

Beitrag zur Optimierung von Querstrom-Drehkorbsichtern

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Christian Streicher

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der montanistischen Wissenschaften an
der Montanuniversität Leoben

1. Begutachter. Univ.-Prof. Dr. mont. Helmut Flachberger
2. Begutachter: Univ.-Prof. Dr. techn. Harald Raupenstrauch



in Zusammenarbeit mit

Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH

Sudhoferweg 110-112, 59269 Beckum

Deutschland



Danksagung

Ich möchte besonders Herrn Professor Flachberger danken, dass er mir die Durchführung dieser Dissertationsarbeit ermöglicht hat. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Professor Raupenstrauch bedanken, der als zweiter Betreuer dieser Arbeit gewirkt hat.

Besonderer Dank gebührt auch meiner Familie und meinen Freunden. Sie haben mich in dieser äußerst turbulenten Zeit immer unterstützt und mir den Rückhalt gegeben, der notwendig war, um meine Dissertationsarbeit fertigstellen zu können.

Bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Jürgen Roth. Ohne seine Ratschläge und sein unterstützendes Wirken wären die Hürden, welche ich im Zuge dieses Projektes immer wieder antraf, noch schwerer zu bewältigen gewesen.

Mein Dank gilt insbesondere auch der Firma Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH und deren Geschäftsführung. Sie stellte mir sowohl die herausfordernde Thematik als auch das entsprechende Equipment zur Verfügung und hat dadurch erst die grundlegenden Voraussetzungen geschaffen, überhaupt ein Dissertationsprojekt in Angriff nehmen zu können.

Zu guter Letzt möchte ich auch den Kollegen am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung und den Kollegen bei CPB danken. Ohne ihre Unterstützung bei der Durchführung der Versuche und der Laborarbeiten, sowie auch weit darüber hinaus, wäre ein erfolgreicher Abschluss der Arbeiten nicht möglich gewesen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Beckum im November 2013

Dipl.-Ing. Christian Streicher

Kurzfassung

Der Klassierprozess in Mahlkreisläufen bietet einen guten Ansatzpunkt zu deren Optimierung. Obwohl der größte Anteil der für die Mahlung aufgewendeten Energie über die Mühle eingetragen wird, trägt der Sichtprozess in trockenen Mahlkreisläufen entscheidend zu deren Effizienz bei. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im Speziellen mit Querstrom-Drehkorbsichtern. Um den Sichtprozess besser verstehen zu können, wurde eine ausführliche Parameterstudie auf einer Anlage im Technikumsmaßstab durchgeführt und die erhaltenen Daten einer intensiven Auswertung zugeführt. Dafür wurden Kennfelder erstellt und Trennkurven zur Bestimmung der Sichteffizienz ermittelt. Um diese Versuchsarbeiten zu ermöglichen, war es notwendig, umfangreiche Adaptionen an einer vorhandenen Technikumsanlage vorzunehmen.

Zur vertiefenden Charakterisierung der Versuchsanlage wurden theoretische Trennschnittberechnungen mit Parametern der Partikelgrößenverteilungen der Feinprodukte aus den Sichtversuchen korreliert. Diese Korrelationsmethode wurde auch auf Ergebnisse von Anlagen im industriellen Maßstab angewandt und die erhaltenen Daten einem Vergleich zugeführt. Zusätzlich wurden Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt, deren Ausgangspunkt in Berechnungen zur Charakterisierung des Strömungsfeldes der Technikumsanlage lag. Darauf aufbauend wurden partikelbeladene Strömungen simuliert, um deren Ergebnisse im Anschluss mit Ergebnissen der Versuchsreihen abzugleichen. Versuche zum Einfluss der Aufgabestelle des zu sichtenden Materials in den Sichtraum bildeten den Abschlusspunkt der Untersuchungen.

Abstract

The classification step in grinding circuits presents itself as an appropriate starting point for optimization. Although the biggest part of the energy used for grinding is transferred into the circuit through the mill, the air classification in dry grinding circuits crucially contributes to their efficiency. The thesis at hand puts the focus on cross-flow rotating cage separators. To gain a better understanding for the separation process, an extensive parameter study using a pilot scale plant was conducted and the obtained data intensively evaluated and used for the establishment of a performance map depicting the separator efficiency. To be able to conduct the described research activities, substantial modifications of the pilot plant had to be made.

To further characterize the pilot plant, values for the theoretical cut-size were calculated and correlated to characteristic values of the particle size distribution of the fine products of the classification process. This was also done for values obtained on industrial sized separators and the results were compared. Additionally simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) were conducted, whereas calculations characterizing the flow field of the pilot plant marked the starting point. Subsequently particle laden flows were simulated and the results compared with results obtained through test work on the pilot plant. As a conclusion to the test work the influence of the feed point on the classification result was tested.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	1
2	Zusammenfassung.....	3
3	Stand der Technik.....	9
4	Theoretische Grundlagen.....	15
4.1	Sichtung.....	15
4.2	Berechnung der Trenngrenze.....	18
4.3	Herausforderung Scale-up.....	20
4.4	Dispergierung.....	22
4.5	Stoßfreie Anströmung des Drehkorbes.....	23
5	Aufbau der Versuchsanlage im Technikumsmaßstab.....	25
6	Versuchsdurchführung und Analysemethoden.....	31
6.1	Sichtversuche.....	31
6.1.1	Prinzipielle Durchführung.....	31
6.1.2	Fehlerbetrachtung.....	32
6.2	Laboranalysen.....	35
6.3	Bewertung der Sichterergebnisse.....	35
6.3.1	Masseausbringen.....	36
6.3.2	Ausgleichsrechnung Partikelgrößenverteilung.....	37
6.3.3	Trennkurve.....	42
6.3.4	Vorhergehende Untersuchungen unter Einsatz einer ähnlichen Versuchsanlage.....	45
7	Ergebnisse.....	46
7.1	Parameterkennfelder.....	46
7.1.1	Einfluss der Sichtluftbeladung.....	46
7.1.2	Kennfelder der Trennkurvenparameter.....	48
7.1.3	Kennfelder der Werte der Partikelgröße und der spezifischen Oberfläche..	52
7.1.4	Betrachtung der Masseausbringenswerte des Feingutes.....	58

7.2	CFD-Simulationen	60
7.3	Einfluss der Aufgabestellen	67
7.4	Vergleich mit dem industriellen Maßstab	69
8	Diskussion und Ausblick	72
9	Anhang	77
9.1	Formelzeichen	77
9.1.1	Lateinische Buchstaben	77
9.1.2	Griechische Buchstaben	78
9.2	Literaturverzeichnis	79
9.3	Abbildungsverzeichnis	83
9.4	Tabellenverzeichnis	85
9.5	Laborequipment	85
9.6	Messdaten	86
9.6.1	Rohdatenübersicht	86
9.6.2	Partikelgrößenverteilungen	92

1 Aufgabenstellung

Mahlkreisläufe sind in ihrer grundsätzlichen Funktionsweise einfach beschaffen, bei näherer Betrachtung stellen diese jedoch ein äußerst komplexes System aneinander gereihter prozesstechnischer Abläufe dar. In diesen Kreisläufen wirken eine Vielzahl von Parametern aufeinander ein und hängen damit voneinander ab. Die Komplexität des Gesamtsystems resultiert aus diesen Abhängigkeiten und bestimmt sowohl den Betrieb als auch die Ansatzpunkte für Optimierungen solcher Anlagen. Ein Hauptziel solcher Optimierungen ist einerseits die Herstellung von qualitativ hochwertigen und damit marktfähigen Mahlprodukten für die weitere Verwendung. Andererseits wird in der heutigen Zeit der Optimierung des Mahlprozesses hinsichtlich Energieeffizienz und Ressourcenschonung eine ebenso hohe Bedeutung beigemessen.

Die Klassierung bietet sich unter diesen Gesichtspunkten besonders als Ansatzpunkt an. In trocken betriebenen Mahlanlagen wird der Klassierschritt beinahe ausschließlich mit Sichern realisiert, welche aufgrund der Prozessbeschaffenheit hervorragende Voraussetzungen für Optimierungen des Mahlkreislaufes bieten und somit einen großen Beitrag zur Effizienz des gesamten Mahlprozesses leisten können.

Das Potential zur Optimierung von Sichtprozessen resultiert aus der Vielzahl an zur Verfügung stehenden Parametern, die sowohl die Auslegung und Geometrie des Aggregates, als auch den gewählten Betriebspunkt betreffen. Somit ergibt sich ein breites Spektrum an Möglichkeiten, diesen Teilprozess möglichst effizient zu gestalten und Optimierungspotentiale auszuloten. Besonders die Anpassung der Parameter hinsichtlich der Betriebspunkte lässt sich am Sichter deutlich einfacher realisieren als auf Seiten der Mühle.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit diesen Optimierungspotentialen und setzt dabei einen klaren Fokus auf die Evaluierung der Einflüsse der Betriebsparameter des Sichters auf unterschiedliche Aspekte des Sichterfolges. Die Implikationen von Änderungen der Geometrie und der konstruktiven Auslegung sollen jedoch ebenfalls, wenn auch untergeordnet, beurteilt werden. Zur Erreichung dieser Ziele wurden im Rahmen einer dreijährigen Forschungskoooperation zwischen der Firma Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH mit Sitz in Beckum und dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben umfangreiche Versuchsreihen auf einer Sichteranlage im Technikumsmaßstab durchgeführt und einer umfassenden Auswertung

unterzogen. An der bereits vorhandenen Technikumsanlage wurden dazu umfangreiche Umbauarbeiten durchgeführt, um die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Im Zuge der Auswertung wurden die zur Anwendung kommenden Methoden der aufbereitungstechnischen Erfolgsrechnung und –darstellung einer kritischen Prüfung unterzogen.

Einen weiteren wichtigen Fokus stellte die Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten und –grenzen von solcherart ermittelten Technikumsdaten für ein Scale-up dar. Dazu wurden Betrachtungen zur Übertragung der auf Anlagen im Technikumsmaßstab generierten Ergebnisse hin zu in der Industrie eingesetzten Baugrößen angestellt und Ansätze zur Lösung dieser Herausforderung erarbeitet. Begleitende Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) rundeten die Untersuchungen ab. Auch diese Simulationsergebnisse wurden den Ergebnissen jener Versuche gegenüber gestellt, welche auf der Technikumsanlage durchgeführt wurden.

2 Zusammenfassung

Bei dem in dieser Dissertation im Fokus stehenden Aggregat handelt es sich um einen Querstrom-Drehkorbsichter der Baureihe QDK der Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH mit Sitz in Beckum/Deutschland (kurz: CPB). Bei diesem in Abbildung 2-1 dargestellten Sichter wird das Aufgabegut von oben über zwei Aufgabestellen dem fest mit dem Drehkorb verbundenen Dispergierteller zugeführt. Dieser verteilt das Material an die Gehäusewandung, von wo es hinab in den Sichtraum fällt. Dort wird es von der über ein Spiralgehäuse und einen Leitschaufelkranz quer zur Bewegungsrichtung des Materials eintretenden Sichtluft durchströmt. Das Grobgut wird von der Schwerkraft nach unten ausgetragen. Das Feingut wird von der Sichtluft durch den rotierenden Korb mitgenommen und anschließend mittels Zyklon- oder Filterabscheidung aus dem Luftstrom abgetrennt.

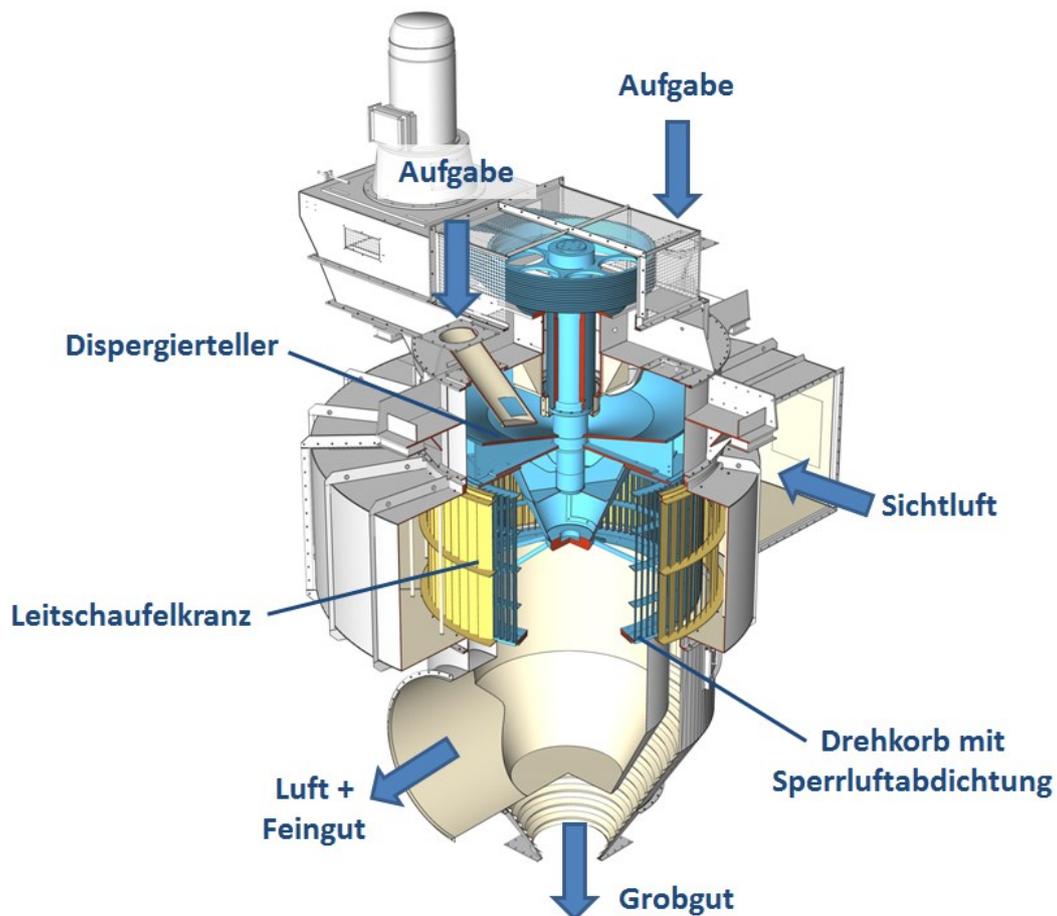


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines Querstrom-Drehkorbsichters [4]

Hauptziel dieser Arbeit war die Charakterisierung des Sichtverhaltens von Querstrom-Drehkorbsichtern über ein weites Parameterkennfeld. Dies wurde über intensive Versuchstätigkeit auf einer Sichteranlage im Technikumsmaßstab realisiert, wobei die Versuchsdaten der einzelnen Betriebspunkte umfassend analysiert wurden. Um eine wissenschaftlich fundierte Versuchsdurchführung zu ermöglichen, waren in deren Vorfeld umfangreiche Arbeiten zur Modifizierung einer bereits vorhandenen Versuchsanlage im Technikum von CPB notwendig. Über langwierige Vorversuchsreihen wurde schlussendlich eine Anlagenkonfiguration durch großzügigen Austausch von dafür als untauglich identifizierten Anlagenteilen hergestellt, welche eine reproduzierbare Datenermittlung und eine vertrauenswürdige Beurteilung der Sichterergebnisse sicherstellte. Die Weiterentwicklung und Inbetriebnahme einer Technikumsanlage dieser Baugröße, die den vorgenannten Anforderungen und angestrebten Zielen nunmehr genügt, stellt einen essentiellen Teil der hier vorgestellten Dissertation und die wesentliche Basis für die ermittelten, in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellten Daten samt der daraus gezogenen Schlüsse dar. Aus Sicht des Unterfertigten ist daraus in Kenntnis der gesichteten Literatur auch ein wissenschaftlicher Neuheitswert ableitbar.

Den Startpunkt zur Erstellung der Kennfelder stellte die Charakterisierung des Einflusses der Feststoffbeladung der Sichtluft dar. Im Falle der Variation der Feststoffbeladung konnte im betrachteten Bereich kein bedeutender Einfluss auf die Sichteffizienz festgestellt werden. Die Grenzbeladung, ab welcher ein starker Einfluss zu erwarten wäre, konnte apparatebedingt nicht erreicht werden.

Besonderes Augenmerk hinsichtlich der Sichteffizienz wurde bei allen Analysen auf die Bypass-Werte und die Imperfektion gelegt, welche beide wichtige Parameter der Trennkurve nach Tromp darstellen.

Das Ergebnis der weiteren umfassenden Bewertung der Sichteffizienz stellt sich z.B. als das in Abbildung 2-2 ausgewiesene Kennfeld der Bypass-Werte dar und gibt Aufschluss über den Bereich der optimalen Betriebsbedingungen für das betrachtete Aggregat. Dieser Bereich ist hier durch die in den dunkleren Grünnuancen gehaltenen Flächen gekennzeichnet.

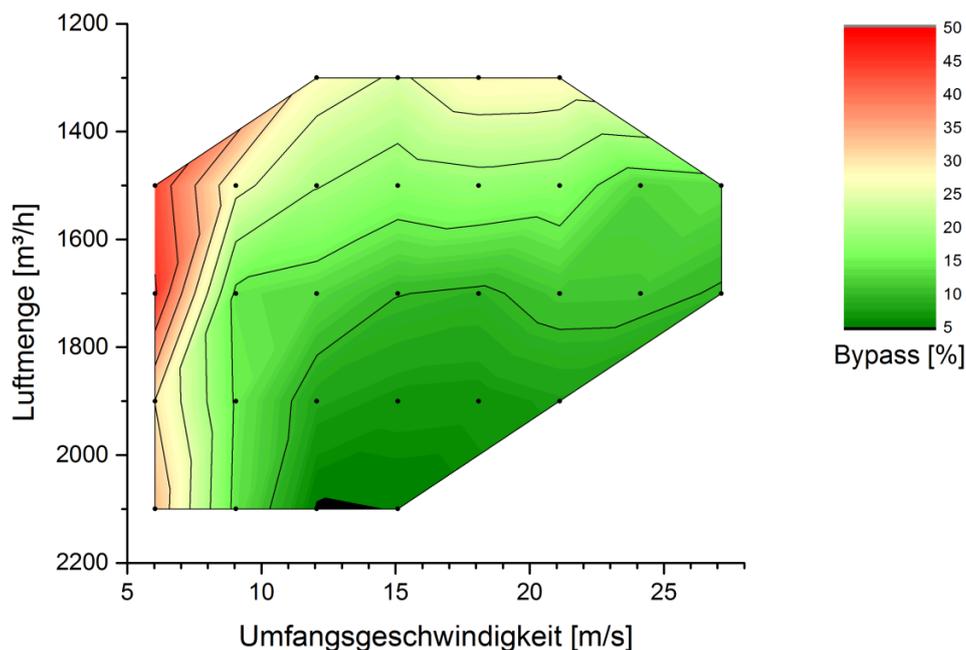


Abbildung 2-2: Kennfeld der Bypass-Werte

Eine weitere wichtige Auswertemethode stellt die Analyse der Partikelgrößenverteilungen der Feingutprodukte und der daraus ableitbaren Kennwerte dar. Im Zuge dieser Auswertung wurden besonders die zugehörigen Partikelgrößen zu entsprechenden Durchgangswerten, wie z.B. der x_{98} -Wert der Feingutverteilung, herangezogen und in Relation zur berechneten theoretischen Trenngrenze gesetzt, wodurch mit den Ergebnissen der Technikumsversuche eine eindeutige Korrelation zwischen den x_{85} -Werten der Feingutverteilungen und diesem berechneten Wert gezeigt werden konnte. In einer darauf folgenden Auswertung der Verhältnisse in Sichern größerer Baureihen wurde festgestellt, dass sich diese Korrelation bei Sichern im industriellen Maßstab hin zu den x_{98} -Werten der Feingutkurven verschiebt. Dieses Ergebnis liefert auch einen wichtigen Beitrag hinsichtlich einer Lösung der, in dieser Arbeit ebenfalls behandelten, Herausforderung beim Scale-up von Sichtaggregaten. Für die Trennschnittlage nach Tromp wurde die gleiche Vorgehensweise gewählt, jedoch konnte keine entsprechende Korrelation festgestellt werden. Als wichtiger Einfluss auf die gefundene Korrelation hat sich hier die Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes gezeigt, welche auch durch das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit des Drehkorbes zur radialen Geschwindigkeit der Sichtluft charakterisiert wird. Stellt man nun die theoretische Trenngrenze sowie die x_{85} -Werte abhängig von diesem Verhältnis dar (Abbildung 2-3), so sieht man schön die

Korrelation der Werte, sowie die Abweichungen bei Unterschreiten eines gewissen Geschwindigkeitsverhältnisses.

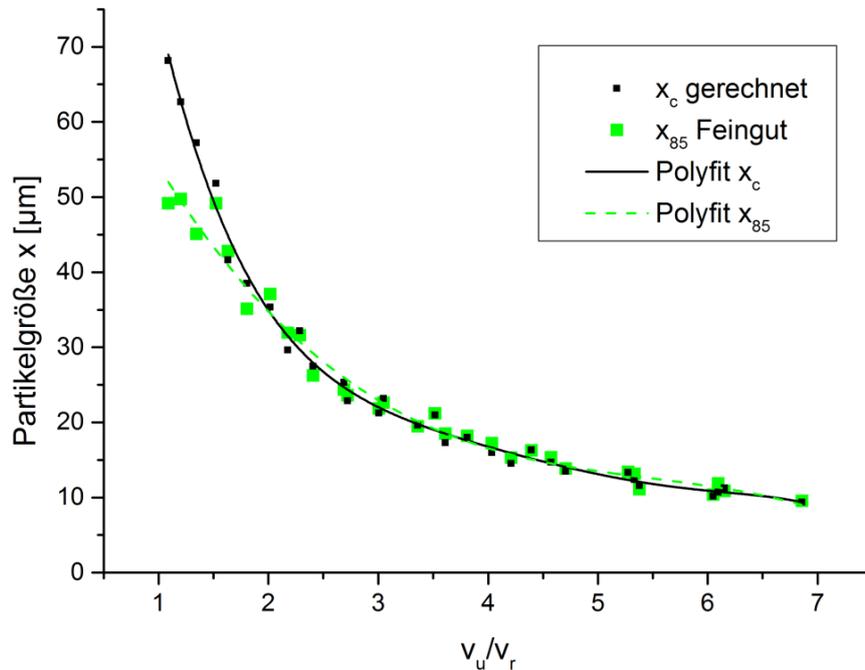


Abbildung 2-3: Vergleich der berechneten Trenngrenze mit Feingutwerten

Auch hinsichtlich der Masseausbringenswerte der Sichtprodukte konnte ein Einfluss dieses Geschwindigkeitsverhältnisses festgestellt werden, wobei dies besonders die Differenz zwischen gewogenen und errechneten Werten betrifft. Es konnte gezeigt werden, dass die errechneten Werte in einem sinnvollen Bereich für den Betriebspunkt die ausgebrachte Feingutmasse überschätzen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden auch CFD-Simulationen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde das Strömungsfeld modelliert, um darauf aufbauend partikelbeladene Strömungen simulieren zu können. Ziel dieser Vorgehensweise war es, die Simulationsergebnisse ebenfalls in Form einer Trennkurve darzustellen, und das Simulationsergebnis mit dem in den Technikumsversuchen erlangten Ergebnissen zu vergleichen. Abbildung 2-4 stellt diesen Vergleich dar. Es ist zu erkennen, dass in einem Bereich oberhalb von $10 \mu\text{m}$ eine gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Bei feineren Partikelgrößen war das Simulationsmodell jedoch nicht in der Lage, die

Vorgänge während des realen Sichtprozesses entsprechend nachzubilden, was vor allem mit der Vernachlässigung von Partikel-Partikel-Interaktionen zu begründen ist.

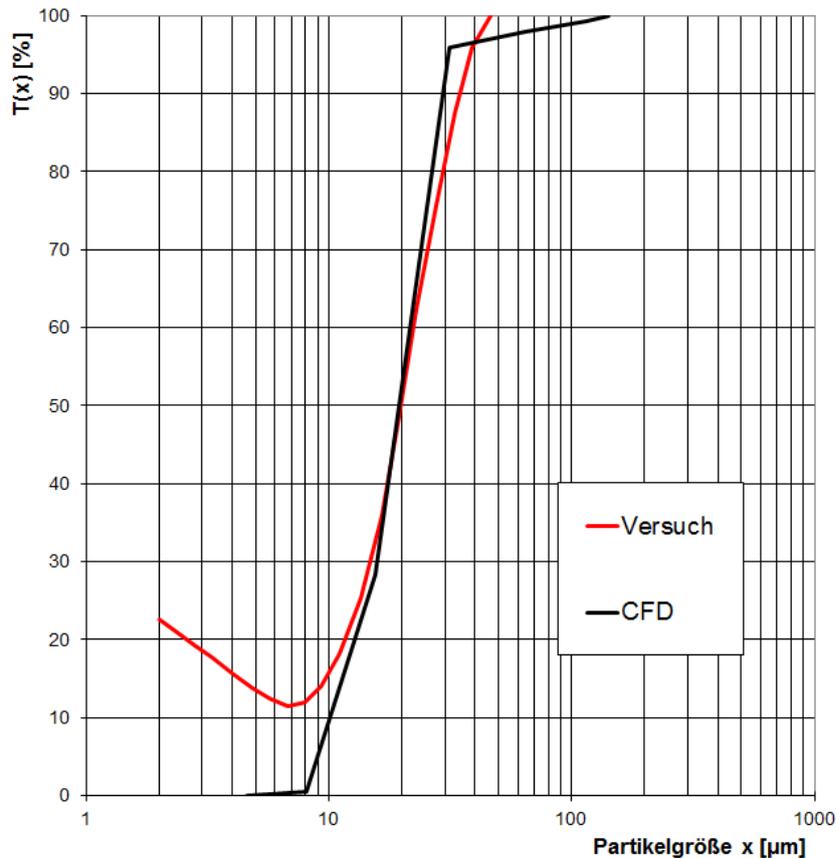


Abbildung 2-4: Vergleich der Trennkurven Versuch - Simulation

Ein weiterer Punkt, welcher behandelt wurde, ist der Einfluss der Materialaufgabe auf das Sichtverhalten. In früheren Untersuchungen zum Dispergierverhalten des Streutellers konnten dazu bereits erste Erkenntnisse gewonnen werden. Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen war es nun, diese Ergebnisse auf den kompletten Sichtprozess zu übertragen. Dafür wurde in einer Versuchsreihe an den zwei vorhandenen Aufgabepunkten getrennt Material zugeführt. Die in Abbildung 2-5 dargestellten Auswertungen zeigen, dass die Wahl des Aufgabepunktes einen deutlichen Einfluss auf den Sichtvorgang hat. Zieht man die Auswertung des simulierten Strömungsfeldes hinzu, so sieht man, dass die Kombination aus den gegebenen Strömungsverhältnissen und der Position der Aufgabepunkte zu den erzielten Ergebnissen führt. Es konnte somit die Wichtigkeit einer Optimierung der Materialaufgabe in Zusammenschau mit einer entsprechenden Strömungsoptimierung gezeigt werden.

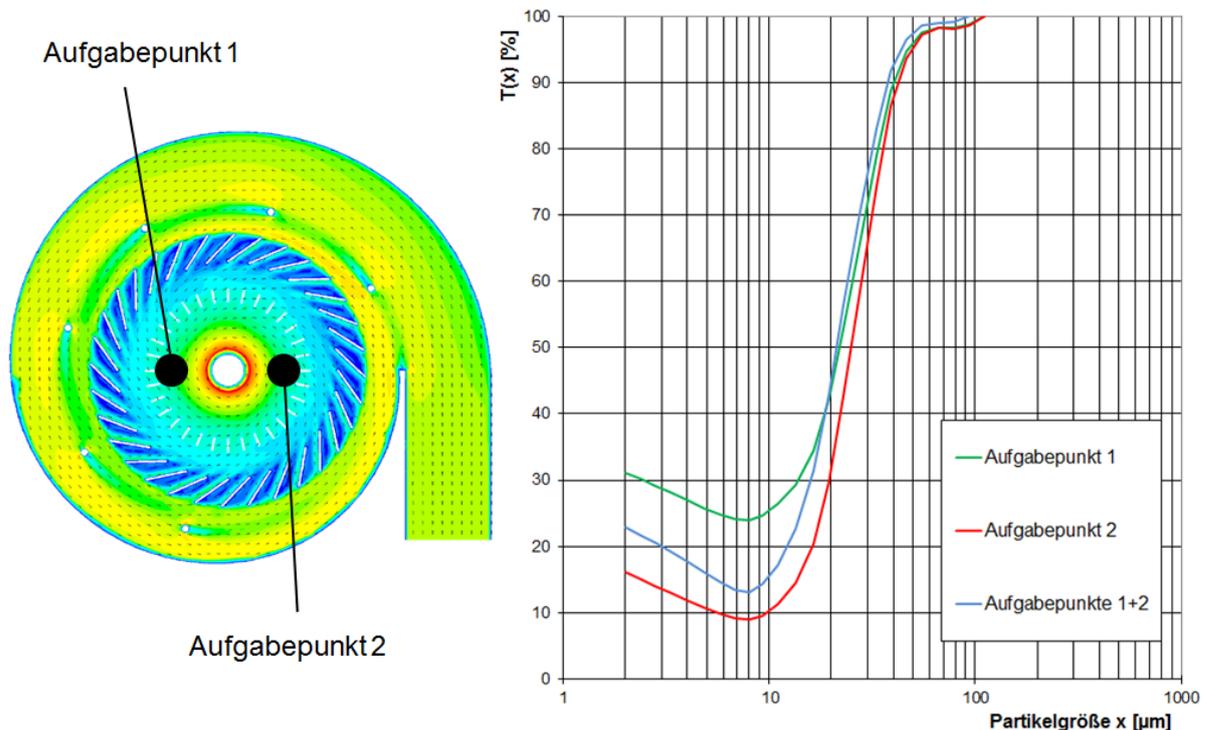


Abbildung 2-5: Darstellung des Einflusses der Aufgabestelle

Ein weiterer Neuheitswert gründet in den vorgestellten Ergebnissen, vor allem in der verbesserten Aussagekraft der vorliegenden Kennfelddaten, was aus Sicht des Verfassers nur mittels umfangreicher Anlagenadaptierungen und erheblichem Untersuchungsaufwand zu bewerkstelligen war. Von entscheidender Wichtigkeit für die Beurteilung des Verhaltens des Siebers war in diesem Zusammenhang die möglichst vollständige Eliminierung der Nebeneinflüsse von, die Sieheffizienz beeinflussenden Anlagenkomponenten (z.B. Zyklon, Radiallüfter), da nur unter dieser Voraussetzung die Verfolgung der Änderungen der Prozessdaten und die vergleichende Betrachtung ebenderselben möglich wurde. Die dadurch gewonnene Einsicht in das Sichtverhalten konnte besonders in Zusammenschau mit Erkenntnissen aus den Strömungssimulationen einen deutlichen Fortschritt im Verständnis der komplexen Vorgänge im Zusammenspiel aller am Sichtprozess beteiligten Teilprozesse bringen.

3 Stand der Technik

Da sich diese Arbeit fast ausschließlich mit Querstrom-Drehkorbsichtern auseinandersetzt, welche ihre hauptsächliche Anwendung in den Mahlprozessen der Zementindustrie finden, soll hier in aller Kürze die Entwicklungsgeschichte dieser Aggregate dargestellt, sowie eine genaue Funktionsbeschreibung der aktuell eingesetzten Sichtergeneration gegeben werden.

Die dynamischen Querstrom-Drehkorbsichter der dritten Generation, welche sich heutzutage im Einsatz befinden, haben ihren Ursprung in den Umluftsichtern der ersten Generation. Solche Aggregate – wie z.B. der Heyd-Sichter (Abbildung 3-1) der Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH mit Sitz in Beckum (kurz: CPB) – realisierten den Trennprozess, die Erzeugung des Sichtluftstromes sowie die Abscheidung des Feingutes aus der Sichtluft in einem Aggregat.

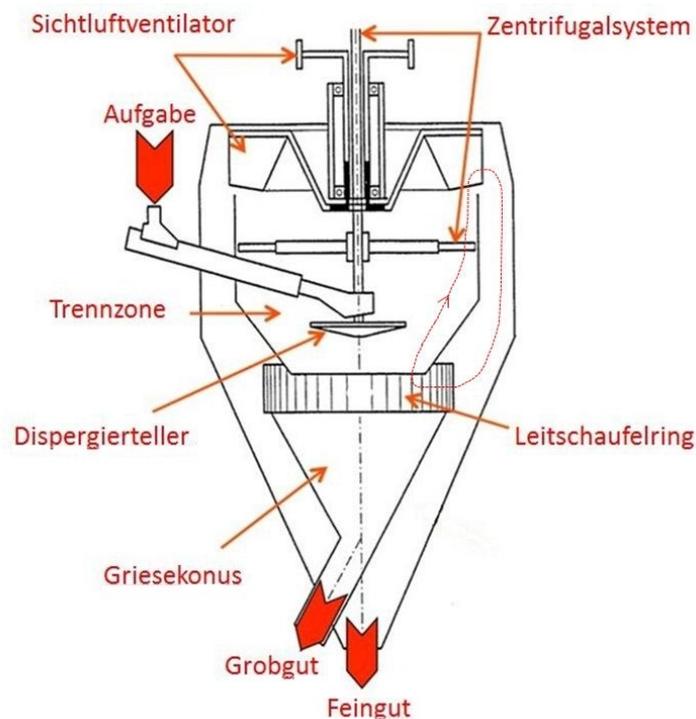


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Sichters der 1. Generation [4]

Das Aufgabematerial wird mittels Dispergierteller direkt in die Sichtzone eingebracht. Unterhalb des Zentrifugalsystems findet im aufsteigenden Sichtluftstrom eine statische Vorseparation statt, bevor am Gegenflügelrad des Zentrifugalsystems die eigentliche

Sichtung stattfindet. Das Grobgut fällt danach hinab in den Griesekonus, wobei das Feingut mit dem Luftstrom durch das Lüfterrad des integrierten Sichtluftventilators in die außen liegende Abscheidezone befördert wird. Durch die hier herrschende Wirbelströmung und die Umlenkung der Sichtluft durch den Leitschaufelring zurück in den Sichterraum wird das Feingut aus dem Sichtluftstrom abgeschieden und ebenfalls nach unten ausgetragen. Diese Abscheidung weist jedoch keine hohe Güte auf, was zu einem hohen Zirkulationsfaktor des Feinmaterials und dadurch zu einem hohen Bypass-Wert führt. Die Art der Ausführung des Zentrifugalsystems führt außerdem zu einem hohen Anteil an Überkorn im Feingut. Insgesamt weisen diese Sichter einen hohen Bypass und eine geringe Trennschärfe auf. Ein weiterer Nachteil liegt im hohen Verschleiß und der ineffizienten Arbeitsweise des Lüfterrades. Bei der ursprünglichen Ausführung dieser Aggregate wurden das Lüfterrad und das Zentrifugalsystem über dieselbe Welle angetrieben. In der abgebildeten späteren Ausführung wird es durch eine Hohlwelle ermöglicht, Lüfterrad und Zentrifugalsystem separat anzutreiben. Dadurch ist eine bessere Anpassung der Trennschneiteinstellung und der Betriebsparameter möglich. Die Effizienz der Sichtung lässt sich dadurch jedoch nur geringfügig verbessern. Sichter dieser Bauweise werden heute noch für gröbere Trennschnitte und Sichtungsaufgaben mit weniger hohen Ansprüchen an die Trennschärfe eingesetzt. Die Vorteile liegen hierbei in der kompakten Bauweise des Sichterkreislafes aufgrund der Integration der Feingutabscheidung und des Sichtertventilators.

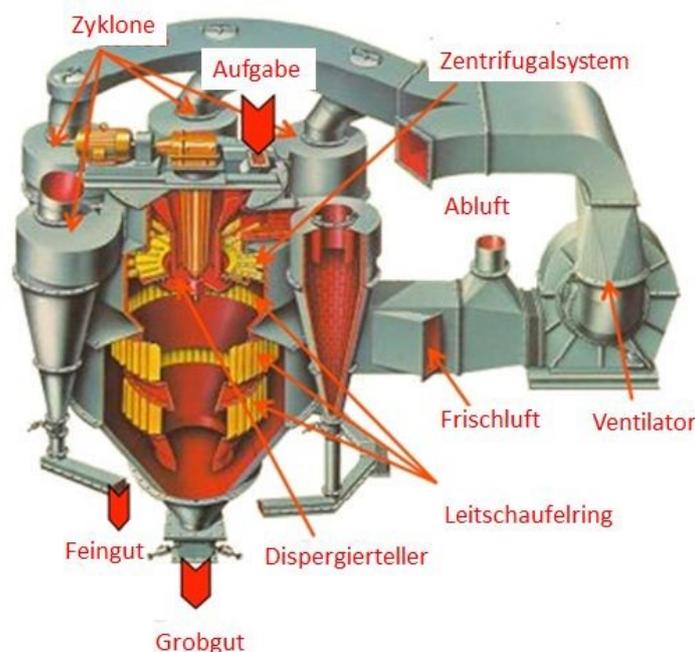


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines Sichters der 2. Generation [57]

Bei dem in Abbildung 3-2 dargestellten Zyklon-Umluft-Sichter der Firma KHD der zweiten Generation wird die Abscheidung des Feingutes mittels direkt um das Sichtergehäuse angeordneten Zyklonen bewerkstelligt. Diese weisen einen deutlich höheren Abscheidegrad als die interne Abscheidung der Sichter der ersten Generation auf. Dadurch wird der Umlauf des Feingutes im Sichterkreislauf deutlich reduziert und die Sichteffizienz erhöht. Der Sichtprozess an sich folgt jedoch dem Prinzip der ersten Generation. Die Sichtluftherzeugung wird von einem externen Ventilator übernommen, was ebenso zu einer Steigerung der Effizienz führt. Durch eine niedrigere Feingutzirkulation ist dieser auch einem geringeren Verschleiß ausgesetzt. Weiters besteht die Möglichkeit, durch Zufuhr von Frischluft heißes Sichtgut zu kühlen.

Die Querstrom-Drehkorbsichter der aktuell dritten Generation sei hier am Beispiel eines Sichters der Baureihe QDK von CPB erklärt (Abbildung 3-3). Die Materialaufgabe erfolgt von oben über 2 Aufgabestutzen auf den Dispergierteller. Dieser ist fest mit dem Drehkorb verbunden und schleudert das Aufgabegut an die Gehäusewandung, wo es zu einer gewissen Desagglomerierung kommt. Von hier fällt das Aufgabegut hinab in den Sichtraum. Die Sichtluft tritt peripher am Einlass des Spiralgehäuses in das Sichtaggregat ein und wird durch dessen Verjüngung und den Leitschaukelkranz möglichst gleichmäßig in den Sichtraum geleitet. Im Sichtraum wird nun das quer zur Strömungsrichtung in den Sichtraum eintretende Gut von der Sichtluft durchlüftet. Im Sichtraum wird hierbei eine grobe statische Vorsichtung erzielt und die größten Partikel abgeschieden. Feinere Partikel werden dabei in Richtung des Korbes befördert, welcher gleichsinnig mit der Wirbelströmung im Sichtraum rotiert und an welchem der eigentliche dynamische Sichtprozess stattfindet. Das Feingut wird mit der Sichtluft durch den Korb gefördert, nach unten ausgetragen und mit Hilfe von extern angeordneten Zyklonen oder Filtern aus dem Luftstrom abgeschieden (Abbildung 3-4). Das Grobgut wird aufgrund der Schwerkraft nach unten aus dem Sichtraum ausgetragen. Um zu verhindern, dass Überkorn durch den Spalt zwischen dem feststehenden Feingutrohr und dem rotierenden Drehkorb und somit auf die Feingutseite des Sichters gelangt, wird eine einstellbare Abdichtung an dieser Stelle mittels Sperrluft realisiert.

Abbildung 3-5 zeigt die Anordnung eines Sichters der Baureihe QDK im Fließschema einer gesamten Mahlanlage mit Filterabscheidung, welche gegenüber der Abscheidung mittels Zyklonen bessere Möglichkeiten zur Kühlung im Sichtprozess bietet und auch bei höheren Produktfeinheiten einen sehr hohen Abscheidegrad aufweist. Die Anordnung in dieser Form ist typisch für Mahlkreisläufe in der Zementindustrie.

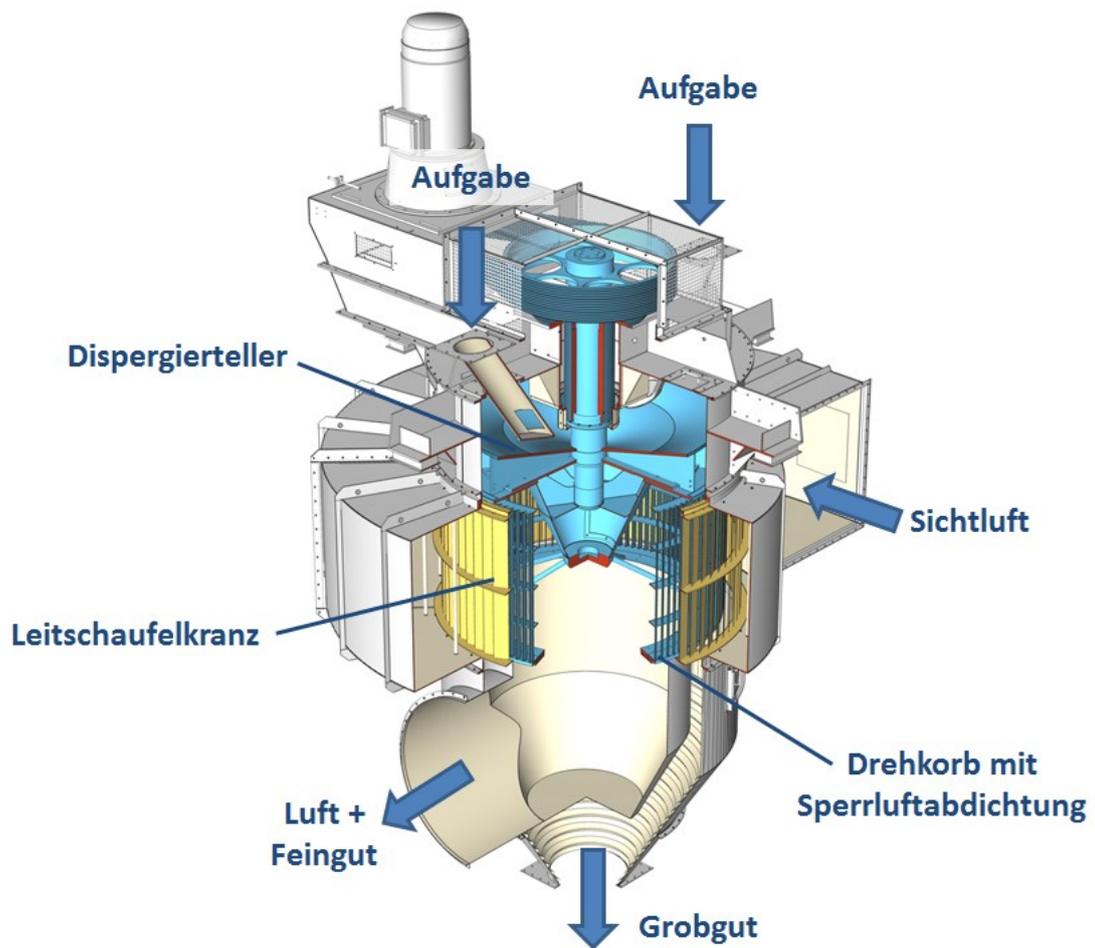


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Siebers der 3. Generation (QDK) [4]

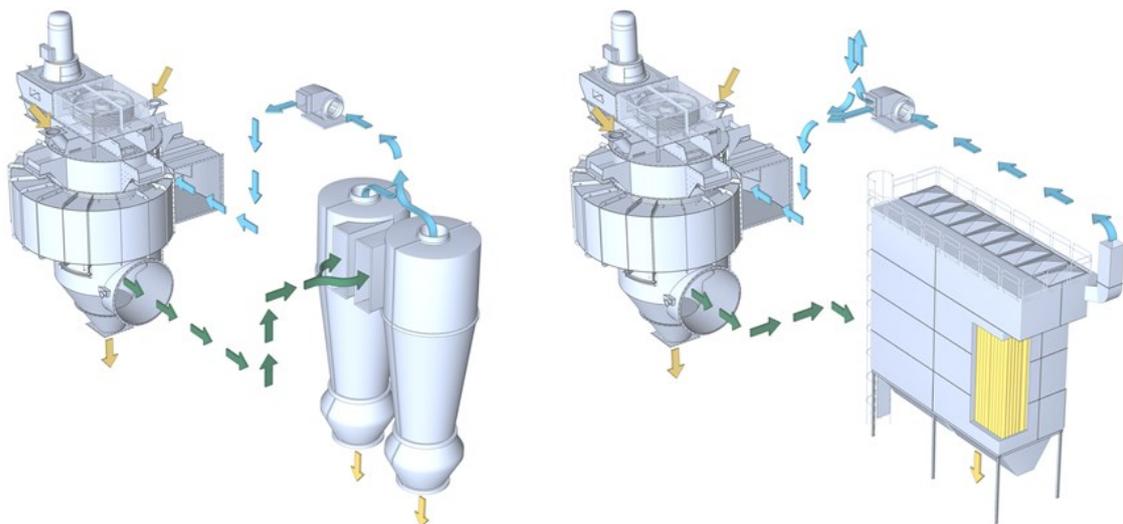


Abbildung 3-4: Anordnung mit Zyklonen (links) und Filter (rechts) [4]

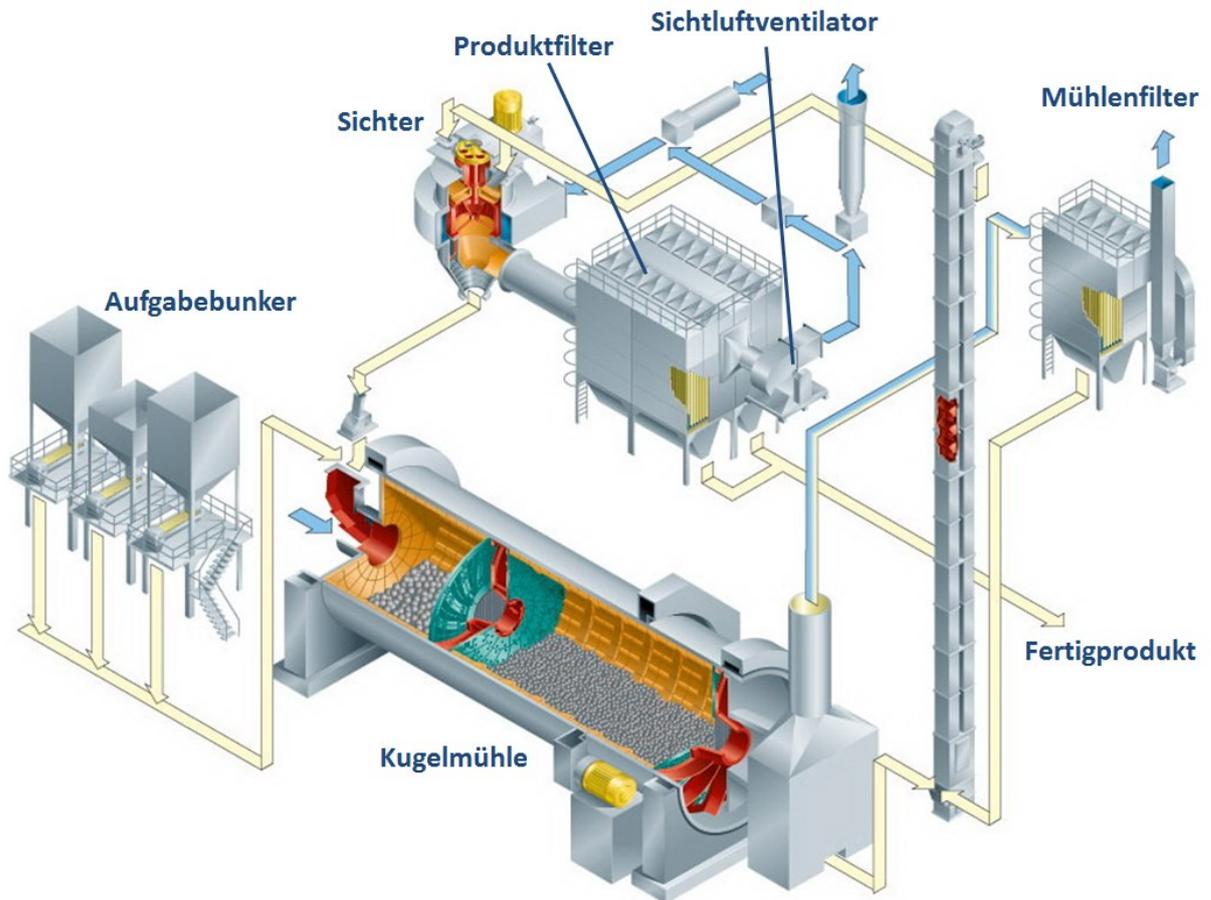


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung eines Mahlkreislaufes mit Filterabscheidung [4]

Eine Variation der Querstrom-Drehkorbsichter stellen Sichter dar, welche die Sichtluft und das Feingut nach oben hin abführen, wie z.B. der in Abbildung 3-6 dargestellte Sichter der Baureihe TGS von CPB. Durch den Verlauf der Rohgasleitung nach oben wird der Dispergierteller auf einen schmalen Dispergierring reduziert. Der größte Vorteil dieser konstruktiven Variante liegt in der Möglichkeit einer sehr kompakten Bauweise des Sichterkreislaufes bei Einsatz von Zyklonen zur Produktabscheidung. Eine weitere Abwandlung sind Drehkorb-Sichter, bei welchen die Rohgutaufgabe bereits gemeinsam mit der Sichtluft von unten erfolgt, wie z.B. der ebenfalls in Abbildung 3-6 dargestellte Sichter der Baureihe DSL von CPB. Sichter dieser Bauart werden in Kombination mit Luftstrommühlen eingesetzt und kommen vor allem in der Kohlemahlung sowie der Rohmehlmahlung zum Einsatz.

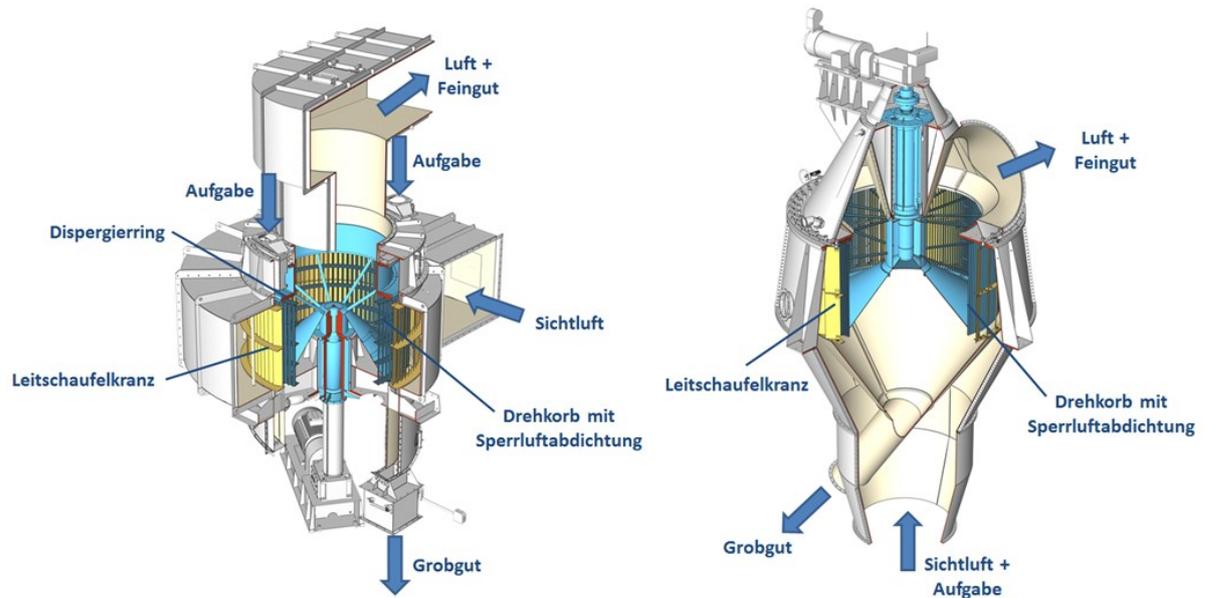


Abbildung 3-6: Sichter der Baureihen TGS (links) und DSL (rechts) [4]

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Sichtung

Sichtprozesse sind Stromklassierprozesse, wobei das Strömungsmedium gasförmig vorliegt. In den meisten Fällen kommt dabei Luft als Fluid zum Einsatz. Das Trennprinzip basiert auf dem Kräftegleichgewicht zwischen der auf das Partikel wirkenden Schleppkraft und einer Kräfteinwirkung zufolge einer Beschleunigung, wobei diese entweder in der Erdbeschleunigung oder in einer Zentrifugalbeschleunigung zufolge einer gekrümmten Bewegungslinie des Partikels begründet sein kann.

In den hier behandelten Querstrom-Drehkorbsichtern handelt es sich um einen Sichtvorgang im Zentrifugalfeld, somit wirkt einerseits die durch die Luftströmung verursachte Schleppkraft F_L und andererseits die Zentrifugalkraft F_Z auf das Partikel. Abhängig vom Verhältnis, in welchem diese Kräfte zueinander stehen, stellt sich eine resultierende Kraft F_R ein (Abbildung 4-1).

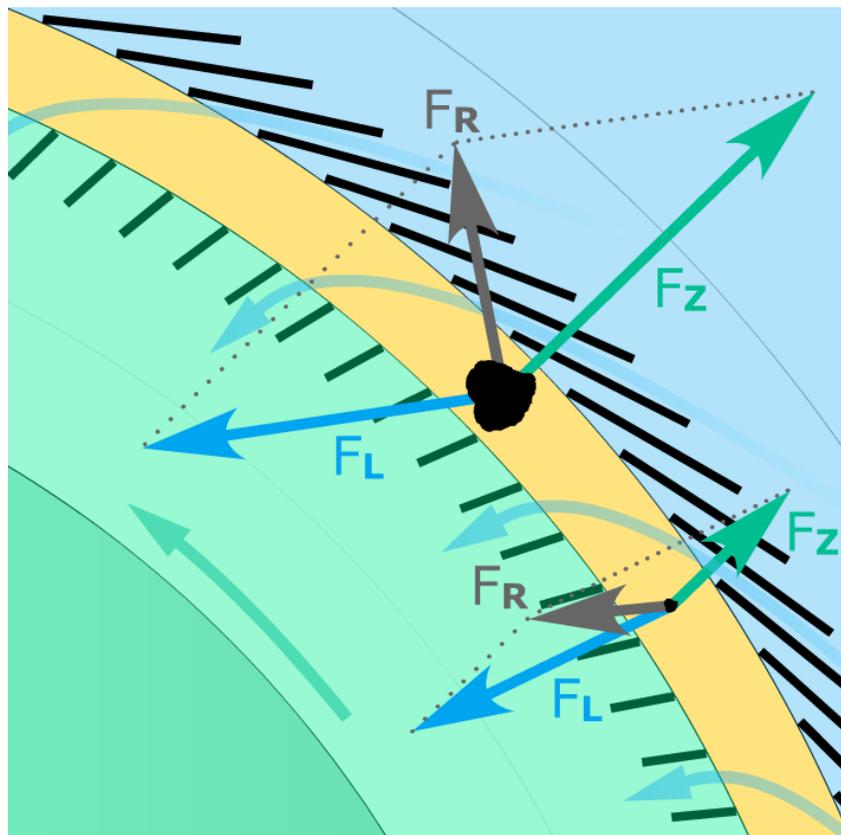


Abbildung 4-1: Prinzipskizze der auf das Partikel wirkenden Kräfte im Sichtraum [4]

Ist diese nach außen gerichtet, wie dies bei Partikeln der Fall ist, welche größer als die Trenngrenze sind, so werden diese abgewiesen und können der Strömung nicht auf ihrem Weg durch den Drehkorb folgen. Ist die resultierende Kraft nach innen gerichtet, was bei Partikeln, welche kleiner als die Trenngrenze sind, der Fall ist, so werden diese von der Strömung durch den Drehkorb gefördert und mit ihr ausgetragen. Partikel, welche exakt der Trenngrenze entsprechen, bewegen sich theoretisch auf einer Kreisbahn um den Drehkorb, bis diese aufgrund der Schwerkraft ebenfalls mit dem Grobgut nach unten ausgetragen werden.

Grundlage für dieses Trennprinzip sind die im Sichtraum herrschende Potentialwirbelströmung einerseits sowie die Starrkörperrotation andererseits, welche sich zwischen den Drehkorbstäben ausbildet. Beide sind hierbei von einer, durch das den Sichtraum durchströmende Volumen bedingten Senkenströmung überlagert. Die Potentialwirbelströmung wird im Grunde von der Geometrie des Leitschaufelkranzes geprägt. Die Ausrichtung der Leitbleche gibt hierbei das Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit und radialer Geschwindigkeit der Strömung vor. Bei der Gestaltung des Leitschaufelkranzes ist hierbei darauf zu achten, dass die im Sichtraum in radialer Richtung nach innen hin zunehmende Geschwindigkeit im Potentialwirbel keine höheren Werte als die Umfangsgeschwindigkeit des Drehkorbes an dessen äußerem Radius erreicht. Dies würde zu besonders ungünstigen Strömungsverhältnissen in der Nähe des Korbes und somit dem eigentlichen Bereich des Sichtprozesses führen [1].

Die Senkenströmung wird hierbei folgendermaßen charakterisiert:

$$v_r \cdot r = konst. \quad (\text{Glg. 1})$$

Für rotationssymmetrische Strömungen wird allgemein angesetzt:

$$v_u \cdot r^m = konst. \quad (\text{Glg. 2})$$

Für die Starrkörperrotation wird $m = -1$ und somit ergibt sich:

$$\frac{v_u}{r} = konst. \quad (\text{Glg. 3})$$

Für den reibungsfreien Fall ergibt sich für die Potentialwirbelströmung $m = 1$ und:

$$v_u \cdot r = konst. \quad (\text{Glg. 4})$$

Für reale und damit reibungsbehaftete Strömungen liegt der Wert für m zwischen 0,5 und 0,85 [1; 44-46], wobei der Wert mit steigender Feststoffbeladung aufgrund von interpartikulärem Impulsaustausch abnimmt.

Abbildung 4-2 [vgl.1; 24] zeigt schematisch den Verlauf der Trenngrenze auf dem Weg vom Leitschaufelkranz zum Feingutaustrag. Die Trenngrenze wird im Potentialwirbel vorerst mit sinkendem Radius r feiner. Bei Annäherung an den Drehkorb wird die Strömung durch die Wirkung der Starrkörperrotation auf den Potentialwirbel beschleunigt. Dies wird durch den roten Teil der Kurve dargestellt und entsprechend den Ergebnissen von Strömungssimulationen angenähert. Hier wird die Trenngrenze nun mit der Annäherung an den Drehkorb deutlich schneller feiner, bis am Umfang des Drehkorbes der feinste Punkt erreicht wird. Dieser stellt die Trenngrenze des Sichtprozesses dar. Sobald ein Partikel diesen Punkt überschritten hat und zwischen die Korbstäbe eintritt, wird es in das Feingut ausgetragen, da in der Starrkörperrotation zwischen den Stäben die Trenngrenze wieder ansteigt. Beim Austritt aus dem Bereich zwischen den Stäben bleibt diese kurz konstant und beginnt danach wieder abzufallen. Dies wird wiederum durch den roten Teil der Kurve dargestellt und ebenfalls entsprechend den Ergebnissen von Strömungssimulationen angenähert. Danach sinkt die Trenngrenze wieder ab, da sich wieder ein Potentialwirbel ausbildet. Theoretisch würde die Geschwindigkeit zum Kern des Potentialwirbels hin gegen unendlich ansteigen und somit die Trenngrenze gegen null streben, aufgrund der Reibung verhält sich der Kern jedoch ähnlich einem Starrkörper. Auch der Übergang in das Feingutrohr sorgt in diesem Bereich in der realen Strömung für eine Änderung der Strömungsverhältnisse. Die Tatsache, dass im inneren Bereich des Drehkorbes die Trenngrenze wieder absinkt, bedeutet, dass dies hinderlich für den Materialabtransport aus dieser Zone sein kann, insbesondere wenn hier die Trenngrenze unter jene am äußeren Korbumfang sinkt. Um dies zu vermeiden, bietet es sich z.B. an, die Korbstäbe im Inneren des Korbes nah an den Übergang zum Feingutrohr heranzuführen. Im Falle der hier betrachteten Querstrom-Drehkorbsichter ist dies durch einen im Vergleich zum Korbdurchmesser relativ großen Durchmesser des Feingutrohres gegeben.

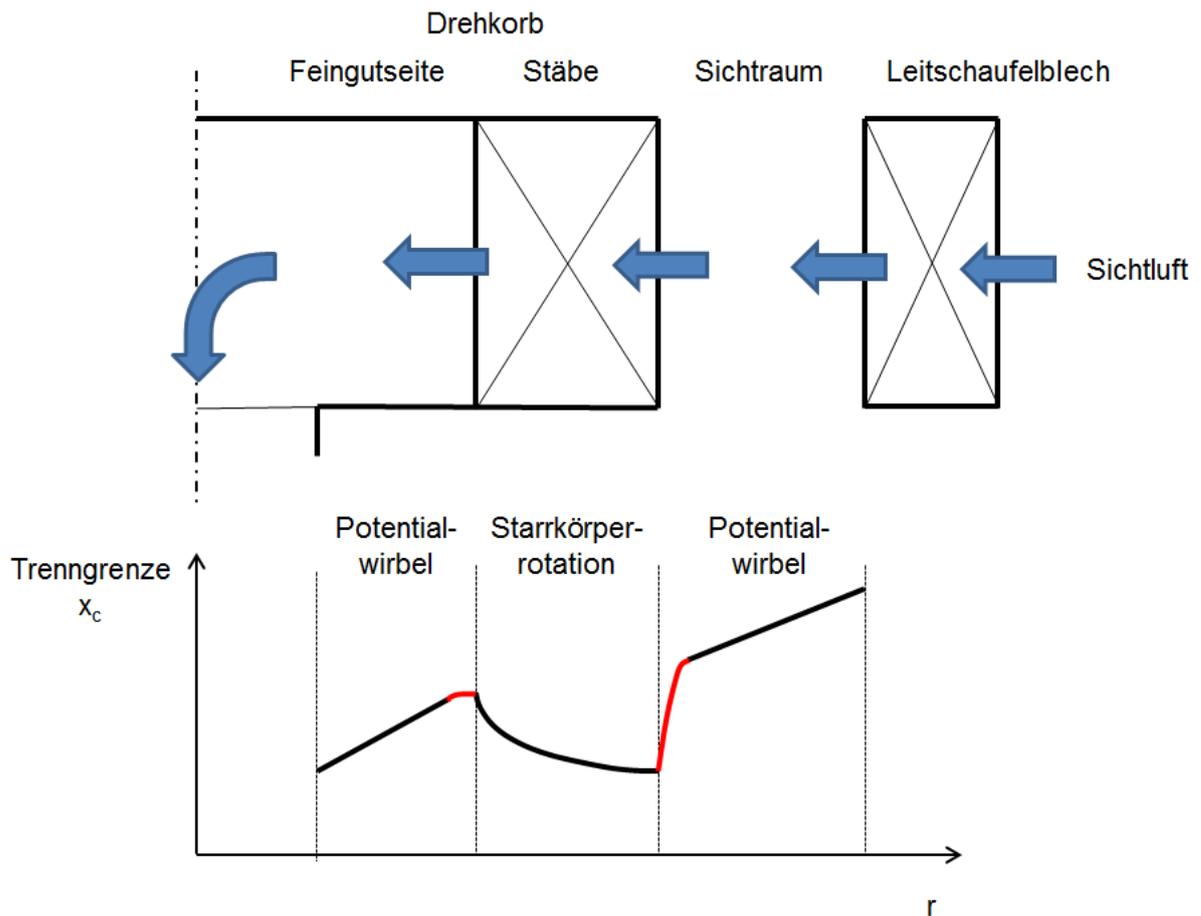


Abbildung 4-2: Theoretischer Verlauf der Trenngrenze

4.2 Berechnung der Trenngrenze

Um die Trenngrenze berechnen zu können, werden einige vereinfachende Annahmen getroffen [1]. Es werden die Druckkraft infolge der beschleunigten Luftbewegung, die Corioliskraft sowie durch Partikelwechselwirkungen entstehende Kräfte vernachlässigt. Außerdem wird angenommen, dass die Umfangsgeschwindigkeit der Partikel jener der Strömung gleicht. Für Partikel kleiner $10 \mu\text{m}$ ist dies mit hinreichender Genauigkeit möglich [1; 24]. Da die im Laufe dieser Arbeit erzielten experimentellen Ergebnisse mit der nachfolgend erläuterten Berechnungsmethode bis zu einer Partikelgröße von $70 \mu\text{m}$ gute Übereinstimmungen zeigen, scheint diese Annahme auch bis zu diesem Bereich für Abschätzungen zulässig zu sein. Somit ergibt sich in Umfangsrichtung keine Relativbewegung zwischen Trennkorn und Strömung. Da angenommen wird, dass sich das Trennkorn zudem auf einer stabilen Kreisbahn bewegt, ergibt sich als

Relativgeschwindigkeit zwischen Partikel und Strömung die radiale Geschwindigkeitskomponente der Strömung. Somit wirken die beiden Kräfte direkt entgegengesetzt in radialer Richtung, wobei F_L nach innen gerichtet ist und F_Z nach außen, und deren Gleichungen für einen bestimmten Radius r wie folgt lauten:

$$F_L = c_d(\text{Re}) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot x_c^2 \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_r^2 \quad (\text{Glg. 5})$$

$$F_Z = \rho_P \cdot \frac{\pi}{6} \cdot x_c^3 \cdot \frac{v_u^2}{r} \quad (\text{Glg. 6})$$

Setzt man diese nun gleich, so erhält man:

$$x_c = \frac{3}{4} \cdot \frac{c_d(\text{Re}) \cdot \rho_L \cdot r \cdot v_r^2}{\rho_P \cdot v_u^2} \quad (\text{Glg. 7})$$

Die Reynolds-Zahl wird folgendermaßen ermittelt:

$$\text{Re} = \frac{v_r \cdot x_c \cdot \rho_L}{\eta} \quad (\text{Glg. 8})$$

Da die experimentell erarbeiteten Trennschnitte im Falle der hier weiter betrachteten Aggregate zwischen 5 und 50 μm liegen und sich somit ergibt, dass die Reynolds-Zahl in den Bereich $0,25 < \text{Re} < 2000$ fällt, befindet sich das Strömungsverhalten im Übergangsbereich zwischen Stokes'schem (laminare Umströmung) und Newton'schem Bereich (turbulente Umströmung). Somit wird folgender Ansatz für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes herangezogen [17]:

$$c_d = \frac{21}{\text{Re}} + \frac{6}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,28 \quad (\text{Glg. 9})$$

Nachfolgend errechnete Werte der Trenngrenze x_c wurden allesamt mittels iterativer Berechnung unter Verwendung der Gleichungen 7 bis 9 ermittelt. Hierbei wurden die in Tabelle 4-1 angegebenen Werte herangezogen.

Parameter	Wert	Einheit
ρ_L	1,205	kg/m ³
ρ_P	3.120	kg/m ³
η	1,823 *10 ⁻⁵	Pa s

Tabelle 4-1: Stoffwerte für Berechnungsgänge

4.3 Herausforderung Scale-up

Bei dem Versuch, Ergebnisse, welche auf einer Anlage im Technikumsmaßstab erarbeitet wurden, in Relation zu, auf Anlagen im Industriemaßstab erzielten Ergebnissen zu setzen, gilt es einige Herausforderungen zu berücksichtigen, welche in physikalischen Gesetzmäßigkeiten begründet sind. Ähnliche Betrachtungen wurden vom Autor bereits in einer gesonderten Veröffentlichung angestellt [6]. Durch Umformung von Glg. 7 derart, dass die Umfangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der anderen Parameter ausgedrückt und der Radius r durch den Korbdurchmesser d ersetzt wird, so erhält man folgende Gleichung:

$$v_u = \sqrt{\frac{3 \cdot c_d(\text{Re}) \cdot d \cdot \rho_L \cdot v_r^2}{8 \cdot \rho_P \cdot x_c}} \quad (\text{Glg. 10})$$

Berechnet man nun mit Hilfe dieser Gleichung und vorheriger Berechnung von Re und $c_d(\text{Re})$ bei einer radialen Luftgeschwindigkeit von $v_r = 4$ m/s die notwendige Umfangsgeschwindigkeit für gewisse Trennschnitte in Abhängigkeit vom Korbdurchmesser, so erhält man die in Abbildung 4-3 dargestellten Kurven. Anhand dieser Darstellung kann man gut erkennen, dass Sichter im Technikumsmaßstab, welche im allgemeinen mit Korbdurchmessern von $\leq 0,5$ m gefertigt sind, im Vergleich zu Sichern im Industriemaßstab, welche besonders in der Zementindustrie meist Korbdurchmesser $\geq 1,5$ m aufweisen, nur sehr geringe Umfangsgeschwindigkeiten benötigen, um die gleichen Trennschnitte zu erreichen.

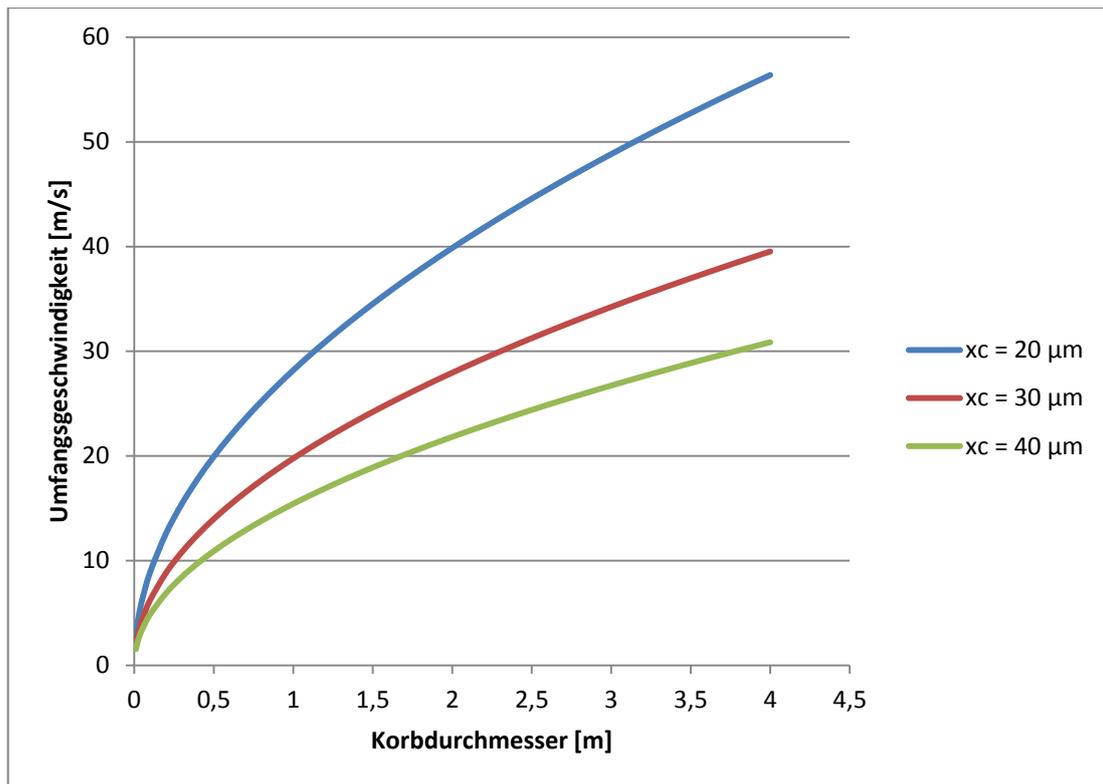


Abbildung 4-3: Notwendige Umfangsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Korbdurchmessers

Um dies zu verdeutlichen, sei in Tabelle 4-2 ein konkretes Zahlenbeispiel angeführt. Dieser Unterschied der benötigten Umfangsgeschwindigkeit für den gleichen Trennschnitt führt dazu, dass auch das Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit und radialer Luftgeschwindigkeit mit den Baugrößen stark variiert. Die später in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Ergebnisse geben einen klaren Hinweis darauf, dass dieses Verhältnis einen wichtigen Einfluss auf die Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes hat und somit auch auf die Güte des Sichtprozesses an sich.

Korbdurchmesser	0,24 m	2,40 m
Trennschnitt	20µm	20µm
v_u benötigt	13,81 m/s	43,68 m/s

Tabelle 4-2: Baugrößenvergleich anhand konkreter Werte

4.4 Dispergierung

Die Dispergierung des Aufgabeguts ist von entscheidender Bedeutung für die Güte des Sichtprozesses, wobei mit dem Dispergiervorgang 2 Ziele verfolgt werden:

- Gleichmäßige Verteilung der Partikel in den Sichtraum
- Auflösung von Agglomeraten

Die Verteilung der Partikel im Sichtraum ist dabei aus zwei Gründen von Bedeutung. Einerseits wird bei gleichmäßiger Verteilung der Partikel der Sichtraum und auch das Sichtluftvolumen optimal genutzt. Somit ist es möglich, an allen Stellen des Sichtraumes die maximale Sichtluftbeladung zu erzielen und somit den Gesamtdurchsatz des Sichtprozesses zu maximieren. Andererseits bedingt eine gleichmäßige Materialverteilung im Sichtraum auch eine gleichmäßige Sichtluftverteilung. Erreicht das zu sichtende Gut den Sichtraum in Strahlenform, so bedeutet dies aufgrund des Impulsaustausches zwischen Sichtluft und Partikelwolke, dass an Orten mit höherer Partikelkonzentration die Luftgeschwindigkeit geringer ist, als dies an Orten mit geringer Partikelkonzentration der Fall ist. Somit stellen sich aufgrund dieser Geschwindigkeitsunterschiede verschiedene Trenngrenzen ein, was zu einer Verschlechterung der Trennschärfe führt.

Die Auflösung von Agglomeraten ist ebenso wichtig, da Agglomerate, welche größer als die Trenngrenze sind, in das Grobgut abgewiesen werden, auch wenn die Einzelpartikel kleiner als die Trenngrenze sind. Ebenso gelangen Feinpartikel in das Grobgut, welche an Grobpartikeln anhaften. Entscheidend für Agglomerationsvorgänge sind hierbei zwei Kräfte [2;47;48]:

- Van der Waals-Kraft
- Elektrostatische Anziehungskräfte

Im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ ist die van der Waals-Kraft in etwa 10^5 Mal größer als die Gewichtskraft und spielt die größte Rolle bei der Agglomeration von Partikeln. Die elektrostatische Anziehungskraft ist im Bereich 10^3 bis 10^4 Mal größer als die Gewichtskraft. Sie spielt aufgrund ihrer relativ großen Reichweite besonders bei der Reagglomeration nach der Auftrennung von Agglomeraten durch mechanische Prozesse eine Rolle. [2]

Bei der Dispergierung spielen zwei Beanspruchungsmechanismen eine Rolle:

- Dispergierung durch Strömungskräfte
- Dispergierung durch Prallbeanspruchung

Die notwendigen Strömungskräfte treten bei Scherströmungen sowie bei sehr stark beschleunigten Strömungen auf. Im Querstrom-Drehkorbsichter treten diese verstärkt im Bereich des Korbeintritts auf. Daher ist die betonte Ausbildung dieses dynamischen Sichtfeldes auch für die Desagglomeration von Bedeutsamkeit. Die Dispergierung durch Prallbeanspruchung kommt in den betrachteten Aggregaten einerseits beim Auftreffen der Partikel auf den Dispergierteller und andererseits beim Anprall an die Gehäusewandung nach Abwurf des Aufgabegutes vom diesem vor.

4.5 Stoßfreie Anströmung des Drehkorbes

Legenhausen [1] untersuchte in seiner Dissertationsarbeit das grundlegende Verhalten der Strömung in Abweiseradsichtern, wobei das Ergebnis dieser Forschungstätigkeit die Theorie der stoßfreien Anströmung des Drehkorbes ist. Abbildung 4-4 zeigt dieses Prinzip. v_φ steht hierbei für die tangentielle Geschwindigkeitskomponente der Strömung und v_s für die Umfangsgeschwindigkeit des Drehkorbes. Sind diese am Eintritt in den Drehkorb gleich, was durch die mittlere Darstellung gezeigt wird, so besitzt die Strömung aus der Sicht eines mit dem Drehkorb mitrotierenden Koordinatensystems ausschließlich eine radiale Komponente. Dies ist der Zustand der stoßfreien Anströmung des Korbes und stellt theoretisch die optimalen Strömungsverhältnisse dar. Besteht eine Differenz zwischen den beiden Geschwindigkeiten, so bildet sich zwischen den Korbstäben eine Wirbelströmung aus, welche dieser Theorie zufolge negative Auswirkungen auf den Sichtprozess hat.

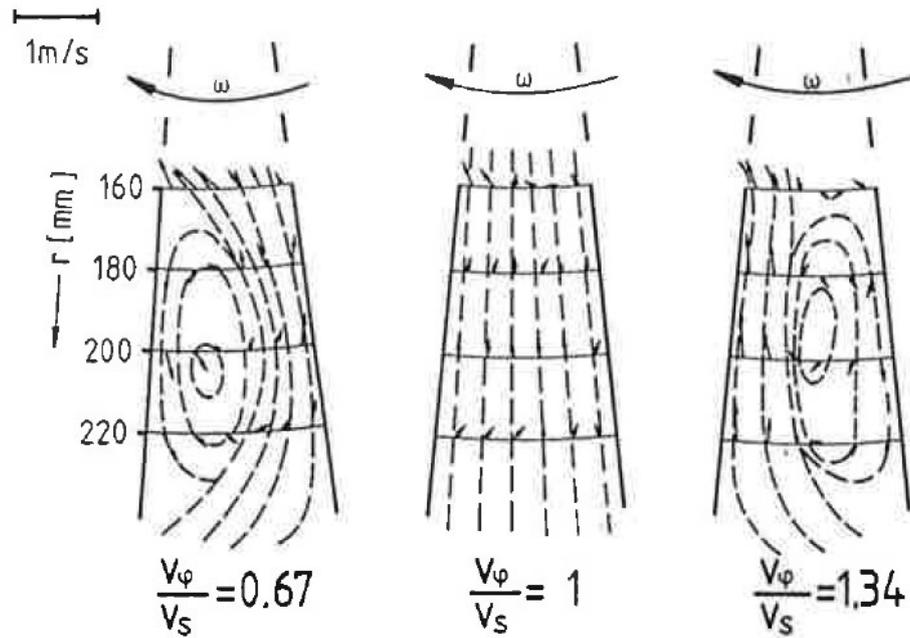


Abbildung 4-4: Darstellung der Möglichkeiten der Korbanströmung [20, S.133]

Dies bedeutet, dass um diese Bedingungen zu erreichen, die Stellung des Leitschaufelkranzes in einer Form angepasst werden müsste, dass sich der freie Potentialwirbel im Sichraum so ausbildet, dass dessen tangentielle Geschwindigkeit am Radius des Korbeintrittes genau der Umfangsgeschwindigkeit des Korbes entspricht.

5 Aufbau der Versuchsanlage im Technikumsmaßstab

Bei der für diese Arbeit eingesetzten Technikumsanlage handelt es sich um einen Sichter der Serie QDK 1,5 von CPB. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die grundlegenden Auslegungsparameter der Anlage.

Auslegungsparameter	
Korbdurchmesser	240 mm
Korbhöhe	160 mm
Sichtspaltbreite	40 mm
Anstellwinkel Leitschaufelbleche	55°
Max. Umfangsgeschwindigkeit des Korbes	30 m/s
Auslegungspunkt Sichtluftmenge	1500 m ³ /h
Max. Sichtluftmenge	2500 m ³ /h
Theoretischer berechneter Trennschnittbereich	7 – 70 µm
Aufgabemenge	400 – 4000 kg/h

Tabelle 5-1: Auslegungsparameter der eingesetzten Technikumsanlage

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Adaptierung der Technikumsanlage wurde vom Autor bereits in einer separaten Veröffentlichung dargestellt [6] und soll im Rahmen dieser Arbeit ausführlicher beschrieben werden. Die ursprüngliche Anordnung der Anlage zu Beginn der Versuchstätigkeit ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Es handelte sich dabei um eine Nachbildung der industriell eingesetzten Anordnung eines Sichterkreislaufes mit Zyklonabscheidung. Die Materialaufgabe erfolgte aus Aufgabebunkern, welche auf Wägezellen gelagert waren, und wurde über Zellenradschleusen gesteuert. Die Sichtluft wurde in einem geschlossenen Kreislauf geführt und mittels eines konventionellen Radiallüfters bereitgestellt. Der Entstaubungsfilter diente in dieser Anordnung sowohl zur Entstaubung des Sichtluftkreislaufes als auch zur Einstellung der Druckverhältnisse am Eingang des Spiralgehäuses des Sichters. Die Feingutabscheidung aus dem Sichtluftstrom wurde mittels Zyklon realisiert.

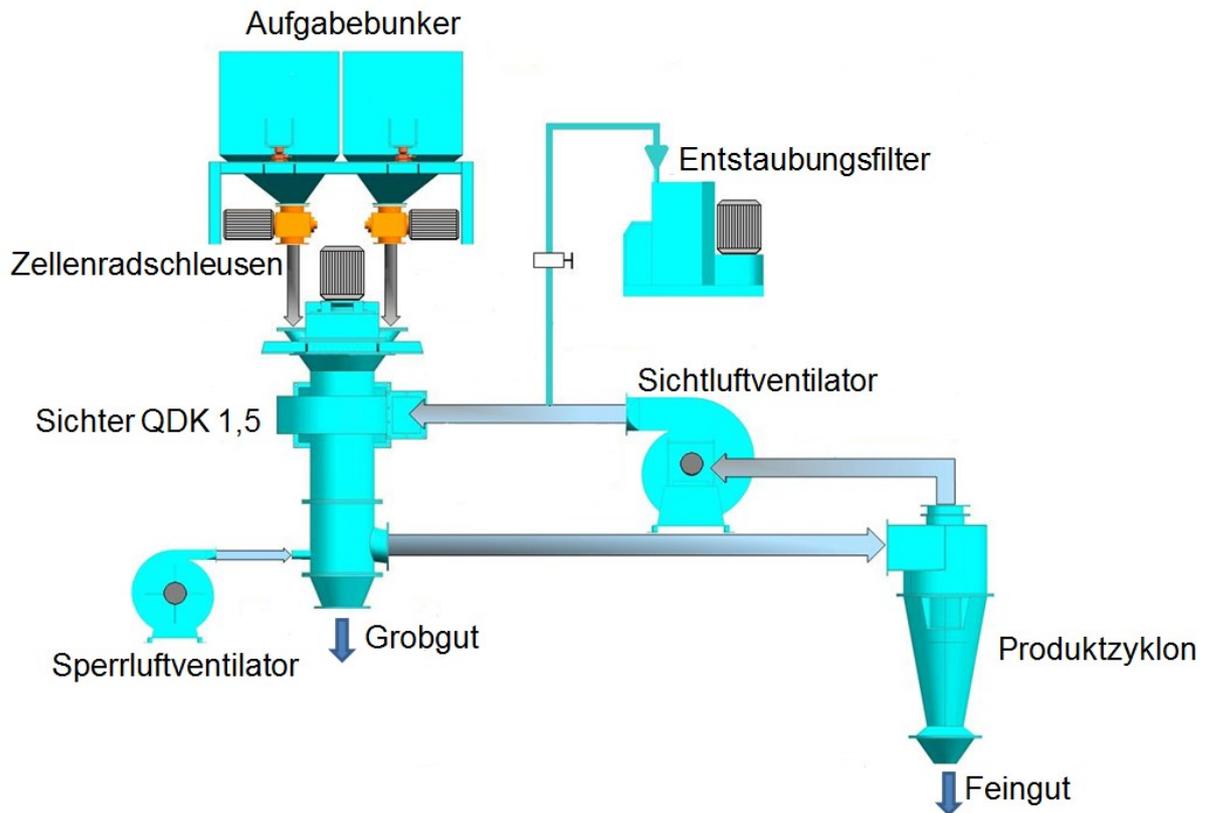


Abbildung 5-1: Fließbild der Technikumsanlage vor Umbau

Erste Versuchsreihen konnten zeigen, dass der Sichter – aufgrund der Baugröße und der im vorigen Kapitel erwähnten Umstände – tendenziell eher feine Trennschnitte erzeugt. Im Zuge der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde dabei deutlich, dass mit dem eingebauten Zyklon im Bereich der erzeugten Feinheiten kein zufriedenstellendes Abscheideergebnis erzielt werden konnte. Insbesondere wurde das Feinstmaterial nicht bzw. unzureichend aus dem Luftstrom abgeschieden, welches auch durch den Entstaubungsfilter nicht ausreichend aus dem in Richtung des Sichters zurückgeführten Luftstrom entfernt werden konnte. Daher gelangte dieses Feinstmaterial über den Leitschaufelkranz abermals zurück in den Sichter, was sich in zweierlei Hinsicht als nachteilig erwies. Zum einen führte dieses Feinstmaterial zu starken Anbackungen am Leitschaufelkranz (Abbildung 5-2), zum anderen wurde der herabfallende Grobgutstrom aufgrund der elektrostatischen Haftkräfte mit Feinstpartikeln kontaminiert, da sich diese an die Grobpartikel anhafteten. Daher wirkte sich die unzureichende Abscheideleistung

des Zyklons entscheidend auf das Sichterergebnis hinsichtlich der Trenngüte aus und verunmöglichte eine Bewertung des Sichtprozesses.



Abbildung 5-2: Anbackungen am Leitschaufelkranz

Ebenso konnte der eingesetzte Radiallüfter zur Bereitstellung des Sichtluftstromes die Anforderungen hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Sichtluftmenge nicht erfüllen. Abbildung 5-3 stellt diese Problematik über den Verlauf eines Versuches dar. Aufgrund einer flachen Ventilator Kennlinie wirkten sich in diesem Fall schon kleine Druckänderungen in der Anlage stark auf die Sichtluftmenge aus. Dies gilt auch für die hier dargestellten Änderungen in der Sichtluftmenge, welche im Start und dem Ende der Materialaufgabe begründet sind, die ebenfalls eine Druckänderung in der Anlage hervorrufen. Somit konnten keine gleichmäßige Sichtluftmenge über die Versuchsdauer und in Folge auch keine konstanten Geschwindigkeiten im Sichtraum gewährleistet werden.

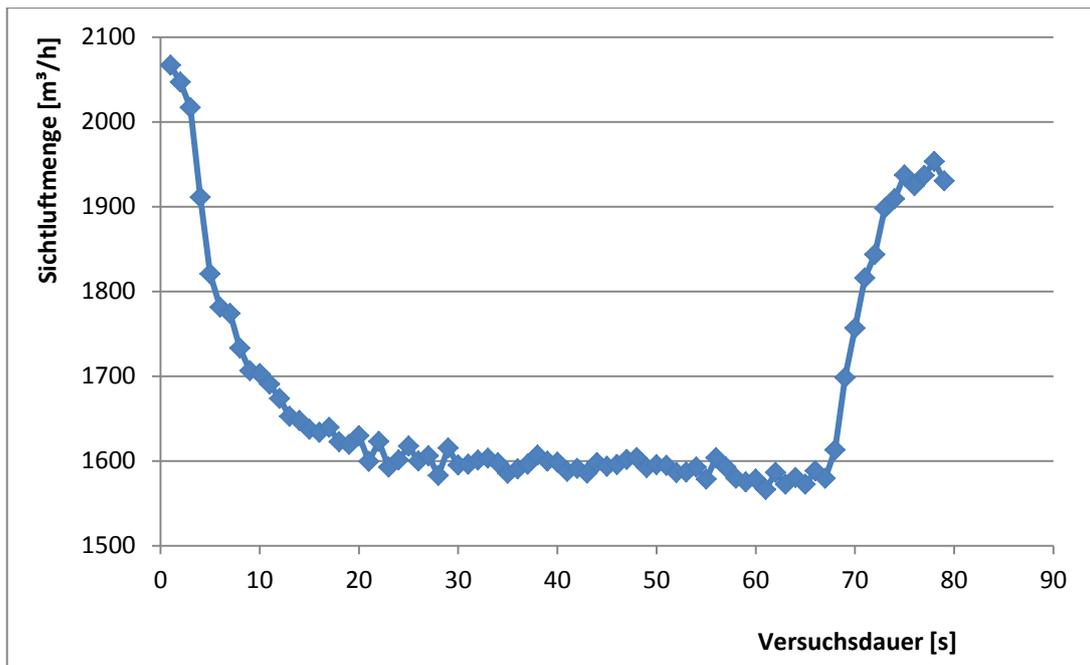


Abbildung 5-3: Verlauf der gemessenen Sichtluftmenge während eines Versuchs vor Umbau

Um die oben beschriebenen Problematiken zu beseitigen, wurde die Anlage umfangreichen Umbauarbeiten unterzogen.

Der Zyklon wurde durch eine Schlauchfilteranlage mit Druckluftabreinigung ersetzt. Dieser erzielt auch bei hohen Feinheiten noch sehr hohe Abscheidegrade und eignet sich daher hervorragend für die vorliegende Anlage. Weiters ermöglicht diese Form der Produktabscheidung innerhalb gewisser Grenzen eine Variation der Sichtluftmenge, ohne den Abscheidegrad entscheidend zu beeinflussen. Zudem kann der Entstaubungsfilter in dieser Anordnung zur Beeinflussung der Strömungsverhältnisse vor dem Spiralgehäuse herangezogen werden.

Der Radiallüfter wurde durch ein Drehkolbengebläse im Saugbetrieb ersetzt, welches eine äußerst steile Volumenstrom-Druck-Kennlinie aufweist. Dadurch wirken sich Änderungen der Druckverhältnisse in der Anlage in vernachlässigbarer Weise auf die geförderte Sichtluftmenge aus.

Im Zuge dieser Umbauarbeiten wurde auch die Materialaufgabe verbessert und nunmehr hochgenaue Differentialdosierwaagen mit Schneckenaustrag mit Erfolg eingesetzt. Die

Zellenradschleusen verblieben in der Anlage, um die Wägeinrichtungen vom Druckbereich des Sichters zu entkoppeln.

Die Sichtprodukte werden in Fässern aufgefangen, welche luftdicht an der Anlage angeschlossen sind. Abbildung 5-4 zeigt ein Fließschema der adaptierten Anlage inklusive der Anordnung der Messpunkte (auf die nachfolgend eingegangen wird).

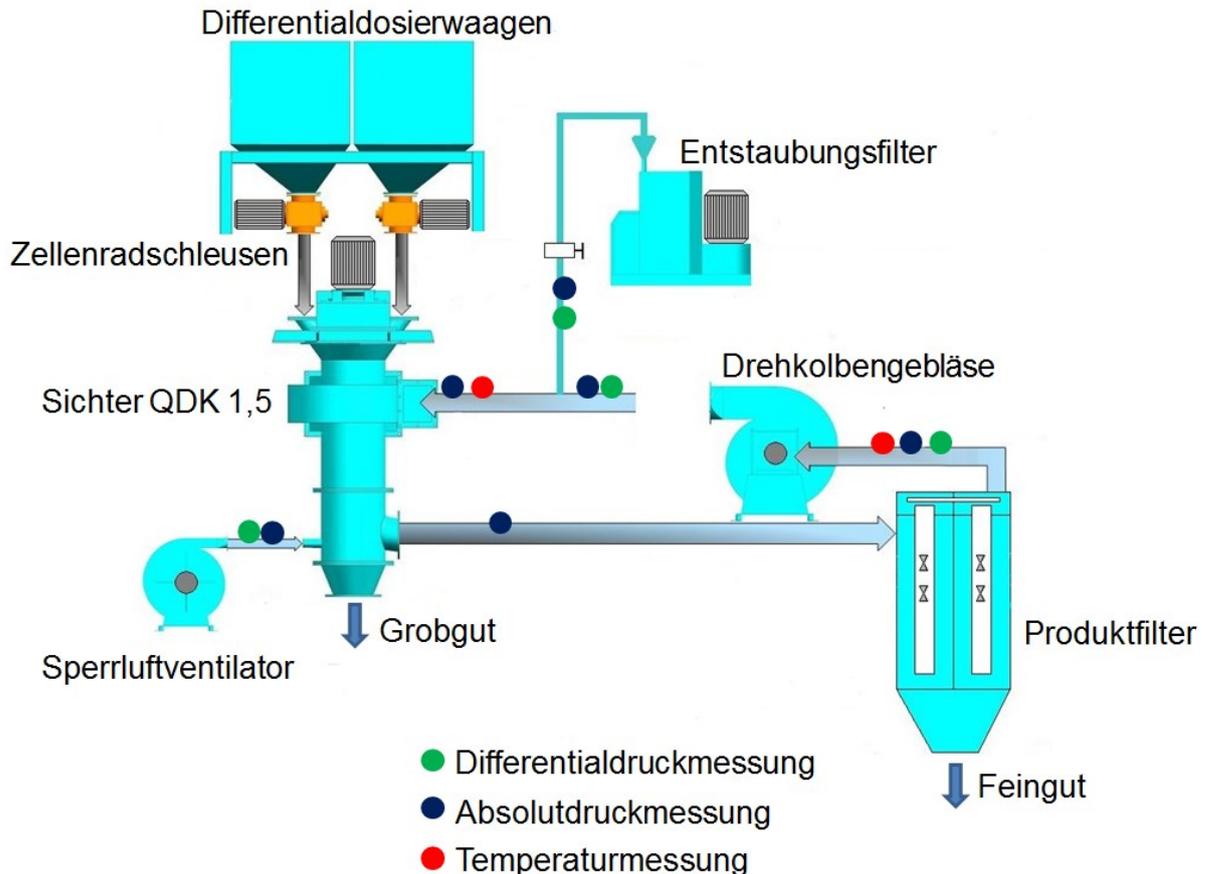


Abbildung 5-4: Fließschema und Sensoranordnung der Technikumsanlage nach Umbau

Die in Abbildung 5-4 dargestellte Anordnung der Messpunkte erlaubt eine umfangreiche messtechnische Beurteilung der Vorgänge in der Anlage anhand der folgenden Parameter:

- **Volumenstrom:** Über die Differentialdruckmessungen ist es möglich, die Strömungsgeschwindigkeiten und somit die Volumenströme in den Rohrleitungen zu bestimmen. Die Prandtl-Rohre zur Differenzdruckmessung sind im Aichelpunkt positioniert, wobei die Positionierung durch eine Ermittlung des

Strömungsprofils mittels Mehrpunkt-Messungen über den Rohrleitungsquerschnitt überprüft wurde.

- **Absolutdruck:** Anhand dieser Messungen können die Druckverhältnisse in den einzelnen Anlagenteilen genau spezifiziert werden.
- **Temperatur:** Hierdurch wird zum einen die Absoluttemperatur ermittelt und zum anderen die Temperaturänderung über die Anlage erfasst.
- **Aufgabemassestrom:** Mit Hilfe der Anlagensteuerung ist es möglich, einen genau spezifizierten Massestrom vorzugeben. Dieser kann über Auslesung der Messwerte der Wägezellen zusätzlich überprüft werden.
- **Drehzahlen:** Über die Anlagensteuerung wird insbesondere die Drehzahl des Sichters geregelt und überwacht. Annähernd ebenso wichtig ist die Drehzahl des Drehkolbengebläses zur Steuerung der Sichtluftmenge.

6 Versuchsdurchführung und Analysemethoden

6.1 Sichtversuche

6.1.1 Prinzipielle Durchführung

Sämtliche Versuche im Technikumsmaßstab wurden auf der Technikumsanlage QDK 1,5 der Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH in Beckum durchgeführt. Als Aufgabegut für diese Versuche wurde ein CEM I 32,5 R Portlandzement nach EN 197-1 herangezogen. Die spezifische Oberfläche nach Blaine lag bei $3100 \text{ cm}^2/\text{g}$. Dieses Material wurde ausgewählt, um eine Vergleichbarkeit mit Zementanlagen im Industriemaßstab zu begünstigen. Abbildung 6-1 zeigt die ähnlichen Kurvenverläufe der Partikelgrößenverteilungen des verwendeten Versuchsmaterials im Vergleich zur beispielhaft ausgewählten Aufgabe eines industriell eingesetzten Sichters zur Herstellung eines CEM I 52,5 R.

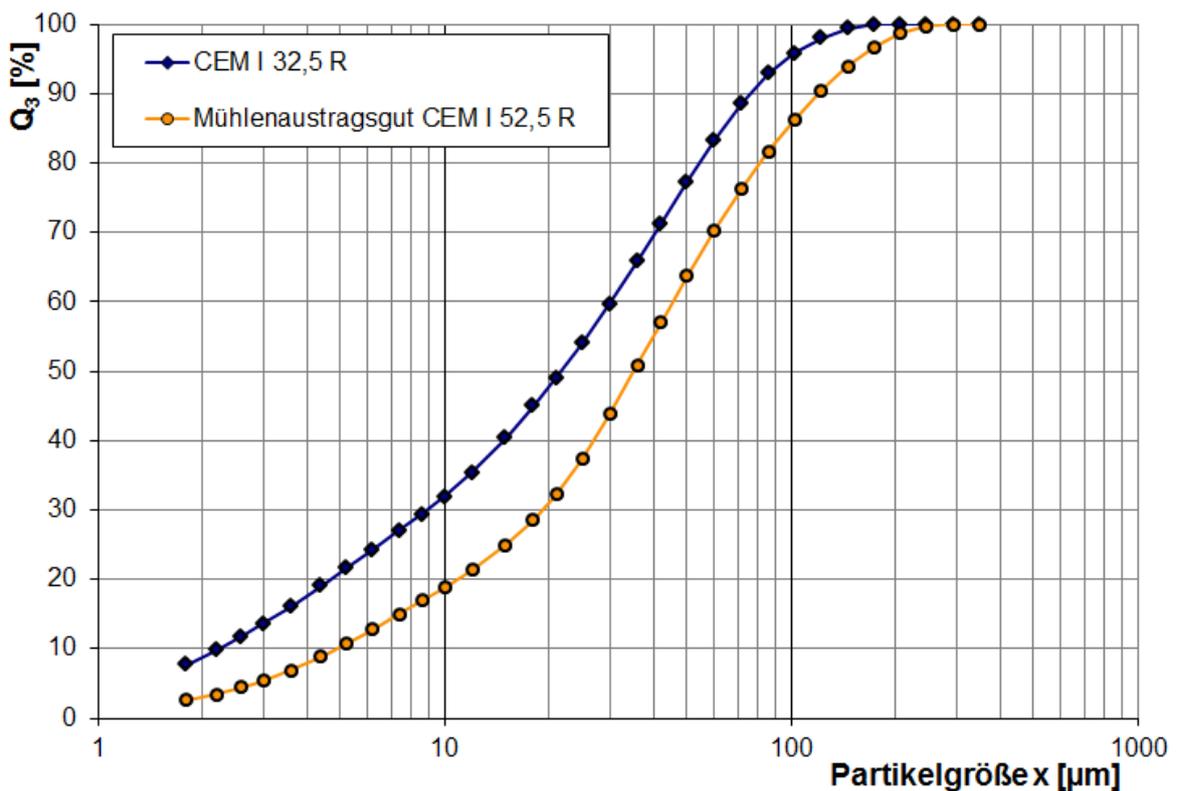


Abbildung 6-1: Vergleich Versuchsmaterial – Mühlenausstragsgut Zementanlage

Die Beprobung des Aufgabematerials erfolgte mittels Probestechern aus den angelieferten Zementsäcken. Die Sichtprodukte wurden für jeden Versuch in ihrer

Gesamtheit aufgefangen und über Probeteilung auf solche Mengen reduziert, welche geeignet für die nachfolgenden Laboranalysen waren. Für jeden Versuch wurde frisches Aufgabematerial herangezogen. Auf eine Zusammenführung der Sichtprodukte und eine angeschlossene Wiederverwendung in Sichtversuchen wurde bewusst verzichtet, da nur so gewährleistet werden konnte, dass etwa bei der Sichtung erfolgte Zerkleinerungsvorgänge oder elektrostatische Aufladungsprozesse keine die Ergebnisse beeinträchtigenden Auswirkungen auf nachfolgende Versuche haben.

Die eingesetzte Materialmenge variierte zufolge der eingestellten Versuchsparameter zwischen 30 und 100 kg pro Versuch. Jedem Versuch folgte eine gründliche Reinigung der Anlage. Die Verluste an Versuchsmaterial bewegten sich hierbei im Bereich von 0,2 – 1 % der Aufgabemasse und lagen absolut betrachtet zwischen 300 – 500 g. Die Massewerte der Sichtprodukte wurden im Anschluss an jeden Versuch durch Auswiegen der gesammelten Sichtprodukte bestimmt.

6.1.2 Fehlerbetrachtung

Im Zuge der Vorversuche konnte ein relevanter Einfluss der Versuchsdauer auf die Schwankungen der Versuchsergebnisse festgestellt werden.

Abbildung 6-2 zeigt die gemessene Luftmenge am Eintritt des Spiralgehäuses (grüner Graph) im Zusammenhang mit der Drehzahl des Antriebes des Drehkorbes (blauer Graph) und dem Druckverlust über die Anlage (roter Graph). In dieser Darstellung ist die geringe Änderung der Fördermenge bei einer Änderung der Druckverhältnisse in der Anlage zu erkennen, was, wie bereits weiter oben beschrieben, durch den Einsatz des Drehkolbengebläses zur Bereitstellung der Sichtluft erzielt werden konnte. Erwartungsgemäß steigt der über die Anlage erzeugte Druckverlust mit steigender Korbdrehzahl an. Die Sichtluftmenge wird dadurch zwar geringfügig beeinflusst, dies hat jedoch keine bedeutende Auswirkung auf das Versuchsergebnis. Es ist jedoch ein anderes Phänomen zu beobachten. Der Anstieg des Druckverlustes über die Anlage folgt mit einer gewissen Verzögerung dem Anstieg der Korbdrehzahl. Dies liegt in der Trägheit der Luftströmung begründet und tritt ebenso auf, wenn die Druckänderung durch den Start der Materialaufgabe verursacht wird.

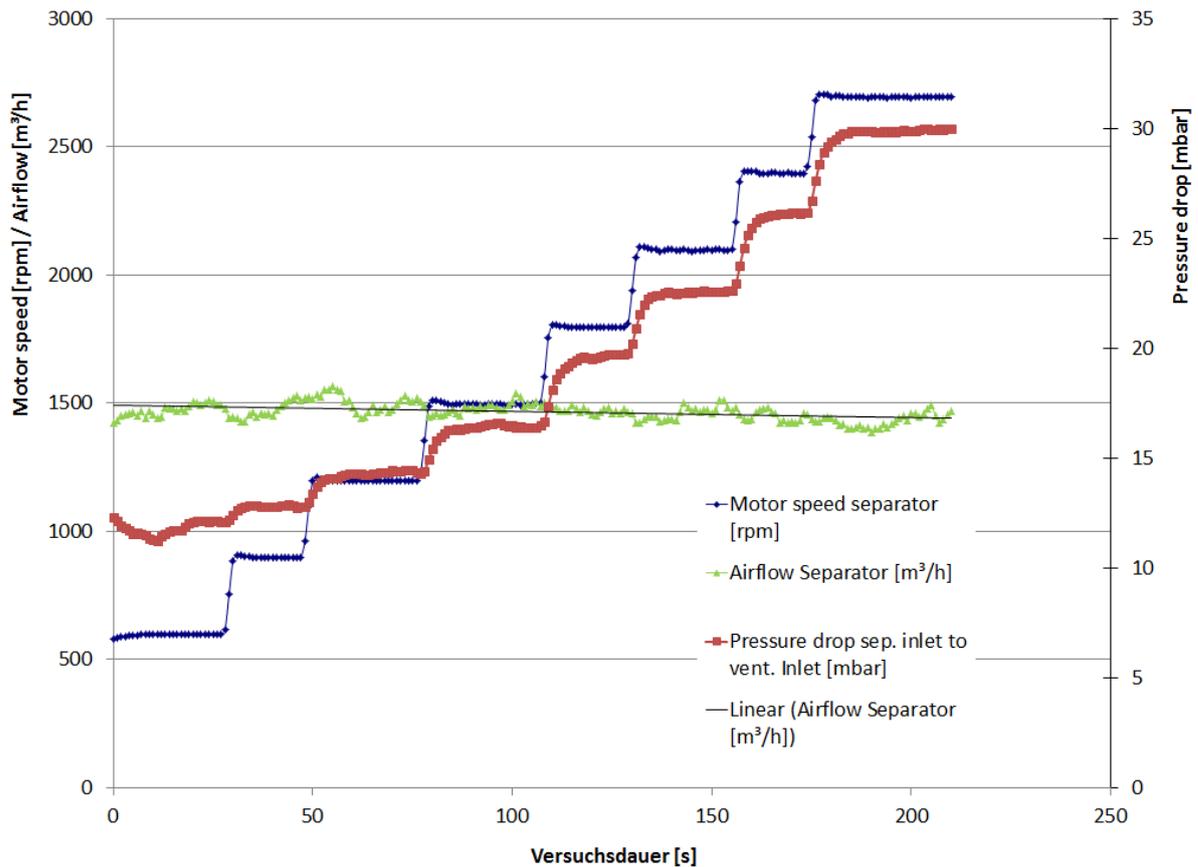


Abbildung 6-2: Druckdifferenz und Luftmenge bei Drehzahländerung am Gebläse

Es gilt somit einen Anfahrbereich zu Beginn eines Versuches zu berücksichtigen, dessen Einfluss auf die Ergebnisse in Relation zur Versuchsdauer steht. Abbildung 6-3 stellt den Einfluss der Versuchsdauer auf die Messwerte der Sichtluftmenge dar. Sowohl der Mittelwert der Messwerte der Sichtluftmenge (blaue Punkte) als auch die Standardabweichung der Messwerte (grüne Punkte) weisen bei Erhöhung der Versuchsdauer eine deutlich geringere Schwankungsbreite auf.

Auch die Laborwerte der Versuchsergebnisse zeigen Korrelationen zur Versuchsdauer. Dies soll hier anhand der Feingutwerte der spezifischen Oberfläche nach Blaine dargestellt werden (Abbildung 6-4). Es zeigt sich hierbei, dass die spezifische Oberfläche mit zunehmender Versuchsdauer ansteigt. Dies liegt an der Wirkung der Materialwolke auf die Strömung und ebenso an der zeitlichen Verzögerung, mit welcher die Sichtluftströmung auf den Beginn der Materialaufgabe reagiert. Erst nach einigen Sekunden stellt sich ein Gleichgewicht ein, welches aufgrund verringerter Geschwindigkeiten im Sichtraum zu höheren Feinheiten führt.

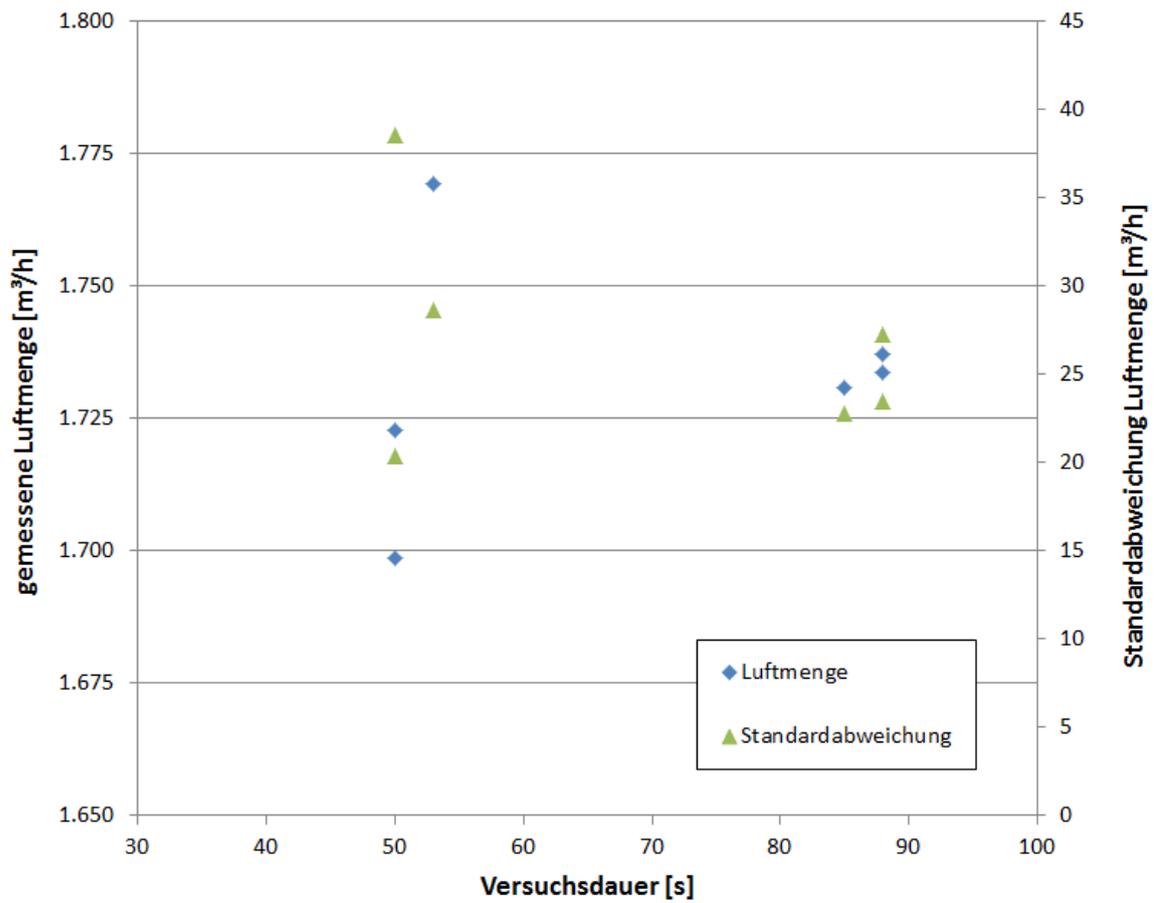


Abbildung 6-3: Gemessene Sichtluftmenge in Abhängigkeit der Versuchsdauer

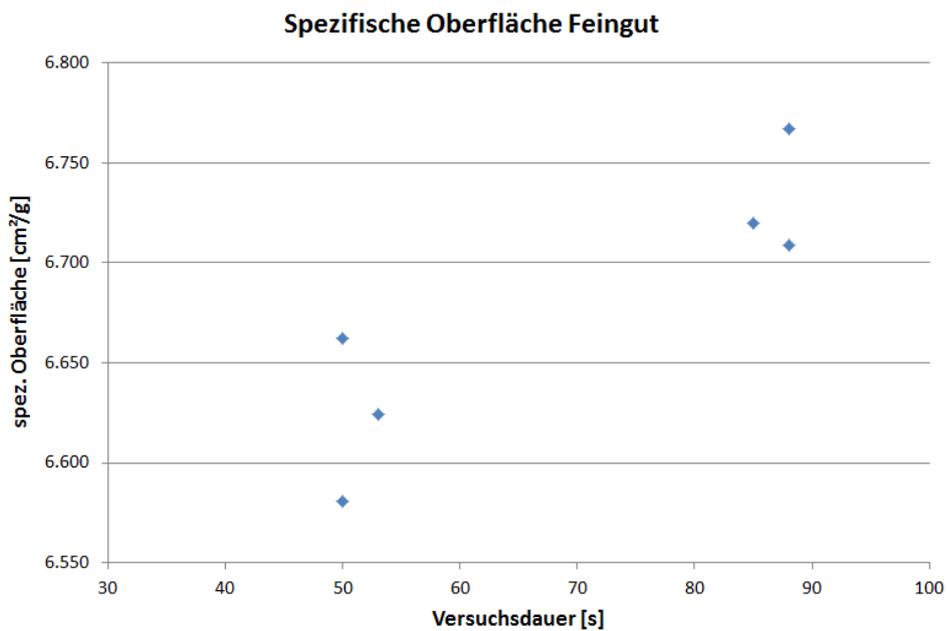


Abbildung 6-4: Spez. Oberfläche des Feinguts nach Blaine in Abhängigkeit der Versuchsdauer

Um über einen Großteil der Versuchsdauer gleichmäßige Bedingungen im Sichtraum garantieren zu können und auch den Einfluss der Versuchsdauer auf Sichterergebnisse zu minimieren ist es daher wichtig, eine ausreichend lange Versuchsdauer zu wählen und diese über die verschiedenen Versuchsreihen hinweg konstant zu halten. Im Falle der vorliegenden Versuche hat sich eine Versuchsdauer von 90 s als ausreichend erwiesen.

Durch Berücksichtigung all dieser Gesichtspunkte war es schlussendlich möglich, im Versuchsbetrieb der Technikumsanlage statistisch reproduzierbare Ergebnisse mit akzeptablen Schwankungen der Analysenwerte zu erzielen.

6.2 Laboranalysen

Folgende charakteristische Kennwerte wurden für alle Proben mittels Laboranalysen ermittelt:

Dichte: Die Dichte der Proben wurde mit Hilfe eines mit Helium betriebenen Gasdruckpyknometers bestimmt.

Partikelgrößenverteilung: Die Partikelgrößenverteilung wurde für alle Proben über Laserbeugungsspektrometrie ermittelt. Eine Vorabsiebung bei 315 μm wurde lediglich zum Schutz des Laborgeräts durchgeführt. Es wurden keine Rückstandswerte festgestellt, da bereits das eingesetzte Aufgabematerial keine nennenswerten Anteile $> 315 \mu\text{m}$ enthielt.

Spezifische Oberfläche: Die spezifische Oberfläche wurde für alle Proben mittels der Durchströmungsmethode nach Blaine ermittelt. Die Anwendung dieser Analysenmethode wurde gemäß EN 196-6 [13] durchgeführt.

Eine Auflistung der eingesetzten Laborgeräte befindet sich im Anhang.

6.3 Bewertung der Sichterergebnisse

Zur Beurteilung des Sichterfolges werden folgende Bewertungskriterien herangezogen:

- Spezifische Oberfläche der Sichtprodukte
- Partikelgrößenverteilungen
- Masseausbringenswerte der Sichtprodukte
- Trennkurve

Die Werte der Spezifischen Oberfläche der Sichtprodukte wurden direkt aus den zuvor beschriebenen Laboranalysen in die Auswertung übernommen. Die Berechnungs- und Auswertemethoden bezüglich der Partikelgrößenverteilungen sowie zur Bestimmung der Masseausbringenswerte und zur Errechnung der Trennkurve sollen im Folgenden erläutert werden.

6.3.1 Masseausbringen

Die Werte für das Masseausbringen der Sichtprodukte wurden im Zuge dieser Arbeit auf zwei Arten ermittelt:

- Wägung der Sichtprodukte
- Berechnung aus den Partikelgrößenverteilungen

Grundlage dieser Berechnungen bildet die Massenbilanz des Sichtversuches.

$$r_{mF} + r_{mG} = 1 \quad (\text{Glg. 11})$$

$$Q_A(x) = r_{mF} \cdot Q_F(x) + r_{mG} \cdot Q_G(x) \quad (\text{Glg. 12})$$

Bei der Ermittlung über die Wägung der Sichtprodukte wurde das Masseausbringen in das Feingut folgendermaßen berechnet:

$$r_{mF,w} = \frac{m_F}{m_G + m_F} \quad (\text{Glg. 13})$$

Das Masseausbringen für das Grobgut ergibt sich demnach durch:

$$r_{mG,w} = 1 - r_{mF,w} \quad (\text{Glg. 14})$$

Bei der Anwendung der Methodik zur Berechnung des Masseausbringens aus den Partikelgrößenverteilungen von Aufgabe, Grobgut und Feingut wurden die Werte mittels Gauß-Ausgleich für Zweiproduktentrennung [8;9] aus den Werten der Summenverteilungen der Versuchsgüter berechnet.

$$r_{mF,c} = \frac{\sum_i [(Q_{i,A}(x_i) - Q_{i,G}(x_i))^2 \cdot (Q_{i,F}(x_i) - Q_{i,G}(x_i))]}{\sum_i (Q_{i,F}(x_i) - Q_{i,G}(x_i))^2} \quad (\text{Glg. 15})$$

$$r_{mG,c} = 1 - r_{mF,c} \quad (\text{Glg. 16})$$

6.3.2 Ausgleichsrechnung Partikelgrößenverteilung

Reale Sichtprozesse unterscheiden sich in einigen Gesichtspunkten von der idealen Vorstellung. Sofern alle Partikel die gleiche Dichte aufweisen, handelt es sich bei einem Sichtprozess ausschließlich um einen Klassiervorgang. Ist dies nicht der Fall, wird die Klassierung (Trennung nach Unterschieden in der Korngröße) von einem Sortiereffekt (Trennung nach Unterschieden in der Dichte) überlagert. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass es bei realen Sichtvorgängen auch zu Zerkleinerungsvorgängen kommt. Weiters kann nicht ausgeschlossen werden, dass gewisse Anteile des Aufgabegutes bei den Sichtversuchen nicht in die Sichtprodukte gelangen. Während der Probenahme und in den Laboranalysen kommt es ebenso zu gewissen Mess- wie Probenahmefehlern, welche noch dazu eine Abhängigkeit von der Partikelgröße aufweisen [3].

Aus der Kombination dieser Umstände erwächst die Tatsache, dass es bei Errechnung einer Aufgabegutkurve aus der gemessenen Grob- und Feingutkurve mit Hilfe der Masseausbringenswerte zu Abweichungen zur gemessenen Aufgabegutkurve kommt. Hier kann man nun einen quadratischen Fehlerausgleich nach Lagrange ansetzen [8-12]. Der Fehlerterm berechnet sich folgendermaßen:

$$r_i = Q_{i,A}(x_i) - r_{mF} \cdot Q_{i,F}(x_i) - (1 - r_{mF}) \cdot Q_{i,G}(x_i) \quad (\text{Glg. 17})$$

Danach werden die Abweichungen für jedes Sichtgut errechnet:

$$\Delta Q_{i,A}(x_i) = \frac{r_i}{\left(1 + r_{mF}^2 + (1 - r_{mF})^2\right)} \quad (\text{Glg. 18})$$

$$\Delta Q_{i,F}(x_i) = -\frac{r_{mF} \cdot r_i}{\left(1 + r_{mF}^2 + (1 - r_{mF})^2\right)} \quad (\text{Glg. 19})$$

$$\Delta Q_{i,G}(x_i) = -\frac{(1 - r_{mF}) \cdot r_i}{\left(1 + r_{mF}^2 + (1 - r_{mF})^2\right)} \quad (\text{Glg. 20})$$

Die ausgeglichenen Summenverteilungswerte berechnen sich dann zu:

$$\bar{Q}_{i,A}(x_i) = Q_{i,A}(x_i) - \Delta Q_{i,A}(x_i) \quad (\text{Glg. 21})$$

$$\bar{Q}_{i,F}(x_i) = Q_{i,F}(x_i) - \Delta Q_{i,F}(x_i) \quad (\text{Glg. 22})$$

$$\bar{Q}_{i,G}(x_i) = Q_{i,G}(x_i) - \Delta Q_{i,G}(x_i) \quad (\text{Glg. 23})$$

Mit dieser Methode können ausgeglichene Summenverteilungen für die Partikelgrößenverteilungen von Aufgabegut, Grobgut und Feingut berechnet werden. Bei der Durchführung können sowohl die durch Wägung ermittelten Masseausbringenswerte als auch jene, die durch den Gauß-Ausgleich ermittelt wurden, herangezogen werden. Abbildung 6-5 stellt einen Vergleich der gemessenen Partikelgrößenverteilungen mit den durch Ausgleichsrechnung unter Verwendung der berechneten Masseausbringenswerte erhaltenen Partikelgrößenverteilungen dar. Es ist gut zu sehen, dass die Abweichungen zwischen gemessenen und gerechneten Kurven marginal sind.

In Abbildung 6-6 ist ein Vergleich der gemessenen Partikelgrößenverteilungen mit den durch Ausgleichsrechnung unter Verwendung der durch Wägung bestimmten Masseausbringenswerte erhaltenen dargestellt. Ein Nachteil dieser Berechnungsmethode ist, dass keine Gewichtung bezüglich der Änderungen der jeweiligen Produkte vorgenommen werden kann.

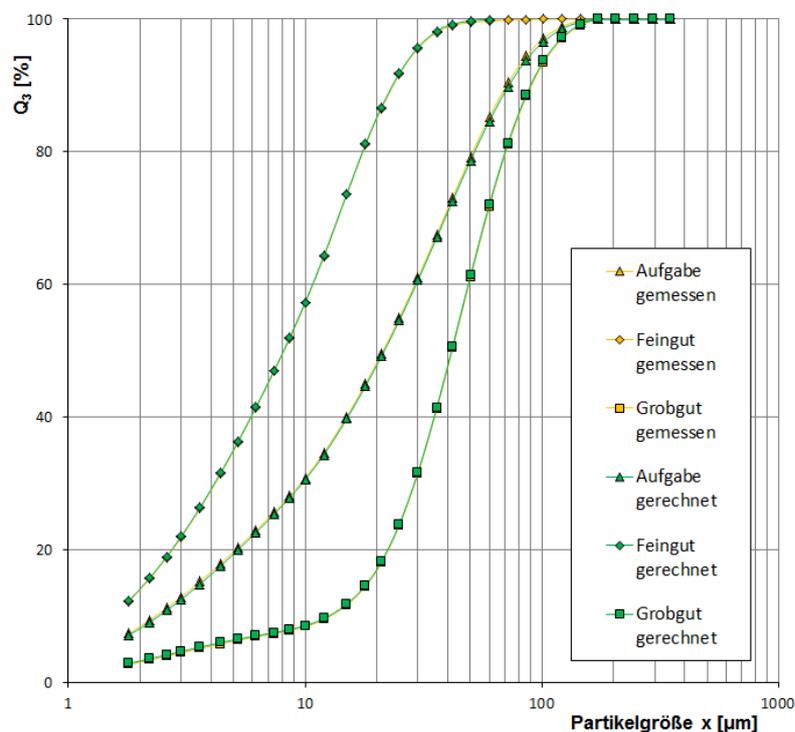


Abbildung 6-5: Partikelgrößenverteilungen ohne und mit Ausgleichsrechnung mit $r_{mF,c}$

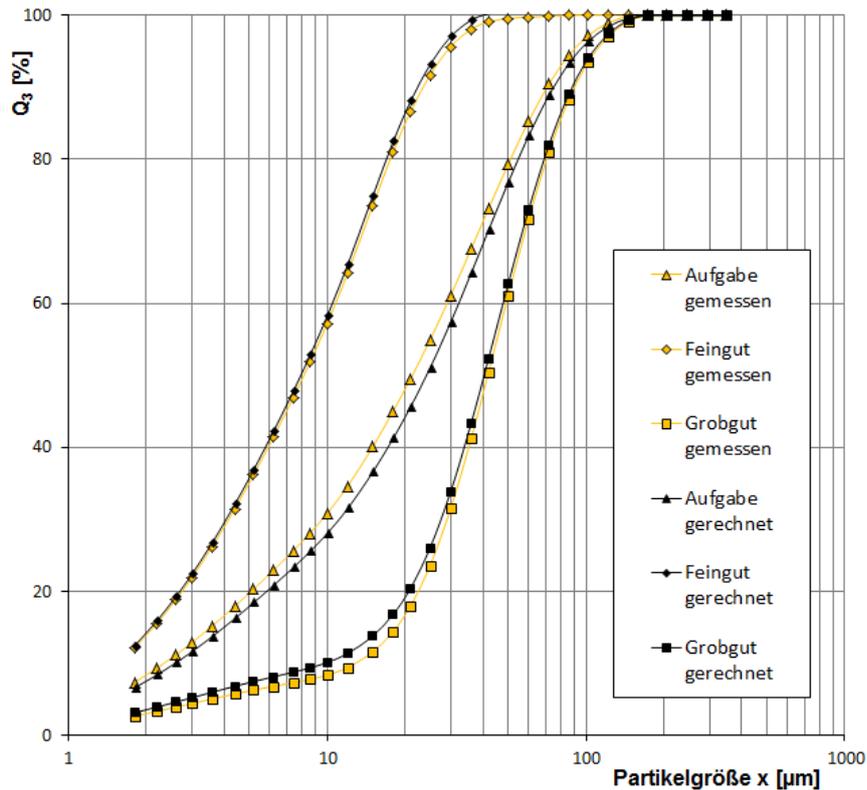


Abbildung 6-6: Partikelgrößenverteilungen ohne und mit Ausgleichsrechnung mit $r_{mF,w}$

Es ist auch möglich, mit Hilfe der Massenbilanz des Sichtprozesses (Gleichung 11 und 12) und den durch Wägung bestimmten Masseausbringenswerten aus zwei Partikelgrößenverteilungen die dritte zu errechnen. Die folgenden Abbildungen stellen die solcherart aus den jeweils zwei anderen Produkten errechneten Kurven den gemessenen Kurven gegenüber. Dies wurde für drei Betriebspunkte durchgeführt, wobei diese hier mit Bezug auf die Feinheit der erhaltenen Feingüter als „fein“, „mittel“ und „grob“ bezeichnet werden.

Diese drei Diagramme zeigen, dass die Abweichung der gerechneten von den gemessenen Kurven im Falle der Feingut- und Grobgutkurven relativ stark ausgeprägt ist, wohingegen im Falle der Aufgabegutkurven deutlich geringere Unterschiede feststellbar sind. Diese fallen nicht deutlich größer aus als jene Abweichungen, die bei einer Ausgleichsrechnung nach Lagrange auftreten. In der tatsächlichen Anwendung im industriellen Maßstab ist es aufgrund der Anordnung oftmals schwierig, repräsentative Proben des Aufgabeguts zu erhalten. Weiters bleibt unter Verwendung dieser Berechnungsmethode die gemessene Feingutkurve erhalten, welche in der Industrieanwendung als wichtiges Bewertungskriterium des Prozesses herangezogen

wird, da es sich meist um dessen Endprodukt handelt. In diesem Sinne wurde in Berechnungsgängen, wo dies von Bedeutung ist, dieser Ausgleichsmethode der Vorzug gegeben. Dies ist der Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus der Industrie zuträglich.

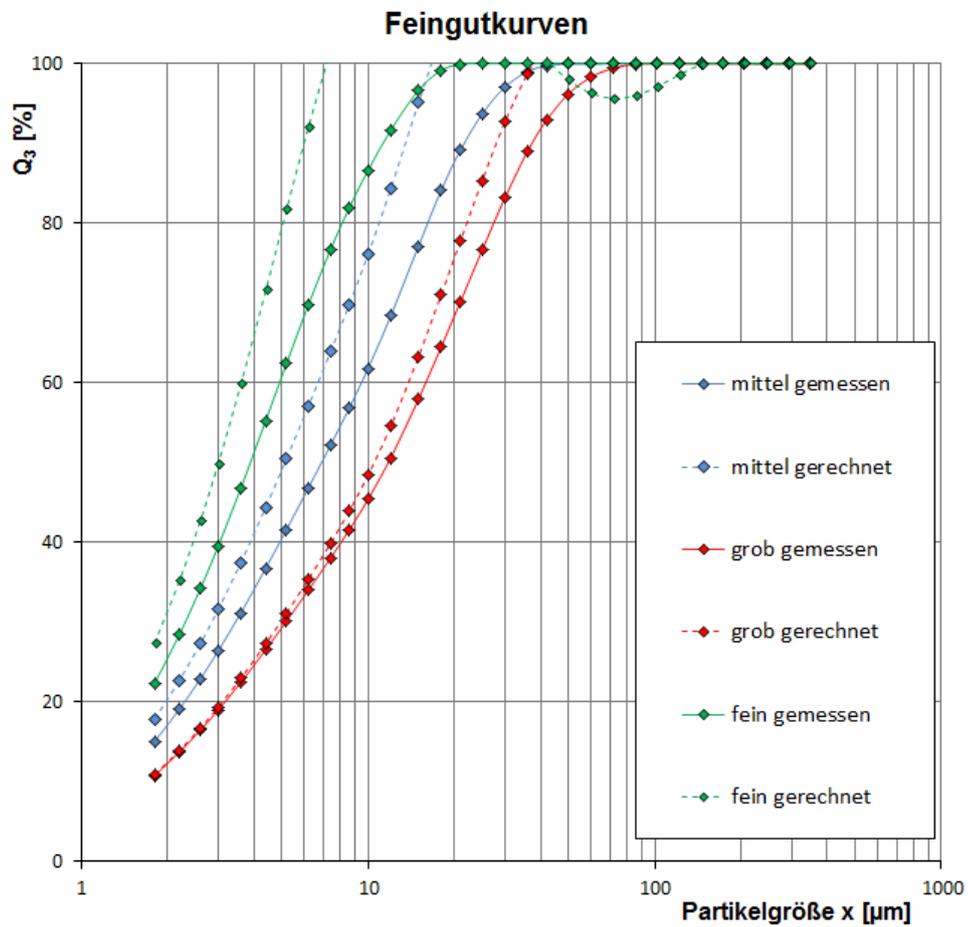


Abbildung 6-7: Vergleich Feingutkurven gemessen - gerechnet

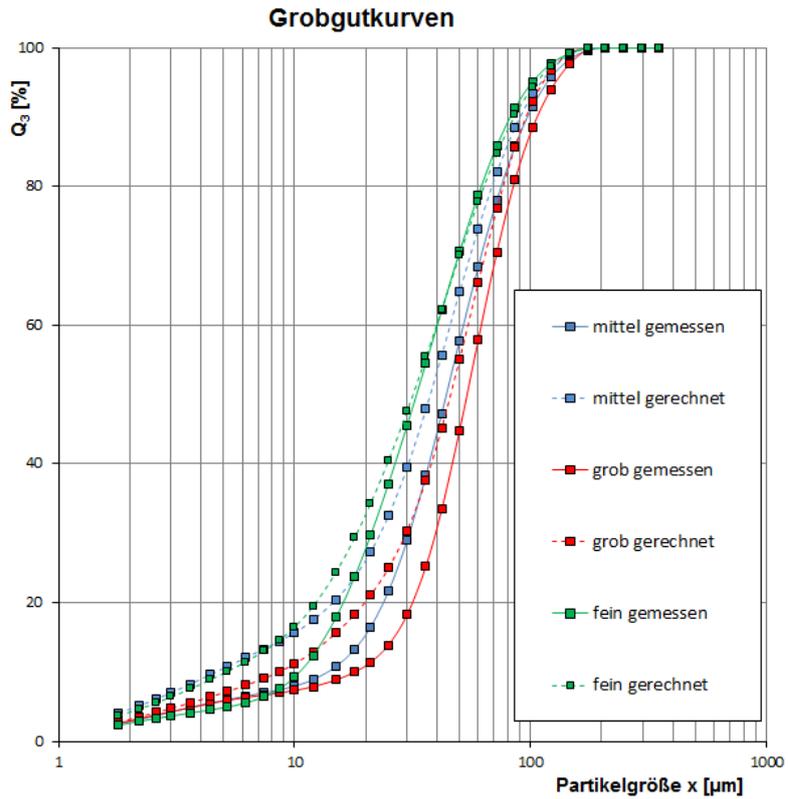


Abbildung 6-8: Vergleich Grobgutkurven gemessen - gerechnet

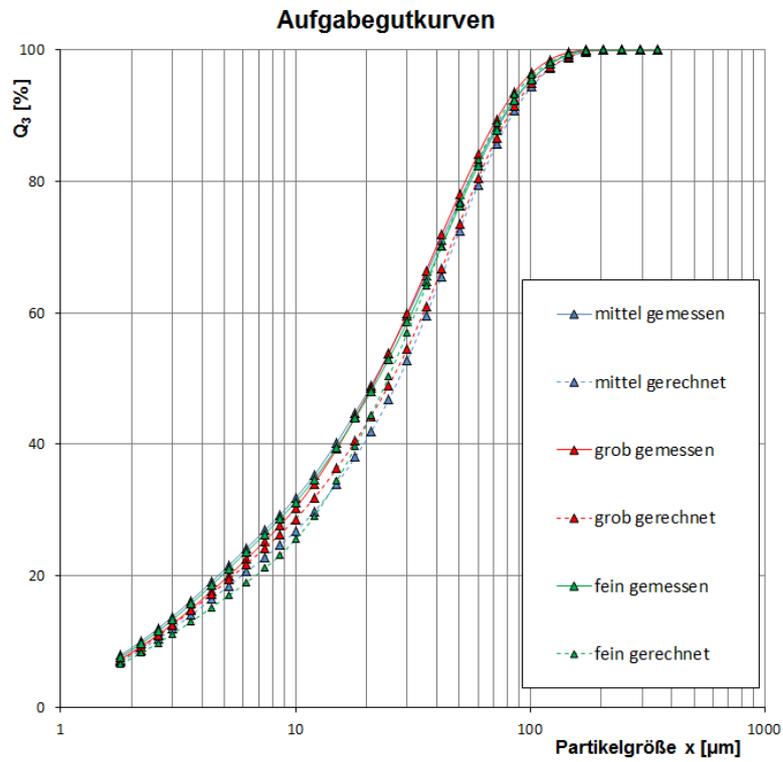


Abbildung 6-9: Vergleich Aufgabegutkurven gemessen - gerechnet

6.3.3 Trennkurve

Die Trennkurve – auch Trompkurve oder Teilungskurve genannt – stellt ein etabliertes Werkzeug zur Beurteilung des Erfolges von Trennprozessen dar. Dies gilt natürlich auch für Klassierprozesse. Daher wird die Trennkurve im Rahmen dieser Arbeit zur Beurteilung des Sichterfolges herangezogen. Abbildung 6-10 zeigt beispielhaft eine grob- und feinstgutbezogene Trennkurve und deren charakteristische Parameter. In dieser Arbeit wird ausschließlich mit grob- und feinstgutbezogenen Trennkurven gearbeitet.

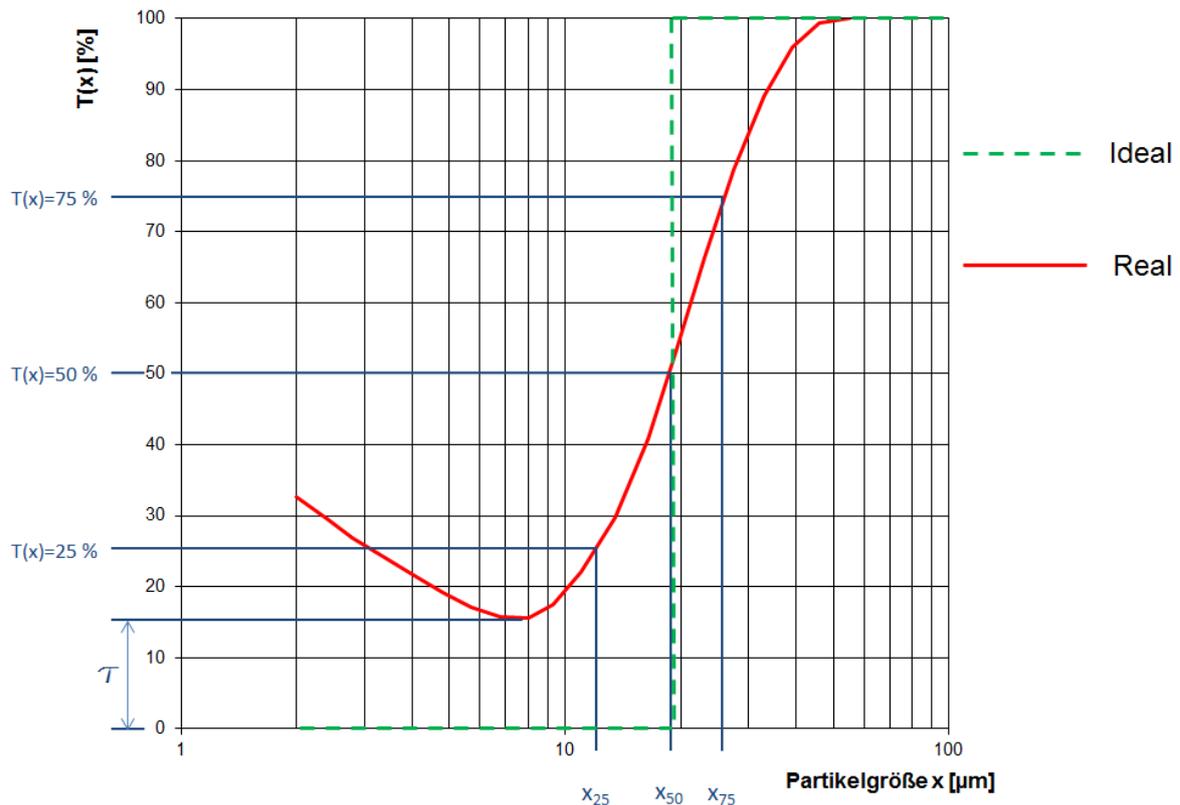


Abbildung 6-10: Beispielhafte Darstellung einer Trennkurve

Die Berechnung der grob- und feinstgutbezogenen Trennkurve erfolgt folgendermaßen:

$$T_i(x_i) = \frac{r_{mG} \cdot q_{i,G}(x_i)}{q_{i,A}(x_i)} \quad (\text{Glg. 24})$$

Da es sich hierbei um eine Berechnung der Werte von $T_i(x_i)$ für diskrete Partikelgrößenklassen handelt, ist die resultierende Funktion nicht stetig. Die annähernd stetige Form der nachfolgend hier dargestellten Trennkurven wurde dadurch erreicht, dass die Intervalle der Partikelgrößen bei der Ausgabe der Ergebnisse der Laserbeugungsspektrometrie sehr eng gewählt wurden. Als diskreter Punkt für die

Darstellung des zugehörigen Wertes von $T_i(x_i)$ wurde das arithmetische Mittel der Partikelgröße der jeweiligen Klasse gewählt.

Eine ideale Trennkurve würde sich als Sprungfunktion bei dem angestrebten Trennschnitt darstellen. Somit würden keine Partikel, welche gröber sind als der Trennschnitt, in das Feingut gelangen und umgekehrt auch keine Partikel, welche feiner sind als der Trennschnitt, den Weg in das Grobgut finden. Bei realen Trennprozessen weicht die Kurve in zweierlei Hinsicht von diesem Ideal ab. Erstens weist sie eine gewisse Neigung auf und zweitens erreicht sie in y-Richtung nicht den Nullwert. Die in dieser Arbeit zur Anwendung kommenden charakteristischen Parameter zur Beschreibung der Kurve sowie zur Spezifizierung der Abweichung vom Idealfall sind wie folgt:

- x_{50} Trennschnittlage nach Tromp
- τ Bypass
- $I = \frac{1}{2} \cdot \frac{x_{75} - x_{25}}{x_{50}}$ Imperfektion (Glg. 25)

Die Trennschnittlage nach Tromp gibt an, Partikel welcher Größe zu jeweils 50 % sowohl in das Grobgut als auch in das Feingut gelangen.

Der Bypass τ gibt den Abstand des Wendepunktes der Kurve zur x-Achse an. Im Idealfall wäre $\tau = 0$ %. Je größer der Wert für den Bypass wird, umso schlechter ist das Trennergebnis. Zwar werden hohe Werte durch ein schlechtes Sichterergebnis im Feinbereich verursacht, diese stellen aber lediglich einen Indikator für eine unzureichende Dispergierung der Feinpartikel und kein direktes Maß für das Ausmaß der ungesichteten Anteile dar.

Die Imperfektion gibt Aufschluss über die Steilheit der Kurve in Relation zur Trennschnittlage. Im Idealfall wäre dieser Wert ebenfalls $I = 0$. Höhere Werte bedeuten eine größere Abweichung von der idealen Trennung. Daher wird die Imperfektion als ein Maß für die Trennschärfe des Prozesses betrachtet.

Die Trennkurve kann sowohl aus den gemessenen Partikelgrößenverteilungen als auch aus jenen berechnet werden, welche mittels Ausgleichsrechnung ermittelt wurden. Dies gilt auch für die herangezogenen Werte des Masseausbringens. Aus den zuvor erläuterten Gründen werden die gemessenen Partikelgrößenverteilungen von Grobgut und Feingut sowie die daraus errechnete Aufgabegutverteilung zur Berechnung der

Trennkurve herangezogen. Abbildung 6-11 stellt einen Vergleich zwischen Trennkurven verschiedener Betriebspunkte dar, welche mit der genannten Berechnungsmethode generiert wurden. Der Unterschied in den Kurven desselben Betriebspunktes liegt darin begründet, dass jeweils einmal die berechneten Werte des Masseausbringens r_m benutzt wurden und das andere Mal die mittels Wägung ermittelten.

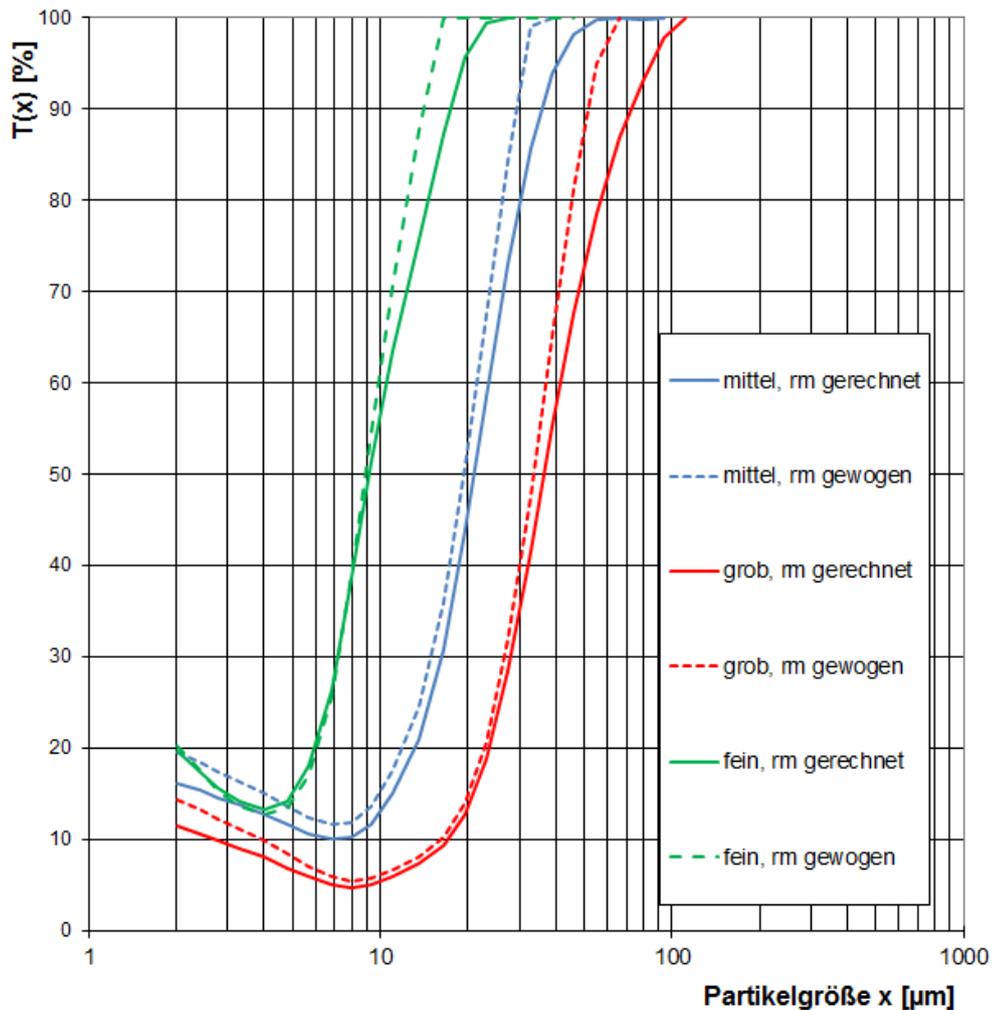


Abbildung 6-11: Vergleich Trennkurven ohne und mit Ausgleichsrechnung

Der Unterschied zwischen diesen beiden Berechnungsmethoden ist relativ gering. Ebenso ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Betriebspunkten beinahe unabhängig von der Berechnungsmethode sind. Da der Fokus dieser Arbeit auf der vergleichenden Betrachtung von Betriebspunktkenfeldern liegt, sowie wiederum unter dem Gesichtspunkt der Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus industriellen Anlagen, wurden alle weiteren Trennkurvenberechnungen mittels errechneter Werte für das Masseausbringen angestellt.

6.3.4 Vorhergehende Untersuchungen unter Einsatz einer ähnlichen Versuchsanlage

Unter Einsatz einer ähnlichen Anlage, wie sie zu Beginn dieser Forschungs Kooperation im Technikum von CPB vorhandenen war, wurden von anderen Forschergruppen bereits Versuchsreihen durchgeführt, welche vom Grundkonzept her den hier vorgestellten Untersuchungen stark ähneln [15; 16]. So wurde ebenfalls ein Aggregat der Baureihe QDK 1,5 verwendet, jedoch unter zusätzlichem Einsatz eines Filters zur Feingutabscheidung. Abweichend von den eigenen Arbeiten [15; 16] wurden aber Aufgabematerialien mit deutlich geringerer Feinheit eingesetzt, was zu sehr geringen Werten für das Ausbringen der Feingutmasse führte, da noch dazu sehr feine Trennschnitte erreicht wurden. Außerdem wurde das jeweils verwendete Aufgabegut durch Vereinigung der Sichtprodukte der vorhergehenden Versuche hergestellt. Aus diesen Gründen sind die Ergebnisse dieser Arbeiten nicht mit den nunmehr vorliegenden Untersuchungsergebnissen vergleichbar und die Aussagekraft der unter den zuvor aufgelisteten Rahmenbedingungen erzielten Ergebnisse kritisch zu hinterfragen. Auf das Einbeziehen dieses Datenmaterials wurde daher bewusst verzichtet.

7 Ergebnisse

Ein Hauptziel dieser Arbeit lag in der Erforschung des Sichtverhaltens über ein breites Kennfeld von Betriebspunkten. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Versuche und stellt die daraus gewonnenen Erkenntnisse dar.

7.1 Parameterkennfelder

7.1.1 Einfluss der Sichtluftbeladung

Aufgrund von interpartikulären Anziehungskräften und Kollisionsvorgängen sowie Wechselwirkungen zwischen dem Strömungsfeld und der Partikelwolke kommt der Beladung des Sichtluftstromes eine hohe Bedeutung zu. Wird eine gewisse Grenzbeladung erreicht, so wird das zu sichtende Gut im Sichtraum nicht mehr ausreichend dispergiert und auch nicht mehr ausreichend durchlüftet. Die Qualität des Trennprozesses nimmt somit bei Erreichen dieser Grenzbeladung dramatisch ab. Die Beladung wird dabei als Verhältnis der Masse des Sichtgutes zum Volumenstrom der Sichtluft angegeben. Diese kann bezogen auf den Feingutmassenstrom oder auf den Aufgabemassenstrom angegeben werden, wobei hier immer die letztere Variante verwendet wird.

$$\mu_A = \frac{\dot{m}_A}{\dot{V}_L} \quad (\text{Glg. 26})$$

Um den Einfluss der Sichtluftbeladung auf den Trennprozess in der Technikumsanlage zu charakterisieren, wurden Versuche mit einer Sichtluftmenge von 1700 m³/h und Drehkorb-Umfangsgeschwindigkeiten von 12 und 15 m/s sowie den in Tabelle 7-1 angegebenen Beladungen durchgeführt.

Aufgabemenge [kg/h]	Beladung aufgabeseitig [kg/m ³]
1800	1,06
2300	1,35
2700	1,59
3100	1,82
3600	2,12

Tabelle 7-1: Beladungswerte der durchgeführten Versuche

Abbildung 7-1 zeigt die Auswirkung der Beladungsänderung auf die Bypass- und Imperfektions-Werte der Trennkurven der entsprechenden Versuche.

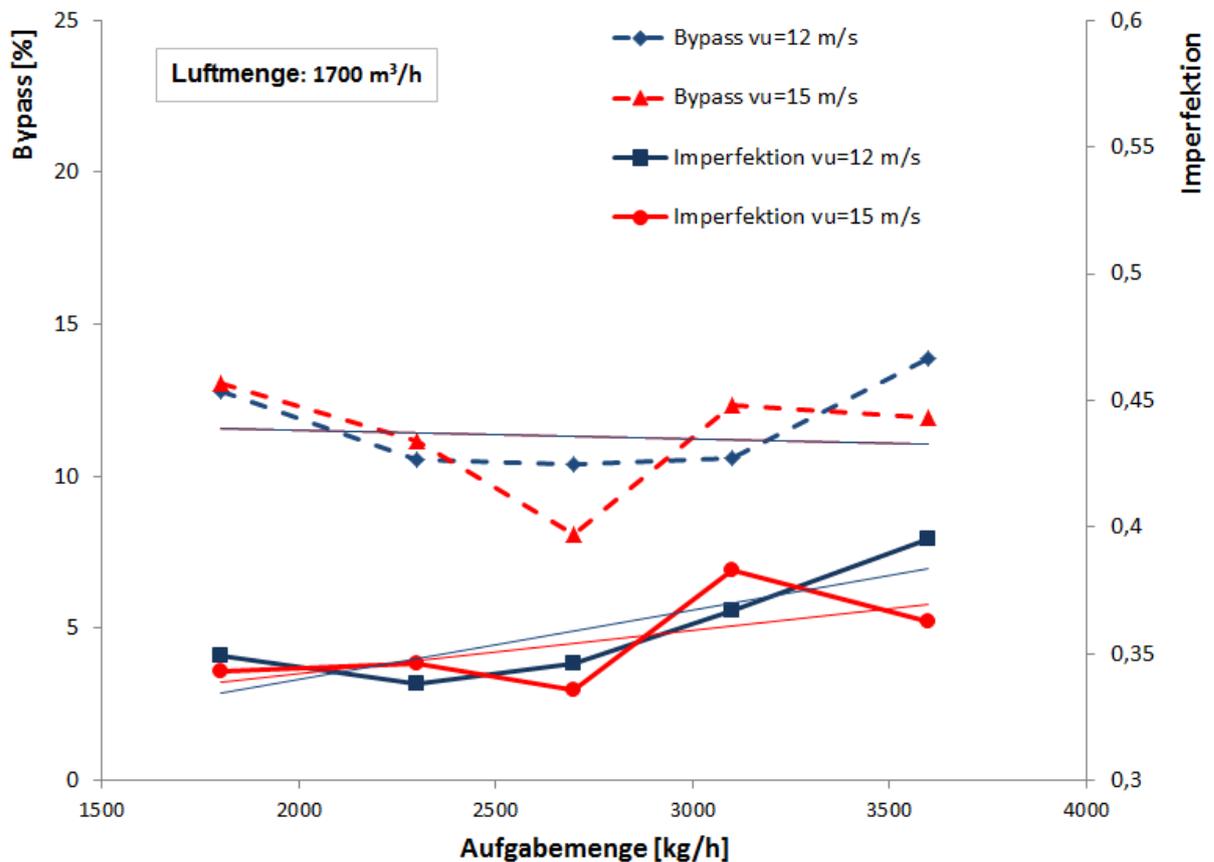


Abbildung 7-1: Bypass und Imperfektion in Abhängigkeit der Aufgabemenge

Man kann erkennen, dass die Imperfektion im Falle beider Korbgeschwindigkeiten mit steigender Beladung zunimmt und somit ein schlechteres Ergebnis indiziert, was auch durch die entsprechenden Trendlinien dargestellt wird. Der Anstieg ist zwar deutlich, jedoch ist noch kein Erreichen der Grenzbeladung erkennbar. Betrachtet man die Bypasskurven, so stellt man fest, dass die Trendlinien mit Erhöhung der Beladung nicht ansteigen. Die Werte steigen ebenfalls nicht konstant an. Grundsätzlich ist an dieser Stelle anzumerken, dass der Bypass der Trennkurven bei mehreren Versuchen am selben Betriebspunkt einer Schwankungsbreite von bis zu 4 %-Punkten unterliegt. Auch hier ist kein Erreichen der Grenzbeladung feststellbar, da die eingesetzten Zellenradschleusen eine weitere Erhöhung des Aufgabemassestroms verunmöglichten.

Die Ergebnisse der Bypassanalyse zeigen, dass der Einfluss des Aufgabemassestroms im feinen Partikelgrößenbereich des Sichtprozesses vor dem Erreichen der Grenzbeladung von untergeordneter Bedeutung ist. Im nahe dem Trennkorn liegenden Partikelgrößenbereich, welcher für die Berechnung der Imperfektion von entscheidender Bedeutung ist, ist ein Einfluss der Beladung zu erkennen. Diese hat dem Anschein nach somit einen größeren Einfluss auf die Vorgänge in der eigentlichen Sichtzone, dem Nahbereich des äußeren Korbumfanges.

Da in dieser Versuchsreihe die Grenzbeladung nicht erreicht werden konnte und eine weitere Erhöhung der Beladung aus anlagentechnischen Einschränkungen nicht möglich war, wurden alle weiteren Versuche mit einem festgelegten Aufgabemassestrom von 2700 kg/h durchgeführt.

7.1.2 Kennfelder der Trennkurvenparameter

Zur Charakterisierung des Sichtverhaltens wurde ein Kennfeld von Betriebsparametern festgelegt, in welchem die Sichtluftmenge und die Umfangsgeschwindigkeit des Drehkorbes entsprechend variiert wurden. Die Aufgabemenge wurde gemäß den zuvor angeführten Gesichtspunkten für all diese Versuche mit 2700 kg/h festgelegt.

Diese Auswertung konzentriert sich auf die Bypass-Werte der Trennkurve und die Imperfektion und stellt diese über das Parameterkennfeld dar. Abbildung 7-2 zeigt eine Kennfeld-Darstellung der Bypass-Werte in Form eines Konturdiagrammes. Man kann gut erkennen, dass die Bereiche hoher Bypass-Werte in jenem Teil des Kennfeldes liegen, wo geringe Luftmengen und geringe Umfangsgeschwindigkeiten angesiedelt sind. Dies ist gleichbedeutend mit eher groben Trennschnitten unter Einsatz geringer Luftmengen. Diese Kombination führt zu einer äußerst niedrigen Sichteffizienz. Folgt man dem Kennfeld in Richtung höherer Luftmengen bei gleichbleibender Umfangsgeschwindigkeit, so sinken die Bypass-Werte, bis eine Luftmenge von 1900 m³/h erreicht ist und steigen danach wieder leicht an. Die Trennschnitte werden in diese Richtung gröber. Dies zeigt, dass hier die höchste Effizienz für grobe Trennschnitte erreicht ist und sich darüber hinaus die Strömungsverhältnisse aufgrund zu hoher Geschwindigkeiten im Sichtraum wieder in eine ungünstigere Richtung verändern.

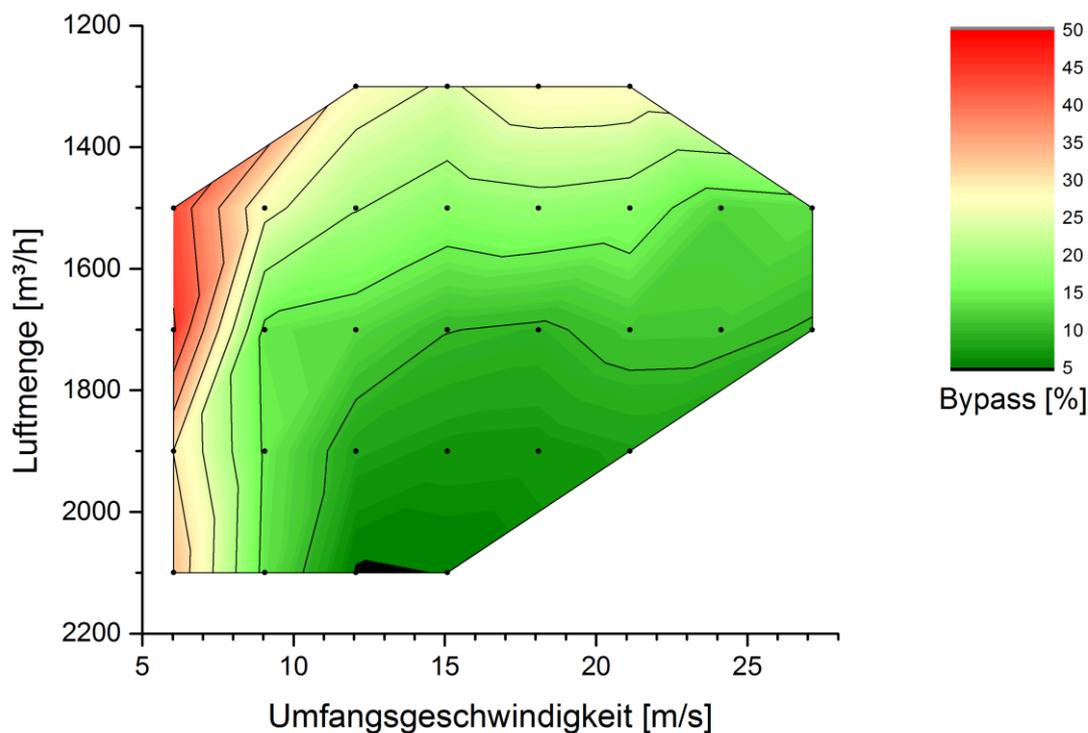


Abbildung 7-2: Konturdarstellung des Bypass-Kennfelds

Dass bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 6 m/s auch bei höherer Luftmenge noch sehr hohe Bypass-Werte vorherrschen, zeigt die ineffiziente Arbeitsweise des Aggregates bei groben Trennschnitten. Erhöht man die Umfangsgeschwindigkeiten, so sinken auch bei niedrigen Luftmengen die Bypass-Werte ab. Dies gilt bei einer Erhöhung von 6 m/s auf 12 m/s auch sehr deutlich für höhere Luftmengen. Der Sichtprozess tritt hier in einen für dieses Aggregat günstigen Feinheitsbereich ein. Über 15 m/s sinken die Bypass-Werte nicht mehr ab, da in diesem Bereich die erzielten Produktfeinheiten bis auf über 10.000 cm^2/g ansteigen. Bypass-Werte unter 15 % sind bei derartigen Feinheiten für diese Sichterbauform ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis.

Erhöht man im Bereich der Umfangsgeschwindigkeit über 10 m/s die Luftmenge, so werden die Bypass-Werte ebenfalls niedriger. Der Sichter funktioniert unter diesen Bedingungen äußerst gut, da das dynamische Sichtfeld gut ausgeprägt ist und die höhere Luftmenge für eine gute Durchlüftung des Materials im Sichtraum sorgt. Dies bedeutet jedoch auch eine erhebliche Steigerung des für die Sichtung notwendigen Energieaufwandes. Es soll hier auch noch erwähnt sein, dass aufgrund der Erhöhung der

Luftmenge unter Beibehaltung der Aufgabemenge die Beladung der Sichtluft mit steigender Luftmenge sinkt. Wie zuvor erläutert, hat die Beladung im betrachteten Bereich hinsichtlich der Bypass-Werte jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung.

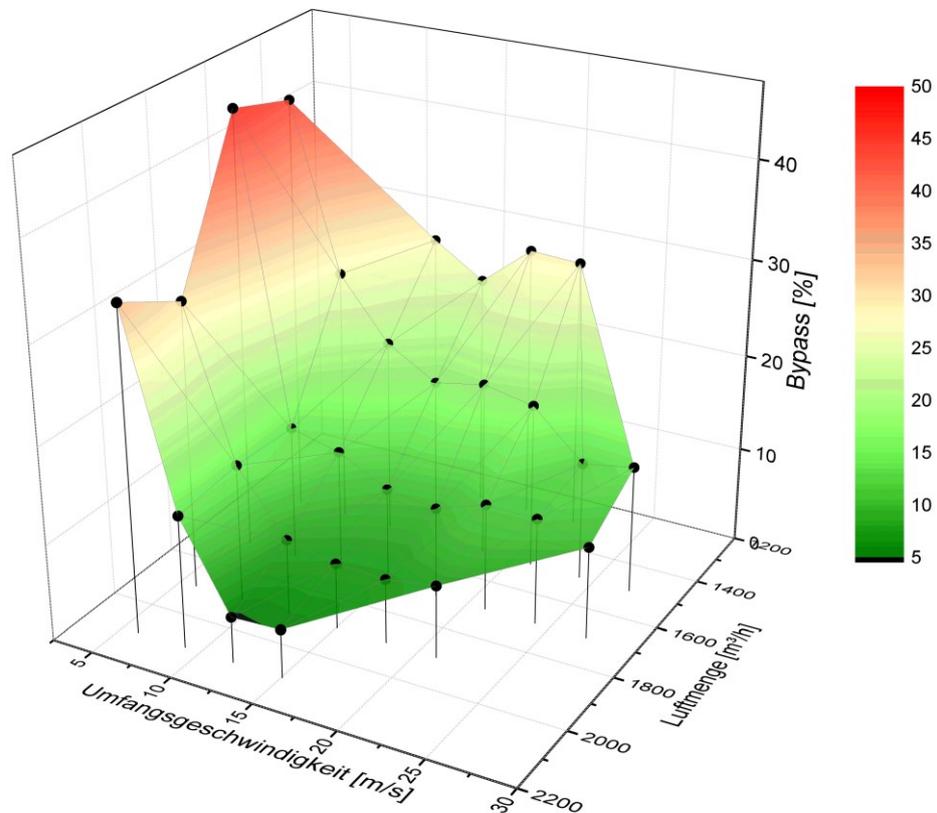


Abbildung 7-3: 3D-Darstellung des Bypass-Kennfelds

Abbildung 7-3 zeigt die Bypass-Werte aufgetragen über dem Parameterkennfeld in einer dreidimensionalen Darstellung. In dieser Ansicht verdeutlicht sich sehr schön der scharfe Anstieg der Bypass-Werte hin zu den größten Trennschnitten des Kennfeldes. Der weniger steile Anstieg hin zu geringen Luftmengen ist ebenfalls gut zu erkennen.

Analysiert man nun die Werte für die Imperfektion, so sieht man in dem in Abbildung 7-4 dargestellten Konturdiagramm eine sehr ähnliche Situation. Die rot dargestellten Datenpunkte zeigen hierbei Betriebspunkte an, an welchen der Bypass-Wert über 25 % liegt. An diesen Punkten ist es daher nicht möglich, einen Wert für die Imperfektion zu errechnen.

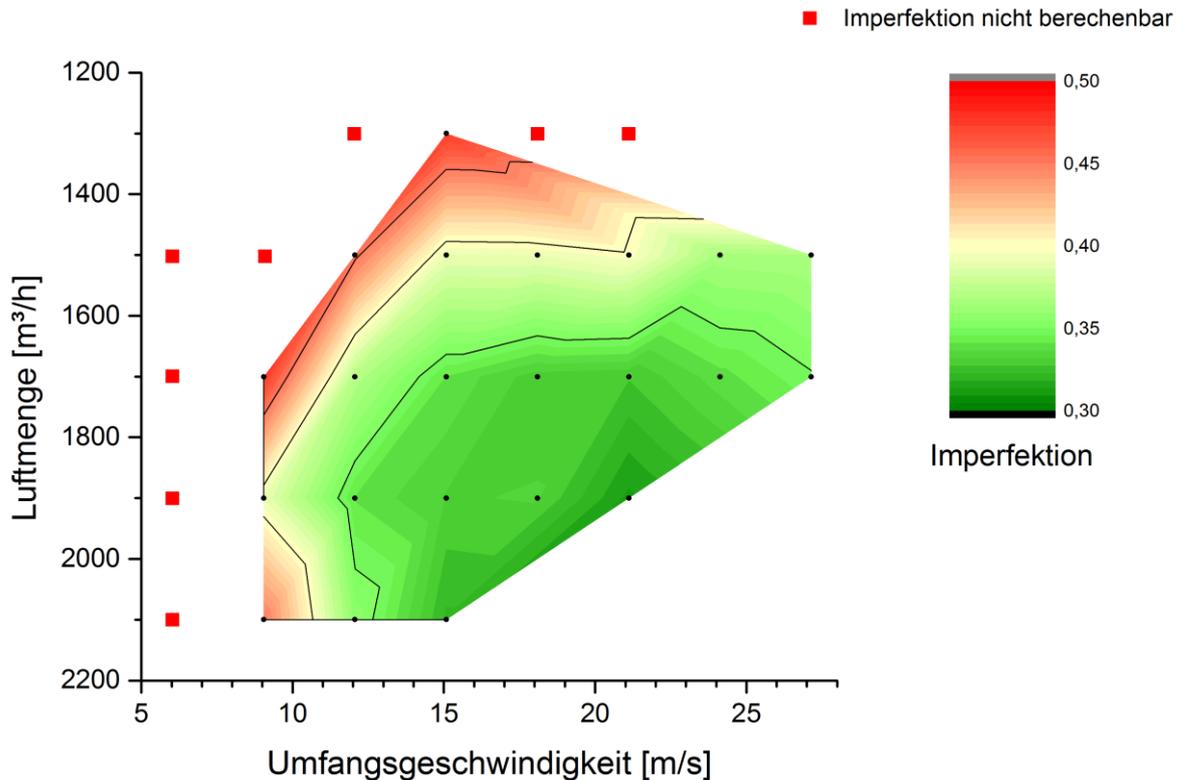


Abbildung 7-4: Konturdarstellung des Imperfektions-Kennfeldes

Aufgrund der hohen Bypass-Werte und der Form des Konturdiagrammes kann geschlossen werden, dass an den rot gekennzeichneten Betriebspunkten die Effizienz hinsichtlich der Trennschärfe ähnlich niedrig oder niedriger ist, als dies an den nächsten Randpunkten der Kontur der Fall ist. Es ist somit auch zu erkennen, dass der optimale Betriebsbereich hinsichtlich der Trennschärfe erst bei Umfangsgeschwindigkeiten größer 15 m/s beginnt und dadurch kleiner ausfällt, als dies in Bezug auf die Bypass-Werte der Fall ist.

Abbildung 7-5 stellt die Werte für die Imperfektion ebenfalls dreidimensional dar. Auch hier ist der sehr steile Anstieg der Werte außerhalb des optimalen Betriebsbereiches sehr gut zu erkennen. Ebenso wie für die Bypass-Werte ist erkennbar, dass bei einer Luftmenge von 1900 m³/h insbesondere im Grobbereich eine höhere Sichteffizienz erreicht wird. Jedoch werden mit dieser Luftmenge auch im Feinbereich sehr gute Sichtergebnisse erzielt. Die Imperfektion für den Bereich von 27 m/s befindet sich unter Berücksichtigung der hohen Produktfeinheiten mit einem Wert kleiner 0,4 wiederum in einem akzeptablen Bereich für ein Aggregat dieser Bauweise.

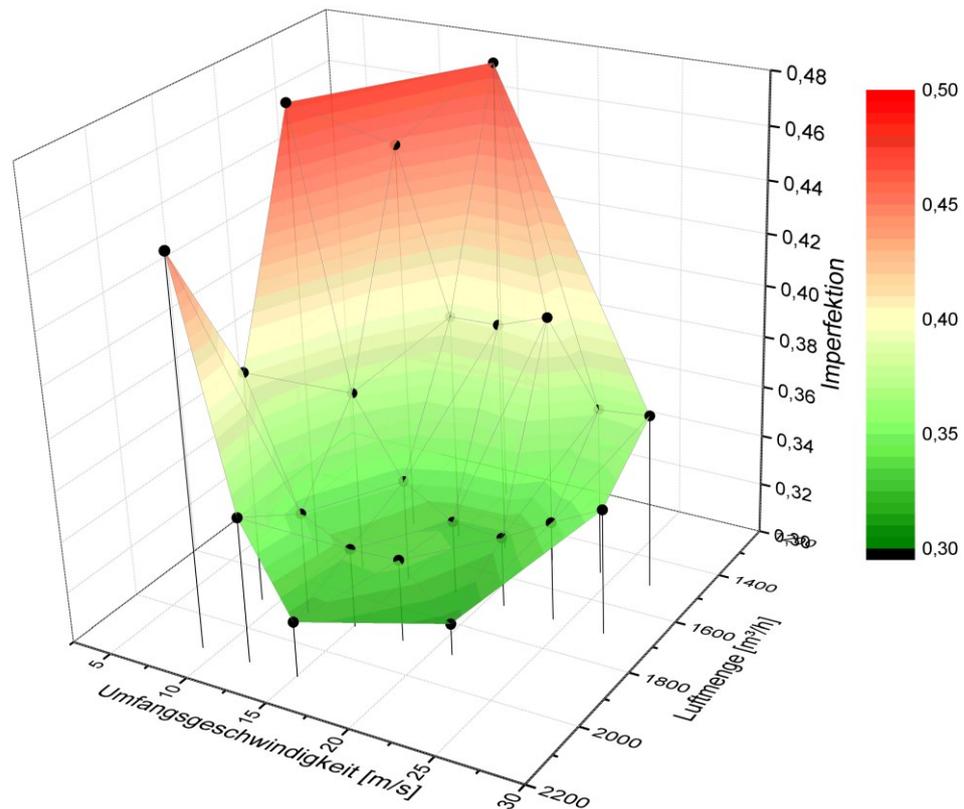


Abbildung 7-5: 3D-Darstellung des Imperfektions-Kennfeldes

7.1.3 Kennfelder der Werte der Partikelgröße und der spezifischen Oberfläche

Bei Betrachtung der in Abbildung 7-6 über dem Kennfeld dargestellten Werte der rechnerischen Trennschnittlage sieht man, dass eine Änderung der Korbgeschwindigkeit einen deutlich höheren Einfluss auf den Trennschnitt hat, als dies bei einer Änderung der Sichtluftmenge der Fall ist.

Die Form dieses Trennschnitt-Kennfeldes findet sich sowohl durch die Messwerte der spezifischen Oberfläche der Feingutprodukte, als auch durch die Verläufe der Partikelgrößenverteilungen bestätigt. Abbildung 7-7 zeigt das Kennfeld der spezifischen Oberflächen aus zwei Blickrichtungen.

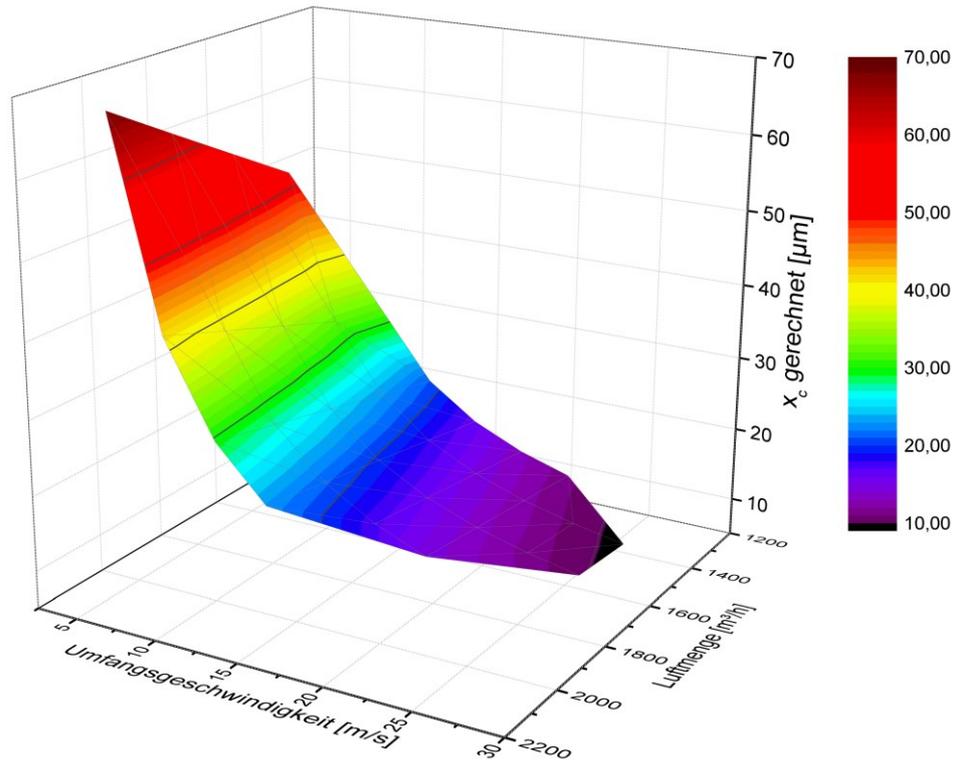


Abbildung 7-6: Rechnerische Trenngrenze über das Betriebskennfeld

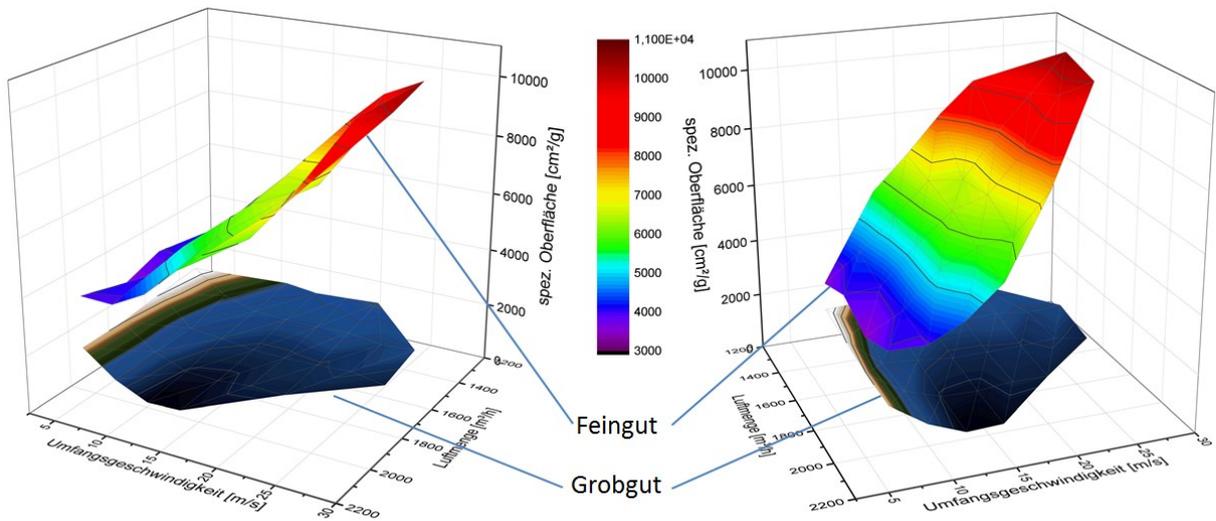


Abbildung 7-7: Kennfelder der Werte der spezifischen Oberfläche

Die obere, rot gefärbte Fläche stellt hierbei die Werte der Feingutproben, die untere, blau gefärbte Fläche die Werte der Grobgutproben dar. Diese Darstellung dient zur Verdeutlichung der Verhältnisse der Feinheiten von Grob- und Feingut. Die Feingutfläche bestätigt die berechneten Werte für den Trennschnitt in der Hinsicht, dass an jenen Stellen des Kennfeldes, wo man feine Trennschnitte findet, auch hohe spezifische Oberflächen im Feingut zu beobachten sind. Die spezifische Oberfläche der Grobgutprodukte verhält sich über das Kennfeld weitgehend gleichmäßig mit einer leichten Tendenz zu niedrigeren Werten, und zwar sowohl bei Erhöhung der Korbgeschwindigkeit als auch bei Erhöhung der Luftmenge. Interessant ist der Bereich niedriger Sichtluftmengen, welcher durch den hellen Teil der Grobgutebene dargestellt ist. Hier steigt die spezifische Oberfläche des Grobgutes deutlicher an, besonders im Zusammenhang mit geringen Korbgeschwindigkeiten. Dies ist konsistent mit den für diese Betriebspunkte ermittelten hohen Bypass-Werte und die somit nicht errechenbaren Imperfektionswerte. Unter diesen Betriebsbedingungen gelingt es also nicht, durch den Sichtprozess dem Grobgut die Feinanteile zu entziehen, was charakteristisch für einen ineffizienten Sichtprozess ist.

Vergleicht man den berechneten Trennschnitt mit Werten der Partikelgrößenverteilungen der Feingutprodukte, so kann man für das eingesetzte Aggregat eine Korrelation mit den x_{85} -Werten dieser Verteilungen feststellen. Dies gilt für den gesamten Bereich der Variation der Sichtluftmenge. Abbildung 7-8 bis Abbildung 7-12 stellen diesen Zusammenhang dar. Bei den Betriebspunkten mit einer Korbgeschwindigkeit von 6 m/s besteht eine gewisse Tendenz, dass die x_{85} -Werte zu feineren Partikelgrößen als errechnet abweichen. Diese Tendenz ist für die Trennschnittlage nach Tromp x_{50} noch viel deutlicher ausgeprägt. Auch diese Werte sind zum Vergleich hier dargestellt. Man kann erkennen, dass diese jedoch eine eindeutige Abhängigkeit von der Sichtluftmenge zeigen. Für einen Wert von 1300 m³/h, welcher unter der Nennluftmenge des Sichters angesiedelt ist, liegen die x_{50} -Werte unter den anderen Werten. Für die Nennluftmenge von 1500 m³/h korrelieren diese mit den anderen Werten. Für jene Luftmengen, welche über der Nennluftmenge liegen, steigen die x_{50} -Werte über die gerechneten Trennschnittwerte, wobei dieser Effekt mit erhöhter Luftmenge zunimmt.

Es zeigt sich somit, dass der berechnete theoretische Trennschnitt für die vorliegenden Versuchsbedingungen hervorragend für eine Voraussage des x_{85} -Wertes der zu erwartenden Feingutverteilung taugt. Die Korrelation mit der Trennschnittlage nach Tromp

zeigt jedoch eine deutliche Abhängigkeit von der Sichtluftmenge, und eignet sich daher nur sehr bedingt für Voraussagen.

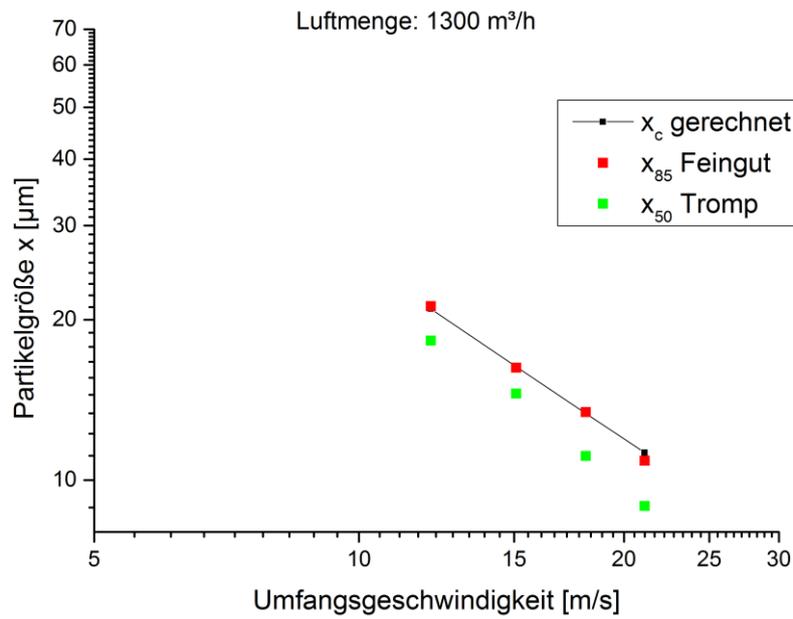


Abbildung 7-8: Korrelation errechnete Trenngrenze mit Feingutwerten (1300 m³/h)

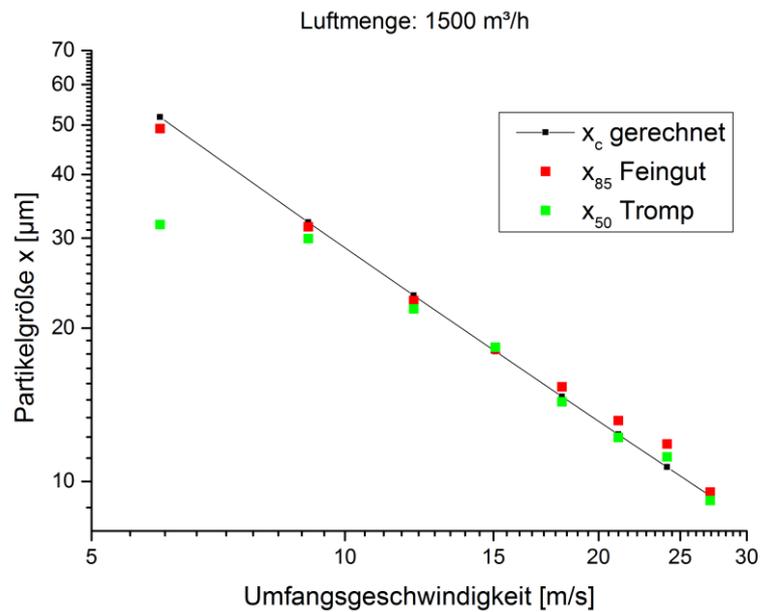


Abbildung 7-9: Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (1500 m³/h)

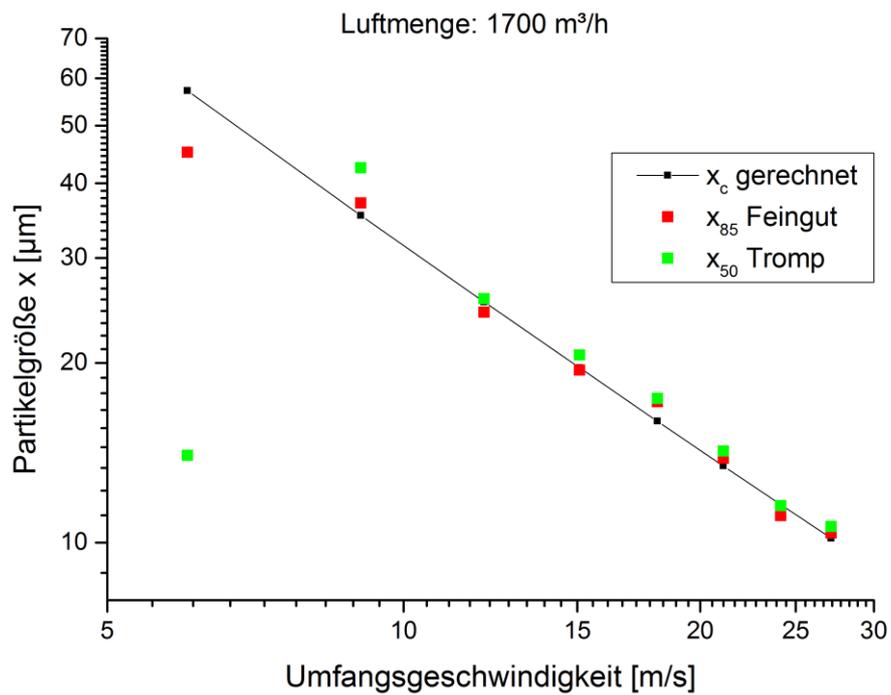


Abbildung 7-10: Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (1700 m³/h)

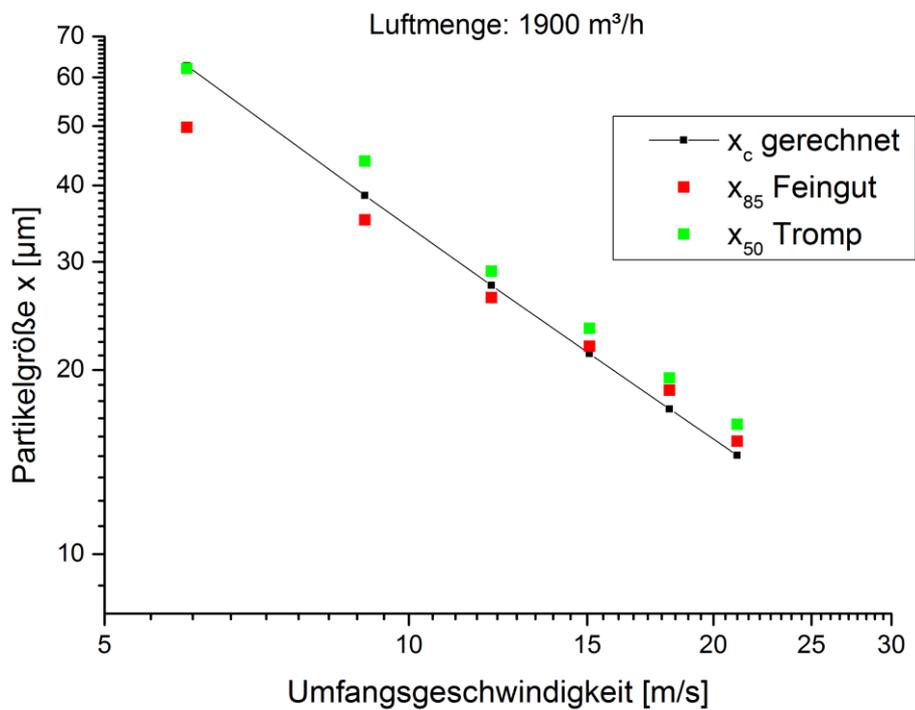


Abbildung 7-11: Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (1900 m³/h)

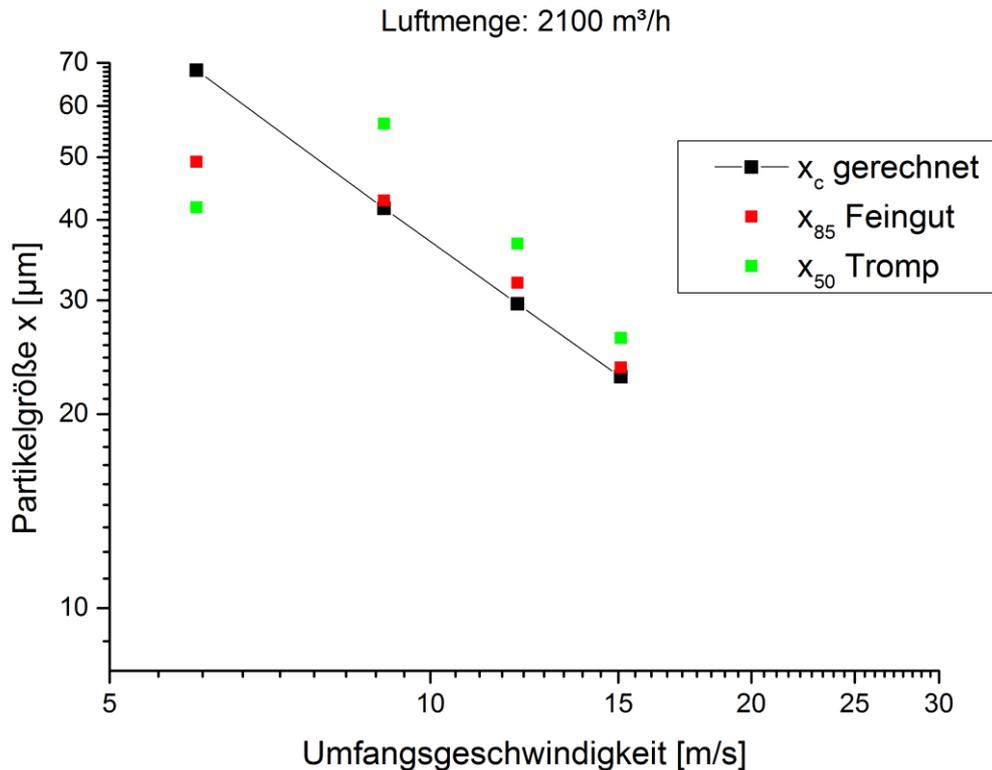


Abbildung 7-12 Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (2100 m³/h)

Die erarbeiteten Versuchsergebnisse zeigen eindeutig, dass die Umfangsgeschwindigkeit des Drehkorbes einen entscheidenden Einfluss auf den Trennschnitt hat und diese das Sichtergebnis, auch hinsichtlich der Sichteffizienz, maßgeblicher beeinflusst, als dies bei der Sichtluftmenge der Fall ist. Da jedoch diese beiden Parameter gemeinsam den Sichtprozess bestimmen, wurde eine Auswertemethode angestrebt, welche diesem Umstand Rechnung trägt. Die angestellten theoretischen Überlegungen zu den Vorgängen im Sichtraum weisen außerdem darauf hin, dass die Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes in Relation zur radialen Strömungskomponente der Sichtluft von hoher Relevanz ist. Um diesen Umstand darzustellen, wurde die Umfangsgeschwindigkeit des Korbes in Relation zur radialen Strömungsgeschwindigkeit der Sichtluft gesetzt und die Abhängigkeit des Trennschnitts von diesem Parameter dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7-13 dargestellt.

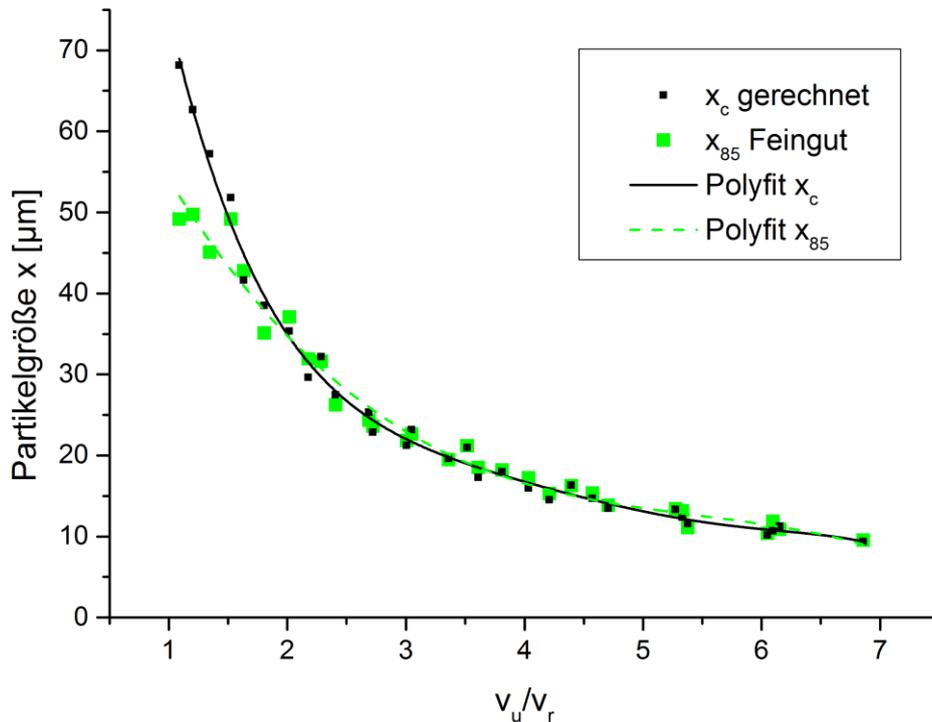


Abbildung 7-13: Partikelgrößen-Korrelation in Abhängigkeit des dynamischen Sichtfeldes

In dieser Darstellung sieht man eindeutig die Abhängigkeit der berechneten Trennschnittlage von diesem Geschwindigkeitsverhältnis sowie die entsprechende Korrelation der x_{85} -Werte. Unter einem Verhältnis von 2 ist eine deutliche Abweichung der beiden Kurven erkennbar. Dies zeigt, dass für den Sichterfolg die Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes von hoher Wichtigkeit ist.

7.1.4 Betrachtung der Masseausbringenswerte des Feingutes

Wie bereits zuvor erwähnt, werden durch den Einsatz verschiedener Ermittlungsmethoden für das Masseausbringen unterschiedliche Werte erzielt. Abbildung 7-14 stellt diese Unterschiede dar, wobei die Differenz aus dem Masseausbringen für das Feingut in %-Form errechnet wurde und daher in diesem Diagramm in Form von %-Punkten angegeben wird.

Auch hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes. Die Werte für ein Verhältnis über 3 stellen sich konstant dar, während darunter die

Abweichungen vom negativen Bereich in den positiven umschlagen. Das bedeutet, dass für Betriebspunkte mit gut ausgeprägtem Sichtfeld die Methode der Ermittlung des Masseausbringens über eine Berechnung aus den Partikelgrößenverteilungen das Feingutausbringen überschätzt. Ist das dynamische Sichtfeld nicht gut ausgeprägt, so kehrt sich dieses Verhältnis um und die Berechnungsmethode unterschätzt den Feingutanteil. Dies beeinflusst auch die Unterschiede zwischen den mittels der verschiedenen Masseausbringenswerte für diese Betriebspunkte errechneten Trennkurven. Sobald die Differenz in den positiven Bereich umschlägt, stellen die Trennkurven, welche unter Verwendung der durch Wägung ermittelten Masseausbringenswerte errechnet wurden, das Trennverhalten als effizienter dar, als jene der anderen Berechnungsmethode. Somit tritt auch hinsichtlich des Vergleichs der Trennkurvenergebnisse eine Umkehr auf. Daher ist in diesem Bereich Vorsicht bei der Bewertung der Trennkurven geboten.

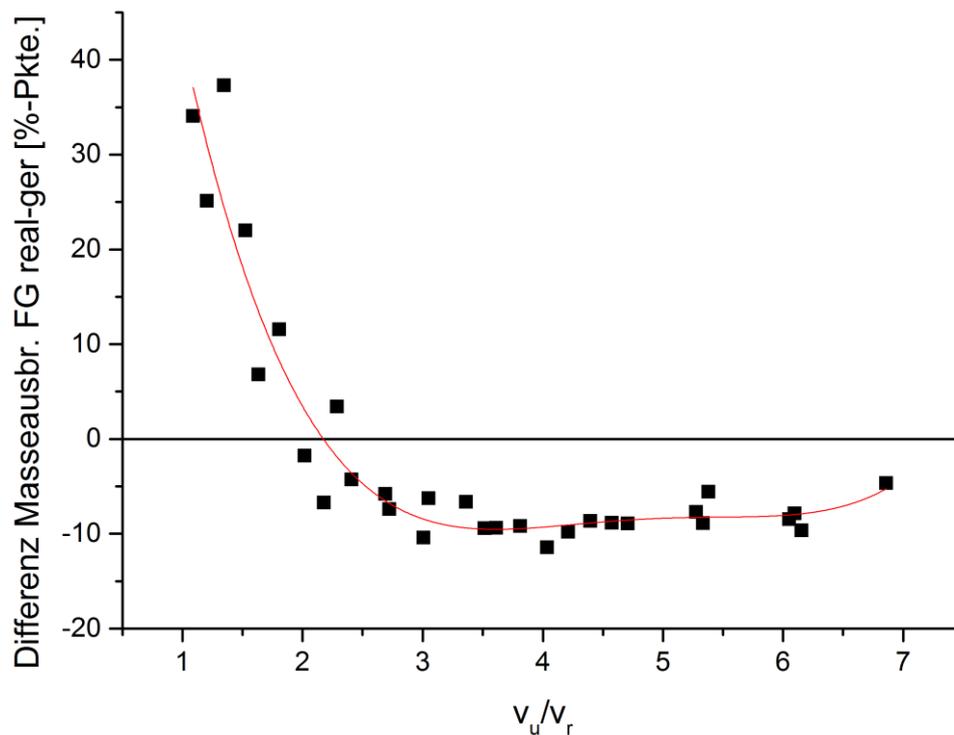


Abbildung 7-14: Differenz Masseausbringen gewogen-gerechnet abhängig vom dynamischen Sichtfeld

7.2 CFD-Simulationen

Im Zuge der hier dargestellten Forschungsaktivitäten wurden auch Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt, welche von der Firma aix-process mit Sitz in Aachen in enger Kooperation mit dem Autor dieser Arbeit unter Einsatz der Software ANSYS FLUENT ausgeführt wurden. Folgende grundsätzlichen Annahmen hinsichtlich der Strömung wurden bei der Modellierung getroffen:

- Inkompressibel
- Adiabat
- Turbulent (k- ϵ -Modell)

Für die Simulationen von Strömungen ohne Partikelbeladung wurden zusätzlich folgende Punkte festgelegt:

- Einphasige Strömung
- Stationär
- Diskretisierung: second order bzw. QUICK

Für die Simulationen von Strömungen mit Partikelbeladung wurden hingegen folgende Punkte zusätzlich festgelegt:

- DPM Modellierung (Discrete Phase Model – Zweiphasenmodell)
- Strömung stationär, Partikel instationär
- Two way coupling
- 1 Partikel-Iterationsschritt nach 50 Iterationen der Gasphase
- Zeitschritt Partikelberechnung 0,001 s
- Diskretisierung: first order und PRESTO!

Es wurden bereits im Vorfeld dieser Forschungsarbeit CFD-Simulationen durchgeführt. Ein kurzer Auszug daraus soll an dieser Stelle die Möglichkeiten aufzeigen, die diese Art der Simulation bietet, um Ansatzpunkte für Optimierungen zu identifizieren.

Abbildung 7-15 zeigt einen Schnitt durch das Gehäuse eines Sichters der Baureihe QDK mit einem Korbdurchmesser von 2,95 m. Die Farbskalierung zeigt eine Konturdarstellung der Tangentialgeschwindigkeit der Strömung. Die Geschwindigkeits-Skalierung in diesen Bildern ist unterschiedlich und daher nicht direkt vergleichbar. Diese Gegenüberstellung soll jedoch an dieser Stelle auch nur dazu dienen zu zeigen, dass über

Geometrieänderungen eine deutliche Vergleichmäßigung der Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit im Strömungsfeld und somit auch eine Vergleichmäßigung der Luftmenge um den Umfang zu erzielen ist

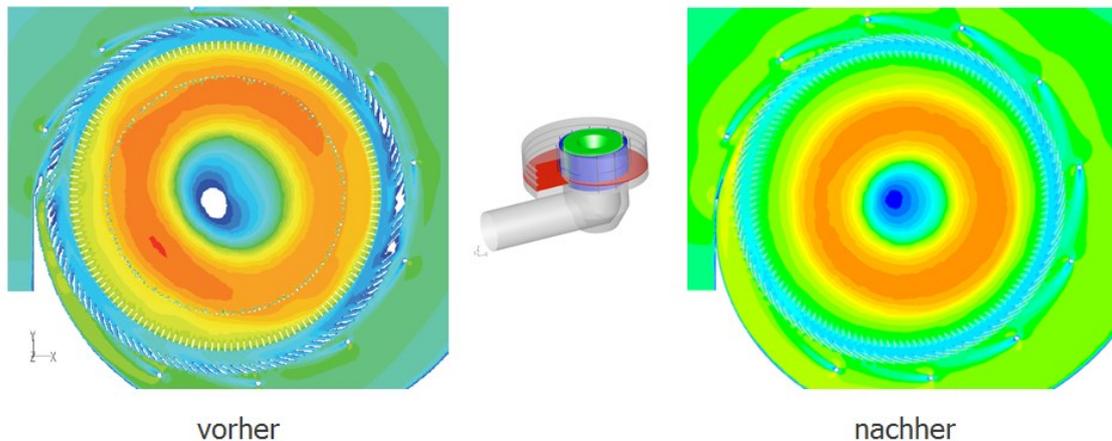


Abbildung 7-15: Strömungsfeld in einem Sichter der Baureihe QDK mit Korbdurchmesser 2,95 m [4]

In Abbildung 7-16 ist der Bereich am Eintritt des Spiralgehäuses dargestellt. Die Farbskalierung für die Geschwindigkeit ist wiederum in den Darstellungen für den Zustand vor und nach der Optimierung unterschiedlich und daher nicht direkt vergleichbar. Es ist jedoch schön zu erkennen, welche positiven Einfluss die Abänderung der Geometrie auf die Gleichmäßigkeit der Strömung hat. Besonders die durch die Pfeile markierten Rückströmgebiete zwischen den Leitschaufelblechen konnten über eine Anpassung des Spiralgehäuses in diesem Bereich eliminiert werden. Ebenso konnten Adaptierungen am Leitschaufelkranz und der Korbgeometrie für eine Verbesserung der Strömungsbedingungen im Sichtertraum sorgen.

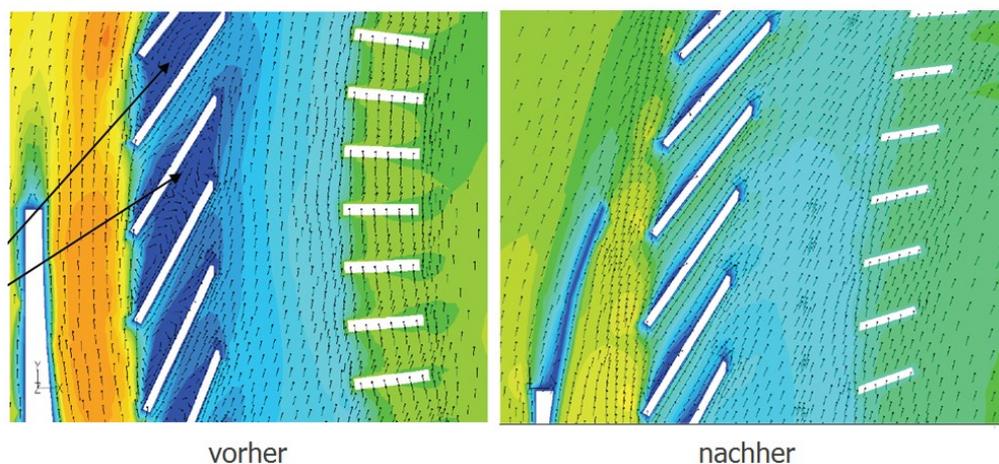


Abbildung 7-16: Strömungsbedingungen in Leitschaufelkranz und Sichtertraum

Fraktionen %	Klassen [µm]	arithmetisches Mittel [µm]	Simulations-KG [µm]
12,03	0 - 3,0	1,5	1,5
9,57	3,0 - 6,2	4,6	4,5
7,53	6,2 - 10,0	8,1	8
16,50	10,0 - 21,0	15,5	15
21,84	21,0 - 42,0	31,5	31
23,28	42,0 - 86,0	64	60
8,18	86,0 - 146,0	115	110
1,07	146,0 - 206,0	176	176

Tabelle 7-2: Partikelgrößenverteilung für die Simulation

Die Partikel wurden im Falle der Simulation der partikelbeladenen Strömung im Ringspalt oberhalb des Sichtraumes eingetragen. Als Startgeschwindigkeit wurde die Umfangsgeschwindigkeit des Korbes gewählt. Die Verteilung über den Ringspalt in radialer Richtung wurde mit einer höheren Gewichtung am äußeren Rand gewählt. Über den Umfang wurden die Partikel statistisch mit einer vorgegebenen Frequenz eingebracht. Abbildung 7-18 stellt die dazugehörigen geometrischen Verhältnisse dar. Der Partikelmassenstrom wurde mit 44 kg/min angenommen, was 2640 kg/h entspricht. Die Partikeldichte wurde auf 3110 kg/m³ festgelegt. Als Lufttemperatur wurden 20°C festgelegt.

Abbildung 7-19 stellt das Strömungsfeld am gleichen Betriebspunkt wie zuvor dar, jedoch mit Partikelbeladung. Es ist gut zu erkennen, dass die Partikel eine bedeutende Wirkung auf die Strömungszustände haben. Es kommt zu einer Geschwindigkeitserhöhung zum Ende der Spirale hin. Weiters entstehen am Austritt des Leitschaufelkranzes dunkelblau dargestellte Rezirkulationsgebiete. Deren Lage und Intensität verändert sich während der Simulation, da es sich hier um die Momentaufnahme einer instationären Rechnung handelt.

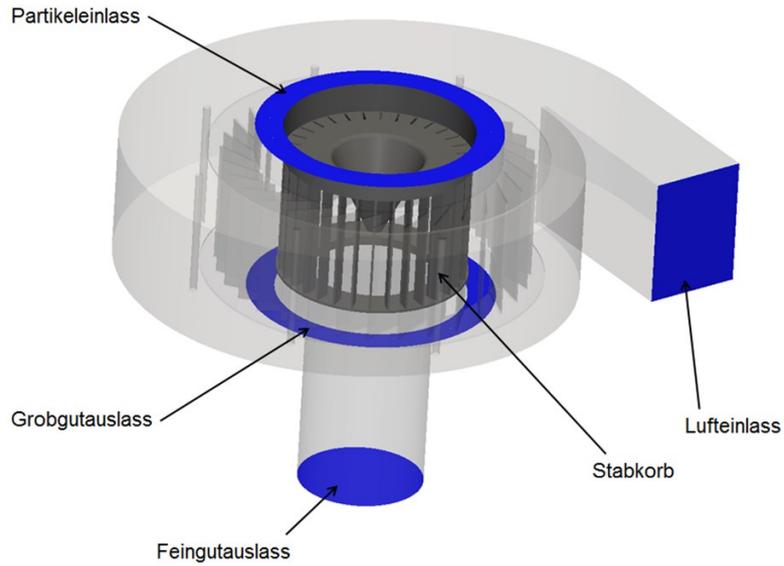


Abbildung 7-18: geometrische Verhältnisse des Strömungsmodells

Sichtluftmenge: 1500 m³/h
 Korbgeschwindigkeit: 9 m/s
 Partikelbeladene Strömung

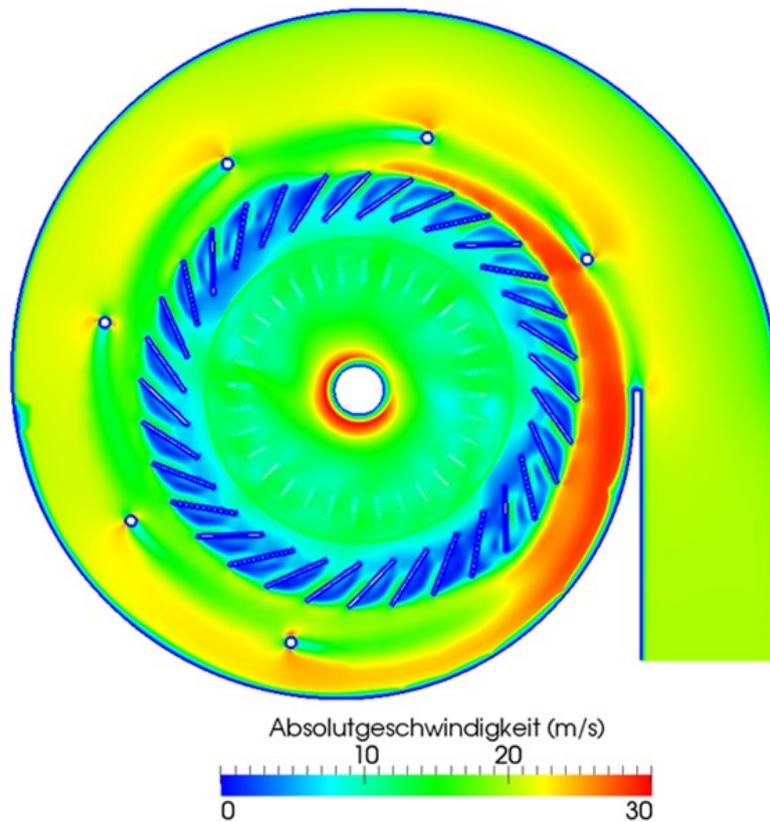


Abbildung 7-19: Strömungsfeld mit Partikelbeladung (1500 m³/h)

In weiterer Folge wurden aufgrund zu diesem Zeitpunkt bereits vorliegender Versuchsergebnisse die Betriebsparameter für den anschließenden Vergleich mit Versuchsergebnissen auf eine Sichtluftmenge von 1700 m³/h und eine Korbgeschwindigkeit von 15 m/s abgeändert. Die Strömung verhält sich unter diesen Bedingungen im beladenen Zustand sehr ähnlich den Bedingungen am vorigen Betriebspunkt (Abbildung 7-20). Es ist auch hier zu beachten, dass die Farbskalierung der Geschwindigkeiten unterschiedlich ist.

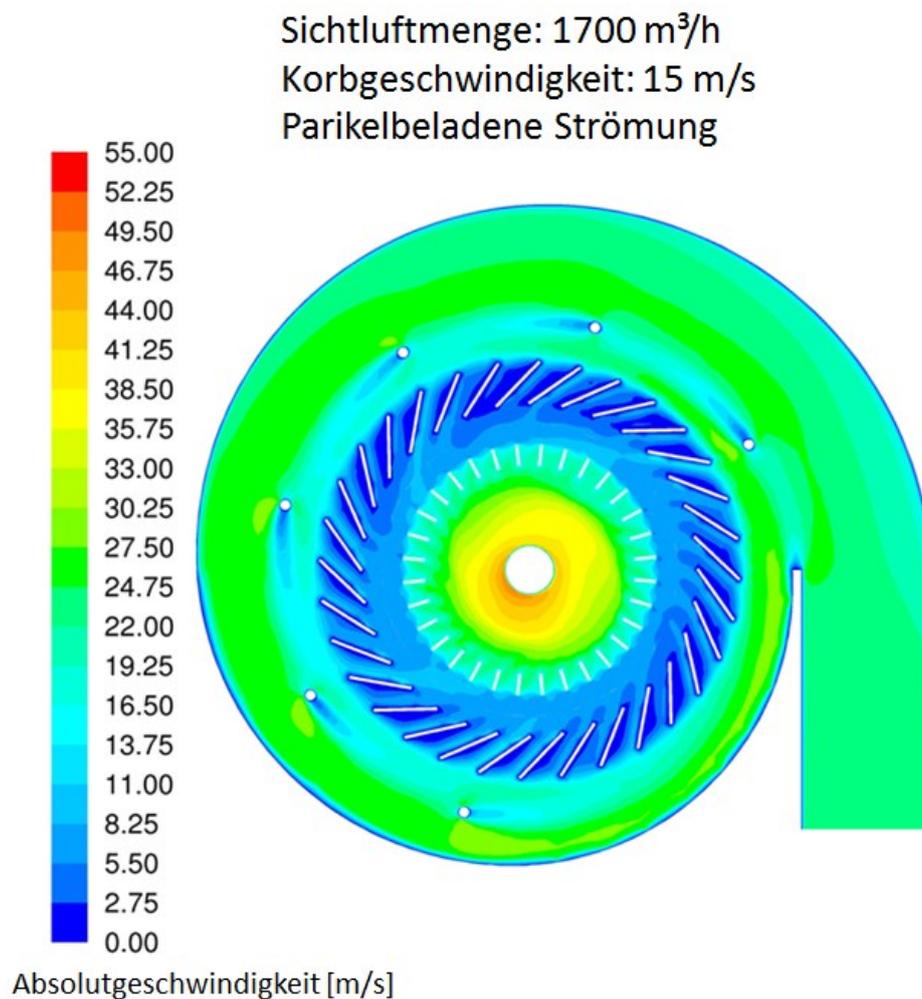


Abbildung 7-20: Strömungsfeld mit Partikelbeladung (1700 m³/h)

Die Partikelgrößenverteilungen für das simulierte Sichtergebnis wurden durch numerisches Auszählen der in der Berechnung in das Grob- und Feingut gelangten Partikel erstellt. Aus diesen Verteilungen wurde eine Trennkurve errechnet, welche im

Anschluss mit der Trennkurve des entsprechenden Technikumsversuches verglichen wurde (Abbildung 7-21), wobei diese Darstellung bereits im Vorfeld dieser Arbeit veröffentlicht wurde [7]. Nach Auswertung des ersten CFD-Ergebnisses wurde versucht, über Modifizierung des Simulationsmodells eine Annäherung an die Kurve des Technikumsversuches zu erzielen. Im Bereich über 10 μm konnte dadurch eine gute Anpassung erreicht werden. Für Partikelgrößen, welche unter diesem Wert liegen, kann das eingesetzte Modell die Vorgänge jedoch nur unzureichend abbilden. Interpartikuläre Wechselwirkungen werden in den vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt. Daher wird die Effizienz der Sichtung von der Simulation in diesem Bereich deutlich überschätzt und ein Bypass-Wert von 0 % erreicht. Dies zeigt wiederum deutlich, dass in diesem Bereich die Anziehungskräfte zwischen den Partikeln von entscheidender Bedeutung für den Sichtprozess sind.

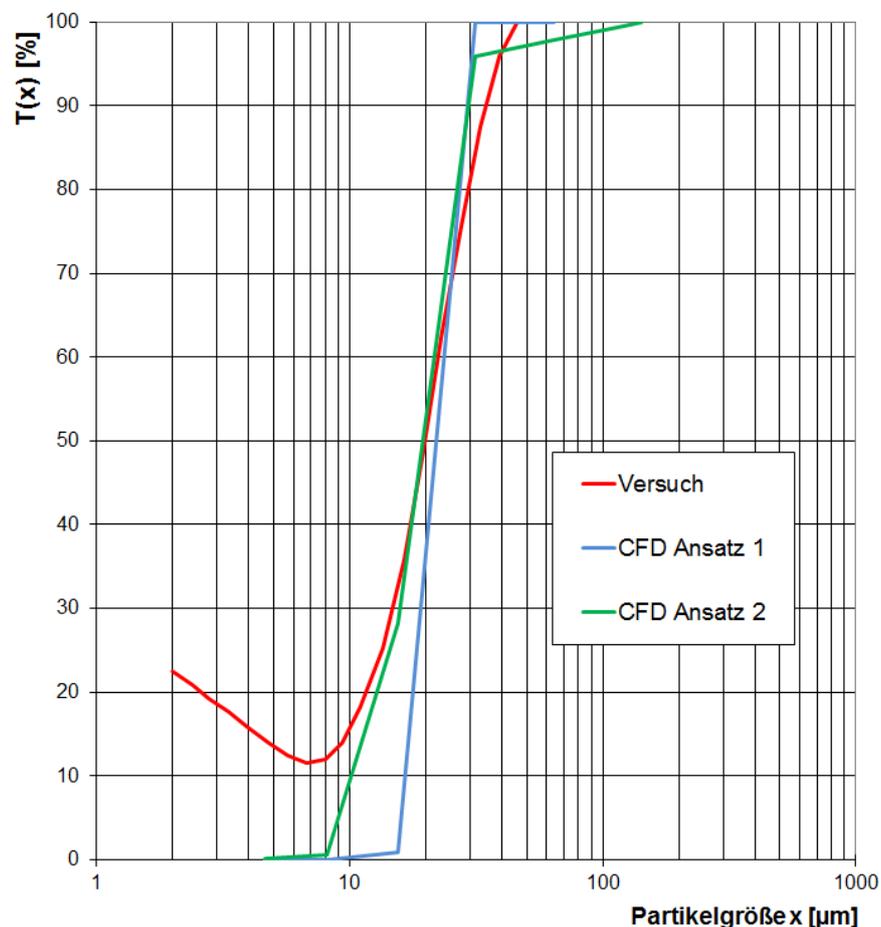


Abbildung 7-21: Vergleich simulierter und versuchstechnisch ermittelter Trennkurven

7.3 Einfluss der Aufgabestellen

Untersuchungen zum Dispergierverhalten des Streutellers wurden bereits in einer Masterarbeit am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung angestellt [5]. Hierbei wurde Material auf einen separat angeordneten Dispergierteller aufgegeben und die Abwurfcharakteristik über eine Auffangvorrichtung, welche über den Umfang in acht Sektoren geteilt wurde, unter verschiedenen Bedingungen analysiert. Abbildung 7-22 zeigt komprimiert die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Das Versuchsmaterial wurde dabei über Sektor Nummer 1 aufgegeben. Es konnte festgestellt werden, dass der eingesetzte Dispergierteller mit einem Durchmesser von 680 mm das Material tendenziell gegenüber der Aufgabestelle abwirft. Über die hier dargestellte Modifikation des Auslassstutzens konnte eine Verbesserung der Charakteristik hin zu einem gleichmäßigeren Abwurfbild erzielt werden.

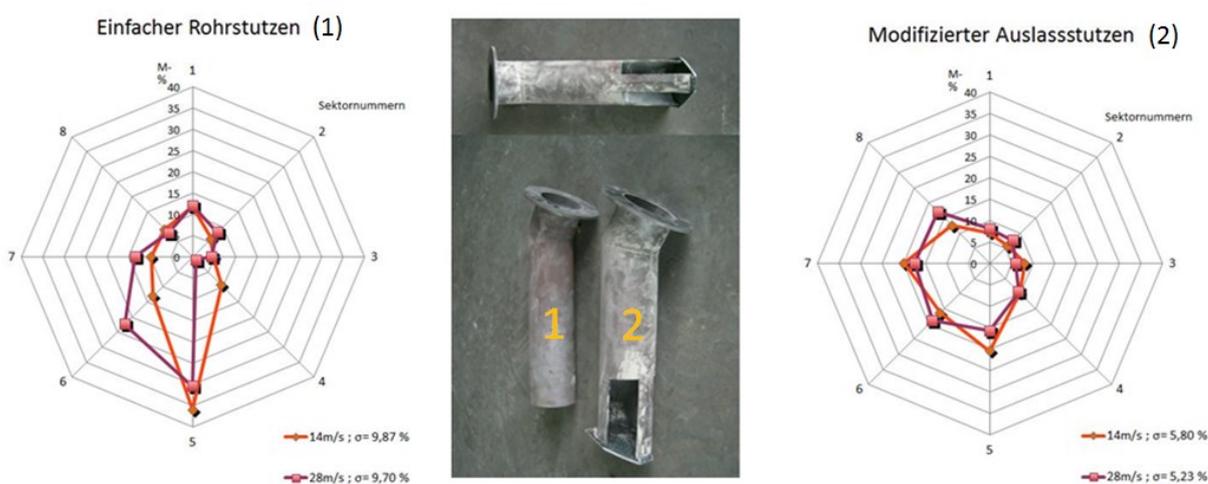


Abbildung 7-22: Ergebnisse der Streutellerversuche

Diese Betrachtung hat allerdings den Nachteil, dass sie entkoppelt von den anderen Teilprozessen des Sichtvorganges angestellt wurde und somit die Wechselwirkungen vernachlässigt werden. Dies ist immer der Fall, wenn ein einzelner Teilprozess zur separaten Betrachtung extrahiert wird. Um die Betrachtungsweise zu erweitern, wurden im Zuge dieser Arbeit daher auch Versuche zum Sichtverhalten in Abhängigkeit des Aufgabepunktes durchgeführt, wobei die Aufgabepunkte der Technikumsanlage als

einfache Rohrstutzen ausgeführt sind. Abbildung 7-23 zeigt die Ergebnisse dieser Versuche. Es ist dabei deutlich zu sehen, dass die Positionierung des Aufgabepunktes einen starken Einfluss auf die Sichtgüte hat. Es ist anzunehmen, dass der deutlich kleinere Dispergierteller des Versuchssichters das Material weniger weit mitnimmt, als dies im Falle der zuvor erwähnten Streutellerversuche geschehen ist. Daher wird der Abwurf des in Aufgabepunkt 1 in den Sichter eingebrachten Aufgabegutes eher im Bereich vor Aufgabepunkt 2 stattfinden. Betrachtet man in dieser Hinsicht nun das Strömungsfeld im Sichtraum, so fällt auf, dass dieses an eben dieser Stelle geringere Geschwindigkeiten aufweist. Im Falle, dass die Materialaufgabe ausschließlich über Punkt 1 erfolgt, stellt sich daher ein deutlich ineffizienteres Sichterergebnis ein, als dies in Punkt 2 der Fall ist. Erfolgt die Materialaufgabe über beide Punkte, so stellt sich ein Ergebnis ein, welches inmitten dieser beiden Extreme liegt.

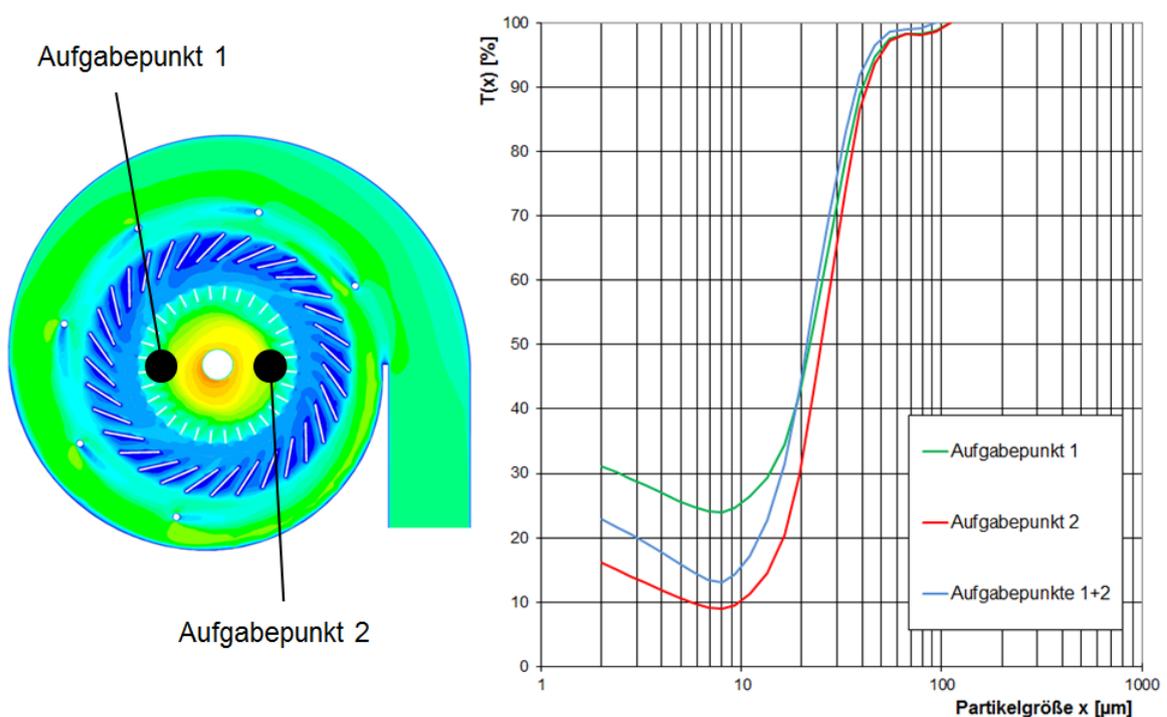


Abbildung 7-23: Einfluss der Aufgabestelle unter Berücksichtigung der Strömungsbedingungen

Abbildung 7-24 stellt die Unterschiede bezüglich der beiden Aufgabepunkte zusätzlich für verschiedene Korbumfangsgeschwindigkeiten dar. Auch unter diesen Bedingungen lässt sich der Effekt in gleichem Ausmaß beobachten.

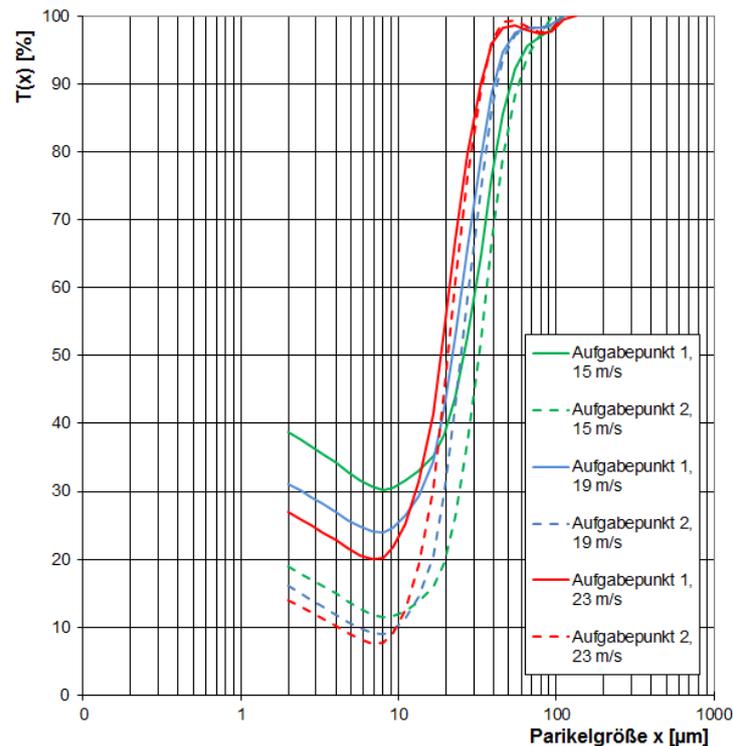


Abbildung 7-24: Einfluss der Aufgabestelle unter Variation der Korbgeschwindigkeit

7.4 Vergleich mit dem industriellen Maßstab

In den theoretischen Betrachtungen dieser Arbeit wurden die Effekte beim Scale-up bereits intensiv diskutiert. Um den entsprechenden Bezug der auf der Technikumsanlage erarbeiteten Ergebnisse zu industriell eingesetzten Größenordnungen herzustellen, werden in den folgenden Abbildungen die Ergebnisse der Beprobung von drei Sichern unterschiedlicher Baugröße dargestellt, welche sich im Einsatz in Zementmahanlagen befinden. Dazu wurde der errechnete theoretische Trennschnitt x_c den x_{95} - und x_{98} -Werten der Feingutkurven gegenüber gestellt.

Im Technikumsmaßstab erfolgte der Vergleich des theoretischen Trennschnitts zu den x_{85} -Werten der Feingutkurve. Es ist bei den größeren Baureihen also eine deutliche Verschiebung zu erkennen. Im Falle des Sickers der Baureihe QDK 82,6 ist noch abhängig von der Korbgeschwindigkeit eine Korrelation zwischen x_c und x_{95} bzw. x_{98} zu sehen. Für die beiden Sicker der größeren Baureihen ist hingegen eine eindeutige Korrelation von x_c mit x_{98} der Feingutkurve zu erkennen. Somit kann die berechnete

theoretische Trenngrenze bei Sichern größerer Baureihen hervorragend zur Abschätzung des angestrebten Top-cuts herangezogen werden.

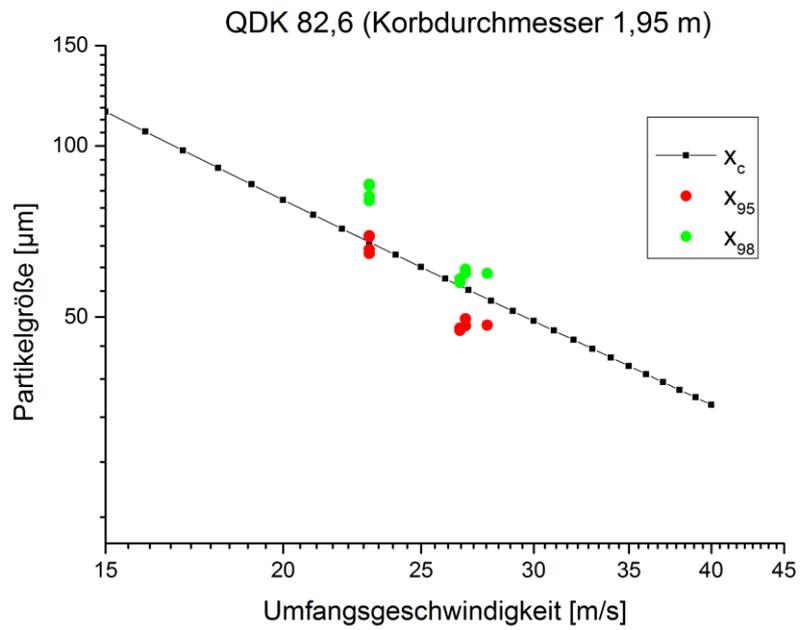


Abbildung 7-25: Korrelation gerechneter Trennschnitt - gemessene Partikelgrößenwerte QDK 82,6

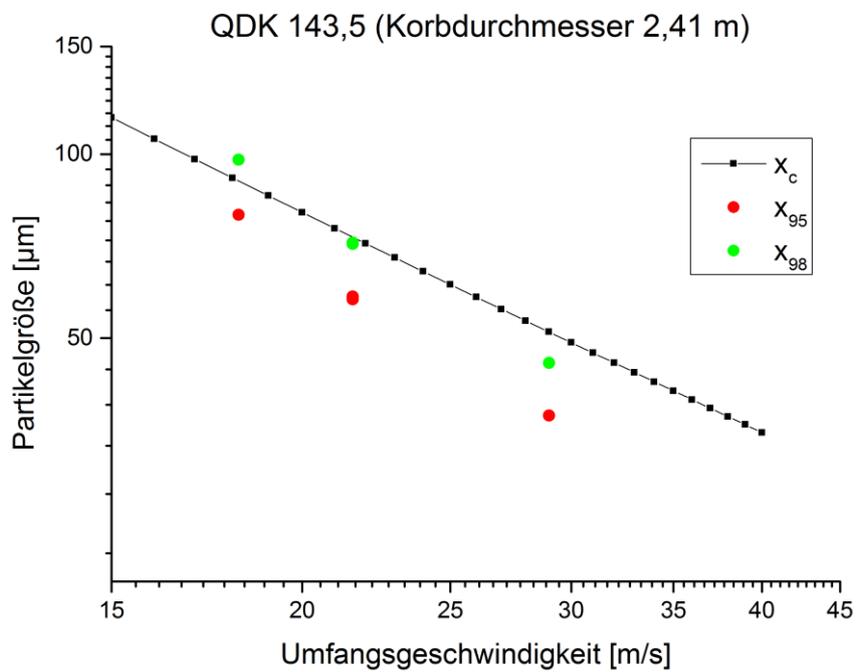


Abbildung 7-26: Korrelation gerechneter Trennschnitt - gemessene Partikelgrößenwerte QDK 143,5

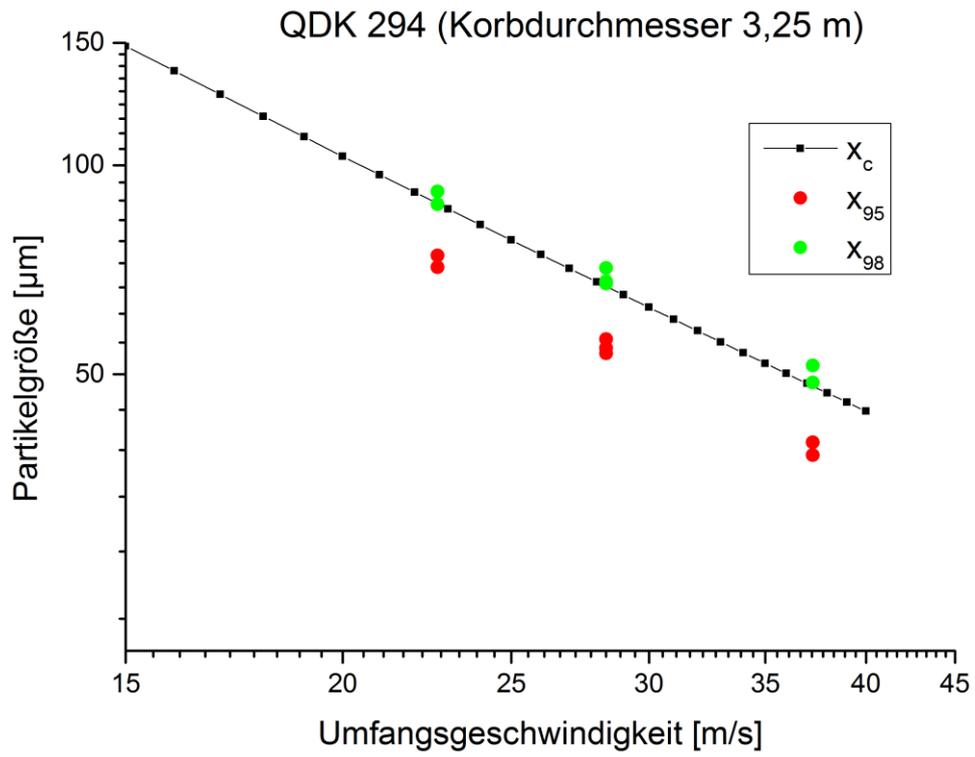


Abbildung 7-27: Korrelation gerechneter Trennschnitt - gemessene Partikelgrößenwerte QDK 294

8 Diskussion und Ausblick

Im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit konnten vertiefende Erkenntnisse zu den Vorgängen des Sichtprozesses gewonnen werden. Die Feststoffbeladung der Sichtluft ist ein oft diskutiertes Kriterium im Zuge der Auslegung von Sichteranlagen. Anhand der Ergebnisse der Technikumsversuche konnte durch Variation der Feststoffbeladung gezeigt werden, dass diese innerhalb gewisser Grenzen zu keinen nennenswerten Veränderungen in der Sichteffizienz führten.

Die Versuchsarbeit zur Charakterisierung des Sichtverhaltens über das gewählte Parameterkennfeld führte zu eindeutigen Ergebnissen hinsichtlich der Sichteffizienz in den unterschiedlichen Betriebsbereichen. Die entsprechenden Darstellungen der Bypass- und Imperfektionswerte weisen den optimalen Betriebsbereich der Technikumsanlage eindrucksvoll aus. So konnte ermittelt werden, dass Sichter mit geringem Korbdurchmesser im Bereich grober Trennschnitte keine optimalen Trennergebnisse erzielen, was auch durch eine alleinige Erhöhung der Sichtluftmenge nicht zu beheben ist. Die optimalen Betriebsbereiche, welche durch geringen Bypass und niedrige Werte der Imperfektion gekennzeichnet sind, zeigen hierbei eine große Ähnlichkeit, wobei die Werte der Imperfektion in einem kleineren Bereich als optimal zu bezeichnen sind.

Die Berechnung der theoretischen Trenngrenze wurde ausführlich dargestellt. Um diese für Voraussagen bezüglich des zu erwartenden Sichterergebnisses heranzuziehen, wurde im Zuge der Bewertung der Ergebnisse des Parameterkennfeldes darauf abgezielt, eine Korrelation unterschiedlichster Messwerte mit eben dieser berechneten Trenngrenze herzustellen. Ein Vergleich mit den Werten der spezifischen Oberfläche der Feinprodukte konnte zeigen, dass in Bereichen feiner errechneter Trennschnitte auch die spezifische Oberfläche der Feingutprodukte hohe Werte erreicht. Von größerem Interesse ist jedoch die Korrelation der theoretischen Trenngrenze mit den x_{85} -Werten der gemessenen Partikelgrößenverteilungen der Feingutprodukte. Diese ist beinahe über den gesamten Bereich des Kennfeldes feststellbar, wobei lediglich in Bereichen niedriger Sichteffizienz in dieser Hinsicht Abweichungen feststellbar sind. Für die Technikumsanlage ist somit unter Anwendung dieser Korrelation eine Voraussage der zu erwartenden Feingutkurve mit Hilfe der rechnerischen Trenngrenzenermittlung möglich. An dieser Stelle findet man auch einen geeigneten Ansatz für Vergleiche mit Sichtern größerer Baureihen, welche in industriellem Maßstab zum Einsatz kommen. Durch die Auswertung von Daten, welche durch Beprobung im industriellen Betrieb befindlicher Sichter gewonnen wurden, konnten

vergleichende Korrelationsanalysen erstellt werden. Diese zeigen eine ähnliche Korrelation zwischen der errechneten Trenngrenze und Parametern der Feingutkurve, es findet jedoch mit steigender Baugröße eine Verschiebung hin zu den x_{98} -Werten der Partikelgrößenverteilung des Feingutes statt. Somit ist für die Sichter der größeren Baureihen eine hervorragende Prognose hinsichtlich des zu erwartenden Top-cuts möglich. Versucht man hingegen, die Trennschnittlage nach Tromp mit dem errechneten Trennschnitt zu vergleichen, so zeigt sich, dass dieser Parameter deutliche Schwankungen und eine geringe Korrelation aufweist. Es ist daher nicht sinnvoll, die errechneten Werte für eine Prognose der Trennschnittlage nach Tromp heranzuziehen.

Die Abhängigkeit der beschriebenen Korrelation von der Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes konnte ebenfalls deutlich dargestellt werden. Dies ist ein wichtiger Hinweis auf die entscheidende Bedeutung des Verhältnisses zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Drehkorbes und jener radialen Geschwindigkeit, mit welcher die Sichtluft in den Korb einströmt. Die passende Abstimmung dieses Verhältnisses konnte somit als ein grundlegender Ansatz für die Auslegung von Drehkorbsichtern identifiziert werden. Dies hat auch Auswirkungen auf die Betrachtung der stoßfreien Anströmung des Drehkorbes. In der Praxis konnte dieser Ansatz von den Sichterergebnissen nicht bestätigt werden. Diese weisen im Zusammenhang mit der Analyse der Simulationen des Strömungsfeldes eher darauf hin, dass diese Wirbel im Sichtprozess nicht in der von Legenhausen in Strömungsversuchen ermittelten Intensität auftreten. Eine Annäherung an die stoßfreie Anströmung wird nur in Bereichen grober Trennschnitte erreicht, wo jedoch die schlechtesten Ergebnisse der Sichteffizienz erreicht wurden. Somit dürfte der Vorgang der Beschleunigung der Wirbelströmung bei Annäherung an den Drehkorb, welche durch die Wirkung der Starrkörperrotation zwischen den Korbstäben auf den Potentialwirbel im Sichtraum verursacht wird, im Bereich der betrachteten Trenngrenzen und Strömungsgeschwindigkeiten einen positiven Einfluss auf den Sichtprozess haben.

Ein weiteres interessantes Ergebnis konnte durch vergleichende Betrachtung von mit unterschiedlichen Methoden ermittelten Masseausbringenswerten erzielt werden. Es zeigte sich auch hier eine Abhängigkeit von der Ausprägung des dynamischen Sichtfeldes. Im Bereich einer guten Ausprägung konnte festgestellt werden, dass die Berechnung des Masseausbringens mithilfe der Partikelgrößenverteilungen konstante Abweichungen zu den über Wägung ermittelten Werten aufweist. Die errechneten Werte überschätzen hierbei die tatsächlich ausgebrachten Feingutmengen. Dies ist besonders bedeutsam, da in Anlagen im industriellen Maßstab meistens nicht die Möglichkeit

besteht, das Masseausbringen der Sichtprodukte mittels Wägung exakt zu bestimmen. Daher ist man auf die rechnerische Ermittlung angewiesen. Die Versuchsergebnisse konnten somit einen wertvollen Hinweis bezüglich der Bewertung von rechnerisch ermittelten Ergebnissen liefern.

Unter Anwendung von CFD-Simulationen wurde eine Charakterisierung des Strömungsfeldes der Technikumsanlage vorgenommen und darauf aufbauend Simulationen partikelbeladener Strömungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden in Relation zu Versuchsergebnissen der Technikumsanlage gestellt und konnten zeigen, dass das eingesetzte Simulationsmodell in der Lage ist, die Vorgänge oberhalb einer Partikelgröße von 10 μm zufriedenstellend darzustellen. Unterhalb von 10 μm kommt es zu Abweichungen, deren Ursache in der fehlenden Möglichkeit, interpartikuläre Kräfte und andere Wechselwirkungen zwischen den Partikeln zu berücksichtigen, begründet ist. Mit der Aussicht, dass die Rechenkapazitäten für Simulationen in naher Zukunft weiter rapide ansteigen werden, empfiehlt es sich, den Simulationsansatz mit einem anderen Modell – z.B. Discrete Elements Method (DEM) – weiter zu verfolgen.

In Zusammenschau mit den Simulationsergebnissen hinsichtlich des Strömungsfeldes konnten auch Versuche zum Einfluss des Aufgabepunktes wertvolle Ergebnisse liefern. Der Einfluss der Position der Aufgabestelle war hierbei höher als erwartet, was insbesondere in der Kombination mit der Ausprägung der Gleichmäßigkeit der Strömung im Sichtspalt begründet ist. So ist auch festzustellen, dass in zuvor durchgeführten Untersuchungen zum Streuverhalten des Dispergiertellers erhaltene Ergebnisse bestätigt werden konnten.

Die hier vorgestellten Versuche und deren Ergebnisse bilden eine fundierte Ausgangslage für weitere wissenschaftliche Untersuchungen des Sichtverhaltens. Folgende Punkte sind dabei aus Sicht des Verfassers von besonderem Interesse:

- **Geometrievariation des Drehkorbes:** Als nächster Schritt bietet sich hier besonders die genaue Charakterisierung des Einflusses von aus Drehrichtung betrachtet rückwärts angestellten Korbstäben an.
- **Geometrievariation des Leitschaufelkranzes:** Hier bieten sich zwei Ansatzpunkte. Einerseits ist noch ein beträchtliches Optimierungspotential hinsichtlich der Strömungsverhältnisse in diesem Bereich gegeben. Andererseits ist eine Optimierung der Sichtverhältnisse für unterschiedliche

Partikelgrößenbereiche von Interesse, wobei dies besonders eine Erweiterung zu groben Trennschnitten hin betrifft.

- **Variation der Materialaufgabe:** Aufgrund des starken Einflusses, den die Wahl der Aufgabestelle auf die Sichteffizienz auszuüben scheint, sind in dieser Hinsicht weitere Versuche mit einer stärkeren Variation der Aufgabestellen in Kombination mit gezielter Strömungsbeeinflussung angeraten. Jedoch wäre in Zukunft auch eine Abänderung zu einer Aufgabe direkt in den Sichtluftstrom denkbar, um auch die Einflüsse einer solchen Änderung beurteilen zu können.
- **Variation des Versuchsmaterials:** In der vorliegenden Arbeit wurden alle Versuche mit einem Zement als Aufgabegut der Sichtung durchgeführt. Materialeinflüsse auf den Sichtvorgang können somit aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Daher wäre es von Interesse, in weiteren Versuchen die Einflüsse von Materialkennwerten auf den Sichtprozess zu untersuchen. Hierbei spielen sowohl gutspezifische Kennwerte wie z.B. die Dichte als auch die Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes eine Rolle. Betrachtet man die Eigenschaften von Zement, so beeinflusst die Partikelgrößenverteilung des aus der Sichtung erhaltenen Feingutes diese entscheidend [52-56]. Auch hinsichtlich der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Zementeigenschaften über Anpassungen im Sichtprozess bietet sich somit ein ansehnliches Forschungspotential.

Es ist aus dieser Aufzählung abzuleiten, dass sich mit dem Ende dieser Forschungsarbeit hier noch ein breites Betätigungsfeld für weitere Versuchstätigkeiten eröffnet. Diese Arbeit ist daher auch klar als Ausgangspunkt für die Nutzbarmachung des noch bestehenden Optimierungspotentials von Querstrom-Drehkorbsichtern zu sehen.

Abschließend sei es dem Verfasser gestattet, zum Neuheitswert der vorgestellten Arbeiten und Erkenntnisse aus persönlicher Sicht kurz Stellung zu nehmen:

Bisher war es nicht möglich, auf Anlagen dieser Baugröße, wie sie im Falle der eingesetzten Technikumsanlage nunmehr vorliegt, derartig umfangreiche Kennfelder unter Einhaltung strikter Probenahmestandards zu erstellen. Um einen Gleichgewichtszustand in Sichteranlagen dieser Baugröße zu erreichen, waren bislang lange Versuchszeiten notwendig, welche aufgrund der großen Materialmengen eine Herausforderung hinsichtlich der Probenmanipulation darstellten. Weitere Herausforderungen ergaben sich auch aus Sicht der Probenahme, aber auch aus Sicht der insgesamt notwendigen Materialmenge, welche aus der großen Versuchsanzahl für

die umfangreichen Untersuchungen zur Erfassung der Kennfelder resultierten. Übergeordnetes Ziel der Neukonzeptionierung der Technikumsanlage war es daher, möglichst schnell konstante Betriebsbedingungen in der Anlage sicherzustellen, um die Versuchsdauer und damit die einzusetzenden Materialmengen zu minimieren. Dies bedingte umfangreiche Vorversuchsreihen, deren Erkenntnisse allesamt in die Anlagenadaptierung einfließen.

Durch diese Arbeiten konnte die Basis geschaffen werden, welche eine entsprechende Versuchsdurchführung zuließ, und somit die Beurteilung des Verhaltens des Sichters unter weitestgehender Eliminierung der Einflüsse der umgebenden Anlagenteile ermöglichte. In Kombination mit dem aufgrund der kurzen Versuchsdauer ermöglichten großen Umfang der Variation der Betriebsparameter konnte die Aussagekraft der Versuchsergebnisse deutlich verbessert werden. Durch Zusammenführung dieser Erkenntnisse mit jenen aus der Simulationstätigkeit konnten wertvolle neue Einblicke in das komplexe Zusammenspiel jener Teilprozesse gewonnen werden, welche in Ihrer Gesamtheit den Sichtprozess ausmachen.

9 Anhang

9.1 Formelzeichen

9.1.1 Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$c_d(\text{Re})$		Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynoldszahl
F_L	N	Schleppkraft zufolge der Luftströmung
F_Z	N	Zentrifugalkraft zufolge der gekrümmten Bahnkurve
l		Imperfektion
m_F	kg	Feingutmasse
m_G	kg	Grobgutmasse
$q_{iA}(x_i)$		Fraktion der Dichteverteilung der Partikelgröße des Aufgabegutes
$q_{iG}(x_i)$		Fraktion der Dichteverteilung der Partikelgröße des Grobgutes
$Q_A(x)$		Summenverteilung der Partikelgröße des Aufgabegutes
$Q_F(x)$		Summenverteilung der Partikelgröße des Feingutes
$Q_G(x)$		Summenverteilung der Partikelgröße des Grobgutes
$Q_{iA}(x_i)$		Fraktion der Summenverteilung der Partikelgröße des Aufgabegutes
$Q_{iF}(x_i)$		Fraktion Summenverteilung der Partikelgröße des Feingutes
$Q_{iG}(x_i)$		Fraktion Summenverteilung der Partikelgröße des Grobgutes
$\Delta Q_{iA}(x_i)$		Anpassung der Fraktion der Summenverteilung der Partikelgröße des Aufgabegutes
$\Delta Q_{iF}(x_i)$		Anpassung der Fraktion Summenverteilung der Partikelgröße des Feingutes
$\Delta Q_{iG}(x_i)$		Anpassung der Fraktion Summenverteilung der Partikelgröße des Grobgutes
$\bar{Q}_{iA}(x_i)$		Angepasster Wert der Fraktion der Summenverteilung der Partikelgröße des Aufgabegutes
$\bar{Q}_{iF}(x_i)$		Angepasster Wert der Fraktion Summenverteilung der Partikelgröße des Feingutes
$\bar{Q}_{iG}(x_i)$		Angepasster Wert der Fraktion Summenverteilung der Partikelgröße des Grobgutes

$Q3(x)$		Volumen-Summenverteilung der Partikelgröße
Re		Reynoldszahl
r	m	Radius des betrachteten Punktes im Strömungsfeld
r_{mF}		Masseausbringen Feingut
r_{mG}		Masseausbringen Grobgut
$r_{mF,w}$		Masseausbringen Feingut, ermittelt durch Wägung
$r_{mG,w}$		Masseausbringen Grobgut, ermittelt durch Wägung
$r_{mF,c}$		Masseausbringen Feingut, ermittelt durch Berechnung
$r_{mG,c}$		Masseausbringen Grobgut, ermittelt durch Berechnung
$T_i(x_i)$		Trennkurve
v_r	m/s	Radiale Geschwindigkeitskomponente
v_u	m/s	Tangentiale Geschwindigkeitskomponente, Umfangsgeschwindigkeit
x	m	Partikelgröße
x_c	m	Trenngrenze
x_{50T}	m	Trennschnittlage nach Tromp

9.1.2 Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Beschreibung
η	Pa s	Dynamische Viskosität der Luft
ρ_L	kg/m ³	Dichte der Luft
ρ_P	Kg/m ³	Dichte des Partikels
τ	%	Bypasswert

9.2 Literaturverzeichnis

- [1] Legenhausen, K.: Untersuchung der Strömungsverhältnisse in einem Abweiseradsichter. Dissertation, TU Clausthal, 1991
- [2] Galk, J.: Feinsttrennung in Abweiseradsichtern. Dissertation, TU Clausthal, 1995
- [3] Bauer, U.: Zur trennscharfen Feinstsichtung in Fliehkraft-Abweiseradsichtern. Dissertation, TU Clausthal, 2002
- [4] Abbildungen zur Verfügung gestellt von: Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH, Beckum, 2013
- [5] Streicher, C.: Untersuchungen zum Dispergierverhalten in eine Querstrom-Korbsichter. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, 2011
- [6] Streicher, C.; Flachberger H.: Development of a pilot plant separator for optimizing dynamic separators. Cement International 11 (2013), Issue 1, S.55-61
- [7] Streicher, C.; Flachberger H.: Aufbereitungstechnische Untersuchungen zur Optimierung von Querstrom-Drehkorbsichtern aus dem Hause Christian Pfeiffer – ein Zwischenbericht. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 158. Jg. (2013), Heft 6, S.251-257
- [8] Grumbrecht, K.: Vereinfachung der Berechnung von Mengenausbringen in der Steinkohlenaufbereitung nach dem Fehlerausgleichsverfahren. Glückauf 89 (1953) Heft 17/18, S.426
- [9] Grumbrecht, K.: Vorschläge zur Verbesserung der Grundlagen für die Erfolgsrechnung in der Steinkohleaufbereitung. Glückauf 88 (1952) Heft 39/40, S.957-964
- [10] Wills, B.A.; Napier-Munn, T.: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Wills' Mineral Processing Technology, Seventh Edition, Elsevier Science & technology Books, October 2006, S.65-89
- [11] Wills, B.A.: Metallurgical Accounting, Control and Simulation. Wills' Mineral Processing Technology, Sixth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford 1997, S.84-91
- [12] Leschonski, K.: Characterization of a Classification or Separation Process. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim, 2012
- [13] ÖNORM EN 196-6: Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit. Ausgabe: 2010-03-01

- [14] Grzywacki, S.: Einflüsse auf die Effizienz eines halbtechnischen dynamischen Luftsichters, der nach dem Querstromprinzip mit eingebautem Drehkorb arbeitet. Diplomarbeit, Fachhochschule Südwestfalen, Soest, 2008
- [15] Dangeleit, M.: Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines halbtechnischen Stabkorbsichters. Diplomarbeit, Fachhochschule Niederrhein, Krefeld, 1995
- [16] Reininghaus, F.: Untersuchung der Arbeitsweise eines halbtechnischen Abweiseradsichters. Diplomarbeit, Fachhochschule Niederrhein, Krefeld, 1996
- [17] Kürten, H.; et.al.: Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfeld mit konstanter Geschwindigkeit. Chemie-Ingenieur-Technik 38 (1966) 9, S.941-948
- [18] Kolacz, J.: Investigating flow conditions in dynamic air classification. Minerals Engineering 15 (2002) S.131-138
- [19] Guo, L.; et.al.: Velocity measurements and flow field characteristic analysys in a turbo air classifier. Powder Technology 178 (2007) S.10-16
- [20] Leschonski, K.; Legenhausen, K.: Investigation of the flow field in deflector wheel classifiers. Chemical Engineering and Processing, 31 (1992) S.131-136
- [21] Liu, J.; et.al.: Improvement in classification performance of turbo classifiers by reducing the inertia counter-rotating vortices. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress (2000), S. C4-53 bis C4-57
- [22] Karunakumari, L.; et.al.: Experimental and Numerical Study of a Rotating Wheel Air Classifier. American Institute of Chemical Engineers Journal, March2005 Vol.51, No.3, S.776-790
- [23] Johansen, S.T.; de Silva, S.R.: Some considerations regarding optimum flow fields for centrifugal classification. International Journal of Mineral Processing 44-45 (1996) S.703-721
- [24] Bauder, A.; et.al.: Investigations concerning the separation mechanism in deflector wheel classifiers. International Journal of Mineral Processing 74S (2004) S.147-154
- [25] Alfano, G.; Surracco, M.: Some classification expiriences with a dynamic classifier. Proceedings of the XXVI International Mineral Processing Congress (2012), Paper No. 106
- [26] Kolacz, J.: Improving the air classification process by optimal operating parameters. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress (2000), S. A4-31 bis A4-37

- [27] Feng, Y.; et.al.: Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier. *Minerals Engineering* 21(2008) S.598-604
- [28] Baudet,G.; et.al.: Influences of Operating parameters and shape factor of particles on performances of dynamic air classifier. *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress (2000)*, S. A4-21 bis A4-30
- [29] Shapiro, M.; Galperin, V.: Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing* 44 (2005), S.279-285
- [30] Morimoto, H.; Shakouchi, T.: Classification of ultra fine powder by a new pneumatic type classifier. *Powder Technology* 131 (2003), S.71-79
- [31] Galk, J.; et.al.: Industrial classification in a new impeller wheel classifier. *Powder Technology* 105 (1999), S.186-189
- [32] Shah, K.V.; et.al.: CFD based investigations into optimization of coal pulveriser performance: Effect of classifier vane settings. *Fuel Processing Technology* 90 (2009), S.1135-1141
- [33] Xu, N.: et.al.: Numerical simulation of particle motion in turbo classifier. *China Particuology* Vol. 3, No. 5, S. 275-278, 2005
- [34] Kolacz, J.: Production of ultra-fine particles in the new type air classifier. *Proceedings of the XXIII International Mineral Processing Congress (2006)*, S. 111-115
- [35] Adam, M.; Zampini, S.: Optimized production scale classifier for finest cuts at high capacities. *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress (2000)*, S. C4-58 bis C4-63
- [36] Nied, R.: CFS-HD: A new classifier for fine classification with high efficiency. *International journal of Mineral Processing* 44-45 (1996) S.723-731
- [37] Kolacz, J.: Improving the Fine Grinding Process in Air Swept Ball Mill Circuits. *Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1995*
- [38] Braun, R.M.; et.al.: Fine dry comminution of calcium carbonate in a Hicom mill with an Inprosyst air classifier. *Minerals Engineering* 15 (2002), S.123-129
- [39] Teipel, U.: Charakterisierung transparenter Partikel mittels Laserbeugungsspektrometrie. *Partikelmessstechnik* Vol. 9 (2003), Nr. 2, S.88-95
- [40] Venkoba Rao, B.: Addressing an inverse problem of classifier size distributions. *Powder Technology* 176 (2007), S.123-129
- [41] Eswaraiah, C.; et.al.: A reduced efficiency approach-based process model for circulating air classifier. *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008), S.1887-1900

- [42] Wang, X.; et.al.: A model for performance of the centrifugal countercurrent air classifier. Powder Technology 98 (1998), S.171-176
- [43] Wang, Q.; et.al.: Investigation and simulation of a cross-flow air classifier. Powder Technology 120 (2001), S.273-280
- [44] Shepherd, C.B.; Lapple, C.E.: Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 31 (1939), S.972 and 32 (1940), S. 1246
- [45] Ter Linden, A.J.: Untersuchungen an Zyklonabscheidern. Tonindustrie-Zeitung 77 (1953), S.49-54
- [46] Ebert, K.F.: Berechnung rotationssymmetrischer turbulenter Grenzschichten mit Sekundärströmungen. Dissertation, TH Karlsruhe, 1967
- [47] Rajathurai, A.M.: Untersuchungen zur Dispergierung und Desagglomeration von submikronen Partikelensembeln. Dissertation, GH Duisburg, 1990
- [48] Zharadnicek, A.: Untersuchung zur Dispergierung von Quarz- und Kalksteinfraktionen im Korngrößenbereich 0,5-10 µm. Dissertation, TH Karlsruhe, 1976
- [49] Kis, P.B.; et.al.: Discrete Model for analysis and design of grinding mill-classifier systems. Chemical Engineering and Processing 45 (2006), S.340-349
- [50] Leschonski, K.; Rumpf, H.: Principle and Construction of Two New Air Classifiers for Particle Size Analysis. Powder Technology , 2(1968/69), S.175-185
- [51] Lauer, O.: Neuer Fliehkraft-Laborwindsichter mit weitem Trennbereich. Chemie-Ingenieur-Technik 41. Jahrgang 1969/Nr.8, S.491-496
- [52] Kuhlmann, K.; et.al.: Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement – Teil I: Festigkeit von Portlandzement. Zement Kalk Gips 04/1985, S.169
- [53] Sprung, S.; et.al.: Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement – Teil II: Wasseranspruch von Portlandzement. Zement Kalk Gips 09/1985, S.528
- [54] Bentz, D.P.; et.al.: Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. Cement and Concrete Research 29 (1999) S.1663-1671
- [55] Ai Qin, W.; et.al.: Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No.5 1997, S.685-695
- [56] Ai Qin, W.; et.al.: The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. Cement and Concrete Research 29 (1999), S.1721-1726

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines Querstrom-Drehkorbsichters [4].....	3
Abbildung 2-2: Kennfeld der Bypass-Werte.....	5
Abbildung 2-3: Vergleich der berechneten Trenngrenze mit Feingutwerten	6
Abbildung 2-4: Vergleich der Trennkurven Versuch - Simulation	7
Abbildung 2-5: Darstellung des Einflusses der Aufgabestelle	8
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Sichters der 1. Generation [4]	9
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines Sichters der 2. Generation [57]	10
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Sichters der 3. Generation (QDK) [4]	12
Abbildung 3-4: Anordnung mit Zyklonen (links) und Filter (rechts) [4].....	12
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung eines Mahlkreislaufes mit Filterabscheidung [4]	13
Abbildung 3-6: Sichter der Baureihen TGS (links) und DSL (rechts) [4].....	14
Abbildung 4-1: Prinzipskizze der auf das Partikel wirkenden Kräfte im Sichtraum [4].....	15
Abbildung 4-2: Theoretischer Verlauf der Trenngrenze.....	18
Abbildung 4-3: Notwendige Umfangsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Korbdurchmessers.....	21
Abbildung 4-4: Darstellung der Möglichkeiten der Korbanströmung [20, S.133].....	24
Abbildung 5-1: Fließbild der Technikumsanlage vor Umbau	26
Abbildung 5-2: Anbackungen am Leitschaufelkranz.....	27
Abbildung 5-3: Verlauf der gemessenen Sichtluftmenge während eines Versuchs vor Umbau	28
Abbildung 5-4: Fließschema und Sensoranordnung der Technikumsanlage nach Umbau	29
Abbildung 6-1: Vergleich Versuchsmaterial – Mühlenausstragsgut Zementanlage	31
Abbildung 6-2: Druckdifferenz und Luftmenge bei Drehzahländerung am Gebläse.....	33
Abbildung 6-3: Gemessene Sichtluftmenge in Abhängigkeit der Versuchsdauer	34
Abbildung 6-4: Spez. Oberfläche des Feinguts nach Blaine in Abhängigkeit der Versuchsdauer.....	34
Abbildung 6-5: Partikelgrößenverteilungen ohne und mit Ausgleichsrechnung mit $r_{mF,c}$...	38
Abbildung 6-6: Partikelgrößenverteilungen ohne und mit Ausgleichsrechnung mit $r_{mF,w}$...	39
Abbildung 6-7: Vergleich Feingutkurven gemessen - gerechnet	40
Abbildung 6-8: Vergleich Grobgutkurven gemessen - gerechnet	41

Abbildung 6-9:Vergleich Aufgabegutkurven gemessen - gerechnet.....	41
Abbildung 6-10: Beispielhafte Darstellung einer Trennkurve.....	42
Abbildung 6-11: Vergleich Trennkurven ohne und mit Ausgleichsrechnung	44
Abbildung 7-1: Bypass und Imperfektion in Abhängigkeit der Aufgabemenge	47
Abbildung 7-2: Konturdarstellung des Bypass-Kennfelds.....	49
Abbildung 7-3: 3D-Darstellung des Bypass-Kennfelds.....	50
Abbildung 7-4: Konturdarstellung des Imperfektions-Kennfeldes	51
Abbildung 7-5: 3D-Darstellung des Imperfektions-Kennfeldes	52
Abbildung 7-6: Rechnerische Trenngrenze über das Betriebskennfeld	53
Abbildung 7-7: Kennfelder der Werte der spezifischen Oberfläche	53
Abbildung 7-8: Korrelation errechnete Trenngrenze mit Feingutwerten (1300 m ³ /h)	55
Abbildung 7-9: Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (1500 m ³ /h)	55
Abbildung 7-10: Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (1700 m ³ /h)	56
.....	56
Abbildung 7-11: Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (1900 m ³ /h)	56
.....	56
Abbildung 7-12Korrelation der errechneten Trenngrenze mit Feingutwerten (2100 m ³ /h)	57
Abbildung 7-13: Partikelgrößen-Korrelation in Abhängigkeit des dynamischen Sichtfeldes	58
.....	58
Abbildung 7-14: Differenz Masseausbringen gewogen-gerechnet abhängig vom dynamischen Sichtfeld.....	59
Abbildung 7-15: Strömungsfeld in einem Sichter der Baureihe QDK mit Korbdurchmesser 2,95 m [4].....	61
Abbildung 7-16: Strömungsbedingungen in Leitschaufelkranz und Sichtraum	61
Abbildung 7-17: Simuliertes Strömungsfeld der Technikumsanlage	62
Abbildung 7-18: geometrische Verhältnisse des Strömungsmodells.....	64
Abbildung 7-19: Strömungsfeld mit Partikelbeladung (1500 m ³ /h)	64
Abbildung 7-20: Strömungsfeld mit Partikelbeladung (1700 m ³ /h)	65
Abbildung 7-21: Vergleich simulierter und versuchstechnisch ermittelter Trennkurven	66
Abbildung 7-22: Ergebnisse der Streutellerversuche	67
Abbildung 7-23: Einfluss der Aufgabestelle unter Berücksichtigung der Strömungsbedingungen.....	68
Abbildung 7-24: Einfluss der Aufgabestelle unter Variation der Korbgeschwindigkeit	69
Abbildung 7-25: Korrelation gerechneter Trennschnitt - gemessene Partikelgrößenwerte QDK 82,6.....	70

Abbildung 7-26: Korrelation gerechneter Trennschnitt - gemessene Partikelgrößenwerte QDK 143,5	70
Abbildung 7-27: Korrelation gerechneter Trennschnitt - gemessene Partikelgrößenwerte QDK 294	71

9.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Stoffwerte für Berechnungsgänge	20
Tabelle 4-2: Baugrößenvergleich anhand konkreter Werte	21
Tabelle 5-1: Auslegungsparameter der eingesetzten Technikumsanlage	25
Tabelle 7-1: Beladungswerte der durchgeführten Versuche	46
Tabelle 7-2: Partikelgrößenverteilung für die Simulation	63

9.5 Laborequipment

Gasdruckpyknometer:

Hersteller: Porotec
 Modell: Pycnomatic ATC
 Messgas: Helium

Laserspektrometer:

Hersteller: Sympatec
 Modell: Helos/BF
 Dispergiereinheit: Sucell/M (Nassdispergierung)
 Messfluid: Isopropanol
 Messbereich: R4: 0,5/1,8...350µm
 Formfaktor: 1,145

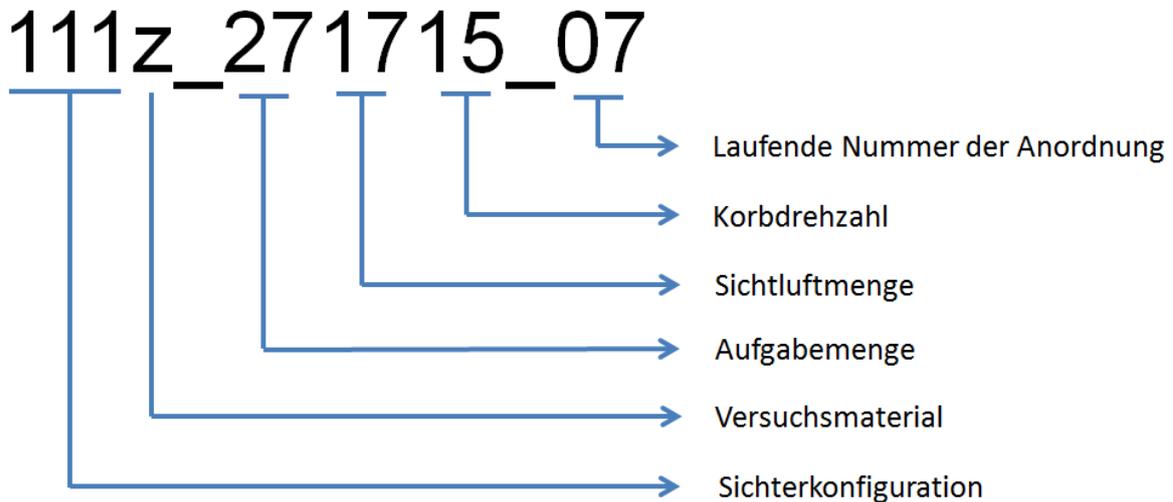
Siebe: Alle zur Siebung eingesetzten Analysensiebe entsprachen DIN ISO 3310-1.

Blaine-Messgerät: Ein ÖNORM EN 196-6 entsprechendes Messgerät wurde eingesetzt.

9.6 Messdaten

9.6.1 Rohdatenübersicht

Hier befindet sich eine Auflistung der aus den Versuchen erhaltenen Rohdaten. Die folgende Grafik erläutert die Codierung der Versuchsnummer, um die Identifizierung der Daten zu erleichtern.



Sichterkonfiguration: Die erste Zahl gibt die Bauform des Korbes an. In dieser Arbeit wurde ausschließlich Form 1 mit geraden Korbstäben benutzt. Die zweite Zahl gibt die Leitschaufelkranzform an. Auch hier wurde lediglich die Konfiguration Nr. 1 benutzt. Die dritte Zahl gibt die Aufgabestelle mit folgender Bedeutung an:

- 1 – Aufgabestelle 1 + 2
- 2 – nur Aufgabestelle 1
- 3 – nur Aufgabestelle 2

Versuchsmaterial: Der Buchstabe gibt das verwendete Versuchsmaterial an. In dieser Arbeit wurde nur Zement (z) verwendet.

Aufgabemenge: Diese Zahl mit 1000 multipliziert gibt die Aufgabemenge in kg/h an.

Sichtluftmenge: Diese Zahl mit 1000 multipliziert gibt die Sichtluftmenge in m³/h an.

Korbdrehzahl: Diese Zahl mit 1000 multipliziert gibt die in der Anlagensteuerung eingestellte Drehzahl des Antriebes des Drehkorbes in rpm an. Dieser Wert dividiert durch 1,25 ergibt die Drehzahl des Korbes, da dieser über ein Riemenscheibenpaar mit diesem Übersetzungsverhältnis angetrieben wurde.

Laufende Nummer: Gibt die laufende Nummer des Versuches in dieser Parameterkombination an.

Versuchsnummer	Versuchsdaten							x ₀ berechnet μm
	Aufgabemenge	Luftmenge	Drehzahl Korb	Sichtluftbelastung	v _u	v _r		
	kg/h	m ³ /h	rpm	kg/m ³	m/s	m/s		
111z_181509_01	1800	1500	900	1,20	9,05	3,96	32,20	
111z_181512_01	1800	1500	1200	1,20	12,06	3,96	23,15	
111z_181515_01	1800	1500	1500	1,20	15,08	3,96	17,98	
111z_181709_01	1800	1700	900	1,06	9,05	4,49	35,35	
111z_181712_01	1800	1700	1200	1,06	12,06	4,49	25,31	
111z_181715_01	1800	1700	1500	1,06	15,08	4,49	19,62	
111z_231712_01	2300	1700	1200	1,35	12,06	4,49	25,31	
111z_231715_01	2300	1700	1500	1,35	15,08	4,49	19,62	
111z_271312_03	2700	1300	1200	2,08	12,06	3,43	20,95	
111z_271315_01	2700	1300	1500	2,08	15,08	3,43	16,32	
111z_271318_01	2700	1300	1800	2,08	18,10	3,43	13,33	
111z_271321_01	2700	1300	2100	2,08	21,11	3,43	11,25	
111z_271506_01	2700	1500	600	1,80	6,03	3,96	51,78	
111z_271509_03	2700	1500	900	1,80	9,05	3,96	32,20	
111z_271512_02	2700	1500	1200	1,80	12,06	3,96	23,15	
111z_271515_05	2700	1500	1500	1,80	15,08	3,96	17,98	
111z_271518_01	2700	1500	1800	1,80	18,10	3,96	14,66	
111z_271521_01	2700	1500	2100	1,80	21,11	3,96	12,36	
111z_271524_01	2700	1500	2400	1,80	24,13	3,96	10,66	
111z_271527_01	2700	1500	2700	1,80	27,14	3,96	9,37	
111z_271706_01	2700	1700	600	1,59	6,03	4,49	57,19	
111z_271709_01	2700	1700	900	1,59	9,05	4,49	35,35	
111z_271712_03	2700	1700	1200	1,59	12,06	4,49	25,31	
111z_271715_21	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	
111z_271718_01	2700	1700	1800	1,59	18,10	4,49	15,96	
111z_271721_01	2700	1700	2100	1,59	21,11	4,49	13,43	
111z_271724_01	2700	1700	2400	1,59	24,13	4,49	11,58	
111z_271727_01	2700	1700	2700	1,59	27,14	4,49	10,16	
111z_271906_01	2700	1900	600	1,42	6,03	5,01	62,64	
111z_271909_01	2700	1900	900	1,42	9,05	5,01	38,49	
111z_271912_01	2700	1900	1200	1,42	12,06	5,01	27,47	
111z_271915_02	2700	1900	1500	1,42	15,08	5,01	21,23	
111z_271918_01	2700	1900	1800	1,42	18,10	5,01	17,25	
111z_271921_01	2700	1900	2100	1,42	21,11	5,01	14,49	
111z_272106_01	2700	2100	600	1,29	6,03	5,54	68,13	
111z_272109_01	2700	2100	900	1,29	9,05	5,54	41,63	
111z_272112_01	2700	2100	1200	1,29	12,06	5,54	29,61	
111z_272115_01	2700	2100	1500	1,29	15,08	5,54	22,83	
111z_311712_01	3100	1700	1200	1,82	12,06	4,49	25,31	
111z_311715_01	3100	1700	1500	1,82	15,08	4,49	19,62	
111z_361709_01	3600	1700	900	2,12	9,05	4,49	35,35	
111z_361712_01	3600	1700	1200	2,12	12,06	4,49	25,31	
111z_361715_01	3600	1700	1500	2,12	15,08	4,49	19,62	
111z_361912_01	3600	1900	1200	1,89	12,06	5,01	27,47	
111z_361915_01	3600	1900	1500	1,89	15,08	5,01	21,23	
112z_131712_01	1300	1700	1200	0,76	12,06	4,49	25,31	
112z_131715_02	1300	1700	1500	0,76	15,08	4,49	19,62	
112z_131718_01	1300	1700	1800	0,76	18,10	4,49	15,96	
113z_131712_01	1300	1700	1200	0,76	12,06	4,49	25,31	
113z_131715_02	1300	1700	1500	0,76	15,08	4,49	19,62	
113z_131718_01	1300	1700	1800	0,76	18,10	4,49	15,96	
Versuche zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse:								
111z_271715_11	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	
111z_271715_12	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	
111z_271715_13	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	
111z_271715_14	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	
111z_271715_15	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	
111z_271715_16	2700	1700	1500	1,59	15,08	4,49	19,62	

Versuchsnummer	Masseausbringen				spezifische Oberfläche			
	gewogen		gerechnet		Blaine		Laser	
	FG	GG	FG	GG	FG	GG	FG	GG
	-	-	-	-	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
111z_181509_01	0,506	0,494	0,522	0,478	4112	1886	4200	2308
111z_181512_01	0,369	0,631	0,461	0,539	5302	1436	4924	1835
111z_181515_01	0,309	0,691	0,426	0,574	6077	1267	5508	1546
111z_181709_01	0,598	0,402	0,545	0,455	4244	1771	4271	2216
111z_181712_01	0,450	0,550	0,511	0,489	5097	1217	4871	1645
111z_181715_01	0,374	0,626	0,447	0,553	6220	1159	5614	1452
111z_231712_01	0,434	0,566	0,514	0,488	5158	1180	4883	1542
111z_231715_01	0,348	0,652	0,441	0,559	6172	1219	5502	1480
111z_271312_03	0,270	0,730	0,364	0,636	5653	1689	5069	2015
111z_271315_01	0,233	0,767	0,319	0,681	6822	1556	5861	1803
111z_271318_01	0,192	0,808	0,289	0,731	8124	1626	6849	1915
111z_271321_01	0,143	0,857	0,239	0,761	9179	1705	7433	1956
111z_271506_01	0,697	0,303	0,478	0,522	3494	2552	3518	2820
111z_271509_03	0,512	0,488	0,478	0,522	4408	1771	4202	2197
111z_271512_02	0,359	0,641	0,422	0,578	5462	1446	4942	1829
111z_271515_05	0,300	0,700	0,392	0,608	6604	1396	5795	1685
111z_271518_01	0,245	0,755	0,333	0,667	6474	1395	6025	1635
111z_271521_01	0,219	0,781	0,308	0,692	7975	1463	6559	1538
111z_271524_01	0,225	0,775	0,303	0,697	9207	1298	7511	1404
111z_271527_01	0,214	0,786	0,281	0,739	10482	1382	8338	1477
111z_271706_01	0,788	0,212	0,415	0,585	3961	2401	4043	2706
111z_271709_01	0,611	0,389	0,629	0,371	4062	1388	3934	1840
111z_271712_03	0,426	0,574	0,484	0,516	5292	1298	4837	1602
111z_271715_21	0,371	0,629	0,437	0,563	6307	1155	5619	1368
111z_271718_01	0,295	0,705	0,409	0,591	6672	1158	5801	1282
111z_271721_01	0,255	0,745	0,344	0,656	7951	1186	6865	1328
111z_271724_01	0,245	0,755	0,300	0,700	9706	1255	7893	1343
111z_271727_01	0,207	0,793	0,292	0,708	10038	1064	8102	1312
111z_271906_01	0,854	0,146	0,603	0,397	3464	2230	3584	2601
111z_271909_01	0,726	0,274	0,610	0,390	4142	1426	4145	1817
111z_271912_01	0,490	0,510	0,533	0,467	5356	1012	5096	1378
111z_271915_02	0,383	0,617	0,487	0,513	5866	983	5367	1221
111z_271918_01	0,343	0,657	0,437	0,563	6084	1099	5511	1186
111z_271921_01	0,292	0,708	0,390	0,610	7405	1077	6539	1133
111z_272106_01	0,864	0,136	0,524	0,476	3977	2196	4183	2618
111z_272109_01	0,747	0,253	0,679	0,321	3945	1370	4022	1915
111z_272112_01	0,580	0,440	0,627	0,373	4541	873	4521	1218
111z_272115_01	0,454	0,546	0,528	0,472	5573	921	5233	1131
111z_311712_01	0,433	0,567	0,499	0,501	5256	1153	4959	1546
111z_311715_01	0,320	0,680	0,439	0,561	6039	1266	5419	1516
111z_361709_01	0,566	0,434	0,586	0,414	4233	1471	4228	1986
111z_361712_01	0,417	0,583	0,498	0,502	5313	1271	4956	1641
111z_361715_01	0,324	0,676	0,435	0,565	6261	1215	5649	1453
111z_361912_01	0,482	0,518	0,542	0,458	4945	1147	4703	1546
111z_361915_01	0,381	0,619	0,459	0,541	5959	1137	5370	1415
112z_131712_01	0,348	0,652	0,410	0,590	4708	1517	4235	2006
112z_131715_02	0,320	0,680	0,391	0,609	5400	1395	4859	1694
112z_131718_01	0,293	0,707	0,366	0,634	6063	1355	5377	1545
113z_131712_01	0,470	0,530	0,535	0,465	4656	799	4321	1376
113z_131715_02	0,390	0,610	0,473	0,527	5541	945	4908	1187
113z_131718_01	0,339	0,661	0,425	0,575	6237	988	5431	1099
Versuche zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse:								
111z_271715_11	0,352	0,648	0,425	0,575	6662	1161	5944	1357
111z_271715_12	0,369	0,631	0,425	0,575	6767	1133	6014	1358
111z_271715_13	0,404	0,596	0,443	0,557	6624	1108	5874	1298
111z_271715_14	0,383	0,617	0,423	0,577	6720	1158	5916	1422
111z_271715_15	0,402	0,598	0,440	0,560	6581	1128	5850	1357
111z_271715_16	0,391	0,609	0,431	0,569	6709	1176	5872	1387

Versuchsnummer	Parameter der Partikelgrößenverteilung des Feingutes					
	d_{50}	x_{70}	x_{80}	x_{85}	x_{90}	x_{95}
	μm	μm	μm	μm	μm	μm
111z_181509_01	13,58	24,04	31,36	35,90	42,12	52,52
111z_181512_01	9,79	16,96	21,86	24,99	29,38	36,27
111z_181515_01	7,78	13,76	17,65	20,38	24,23	30,55
111z_181709_01	13,12	23,83	31,77	36,91	44,18	56,03
111z_181712_01	10,16	17,91	23,48	27,14	31,91	39,57
111z_181715_01	7,64	13,72	17,63	20,29	23,92	29,49
111z_231712_01	10,08	17,56	22,83	26,24	30,61	37,73
111z_231715_01	7,70	13,49	17,25	19,79	23,34	28,97
111z_271312_03	8,61	14,48	18,43	21,19	25,02	31,42
111z_271315_01	6,67	11,22	14,28	16,24	18,76	23,18
111z_271318_01	5,28	8,95	11,63	13,41	15,48	18,97
111z_271321_01	4,53	7,21	9,37	10,87	12,82	15,55
111z_271506_01	17,08	31,28	41,85	49,18	58,92	74,16
111z_271509_03	12,10	20,79	27,34	31,58	37,17	46,63
111z_271512_02	9,05	15,34	19,67	22,63	26,58	33,00
111z_271515_05	7,11	12,46	15,96	18,19	21,32	26,50
111z_271518_01	6,27	10,53	13,53	15,33	17,82	22,47
111z_271521_01	5,41	8,83	11,43	13,16	15,13	18,47
111z_271524_01	4,56	7,66	10,17	11,85	14,12	17,59
111z_271527_01	3,91	6,24	8,17	9,53	11,36	14,02
111z_271706_01	13,95	27,20	37,74	45,09	55,04	70,29
111z_271709_01	13,94	24,36	32,09	37,11	44,25	55,96
111z_271712_03	9,55	16,39	21,06	24,32	28,62	35,15
111z_271715_21	7,54	13,28	17,00	19,45	22,85	28,24
111z_271718_01	6,86	11,75	14,99	17,21	20,20	25,54
111z_271721_01	5,31	9,22	11,99	13,84	16,05	19,59
111z_271724_01	4,28	7,20	9,54	11,09	13,04	15,62
111z_271727_01	4,12	6,79	8,91	10,36	12,17	14,71
111z_271906_01	17,15	31,59	42,33	49,72	59,64	75,77
111z_271909_01	12,99	23,05	30,35	35,12	41,16	49,86
111z_271912_01	9,29	16,90	22,47	26,21	31,15	39,20
111z_271915_02	8,28	14,64	18,93	21,84	25,78	32,21
111z_271918_01	7,41	12,78	16,29	18,51	21,63	26,74
111z_271921_01	5,80	10,28	13,43	15,28	17,77	22,20
111z_272106_01	14,34	29,55	41,27	49,19	59,66	77,02
111z_272109_01	14,73	27,54	36,66	42,81	51,09	64,75
111z_272112_01	11,77	20,93	27,62	31,93	37,57	47,14
111z_272115_01	8,92	15,76	20,39	23,60	27,87	34,63
111z_311712_01	9,60	16,89	21,56	24,77	29,12	35,65
111z_311715_01	7,97	13,93	17,84	20,59	24,39	30,53
111z_361709_01	13,13	23,28	30,63	35,51	42,25	54,33
111z_361712_01	9,89	16,99	22,23	25,73	30,40	38,52
111z_361715_01	7,58	13,39	17,18	19,76	23,42	29,30
111z_361912_01	10,54	18,24	23,92	27,79	33,02	41,52
111z_361915_01	8,11	14,29	18,37	21,12	24,88	31,05
112z_131712_01	11,74	19,87	25,12	28,82	33,75	41,46
112z_131715_02	9,49	16,05	20,37	23,34	27,25	33,55
112z_131718_01	7,85	13,40	16,96	19,32	22,65	28,29
113z_131712_01	11,80	19,92	25,53	29,19	34,16	41,74
113z_131715_02	9,31	15,83	20,16	23,12	27,02	33,28
113z_131718_01	7,79	13,28	16,77	19,01	22,09	27,16
Versuche zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse:						
111z_271715_11	6,98	12,85	16,72	19,28	22,90	28,76
111z_271715_12	6,88	12,66	16,39	18,76	22,06	27,40
111z_271715_13	7,19	13,20	17,07	19,65	23,24	28,99
111z_271715_14	7,09	12,96	16,76	19,24	22,71	28,32
111z_271715_15	7,23	13,27	17,17	19,77	23,38	29,05
111z_271715_16	7,12	13,05	16,89	19,41	22,93	28,56

Versuchsnummer	Parameter der Trennkurve						
	x_{Bypass}	Bypass	x_{26}	x_{60}	x_{76}	Imperfektion	x_{26}/x_{76}
	μm	%	μm	μm	μm	-	-
111z_181509_01	8,00	27,94		37,02	57,61		
111z_181512_01	8,00	20,54	13,83	25,30	35,80	0,43	0,39
111z_181515_01	6,80	15,17	13,00	20,09	28,47	0,38	0,46
111z_181709_01	8,00	24,78	9,05	38,87	61,38	0,67	0,15
111z_181712_01	8,00	14,69	18,67	28,71	39,77	0,37	0,47
111z_181715_01	6,80	13,00	14,97	21,97	30,05	0,34	0,50
111z_231712_01	8,00	11,88	18,72	28,11	38,75	0,36	0,48
111z_231715_01	6,80	11,98	14,16	20,84	28,82	0,35	0,49
111z_271312_03	8,00	27,61		18,25	27,47		
111z_271315_01	6,80	24,32	7,25	14,53	21,06	0,48	0,34
111z_271318_01	4,80	28,54		11,09	17,04		
111z_271321_01	4,80	28,28		8,94	14,04		
111z_271506_01	8,00	43,30		31,89	92,70		
111z_271509_03	8,00	26,49		29,95	45,90		
111z_271512_02	8,00	20,24	11,83	21,79	31,58	0,45	0,37
111z_271515_05	6,80	17,25	11,33	18,33	25,64	0,39	0,44
111z_271518_01	5,70	18,26	8,84	14,32	20,05	0,39	0,44
111z_271521_01	4,80	17,25	7,82	12,19	17,52	0,40	0,45
111z_271524_01	4,80	12,40	7,76	11,16	15,94	0,37	0,49
111z_271527_01	4,00	13,34	6,62	9,17	13,38	0,37	0,50
111z_271706_01	5,70	45,36		14,00	73,00		
111z_271709_01	9,30	14,03	25,77	42,46	66,31	0,48	0,39
111z_271712_03	8,00	12,77	16,81	25,61	35,84	0,37	0,47
111z_271715_21	6,80	10,10	14,25	20,62	28,32	0,34	0,50
111z_271718_01	6,80	9,43	12,06	17,43	23,54	0,33	0,51
111z_271721_01	5,70	11,22	9,70	14,22	19,02	0,33	0,51
111z_271724_01	4,80	11,13	8,15	11,52	15,96	0,34	0,51
111z_271727_01	4,00	9,61	7,65	10,64	15,08	0,35	0,51
111z_271906_01	8,00	29,91		62,04	108,24		
111z_271909_01	8,00	14,45	26,76	43,81	61,02	0,39	0,44
111z_271912_01	8,00	7,95	20,06	28,94	39,77	0,34	0,50
111z_271915_02	6,80	6,90	16,71	23,36	32,19	0,33	0,52
111z_271918_01	6,80	6,73	13,81	19,37	26,69	0,33	0,52
111z_271921_01	5,70	7,55	11,49	16,29	21,66	0,31	0,53
111z_272106_01	4,80	33,48		41,78	97,86		
111z_272109_01	8,00	13,78	33,74	56,32	84,43	0,45	0,40
111z_272112_01	8,00	4,78	25,90	36,72	52,11	0,36	0,50
111z_272115_01	8,00	5,05	18,77	26,22	35,64	0,32	0,53
111z_311712_01	8,00	10,61	17,77	26,39	36,80	0,36	0,48
111z_311715_01	6,80	12,22	13,40	20,45	29,41	0,39	0,46
111z_361709_01	9,30	16,83	22,76	38,57	59,91	0,48	0,38
111z_361712_01	8,00	13,00	17,04	26,43	37,61	0,39	0,45
111z_361715_01	6,80	11,40	13,59	20,10	28,16	0,36	0,48
111z_361912_01	8,00	9,33	19,37	29,17	41,58	0,38	0,47
111z_361915_01	6,80	10,19	15,15	22,25	31,05	0,36	0,49
112z_131712_01	8,00	30,22		26,08	38,26		
112z_131715_02	8,00	24,00	9,59	22,04	31,33	0,49	0,31
112z_131718_01	6,80	19,98	10,92	18,58	25,80	0,40	0,42
113z_131712_01	8,00	11,41	22,37	32,20	43,53	0,33	0,51
113z_131715_02	8,00	8,94	17,97	25,09	33,32	0,31	0,54
113z_131718_01	6,80	7,54	15,06	20,62	27,13	0,29	0,56
Versuche zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse:							
111z_271715_11	6,80	10,71	13,86	19,94	27,36	0,34	0,51
111z_271715_12	6,80	10,19	14,05	20,12	27,29	0,33	0,52
111z_271715_13	6,80	9,44	14,82	21,08	28,64	0,33	0,52
111z_271715_14	6,80	11,52	13,83	20,17	27,49	0,34	0,50
111z_271715_15	6,80	10,01	14,61	21,03	28,89	0,34	0,51
111z_271715_16	6,80	10,48	14,22	20,53	28,03	0,34	0,51

Versuche zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse: zusätzliche Daten

Versuchsnummer	Versuchsdauer s	Luftmenge gemessen			
		min m³/h	max m³/h	Spreizung m³/h	Standardabw m³/h
111z_271715_11	50	1767	1658	109	20,35
111z_271715_12	88	1801	1688	113	23,52
111z_271715_13	53	1822	1724	98	28,65
111z_271715_14	85	1797	1675	122	22,80
111z_271715_15	50	1816	1655	161	38,58
111z_271715_16	88	1818	1685	133	27,30

Versuchsnummer	Temperatur °C	Bunkerinhalt		Versuchsm: Massefluss	
		Start kg	Ende kg	kg	kg/h
111z_271715_11	29,2	111	94	34	2448
111z_271715_12	29,6	94	61	66	2700
111z_271715_13	30,1	60	41	38	2581
111z_271715_14	29,6	114	82	64	2711
111z_271715_15	29,4	82	64	36	2592
111z_271715_16	29,6	64	31	66	2700

9.6.2 Partikelgrößenverteilungen

Die Reihenfolge entspricht jener der Auflistung der Rohdaten.

