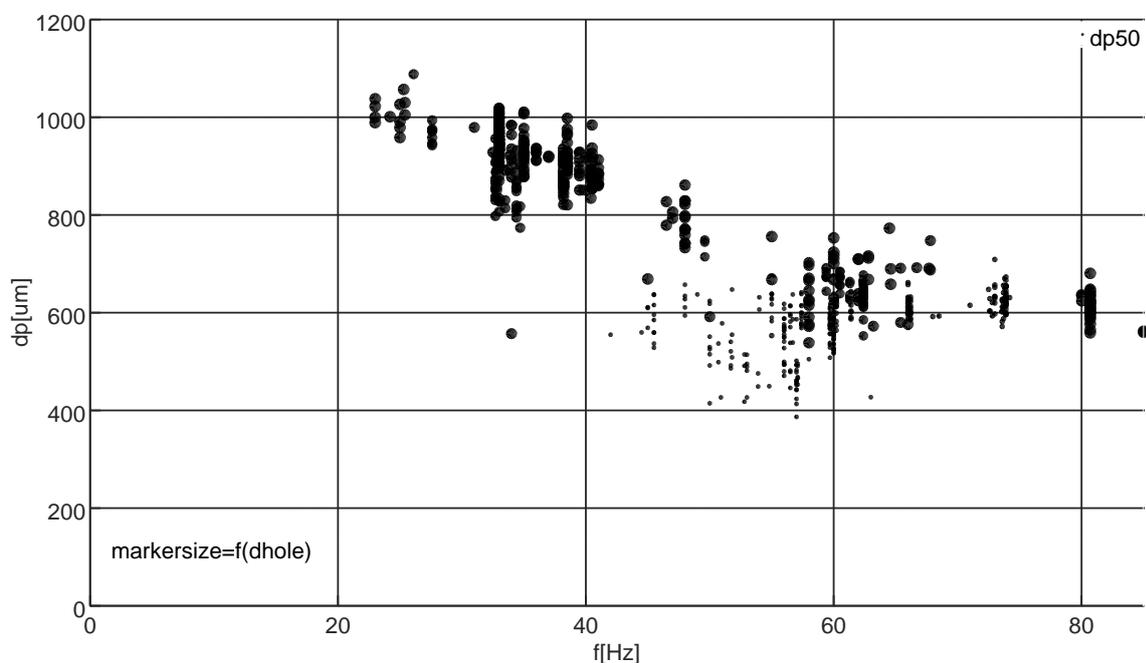


Abb. 7-2: Daten aus der Prozessdatenerfassung für Trommeldurchmesser $D=60$ mm; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [μm] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz f [Hz]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

7.2 Umrechnung: Motorfrequenz in Trommeldrehzahl

In der Prozessdatenerfassung wird die Motorfrequenz f [Hz] des Antriebsmotors eingetragen. Die Umrechnung erfolgt über den in Glg. 7-3 angegebenen Zusammenhang. Der Antriebsmotor ist ein Asynchronmotor mit 1 Polpaar, also 2 Polen. Bei 50 Hz läuft der Motor mit einer Nenndrehzahl von 2800 U/min (siehe Glg. 7-1). Die Übersetzung des Riementriebs von der Motorachse auf die Werkzeugachse ist in Glg. 7-2 angegeben.

$$K = \frac{n_{nenn}}{f_{nenn}} = \frac{2800 \frac{\text{U}}{\text{min}}}{50 \text{ Hz}} = 56 \frac{\text{U}}{\text{Hz}} \quad (7-1)$$

$$i_{M \rightarrow W} = \frac{d_W}{d_M} = \frac{80 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 1,6 \quad (7-2)$$

$$n \left[\frac{\text{U}}{\text{min}} \right] = f \text{ [Hz]} \frac{K}{i_{M \rightarrow W}} = f \text{ [Hz]} \frac{56}{1,6} \quad (7-3)$$

7.3 Modellerstellung

Bei der Betrachtung der mittleren Partikelgrößen in Abhängigkeit der Drehzahl, des Trommeldurchmessers und vor allem des Lochdurchmessers kann eine Unterscheidung zwischen großen Löchern mit Lochdurchmesser $d_{loch} > 1,5 \text{ mm}$ und kleinen Löchern $d_{loch} < 1,5 \text{ mm}$ aufgestellt werden, da kleine Löcher bei gleichen Prozessbedingungen kleinere Partikel produzieren. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde diese Unterscheidung auf das Trommelüberlaufen (siehe Kap. 7.3.3, Überlaufparameter p) geändert, da primär die Benetzung der Löcher für die Modellwahl ausschlaggebend ist. Das Kräftebilanzmodell wird bei relativ voller, aber nicht überlaufender Trommel ($p > 50\%$ bis $p < 100\%$) verwendet. Das Spinning Disc Modell, das die Partikelgröße ohne Berücksichtigung der Löcher berechnet, wird bei relativ leerer ($p < 10\%$) und stark überlaufender Trommel ($p > 200\%$) verwendet. In den Übergangsbereichen wird zwischen beiden Modellen mittels des Überlaufparameters p linear interpoliert. Die für beide Modelle aus der Literatur entnommenen Gleichungen wurden auf die Schlackenverrundung angepasst.

7.3.1 Kräftebilanzmodell

Originalmodell

Das Kräftebilanzmodell basiert auf dem in Qin et al. (2013) beschriebenen Kräftegleichgewicht (siehe auch Kap. 2.2). Jedoch wird vom Betrieb im Ligamentregime ausgegangen und die Kräfte definitionen darauf angepasst. Der Kräftebilanz liegt die Annahme zugrunde, dass die Strähne das Loch vollständig benetzt. Die Oberflächen-

und Widerstandskraft werden daher mit dem Lochdurchmesser gebildet. Im Gegensatz dazu wird die entgegenwirkende Zentrifugalkraft mit dem Partikeldurchmesser (bzw. -masse) gebildet, um aus der Kräftebilanz die gewünschte Partikelgröße berechnen zu können.

$$F_s + F_w = F_z \quad (7-4)$$

$$d_{loch} \pi \sigma + \frac{16 u_{loch} \eta l^2}{d_{loch}} = m_p \omega^2 \left(\frac{D}{2} \right) \quad (7-5)$$

Die Partikelmasse kann durch $m_p = \rho \frac{d_p^3 \pi}{6}$ und die Lochaustrittsgeschwindigkeit mit $u_{loch} = \frac{\dot{V}}{A_{loch} n_{loch}}$ berechnet werden.

$$d_{loch} \pi \sigma + \frac{16 u_{loch} \eta l^2}{d_{loch}} = \frac{d_p^3 \pi}{6} \rho \omega^2 \left(\frac{D}{2} \right) \quad (7-6)$$

Daraus kann der Partikeldurchmesser berechnet werden.

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{12}{\rho \omega^2 D \pi} \left(d_{loch} \pi \sigma + \frac{16 u_{loch} \eta l^2}{d_{loch}} \right)} \quad (7-7)$$

$$\text{mit } u_{loch} = \frac{\dot{V}}{A_{loch} n_{loch}} = \frac{\frac{\dot{m}}{\rho}}{\frac{d_{loch}^2 \pi}{4} n_{loch}} \quad (7-8)$$

Anpassung des Kräftebilanzmodells

Das originale Kräftebilanzmodell (Glg. 7-7) muss durch Einführung von drei Faktoren an die Partikelgrößen aus der Prozessdatenerfassung angepasst werden. Das Resultat ist in Glg. 7-9 dargestellt. Die eingeführten Faktoren sind darin fett hervorgehoben. Bei der Anpassung wurden die Datenpunkte, die mit Trommeln mit kleinen Löchern ($d \leq 1,5$ mm) aufgenommen wurden, höher gewichtet, als die mit großen Löchern. Diese Vorgehensweise wird mit der bei Trommeln mit großen Löchern nicht zutreffenden Annahme der vollständigen Lochbenetzung begründet.

$$d_p = \mathbf{0,55} \sqrt[3]{\frac{12}{\rho \omega^2 D \pi} \left(\mathbf{3} d_{loch} \pi \sigma + \mathbf{0,001} \frac{16 u_{loch} \eta l^2}{d_{loch}} \right)} \quad (7-9)$$

$$\text{mit } u_{loch} = \frac{4 \dot{m}}{\rho d_{loch}^2 \pi n_{loch}} \quad (7-10)$$

Der Vergleich zwischen Prozessdatenerfassung und angepasstem Kräftebilanzmodell ist in Abb. 7-3 dargestellt. Darin sind die mittleren Partikelgrößen aus der Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte) und die durch das angepasste Kräftebilanzmodell

bei gleichen Prozessbedingungen berechnete Partikelgrößen (blaue Punkte) für Trommeln mit Trommelaußendurchmesser von $D=60$ mm in Abhängigkeit der Motorfrequenz dargestellt. Die Punktgröße ist in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers dargestellt. Kleine Punkte stellen dabei kleine Lochdurchmesser dar.

Das Kräftebilanzmodell kann nur die Punkte, wo Trommeln mit kleinen Löchern verwendet wurden, gut abschätzen. Das kann aus Abb. 7-3 an der Übereinstimmung der kleinen blauen und schwarzen Punkte bei Motorfrequenzen zwischen 45 und 60 Hz erkannt werden. Für Trommeln mit großen Löchern berechnet das Modell eine zu große Partikelgröße. Die großen blauen Punkte liegen alle oberhalb der dazugehörigen großen schwarzen Punkte. Dieser Effekt nimmt zwar mit steigender Motorfrequenz ab, bleibt jedoch deutlich vorhanden. Bei niedrigen Motorfrequenzen weichen die Berechnungen mit ca. $500 \mu\text{m}$ sehr stark von der gemessenen Partikelgröße ab. Bei hohen Drehgeschwindigkeiten sinken die Abweichungen auf ungefähr $200 \mu\text{m}$ ab. Die Abweichungen zwischen tatsächlichen und berechneten Partikelgrößen können mit einer getroffenen Annahme in der Berechnung erklärt werden. In der Berechnung wird von einer vollständigen Benetzung aller Löcher ausgegangen. Bei großen Lochdurchmessern wird diese Voraussetzung aber nicht erfüllt. Daher wird eine zu große Partikelgröße berechnet.

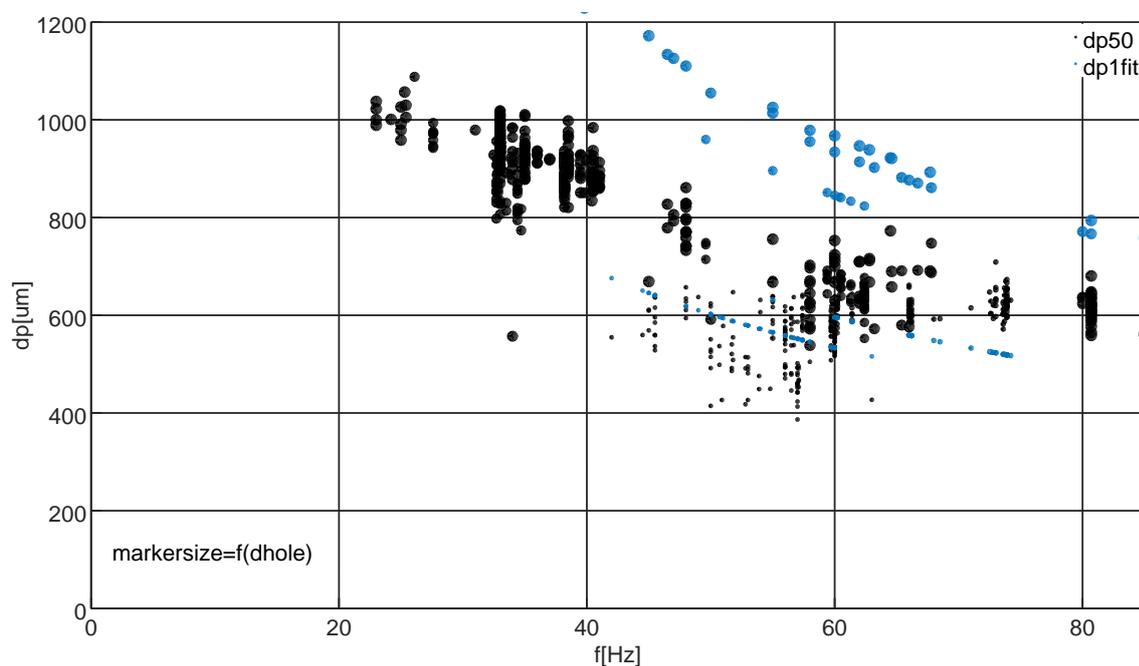


Abb. 7-3: Daten aus der Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte) und Partikelgrößenberechnung mit dem Kräftebilanzmodell (blaue Punkte) für Trommeldurchmesser $D=60$ mm; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [μm] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz f [Hz]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

7.3.2 Spinning Disc Modell

Originalmodell

Das Spinning Disc Modell basiert auf dem Modell nach Dhirhi et al. (2016), das die Partikelgröße bei der Schlackenverrundung mit Hilfe einer flachen Scheibe beschreibt. (siehe auch Kap. 2.2)

$$Re = \frac{4 \rho \dot{V}}{\pi \eta R_{disc}} = \frac{4 \dot{m}}{\pi \eta R_{disc}} \quad (7-11)$$

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma R_{disc}}} \quad (7-12)$$

$$We = \frac{\rho \omega^2 R_{disc}^3}{\sigma} \quad (7-13)$$

$$d_p = \frac{D}{2} 6,28 Re^{0,21} Oh^{0,92} We^{-0,26} \quad (7-14)$$

Anpassung des Spinning Disc Modells

Das Spinning Disc Modell (Glg. 7-14) muss durch Verändern zweier Faktoren (fett markierte Zahlen in Glg. 7-15) angepasst werden, um die Partikelgröße des Schlackenverrundungsprozesses berechnen zu können. Dieses Modell sollte für Trommeln mit großen Löchern ($d \geq 1,5$ mm) gute Vorhersagen zulassen. Daher wurden im Fitting-Prozess die Datenpunkte, wo Trommeln mit großen Löchern verwendet wurden, höher gewichtet, als die Datenpunkte für Trommeln mit kleinen Löchern. Für die Vorhersage der Partikelgröße bei kleinen Bohrungen wurde das Kräftebilanzmodell angepasst. (siehe Kap. 7.3.1)

$$d_p = \frac{D}{2} \mathbf{11} Re^{0,21} Oh^{0,92} We^{-0,31} \quad (7-15)$$

In Abb. 7-4 ist der Vergleich zwischen Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte im Diagramm) und angepasstem Spinning Disc Modell (Glg. 7-15, blaue Punkte im Diagramm) für einen konstanten Tommelaußendurchmesser von $D=60$ mm dargestellt. Die Partikelgröße ist in Abhängigkeit der Motorfrequenz dargestellt. Die Größe der Datenpunkte ist als Funktion der Bohrungsgröße angepasst: kleiner Punkt = kleiner Bohrungsdurchmesser. Für Trommeln mit großen Löchern kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Prozessdatenerfassung und Modellberechnungen gefunden werden. Große blaue Punkte und große schwarze Punkte stimmen vorallem bei mittleren Motorfrequenzen ($30 \text{ Hz} \leq f \leq 70 \text{ Hz}$) gut überein. Nur bei sehr geringer und sehr hoher Motorfrequenz lässt sich eine Abweichung feststellen. Bei Verwendung kleiner

Löcher (kleine Punkte) liefert das Modell keine guten Ergebnisse. Das kann damit erklärt werden, dass das Spinning Disc Modell den Bohrungsdurchmesser und die Bohrungsanzahl in der Trommel nicht berücksichtigt. Bei der Verwendung von großen Löchern kann also keine Abhängigkeit der Partikelgröße von der Bohrungsgröße festgestellt werden. Erst ab Bohrungsgrößen von ca. 1,5 mm wird die Partikelgröße beeinflusst.

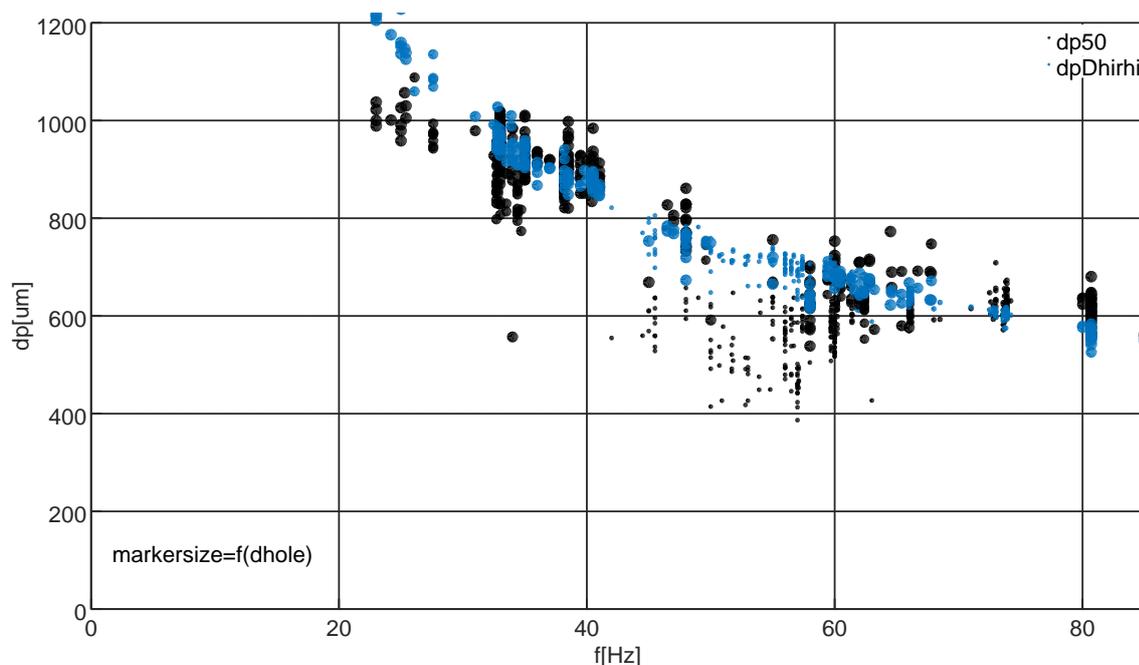


Abb. 7-4: Daten aus der Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte) und Partikelgrößenberechnung mit dem Spinning Disc Modell (blaue Punkte) für Trommeldurchmesser $D=60\text{mm}$; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [μm] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz $f[\text{Hz}]$. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

7.3.3 Berechnung des Trommelüberlaufens

Bei zu hohem Durchsatz oder zu geringer Drehzahl läuft die Trommel über. Dieser Betriebszustand unterscheidet sich erheblich vom reinen Lochdurchsatz. Daher muss dieser Zustand berechnet werden können. Dazu wird das angepasste Kräftebilanzmodell (Glg. 7-9) weiter verändert und angepasst. Die dafür erhaltene Kräftebilanz (Glg. 7-16) mit den angepassten Faktoren wird für die Berechnung des Trommelüberlaufens verwendet.

$$0,001 \frac{16 l^2 u_{loch}^2}{d_{loch}} + 3 d_{loch} \pi \sigma = \frac{1}{0,55^3} \rho \omega^2 \frac{D}{2} \frac{d_{lig}^2 \pi}{4} l_{lig} \quad (7-16)$$

Die Kräftedefinitionen müssen jedoch leicht verändert werden. Die Zentrifugalkraft wird anstatt mit dem Partikelvolumen, mit dem Ligamentvolumen, gebildet aus mittlerem Ligamentdurchmesser und Ligamentlänge, berechnet. Der mittlere Ligamentdurchmesser (Glg. 7-17) wird als gewichteter Mittelwert zwischen Lochdurchmesser und dem in Kashiwaya et al. (2010b) abgeschätzten Ligamentenddurchmesser von 0,2 mm gebildet. Die Gewichtung wird über ein Fitting erhalten. Die Ligamentlänge (Glg. 7-18) wird durch eine empirisch ermittelte Gleichung berechnet. Die tatsächliche Ligamentlänge kann nicht mit dieser Gleichung abgeschätzt werden!

$$d_{lig} = \frac{d_{loch} + 6 \cdot 0,0002}{6 + 1} \quad (7-17)$$

$$l_{lig} = \frac{56,6 d_{loch}^2 n_{loch}}{u_{loch}} \quad (7-18)$$

Nach Einsetzen von Glg. 7-17 und Glg. 7-18 in Glg. 7-16 wird eine quadratische Gleichung in u_{loch} erhalten. Mit Hilfe der quadratischen Lösungsformel kann diese gelöst werden. Dabei darf nur der positive Teil weiterverwendet werden, da eine negative Ligamentlänge keinen realen Zustand beschreibt.

Mit Hilfe der berechneten Lochaustrittsgeschwindigkeit u_{loch} kann bei gegebenem Durchsatz die benötigte Lochaustrittsfläche mit Glg. 7-19 berechnet werden. Unter Berücksichtigung des Lochdurchmessers wird die benötigte Lochanzahl (Glg. 7-20) erhalten. Der Vergleich zwischen tatsächlicher und benötigter Lochanzahl ergibt den prozentualen Überlauf (Glg. 7-21).

$$A_{loch,benötigt} = \frac{\dot{m}}{u_{loch} \rho} \quad (7-19)$$

$$n_{loch,benötigt} = \frac{4 A_{loch,benötigt}}{d_{loch}^2 \pi} \quad (7-20)$$

$$p = \frac{n_{loch,benötigt}}{n_{loch}} 100 \quad (7-21)$$

In Abb. 7-5 ist die mittlere Partikelgröße aus der Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte) und die Ergebnisse der Berechnung des Trommelüberlaufens (Glg. 7-21, rote Punkte) in Abhängigkeit der Motorfrequenz dargestellt. Das Trommelüberlaufen ist als Anteil der benötigten (für eine volle, nicht überlaufende Trommel) zur tatsächlichen Bohrungsanzahl in Prozent dargestellt. Ein Datenpunkt mit dem Wert von 100 % stellt eine volle, gerade nicht überlaufende Trommel dar. Höhere Werte ($\text{prozÜberlauf} \geq 100\%$) stellen überlaufende Trommeln dar. Kleinere Werte ($\text{prozÜberlauf} \leq 100\%$) stellen entweder Trommeln mit vollständig benetzten Löchern oder bei sehr kleinen Werten ($0\% \leq \text{prozÜberlauf} \leq 50\%$) Trommeln mit nicht vollständig benetzten Löchern dar. Die Größe der Datenpunkte ist als Funktion der Bohrungs-

größe angepasst: kleiner Punkt = kleiner Bohrungsdurchmesser. Aus Abb. 7-5 ist ersichtlich, dass Trommeln mit kleinen Löchern (kleine Punkte) immer im Überlaufen betrieben wurden. Die kleinen roten Punkte liegen teilweise deutlich über 100% Überlauf. Die in der Vergangenheit verwendeten Schleudertrommeln besitzen, bis auf eine einzige Ausnahme, 32 Bohrungen. Daraus wird geschlossen, dass für kleine Bohrungen die Anzahl deutlich erhöht werden muss. Bei Trommeln mit großen Bohrungen (große Punkte) wird deutlich, dass diese mit nicht vollständig benetzten Löchern betrieben wurden. Die großen roten Punkte liegen deutlich unter 50% Überlauf.

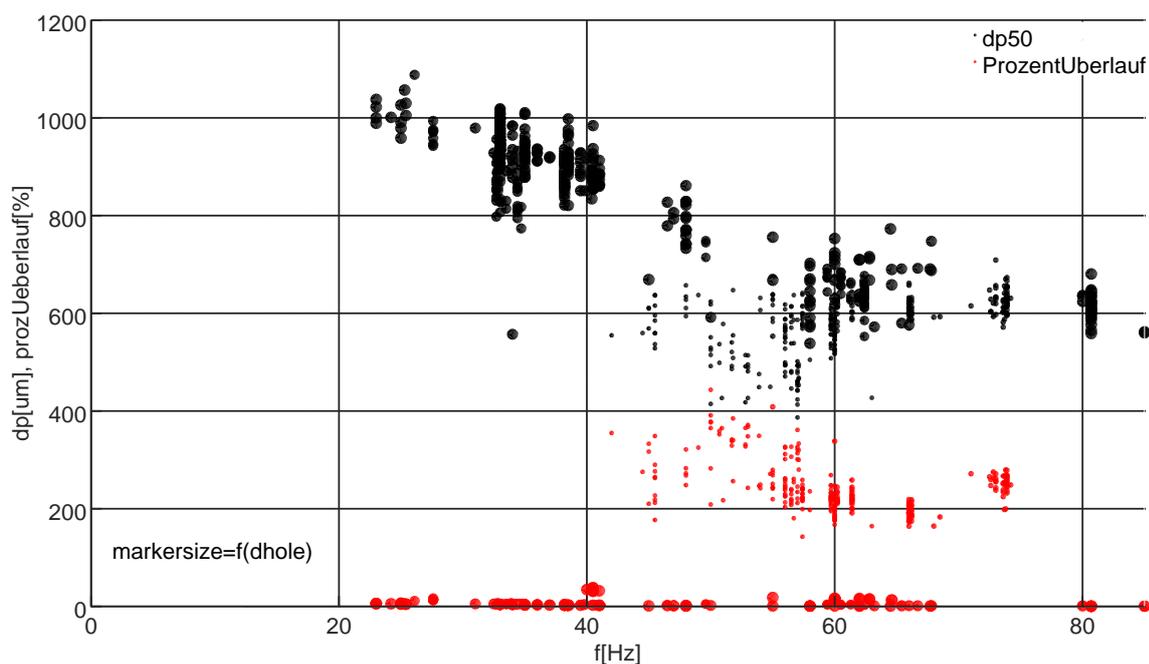


Abb. 7-5: Daten aus der Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte) und Vorhersage des Trommelüberlaufens (rote Punkte) für Trommeldurchmesser $D=60$ mm; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [μm] und der prozentuale Überlauf [%] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz f [Hz]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

7.4 Ergebnisse

Die beiden Modelle, das angepasste Kräftebilanzmodell (Glg. 7-9) und Spinning Disc Modell (Glg. 7-15), können durch die Berechnung des Trommelüberlaufens gut für die Vorhersage der Schlackenpartikelgröße verwendet werden. Die Unterscheidung zwi-

schen den Modellen findet durch den Überlaufparameter p (Glg. 7-21) statt. Folgende Bereiche werden unterschieden:

Löcher nicht benetzt: ($p < 10\%$)	Spinning Disc Modell
Löcher teilweise benetzt: ($10\% < p < 50\%$)	lineare Interpolation
Löcher benetzt: ($50\% < p < 100\%$)	Kräftebilanzmodell
Trommelüberlaufen: ($100\% < p < 200\%$)	lineare Interpolation
starkes Trommelüberlaufen: ($p > 200\%$)	Spinning Disc Modell

In den Abb. 7-6 und 7-7 ist ein Vergleich zwischen den gemessenen mittleren Partikelgrößen aus der Prozessdatenerfassung (schwarze Punkte) und den durch das Gesamtmodell abgeschätzten Partikelgrößen (rote Punkte) in Abhängigkeit der Motorfrequenz f und in Abb. 7-6 zusätzlich in Abhängigkeit des Trommelaußendurchmessers D dargestellt. Die Größe der Datenpunkte ist bohrungsgrößenabhängig: kleiner Punkt = kleiner Bohrungsdurchmesser.

Aus Abb. 7-6 kann eine gute Übereinstimmung der Messwerte und der Vorhersagen gefunden werden. Dieselbe Aussage kann aus Abb. 7-7 getroffen werden. Die roten Punkte stimmen gut mit den dazugehörigen schwarzen Punkte überein. Eine geringe Abweichung kann für die kleinen Punkte gefunden werden. Dies kann mit dem in Kap. 7.3.3 und Abb. 7-5 gefundenen Trommelüberlaufen erklärt werden. Dort wird ein Trommelüberlaufen für die dargestellten kleinen Punkte berechnet. Bei überlaufender Trommel gestaltet sich die genaue Partikelgrößenberechnung schwierig, was sich in höheren Abweichungen zeigt. Zusätzlich ist die Berechnung bei sehr kleinen ($f \leq 30$ Hz) und sehr großen Motorfrequenzen ($f \geq 70$ Hz) ungenauer, als bei mittleren ($30 \text{ Hz} \leq f \leq 70 \text{ Hz}$). Grundsätzlich kann aber die Partikelgröße gut als Funktion der Prozessparameter berechnet werden.

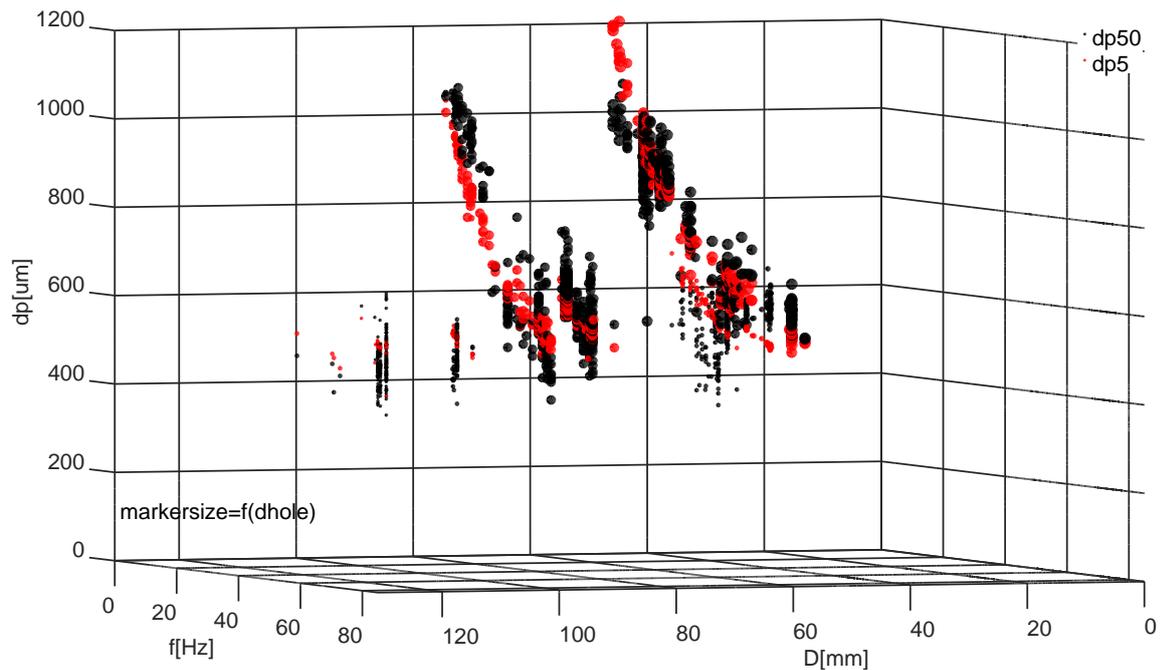


Abb. 7-6: Daten aus der Prozessdatenerfassung (schwarz) und Partikelgrößenberechnung mit dem Gesamtmodell (rot) in 3D; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [µm] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz f [Hz] und des Trommeldurchmessers D [mm]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

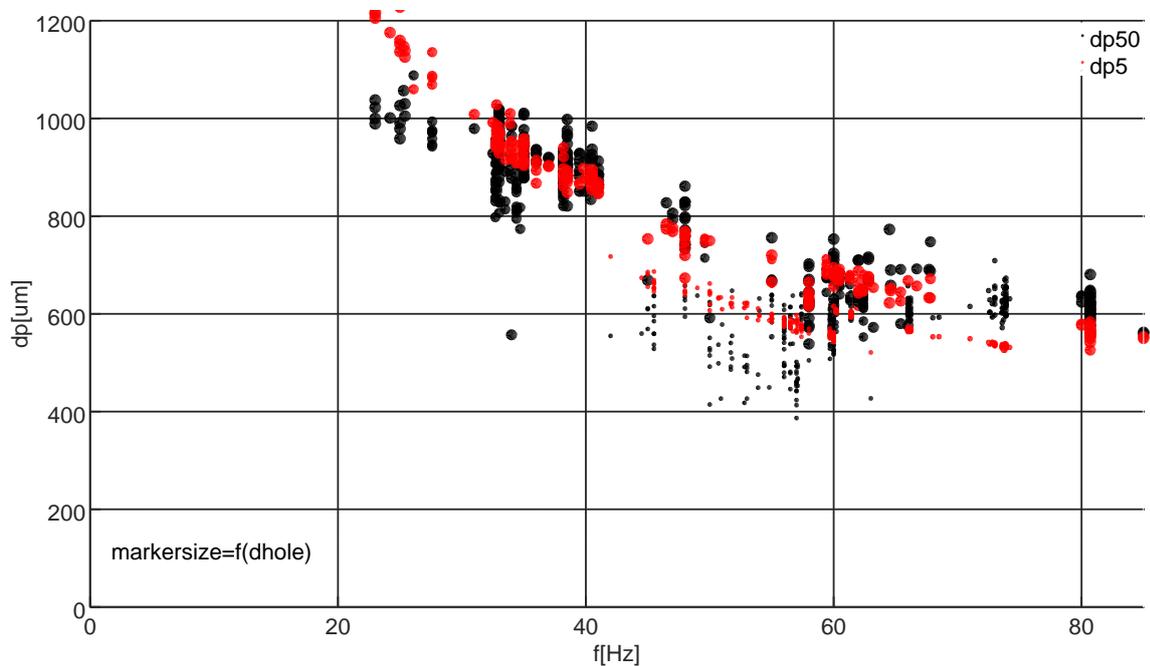


Abb. 7-7: Daten aus der Prozessdatenerfassung (schwarz) und Partikelgrößenberechnung mit dem Gesamtmodell (rot) für Trommeldurchmesser $D=60$ mm; Die mittlere Partikelgröße $d_{p,50}$ [µm] dargestellt als Funktion der Motorfrequenz f [Hz]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

7.5 Fehlerbetrachtung

Die Modelle sind auf die Prozessdatenerfassung angepasst. Der große Vorteil ist dabei die große Datenmenge aus 1,5 Jahren Produktion. Diese Probenanzahl hätte den Umfang dieser Arbeit weit überschritten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass teilweise Messungen verfälscht aufgenommen und in der Prozessdatenerfassung eingetragen wurden.

Im Auffangbehälter (primär von Ofen 4) sammeln sich vor allem kleine Partikel an und werden beim Ausblasen gesammelt abtransportiert. Die Probenahme gestaltet sich dadurch sehr schwierig. Beim Ziehen einer großen Probe über mehrere Minuten und anschließendem Probeteilen kann dieser systematische Fehler zwar einigermaßen eliminiert werden. Jedoch ist dafür der zeitliche Aufwand für die Produktionsmitarbeiter zu groß. Daher werden immer nur kleine Proben im Bereich von ca. 100 g gezogen, die zur Siebanalyse weiter auf ca. 30 g verkleinert werden. Die Probeteilung erfolgt aber nicht durch einen Probeteiler, sondern durch die Entnahme mit einem Löffel. Die Repräsentativität der Proben wird daher stark angezweifelt. Dieser Nachteil wird zwar durch die große Datenmenge relativiert, es bleiben jedoch Zweifel an der Repräsentativität bestehen.

Die Siebanalyse wird mit Maschenweiten von 150 μm bis 1 mm durchgeführt. Der mittlere Durchmesser wird durch die Betrachtung der dadurch erhaltenen Partikelgrößenverteilung berechnet. Bei der Produktion mit geringen Drehzahlen, wo große Partikel mit $d_{p,50} > 900 \mu\text{m}$ hergestellt werden, befindet sich teilweise der Großteil des Rückstandes auf dem Sieb mit einer Maschenweite von 1 mm. In diesem Fall kann zwar eine Partikelgrößenverteilung erstellt werden, der mittlere Partikeldurchmesser aber nur sehr grob abgeschätzt werden. Das Problem dabei ist die unbekannte obere Grenze der größten Siebklasse. Die mittleren Partikeldurchmesser bei geringen Drehzahlen sind deshalb mit großen Unsicherheiten behaftet.

Aus der Prozessdatenerfassung lässt sich kein Überlaufen der Trommel erkennen. Das Modell zur Vorhersage des Überlaufens basiert deshalb auf Datenpunkten, die im Laufe dieser Arbeit aufgenommen wurden. Die Menge der Datenpunkte ist daher viel kleiner, als das die Prozessdatenerfassung zulassen würde.

Der Beginn des Überlaufens der Schleudertrommel ist stark abhängig von der Temperatur im Ofen und die dadurch beeinflusste Viskosität der Schmelze. Bei der Anpassung des Modells konnte dieser Einfluss nicht berücksichtigt werden, da die Temperatur im Ofen zwar kontinuierlich aufgenommen wird, die exakte Uhrzeit der Probenahme aber nicht in der Prozessdatenerfassung eingetragen ist. Da die Temperatur einen Einfluss auf die Partikelgröße und einen sehr starken Einfluss auf das Überlaufen der Trommel (vor allem bei kleinen Bohrungen) hat, wurde die Berück-

sichtigung der Schmelztemperatur zwar versucht aber nicht erfolgreich umgesetzt. Die Anpassung der Modelle ohne Temperatureinfluss lieferte genauere Ergebnisse.

8 Überprüfung der Modellierung durch die Produktionsversuche

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche an der Produktionsanlage wurden zur Überprüfung und Verbesserung des Modells zur Abschätzung der Partikelgröße und des Überlaufpunktes verwendet. Die Verbesserungen sind bereits im Modell nach Kap. 7.3 eingearbeitet.

8.1 Ergebnisse

In Abb. 8-1 sind die produzierten, mittleren Partikelgrößen (schwarze Punkte), die mit Hilfe der Produktionsversuche und der optischen Partikelgrößenmessung erhalten wurden und die vom Gesamtmodell (Kap. 7.4, rote Punkte) vorhergesagten Partikelgrößen in Abhängigkeit der Motorfrequenz f für einen konstanten Trommelaußendurchmesser $D=60$ mm gezeigt. Die Größe der Datenpunkte ist bohrengrößenabhängig dargestellt: kleiner Punkte = kleiner Bohrungsdurchmesser.

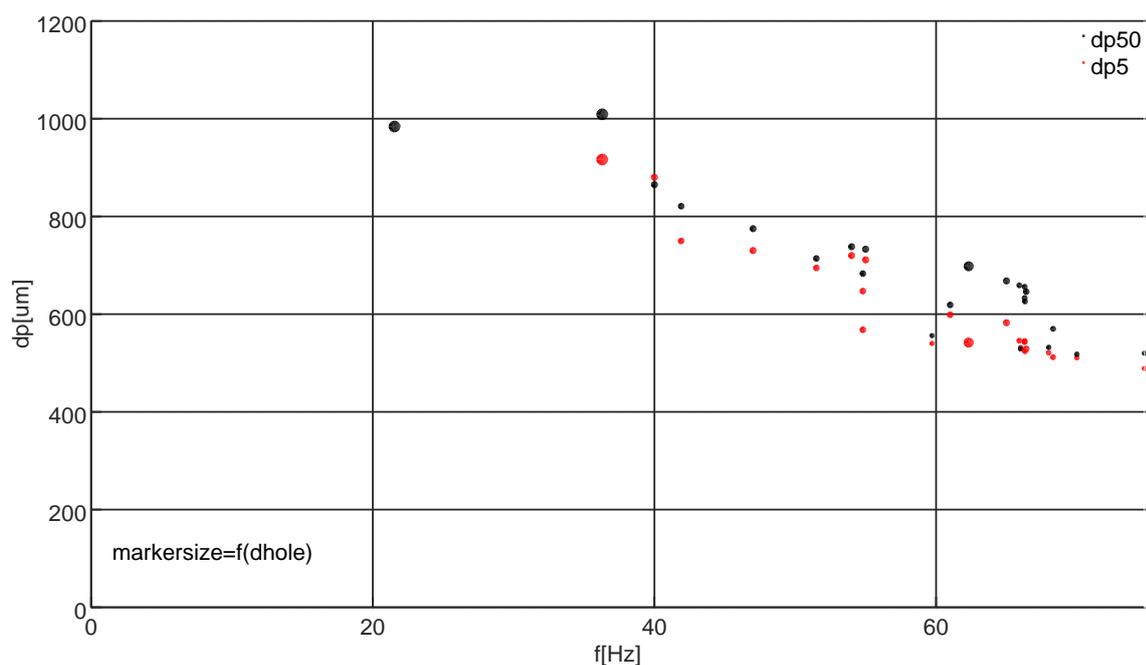


Abb. 8-1: Ergebnisse der Produktionsversuche mit Trommeldurchmesser $D=58$ mm und $D=60$ mm:

Darstellung der mittleren Partikeldurchmesser aus den Experimenten (schwarze Punkte) und der durch das Gesamtmodell abgeschätzten (rote Punkte) in Abhängigkeit der Motorfrequenz f [Hz]. Die Punktgröße ist als Funktion des Lochdurchmessers dargestellt: kleiner Punkt = kleines Loch

In Abb. 8-1 können relativ geringe Abweichungen zwischen Experimenten und Berechnungen gefunden werden. Die Partikelgrößen können auf ca. 100 μm genau vorhergesagt werden. Vor allem der Übergang zwischen den Modellen, dem Kräftebilanzmodell und dem Spinning Disc Modell, ist schwierig zu modellieren und produziert größere Abweichungen. Dies kann an den größeren Abweichungen bei der Verwendung von Trommeln mit großen Bohrungsdurchmessern erkannt werden. Der Abstand zwischen den großen schwarzen und großen roten Punkten ist durchwegs größer als für die kleinen Punkte.

Die neuen Trommelgeometrien werden so ausgelegt, dass nur das Kräftebilanzmodell zur Anwendung kommt. Dies kann mit der Verwendung von kleinen Löchern und der Anpassung der Lochanzahl auf das Trommelüberlaufen erreicht werden. Deshalb sind diese Ungenauigkeiten ohne Relevanz und nur für die alte Trommelgeometrie von Bedeutung.

9 Anwendung des Modells zur Trommelauslegung

Aus den Ergebnissen der Produktionsversuche und mit Hilfe des Gesamtmodells (siehe Kap. 7 bzw. 7.4), das in Octave erstellt wurde, wurde eine Excel-Datei zur Trommelauslegung (Abb. 9-1) und Abschätzung von bestehenden Trommeln (Abb. 9-2) erstellt. Dabei wurde das Modell zur Abschätzung der Partikelgröße von Octave in vba-Excel übertragen. Als Ergebnis kann für bestehende Trommeln die mittlere Partikelgröße und das Trommelüberlaufen abgeschätzt werden. Zusätzlich wurde eine Trommelauslegung erstellt.

Der Lochdurchmesser wird durch die gewünschte Partikelgröße bestimmt. Dieser wird um 10 % größer als die Partikelgröße gewählt. Dann kann über eine Iteration die benötigte Lochanzahl und Trommeldrehzahl bestimmt werden, um ein Überlaufen der Trommel gerade zu verhindern. Dafür wird die Vorhersage des Überlaufens verwendet. In diesem Betriebsbereich sind die Löcher vollständig benetzt. Damit ergibt sich die Verwendung des Kräftebilanzmodells. Nur für die Berechnung des Partikelgrößenverlaufs in Abhängigkeit der Trommeldrehzahl kommt auch das Spinning Disc Modell zur Anwendung, da bei starker Erhöhung der Drehzahl die Löcher immer weniger benetzt sind. Dabei wird der Betriebszustand für die Verwendung des Spinning Disc Modells erreicht.

Der Trommeldurchmesser muss für diese Vorgehensweise vorgegeben werden. Da zur Fertigung nur gewisse Rohrdurchmesser verwendet werden können, soll diese Anpassung auch händisch erfolgen. Zusätzlich werden geometrische Daten der Trommel und die Stoffdaten der Schlacke, die im Modell verwendet werden, ausgegeben. Als Zusatzfunktion wird eine Überprüfung der Iteration mit den Trommelauslegungsergebnissen durchgeführt.

Die Vorgehensweise der Trommelauslegung soll folgendermaßen aussehen:

- Eingabe in die Trommelauslegung (Abb. 9-1)
 - Massenstrom
 - Zielpartikelgröße
 - geschätzter Trommeldurchmesser (ca. 55 bis 120 mm)
- Berechnung einer passenden Trommel
- Anpassung des Trommeldurchmessers
- Übertragung der Ergebnisse in die Trommelüberprüfung (Abb. 9-2)
- Vergrößerung der Lochanzahl auf einen ganzen Teilungswinkel (zur Vereinfachung der Fertigung)

- Durchführung gewünschter Variationen, z.B.: Durchsatz-, Drehzahlvariation

Das Ergebnis ist eine Trommelgeometrie, die die gewünschte Partikelgröße herstellen soll. Die erforderliche Motorfrequenz und Trommelheizleistung wird auch ausgegeben.

Veränderungen in der Schlackentemperatur können nur im vba-Code durchgeführt werden. Diese konnten aber im Rahmen dieser Arbeit nicht in ausreichender Genauigkeit abgebildet werden. Daher wird von einer Veränderung der Temperatur abgeraten. Die Trommel sollte nur mit einer Motorfrequenz größer als die Grenzfrequenz betrieben werden, um ein Trommelüberlaufen zu verhindern.

Die Auslegung der optimierten Trommelgeometrien wurde bereits nach dieser Vorgehensweise durchgeführt.

Eingabe			
Massenstrom	3000	[g/min]	5,00E-02 [kg/s]
Zielpartikelgröße dp50	530	[µm]	5,30E-04 [m]
Trommeldurchmesser	58	[mm]	0,058 [m]
Wandstärke Trommel	1,5	[mm]	0,0015 [m]
Ausgabe			
Motorfrequenz	66,24	[Hz]	
Trommelheizleistung	5,74	[kW]	
Lochanzahl	74	[1]	
Lochdurchmesser	6,00E-04	[m]	0,60 [mm]
Abstand zwischen Löchern	1,86E-03	[m]	1,86 [mm]
Winkel zwischen Löchern	4,86	[°]	
Summe der Lochquerschnittsflächen	2,09E-05	[m ²]	20,92 [mm ²]
Prozent vom maximalen Durchsatz	86,14	[%]	
Abweichung vom maximalen Durchsatz	-13,86	[%]	
Überprüfung			
Lochanzahl	74	[1]	
Lochdurchmesser	6,00E-04	[m]	0,60 [mm]
Motorfrequenz	66,24	[Hz]	
Partikeldurchmesser dp50	5,30E-04	[m]	530,00 [µm]
Motorgrenzfrequenz zum Überlaufen	61,47	[Hz]	
Maximaler Durchsatz = 100	86,14	[%]	
Abweichung vom maximalen Durchsatz	-13,86	[%]	
Stoffeigenschaften			
Dichte	2762,50	[kg/m ³]	
Oberflächenspannung	3,91E-01	[N/m]	
dynamische Viskosität	6,31E-02	[Pa*s]	

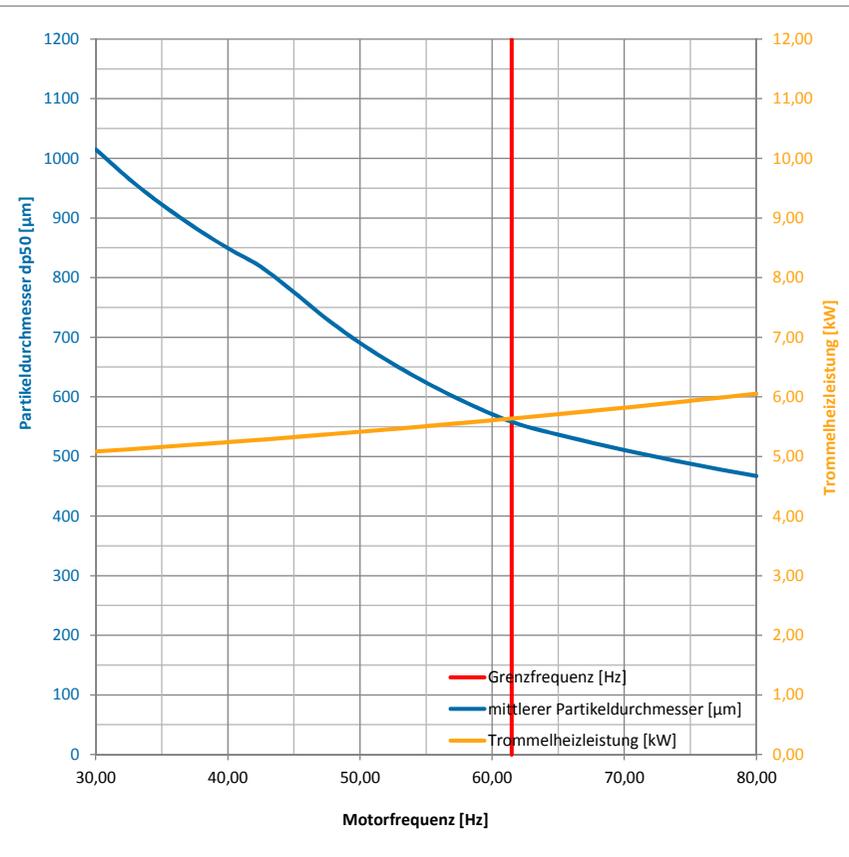


Abb. 9-1: Trommelauslegung in Excel: Nach der Eingabe des Schlackemassenstroms, der Zielpartikelgröße, des Trommeldurchmessers und der Wandstärke der Trommel wird eine geeignete Trommelgeometrie (Lochanzahl, Lochdurchmesser) und die erforderlichen Prozessparameter Motorfrequenz und Trommelheizleistung berechnet. Im Bild rechts ist der Partikelgrößenverlauf und der Heizleistungsverlauf in Abhängigkeit der Motorfrequenz dargestellt. Zusätzlich ist die Grenzfrequenz zum Trommelüberlaufen gekennzeichnet. Die Trommel darf nur mit höherer Motorfrequenz betrieben werden.

Eingabe			
Trommeldurchmesser	58	[mm]	0,058 [m]
Lochanzahl	72	[1]	
Lochdurchmesser	0,6	[mm]	0,0006 [m]
Wandstärke Trommel	1,5	[mm]	0,0015 [m]
Massenstrom	3000	[g/min]	5,00E-02 [kg/s]
Motorfrequenz	67	[Hz]	
Ausgabe			
Partikeldurchmesser dp50	5,26E-04	[m]	525,98 [µm]
Trommelheizleistung	5,75	[kW]	
Motorgrenzfrequenz zum Überlaufen	63,18	[Hz]	
Maximaler Durchsatz = 100	88,93	[%]	
Abweichung vom maximalen Durchsatz	-11,07	[%]	
Abstand zwischen Löchern	1,93E-03	[m]	1,93 [mm]
Winkel zwischen Löchern	5	[°]	
Summe der Lochquerschnittsflächen	2,04E-05	[m ²]	20,36 [mm ²]
Stoffeigenschaften			
Dichte	2762,5	[kg/m ³]	
Viskosität	6,31E-02	[Pa*s]	
Oberflächenspannung	3,91E-01	[N/m]	

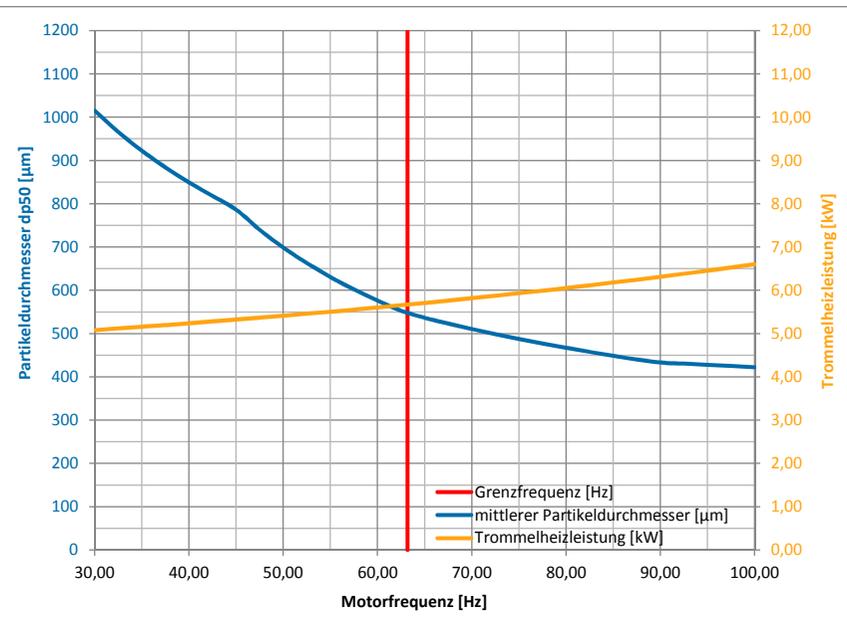


Abb. 9-2: Trommelüberprüfung in Excel:

Nach der Eingabe der Trommelgeometrie (Trommeldurchmesser, Lochanzahl, Lochdurchmesser, Wandstärke), des Schlackemassenstroms und der Motorfrequenz wird ein Partikeldurchmesser für diese Prozessbedingungen abgeschätzt. Zusätzlich wird die erforderliche Trommelheizleistung berechnet. Zur Abschätzung des Trommelüberlaufens bei den angegebenen Bedingungen wird die Motorgrenzfrequenz und der Überlaufparameter berechnet. Wenn die Motorfrequenz unter der Motorgrenzfrequenz liegt, läuft die Trommel über. Im Bild rechts ist der Partikelgrößenverlauf und Heizleistungsverlauf in Abhängigkeit der Motorfrequenz bei Verwendung der in der Eingabe spezifizierten Trommelgeometrie und des angegebenen Massenstroms dargestellt. Zusätzlich ist die Grenzfrequenz zum Trommelüberlaufen gekennzeichnet. Die Trommel darf nur mit höherer Motorfrequenz betrieben werden.

10 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Verrundungsprozess von Schlackepartikel mit Hilfe von Trommelwerkzeugen beschrieben und optimiert.

Der Produktionsprozess wurde charakterisiert. Im bisherigen Prozess werden Trommeln mit Bohrungsdurchmessern von 0,3 mm bis 2,7 mm verwendet. Die Lochanzahl wird nicht variiert, sondern der Prozess primär mit der Größe der Bohrungen und des Trommeldurchmessers eingestellt. Der Schlackenstrahl und dessen Viskosität besitzt einen großen Einfluss auf den Betrieb. Wenn die Trommel nahe des Überlaufens betrieben wird, kann eine geringe Temperaturverringern, die eine Viskositätserhöhung und Durchsatzverringern zur Folge hat, bereits den Prozess negativ beeinflussen, in dem die Trommel zum Überlaufen gebracht wird. Der Betriebszustand der verschiedenen Trommeln war bisher nicht bekannt, wurde im Laufe dieser Arbeit aber überprüft und spezifiziert. Es konnte beobachtet werden, dass die Strähnenbildung an den Trommelbohrungen stark abhängig ist von deren Durchmessern. Die Schlacke kann große Löcher nicht oder nur teilweise benetzen. Die Strähnen werden nicht in der Lochmitte, sondern unter, hinter oder ober dem Loch gebildet. Teilweise konnte eine zweifache Strähnenbildung beobachtet werden. Bei der Verwendung kleiner Löcher ist die Strähnenbildung vereinheitlicht. Je Loch entsteht genau eine Strähne in der Lochmitte.

Der Produktionsprozess wurde mit Hilfe der dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-, Weber- und Ohnesorgezahl unter Verwendung der Modelltheorie auf eine Kleinanlage übertragen. Die Vorgabe für das Scale-Down war die Beibehaltung der Trommelgröße, um die Produktionstrommeln auch auf der Technikumsanlage betreiben zu können. Die Technikumsanlage wurde mit einem Glycerin-Wasser-Gemisch betrieben. Es wurde eine neue Trommelgeometrie aus Stahl gefertigt, die im Gegensatz zu den Produktionstrommeln eine senkrechte Trommelwand und einen Überstand besitzt. Eine Tropfengrößenmessung mit einer Kamera, einem Objektmikrometer und der Auswertung mit Hilfe eines ImageJ-Makros wurde installiert. Damit wurden die Versuche an der Technikumsanlage ausgewertet. Als Ergebnis konnten die Einflussparameter auf den Verrundungsprozess beschrieben werden. Eine Erhöhung der Drehzahl und Verringerung des Durchsatzes resultiert in einer Verringerung der Partikelgröße, wobei die Drehzahl einen größeren Einfluss besitzt. Die Größe und Anzahl der Löcher konnte als wichtiger Parameter für die Strähnenbildung gefunden werden. Große Löcher bilden die Strähnen weniger einheitlich als kleine Löcher. Bei kleinen Löchern muss aber die Anzahl so angepasst werden, dass kein Trommelüberlaufen auftreten kann. Ein Trommelüberlaufen verschlechtert die Regelmäßigkeit des Tropfenschirms und erzeugt große Spritzer. Ein Unterschied zwischen den Produktionstrommeln und

der Stahltrommelgeometrie konnte gefunden werden. Die gewölbte Form der Produktionstrommeln verursacht ein problematischeres Überlaufen. Das überlaufende Fluid läuft an der Außenwand in Richtung der Löcher und zerstört die regelmäßige Strähnenbildung bei den Löchern. Bei Verwendung der Stahltrommeln wurden die Strähnen des überlaufenden Fluids direkt an der Oberkante der Trommel gebildet. Damit konnte keine Beeinflussung der Lochsträhnen beobachtet werden. Der Tropfenschirm wird stark durch die Auftreffposition des Fluids auf die Trommel beeinflusst. Eine exakt mittige Zuführung muss gewährleistet werden, um einen regelmäßigen Tropfenschirm und damit eine enge Tropfengrößenverteilung zu erreichen.

Die Erkenntnisse aus den Technikumsversuchen wurden für die Optimierung des Produktionswerkzeugs verwendet. Zwei verschiedene Geometrien wurden verwendet: Eine Trommelform mit hoher senkrechter Wand und keinem Überstand und eine Trommelform mit niedriger, senkrechter Wand und Überstand. Die Lochanzahl wurde variiert und auf das Trommelüberlaufen eingestellt. Die erstere Form ohne Überstand konnte keine guten Ergebnisse liefern. Die leicht konische, nach oben öffnende Form der Wand verursachte ein ständiges Überlaufen. Die Erhöhung der Lochanzahl verringerte zwar den Anteil, konnte aber das Überlaufen nie komplett verhindern. Die Qualität wurde durch große, unrunde Partikel stark verschlechtert. Bei der Verwendung der zweiten Trommelgeometrie mit Überstand konnte dieser Effekt verhindert werden. Die Ergebnisse waren eine erhöhte Ausbeute an Zielkorn und eine deutliche Qualitätsverbesserung.

Die Prozessdatenerfassung wurde für die Erstellung eines Modells für die Vorhersage der mittleren Partikelgrößen bei verschiedenen Betriebszuständen verwendet. Zusätzlich wurden Produktionsversuche durchgeführt, die für die Optimierung und Validierung des Modells herangezogen wurden. Das Modell lässt sich in zwei Teilmodelle gliedern. Wenn die Löcher benetzt sind, also vor allem, wenn die Lochdurchmesser klein sind und kein Überlaufen stattfindet, wird ein Kräftebilanzmodell verwendet. Dieses berücksichtigt den Einfluss der Lochanzahl und des Lochdurchmessers auf die produzierte Partikelgröße. Bei stark überlaufender Trommel oder Nichtbenetzung der Löcher (Löcher zu groß) wird ein Modell nach Dhirhi et al. (2016) verwendet. Dieses beschreibt die Schlackenverrundung mit Hilfe eines Tellerwerkzeugs. Die Lochanzahl und der Lochdurchmesser werden nicht berücksichtigt. Dieses Modell wurde auf die Schlackenverrundung angepasst. Als Unterscheidungskriterium zwischen den beiden Modellen dient die Vorhersage des Trommelüberlaufens mit Hilfe eines angepassten Kräftebilanzmodells.

Das Modell wurde gemeinsam mit den Erkenntnissen aus den Produktions- und Technikumsversuchen für die Erstellung eines Trommelauslegungstools verwendet. Dieses berechnet die optimale Werkzeuggeometrie und die erforderlichen Prozessparameter

für die Produktion einer gewünschten Partikelgröße. Dieses wurde für die einfache Anwendung von Octave in einen Excel-vba Code übersetzt und in einem Excelsheet umgesetzt. Dieses Tool wurde bereits für die Auslegung zweier Trommelwerkzeuge verwendet. Für die Produktion von Partikel mit $600 \mu\text{m} \leq d_p \leq 1000 \mu\text{m}$ wurde eine Trommel (senkrechte Wand, Überstand) mit Außendurchmesser $D = 58 \text{ mm}$ und 36 Löchern mit jeweils einem Durchmesser von $d_{loch} = 1 \text{ mm}$ hergestellt und erfolgreich in die Produktion integriert. Für die Produktion von Partikel mit $400 \mu\text{m} \leq d_p \leq 600 \mu\text{m}$ wurde eine Trommel mit Außendurchmesser $D = 58 \text{ mm}$ und 72 Löchern mit Bohrungsdurchmesser von $d_{loch} = 0,6 \text{ mm}$ gefertigt und auch erfolgreich in die Produktion integriert. Die Ausbeute, die Stabilität des Prozesses und die Partikelqualität wurden durch die neuen Trommeln verbessert.

11 Ausblick

Eine weitere Produktionsverbesserung soll für die Partikelfractionen von $d_p \leq 300 \mu\text{m}$ und $300 \mu\text{m} \leq d_p \leq 500 \mu\text{m}$ erzielt werden. Dafür kann die Trommelauslegung für eine Abschätzung der erforderlichen Trommelgeometrie verwendet werden. Da eine Trommel für die Feinstfraktion sehr viele kleine Löcher (ca. $270 \times 0,3 \text{ mm}$) erfordert, soll ein Alternativprozess zum mechanischen Bohren gefunden werden. Das Laserbohren kann sowohl die erforderliche Größe, als auch Präzision der Bohrungen liefern. Um den Rundlauf der Trommel weiter verbessern zu können, sollte der händische Schweißprozess zum Beispiel durch einen Laserschweißprozess ersetzt werden. Dadurch könnte sowohl die Laufzeit eines Werkzeugs, als auch dessen produzierte Partikelqualität und die Breite der Verteilung verbessert werden.

Für die Produktion der Feinstfraktion sollten auch Veränderungen in der Trommelgeometrie weiter betrachtet werden. Da die erhebliche Größe der Trommel und die hohe Drehzahl eine hohe Dauerbelastung für das Material und die Schweißnähte bedeuten, sollte eine kleinere Trommel in Betracht gezogen werden. Außerdem muss das Problem des Faserns, also die unerwünschte Produktion von Schlackefasern bei hoher Drehzahl, weiter verfolgt werden, um Abhilfe schaffen zu können. Damit könnte der Ausschuss und der Aufwand für die Produktionsmitarbeiter reduziert werden.

Für die bestehenden Öfen ist eine Erhöhung des Durchsatzes geplant. Um die Produktionstrommeln danach weiter betreiben zu können, muss die Lochanzahl bei der Herstellung neuer Trommelwerkzeuge bereits auf den erhöhten Durchsatz angepasst werden. Andernfalls kann es zum Überlaufen der Trommel und zu erheblichen Beeinträchtigungen bei der Ausbeute und der Qualität der Partikeln kommen.

12 Anhang

12.1 ImageJ Makro zur Auswertung der Tropfenfotos

ImageJ Makro zur automatisierten Auswertung der Tropfenfotos

```
/*
Verarbeitung von Tropfenfotos mit vorhandenem Skalenfoto und Vermessung der Tropfen
Es wird ein Ausschnitt aus den Bilddateien erstellt, um nur den gut beleuchteten Bereich zu
verarbeiten und die Bildgröße zu reduzieren.
Die Skalendatei wird automatisch geöffnet und eine Linie eingezeichnet.
Es muss im Verzeichnis mit den Originaldateien ein leerer Ordner mit Ordnername "bearbeitet"
erstellt werden!
Autor: Simon Alkin, Mai 2017
*/

imin=1;      // Index des ersten Bildes
imax=102;    // Index des letzten Bildes
nBilder=30;  // Anzahl der Bilder pro Umwandlungsdurchlauf (bei 32bit Java nicht höher als 10;
abhängig vom ansprechbaren Arbeitsspeicher)

W="St3";     // Werkzeugnummer
n=900;      // Drehzahl [U/min]
m=520;      // Massendurchsatz [g/min]

// Ordner und Dateinamen
Ordnername =
    "E:\Bilder\Tech_GlyWa_"+W+"_20170612\Tech_GlyWa_"+W+"_"+n+"rpm_"+m+"gm\Te
ch_GlyWa_"+W+"_"+n+"rpm_"+m+"gm_Tropfen\";
Dateinameopen = "Tech_GlyWa_"+W+"_"+n+"rpm_"+m+"gm ("+"+imin+").JPG";
Dateinamesave = "bearbeitet\Tech_GlyWa_"+W+"_"+n+"rpm_"+m+"gm_Tropfen0000.jpg"; //
selber Name wie Originaldatei
OrdnernameSkala = "E:\Bilder\Tech_GlyWa_"+W+"_20170711\Skala.jpg"; // Änderung
der Skala: Ändern der Punkte für die Skalenlinie!!!

// Partikeleingrenzung für Vermessung
RundheitMIN=0.1;
RundheitMAX=1;
AreaMIN=0.01;
AreaMAX=10;

// Eckkoordinaten für die rechteckige Beschneidung der Originalbilddateien
// (Koordinaten in Pixel; Koordinatenursprung (0,0) an linker oberer Bildkante)
// makeRectangle(x, y, width, height); (x,y) ist linke obere Rechteckkante
R1x=1148;
R1y=972;
Rwidth=2924;
Rheight=2000;

// Linienkoordinaten für Skala
// (Koordinaten in Pixel; Koordinatenursprung (0,0) an linker oberer Bildkante)
// makeLine(x1, y1, x2, y2); (x1,y1) = Punkt 1; (x2,y2) = Punkt 2;
P1x=2560;
P1y=2281;
P2x=2997;
P2y=2947;
```

```
// Länge und Längeneinheit der Skala
Skalenlaenge=10;
Laengeneinheit="mm";

// makeLine(2555, 1271, 2610, 1779); ..._20170531\Skala.jpg
// makeLine(2271, 789, 2353, 1422); ..._20170531\Skala353gm.jpg
// makeLine(2367, 1541, 2627, 1957); ..._20170607\Skala.jpg
// makeLine(2560, 2281, 2997, 2947); ..._20170711\Skala.jpg

//-----

// Öffnen der Bilddateien (nBilder pro Durchlauf (begrenzt durch Arbeitsspeicher, Java Version));
beschneiden; Umwandlung in 8 bit; abspeichern als jpg
for (i=1; i<=(imax-imin)/nBilder+1; i++) {
    run("Image Sequence...", "open=["+"Ordnername+Dateinameopen+"] number="+nBilder+"
starting="+"((i-1)*nBilder)+1+" sort use");
    makeRectangle(R1x, R1y, Rwidth, Rheight);
    run("Crop");
    run("8-bit");
    run("Image Sequence...", "format=JPEG use save="+Ordnername+Dateinamesave);
    close();
}

// Öffnen aller komprimierten und beschnittenen Bilddateien
open(Ordnername+"bearbeitet");

// Verstärkung des Kontrastes
run("Enhance Contrast...", "saturated=0.4 process_all");

// Umwandeln in binäre schwarz-weiß Bilder anhand von Threshold
setThreshold(0, 132);
setOption("BlackBackground", false);
run("Convert to Mask", "method=Default background=Light");

// Löschen von weißen, außenliegenden Punkten (Bildfehlern)
run("Remove Outliers...", "radius=10 threshold=50 which=Bright stack");

// Duplizieren aller Bilder
run("Duplicate...", "duplicate");

// Invertieren der Bilder
run("Invert", "stack");

// Auffüllen aller weißen Stellen
run("Fill Holes", "stack");

// Verwischen des schwarz-weiß Überganges
run("Distance Map", "stack");

// Umwandeln in binäre schwarz-weiß Bildrt anhand von Threshold
setThreshold(103, 255);
run("Convert to Mask", "method=Default background=Light");
```

```

// UND-Verknüpfung der Bilder (nur wo beide Bilder schwarz -> schwarz)
imageCalculator("AND create stack", "bearbeitet", "bearbeitet-1");

// Öffnen der Skala-Datei
open(OrdnernameSkala);
// Zeichne Linie über Skala
makeLine(P1x, P1y, P2x, P2y);
// Setzen der Skalenlänge
run("Set Scale...", "known="+Skalenlaenge+" unit="+Laengeneinheit+" global");
close();

// Löschen des Hintergrundes in jedem einzelnen Bild und Zählen der Partikel
for(i=1; i<=(imax-imin); i++) {
    selectWindow("bearbeitet-1");
    setSlice(i);
    run("Create Selection");
    selectWindow("Result of bearbeitet");
    setSlice(i);
    run("Restore Selection");
    setBackgroundColor(0, 0, 0);
    run("Clear Outside", "Slice");
    // Vermessung der Partikel anhand Partikelgröße und Rundheit
    if (i==1)
        // beim ersten Schleifendurchlauf werden die Resultate aus vorhergegangenen Durchläufen
        gelöscht
        run("Analyze Particles...", "size="+AreaMIN+"-"+AreaMAX+" circularity="+RundheitMIN+"-
"+RundheitMAX+" display exclude clear include slice");
    else
        run("Analyze Particles...", "size="+AreaMIN+"-"+AreaMAX+" circularity="+RundheitMIN+"-
"+RundheitMAX+" display exclude include slice");
}

// Speichern der Partikelzählung und schließen der Fenster
saveAs("Results", Ordnername+"bearbeitet\\Results2.txt");

close();
selectWindow("bearbeitet-1");
close();
selectWindow("bearbeitet");
close();

```

12.2 Octave Code für das Prozessdatenfitting

In diesem Kapitel ist das Modul Prozessdatenmodell.m zu finden.

```

1  %-----
2  % Prozessdatenmodell.m
3  %-----
4  % Programm zur Auswertung der Prozessdatenerfassung,
5  % Erstellung eines Modelles zur Abschätzung von mittlerer Partikelgröße, Tellerheizleistung
6  % Darstellung der PDE-Daten und der berechneten Werte
7  % Einlesen der PDE-Daten über eine csv-Datei mit bestimmter Reihenfolge der
8  % Eingabeparameter,
9  % die aus einer xlsx-Datei stammen und dort teilweise zusammengefügt werden. Eine
10 % Erweiterung
11 % der Daten muss in der Excel-Datei erfolgen!
12 %
13 % benötigte Unterprogramme: dataread_einfach.m, Stoffeigenschaften.m, ProzÜberlauf.m,
14 % Modell_parameters
15 %-----
16 % Autor: Simon Alkin, August 2017
17 %-----
18 clear all; close all;
19 %pkg load optim
20
21 % Einlesen der PDE-Daten aus der csv-Datei
22 data=dlmread('Modell_Prozessdatenerfassung_Wanne3und4_max1250.csv','');
23 %data=dlmread('Modell_Prozessdatenerfassung_Wanne3_max1250.csv','');
24 %data=dlmread('Modell_Prozessdatenerfassung_max1250.csv','');
25 %data=dlmread('Modell_Produktionsmessung.csv','');
26 % Aufrufen des Einleseprogrammes
27 dataread_einfach
28
29 Modell_parameters;
30
31 % Löschen von unbrauchbaren Daten aus dem eingelesenen Datenfeld
32 i=length(Wdia);
33 while(true)
34     if(Gm(i)<1000/(60*1000) || Wholedia(i)==0 || Wdia(i)>0.07 || Wdia(i)<0.05 ||
35     Wdia(i)==NaN || Wn(i)==0 || Wn(i)==NaN || dp50(i)==NaN || WP(i)==NaN || WP(i)==0)
36         Gm(i,:)=[];
37         Wnum(i,:)=[];
38         Wdia(i,:)=[];
39         Wholeanz(i,:)=[];
40         Wholedia(i,:)=[];
41         WP(i,:)=[];
42         Wn(i,:)=[];
43         sieb(i,:)=[];
44         dp25(i,:)=[];
45         dp50(i,:)=[];
46         dp75(i,:)=[];
47         kappa(i,:)=[];
48         Tread(i,:)=[];
49
50         Wday(i,:)=[];
51         Wmonth(i,:)=[];
52         Wyear(i,:)=[];
53         Whour(i,:)=[];
54     endif
55     i--;
56     if(i==0)
57         break;
58     endif
59 endwhile
60
61 T(1)=1350;
62 Stoffeigenschaften
63
64 %-----
65 % Berechnen des mittleren Durchmessers aus einem Kräftebilanzmodell
66 %-----
67 udreh=2 .*pi.*Wn.*(Wdia)./2;
68 dmax=(8.*Gm./(pi.*Wholeanz.*Wn.*Wdia.*grho)).^(1/2);
69 Gmmax=Wholedia.^2 .*pi./4.*Wholeanz.*2.*pi.*Wn.*Wdia./2 .*grho;
70 uloch=(4 .*Gm./(Wholedia.^2 .*pi.*Wholeanz.*grho));
71
72 x1=12./(grho .*(2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi);
73 x2=Wholedia.*pi.*gsigma;
74 x3=16 .*uloch.*geta .*(0.0001^2) ./Wholedia;
75
76 dpl=(x1.*(x2 + x3)).^(1/3);
77
78 %-----
79 % Erstellung von Datenfeldern mit Daten für kleine Lochdurchmesser zum Fitting
80 %-----
81 Wdiakl=Wdia;
82 dp50kl=dp50;
83 Wnkl=Wn;
84 ulochkl=uloch;
85 Wholediakl=Wholedia;
86 Wholeanzkl=Wholeanz;
87 Gmkl=Gm;
88 grhokl=grho;
89 gsigmakl=gsigma;
90 getakl=geta;
91 i=length(dpl);
92 while(i>0)
93     if(Wholedia(i)>0.0015 || Wholedia(i)<0.0001)
94         Wdiakl(i)=[];
95         dp50kl(i)=[];
96         Wnkl(i)=[];
97         ulochkl(i)=[];
98         Wholediakl(i)=[];
99         Wholeanzkl(i)=[];
100        Gmkl(i)=[];
101        if(length(T)>1)
102            grhokl(i)=[];
103            gsigmakl(i)=[];
104            getakl(i)=[];
105        endif
106        i--;
107    endwhile
108
109 %-----
110 % Fitten des Kräftebilanzmodells
111 %-----
112 lwand=0.0015;
113 %x2=0.5; %3 %3
114 %x3=0.0001; %0.05 %0.001
115 %xopt=fminsearch(@(x) (sum((x(1).*(12./(grhokl .* (2 .*pi.*Wnkl).^2 .*Wdiakl.*pi)).*(x2
116 .*Wholediakl.*pi.*gsigmakl + 16 .*x3 .* (4 .*Gmkl./Wholediakl.^2
117 .*pi.*Wholeanzkl.*grhokl)).*getakl .* (lwand.^2) ./Wholediakl)).^(1/3) - dp50kl).^2), [0.6]
118 %dplfit=(xopt(1)).*(12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi)).*x2
119 .*Wholedia.*pi.*gsigma + 16 .*x3 .*uloch.*geta .* (lwand.^2) ./Wholedia)).^(1/3);
120 %x1=1; %0.658 %0.573
121 %dplfit=(x1).*(12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi)).*(x2 .*Wholedia.*pi.*gsigma +
122 16 .*x3 .*uloch.*geta .* (lwand.^2) ./Wholedia)).^(1/3);
123 %plots;
124 dplfit=(dpl_fit_f1).*(12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi)).*(dpl_fit_f2
125 .*Wholedia.*pi.*gsigma + 16 .*dpl_fit_f3 .*uloch.*geta .* (lwand.^2) ./Wholedia)).^(1/3);
126
127 %dplfit=0.47 .* (12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi)).*(x2 .*Wholedia.*pi.*gsigma +
128 16 .*x3 .*uloch.*geta .* (lwand.^2) ./Wholedia)).^(1/3);
129 %dplfit=0.55 .* (12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi)).*(x2 .*Wholedia.*pi.*gsigma +
130 16 .*0.005 .*uloch.*geta .* (lwand.^2) ./Wholedia)).^(1/3);
131 %plots;
132 %dplfit=0.723 .* (12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi)).*(Wholedia.*pi.*gsigma + 16
133 .*0.0127 .*uloch.*geta .* (lwand.^2) ./Wholedia)).^(1/3);
134
135 %-----
136 %%
137 %% dp Abschätzung durch Durchmesser zwischen Löchern
138 %%-----
139 %lzwischen=(Wdia.*pi-Wholeanz.*Wholedia)./Wholeanz;
140 %x1=12./(grho .* (2 .*pi.*Wn).^2 .*Wdia.*pi);
141 %x2=lzwischen.*pi.*gsigma;
142 %x3=16 .*udreh.*geta .* (0^2) ./lzwischen;
143 %dp2=(x1.*(x2 + x3)).^(1/3);
144
145 %-----

```

```

141 %-----
142 % Abschätzung des mittleren Durchmessers aus dem Modell nach Dhirhi et al., 2016
143 %-----
144 Re=8 .*Gm./(pi.*geta.*Wdia);
145 Oh=geta./((grho.*gsigma.*Wdia./2).^ (1/2));
146 We=(grho.*(2*pi.*Wn).^2).*((Wdia./2).^3)/.gsigma;
147 dpDhirhi16=(Wdia./2)*6.26 .*Re.^0.21 .* Oh.^0.92 .* We.^(-0.26);
148 %-----
149
150 %-----
151 % Modifiziertes Modell nach Dhirhi et al., 2016
152 %-----
153 Re=8 .*Gm./(pi.*geta.*Wdia);
154 Oh=geta./((grho.*gsigma.*Wdia./2).^ (1/2));
155 We=(grho.*(2*pi.*Wn).^2).*((Wdia./2).^3)/.gsigma;
156 dpDhirhimod=(Wdia./2)*6.26 .*Re.^0.21 .* Oh.^0.92 .* We.^(-0.2);
157 %-----
158
159 %-----
160 % Fitting von Dhirhimod und
161 %i=length(dmax);
162 %dp4=zeros(length(dmax),1);
163 %while(i>0)
164 % if(dp3(i)<dpDhirhimod(i) || Wholedia(i)<=dmax)
165 % dp4(i)=dp1(i);
166 % else
167 % dp4(i)=(2.*dpDhirhimod(i)+dp1(i))./3;
168 % endif
169 % i--;
170 %endwhile
171
172 %-----
173 % Erstellung von Datenfeldern mit Daten für große Lochdurchmesser zum Fitting
174 %-----
175 Reopt=Re;
176 Ohopt=Oh;
177 Weopt=We;
178 Wdiaopt=Wdia;
179 dp50opt=dp50;
180
181 i=length(dp1);
182 while(i>0)
183 if(Wholedia(i)<=0.001)
184 Wdiaopt(i)=[];
185 Reopt(i)=[];
186 Ohopt(i)=[];
187 Weopt(i)=[];
188 dp50opt(i)=[];
189 endif
190 i--;
191 endwhile
192 %-----
193
194 %-----
195 % Fitting von dpDhirhi, nur mit Daten für große Lochdurchmesser
196 %-----
197 Re=8 .*Gm./(pi.*geta.*Wdia);
198 Oh=geta./((grho.*gsigma.*Wdia./2).^ (1/2));
199 We=(grho.*(2*pi.*Wn).^2).*((Wdia./2).^3)/.gsigma;
200 %x1=11;
201 %x2=0.21;
202 %x3=0.92;
203 %x4=-0.31;
204 %xopt=fminsearch(@(x) (sum(((Wdiaopt./2)*x(1) .*Reopt.^x2 .* Ohopt.^x3 .* Weopt.^(x4) -
dp50opt).^2)), [6.25])
205 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*xopt(1) .*Re.^x2 .* Oh.^x3 .* We.^(x4);
206 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*x1 .*Re.^x2 .* Oh.^x3 .* We.^(x4);
207 %plots;
208 dpDhirhimod2=(Wdia./2)*dpDhirhimod2_f1 .*Re.^dpDhirhimod2_f2 .* Oh.^dpDhirhimod2_f3 .*
We.^(dpDhirhimod2_f4);
209 %plots;
210
211 %xopt=fminsearch(@(x) (sum(((Wdiaopt./2)*x(1) .*Reopt.^x(2) .* Ohopt.^x(3) .*
Weopt.^(-x(4)) - dp50opt).^2)), [6.25;0.21;0.925;0.21])
212 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*xopt(1) .*Re.^xopt(2) .* Oh.^xopt(3) .* We.^(-xopt(4));
213 %% fertige Fittings

```

```

214 %x1=7.215;
215 %x2=0.184;
216 %x3=0.853;
217 %x4=-0.284;
218 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*x1 .*Re.^x2 .* Oh.^x3 .* We.^(x4);
219 %plots;
220 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*7.215 .*Re.^0.184 .* Oh.^0.853 .* We.^(-0.284); %Fit mit n[U/s]
221 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*6.09 .*Re.^0.178 .* Oh.^0.738 .* We.^(-0.285); %Fit mit n=f[Hz]
222 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*6.25 .*Re.^0.21 .* Oh.^0.925 .* We.^(-0.21);
223 %-----
224
225 %-----
226 %% dp3 Berechnung
227 %-----
228 %i=1;
229 %while(i<=length(dmax))
230 % if(Gm<Gmmax)
231 % dp3(i)=dpDhirhimod(i);
232 % else
233 % dp3(i)=dp1(i);
234 % endif
235 % i++;
236 %endwhile
237
238
239 %%Überlaufschätzung
240
241 %lLoch=W_thick;
242 %lLig=W_thick*2;
243 %Ww=2*pi.*Wn;
244 %uL=(grho.*Ww.^2 .*Wdia./2 .*Wholedia.^2 .*pi./4 .*lLig-Wholedia.*pi.*gsigma)/ (16
.*geta.*lLoch.^2 ./Wholedia);
245 %%fsolve(@(uL)
l6*uL*geta.*lLoch.^2/Wholedia+Wholedia.*pi.*gsigma-grho.*Ww.^2.*Wdia./2.*Wholedia.^2.*pi./4.*lLig), 300)
246 %u=Ww.*Wdia./2;
247 %AL=Gm./ (uL.*grho);
248 %nLig=4*AL./ (Wholedia.^2 .*pi);
249
250 %-----
251 % Abschätzung des Überlaufpunktes und Berechnung von dp5
252 %-----
253 i=length(dmax);
254
255 W_thick=0.0015;
256
257 % Parameter zum Festlegen des Überlaufbereiches und somit der Verwendung
258 % des gefitteten Kräftebilanzmodells anstatt des gefitteten Dhirhi-Modells
259 % Parameter siehe Modell_parameters.m
260 %pgrenzmin=50;
261 %pschleifmin=95;
262 %pschleifmax=100;
263 %pgrenzmax=400;
264
265 %-----
266 % Kriterien für Modellwahl:
267 %
268 % pgrenzmin < p < pschleifmin: bergang Dhirhi -> Kräftebilanz
269 % pschleifmin < p < pschleifmax: Kräftebilanz-Modell
270 % pschleifmax < p < pgrenzmax: bergang Kräftebilanz -> Dhirhi
271 % pgrenzmax < p: Dhirhi-Modell
272 %-----
273
274 % Modellwahl, abhängig vom Überlaufen
275 while(i>0)
276 if(length(T)==1)
277
278 p(i)=ProzÜberlauf(Wdia(i),Wholeanz(i),Wholedia(i),W_thick,Gm(i),grho,gsigma,geta,Wn(i));
279 else
280
281 p(i)=ProzÜberlauf(Wdia(i),Wholeanz(i),Wholedia(i),W_thick,Gm(i),grho(i),gsigma(i),geta(i),W
n(i));
282 endif
283 if(p(i)<pgrenzmin || p(i)>pgrenzmax)
284 dp5(i)=dpDhirhimod2(i);
285 else

```

```

285     dp5_loch(i)=dplfit(i);
286     dp5_dhirhi(i)=dpDhirhimod2(i);
287     if (dp5_loch(i)<=dp5_dhirhi(i))
288         if (p(i)>pschleifmax && p(i)<=pgrenzmax)
289             %dp5(i)=(dp5_loch(i)*pschleifmax+dp5_dhirhi(i)*(p(i)-pschleifmax))/p(i);
290
291 dp5(i)=dp5_loch(i)+(p(i)-pschleifmax)*(dp5_dhirhi(i)-dp5_loch(i))/(pgrenzmax-pschleifmax);
292     elseif (p(i)>pgrenzmin && p(i)<=pschleifmin)
293         %dp5(i)=(dp5_loch(i)*p(i)+dp5_dhirhi(i)*(pschleifmin-p(i)))/pschleifmin;
294
295 dp5(i)=dp5_dhirhi(i)+(p(i)-pgrenzmin)*(dp5_loch(i)-dp5_dhirhi(i))/(pschleifmin-pgrenzmin);
296     else
297         dp5(i)=dplfit(i);
298     endif
299     dp5(i)=dp5_dhirhi(i);
300     endif
301     i--;
302 endwhile
303
304
305
306
307 %%-----
308 %% Modell nach Wu et al., 2015 zur Partikeldurchmesserabschätzung
309 %%-----
310 %rinj=0.003/2;
311 %Re=Gm.*Wdia./(2.*pi.*geta.*rinj^2);
312 %Oh=geta./((grho.*gsigma.*Wdia./2).^1/2);
313 %We=(grho.*(2*pi.*Wn).^2.*((Wdia./2).^3))./gsigma;
314 %dpWu15=(Wdia./2)*9.9.*Re.^0.42.*Oh.^0.61.*We.^(-0.68);
315 %%-----
316
317
318
319 %%-----
320 %% Fit des Modells nach Wu et al., 2015 zur Partikeldurchmesserabschätzung
321 %%-----
322 %xopt=fminsearch(@(x) (sum(((Wdiaopt./2)*x(4).*Reopt.^x(1).*Ohopt.^x(2).*
323 Weopt.^(-x(3))-dp50opt).^2)), [0.21;0.65;0.29;15]);
324 %dpWu15=(Wdia./2)*xopt(4).*Re.^xopt(1).*Oh.^xopt(2).*We.^(-xopt(3));
325 %sum(((Wdiaopt./2)*xopt(4).*Reopt.^xopt(1).*Ohopt.^xopt(2).*Weopt.^(-xopt(3)))-
326 dp50opt).^2);
327 %%-----
328
329 %% dp6 Berechnung
330 %%-----
331 %i=length(dmax);
332 %while(i>0)
333 % if (Wholedia(i)>=0.0006 || Gm(i)>Gmmax(i))
334 %     dp6(i)=dpWu15(i);
335 % else
336 %     dp6(i)=dpl(i);
337 % endif
338 % i--;
339 %endwhile
340 %%-----
341
342
343
344 %%-----
345 %% Modell nach Ahmed & Youssef, 2012 zur Partikeldurchmesserabschätzung
346 %%-----
347 %Rzud=2; % R=Abstand vom Teller; D=Tellerdurchmesser
348 %pl=Gm./(grho.*2.*pi.*Wn.*(Wdia.^3));
349 %Re=Wdia.^2.*2.*pi.*Wn.*grho./geta;
350 %We=Wdia.^3.*(2.*pi.*Wn).^2.*grho./gsigma;
351 %dpAhmed12=Wdia.*27.81.*pl.^0.051.*Rzud.^0.581.*Re.^(-0.651).*We.^(-0.0218);
352 %%-----
353
354
355 %%-----
356 %% Erstellung von Datenfeldern mit Daten für große Lochdurchmesser zum Fitting

```

```

357 %%-----
358 %Reopt2=Re;
359 %Weopt2=We;
360 %Wdiaopt2=Wdia;
361 %dp50opt2=dp50;
362 %plopt=p1;
363 %
364 %i=length(dp1);
365 %while(i>0)
366 % if (Wholedia(i)<=0.0006)
367 %     Wdiaopt2(i)=[];
368 %     plopt(i)=[];
369 %     Reopt2(i)=[];
370 %     Weopt2(i)=[];
371 %     dp50opt2(i)=[];
372 % endif
373 % i--;
374 %endwhile
375 %%-----
376
377
378 %%-----
379 %% Fitting von Ahmed & Youssef, 2012
380 %%-----
381 %xopt=fminsearch(@(x) (sum((Wdiaopt2.*x(1).*plopt.^x(2).*Reopt2.^(-x(3)).*
382 Weopt2.^(-x(4))-dp50opt2).^2)), [27.81;0.051;0.651;0.0218]);
383 %dpAhmedmod=Wdia.*xopt(1).*pl.^xopt(2).*Re.^(-xopt(3)).*We.^(-xopt(4));
384 %sum((Wdiaopt2.*xopt(1).*plopt.^xopt(2).*Reopt2.^(-xopt(3)).*Weopt2.^(-xopt(4))-
385 dp50opt2).^2);
386 %dpAhmedmod=Wdia.*27.81.*pl.^0.143.*Re.^(-0.82).*We.^(-(-0.195)); %Fit für n=f[Hz]
387 %%-----
388
389
390 %% dp7 Berechnung
391 %i=length(dmax);
392 %while(i>0)
393 % if (Wholedia(i)>=0.0006 || Gm(i)>Gmmax(i))
394 %     dp7(i)=dpAhmedmod(i);
395 % else
396 %     dp7(i)=dpl(i);
397 % endif
398 % i--;
399 %endwhile
400 %
401 %%-----
402
403 %%-----
404 %% Fitting der Trommelheizleistung aus der Prozessdatenerfassung
405 %%-----
406 %Popt=fminsearch(@(p)
407 sum((p(1)+(1+Wdia).^p(2)+(1+Wn/1000).^p(3)+(1+Gm*10).^p(4)-WP).^2), [1.5;10;3;10])
408 %sum((Popt(1)+(1+Wdia).^Popt(2)+(1+Wn/1000).^Popt(3)-WP).^2)
409 %Pfit=0.0655+(1+Wdia).^21.37+(1+Wn/1000).^19.71; % fit für n[U/s]
410 %Pfit=Popt(1)+(1+Wdia).^Popt(2)+(1+Wn/1000).^Popt(3)+(1+Gm*10).^Popt(4);
411 %Pfit=0.0674+(1+Wdia).^20.93+(1+Wn/1000).^18.8+(1+Gm*10).^(-2.41); % fit für n[U/s]
412 %Pfit=Pfit_f1+(1+Wdia).^Pfit_f2+(1+Wn/1000).^Pfit_f3+(1+Gm*10).^Pfit_f4; %Fitting
413 Parameter aus Modell_parameters.m
414
415 %Pfit=1.71+(1+Wdia).^16.02+(1+Wn/1000).^6.91; %fit nur für große Löcher und n=f[Hz]
416 %sum((Pfit-WP).^2);
417 %Pfit2=0.056+(1+Wdia).^21.37+(1+Wn/1000).^11.74; %fit für n=f[Hz]
418 %Pfit=1.88+(1+Wdia).^21.24;
419 %%-----
420
421
422 % Plotting; Darstellung der Prozessdaten und der Abschätzungen
423 %%-----
424
425 %%-----
426 % Einstellungen für plots
427 %%-----
428 fak1=1.6/56; % Umrechnungsfaktor: 1, wenn mit Drehzahl [U/min]; 1.6/56, wenn mit

```

```

429 Frequenz [Hz]
430 labl='f[Hz]'; % x-Achsenbeschriftung
431 pos1=[0.02 0.1 0.9 0.8]; % Größe der plots auf Bildschirm [Abstand links, Abstand unten,
Breite, Höhe]
432 view1=[1 0 0]; % Ansicht parallel zu x-Achse
433 %view1=( [max(Wdia)*10^3+900 max(Wn)*60 1200-1000] ); % Ansicht von schräg oben
434 pos2=0.02; % Position des Textes in y-Richtung
435 pos3=0.1; % Position des Textes in z-Richtung
436 Dmin=0; % Minimum der x-Achse (Trommeldurchmesser)
437 Dmax=max(Wdia)*10^3+10; % Maximum der x-Achse
438 nmin=0; % Minimum der y-Achse (Drehzahl bzw. Frequenz)
439 nmax=max(Wn)*60*fakl; % Maximum der y-Achse
440 dpmin=0; % Minimum der z-Achse (mittlere Partikelgröße)
441 dpmax=max(max(dp50),0.0012)*10^6; % Maximum der z-Achse
442 Pmin=0; % Minimum der z-Achse (Heizleistung im Leistungsplot)
443 Pmax=max(WP)*1.2; % Maximum der z-Achse im Leistungsplot
444 export=0; %export=0 ... kein Export; export=1 ... pdf-Export; export=2 ...
445 jpeg-Export
446 schriftgr=30;
447 %-----
448 % Darstellung der Prozessdaten und Abschätzungen durch die Modelle
449 figure(107,'Units','normalized','Position',pos1)
450 %scatter3(Wdia,Wn,Wholedia, ((dp50./max(dp50)).^(2)).*10^3, '.')
451 %axis([0 max(Wdia) 0 max(Wn) 0 max(Wholedia)]);
452 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,WP./max(WP), '.')
453 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,WP./max(WP), '.')
454 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*1.6/56,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,WP./max(WP), '.')
455 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'k', '.')
456
457 hold on;
458 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp1.*10^6,0.5*10^3, '.')
459
460 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp1fit.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'g', '.')
461
462 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp2.*10^6,0.5*10^3, '.')
463 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp3.*10^6,0.5*10^3, '.')
464 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp4.*10^6,0.5*10^3, '.')
465 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn, (dp25./dp75).^3 *3*10^3,0.1*10^3,'k','*')
466
467 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60, (dp75-dp25).*10^6,0.1*10^3,'k','*')
468
469 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,y.*10^5,0.1*10^3,'k', '.')
470 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,ymin.*10^5,0.1*10^3,'x', '.')
471 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,ymax.*10^5,0.1*10^3,'x', '.')
472 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn, (dp25./dp75).^3 *3*10^3,0.1*10^3,'k','*')
473 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dpDhirhi16.*10^6,0.5*10^3, '.')
474 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60,dpDhirhimod.*10^6,0.5*10^3, '.')
475
476 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dpDhirhimod2.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'b', '.')
477
478 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dpDhirhimod3.*10^6,0.5*10^3, '*')
479 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60,dp5.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'x', '.')
480
481 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp5.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'r', '.')
482
483 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dpWul5.*10^6,0.5*10^3, '.')
484 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dpWumod.*10^6,0.5*10^3, '.')
485 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp6.*10^6,0.5*10^3,'x')
486 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dpAhmed12.*10^6,0.5*10^3, '.')
487 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dpAhmedmod.*10^6,0.5*10^3, '.')
488 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp7.*10^6,0.5*10^3, '.')
489
490 axis([Dmin Dmax nmin nmax dpmin dpmax]);
491 %axis([min(Wdia)*10^3-10 max(Wdia)*10^3+10 min(Wn)*60 max(Wn)*60*1.6/56 0 max(max(dp50),0.0012)*10^6]);
492
493 gcl=xlabel("D[mm]");
494
495 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
496 gcl=ylabel(labl);
497 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
498
499 gcl=zlabel("dp[um]");
500 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
501 %gct=title("markersize=f(dhole); color=f(P)");
502 %view([max(Wdia)*10^3+900 max(Wn)*60 1200-1000])
503 view(view1);
504 set(gca,"fontsize",schriftgr,"linewidth",2);
505 leg=legend("dp50","dp1fit","dpDhirhi");
506 set(leg,"fontsize",schriftgr);
507 legend boxoff;
508 gct=text(Dmax,nmax*pos2,dpmin+pos3*(dpmax-dpmin),"markersize=f(dhole)");
509 set(gct,"fontsize",schriftgr);
510 hold off;
511 if (export==1)
512 print -dpdf "-S1500,800" Prozessdaten_dp1fit_dpDhirhi_dp5.pdf
513 elseif (export==2)
514 print -djpeg "-S2000,1064" Prozessdaten_dp1fit_dpDhirhi_dp5.jpeg
515 endif
516
517 % Darstellung der Prozessdaten und Abschätzungen durch dpDhirhi
518 figure(110,'Units','normalized','Position',pos1)
519 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,WP./max(WP), '.')
520 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'k', '.')
521 hold on;
522 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dpDhirhimod2.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,0^3, '.')
523 axis([Dmin Dmax nmin nmax dpmin dpmax]);
524 %axis([min(Wdia)*10^3-10 max(Wdia)*10^3+10 min(Wn)*60 max(Wn)*60 0 max(max(dp50),0.0012)*10^6]);
525 gcl=xlabel("D[mm]");
526 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
527 gcl=ylabel(labl);
528 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
529 gcl=zlabel("dp[um]");
530 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
531 %gct=title("markersize=f(dhole); color=f(P)");
532 view(view1)
533 set(gca,"fontsize",schriftgr,"linewidth",2);
534 leg=legend("dp50","dpDhirhi");
535 set(leg,"fontsize",schriftgr);
536 legend boxoff;
537 gct=text(Dmax,nmax*pos2,dpmin+pos3*(dpmax-dpmin),"markersize=f(dhole)");
538 set(gct,"fontsize",schriftgr);
539 hold off;
540 if (export==1)
541 print -dpdf "-S1500,800" Prozessdaten_dpDhirhi.pdf
542 elseif (export==2)
543 print -djpeg "-S2000,1064" Prozessdaten_dpDhirhi.jpeg
544 endif
545
546 % Darstellung der Prozessdaten und Abschätzungen durch dp1fit
547 figure(111,'Units','normalized','Position',pos1)
548 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,WP./max(WP), '.')
549 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'k', '.')
550 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp1fit.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'r', '.')
551 hold on;
552 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fakl,dp1fit.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3,'l', '.')
553 axis([Dmin Dmax nmin nmax dpmin dpmax]);
554 %axis([min(Wdia)*10^3-10 max(Wdia)*10^3+10 min(Wn)*60 max(Wn)*60 0 max(max(dp50),0.0012)*10^6]);
555 gcl=xlabel("D[mm]");
556 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
557 gcl=ylabel(labl);
558 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
559 gcl=zlabel("dp[um]");
560 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
561 %gct=title("markersize=f(dhole); color=f(P)");

```

```

562 view(view1)
563 set(gca, "fontsize", schriftgr, "linewidth", 2);
564 leg=legend("dp50", "dplfit");
565 set(leg, "fontsize", schriftgr);
566 legend boxoff;
567 gct=text(Dmax, nmax*pos2, dpmin+pos3*(dpmax-dpmin), "markersize=f(dhole)");
568 set(gct, "fontsize", schriftgr);
569 hold off;
570 if(export==1)
571     print -dpdf "-S1500,800" Prozessdaten_dplfit.pdf
572 elseif(export==2)
573     print -djpeg "-S2000,1064" Prozessdaten_dplfit.jpeg
574 endif
575
576
577 % Darstellung der Prozessdaten und Abschätzungen durch dp5
578 figure(112, 'Units', 'normalized', 'Position', pos1)
579 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60, dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, WP./max(WP), '.')
580 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, 'k', '.')
581 hold on;
582 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, dp5.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, 'r', '.')
583 axis([Dmin Dmax nmin nmax dpmin dpmax]);
584 %axis([min(Wdia)*10^3-10 max(Wdia)*10^3+10 min(Wn)*60 max(Wn)*60 0 max(max(dp50), 0.0012)*10^6]);
585 gcl=xlabel("D[mm]");
586 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
587 gcl=ylabel(labl1);
588 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
589 gcl=zlabel("dp[um]");
590 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
591 %gct=title("markersize=f(dhole); color=f(P)");
592 view(view1)
593 set(gca, "fontsize", schriftgr, "linewidth", 2);
594 leg=legend("dp50", "dp5");
595 set(leg, "fontsize", schriftgr);
596 legend boxoff;
597 gct=text(Dmax, nmax*pos2, dpmin+pos3*(dpmax-dpmin), "markersize=f(dhole)");
598 set(gct, "fontsize", schriftgr);
599 hold off;
600 if(export==1)
601     print -dpdf "-S1500,800" Prozessdaten_dp5.pdf
602 elseif(export==2)
603     print -djpeg "-S2000,1064" Prozessdaten_dp5.jpeg
604 endif
605
606
607 % Darstellung des Überlaufens
608 figure(108, 'Units', 'normalized', 'Position', pos1)
609 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60, dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, WP./max(WP), '.')
610 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, 'k', '.')
611 hold on;
612 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, p, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, 'r', '.')
613 %scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60, dp5.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, 'r', '.')
614 axis([Dmin Dmax nmin nmax dpmin dpmax]);
615 %axis([min(Wdia)*10^3-10 max(Wdia)*10^3+10 min(Wn)*60 max(Wn)*60 0 max(max(dp50), 0.0012)*10^6]);
616 gcl=xlabel("D[mm]");
617 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
618 gcl=ylabel(labl1);
619 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
620 gcl=zlabel("dp[um], prozUeberlauf[%]");
621 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
622 %gct=title("markersize=f(dhole); color=f(P)");
623 view(view1)
624 set(gca, "fontsize", schriftgr, "linewidth", 2);
625 leg=legend("dp50", "ProzentÜberlauf");
626 set(leg, "fontsize", schriftgr);
627 legend boxoff;
628 gct=text(Dmax, nmax*pos2, dpmin+pos3*(dpmax-dpmin), "markersize=f(dhole)");
629 set(gct, "fontsize", schriftgr);
630 hold off;
631
632
633
634
635
636
637
638 % Darstellung der Prozessdaten
639
640
641 figure(109, 'Units', 'normalized', 'Position', pos1)
642 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60, dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, WP./max(WP), '.')
643 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, dp50.*10^6, ((Wholedia./max(Wholedia)).^(1)).*1.5.*10^3, 'k', '.')
644 hold on;
645 %scatter3(Wdia.*10^3, Wn, p.*10, 0.1*10^3, 'k', '*')
646 %scatter3(Wdia.*10^3, Wn, dp5.*10^6, 0.3*10^3, 'r', '*')
647 axis([Dmin Dmax nmin nmax dpmin dpmax]);
648 %axis([min(Wdia)*10^3-10 max(Wdia)*10^3+10 min(Wn)*60 max(Wn)*60 0 max(max(dp50), 0.0012)*10^6]);
649 gcl=xlabel("D[mm]");
650 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
651 gcl=ylabel(labl1);
652 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
653 gcl=zlabel("dp[um]");
654 set(gcl, "fontsize", schriftgr);
655 %gct=title("markersize=f(dhole); color=f(P)");
656 view(view1)
657 view1=view();
658 set(gca, "fontsize", schriftgr, "linewidth", 2);
659 leg=legend("dp50");
660 set(leg, "fontsize", schriftgr);
661 legend boxoff;
662 gct=text(Dmax, nmax*pos2, dpmin+pos3*(dpmax-dpmin), "markersize=f(dhole)");
663 set(gct, "fontsize", schriftgr);
664 hold off;
665 if(export==1)
666     print -dpdf "-S1500,800" Prozessdaten.pdf
667 elseif(export==2)
668     print -djpeg "-S2000,1064" Prozessdaten.jpeg
669 endif
670
671
672
673 %% Darstellung der Durchsätze
674 %%
675 %figure(105)
676 %scatter3(Wdia, Wn, Wholedia, ((dp50./max(dp50)).^(2)).*10^3, '.');
677 %axis([0 max(Wdia) 0 max(Wn) 0 max(Wholedia)]);
678 %scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, Gm.*60000, ((dp50./max(dp50)).^(3)).*2*10^3, Wholedia./max(Wholedia), '.');
679 %axis([0 max(Wdia.*10^3) 0 max(Wn)*60*fak1 0 max(Gm)*60000]);
680 %gcl=xlabel("D[mm]");
681 %set(gcl, "fontSize", 16);
682 %gcl=ylabel(labl1);
683 %set(gcl, "fontSize", 16);
684 %gcl=zlabel("m[g/min]");
685 %set(gcl, "fontSize", 16);
686 %gct=title("markersize=f(dp50); color=f(dhole)");
687 %set(gct, "fontSize", 16);
688 %set(gca, "fontSize", 16, "linewidth", 2);
689 %%
690
691
692 % Darstellung der Trommelheizleistung
693 %
694 %figure(106, 'Units', 'normalized', 'Position', pos1)
695 scatter3(Wdia, Wn, Wholedia, ((dp50./max(dp50)).^(2)).*10^3, '.');
696 %axis([0 max(Wdia) 0 max(Wn) 0 max(Wholedia)]);
697
698
699 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60, WP, ((dp50./max(dp50)).^(3)).*2*10^3, Wholedia./max(Wholedia), '.');
700 scatter3(Wdia.*10^3, Wn.*60*fak1, WP, ((dp50./max(dp50)).^(3)).*2*10^3, 'k', '.');
701

```

```

702 hold on
703 scatter3(Wdia.*10^3,Wn.*60*fak1,Pfit,0.2*10^3,'r','.')
704 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,(dp75-dp25).*10^4,0.1*10^3,'k','*')
705 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,Pfit2,0.2*10^3,'b','.')
706 %scatter3(Wdia.*10^3,Wn,dp25./dp75.*10,0.2*10^3,'k','*')
707 %axis([50 120 600 3000 0 max(WP)*1.2]);
708 axis([Dmin Dmax nmin nmax Pmin Pmax]);
709 gcl=xlabel("D[mm]");
710 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
711 gcl=ylabel(labl);
712 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
713 gcl=zlabel("P[kW]");
714 set(gcl,"fontsize",schriftgr);
715 view(view1)
716 set(gca,"fontsize",schriftgr,"linewidth",2);
717 leg=legend("P","Pfit");
718 set(leg,"fontsize",schriftgr);
719 legend boxoff;
720 %gct=title("markersize=f(dp50); color=f(dhole)");
721 gct=text(Dmax,nmax*pos2,Pmin+pos3*(Pmax-Pmin),"markersize=f(dhole)");
722 set(gct,"fontsize",schriftgr);
723 hold off
724 if(export==1)
725     print -dpdf "-S1500,800" Prozessdaten_P_Pfit.pdf
726 elseif(export==2)
727     print -djpeg "-S2000,1064" Prozessdaten_P_Pfit.jpeg
728 endif
729 %-----
730
731

```

12.3 Octave Code für das Spinning Disc Modell

In diesem Kapitel sind die Module `Modell_Ausfuehrung.m` und `Modell.m` zu finden.

```

1  %-----
2  % Modell_Ausfuehrung.m
3  %-----
4  % Aufrufmodul für Modell.m; Eingabe der Prozessparameter
5  %-----
6  % Autor: Simon Alkin, August 2017
7  %-----
8
9  clear all; close all;
10
11  %Freq=50:5:60;
12  %D=0.08;
13  %dhole=0.0021;
14  %nhole=32;
15  %TTrommel=1380;
16  %Gm=3100/(1000*60);
17
18
19  %---- Eingabe Anfang -----
20  Freq=20:2:80;      % Motorfrequenz [Hz]; wird unter Verwendung des Zusammenhangs
    Motorfrequenz->Drehzahl (1Hz=56U/min)
21  % und einer Übersetzung Motordrehzahl->Trommeldrehzahl von 1.6
    umgerechnet
22  D=[0.06];        % Außendurchmesser der Trommel
23  dhole=[0.0006];  % Durchmesser der Bohrungen an der Außenwand der Trommel
24  nhole=[72];     % Anzahl der Löcher in der Trommel
25  %nhole=[200];
26  TTrommel=1350;   % 1350 Temperatur [°C]
27  Gm=[3000];      % Massendurchfluss: Eingabe in g/min,
28  Gm=Gm./(1000*60); % Umrechnung auf kg/s
29  lhole=0.0015;   % Wandstärke der Trommel [m]
30  %--- Eingabe Ende -----
31
32  Modell_parameters;
33  legend1="";
34  legend2="";
35  T=TTrommel;
36  Stoffeigenschaften;
37
38  % Berechnen des mittleren Partikeldurchmessers und der Tellerheizleistung für die
    vorgegebenen
39  % Parameter Lochdurchmesser, Lochanzahl, Trommeldurchmesser, Trommeldrehzahl (als
    Motorfrequenz)
40  k=1;
41  while(k<=length(Gm))
42  h=1;
43  while(h<=length(nhole))
44  g=1;
45  while(g<=length(dhole))
46  i=1;
47  while(i<=length(D))
48  j=1;
49  while(j<=length(Freq))
50  %Modell(Wf,Wdia,Wholedia,Wholeanz,T_Trommel,Gm)
51  %dp(j,i)=Modell(Freq(j),D(i),dhole(g),nhole(h),lhole,TTrommel,Gm,Wthick(i));
52  dp(j,i)=Modell(Freq(j),D(i),dhole(g),nhole(h),lhole,TTrommel,Gm(k));
53  n(j)=Freq(j).*56./(60.*1.6);
54  %P(j,i)=0.0655+(1+D(i)).^21.37+(1+n(j)/1000).^19.71; % fit für n[U/s]
55  P(j,i)=0.0674+(1+D(i)).^20.93+(1+n(j)/1000).^18.8+(1+Gm(k)*10).^(-2.41);
56  P(j,i)=Pfit_f1+(1+D(i)).^Pfit_f2+(1+n(j)/1000).^Pfit_f3+(1+Gm(k)*10).^(-Pfit_f4);
57  j++;
58  endwhile
59
60  % Berechnen der Grenzfrequenz, bei der die Trommel überläuft
61  nrpsGrenz=nGrenz(D(i),nhole(h),dhole(g),lhole,Gm(k),grho,gsigma,geta);
62  dpGrenz=Modell(nrpsGrenz*(60*1.6)/56,D(i),dhole(g),nhole(h),lhole,TTrommel,Gm(k));
63  pGrenz=ProzUberlauf(D(i),nhole(h),dhole(g),lhole,Gm(k),grho,gsigma,geta,nrpsGrenz);
64
65  dpGrenz25=Modell(nrpsGrenz*(60*1.6)/56*1.25,D(i),dhole(g),nhole(h),lhole,TTrommel,Gm(k));
66
67  dpGrenz50=Modell(nrpsGrenz*(60*1.6)/56*1.5,D(i),dhole(g),nhole(h),lhole,TTrommel,Gm(k));
68
69  p50=ProzUberlauf(D(i),nhole(h),dhole(g),lhole,Gm(k),grho,gsigma,geta,nrpsGrenz*1.5);
    figure(1)
    plot(Freq,dp(:,i).*10^6)
    %plot(Freq.*56/1.6,dp(:,i).*10^6)

```

```

70  strbig=["m=",num2str(Gm(k)*60);";D=", num2str(D(i)),
    ";dhole=",num2str(dhole(g));";nhole=",num2str(nhole(h));";fGrenz=",num2str(nrpsGrenz*(60*1.
6)/56);";dpGrenz=",num2str(dpGrenz);";f50=",num2str(nrpsGrenz*(60*1.6)/56*1.5);";dpGrenz50=
",num2str(dpGrenz50);";p50=",num2str(p50);";L_{Abst}=",num2str((D(i)*pi()-nhole(h))*dhole(g)
)/nhole(h)]];
71  %strbig={"m=",num2str(Gm(k)*60);";D=", num2str(D(i)),
    ";dhole=",num2str(dhole(g));";nhole=",num2str(nhole(h));";nGrenz=",num2str(nrpsGrenz*(60*1.
6)/56*56/1.6);";dpGrenz=",num2str(dpGrenz);";n50=",num2str(nrpsGrenz*(60*1.6)/56*1.5*56/1.6
);";dpGrenz50=",num2str(dpGrenz50);";p50=",num2str(p50)]];
72  str=["m=",num2str(Gm(k)*60);";D=", num2str(D(i)),
    ";dhole=",num2str(dhole(g));";nhole=",num2str(nhole(h));";fGrenz=",num2str(nrpsGrenz*(60*1.
6)/56)]];
73  %str={"m=",num2str(Gm(k)*60);";D=", num2str(D(i)),
    ";dhole=",num2str(dhole(g));";nhole=",num2str(nhole(h));";nGrenz=",num2str(nrpsGrenz*(60*1.
6)/56*56/1.6)]];
74  if(k==1 && g==1 && h==1 && i==1)
75  legend1=str;
76  legend2=strbig;
77  else
78  legend1=[legend1 str];
79  legend2=[legend2 strbig];
80  endif
81  hold on
82
83  figure(2)
84  plot(Freq,P(:,i))
85  %plot(Freq.*56/1.6,P(:,i))
86  hold on
87  Freq;
88  %Freq.*56/1.6;
89  P(:,i);
90  i++;
91  endwhile
92  g++;
93  endwhile
94  h++;
95  endwhile
96  k++;
97  endwhile
98  legend2
99  figure(1,'Units','normalized','Position',[0.02 0.1 0.45 0.8])
100 %figure(1)
101 axis([20 80 0 1300])
102 xlabel("f[Hz]");
103 %axis([0 3000 0 2000])
104 %xlabel("n[rpm]");
105 ylabel("dp[um]");
106 leg1=legend(legend1);
107 set (leg1, "FontSize", 16);
108 grid on;
109 hold off
110
111 figure(2,'Units','normalized','Position',[0.52 0.1 0.45 0.8])
112 %axis([0 3000 0 15])
113 %xlabel("n[rpm]");
114 axis([20 80 0 15])
115 xlabel("f[Hz]");
116 ylabel("P[kW]");
117 %legend(legend1);
118 grid on;
119 hold off
120 Freq;
121 dp;

```

```

1  %-----
2  % Modell.m
3  %-----
4  % Funktion, die den mittleren Partikeldurchmesser anhand der
5  % übergebenen Prozessparameter abschätzt.
6  % Modell ist in 2 Teilmodelle geteilt:
7  % Nahe beim Überlaufen wird anhand einer Kräftebilanz (gefittet), weit
8  % außerhalb des Überlaufens ein modifiziertes Modell nach Dhirhi et al., 2016
9  %-----
10 % Autor: Simon Alkin, August 2017
11 %-----
12
13 function dppred=Modell(Wf,Wdia,Wholedia,Wholeanz,W_thick,T_Trommel,Gm)
14 Modell_parameters;
15 %clear all;
16
17 %T_Wanne=1300;
18 %
19 %Wn=40;
20 %Wdia=0.06;
21 %Wholedia=0.001;
22 %Wholeanz=32;
23 %W_thick=0.0015;
24
25 % Umrechnung der Motorfrequenz [Hz] auf Drehzahl [U/s], bei Verwendung einer Übersetzung
26 % von 1.6
27 Wn=Wf.*56./(60.*1.6);
28
29 T=T_Trommel;
30 % Abschätzen der Stoffparameter (Dichte, dyn. Viskosität und Oberflächenspannung) anhand
31 % der Temperatur T
32 % Stoffeigenschaften
33
34 %Gm=-0.345+0.446.*(T_Wanne./1500);
35
36 % Abschätzung des Trommelüberlaufens
37 p=ProzÜberlauf(Wdia,Wholeanz,Wholedia,W_thick,Gm,grho,gsigma,geta,Wn);
38
39 udreh=2.*pi.*Wn.*(Wdia)./2;
40 dmax=(8.*Gm./(pi.*Wholeanz.*Wn.*Wdia.*grho)).^(1/2);
41 Gmmax=Wholedia.^2.*pi./4.*Wholeanz.*2.*pi.*Wn.*Wdia./2.*grho;
42 uloch=(4.*Gm./(Wholedia.^2.*pi.*Wholeanz.*grho));
43
44 % Abschätzung des Partikeldurchmessers durch ein gefittetes Kräftebilanzmodell
45 dplfit=dpl_fit_f1.*(12./grho.*(2.*pi.*Wn).^2.*Wdia.*pi)).*(dpl_fit_f2.*Wholedia.*pi.*gsigma + 16.*dpl_fit_f3.*uloch.*geta
46 .*W_thick^2 ./Wholedia)).^(1/3);
47
48 % Abschätzung des Partikeldurchmessers durch ein modifiziertes Modell nach Dhirhi et al.,
49 % 2016
50 Re=8.*Gm./(pi.*geta.*Wdia);
51 Oh=geta./((grho.*gsigma.*Wdia./2).^(1/2));
52 We=(grho.*(2.*pi.*Wn).^2).*((Wdia./2).^3)./gsigma;
53 dpDhirhimod2=(Wdia./2)^7.215.*Re.^0.184.*Oh.^0.853.*We.^(-0.284); %Fit mit n[U/s]
54 dpDhirhimod2=(Wdia./2).*dpDhirhimod2_f1.*Re.^dpDhirhimod2_f2.*Oh.*dpDhirhimod2_f3.*
55 We.^(dpDhirhimod2_f4);
56
57 % Parameter zum Festlegen des Überlaufbereiches und somit der Verwendung
58 % des gefitteten Kräftebilanzmodells anstatt des gefitteten Dhirhi-Modells
59 % Parameter siehe Modell_parameters.m
60 %pgrenzmin=50; %10
61 %pschleifmin=95; %30
62 %pschleifmax=100; %100
63 %pgrenzmax=400; %250
64
65 %-----
66 % Kriterien für Modellwahl:
67 %
68 % p < pgrenzmin: Dhirhi-Modell (dpDhirhimod2)
69 % pgrenzmin < p < pschleifmin: Übergang Dhirhi -> Kräftebilanz
70 % pschleifmin < p < pschleifmax: Kräftebilanz-Modell (dplfit)
71 % pschleifmax < p < pgrenzmax: Übergang Kräftebilanz -> Dhirhi
72 % pgrenzmax < p: Dhirhi-Modell (dpDhirhimod2)
73 %-----
74
75 % Modellwahl, abhängig vom Überlaufen
76 i=length(dmax);

```

```

71 while(i>0)
72 if(p<pgrenzmin || p>pgrenzmax)
73 dp5(i)=dpDhirhimod2(i);
74 else
75 dp5_loch(i)=dplfit(i);
76 dp5_dhirhi(i)=dpDhirhimod2(i);
77 if (dp5_loch(i)<=dp5_dhirhi(i))
78 if (p>pschleifmax && p<=pgrenzmax)
79
80 dp5(i)=dp5_loch(i)+(p-pschleifmax)*(dp5_dhirhi(i)-dp5_loch(i))/(pgrenzmax-pschleifmax);
81 elseif (p>pgrenzmin && p<=pschleifmin)
82
83 dp5(i)=dp5_dhirhi(i)+(p-pgrenzmin)*(dp5_loch(i)-dp5_dhirhi(i))/(pschleifmin-pgrenzmin);
84 else
85 dp5(i)=dp5_loch(i);
86 endif
87 else
88 dp5(i)=dp5_dhirhi(i);
89 endif
90 i--;
91 endwhile
92
93 % Abschätzung der Tellerheizleistung (Fit der Prozessdatenerfassung)
94 %Pfit=0.0655+(1+Wdia).^21.37+(1+Wn/1000).^19.71; % fit für n[U/s]
95 Pfit=Pfit_f1+(1+Wdia).^Pfit_f2+(1+Wn/1000).^Pfit_f3+(1+Gm*10).^Pfit_f4);
96 %Fittingparameter aus Modell_parameters.m
97
98 dppred=dp5(1);
99
100 endfunction

```

12.4 Octave Code für die Trommelauslegung

In diesem Kapitel ist das Modul `Trommelauslegung.m` zu finden.

```

1  % -----
2  % Trommelauslegung.m
3  % -----
4  % Dieses Programm liefert eine optimale Trommelgeometrie bei der Vorgabe der
5  % gewünschten Partikelgröße, des Trommeldurchmessers, des Massendurchsatzes und
6  % der Trommelwandstärke bzw. Bohrungslänge; Außerdem werden die Stoffeigenschaften
7  % durch die Temperatur T_Trommel abgeschätzt und im Modell verwendet.
8  %
9  % erforderliche Unterprogramme: Stoffeigenschaften.m, (evtl. auch ProzÜberlauf.m,
10 % Modell.m zur Kontrolle)
11 % -----
12 % Autor: Simon Alkin, August 2017
13 % -----
14 clear all;
15 close all;
16
17 %--- Eingabe Anfang -----
18 D=0.06; % Schätzung für den Außendurchmesser der Trommel
19 nholeschaetz=5; % Anzahl der Löcher in der Trommel
20 FreqBereich=20:5:70; % zulässiger Frequenzbereich
21 TTrommel=1350; % Temperatur [°C] (Modell auf 1350°C ausgelegt)
22 Gm=3000; % Massendurchsatz: Eingabe in g/min,
23 lLoch=0.0015; % Wandstärke der Trommel [m]
24 dpziel=510E-6; % Zielkorngröße [m]
25 %--- Eingabe Ende -----
26
27 Gm=Gm/(1000*60); %Umrechnung auf kg/s
28
29 Modell parameters;
30 legendl="";
31
32 % Abschätzung der Stoffparameter Dichte, Oberflächenspannung und
33 % dynamische Viskosität anhand der Temperatur T_Trommel
34 T=TTrommel;
35 Stoffeigenschaften;
36
37 fak1_init=1.2;
38 dLoch=round(fak1_init*dpziel*10000)/10000;
39 U=D*pi;
40
41 nLoch=nholeschaetz;
42 errorl=false;
43
44 %Iteriere solange, bis die Löcher maximal ein Drittel des Umfangs einnehmen
45 %while(U/3<nLoch*dLoch)
46 iter=1;
47 while(true)
48     nLoch;
49     fGrenz=nGrenz(D,nLoch,dLoch,lLoch,Gm,grho,gsigma,geta)*1.6*60/56;
50
51     if(FreqBereich(1)<=fGrenz && fGrenz<=FreqBereich(end))
52         i=1;
53         while(i<=length(FreqBereich))
54             i;
55             FreqBereich(i);
56             dp(i)=Modell(FreqBereich(i),D,dLoch,nLoch,lLoch,TTrommel,Gm);
57
58             if(dp(i)<=dpziel)
59                 FreqBereich2=FreqBereich(i-1):(FreqBereich(i)-FreqBereich(i-1))/10:FreqBereich(i);
60
61                 j=1;
62                 while(j<=length(FreqBereich2))
63                     j;
64                     FreqBereich2(j);
65                     dp2(j)=Modell(FreqBereich2(j),D,dLoch,nLoch,lLoch,TTrommel,Gm);
66
67                     if(dp2(j)<=dpziel)
68
69
70 Freq=FreqBereich2(j)-(FreqBereich2(j)-FreqBereich2(j-1))*(dpziel-dp2(j))/(dp2(j-1)-dp2(j));
71     n=Freq*56/(1.6*60);
72     p=ProzÜberlauf(D,nLoch,dLoch,lLoch,Gm,grho,gsigma,geta,n);
73     break
74 else
75     p=0;
76
77
78     endif
79
80     j++;
81     endwhile
82
83
84 %
85 Freq=FreqBereich(i)-(FreqBereich(i)-FreqBereich(i-1))*(dpziel-dp(i))/(dp(i-1)-dp(i));
86 %
87     n=Freq*56/(1.6*60);
88 %
89     p=ProzÜberlauf(D,nLoch,dLoch,lLoch,Gm,grho,gsigma,geta,n);
90     break
91 else
92     p=0;
93     endif
94
95     i++;
96     endwhile
97
98     if(50<p && p<100)
99         break
100 else
101     nLoch=nLoch+2;
102     endif
103 elseif(FreqBereich(1)<fGrenz)
104     nLoch=nLoch+2;
105 elseif(fGrenz>FreqBereich(end))
106     nLoch=nLoch-2;
107     endif
108 iter++;
109 if(iter>50)
110     errorl=true;
111     break;
112     endif
113 endwhile
114
115 if(!errorl)
116     dpziel
117
118     Gm_gmin=Gm*1000*60
119     D
120     dLoch
121     nLoch
122     n
123     nrpm=n*60
124     Freq=n*1.6*60/56
125     Lochabstand=(U-nLoch*dLoch)/nLoch
126
127     P=Pfit_f1+(1+D).^Pfit_f2+(1+n/1000).^Pfit_f3+(1+Gm*10).^Pfit_f4
128
129 % Kontrolle der Iteration
130 fGrenz=nGrenz(D,nLoch,dLoch,lLoch,Gm,grho,gsigma,geta)*1.6*60/56
131 p=ProzÜberlauf(D,nLoch,dLoch,lLoch,Gm,grho,gsigma,geta,n)
132 dppred=Modell(n*1.6*60/56,D,dLoch,nLoch,lLoch,TTrommel,Gm)
133 else
134     "No Solution found!"
135     endif

```

12.5 Octave Code der Zusatzmodule

In diesem Kapitel sind die Module Stoffeigenschaften.m, dataread_einfach.m, Modell_parameters.m, nGrenz.m und ProzÜberlauf.m zu finden.

```

1  %-----
2  % Stoffeigenschaften.m
3  %-----
4  % Dieses Programm berechnet die Stoffeigenschaften Dichte, dyn. Viskosität
5  % und Oberflächenspannung anhand der Variable T
6  % Variable T muss vom Übergabeprogramm gesetzt werden! Diese kann einen
7  % Einzelwert oder ein Temperaturdatenfeld enthalten
8  %
9  % optim Package wird benötigt
10 %-----
11 % Autor: Simon Alkin, August 2017
12 %-----
13
14 pkg load optim
15 T_std=1350;
16
17 %-----
18 % Berechnung der Dichte [kg/m3]
19 %-----
20 % Extrapolationspunkte:
21 T1 = 1200;
22 rho1 = 2791;
23 T2 = 1400;
24 rho2 = 2753;
25
26 rhofunc=polyfit([T1,T2],[rho1,rho2],1);
27 if(length(T)==1)
28     %grho=interp1([T1,T2],[rho1,rho2],[T])(1);
29     grho=polyval(rhofunc,T);
30 else
31     grho=zeros(length(T),1);
32     i=1;
33     while(i<=length(T))
34         %grho(i)=interp1([T1,T2],[rho1,rho2],[T(i)])(1);
35         if(T(i)==0)
36             T(i)=T_std;
37         endif
38         grho(i,1)=polyval(rhofunc,T(i));
39         i++;
40     endwhile
41 endif
42 %-----
43
44
45 %-----
46 % Berechnung der Oberflächenspannung [N/m]
47 %-----
48 % Extrapolationspunkte:
49 T1 = 1300;
50 sig1 = 0.3926;
51 T2 = 1400;
52 sig2 = 0.3887;
53 sigmafunc=polyfit([T1,T2],[sig1,sig2],1);
54 if(length(T)==1)
55     %gsigma=interp1([T1,T2],[sig1,sig2],[T])(1);
56     gsigma=polyval(sigmafunc,T);
57 else
58     gsigma=zeros(length(T),1);
59     i=1;
60     while(i<=length(T))
61         %gsigma(i)=interp1([T1,T2],[sig1,sig2],[T(i)])(1);
62         if(T(i)==0)
63             T(i)=T_std;
64         endif
65         gsigma(i,1)=polyval(sigmafunc,T(i));
66         i++;
67     endwhile
68 endif
69 %-----
70
71
72 %-----
73 % Berechnung der dyn. Viskosität [Pa*s]
74 %-----
75 % Extrapolationspunkte:
76 T1 = 1256.1;

```

```

77 eta1 = 0.104;
78 T2 = 1380;
79 eta2 = 0.05;
80 etafunc=polyfit([T1,T2],[eta1,eta2],1);
81 if(length(T)==1)
82     %geta=interp1([T1,T2],[eta1,eta2],[T])(1);
83     geta=polyval(etafunc,T);
84 else
85     geta=zeros(length(T),1);
86     i=1;
87     while(i<=length(T))
88         %geta(i)=interp1([T1,T2],[eta1,eta2],[T(i)])(1);
89         if(T(i)==0)
90             T(i)=T_std;
91         endif
92         geta(i,1)=polyval(etafunc,T(i));
93         i++;
94     endwhile
95 endif
96 %-----

```

```

1  %-----
2  % dataread_einfach.m
3  %-----
4  % Programm zum Einlesen des Datenfeldes data und zuordnen zu den Variablen
5  %-----
6  % Autor: Simon Alkin, August 2017
7  %-----
8
9  dmin=data(1,32:40);
10 Gm=data(4:end,8)./(1000.*60);
11 Wnum=data(4:end,14);
12 Wdia=data(4:end,15).*(10^-3);
13 Wholeanz=data(4:end,17);
14 Wholedia=data(4:end,18).*(10^-3);
15 WP=data(4:end,20);
16 Wn=data(4:end,21).*56./(60.*1.6); %Umrechnung von Motorfrequenz [Hz] auf
    Trommeldrehzahl [1/s]
17 sieb=data(4:end,32:40);
18 dp25=data(4:end,42).*(10^-6);
19 dp50=data(4:end,43).*(10^-6);
20 dp75=data(4:end,44).*(10^-6);
21 kappa=data(4:end,45);
22 Tread=data(4:end,46);
23
24 % Einlesen von Datum und Uhrzeit
25 Wday=floor(real(data(4:end,4)));
26 Wmonth=round(100*(real(data(4:end,4))-round(data(4:end,4))));
27 Wyear=round(imag(data(4:end,4))*10000);
28 Whour=data(4:end,5);
29
30 % Löschen von Einträgen ohne Trommeldurchmesser
31 i=length(Wdia);
32 while(true)
33     if(Wdia(i)==0 || Wdia(i)==NaN)
34         Gm(i,:)=[];
35         Wnum(i,:)=[];
36         Wdia(i,:)=[];
37         Wholeanz(i,:)=[];
38         Wholedia(i,:)=[];
39         WP(i,:)=[];
40         Wn(i,:)=[];
41         sieb(i,:)=[];
42         dp25(i,:)=[];
43         dp50(i,:)=[];
44         dp75(i,:)=[];
45         kappa(i,:)=[];
46         Tread(i,:)=[];
47         Wday(i,:)=[];
48         Wmonth(i,:)=[];
49         Wyear(i,:)=[];
50         Whour(i,:)=[];
51     endif
52     i--;
53     if (i==0)
54         break;
55     endif
56 endwhile

```

```

1  %-----
2  % Modell_parameters.m
3  %-----
4  % Modul zur gesammelten Speicherung der Parameter
5  %-----
6  % Autor: Simon Alkin, August 2017
7  %-----
8
9  % f1=0.723;
10 % f2=0.0127;
11 % f3=400; %200
12 % f4=9; %8
13
14 % Variante 1: llig=(llig_f1*uL)^(-1);
15 % Variante 2: llig=(llig_f1*llig_f2 .*1/(dLoch.^0.5) .*1/nLoch*uL)^(-1)
16 %llig_f1=0.007; %220
17 %llig_f2=0.7639; %dLoch^2: 0.000014; dLoch^1: 0.0255; dLoch^0.5: 0.7639;
18 llig_f1=1;
19 llig_f2=1/187.01;
20 llig_f2=1/56.6;
21
22 %dlig=((dLoch+dlig_f1*2E-4)/(dlig_f1+1));
23 dlig_f1=6; %6
24
25 %dplfit=dpl_fit_f1 .*((12 ./ (grho .* (2 .*pi.*Wn).^2
.*Wdia.*pi)).*(dpl_fit_f2.*Wholedia.*pi.*gsigma + 16 .*dpl_fit_f3.*uloch.*geta
.* (W_thick^2) ./Wholedia)).^(1/3);
26 dpl_fit_f1=0.55; %0.658 %0.55
27 dpl_fit_f2=3; %1.9 %3
28 dpl_fit_f3=0.001; %0.005 %0.001
29
30
31 %dpDhirhimod2=(Wdia./2)*dpDhirhimod2_f1 .*Re.^dpDhirhimod2_f2 .* Oh.^dpDhirhimod2_f3 .*
We.^(dpDhirhimod2_f4);
32 dpDhirhimod2_f1=11;
33 dpDhirhimod2_f2=0.21;
34 dpDhirhimod2_f3=0.92;
35 dpDhirhimod2_f4=-0.31;
36
37 %Grenzen für Wahl des dp-Modell
38 pgrenzmin=10; %10
39 pschleifmin=50; %30
40 pschleifmax=100; %100
41 pgrenzmax=1000; %250
42 % pgrenzmin=80; %10
43 % pschleifmin=90; %30
44 % pschleifmax=100; %100
45 % pgrenzmax=110; %250
46
47 %Pfit=Pfit_f1+(1+Wdia).^Pfit_f2+(1+Wn/1000).^Pfit_f3+(1+Gm*10).^ (Pfit_f4);
48 Pfit_f1=0.0674;
49 Pfit_f2=20.93;
50 Pfit_f3=18.8;
51 Pfit_f4=-2.41;
52

```

```

1  %-----
2  % nGrenz.m
3  %-----
4  % Funktion zur Abschätzung der Grenzdrehzahl zum Überlaufen der Trommel
5  %-----
6  % Autor: Simon Alkin, August 2017
7  %-----
8
9  function nrpsgrenz=nGrenz(D,nLoch,dLoch,lLoch,m,rho,sigma,mu)
10     Modell_parameters;
11     ALocher=dLoch^2*pi/4*nLoch; % gesamte Austrittsfläche aller Löcher in Trommel
12     uLoch=m./(rho*ALocher);      % benötigte Lochaustrittsgeschwindigkeit, um gegebenen
    Massedurchsatz durch Löcher zu erreichen
13     %w=fsolve(@(w)
    16*uLoch.*mu*lLoch^2/dLoch+dLoch*pi*sigma-rho*w^2*D/2*dLoch^2*pi/4*lLig),124) %
    Umdrehungsgeschwindigkeit, um die Lochaustrittsgeschwindigkeit zu erreichen
14
15     %lLig=(88.906*m.^2-0.2865 .*m+0.0397-667*10^(-6)*nLoch);
16
17     %lLigGrenz=(lLig_f1.*uLoch).^(-1); % Variante 1
18     lLigGrenz=(lLig_f1 .*lLig_f2 .*1/(dLoch.^2) .*1/nLoch.*uLoch)^(-1); % Variante 2
19
20     dlig=((dLoch+dlig_f1*2E-4)/(dlig_f1+1));
21     w=(dpl_fit_f1^3*8 ./ (rho*D*dlig^2 .*pi.*lLigGrenz).*(dpl_fit_f3*16 .*uLoch.*mu*lLoch^2
    .dLoch+dpl_fit_f2*dLoch*pi*sigma)).^(1/2);
22     %w=uLoch.*2/D;
23     uU=w.*D/2; % Umfangsgeschwindigkeit der Trommel
24     n=w./(2*pi); % Umrechnung von Umdrehungsgeschwindigkeit auf Drehzahl
25
26     nrpsgrenz=n;
27 endfunction

```

```

1  %-----
2  % ProZÜberlauf.m
3  %-----
4  % Diese Funktion schätzt den Trommelüberlauf anhand der Übergabeparameter ab.
5  % Übergabeparameter:
6  %   D:      Trommeldurchmesser [m]
7  %   nLoch:  Lochanzahl [1]
8  %   dLoch:  Lochdurchmesser [m]
9  %   lLoch:  Länge der Bohrung bzw. Wandstärke der Trommel
10 %   m:      Massendurchsatz [kg]
11 %   rho:    Dichte [kg/m3]
12 %   sigma:  Oberflächenspannung [N/m]
13 %   mu:     dynamische Viskosität [Pa*s]
14 %   n:      Trommeldrehzahl [U/s]
15 %-----
16 % Autor: Simon Alkin, August 2017
17 %-----
18
19 function p=ProzÜberlauf(D,nLoch,dLoch,lLoch,m,rho,sigma,mu,n)
20 Modell_parameters;
21 %dLoch=0.0007;      % Lochdurchmesser [m]
22 %nLoch=40;          % Anzahl der Löcher
23 %D=0.06;            % Trommeldurchmesser [m]
24 %lLoch=0.001;       % Wanddicke der Trommel [m]
25 %lLig=0.001*2;      % Länge der Ligamente [m]
26 %m=3400/(1000*60); % Massendurchsatz [kg/s] (Umrechnung von [g/min] auf [kg/s]
27 %
28 %% 1300°C
29 %rho=2772;
30 %sigma=0.3926;
31 %mu=0.0849;
32
33 %-----
34 % Berechnung des Verhältnisses von benötigten zu tatsächlichen Löchern
35 %-----
36 w=2*pi*n;          % Umrechnung von Drehzahl [rps] auf Umdrehungsgeschwindigkeit [rad/s]
37
38 dlig=((dLoch+dlig_f1*2E-4)/(dlig_f1+1));
39
40 % Abschätzung des Überlaufens anhand einer gefitteten Kräftebilanz
41 a=dpl_fit_f3*16*mu*lLoch^2/dLoch;
42 b=dpl_fit_f2*dLoch*pi*sigma;
43 %c=-(w^2*rho*D*dlig^2*pi/(8)*(1/(dpl_fit_f1*llig_f1)));
44 % Variante 1
45 c=-((w^2*rho*D*dlig^2*pi/(8)*(1/(dpl_fit_f1^3*llig_f1.*(llig_f2 .*1/(dLoch.^2)
46 .*1/nLoch))))); % Variante 2
47
48 uL1=(-b+(b^2-4*a*c)^(1/2))/(2*a); % Lösungsformel der quadratischen Gleichung
49 %uL2=(-b-(b^2-4*a*c)^(1/2))/(2*a);
50 if (uL1>0)
51     uL=uL1;
52     n*60;
53     %llig=(llig_f1*uL)^(-1); % Variante 1
54     llig=(llig_f1*llig_f2 .*1/(dLoch.^2) .*1/nLoch*uL)^(-1); % Variante 2
55 endif
56
57 uU=w*D/2;          % Umfangsgeschwindigkeit der Trommel
58 AL=m/(uL*rho);    % benötigte Gesamtaustrittsfläche (Summe der Lochquerschnitte)
59 nLoch;
60 nLig=4*AL/(dLoch^2*pi); % Anzahl der Ligamente, bzw. der benötigten Löcher
61 p=nLig/nLoch*100; % Anteil [%] der Ligamente an der Gesamtlochzahl der Trommel
62
63 endfunction

```

12.6 vba-Excel Code für das Spinning Disc Modell

In diesem Kapitel sind die Module TrommelauslegungRun_ Modul.bas und Trommelauslegung_ Modul.bas zu finden.

TrommelauslegungRun_Modul - 1

Option Explicit

```
'-----  
' Diese Funktionen lassen die Ausgabe der Trommelauslegungs Berechnung  
' auf einzelne Zellen in einem Tabellenblatt zu.  
'  
' Aufruf: (Übergabevariablen sind immer Zellbezüge!)  
' - Trommelauslegung_Motorfrequenz (Trommeldurchmesser [m], Massendurchsatz [kg/s],  
'   Zielpartikelgröße (dp50) [m], Wandstärke [m])  
' - Trommelauslegung_Lochanzahl (Trommeldurchmesser [m], Massendurchsatz [kg/s],  
'   Zielpartikelgröße (dp50) [m], Wandstärke [m])  
' - Trommelauslegung_Uberlauf (Trommeldurchmesser [m], Massendurchsatz [kg/s],  
'   Zielpartikelgröße (dp50) [m], Wandstärke [m])  
' - Trommelauslegung_Trommelheizleistung_kW (Trommeldurchmesser [m], Massendurchsatz [kg/s],  
'   Zielpartikelgröße (dp50) [m], Wandstärke [m])  
'  
' benötigte Module: Trommelauslegung_Modul, Parameter_Modul, Stoffeigenschaften_Modul, dppred_Modul  
'  
'   nGrenz_Modul, ProzUberlauf_Modul  
'  
' Autor: Simon Alkin, August 2017  
'-----  
' öffentliche Variablendeklaration  
Dim d As Double, m As Double, lLoch As Double, dpziel As Double, nLoch As Double  
Dim Freq As Double, dLoch As Double, pUber As Double, Power As Double  
  
Function Trommelauslegung_Motorfrequenz( _  
    ByRef dCell As Range, _  
    ByRef mCell As Range, _  
    ByRef dpzielCell As Range, _  
    ByRef lLochCell As Range _  
    ) As Double  
    ' Überprüfung ob Neuberechnung notwendig  
    If Not (d = dCell.Value) Or Not (m = mCell.Value) _  
    Or Not (dpziel = dpzielCell.Value) Or Not (lLoch = lLochCell.Value) Then  
        ' Starte Neuberechnung der Trommelauslegung  
        Call TrommelauslegungRun(dCell, mCell, dpzielCell, lLochCell)  
    End If  
  
    Trommelauslegung_Motorfrequenz = Freq  
End Function  
  
Function Trommelauslegung_Lochanzahl( _  
    ByRef dCell As Range, _  
    ByRef mCell As Range, _  
    ByRef dpzielCell As Range, _  
    ByRef lLochCell As Range _  
    ) As Double  
    ' Überprüfung ob Neuberechnung notwendig  
    If Not (d = dCell.Value) Or Not (m = mCell.Value) _  
    Or Not (dpziel = dpzielCell.Value) Or Not (lLoch = lLochCell.Value) Then  
        ' Starte Neuberechnung der Trommelauslegung  
        Call TrommelauslegungRun(dCell, mCell, dpzielCell, lLochCell)  
    End If  
  
    Trommelauslegung_Lochanzahl = nLoch  
End Function  
  
Function Trommelauslegung_Lochdurchmesser( _  
    ByRef dCell As Range, _  
    ByRef mCell As Range, _  
    ByRef dpzielCell As Range, _  
    ByRef lLochCell As Range _  
    ) As Double  
    ' Überprüfung ob Neuberechnung notwendig  
    If Not (d = dCell.Value) Or Not (m = mCell.Value) _  
    Or Not (dpziel = dpzielCell.Value) Or Not (lLoch = lLochCell.Value) Then  
        ' Starte Neuberechnung der Trommelauslegung  
        Call TrommelauslegungRun(dCell, mCell, dpzielCell, lLochCell)  
    End If  
  
    Trommelauslegung_Lochdurchmesser = dLoch  
End Function
```

TrommelauslegungRun_Modul - 2

```
Function Trommelauslegung_Uberlauf( _  
    ByRef dCell As Range, _  
    ByRef mCell As Range, _  
    ByRef dpzielCell As Range, _  
    ByRef lLochCell As Range _  
    ) As Double  
    ' Überprüfung ob Neuberechnung notwendig  
    If Not (d = dCell.Value) Or Not (m = mCell.Value) _  
    Or Not (dpziel = dpzielCell.Value) Or Not (lLoch = lLochCell.Value) Then  
        ' Starte Neuberechnung der Trommelauslegung  
        Call TrommelauslegungRun(dCell, mCell, dpzielCell, lLochCell)  
    End If  
  
    Trommelauslegung_Uberlauf = pUber  
End Function  
  
Function Trommelauslegung_Trommelheizleistung_kW( _  
    ByRef dCell As Range, _  
    ByRef mCell As Range, _  
    ByRef dpzielCell As Range, _  
    ByRef lLochCell As Range _  
    ) As Double  
    ' Überprüfung ob Neuberechnung notwendig  
    If Not (d = dCell.Value) Or Not (m = mCell.Value) Or Not (dpziel = dpzielCell.Value) Or Not (lLoch = lLochCell.Value) Then  
        ' Starte Neuberechnung der Trommelauslegung  
        Call TrommelauslegungRun(dCell, mCell, dpzielCell, lLochCell)  
    End If  
  
    Trommelauslegung_Trommelheizleistung_kW = Power  
End Function  
  
Sub TrommelauslegungRun( _  
    ByRef dCell As Range, _  
    ByRef mCell As Range, _  
    ByRef dpzielCell As Range, _  
    ByRef lLochCell As Range)  
    ' Einlesen der Übergabezellen in die Variablen  
    d = dCell.Value           ' Außendurchmesser der Trommel [m]  
    m = mCell.Value           ' Massendurchsatz: Eingabe in kg/s  
    dpziel = dpzielCell.Value ' Zielkorngröße [m]  
    lLoch = lLochCell.Value   ' Wandstärke der Trommel bei den Bohrungen [m]  
  
    ' Aufruf der Trommelauslegung mit allen benötigten Übergabevariablen  
    Call Trommelauslegung_Modul.Trommelauslegung(d, m, dpziel, lLoch, Freq, nLoch, dLoch, pUber, Power)  
    ' MsgBox "m=" & m & ",D=" & d & ",dLoch=" & dLoch & ",nLoch=" & nLoch & ",Freq=" & Freq, vbOKOnly, "Ergebnisse"  
End Sub
```

Trommelauslegung_Modul - 1

Option Explicit

' Dieses Unterprogramm berechnet die benötigte Lochanzahl, den
' benötigten Lochdurchmesser und die benötigte Trommeldrehzahl, um
' die gewünschte Zielpartikelgröße zu produzieren. Außerdem wird die
' erforderliche Tellerheizleistung berechnet.

' Aufruf:

' Trommelauslegung(Trommeldurchmesser[m], Massendurchsatz[g/min],
' Zielpartikelgröße(dp50)[m], Wandstärke[m],
' Motorfrequenz[Hz], Lochanzahl, Lochdurchmesser[m],
' ProzÜberlauf[%], Tellerheizleistung[kW])
' Die ersten 4 Übergabevariablen (Trommeldurchmesser, Massendurchsatz,
' Zielpartikelgröße, Wandstärke) müssen Werte enthalten, die
' 5 restlichen Variablen (Motorfrequenz, Lochanzahl, Lochdurchmesser,
' ProzÜberlauf, Tellerheizleistung) müssen im Aufrufmodul deklariert werden.
' Diese werden dann während des Programmdurchlaufes berechnet
' und in diesen Variablen abgespeichert bzw. zurückgegeben.

' benötigte Module: Parameter_Modul, Stoffeigenschaften_Modul, dppred_Modul,
' nGrenz_Modul, ProzÜberlauf_Modul

' Autor: Simon Alkin, August 2017

Sub Trommelauslegung(ByVal DTrommel_m As Double _

, ByVal Massenstrom_kg_s As Double _
, ByVal dpziel_m As Double _
, ByVal lLoch_m As Double _
, ByRef Freq_Hz As Double _
, ByRef nLoch_l As Double _
, ByRef dLoch_m As Double _
, ByRef p_proz As Double _
, ByRef Pow_kW As Double)

' Variablendeklaration

Dim d As Double, Gm As Double, lLoch As Double, dpziel As Double
Dim dLoch As Double, U As Double, nLoch As Double, fGrenz As Double, Freq As Double, n As Double
Dim p As Double
Dim geta As Double, gsigma As Double, grho As Double
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, iter As Integer
Dim error1 As Boolean
Dim FreqBereich(20)
Dim FreqBereich2(20)
Dim dp
ReDim dp(UBound(FreqBereich))
Dim dp2
ReDim dp2(UBound(FreqBereich2))
Dim Pi As Double
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()

' Einlesen der Übergabevariablen

d = DTrommel_m ' Schätzung für den Außendurchmesser der Trommel
nLoch = 2# ' Iterationsinitialisierung: Anzahl der Löcher in der Trommel
Gm = Massenstrom_kg_s ' Massendurchsatz: Eingabe in g/min, Umrechnung auf kg/s
lLoch = lLoch_m ' Wandstärke der Trommel [m]
dpziel = dpziel_m ' Zielkorngroße [m]

' Redimensionieren und Befüllen des Frequenzarrays mit Werten zwischen Min- und Maxmotorfrequenz

For i = 0 To UBound(FreqBereich)
FreqBereich(i) = FreqBereichMin + i * (FreqBereichMax - FreqBereichMin) / UBound(FreqBereich)

Next i

' Abschätzung der Stoffparameter Dichte[kg/m³], Oberflächenspannung[N/m] und
' dynamische Viskosität[Pa*s] anhand der Temperatur TTrommel (siehe Modul: Parameter_Modul)
geta = Stoffeigenschaften_Modul.Viskositaet(TTrommel)
gsigma = Stoffeigenschaften_Modul.Oberflaechenspannung(TTrommel)
grho = Stoffeigenschaften_Modul.Dichte(TTrommel)

' Abschätzung des Bohrungsdurchmessers, Bohrung soll um den Faktor fak1 größer als die
' Zielpartikelgröße (dp50) sein. Es wird auf 0.1mm gerundet.
dLoch = Application.WorksheetFunction.RoundUp(fak1 * dpziel, 4)

Trommelauslegung_Modul - 2

' Berechnung des Trommelumfangs
U = d * Pi

' Initialisieren der Error-Variable
error1 = False

iter = 1

Do While (True)

' Abschätzung der Grenzfrequenz, bei der die Trommel gerade nicht überschwappt
fGrenz = fGrenz_Modul.fGrenz(d, nLoch, dLoch, lLoch, Gm, grho, gsigma, geta)

If (FreqBereich(LBound(FreqBereich)) <= fGrenz And fGrenz <= FreqBereich(UBound(FreqBereich))) Then

' Grenzfrequenz im zulässigen Motorfrequenzbereich

For i = 0 To UBound(FreqBereich)

' Abschätzung des mittleren Partikeldurchmessers bei gegebenen Prozessparametern

dp(i) = dppred_Modul.dppred(FreqBereich(i), d, dLoch, nLoch, lLoch, Gm, geta, gsigma

a, grho)

If (dp(i) <= dpziel) Then

' Partikeldurchmesser kleiner als Zielpartikeldurchmesser

' Erstellen eines Frequenzarrays mit kleineren Abständen

For k = 0 To UBound(FreqBereich2)

FreqBereich2(k) = FreqBereich(i - 1) + k * (FreqBereich(i) - FreqBereich(i

- 1)) / UBound(FreqBereich2)

Next

For j = 0 To UBound(FreqBereich2)

' Abschätzung des mittleren Partikeldurchmessers bei gegebenen Prozessparam

etern

dp2(j) = dppred_Modul.dppred(FreqBereich2(j), d, dLoch, nLoch, lLoch, Gm, g

eta, gsigma, grho)

If (dp2(j) <= dpziel) Then

' Partikeldurchmesser kleiner als Zielpartikeldurchmesser

' Lineare Interpolation auf die für die Zielpartikelgröße benötigte Mot

orfrequenz

Freq = FreqBereich2(j) - (FreqBereich2(j) - FreqBereich2(j - 1)) * (dpz

iel - dp2(j)) / (dp2(j) - 1)

n = Freq * Hz_Umin / (Übersetzung * 60) ' Umrechnung auf Motordrehzahl

[U/s]

' Abschätzung des Verhältnisses[%] von benötigten zu vorhandenen Löcher

n

p = ProzÜberlauf_Modul.ProzÜberlauf(d, nLoch, dLoch, lLoch, Gm, grho, g

sigma, geta, Freq)

Exit For

Else

p = 0

End If

Next

Next

Exit For

Else

p = 0

End If

Next

If (pgrenzmin_Auslegung < p And p < pgrenzmax_Auslegung) Then

' Auslegung im zulässigen Bereich -> Beenden der Iteration

Exit Do

ElseIf (p > pgrenzmax_Auslegung) Then

' Trommel schwappt über -> Erhöhen der Lochanzahl

nLoch = nLoch + 2

ElseIf (p < pgrenzmin_Auslegung) Then

' Trommel zu wenig voll, daher Löcher nicht vollständig benetzt

' -> Verringern der Lochanzahl

nLoch = nLoch - 2

End If

ElseIf (fGrenz > FreqBereich(UBound(FreqBereich))) Then

' Grenzfrequenz oberhalb des zulässigen Motorfrequenzbereichs,

' daher Erhöhung der Lochanzahl nötig

nLoch = nLoch + 2

ElseIf (fGrenz < FreqBereich(LBound(FreqBereich))) Then

' Grenzfrequenz unterhalb des zulässigen Motorfrequenzbereichs,

' daher Verringerung der Lochanzahl nötig

```

Trommelauslegung_Modul - 3

    nLoch = nLoch - 2
End If

' Erhöhen des Iterationszählers
iter = iter + 1
If (iter > 500) Then
    ' Abbruchbedingung, nach 500 Iterationsdurchläufen
    error1 = True
    Exit Do
End If
Loop

If (error1 = False) Then
    MsgBox "m=" & Gm & ",D=" & d & ",dLoch=" & dLoch & ",nLoch=" & nLoch & ",Freq=" & Freq, vb
OKOnly, "Ergebnisse"

    ' Ausgabe der Ergebnisse
    Freq_Hz = Freq
    nLoch_l = nLoch
    dLoch_m = dLoch
    p_proz = p
    ' Berechnung der benötigten Tellerheizleistung[kW]
    Pow_kW = Pfit_f1 + (1 + d) ^ Pfit_f2 + (1 + n / 1000) ^ Pfit_f3 + (1 + Gm * 10) ^ (Pfit_f4)
Else
    ' Keine Lösung bei gegebenen Parametern möglich
    MsgBox "No Solution found!"
    Freq_Hz = 0#
    nLoch_l = 0#
    dLoch_m = 0#
    p_proz = 0#
    Pow_kW = 0#
End If

End Sub

```

12.7 vba-Excel Code für die Trommelauslegung

In diesem Kapitel ist das Modul `dppred_Modul.bas` zu finden.

dppred_Modul - 1

Option Explicit

```
'-----  
' Diese Funktion schätzt den mittleren Partikeldurchmesser aufgrund  
' der übergebenen Prozessparameter. Abhängig vom Grad des Überschwappens  
' der Trommel wird zwischen zwei Berechnungsmodellen unterschieden.  
'  
' Aufruf: dppred(Motorfrequenz[Hz], Trommeldurchmesser[m], Lochdurchmesser[m],  
'             Lochanzahl, Wandstärke[m], Massendurchsatz[kg/s], dyn.Viskosität[Pa*s]  
'             Oberflächenspannung[N/m], Dichte[kg/m3])  
'  
' benötigte Module: ProzÜberlauf_Modul, Parameter_Modul  
'  
' Autor: Simon Alkin, August 2017  
'-----
```

Function dppred(

```
    ByVal Wf As Double, _  
    ByVal Wdia As Double, _  
    ByVal Wholedia As Double, _  
    ByVal Wholeanz As Double, _  
    ByVal W_thick As Double, _  
    ByVal Gm As Double, _  
    ByVal geta As Double, _  
    ByVal gsigma As Double, _  
    ByVal grho As Double _  
    ) As Double
```

```
' Variablendeklaration  
Dim Wn As Double, T As Double, p As Double, UL As Double  
Dim dplfit As Double ' Variable für Kräftebilanzmodell  
Dim Re As Double, Oh As Double, We As Double, dpDhirhimod2 As Double ' Variablen für modifizier  
tes Modell nach Dhirhi et al., 2016  
Dim dp5 As Double, dp5_loch As Double, dp5_dhirhi As Double  
Dim Pfit As Double  
Dim i As Integer
```

```
Dim Pi As Double  
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()
```

```
' Umrechnung der Motorfrequenz [Hz] auf Drehzahl [U/s], bei Verwendung einer  
' Übersetzung von "Übersetzung" und einer Umrechnung zwischen Motorfrequenz und  
' Motordrehzahl von "Hz_Umin" (1[Hz] = Hz_Umin [U/min])  
Wn = Wf * Hz_Umin / (60 * Übersetzung)
```

```
' Abschätzung des Grades des Trommelüberlaufens  
p = ProzÜberlauf_Modul.ProzÜberlauf(Wdia, Wholeanz, Wholedia, W_thick, Gm, grho, gsigma, geta,  
Wf)
```

```
' Berechnung der Lochaustrittsgeschwindigkeit  
UL = (4 * Gm / (Wholedia ^ 2 * Pi * Wholeanz * grho))
```

```
' Abschätzung des Partikeldurchmessers durch ein gefittetes Kräftebilanzmodell  
dplfit = dpl_fit_f1 * ((12 / (grho * (2 * Pi * Wn) ^ 2 * Wdia * Pi)) * (dpl_fit_f2 * Wholedia *  
Pi * gsigma + 16 * dpl_fit_f3 * UL * geta * (W_thick ^ 2) / Wholedia)) ^ (1 / 3)
```

```
' Abschätzung des Partikeldurchmessers durch ein modifiziertes Modell nach Dhirhi et al., 2016  
Re = 8 * Gm / (Pi * geta * Wdia)  
Oh = geta / ((grho * gsigma * Wdia / 2) ^ (1 / 2))  
We = (grho * ((2 * Pi * Wn) ^ 2) * ((Wdia / 2) ^ 3)) / gsigma  
dpDhirhimod2 = (Wdia / 2) * dpDhirhimod2_f1 * Re ^ dpDhirhimod2_f2 * Oh ^ dpDhirhimod2_f3 * We  
^ dpDhirhimod2_f4
```

```
'-----  
' Kriterien für Modellwahl:  
'  
' p < pgrenzmin: Dhirhi-Modell (dpDhirhimod2)  
' pgrenzmin < p < pschleifmin: Übergang Dhirhi -> Kräftebilanz (Mittelung durch p)  
' pschleifmin < p < pschleifmax: Kräftebilanz-Modell (dplfit)  
' pschleifmax < p < pgrenzmax: Übergang Kräftebilanz -> Dhirhi (Mittelung durch p)  
' pgrenzmax < p: Dhirhi-Modell (dpDhirhimod2)  
'-----
```

```
' Modellwahl, abhängig vom Überlaufen (Variable p=ProzÜberlauf(...))  
If (p < pgrenzmin Or p > pgrenzmax) Then  
    dp5 = dpDhirhimod2  
Else
```

dppred_Modul - 2

```
    dp5_loch = dplfit  
    dp5_dhirhi = dpDhirhimod2  
    If (dp5_loch <= dp5_dhirhi) Then  
        If (p > pschleifmax And p <= pgrenzmax) Then  
            dp5 = dp5_loch + (p - pschleifmax) * (dp5_dhirhi - dp5_loch) / (pgrenzmax - pschlei  
fmax)  
        ElseIf (p > pgrenzmin And p <= pschleifmin) Then  
            dp5 = dp5_dhirhi + (p - pgrenzmin) * (dp5_loch - dp5_dhirhi) / (pschleifmin - pgre  
n  
zmin)  
        Else  
            dp5 = dp5_loch  
        End If  
    Else  
        dp5 = dp5_dhirhi  
    End If  
End If
```

```
' Abschätzung der Tellerheizleistung (Fit der Prozessdatenerfassung)  
Pfit = Pfit_f1 + (1 + Wdia) ^ Pfit_f2 + (1 + Wn / 1000) ^ Pfit_f3 + (1 + Gm * 10) ^ (Pfit_f4) '  
Fittingparameter aus Modell_parameters.m
```

```
' Ausgabe des berechneten Partikeldurchmessers  
dppred = dp5
```

End Function

12.8 vba-Excel Code der Zusatzmodule

In diesem Kapitel sind die Module fGrenz_Modul.bas, Stoffeigenschaften_Modul.bas, Parameter_Modul.bas und ProzÜberlauf_Modul.bas zu finden.

fGrenz_Modul - 1

Option Explicit

```
'-----  
' Diese Funktionen schätzt die Grenzfrequenz[Hz] des Motors mit den übergebenen Parametern  
' ab. Bei geringerer Frequenz bzw. Drehzahl läuft die Trommel über.  
'  
' Aufrufe: nGrenz(Trommeldurchmesser[m], Lochanzahl, Lochdurchmesser[m],  
'           Massenstrom[kg/s], Dichte[kg/m3], Oberflächenspannung[N/m],  
'           dynamische Viskosität[Pa*s])  
'  
' benötigte Module: Parameter_Modul  
'  
' Autor: Simon Alkin, August 2017  
'-----  
  
Function fGrenz( _  
    ByVal d As Double, _  
    ByVal nLoch As Double, _  
    ByVal dLoch As Double, _  
    ByVal lLoch As Double, _  
    ByVal m As Double, _  
    ByVal rho As Double, _  
    ByVal sigma As Double, _  
    ByVal mu As Double _  
        ) As Double  
  
    ' Variablendeklaration  
    Dim ALocher As Double, UL As Double, llig As Double, dLig As Double, w As Double, uU As Double  
    Dim Pi As Double  
    Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()  
  
    ALocher = dLoch ^ 2 * Pi / 4 * nLoch    ' gesamte Austrittsfläche aller Löcher in Trommel  
    UL = m / (rho * ALocher)              ' benötigte Lochaustrittsgeschwindigkeit, um gegebenen  
    Massendurchsatz durch Löcher zu erreichen  
  
    ' Abschätzung der Ligamentlänge  
    lligGrenz=(llig_f1*uL)^(-1)           ' Variante 1  
    llig = (llig_f1 * llig_f2 * 1 / (dLoch ^ 2) * 1 / nLoch * UL) ^ (-1) ' Variante 2  
  
    ' Abschätzung des Ligamentdurchmessers; Mittelung zwischen Lochdurchmesser und 2um  
    dLig = ((dLoch + dlig_f1 * 0.0002) / (dlig_f1 + 1))  
  
    ' Berechnung der benötigten Trommelwinkelgeschwindigkeit, um gerade kein Überschwappen zu errei  
    chen  
    w = (dpl_fit_f1 ^ 3# * 8 / (rho * d * dLig ^ 2 * Pi * llig) _  
        * (dpl_fit_f3 * 16 * UL * mu * lLoch ^ 2 / dLoch + dpl_fit_f2 * dLoch * Pi * sigma)) ^ (1 /  
    2)  
    uU = w * d / 2                        ' Umfangsgeschwindigkeit der Trommel  
  
    fGrenz = w / (2 * Pi) * (60 * Übersetzung) / Hz_Umin ' Umrechnung von Winkelgeschwindigkeit au  
    f Motorfrequenz  
  
End Function
```

Stoffeigenschaften_Modul - 1

Option Explicit

```
'-----  
' Diese Funktionen schätzen die Stoffeigenschaften Dichte, dynamische Viskosität  
' und Oberflächenspannung aufgrund der übergebenen Temperatur ab. Dazu wird eine Gerade  
' zwischen zwei bekannten Punkten verwendet.  
'  
' Aufrufe: - dynamische Viskosität [Pa*s]:   Viskositaet(Temperatur[°C])  
'          - Oberflächenspannung [N/m]:       Oberflachenspannung(Temperatur[°C])  
'          - Dichte [kg/m3]:                 Dichte(Temperatur[°C])  
'  
' benötigte Module: keine  
'  
' Autor: Simon Alkin, August 2017  
'-----
```

Function Viskositaet(ByVal T As Double) As Double

```
Dim Teta(1), eta(1)  
Teta(0) = 1256.1 ' [°C]  
eta(0) = 0.104 ' [Pa*s]  
Teta(1) = 1380 ' [°C]  
eta(1) = 0.05 ' [Pa*s]
```

```
Viskositaet = LinReg(Teta(0), eta(0), Teta(1), eta(1), T)  
'Viskositaet = 0.65145 - 4.3584 * 10 ^ (-4) * T
```

End Function

Function Oberflaechenspannung(ByVal T As Double) As Double

```
Dim Tsigma(1), sigma(1)  
Tsigma(0) = 1300 ' [°C]  
sigma(0) = 0.3926 ' [N/m]  
Tsigma(1) = 1400 ' [°C]  
sigma(1) = 0.3887 ' [N/m]
```

```
Oberflaechenspannung = LinReg(Tsigma(0), sigma(0), Tsigma(1), sigma(1), T)  
'Oberflaechenspannung = 0.4433 - 3.9 * 10 ^ (-5) * T
```

End Function

Function Dichte(ByVal T As Double) As Double

```
Dim Trho(1), rho(1)  
Trho(0) = 1200 ' [°C]  
rho(0) = 2791 ' [kg/m3]  
Trho(1) = 1400 ' [°C]  
rho(1) = 2753 ' [kg/m3]
```

```
Dichte = LinReg(Trho(0), rho(0), Trho(1), rho(1), T)  
'Dichte = 3019 - 0.19 * T
```

End Function

Function LinReg(ByVal x1 As Double, ByVal y1 As Double, ByVal x2 As Double, ByVal y2 As Double, ByVal x As Double) As Double

```
' Diese Funktion berechnet eine Geradengleichung aus zwei bekannten Punkten und  
' berechnet den unbekanntem y-Wert für den übergebenen x-Wert
```

```
Dim k As Double, d As Double  
k = (y1 - y2) / (x1 - x2)  
d = y1 - k * x1  
LinReg = k * x + d
```

End Function

Parameter_Modul - 1

Option Explicit

```
'-----  
' Deklaration der Konstanten und Parameter  
'  
' Aufruf: Modul muss sich beim aufrufenden Modul befinden,  
' dann können Variablen ganz ohne weitere Deklaration  
' verwendet werden  
'  
' benötigte Module: keine  
'  
' Autor: Simon Alkin, August 2017  
'-----  
  
' diverse Parameter  
Public Const fak1 As Double = 1.1 ' Faktor um den der Lochdurchmesser größer als Ziel  
korngroße sein soll  
Public Const Übersetzung As Double = 1.6 ' Übersetzung von Motor auf Trommeldrehzahl (i=d2/d  
l=n1/n2)  
Public Const Hz_Umin As Double = 56# ' Umrechnung von Motorfrequenz [Hz] auf Motordrehza  
hl [U/min]  
  
Public Const TTrommel As Double = 1350# ' 1Hz = Hz_Umin U/min  
Modell auf 1350°C ausgelegt ' Temperatur zur Berechnung der Stoffeigenschaften,  
Public Const FreqBereichMin As Integer = 20 ' kleinste zulässige Motorfrequenz  
Public Const FreqBereichMax As Integer = 80 ' größte zulässige Motorfrequenz  
  
' Parameter zur Berechnung der Ligamentlänge, die für die Zentrifugalkraft ausschlaggebend ist  
Public Const llig_f1 As Double = 1  
Public Const llig_f2 As Double = 1 / 56.6  
  
' Parameter zur Berechnung des Ligamentdurchmessers  
' Formel: dlig=(dLoch+dlig_f1*2E-4)/(dlig_f1+1) (Mittelung zwischen Lochdurchmesser und 2um)  
Public Const dlig_f1 As Integer = 6  
  
' Parameter des gefitteten Kräftebilanzmodells  
' Formel: dpfit=dp1_fit_f1 * ((12 / (grho * (2*Pi*Wn)^2 *Wdia*Pi)) * (dp1_fit_f2*Wholedia*Pi*gsigma + 1  
6 *dp1_fit_f3*uloch*geta*W_thick^2 /Wholedia))^(1/3)  
Public Const dp1_fit_f1 As Double = 0.55  
Public Const dp1_fit_f2 As Double = 3  
Public Const dp1_fit_f3 As Double = 0.001  
  
' Parameter des modifizierten/gefitteten Modells nach Dhirhi et al., 2016  
' Formel: dpDhirhimod2=Wdia/2*dpDhirhimod2_f1 *Re^dpDhirhimod2_f2* Oh^dpDhirhimod2_f3 *We^(dpDhirhi  
mod2_f4)  
Public Const dpDhirhimod2_f1 As Double = 11  
Public Const dpDhirhimod2_f2 As Double = 0.21  
Public Const dpDhirhimod2_f3 As Double = 0.92  
Public Const dpDhirhimod2_f4 As Double = -0.31  
  
' Grenzen für Wahl des dp-Modells  
Public Const pgrenzmin As Integer = 10  
Public Const pschleifmin As Integer = 50  
Public Const pschleifmax As Integer = 100  
Public Const pgrenzmax As Integer = 200  
  
'-----  
' Kriterien für Modellwahl:  
'  
' pgrenzmin < p < pschleifmin: Dhirhi-Modell (dpDhirhimod2)  
' pschleifmin < p < pschleifmax: Übergang Dhirhi -> Kräftebilanz  
' pschleifmax < p < pgrenzmax: Kräftebilanz-Modell (dpfit)  
' pgrenzmax < p: Übergang Kräftebilanz -> Dhirhi  
' Dhirhi-Modell (dpDhirhimod2)  
'-----  
  
' Zielbereich für Überlauf bei Trommelauslegung  
' (Zielwert orientiert sich am "pgrenzmax_Auslegung"-Wert!)  
Public Const pgrenzmax_Auslegung = 90  
Public Const pgrenzmin_Auslegung = 60  
  
' Parameter zur Leistungsberechnung der Trommelheizung  
' Formel: Pfit=Pfit_f1+(1+Wdia)^Pfit_f2+(1+Wn/1000)^Pfit_f3+(1+Gm*10)^(Pfit_f4)  
Public Const Pfit_f1 As Double = 0.0674  
Public Const Pfit_f2 As Double = 20.93  
Public Const Pfit_f3 As Double = 18.8  
Public Const Pfit_f4 As Double = -2.41  
'-----
```

ProzÜberlauf_Modul - 1

Option Explicit

```
'-----  
' Diese Funktion schätzt das Verhältnis[%] von benötigten zu vorhandenen  
' Löchern am Umfang der Trommel aufgrund der übergebenen Prozessparameter ab.  
' Bei ProzÜberlauf>100 läuft die Trommel über, bei ProzÜberlauf<100 sind die  
' Löcher nicht komplett benetzt (dieser Effekt tritt aber vorrangig bei großen  
' Löchern, also bei ProzÜberlauf<<100 auf).  
'  
' Aufruf: ProzÜberlauf(Trommeldurchmesser[m], Lochanzahl, Lochdurchmesser[m],  
'           Wandstärke[m], Massendurchsatz[kg/s], Dichte[kg/m3],  
'           Oberflächenspannung[N/m], dyn.Viskosität[Pa*s],  
'           Motorfrequenz[Hz])  
'  
' benötigte Module: Parameter_Modul  
'  
' Autor: Simon Alkin, August 2017  
'-----  
  
Function ProzÜberlauf( _  
    ByVal d As Double, _  
    ByVal nLoch As Double, _  
    ByVal dLoch As Double, _  
    ByVal lLoch As Double, _  
    ByVal m As Double, _  
    ByVal rho As Double, _  
    ByVal sigma As Double, _  
    ByVal mu As Double, _  
    ByVal Freq As Double _  
    ) As Double  
  
    ' Variablendeklaration  
    Dim w As Double, n As Double, dLig As Double, lLig As Double, nLig As Double  
    Dim a As Double, b As Double, c As Double  
    Dim uL1 As Double, UL As Double, uU As Double  
    Dim AL As Double  
    Dim Pi As Double  
    Pi = Application.WorksheetFunction.Pi  
  
    n = Freq * Hz_Umin / (60 * Übersetzung)  
    w = 2 * Pi * n ' Umrechnung von Drehzahl [U/s] auf Winkelgeschwindigkeit [rad/s]  
  
    ' Abschätzung des Ligamentdurchmessers; Mittelung zwischen Lochdurchmesser und 0.2mm  
    dLig = ((dLoch + dlig_f1 * 0.0002) / (dlig_f1 + 1#))  
  
    ' Abschätzung der Lochaustrittsgeschwindigkeit mittels Kräftebilanz  
    a = dpl_fit_f3 * 16# * mu * lLoch ^ 2# / dLoch  
    b = dpl_fit_f2 * dLoch * Pi * sigma  
  
    ' Variante 1 zur Berechnung der Ligamentlänge  
    ' llig=(llig_f1*uL)^(-1);  
    ' c=-(w^2*rho*D*dlig^2*Pi/(8)*(1/(dpl_fit_f1*llig_f1)))  
  
    ' Variante 2 zur Berechnung der Ligamentlänge  
    ' llig = (llig_f1 * llig_f2 * 1# / (dLoch ^ 2) * 1# / nLoch * UL) ^ (-1#)  
    c = -(w ^ 2# * rho * d * dLig ^ 2# * Pi / 8# * (1# / (dpl_fit_f1 ^ 3# * llig_f1 * (llig_f2 * 1  
# / (dLoch ^ 2) * 1# / nLoch))))  
  
    uL1 = (-b + (b ^ 2# - 4# * a * c) ^ (1 / 2#)) / (2# * a) ' Lösungsformel für die quadratische G  
leichung  
    'uL2=(-b-(b^2-4*a*c)^(1/2))/(2*a);  
  
    If (uL1 > 0) Then  
        UL = uL1  
    Else  
        UL = 0  
    End If  
  
    'uU = w * d / 2#  
    AL = m / (UL * rho) ' Umfangsgeschwindigkeit der Trommel  
                        ' benötigte Gesamtaustrittsfläche (Summe der Lochquersc  
hnitte)  
    nLig = 4# * AL / (dLoch ^ 2# * Pi) ' Anzahl der Ligamente, bzw. der benötigten Löcher  
    ProzÜberlauf = nLig / nLoch * 100# ' Anteil [%] der Ligamente an der Gesamtlochanzahl der  
Trommel;  
                        ' bei ProzÜberlauf>100 läuft die Trommel über  
  
End Function
```

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Buchstabe/Symbol	Bezeichnung	Einheit
\dot{V}, Q	Volumenstrom	$\frac{m^3}{s}$
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
m	(Partikel-) Masse	kg
Q	Partikelsummenverteilung	1
q	Partikeldichteverteilung	$\frac{1}{m}$
ω	Umdrehungsgeschwindigkeit	$\frac{rad}{s}$
n	Drehzahl, Anzahl	$\frac{U}{s}$
f	Frequenz	Hz
η ($, \mu$)	dynamische Viskosität	$Pa \cdot s$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
σ	Oberflächenspannung	$\frac{N}{m}$
D	Trommelaußendurchmesser	m
d	(Loch-) Durchmesser	m
r, R	(Loch-, Trommel-) Radius	m
l	Trommelwanddicke, Länge	m
A	Fläche	m^2
V	Volumen	m^3
F	Kraft	N
We	Weber-Kennzahl	1
Re	Reynolds-Kennzahl	1
Oh	Ohnesorge-Kennzahl	1
K	Strähnenanzahl	1
Z_R	Konstante zur Berechnung der Strähnenanzahl	1
ψ	Sphärizität	1
i	Übersetzung	1

Index	Bezeichnung
p	Partikel
disc	Scheibe
loch	Bohrung in Trommel
lig	Ligament, Strähne
0	Anzahlgrößenverteilung
2	Flächengrößenverteilung
3	Volumengrößenverteilung
z	Zentrifugal(-kraft)
s	Oberflächen(-kraft)
w	Widerstands(-kraft)

Abkürzung	Bezeichnung
DDF	direct droplet formation
LF	ligament formation
FF	film formation
D60	Trommelaußendurchmesser von 60 mm
36x1	Lochanzahl: 36, Lochdurchmesser: 1 mm

Abbildungsverzeichnis

2-1	Darstellung der Tropfenbildungsregime	5
2-2	Übergang der Tropfenbildungsregime in dimensionsloser Darstellung .	6
2-3	Schlackenverrundung mit Schleuderteller	7
2-4	Verrundung mit Schleuderbecher	8
2-5	Schlackenverrundung mit Schleudertrommel	8
2-6	Skizze des Tropfenabreißmechanismus	9
2-7	Ablauf des Tropfenabreißmechanismus	10
3-1	Dynamische Schlackenviskosität	15
3-2	Strukturformel Glycerin	16
3-3	Dichte: Glycerin-Wasser-Gemisch	17
3-4	Oberflächenspannung: Glycerin-Wasser-Gemisch	17
3-5	dynamische Viskosität: Glycerin-Wasser-Gemisch	18
4-1	Skizze der Produktionsanlage	19
4-2	Skizze einer Produktionstrommel	20
4-3	Skizze der Position der Wärmebildaufnahmen	22
4-4	Wärmebild Schlackenstrang	22
4-5	Temperaturprofile Schlackenstrang längs	23
4-6	Temperaturprofil Schlackenstrang quer	23
4-7	Wärmebild Trommel 347	25
4-8	Wärmebild Trommel 350	25
4-9	Skizze der Strähnenaustrittswinkel bei vollständig und unvollständig benetzten Löchern	26
4-10	Strähnenbildung bei Trommel D60, 32x2	27
4-11	Partikelfehler	28
5-1	Laboranlage	31
5-2	Auswertevorgang der Tropfenbilder	34
5-3	Nebelbild Stahltrommel	37
5-4	Nebelbild beim Trommelüberlaufen	37
5-5	Tropfengrößenauswertung für Stahltrommel D60mm, 30x1mm, l1,5mm	39
5-6	Tropfengrößenauswertung für Stahltrommel D60mm, 30x1mm, l3mm	39
5-7	Tropfengrößenauswertung für Stahltrommel D60mm, 30x0,7mm, l1,5mm	40
5-8	Tropfengrößenauswertung für Stahltrommel D60mm, 15x0,7mm, l1,5mm	40
5-9	Darstellung des Unterlaufens an einer Stahltrommel	43
5-10	Darstellung des Trommelüberlaufens an einer Stahltrommel	44

5-11	Mittiges Auftreffen des Strahls	45
5-12	Auermittiges Auftreffen des Strahls	45
6-1	Skizze der optimierten Trommelgeometrien	51
6-2	Vergleich der Produktionsproben	54
7-1	Daten aus Prozessdatenerfassung	58
7-2	Daten aus Prozessdatenerfassung für D=60mm	58
7-3	Daten aus Prozessdatenerfassung und Vorhersage durch Kräftebilanzmodell für D=60mm	61
7-4	Daten aus Prozessdatenerfassung und Vorhersage durch Spinning Disc Modell für D=60mm	63
7-5	Daten aus Prozessdatenerfassung und Vorhersage des Trommelüberlaufens für D=60 mm	65
7-6	Daten aus Prozessdatenerfassung und Vorhersage durch Gesamtmodell	67
7-7	Daten aus Prozessdatenerfassung und Vorhersage durch Gesamtmodell für D=60mm	67
8-1	Ergebnisse der Produktionsversuche	70
9-1	Trommelauslegung in Excel	74
9-2	Trommelüberprüfung in Excel	75

Tabellenverzeichnis

3-1	Übersicht der berechneten Stoffdaten der Schlackenschmelze	15
5-1	Stoffwerte Glycerin-Wasser-Gemisch bei verschiedenen Zusammen- setzungen und berechnete Verhältnisse für Trommelradius, Umdre- hungsgeschwindigkeit, Volumenstrom und Massenstrom	36

Literaturverzeichnis

- Bailer, W., 2006: *Writing ImageJ plugins—a tutorial*, Upper Austria University of Applied Sciences, Austria.
- Brenntag, 2017: *Sicherheitsdatenblatt Glycerin 99,5%*, Brenntag Austria GmbH.
- Champagne, B., Angers, R., 1980a: *Fabrication of powders by the rotating electrode process*, International Journal of Powder Metallurgy, 16(4), 359.
- Champagne, B., Angers, R., 1980b: *Size distribution of powders atomized by the rotating electrode process*, Modern Development in Powder Metallurgy, 12, 83–104.
- Champagne, B., Angers, R., 1984: *REP (Rotating Electrode Process) Atomization Mechanisms*, Powder Metall. Int., 16(3), 125–128.
- Dhirhi, R., Prasad, K., Shukla, A.K., Sarkar, S., Renganathan, T., Pushpavanam, S., Kaza, M., 2016: *Experimental study of rotating dry slag granulation unit: Operating regimes, particle size analysis and scale up*, Applied Thermal Engineering, 107, 898–906.
- Emile, P., 1970: *Method and apparatus for manufacturing small beads by centrifugal action*, uS Patent 3,499,745.
- ImageJ, 2017: *Particle Analysis using ImageJ*, Web Page, URL: https://imagej.net/Particle_Analysis, abgerufen im März 2017.
- Kashiwaya, Y., In-Nami, Y., Akiyama, T., 2010a: *Development of a rotary cylinder atomizing method of slag for the production of amorphous slag particles*, ISIJ international, 50(9), 1245–1251.
- Kashiwaya, Y., In-Nami, Y., Akiyama, T., 2010b: *Mechanism of the formation of slag particles by the rotary cylinder atomization*, ISIJ international, 50(9), 1252–1258.
- Kitamura, Y., Iwamoto, T., Takahashi, T., 1976: *Atomization of Liquids by Rotating Disks*, Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2, 471–475.
- Kitamura, Y., Takahashi, T., 1992: *Atomization of highly viscous liquids by a spinning disk*, Atomization and Sprays, 2(1).

- Liu, J., Yu, Q., Duan, W., Qin, Q., 2014: *Experimental investigation on ligament formation for molten slag granulation*, Applied thermal engineering, 73(1), 888–893.
- Liu, J., Yu, Q., Guo, Q., 2012: *Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups*, Chemical engineering science, 73, 44–50.
- Liu, J., Yu, Q., Zuo, Z., Duan, W., Han, Z., Qin, Q., Yang, F., 2016: *Experimental investigation on molten slag granulation for waste heat recovery from various metallurgical slags*, Applied Thermal Engineering, 103, 1112–1118.
- Mizuochi, T., Akiyama, T., Shimada, T., Kasai, E., Yagi, J.I., 2001: *Feasibility of rotary cup atomizer for slag granulation*, ISIJ international, 41(12), 1423–1428.
- Optris, 2016: *Datenblatt PI 640 G7 - VGA Infrarotkamera mit Zeilenkamera-Funktion*, Optris GmbH, URL: www.optris.de/downloads-infrarotkamas?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrarotkamera/datenblatt-optris-pi-640-g7.pdf.
- Priven, A., 2000: *Calculation of the viscosity of glass-forming melts: V. Binary borate systems*, Glass physics and chemistry, 26(6), 541–558.
- Prüße, U., Jahnz, U., Wittlich, P., Breford, J., Vorlop, K.D., 2002: *Bead production with JetCutting and rotating disc/nozzle technologies*, Landbauforschung Völkenrode, SH241, 1–10.
- Purwanto, H., Mizuochi, T., Akiyama, T., 2005: *Prediction of granulated slag properties produced from spinning disk atomizer by mathematical model*, Materials transactions, 46(6), 1324–1330.
- Qin, Y., Lv, X., Bai, C., Chen, P., Qiu, G., 2013: *Dry Granulation of Molten Slag using a Rotating Multi-Nozzle Cup Atomizer and Characterization of Slag Particles*, steel research international, 84(9), 852–862.
- Retsch, 2014: *Partikelanalysator CAMSIZER P4 - Partikelgrößen- und Partikelformanalyse mittels dynamischer Bildanalyse*, Retsch Technology GmbH, URL: <http://www.retsch-technology.com/downloads/brochures/>.
- Schaeffer, H.A., Langfeld, R., 2013: *Werkstoff Glas: Alter Werkstoff mit großer Zukunft*, Springer-Verlag.

- Shaw, H., 1972: *Viscosities of magmatic silicate liquids; an empirical method of prediction*, American Journal of Science, 272(9), 870–893.
- Sony, 2017: *Technische Daten zur Kamera Sony DSC-RX10M3*, Sony Corporation, URL: <https://www.sony.de/electronics/support/compact-cameras-dscrx-series/dsc-rx10m3/specifications>, abgerufen im September 2017.
- Takamura, K., Fischer, H., Morrow, N.R., 2012: *Physical properties of aqueous glycerol solutions*, Journal of Petroleum Science and Engineering, 98, 50–60.
- Wang, D., Ling, X., Peng, H., Cui, Z., Yang, X., 2016: *Experimental investigation of ligament formation dynamics of thin viscous liquid film at spinning disk edge*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 55(34), 9267–9275.
- Wozniak, G., 2013: *Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte*, Springer-Verlag.
- Wu, J.J., Wang, H., Zhu, X., Liao, Q., Ding, B., 2015: *Centrifugal granulation performance of liquid with various viscosities for heat recovery of blast furnace slag*, Applied Thermal Engineering, 89, 494–504.
- Wu, J.J., Wang, H., Zhu, X., Liao, Q., Li, K., 2017: *Cold experiment of slag centrifugal granulation by rotary atomizer: Effect of atomizer configuration*, Applied Thermal Engineering, 111, 1557–1564.
- Xie, J., Zhao, Y., Dunkley, J., 2004: *Effects of processing conditions on powder particle size and morphology in centrifugal atomisation of tin*, Powder metallurgy, 47(2), 168–172.
- Zhao, Y., 2006: *Considerations in designing a centrifugal atomiser for metal powder production*, Materials & design, 27(9), 745–750.
- Zlokarnik, M., 2005: *Scale-up: Modellübertragung in der Verfahrenstechnik*, John Wiley & Sons.