

# **Abriebsverhalten von Feststoffpartikeln in Wirbelschichten**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin**

**(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Janitza Rangelova  
geb. am 27.12.1973 in Russe, Bulgarien

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:           Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Lothar Mörl  
                          Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Käferstein  
                          Prof. Dr.-Ing. habil. Andrej Minchev

Promotionskolloquium am: 07.06.2002



*Mit großer Liebe für meine Familie*

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Promotionsstudentin am Institut für Apparate- und Umwelttechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Ich möchte mich von ganzem Herzen bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing.habil.Dr.h.c. Lothar Mörl, Lehrstuhlleiter für chemischen Apparatebau, für die Ermöglichung der Bearbeitung dieses Themas, für jederzeit gewährte fachliche und menschliche Unterstützung bedanken. Mein ganz besonderer Dank an meinem Doktorvater Prof. Mörl ist dafür, daß er an mich geglaubt hat und in mich viel Vertrauen gesetzt hat. Ich danke Prof. Mörl für die Erfahrung und das Wissen, die mich sehr viel bereichert haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Käferstein möchte ich für die Übernahme des Gutachtens der Dissertation und für die gründliche Durchsicht der Arbeit danken.

Ebenfalls möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andrej Minchev, der auch mein Lehrer an der Universität für chemische Technologie und Metallurgie in Sofia war, für die Begutachtung der Dissertation danken.

Ich bedanke mich bei Dr.-Ing. Jürgen Dalichau für die Durchsicht meiner Arbeit und die Beratung, die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank ist auch für Dr.-Ing. Stefan Heinrich für die Unterstützung bei der Erstellung meiner Veröffentlichungen und die anregenden Diskussionen.

Mein herzlicher Dank gilt Dipl.-Ing. Thomas Piofczyk für seine Unterstützung und Bereitschaft zu helfen. Ich bedanke mich bei Dipl.-Ing. Matthias Ihlow, der mich zusammen mit Dipl.-Ing. Thomas Piofczyk bei der Herstellung von dem Senf-Kalk-Granulat unterstützt hat. Ganz herzlich möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Jörg Drechsler für seine Hilfe und Computerunterstützung bedanken.

Ebenfalls danke ich Dr.-Ing. Ekkehard Reimann und Dipl.-Ing. Michael Schmidt für die Unterstützung bei der Durchführung der Sondemessungen.

Ich danke meinen Diplomanden Alexander Katzarov und Alexander Dolaschki, die mit ihren durchgeführten experimentellen Untersuchungen einen wichtigen Beitrag geleistet haben.

Dr.-Ing. Gerhard Krüger, Dipl.-Ing. Wolfgang Behns, Dipl.-Ing. Mathias Ihlow, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Mirko Peglow, Dipl.-Ing. Markus Henneberg danke ich für die vielen fachlichen Ratschläge. Ich danke Frau Chem.-Ing. Sabine Schlüsselburg für die Hilfe bei der Partikelmeßwerterfassung und allen meinen Arbeitskollegen für die gute Arbeitsatmosphäre, die für das Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ich bedanke mich bei Herrn Herbst für sein schnelles Mitwirken bei den Umbauarbeiten an der Versuchsanlage.

Beim Land Sachsen-Anhalt bedanke ich mich für die Finanzierung des wissenschaftlichen Aufenthalts und bei der „Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V.“ für die finanziellen Mittel.

Und nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Ich danke meiner Mutter und meinem Vater für ihre große Liebe, für ihre unglaublich starke Unterstützung aus großer Entfernung. Meinem Bruder möchte ich für die Unterstützung in schwierigen Momenten danken, da er immer für mich da war. Ich danke Rene für seine Liebe.

## Kurzreferat

Wirbelschichten werden in zunehmenden Maße in der Technik angewendet, wie z.B. bei Trocknungs- und Granulationsprozessen, beim Partikelcoating, bei Adsorptions- und Desorptionsprozessen, bei der heterogenen Katalyse, bei Wärme- und Stoffübertragungsprozessen u.a. In allen Anwendungsfällen kommt der Frage des Partikelabriebes durch die hohe Belastung des Bettmaterials in der Schicht besondere Bedeutung zu, wobei in der Regel ein geringer Produktabrieb angestrebt wird.

Die Einflußfaktoren auf den Abrieb in blasenbildenden Wirbelschichten können in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Die erste Gruppe sind die prozeßbedingten Einflußfaktoren wie z.B. Gasgeschwindigkeit, Schichtmasse, Temperatur, Partikeloberfläche usw. Die zweite Gruppe sind die durch das Produkt und dessen Struktur selbst beeinflussten Faktoren, wie Partikelfestigkeit, Oberflächenrauigkeit, innere Oberfläche, Porenvolumen, Produktfeuchte usw.

In der vorliegenden Arbeit wurden für zwei beispielhafte Feststoffpartikelkollektive (Natriumpercarbonat und ein selbst hergestelltes Senf-Kalkstein-Granulat) ausgehend vom Stand der Literatur Modellvorstellungen hergeleitet, die es gestatten sollen, den Partikelabrieb und die gesamten partikelgeometrischen, mittleren und zeitabhängigen Größen, wie Partikelverteilungsspektrum, spezifische Schichtoberfläche, spezifische mittlere Teilchenmasse u.a. für eine stationär betriebene blasenbildende Wirbelschicht voraus zu berechnen. Dabei soll die sich durch den Partikelabrieb ständig verkleinernde Schichtmasse durch die Zugabe von neuem Granulat konstant gehalten werden. Grundlage dieser Modellvorstellung ist die Formulierung eines Abriebskoeffizienten, der sowohl konstant als auch zeitabhängig sein kann. Dabei wurden sowohl homogen aufgebaute Partikel als auch inhomogene, schalenförmig aufgebaute Teilchen betrachtet. Bei der Herleitung der Modellvorstellung wurden zwei grundsätzlich mögliche Ansätze verwendet:

1. Der Abrieb ist der in der Schicht vorhandenen Gesamtpartikeloberfläche proportional.
2. Der Abrieb ist der Teilchenmasse in der Wirbelschicht proportional.

Für beide Annahmen wurden sowohl für den zeitlich unabhängigen als auch für den sich mit der Zeit verändernden Abriebskoeffizienten geschlossene analytische Lösungen der entsprechenden Differentialgleichungen hergeleitet und durch entsprechende experimentelle Untersuchungen an einer Versuchsanlage mit einem Wirbelkammerdurchmesser von 150 mm untermauert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
Lateinische Buchstaben.....	VIII
Griechische Buchstaben.....	XI
Dimensionslose Kennzahlen.....	XII
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	1
1.2 Motivation der Untersuchung.....	2
1.3 Forschungsziel.....	3
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>4</b>
2.1 Feststoffzerkleinerung.....	4
2.1.1 Zerkleinerungsmechanismen.....	4
2.1.2 Energiebedarf.....	5
2.1.3 Darstellungsarten.....	7
2.1.4 Anwendung von Fehlstellenstatistik und Bruchmechanik zur Beschreibung von Zerkleinerungsvorgängen.....	8
2.2 Verfahren zur Beurteilung der Zerfallsneigung außerhalb einer Wirbelschicht.....	11
2.2.1 Verschleißwirkung.....	11
2.2.2 Abrasiver Verschleiß von Borosilicatglas.....	13
2.2.3 Beschreibung der Erosionsdispersion von Agglomeraten in einfachen Scherströmungen.....	15
2.2.4 Vergleich verschiedener Prüfmethode zur Untersuchung der Festigkeit von Kaligranulat.....	16
2.3 Verfahren zur Beurteilung der Zerfallsneigung innerhalb einer Wirbelschicht.....	20
2.3.1 Versuche von Forsythe und Hertwig.....	20
2.3.2 Versuche von Ray und Jiang.....	23
2.4 Der Abrieb in Wirbelschichten.....	29
2.4.1 Wirbelschichtzustände (Geldart).....	29
2.4.2 In der Wirbelschicht ablaufende Vorgänge und wirkende Mechanismen.....	32
2.4.3 Untersuchung der Quellen, die zum Partikelabrieb führen.....	36
2.4.3.1 Strahlabrieb.....	37
2.4.3.2 Blasenabrieb.....	40
2.4.3.3 Zyklonabrieb.....	41
2.4.3.4 Vergleich zwischen dem Strahlabrieb, dem Blasenabrieb und dem Zyklonabrieb.....	43

2.4.4	Einflußfaktoren auf den Partikelabrieb. Beschreibung der wesentlichen Einflußgrößen.....	44
2.4.4.1	Umgebungseigenschaften.....	44
2.4.4.2	Partikeleigenschaften allgemein.....	47
<b>3</b>	<b>Modellierung des Abriebs.....</b>	<b>53</b>
3.1	Massenbezogener Abrieb bei konstantem Abriebskoeffizienten.....	54
3.1.1	Dimensionsbehaftete Modellbilanzen.....	54
3.1.2	Dimensionslose Darstellung.....	62
3.2	Oberflächenbezogener Abrieb bei konstantem Abriebskoeffizienten.....	64
3.2.1	Dimensionsbehaftete Modellbilanzen.....	64
3.2.2	Dimensionslose Darstellung.....	70
3.3	Abrieb bei zeitabhängigem Abriebskoeffizienten.....	73
3.3.1	Anwendung des massenbezogenen Abriebskoeffizienten.....	74
3.3.2	Anwendung des oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten.....	80
3.4	Modellierung unter Berücksichtigung der Dichteänderung des Granulates.....	85
3.4.1	Anwendung eines massenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten.....	86
3.4.2	Anwendung eines oberflächenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten.....	94
<b>4</b>	<b>Versuchsanlage.....</b>	<b>99</b>
4.1	Anlagenbeschreibung.....	99
4.2	Installierte Meßtechnik.....	99
4.3	Verwendete Meßgeräte.....	103
4.3.1	EKGM- System (Elektronische Korngrößenmessung).....	103
4.3.2	Partikel Analyse System (TOPAS FAS 360).....	107
4.3.3	Laserbeugungsmeßgerät (HELOS der Firma Sympa TEC).....	110
4.3.4	Bildanalysesystem (Carl Zeiss Jena Mikroskop).....	113
4.4	Entnahme der Analysenprobe aus der Grundgesamtheit und Dispergieren.....	115
<b>5</b>	<b>Versuchsgüter.....</b>	<b>118</b>
5.1	Natriumpercarbonat.....	118
5.2	Umhüllte Senfkörner.....	119
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse.....</b>	<b>124</b>
6.1	Versuchsstrategie zur Ermittlung des Einflusses der Gasgeschwindigkeit.....	124
6.1.1	Ermittlung des Existenzbereiches der Wirbelschicht.....	124
6.1.2	Auswahl von verschiedenen Geschwindigkeiten im berechneten Existenzbereich.....	125
6.1.3	Beschreibung und Auswertung der Versuche.....	126



6.2	Versuchsstrategie zur Ermittlung des Einflusses der Schichtmasse.....	137
6.2.1	Rechenweg für die Ermittlung der Staubkonzentration und des Abriebsstroms.....	137
6.2.2	Beschreibung und Auswertung der Versuche.....	139
6.3	Versuchsstrategie zur Ermittlung der Abriebskoeffizienten.....	144
6.3.1	Massen- bzw. volumenbezogener Abriebskoeffizient.....	148
6.3.2	Oberflächenbezogener Abriebskoeffizient.....	149
<b>7</b>	<b>Vergleich zwischen dem Modell und dem Experiment.....</b>	<b>151</b>
7.1	Vorausberechnung mit einem konstanten Abriebskoeffizienten.....	151
7.2	Vorausberechnung mit einem zeitabhängigen Abriebskoeffizienten.....	154
7.3	Vorausberechnung unter Berücksichtigung der Dichteveränderung.....	155
7.4	Berechnung der Korngrößenverteilung des Bettmaterials.....	160
7.5	Vorbehandlung und Bearbeitung des Materials zur Verminderung des Abriebs.....	162
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>164</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>167</b>
9.1	Anhang 1.....	168
9.2	Anhang 2.....	174
9.3	Anhang 3.....	187
9.4	Anhang 4.....	193
9.5	Anhang 5.....	205
9.6	Anhang 6.....	206
9.7	Anhang 7.....	210
<b>10</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>212</b>

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

$A_1$	[m <sup>2</sup> ]	Kontaktfläche
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Oberfläche
$A_{c, in}$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnitt des Zykloneingangs
$A_i$	[m <sup>2</sup> ]	Gesamtoberfläche der Komponente i
$A_p$	[m <sup>2</sup> ]	Oberfläche eines Feststoffpartikels
$\bar{A}_p$	[m <sup>2</sup> ]	mittlere Oberfläche eines Partikels
$A_{p, ges}$	[m <sup>2</sup> ]	Gesamtpartikeloberfläche
$A_t$	[m <sup>2</sup> ]	Bettquerschnittsfläche
$a$	[-]	Konstante
$Ar$	[-]	Archimedes Zahl
$b$	[-]	Konstante
$b_i$	[-]	Konstante
$c$	[-]	Konstante
$C_c$	[s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Konstante
$C_j$	[s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Konstante
$D$	[m]	Größtkorndurchmesser im Aufgabegut
$d$	[m]	Größtkorndurchmesser nach dem Zerkleinern
$d_p$	[m]	Partikeldurchmesser, Siebdurchmesser
$d_{p, 0}$	[m]	Ausgangspartikeldurchmesser
$d_{p, A}$	[m]	Durchmesser der austragsfähigen Teilchen
$d_{pb}$	[m]	mittlerer Durchmesser der Partikel in der Schicht
$d_{pc}$	[m]	Partikeldurchmesser im Zyklon
$d_{or}$	[m]	Durchmesser der Öffnungen
$d_{sv}$	[m]	mittlere Siebgröße
$d_V$	[m]	volumenbezogener Durchmesser
$d_A$	[m]	oberflächenbezogener Durchmesser
$d_S$	[m]	Sauterdurchmesser
$\bar{d}_A$	[m]	mittlerer oberflächengleicher Durchmesser
$\bar{d}_V$	[m]	mittlerer volumengleicher Durchmesser
$d_k$	[m]	Kerndurchmesser
$D_t$	[m]	Durchmesser des Apparates
$E_{bi}$	[J]	effektive Bruchenergie
$e_i$	[-]	Partikelgestaltsfaktor der Komp. I
$E_k$	[-]	kinetische Energierate der Partikel
$F$	[N]	mittlere Kraft
$f$	[-]	Konstante
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung

$H_{\max}$	[m]	maximale Steighöhe
$H_{mf}$	[m]	Wirbelschichthöhe im Lockerungszustand
$h_b$	[m]	Betthöhe
$K_s$	[-]	Schranke
$K_1$	[m <sup>3</sup> ]	Konstante
$K_2$	[-]	Konstante
$K_3$	[m <sup>3</sup> ]	Konstante
$K_4$	[kg]	Konstante
$k$	[1/m]	Abriebskonstante
$k^*$	[s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Abriebskonstante
$k_{a0}$	[s/m]	tatsächliche Abriebskonstante
$k_{a0}^*$	[s/m <sup>2</sup> ]	Abriebskonstante
$K_b$	[m <sup>-1</sup> .kg <sup>-n</sup> ]	Abriebskonstante
$K_b^*$	[s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Abriebskonstante
$K_j$	[s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	durchmesserabhängige Konstante
$K$	[-]	Konstante
$L$	[m]	Gleitdistanz
$l$	[m]	Länge
$m$	[-]	Konstante
$\Delta m$	[kg]	Massenverlust
$M$	[kg]	Bettmasse
$m_z$	[kg]	Masse des Zerkleinerungsgutes
$\dot{m}_{loss,tot}$	[kg/s]	totaler Massenstrom des ausgetragenen Abriebs
$\dot{m}_{loss,b}$	[kg/s]	produzierte Teilchenmasse pro Zeiteinheit im Blasenbereich
$\dot{m}_{loss,c}$	[kg/s]	produzierte Teilchenmasse pro Zeiteinheit im Zyklon
$\dot{m}_{loss,j}$	[kg/s]	produzierte Teilchenmasse pro Zeiteinheit im Strahlbereich
$\dot{m}_{e,in}$	[kg/s]	Feststoffmassenstrom, der den Zyklon passiert
$\dot{m}_f$	[kg/s]	Massenstrom des Gases
$m_b$	[kg]	Schichtmasse
$m_p$	[kg]	Masse des Partikels
$\bar{m}_p$	[kg]	mittlere Masse eines Partikels
$m_{sch}$	[kg]	Schichtmasse
$m_{sch0}$	[kg]	Ausgangsschichtmasse
$\dot{m}_{P,0}$	[kg/s]	Partikelmassenstrom beim Eintritt
$\dot{m}_{P,A}$	[kg/s]	Partikelmassenstrom beim Austritt

$\dot{m}_{Abrieb}$	[kg/s]	Abriebsmassenstrom
$n$	[s <sup>-1</sup> ]	Drehzahl
$N$	[-]	Anzahl
$n_{or}$	[-]	Anzahl der Öffnungen im Verteilerboden
$n_p$	[-]	Partikelanzahl
$\dot{n}_{P,0}$	[s <sup>-1</sup> ]	Partikelanzahlstrom beim Eintritt
$\dot{n}_{P,A}$	[s <sup>-1</sup> ]	Partikelanzahlstrom beim Austritt
$\dot{n}_P$	[s <sup>-1</sup> ]	Partikelanzahlstrom
$P$	[-]	Bruchwahrscheinlichkeit
$\Delta p$	[Pa]	Bettdruckverlust
$\Delta p_b$	[Pa]	Druckverlust der Wirbelschicht
$q_0$	[1/mm]	Anzahlverteilungsdichtefunktion
$\dot{Q}$	[-]	Quelle – Glied
$Q_B$	[m <sup>3</sup> /s]	Luftblasendurchsatz
$Q_3$	[%]	Volumensummenverteilung
$R_t$	[kg/h]	Gesamtmassenzerfallsrate
$r_i$	[m]	Partikelradius der Komponente i
$R_m$	[kg/kg.min]	massenbezogener Abriebskoeffizient
$R_A$	[kg/m <sup>2</sup> .min]	oberflächenbezogener Abriebskoeffizient
$r_{a,b}$	[%/min]	Abriebskoeffizient
$R_n(x)$	[-]	Restglied
Re	[-]	Reynolds Zahl
$S_V$	[m <sup>-1</sup> ]	volumenbezogene spezifische Oberfläche des Wirbelgutes
$\dot{S}$	[-]	Senke – Glied
$S$	[-]	Flüssigkeitssättigungsgrad
$t$	[min]	Zeit
$t_A$	[s]	Verweilzeit
$T_n(x)$	[-]	Taylor – Reihe
$u$	[m/s]	Wirbelgasgeschwindigkeit, auf leeren Rohrquerschnitt bezogen
$u_{mf}$	[m/s]	Wirbelgasgeschwindigkeit im Lockerungspunkt
$u_1$	[m/s]	Strahlgeschwindigkeit
$u_{or}$	[m/s]	Geschwindigkeit am Düsenausgang
$u_T$	[m/s]	mittlere Totalgeschwindigkeit des Gases
$u_{c,in}$	[m/s]	Gasgeschwindigkeit am Zykloneingang
$u_{min}$	[m/s]	Schwellwertgeschwindigkeit
$V$	[m/s]	Minimalfluidisationsgeschwindigkeit
$V_{\ddot{u}}$	[m/s]	Überschußgeschwindigkeit

$v_{p0}$	[m/s]	Startgeschwindigkeit der Partikel
$v_b$	[m/s]	Blasensteiggeschwindigkeit
$V_p$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen des Partikels
$V_b$	[m <sup>3</sup> ]	Bettvolumen
$\bar{V}_p$	[m <sup>3</sup> ]	mittleres Volumen eines Partikels
$V_{p, ges}$	[m <sup>3</sup> ]	Gesamtpartikelvolumen (Gesamtvolumen aller Partikel in der Schicht)
$W_{sp}$	[J/m <sup>2</sup> ]	spezifische technische Zerkleinerungsarbeit
$W$	[J]	technischer Arbeitsaufwand
$W_m$	[J/kg]	massenspezifische Energie
$\dot{W}$	[-]	dimensionslose Verschleißrate
$W_1$	[m/s]	Abriebsgeschwindigkeit
$W_2$	[kg]	Gesamtschichtmasse
$W_G$	[m/s]	Gasgeschwindigkeit
$w$	[-]	Konstante
$W_W$	[m/s]	Wirbelgeschwindigkeit
$W_A$	[m/s]	Austragsgeschwindigkeit
$W_{Arb.}$	[m/s]	Arbeitsgeschwindigkeit
$x_i$	[-]	Massenanteil der Komponente i
$x$	[m]	Partikeldurchmesser

### Griechische Buchstaben

$\varepsilon$	[-]	relatives Lückenvolumen
$\varepsilon_{mf}$	[-]	Wirbelschichtporosität im Lockerungszustand
$\psi$	[-]	Partikelfaktor
$\eta$	[-]	Effektivität der Energietransformation
$\varphi(d)$	[1/mm]	Masseverteilungskurve
$\mu$	[Pa.s]	dynamische Viskosität des Wirbelgases
$\mu_c$	[-]	Feststoffbeladung
$\mu_R$	[-]	Siebrückstandssummenkurve
$\mu_D$	[-]	Siebdurchgangssummenkurve
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität des Wirbelgases
$\Gamma$	[-]	Gamma Funktion
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Partikeldichte
$\rho_b$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Fluidichte
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Partikeldichte
$\rho_g$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gasdichte
$\rho_F$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Partikeldichte
$\rho_P$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Partikeldichte
$\rho_k$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Kerns
$\rho_M$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Mantels

$\sigma$	[N/m <sup>2</sup> ]	Oberflächenspannung
$\sigma_0$	[Pa]	Zug-Bruchspannung
$\sigma_{n-1}$	[m]	Standardabweichung
$\sigma_z$	[N/m <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit

### Dimensionslose Kennzahlen

$Ar$	$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 (\rho_{fest} - \rho_{gas})}{v_{gas}^2 \cdot \rho_{gas}}$	Archimedes- Zahl
$Re$	$Re = \frac{W_{Arb.} \cdot d_p}{v_{gas}}$	Reynolds- Zahl
$Re_w$	$Re_w = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}$	Reynolds- Zahl am Wirbelpunkt
$Re_A$	$Re_A = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}}$	Reynolds- Zahl am Austragspunkt

## **1 Einleitung**

### **1.1 Technische und wirtschaftliche Problemstellung**

In ein- und mehrstufigen Wirbelschichtapparaten zur Katalyse, Adsorption und Desorption oder auch für chemische Prozesse soll die Verweilzeit der Partikel im Wirbelschichtapparat lang sein, ohne daß diese stark abgerieben werden. Durch die hohe Intensität der im Apparat ablaufenden Wärme-, Stoff- und Impulstransportvorgänge und der damit verbundenen großen mechanischen Verschleißbeanspruchung werden von der Partikeloberfläche Teilchen abgetrennt und mit dem Gas aus der Wirbelschicht ausgetragen. Dieser Vorgang führt zu einer stetigen Verringerung der Schichtmasse, zu einer Abnahme des Durchmessers der in der Wirbelschicht fluidisierten Partikel und damit zu einer Veränderung des Fluidisationsregimes der Wirbelschicht. Durch Zuführung von Partikeln mit der Ausgangskorngrößenverteilung wird versucht, den Schichtmassen- und Teilchenanzahlverlust auszugleichen.

Die zeitliche Veränderung des Partikelspektrums ist von den Partikeleigenschaften (Dichte, Form, Größe, Aufbau, Bindemittelgehalt, Festigkeit), von der Apparategeometrie (Anströmboden, Wände, Einbauten), vom Betriebsregime der Wirbelschicht (zirkulierende oder blasenbildende Wirbelschicht) und von den Prozeßparametern (Fluidisationsgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchte) abhängig. Großtechnische Wirbelschichtanlagen können zuverlässiger betrieben werden, wenn sich die zeitliche Veränderung des Partikelspektrums voraussagen läßt. Zur Zeit reicht das vorhandene Wissen [1,2,3,4] für eine Vorausberechnung noch nicht aus. Viele Autoren untersuchen mit Hilfe eigener Versuchsapparate bzw. durch Abwandlung der Versuchsanordnungen anderer Autoren die Zerfallsneigung und den Abrieb der Partikel in der Wirbelschicht. Das führt natürlich zur Schwierigkeiten bei der Literaturlauswertung, weil verschiedene Materialien bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen untersucht werden [101, 102].

Andererseits werden derartige Prozesse auf Grund ihrer prozeßtechnischen Vorteile (z.B. mehrstufiges kontinuierliches Gegenstromprinzip) immer interessanter für die großtechnische Anwendung.

Eine Möglichkeit, um zu brauchbaren Aussagen über die Partikelveränderung in Wirbelschichten infolge von Abrieb zu gelangen, besteht darin, den Abrieb und die Ermittlung eines Abriebskoeffizienten (massen - oder oberflächenbezogen) unter möglichst prozeßnahen Bedingungen an einer halbtechnischen Versuchsanlage

experimentell zu ermitteln und die langwierigen experimentellen Untersuchungen durch ein Modell zu ersetzen. Aus der Literatur sind eine Reihe von Ansätzen bekannt [5,6,7]. In der Regel haben diese Arbeiten die Ermittlung eines Abriebskoeffizienten zum Inhalt, der wiederum von einer Reihe von Parametern abhängt.

## 1.2 Motivation der Untersuchung

Die Wirbelschicht wird heute in zahlreichen technischen Prozessen eingesetzt, z.B.:

- in Prozessen, bei denen das Bettmaterial möglichst lange Zeit unverändert bleiben soll, wie bei Wirbelschichtreaktoren für katalytische Reaktionen.

Es werden abriebfeste Partikel zur Katalyse, Adsorption und Desorption durch Umhüllung der Partikel entwickelt. Der Partikelkern übernimmt die Prozeßaufgabe (katalytisch aktiver Kern). Die poröse durchlässige Schale erhöht die Abriebfestigkeit. Durch das analytische Modell, mit dem der Abrieb bei einem kontinuierlichen Wirbelschichtprozeß vorausberechnet werden kann, lassen sich die für einen Katalyseprozeß wichtigen Größen wie Oberfläche, Volumen und Masse der Partikel, Aufenthaltszeit eines Partikels und der erforderliche Partikelmassenstrom vorausberechnen.

- in Wirbelschichtfeuerungen, in denen  $\text{SO}_2$ -Binder der Wirbelschicht direkt zugegeben werden.
- bei der Herstellung pharmazeutischer Produkte, die in der Regel aus Hilfsstoffen mit einem geringeren Anteil von Wirkstoffen bestehen. Hier können durch unkontrollierten Abrieb nicht gewünschte Granulatzusammensetzungen entstehen.
- bei der Kunstdüngerherstellung wird eine bestimmte Korngrößenverteilung verlangt, um u.a. die geforderte Rieselfähigkeit zu erreichen.

Die große Anwendung der Wirbelschicht bei vielen technischen Prozessen kann durch die gute Feststoffvermischung und den intensiven Wärme- und Stofftransport in Wirbelschichten erklärt werden.

Das Zerfallsverhalten kann die Wirtschaftlichkeit aller dieser Prozesse entscheidend beeinflussen. Die Gebrauchseigenschaften der Partikel verändern sich gravierend und bei zu kleiner Partikelgröße sind sie sogar unakzeptabel für den eigentlichen Prozeß. Durch die Abriebuntersuchungen kann man die gewonnenen Aussagen auf



alle Wirbelschichtprozesse anwenden, bei denen Abrieb als Nebenerscheinung vorhanden ist.

### 1.3 Forschungsziel

Zielstellung dabei soll es sein, für eine stationär betriebene Wirbelschicht unter vereinfachten Voraussetzungen die Abnahmegeschwindigkeit des Partikeldurchmessers, die Gesamtoberfläche aller Teilchen in der Schicht, die Schichtmasse, die Gesamtteilchenanzahl, die Aufenthaltszeit eines Teilchens in der Schicht und den erforderlichen Partikelmassenstrom an zuzuführenden Teilchen zu berechnen. In der Arbeit sollen verschiedene Betrachtungsweisen dargestellt werden. Es ist mit einem konstanten und einem zeitabhängigen Abriebskoeffizienten zu rechnen, um durch den Vergleich mit dem Experiment eine Entscheidung zu treffen, welche der beiden Modellvorstellungen maßgebend ist. Diese wiederum sollen entweder oberflächenbezogen oder massenbezogen sein. Das entwickelte Modell ist durch Experimente zu überprüfen. Es sind die an einer halbtechnischen Versuchsanlage gemessenen Werte den durch die Modellgleichungen berechneten Werten gegenüberzustellen. Für diesen Zweck sind Granulate an einer Wirbelschichtanlage DN 400 herzustellen. Durch Versuche an der Wirbelschichtanlage DN 150 sind die Abriebskoeffizienten zu ermitteln und der Abrieb ist nachzuweisen. Damit kann auf der Basis des flächenbezogenen und des massenbezogenen Abriebskoeffizienten der Durchmesser als Funktion der Zeit berechnet werden. Es sind auch die mittleren Werte der Oberfläche, des Volumens und der Schichtmasse für alle Betrachtungsfälle auszudrücken. Die Durchführung einer Staubsondenmessung soll als Nachweis des Abriebs und der Reproduzierbarkeit der Versuche und auch zur Ermittlung des Einflusses der Schichtmasse auf den Abriebskoeffizienten dienen. Genauso muß auch der Einfluß der Wirbelgeschwindigkeit auf den Abriebskoeffizienten untersucht werden.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Feststoffzerkleinerung

#### 2.1.1 Zerkleinerungsmechanismen

Zerkleinern eines Feststoffs bedeutet, das Feststoffgefüge unter Wirkung mechanischer Kräfte zu zerteilen und die Dispersität des Feststoffs zu ändern.

Das Zerkleinern dient dem Vorbereiten anschließender Trennvorgänge oder chemischer Prozesse sowie dem Herstellen handelsüblicher Kornklassen.

Der Zerkleinerungsgrad ist definiert als Verhältnis des Größtkorndurchmessers  $D$  im Aufgabegut zum Größtkorndurchmesser  $d$  nach dem Zerkleinern:  $n = \frac{D}{d}$ . (2.1)

Die große Anzahl der Feststoffe und technischer Zerkleinerungsvorgänge haben eine Vielzahl an Zerkleinerungsapparaten unterschiedlicher Arbeitsweise, Bemessung und Leistungsfähigkeit entstehen lassen. Bewegte Mahlorgane zerkleinern das Gut durch Druck, Schlag, Prall, Scheren, Knicken, Reiben oder Schleifen [8].

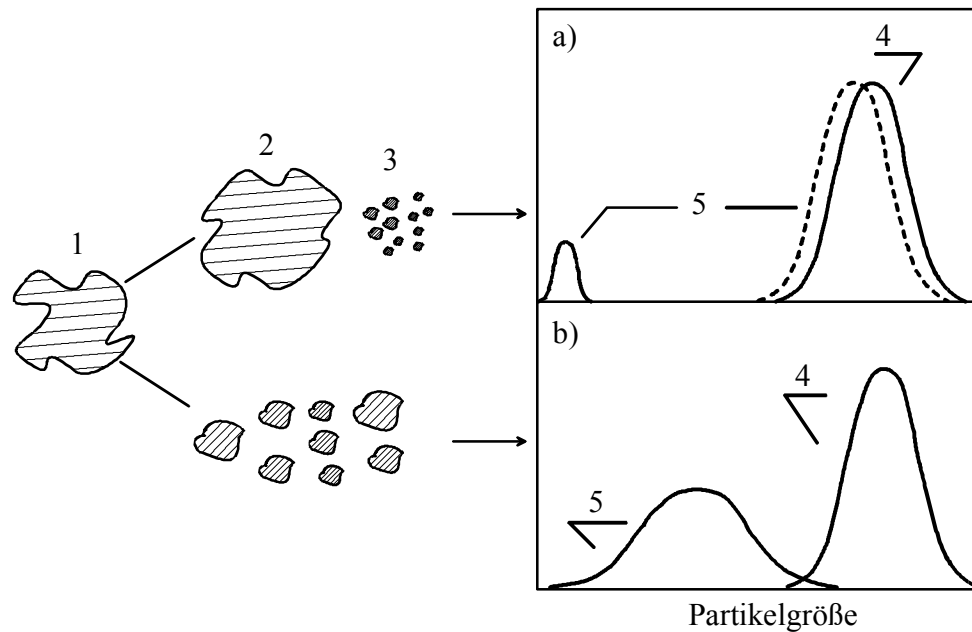
**Tabelle 2.1:** Feststoffeigenschaften und Anwendbarkeit der Beanspruchungsarten

Feststoff	Druck	Schlag	Prall	Reiben	Scheren
hart	●	●	▲	□	□
mittelhart	●	●	●	▲	□
weich	▲	▲	●	●	●
fasrig	□	▲	▲	▲	●
elastisch	□	□	▲	□	●
wärmeempfindlich	□	□	●	□	▲

● gut      ▲ beschränkt      □ nicht geeignet

Das Auftreten von Zerfallsprodukten ist an die Mechanismen:

- Kornzerkleinerung (Kornzerfall) auf Grund der Zerstörung der Partikel bzw. Agglomerate,
- Materialabtrag durch ritzende oder scheuernde Beanspruchung an der Partikeloberfläche (Abrasion, Abrieb, Mikrozerspanung)
- Oberflächenzerrüttung, die in Form von Partikelteilen im Oberflächenbereich auftritt, geknüpft.



**Abb.2.1:** Zerfallsphänomene [4]

1-Ausgangspartikel; 2-Son-Partikel; 3-Fines; 4-Ausgangverteilung; 5-Verteilung nach dem Zerfall

Die Abriebsmechanismen können von der reinen Abnutzung bis zu einer Gesamtzerteilung der Partikel schwanken. Die Auswirkung der Partikelbeanspruchung äußert sich in einer Veränderung des Partikelspektrums nach der Beanspruchung im Verhältnis zum Ausgangszustand. Beim Abrieb wird eine Menge von Feinteilchen produziert, während die Teilchengrößenverteilung der Mutterpartikel kaum geändert wird. Es tritt eine neue Kornklasse auf. Zwischen der neuen Kornklasse und der leicht veränderten Ausgangskornklasse fehlt ein Bereich [17,18]. Im Gegensatz zu diesem ist die Zerteilung ein Prozeß des Partikelbrechens in ähnlich sortierte Stücke [4]. Das Kornspektrum verschiebt sich zu kleineren Werten. Es entstehen in allen Kornklassen kleinere Partikel. Alle diese Mechanismen müssen folglich untersucht werden.

### 2.1.2 Energiebedarf

Die physikalische Zerkleinerungsarbeit ist für einen einmaligen Bruchvorgang an einem Einzelkörper beliebiger Form und Beschaffenheit aufzuwenden. Sie umfaßt die Zunahme der Oberflächenenergie sowie die Formänderungs- und Reibungsarbeit am Einzelkörper. Ein Arbeitsgesetz technischen Mahlens ist nach den gegebenen Ausführungen im wesentlichen eine Gesetzmäßigkeit über die Verlustarbeit in

Zerkleinerungsapparaten. Das Arbeitsgesetz technischer Zerkleinerung besagt, daß technischer Arbeitsaufwand  $W$  und Oberflächenzuwachs  $\Delta A$  des Mahlguts miteinander verhältnismäßig sind. Das Verhältnis beider Größen – die spezifische technische Zerkleinerungsarbeit  $W_{sp}$  – hängt von der Apparateart sowie der Art des Mahlguts ab und ist im mittleren Korngrößenbereich annähernd konstant [8, 88].

$$W_{sp} = \frac{W}{\Delta A} = const \quad (2.2)$$

Neben diesem Rittinger- Gesetz gibt es noch weitere Ähnlichkeitsgesetzmäßigkeiten für die Abhängigkeit der auf die Masse  $m_z$  des Zerkleinerungsgutes bezogenen technischen Zerkleinerungsarbeit  $W$  von der Korngröße  $d_p$ . Alle Zerkleinerungsgesetze folgen aus dem gleichen Exponentialgesetz  $m$ -ter Ordnung:

$$\frac{1}{m_z} \cdot \frac{dW}{dd_p} = -C \cdot d_p^m \quad C, m - \text{Konstanten} \quad (2.3)$$

Die Integration von der Gleichung im Bereich der Anfangskorngröße  $D$  bis zur Endkorngröße  $d$  führt mit bestimmten  $m$ -Werten zu verschiedenen Zerkleinerungsgesetzen, die alle von vereinfachenden Voraussetzungen ausgehen. Diese Gleichungen liefern allein in der Größenordnung übereinstimmende Ergebnisse der massebezogenen technischen Zerkleinerungsarbeit, des sogenannten spezifischen Arbeitsbedarfs. Die Konstante  $C$  ist jeweils aus Versuchen für das Zerkleinerungsgut und den benutzten Zerkleinerungsapparat zu bestimmen.

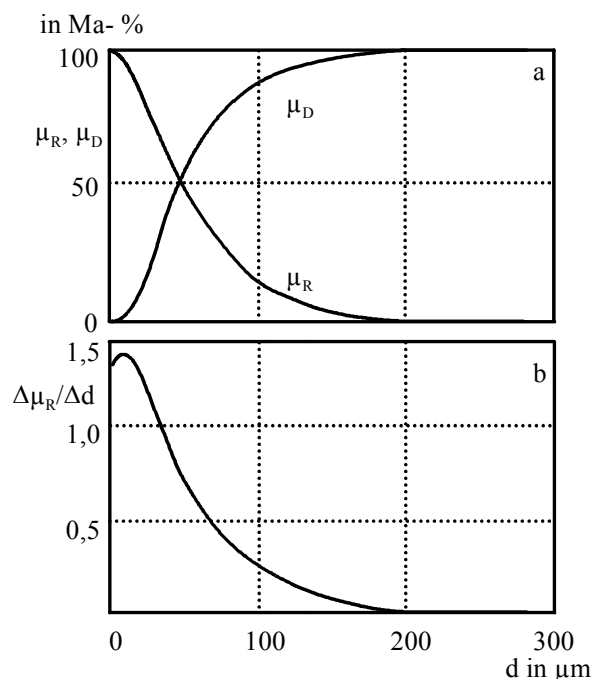
$m$	Zerkleinerungsgesetz (2.3)	benannt nach	Arbeit proportional
-1	$\frac{W}{m_z} = C \cdot (\ln D - \ln d)$	F.Kick (1885) [8]	Volumenabnahme
-1,5	$\frac{W}{m_z} = 2 \cdot C \cdot \left( \frac{1}{d^{0,5}} - \frac{1}{D^{0,5}} \right)$	F.C.Bond (1960) [8, 92]	Bruchspaltlänge
-2	$\frac{W}{m_z} = C \cdot \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$	P.R.v.Rittinger (1867) [8]	Oberflächenzuwachs

Die Zerkleinerung von Feststoffen wurde bisher vorrangig im Zusammenhang mit der Untersuchung von Mahlvorgängen erforscht. Die hier gefundenen, grundlegenden Zusammenhänge sollen als Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen in einer Wirbelschicht dienen. Deshalb ist es notwendig, eine klare Definition des Begriffs

„Abrieb“ zu geben. In dieser Arbeit wird der Begriff „Abrieb“ für den unerwünscht zerkleinerten Anteil von Feststoffteilchen verwendet, die kleiner als 100 bzw. 150  $\mu\text{m}$  sind [17,18]. Der Abriebsprozeß bedeutet, daß viele kleine Partikel produziert wurden, indem die Größenverteilung der Wirbelschichtteilchen sich sehr wenig verändert. Das Auftreten des Abriebs in der Wirbelschicht wird durch verschiedene Ursachen hervorgerufen, die später näher betrachtet werden. Durch die Reibung der Teilchen untereinander werden von deren Oberfläche Partikel mit kleinen Abmessungen abgerieben. Da die obere Grenze zwischen 100 und 150  $\mu\text{m}$  liegt, wird ihre Schwebegeschwindigkeit überschritten und sie werden mit dem Fluidisationsgas aus der Wirbelschicht ausgetragen. Dieser Vorgang führt zu einer stetigen Verringerung der Schichtmasse und zu einer kontinuierlichen Abnahme der Durchmesser der in der Wirbelschicht fluidisierten Partikel mit der Zeit.

### 2.1.3 Darstellungsarten

Die Massensummenkurve (Kornkennlinie) der Siebrückstands(-Kurve) und der Siebdurchgangs(-Kurve) zeigt das Bild für das Feinmahlen von Quarz in Kugelmühlen [8].



**Abb. 2.2:** Massensummenkurve (a) und Massenverteilungskurve (b), erhalten aus der Siebanalyse in Kugelmühlen feingemahlene Quarzes.

$\mu_R$ -Siebrückstandssummenkurve

$\mu_D$ -Siebdurchgangssummenkurve,  $d$ -Korngröße

Der Siebrückstand ist der Massenanteil  $\mu_R$  des Mahlguts, der auf den Korngrößenbereich  $> d$  entfällt, der Siebdurchgang dagegen der Massenanteil  $\mu_D$ , der dem Korngrößenbereich  $< d$  zukommt; es gilt die Normierungsbedingung  $\mu_R + \mu_D = 1$ . Die Massenverteilungskurve (Körnungslinie) charakterisiert die Häufigkeitsverteilung der Körnung eines Haufwerks als relative Häufigkeit des Rückstands  $\Delta\mu_R / \Delta d$  in Abhängigkeit von der Korngröße  $d$ .

$$\frac{d\mu_R}{dd} = \varphi(d) \quad (2.4)$$

Die Massenverteilungskurve wird durch Differentiation der Massensummenkurve erhalten und stellt die Massenverteilungsdichte dar.

#### **2.1.4 Anwendung von Fehlstellenstatistik und Bruchmechanik zur Beschreibung von Zerkleinerungsvorgängen [9]**

Beim Zerkleinern laufen solche Vorgänge ab, für die Zusammenhänge zwischen Partikelgröße, Zerkleinerungsenergie und Bruchstückgrößenverteilung anhand physikalischer Überlegungen mathematisch beschrieben werden. Vor über einem Jahrhundert überlegte sich Rittinger [10], daß der überwiegende Teil der zur Zerkleinerung aufgewandten Energie zur Schaffung neuer Oberflächen verbraucht wird, und er schloß daraus, daß die Zerkleinerungsenergie proportional zur erzeugten Oberfläche sein müsse. Hukki [11] verdeutlichte, daß von Kick gefundene Beziehungen die Zerkleinerung großer Partikel gut beschreiben (die elastischen Spannungen, die zum Bruch eines Partikels führen, sollten unabhängig von der Partikelgröße sein). Die Gleichungen von Rittinger sind für die Beschreibung der Feinzerkleinerung brauchbar. Ein tieferes Verständnis der Zerkleinerungsvorgänge wurde durch Experimente an einzelnen Partikeln ermöglicht, bei denen eine genaue Messung der bis zum Bruch investierten Zerkleinerungsenergie sowie der daraus resultierenden Bruchstückgrößenverteilung erfolgen kann (Rumpf [12], Rumpf und Schönert [13]). Weibull [14] fand in einer Vielzahl von Experimenten, daß sich die Verteilung der Zugfestigkeiten von Stäben aus gleichem Material durch eine einfache mathematische Beziehung beschreiben läßt. Diese Weibullstatistik wird unter dem Namen RRSB- Verteilung übrigens auch zur Beschreibung der Partikelgrößen-

verteilungen von zerkleinertem Material verwendet. Dadurch ist erklärt, daß beim Zerkleinerungsvorgang das Feingut durch Bruchgabelungen entsteht, die sich an Fehlstellen im Inneren des Partikels ausbilden. Die dargestellte Theorie der Zerkleinerung geht von der Weibullstatistik und von den bruchmechanischen Überlegungen aus und führt zu einfachen Gleichungen. Es werden die Zusammenhänge zwischen Partikelgröße, Zerkleinerungsenergie und Bruchstückgrößenverteilung beschrieben. Die Theorie geht von der Überlegung aus, daß die Zerkleinerung in zwei Schritten erfolgt, die sich grundsätzlich voneinander unterscheiden: der Bruchauslösung und der Bruchausbreitung.

Die Bruchauslösung erfolgt an der wirksamsten Fehlstelle des Partikels, d.h. an einer genügend großen Fehlstelle in einem Gebiet mit hoher Zugspannung. Die anschließende Bruchausbreitung erfolgt unbeeinflusst von dieser Fehlstellenverteilung und ist im wesentlichen durch die elastische Energie bestimmt, die im Partikel zum Zeitpunkt der Bruchauslösung gespeichert war.

Entsprechend den Überlegungen von Weibull läßt sich die Bruchwahrscheinlichkeit eines mit der Zugspannung  $\sigma$  belasteten Stabes der Länge  $l$  durch  $P(\sigma, l)$  beschreiben. Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist dann  $1 - P(\sigma, l)$ . Für einen Stab der Länge  $2l$  aus dem gleichen Material beträgt dann die Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$1 - P(\sigma, 2l) = [1 - P(\sigma, l)]^2 \quad (2.5)$$

Für die Länge  $L$  folgt:

$$P(\sigma, L) = 1 - [1 - P(\sigma, l)]^{L/l} \quad (2.6)$$

Durch Einführen einer neuen Funktion  $g$ :

$$\ln(1/[1 - P(\sigma, l)]) = g\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (2.7)$$

erhält man für die Bruchwahrscheinlichkeit:

$$P = 1 - \exp\left[-L/l \cdot g\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)\right] \quad (2.8)$$

$g$  wird experimentell bestimmt. Die Meßergebnisse der meisten untersuchten Stoffe lassen sich durch die einfache Beziehung gut beschreiben.

$$g(\sigma / \sigma_0) = (\sigma / \sigma_0)^n \quad (2.9)$$

$\sigma_0$  und  $n$  sind Konstanten, die die Fehlstellenverteilung berücksichtigen und vom Material und seiner Oberflächenbeschaffenheit abhängen.

Die Beschreibung der elastischen Spannungen an der Kontaktstelle einer Kugel (es wurde angenommen, daß die Partikel kugelförmig sind) erfolgte mit der Hertz-Theorie. Die Theorie ist auch für unregelmäßig geformte Partikel eine brauchbare Näherung.

Für die Bruchwahrscheinlichkeit einer Kugel, die unter Aufwand der massenspezifischen Energie  $W_m$  gegen eine Ebene gepreßt wird, gilt danach:

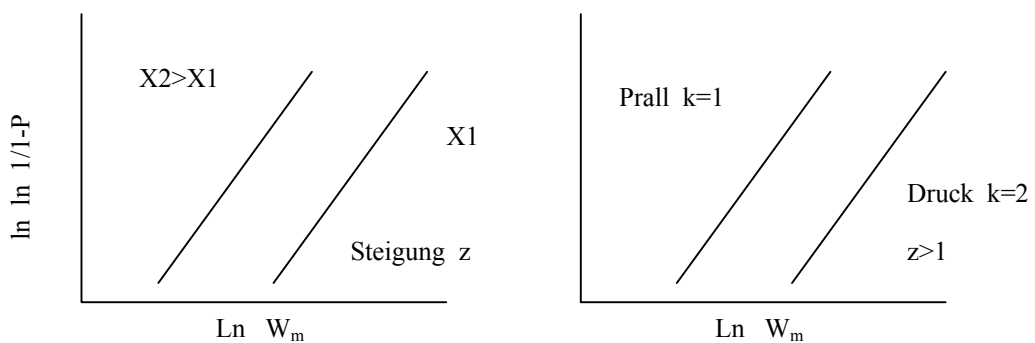
$$P = 1 - \exp(-c \cdot x^2 \cdot W_m^z) \quad (2.10)$$

Der Ausdruck kann für mehrere Kontakte  $k$  der Kugel erweitert werden, wobei  $k = 1$  der Prallbeanspruchung und  $k = 2$  der Druckbeanspruchung zwischen zwei Platten entspricht.

$$P = 1 - \exp(-c \cdot x^2 \cdot W_m^z \cdot k^{1-z}) \quad (2.11)$$

$$W_m = \int_0^\infty W_m (\partial p / \partial W_m) dW_m \quad (2.12)$$

$$W_m = \left(1 / (c \cdot x^2 \cdot k^{1-z})\right)^{1/z} \cdot \Gamma(1/z + 1), \quad \Gamma - \text{Gamma Funktion} \quad (2.13)$$



**Abb. 2.3:** Einfluß der Partikelgröße bei konstanten Belastungsbedingungen

**Abb. 2.4:** Unterschied von Druck- und Prallzerkleinerung bei konstanter Partikelgröße

Die Abbildungen stellen den Zusammenhang zwischen Bruchwahrscheinlichkeit  $P$  und massenspezifischer Zerkleinerungsenergie  $W_m$  von Kugeln dar.

Mit wachsender Partikelgröße verschieben sich die Geraden.



Vergleicht man Druckzerkleinerungs- mit Prallzerkleinerungsexperimenten bei gleicher Partikelgröße, so sagt die Theorie voraus, daß für  $z > 1$  die Geraden von Prallversuchen links von den Geraden der Druckversuche liegen sollten. Die Abbildungen 2.3 und 2.4 verdeutlichen diese Voraussagen. Die Theorie war für Kugeln hergeleitet worden, aber sie ist auch eine brauchbare Approximation für unregelmäßig geformte Partikel.

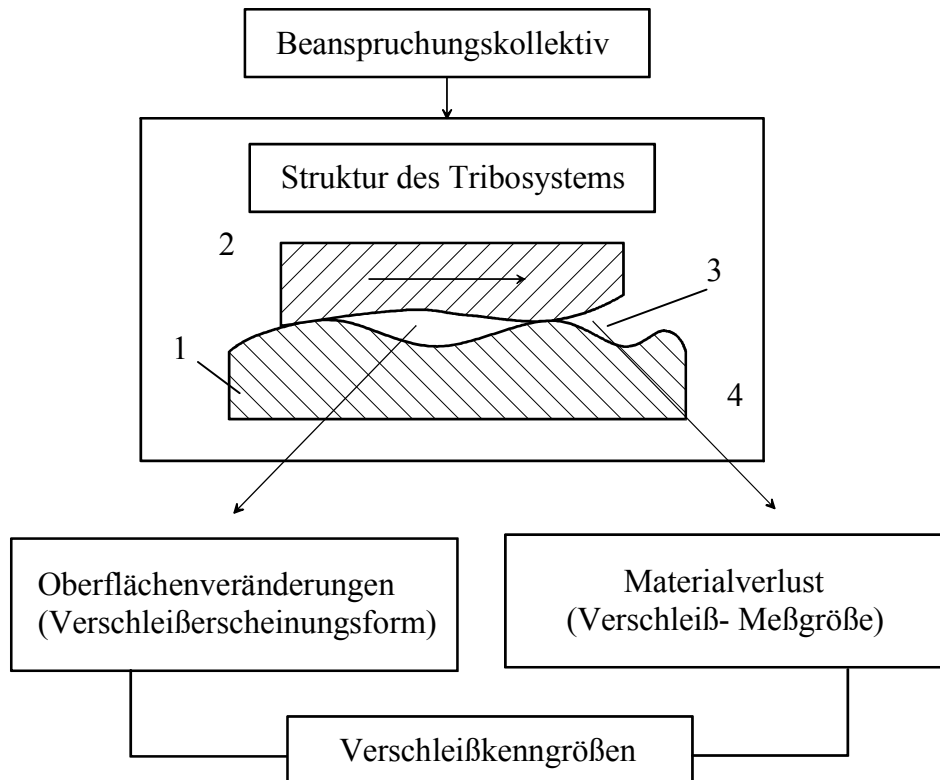
Die Mehrfachgabelung ist die Ursache für die Bildung kleiner Bruchstücke, d.h. des Feinguts aus dem zerkleinerten Partikel. Dabei entscheidet das Bruchmuster über die entstehende Partikelgrößenverteilung.

Die Überprüfung der Festigkeitstheorie an experimentellen Ergebnissen, die aus der Literatur bekannt sind, zeigte eine erstaunlich gute Übereinstimmung. Es ist aber erkennbar, daß mit der Theorie die Zusammenhänge nur annähernd beschrieben werden können und daß Abweichungen deutlich werden, wenn sich das Material nicht mehr spröde verhält. Ein Mangel der Theorie ist, daß die Beschreibung der Bruchstückgrößenverteilung nur für das Feingut gilt. Große Bruchstücke, die außerhalb des durch mehrfache Reißgabelung erzeugten Bruchmusters entstehen, können nicht beschrieben werden.

## **2.2 Verfahren zur Beurteilung der Zerfallsneigung außerhalb einer Wirbelschicht**

### **2.2.1 Verschleißwirkung**

Als Verschleiß wird nach [20] der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers, bezeichnet. Die mechanische Beanspruchung ergibt sich aus der Umsetzung aller plastischen und elastischen Verformungsenergien. Der Verschleiß zeigt sich durch submikroskopisch, mikroskopisch und makroskopisch lose Verschleißpartikel sowie in Stoff- und Formveränderungen des tribologisch beanspruchten Systems.



**Abb. 2.5:** Darstellung eines tribologischen Systems nach [20]

- 1- Grundkörper
- 2- Gegenkörper
- 3- Zwischenstoff
- 4- Umgebungsmedium

Infolge des Mehrschichtaufbaus technischer Oberflächen lassen sich die Verschleißmechanismen je nach ihrer Tiefenwirkung aufteilen in

- a) Verschleißmechanismen der inneren Grenzschicht; diese umfassen die Grundmechanismen Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung;
- b) Verschleißmechanismen der äußeren Grenzschicht; diese umfassen Schichtverschleißprozesse infolge tribochemischer Reaktionen.

- Adhäsiver Verschleiß

Diese Verschleißart ist gekennzeichnet durch eine „Entstehung von atomaren Haftkräften an Oberflächen ohne äußere Grenzschicht, die die Kohäsionsfestigkeit der unter hohem Flächendruck angenäherten Festkörperoberflächen erreichen können“ [21]. Adhäsion tritt vor allem beim Schwingungs- und Gleitverschleiß auf.

- Abrasiver Verschleiß

Im wesentlichen wird die Abrasion als ein Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung (Mikrozerspanungsprozeß) bezeichnet. Diese Art wirkt hauptsächlich beim Strömen [84], Gleiten, Rollen, Wälzen und Oszillieren von Partikeln in einem tribologischen System. Partikel einer viel kleineren Größe bilden sich aus den Ausgangspartikeln.

- Oberflächenzerrüttung

Als Oberflächenzerrüttung wird die „Ermüdung und Rißbildung im Oberflächenbereich durch tribologische Wechselbeanspruchung, die zu Materialtrennungen führen“ [20], definiert.

- Tribochemische Reaktionen

Entstehung von Reaktionsprodukten durch die Wirkung von tribologischer Beanspruchung bei chemischer Reaktion von Grundkörper, Gegenkörper und angrenzendem Medium [20].

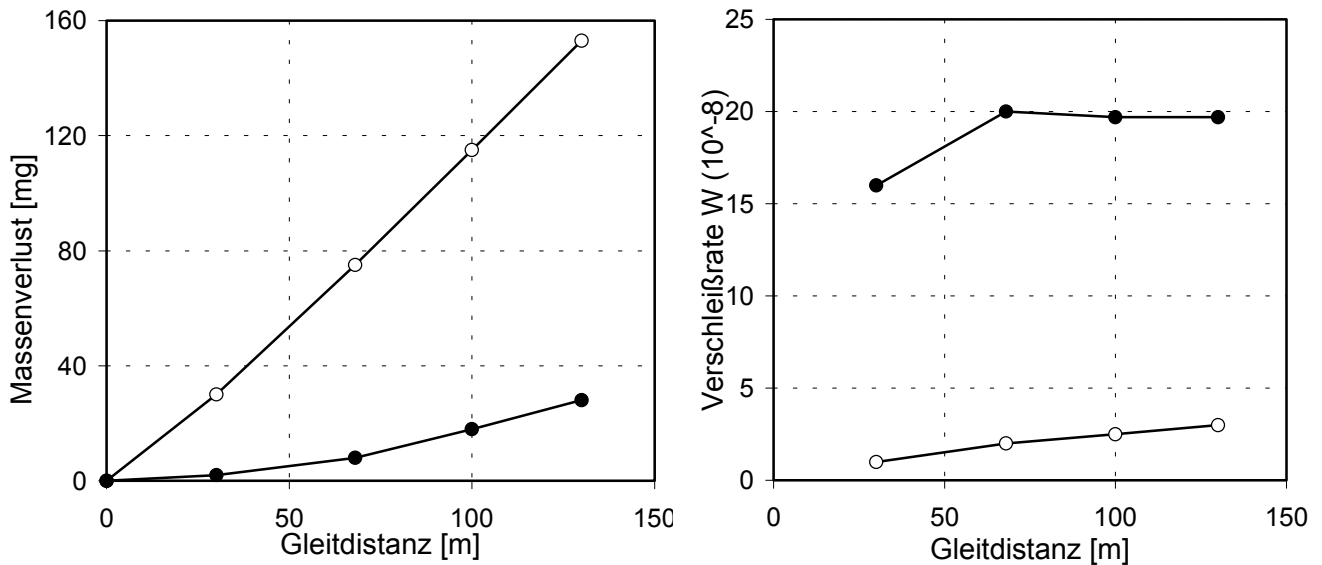
## 2.2.2 Abrasiver Verschleiß von Borosilicatglas

Der abrasive Verschleiß eines Borosilicatglases der Zusammensetzung 80 % SiO<sub>2</sub>, 13% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4% Na<sub>2</sub>O und 3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird mittels einer mechanischen Taberverschleißmaschine bei 20°C untersucht [16]. Als Verschleißkörper dienen mit SiC- versetzte Gummirollen. Der Verschleiß wird lichtmikroskopisch sowie durch Bestimmung der Oberflächenrauigkeit charakterisiert. Der Verschleiß nimmt progressiv mit steigendem Verschleißweg zu, mit steigender Belastung durch die Verschleißapparatur erhöht sich der Abrieb. Wahrscheinlich ist die Oberfläche des Glases durch die Herstellung gehärtet, so daß der anfängliche Verschleiß gering ist. Mit steigender Belastung erhöhen sich die Oberflächenrauigkeit sowie Rißbildungen und Abplatzungen an der Verschleißfläche des Glases. Vereinzelt Risse werden durch SiC- Partikel der Gummirollen gebildet. SiC- und Borosilicatglas- Partikel sowie deren Agglomerate können als Abrieb röntgenographisch nachgewiesen werden. Durch Schmierung der Verschleißfläche mit Äthanol und mit Schmieröl wird der Verschleiß verringert.

Die dimensionslose Verschleißrate ist:

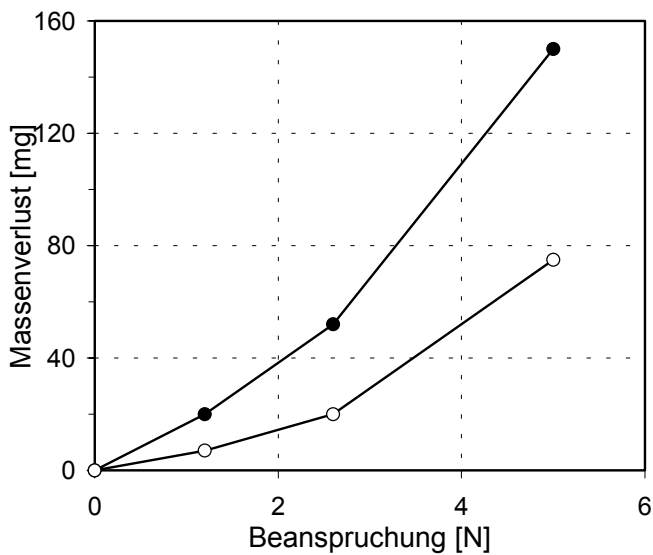
$$\dot{W} = \frac{\Delta m}{A_1 \cdot L \cdot \rho} \quad (2.14)$$

wobei  $\Delta m$  - Massenverlust,  $A_1$  - die Kontaktfläche ( $24,5 \text{ cm}^2$ ),  $L$  - die Gleitdistanz,  $\rho$  - die Dichte von Borosilicatglas ( $2,23 \text{ g/cm}^3$ ) sind.



**Abb. 2.6:** Der Massenverlust als Funktion der Gleitdistanz für eine Kraft von  $\circ$ -5N und  $\bullet$ -1,25N

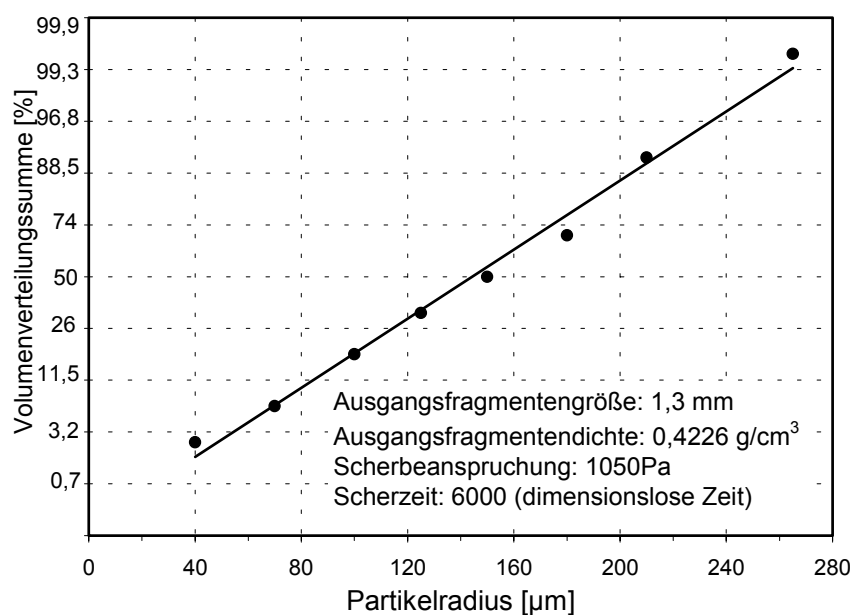
**Abb. 2.7:** Änderung der Verschleißrate mit der Gleitdistanz für eine Kraft von  $\bullet$ - 5N und  $\circ$ - 1,25N



**Abb. 2.8:** Änderung des Massenverlustes von Borosilicatglas mit aufgebrachtter Beanspruchung für die Gleitdistanz von  $\circ$ - 67,5 m und  $\bullet$ - 135 m

### 2.2.3 Beschreibung der Erosionsdispergierung von Agglomeraten in einfachen Scherströmungen

Untersucht wurden der Mechanismus von Agglomeraten in einfachen Scherströmungen und die Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Einflußgrößen des Dispergierungsvorgangs. Die Scherversuche wurden in einer einfachen, transparenten rotierenden Kegel- und Plattenvorrichtung durchgeführt, wobei zwei deutlich erkennbare Aufbruchmechanismen beobachtet wurden, die als „Bruch“ bzw. „Erosion“ bezeichnet wurden [19]. Der Bruchvorgang ist gekennzeichnet durch das plötzliche Zerbrechen des Agglomerats in einige große Stücke, wogegen die Erosion langsamer abläuft und bei niedrigeren Scherspannungen einsetzt als der Bruchvorgang. Der Erosionsablauf ist durch die Abspaltung von Splintern von der Außenoberfläche des Agglomerats gekennzeichnet. Die Erosion von in einer Newtonschen Flüssigkeit suspendierten Agglomeraten läuft nach einer Geschwindigkeitsgleichung erster Ordnung ab, und die Größe der erodierten Bruchstücke weist eine Normalverteilung auf. Der Grad der Strömungstrennung hat keinen Einfluß auf den Dispergierungsprozeß. Als charakteristischer Parameter der Erosionskinetik ist die dimensionslose Kennzahl  $\alpha$  anzusehen, welche ein Maß der angelegten Scherspannung (Viskosität\*Schergeschwindigkeit) im Verhältnis zur Bindekraft des Agglomerats darstellt.



**Abb. 2.9:** Volumenverteilungssumme der Fragmente

## **2.2.4 Vergleich verschiedener Prüfmethoden zur Untersuchung der Festigkeit am Beispiel von Kaligranulat [22]**

In Anwendung sind:

1. Prüfsiebmethoden, bei denen eine Materialprobe auf einem Prüfsieb mit einem Kugelballast geschüttelt wird.
2. Trommelmethoden, bei denen das Material in einer Abriebtrommel mit Mahlkörpern behandelt wird.

Die verschiedenen Methoden liefern Abriebwerte mit einer Schwankungsbreite von absolut 0,3 % - 70,3 %. Granulate unterschiedlicher Härte werden bei verschiedenen Methoden mit unterschiedlicher Intensität beansprucht. Feste Relationen in der Qualitätsabstufung der verschiedenen Granulate stellen sich nicht ein. Ein einfacher Vergleich der mit verschiedenen Methoden erzielten Abriebwerte ist somit unmöglich.

### Beschreibung der Prüfmethoden

Man verwendet hierzu ein Standard- Prüfsiebgerät, in dem das Granulat gemeinsam mit einem Kugelballast oder einer Stahlscheibe eine bestimmte Zeit auf einer Siebmaschine geschüttelt wird. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren sind selbst bei gleicher Prüfmethodik überraschend vielfältig. Die Prüfsiebverfahren unterscheiden sich in Einsatzkörnung, Prüfmenge, Maschenweite des Prüfsiebes, Rütteldauer, Größe der Kugeln sowie Anzahl bzw. Gewicht der Kugeln. Bei den Trommelmethoden sind die Unterschiede nicht minder vielfältig. Es unterscheiden sich Trommelabmessungen, Zahl der Mitnehmer, Form der Mahlkörper (Stäbe oder Kugeln), Menge der Mahlkörper, Drehzahl der Trommel, Einsatzkörnung, Prüfmenge, Versuchsdauer und Prüfsieb. Die Unterschiede der einzelnen Prüfsieb- Methoden sind in Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

**Tabelle 2.2:** Verschiedene Prüfsiebmethoden

Methode	1	2	3		4	5	6
			a	b			
Körnung mm	1,17- 3,33	1,17- 3,33	1,67-2,36	2,36-3,33	2-3,15	1-2	1-4
Einwaage g	100	100	50		50	50	50
Kugeldurchmesser mm	12,7	12,7	9,5		10	15	15
Gewicht einer Kugel g	8,33	8,33	3,52		4,07	13,78	13,78
Anzahl der Kugeln Stk	60	50	200		70	36	36
Gewicht der Kugeln g	500	417	704		285	496	496
Zeit min	10	10	5		10	10	5
Prüfsieb mm	0,833	0,833	1,17	1,67	0,5	0,5	0,5
Siebmaschine	Ro-Tap				Lavib		Spezialgerät 250 min <sup>-1</sup>

Die Versuchsmethodik ist bei allen Prüfmethoden ähnlich. Eine vorgeschriebene Menge der geforderten Kornfraktionen wird gemeinsam mit den Kugeln auf das Prüfsieb oder den Siebboden gegeben und die vorgeschriebene Zeit gerüttelt. Das entstandene Unterkorn wird ausgewogen und in Prozent der Einwaage berechnet. Die Parameter der Trommelmethoden sind in Tabelle 2.3 zusammengestellt.

**Tabelle 2.3:** Verschiedene Trommelmethoden

Nr.	1	2	3	4	5
Einwaage g	150	150	1050	200 od. 300	100
Körnung mm	2,36-3,33	1,67 – 2,36	0,833	1-4	1,167
Zylinder- Maße mm	241,3x190,5	174,625x127,0	203,2x247,6	360x70	76,2x304,8
Füllkörper Stab mm	12,7x133,35	12,7x119,4	-	-	-
Kugel mm	-	-	7,9375	5,0	12,7
Anzahl Stk.	2	2	100	410 615	5
Masse g	264	236	203	200 300	42
Drehzahl n <sup>-1</sup>	53	55	60	84	40
Umfangsgeschwindigkeit m/s	0,67	0,503	0,64	1,58	0,64
Prüfsieb mm	2,36	1,67	0,833	1,0	1,168
Zeit min	5	5	4	10	15

Bei allen Methoden ist die Tendenz zu einer Mahlbarkeitsprüfung unverkennbar, da Stäbe oder Kugeln beigegeben werden. Die Umfangsgeschwindigkeit während der Prüfung liegt bei vier Methoden zwischen 0,5 und 0,7 m/s. Im Vergleich zu den für Kugelmöhlen geltenden Regeln liegt die Geschwindigkeit bei diesem Verfahren oberhalb der sog. kritischen Drehzahl.

### Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden sowohl in Tabellenform als auch graphisch gezeigt. Die große Streubreite der Ergebnisse macht eine präzise Ablesung in der graphischen Darstellung unmöglich, während andererseits ein vergleichender Überblick mit Hilfe einer Tabelle nicht gelingt.

**Tabelle 2.4:** Abriebwerte der verschiedenen Prüfmethoden [22]

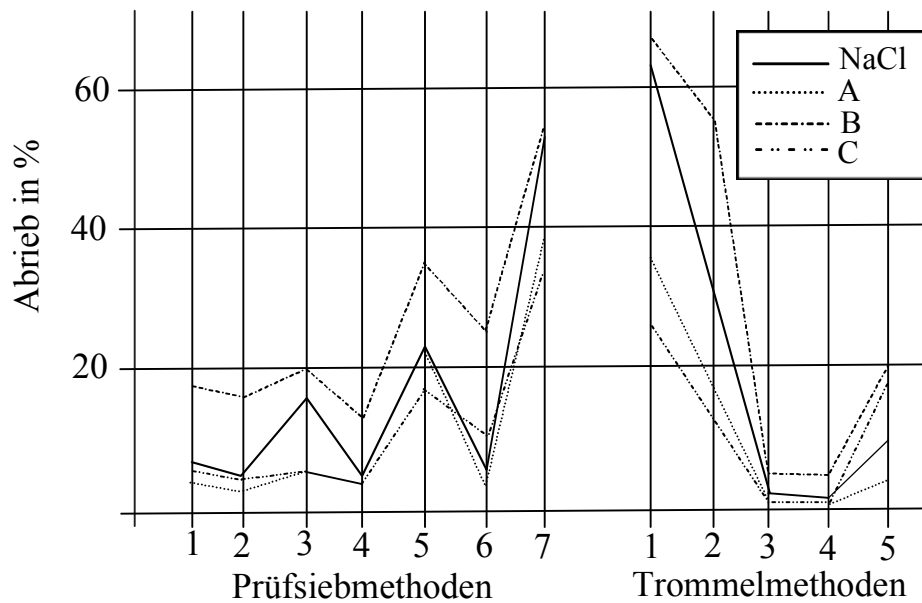
#### **Prüfsiebmethoden Abrieb in %**

Material- probe	1 $\sigma_{n-1}$	2 $\sigma_{n-1}$	3 $\sigma_{n-1}$	4 $\sigma_{n-1}$	5 $\sigma_{n-1}$	6 $\sigma_{n-1}$	7 $\sigma_{n-1}$
NaCl	7,25 0,47	4,83 0,23	15,2 1,68	3,92 0,49	22,26 1,55	8,33 0,39	47,17 1,77
A	3,83 0,36	2,60 0,37	5,74 0,08	2,78 0,06	23,4 7,49	3,18 0,90	35,66 10,34
B	6,40 1,09	4,58 0,50	5,36 0,20	3,19 0,32	16,61 0,47	11,51 1,16	31,68 5,87
C	17,35 1,10	15,98 3,12	19,74 1,77	9,83 0,70	35,92 1,88	20,55 1,94	51,50 3,58

#### **Trommelmethoden Abrieb in %**

Material- probe	1 $\sigma_{n-1}$	2 $\sigma_{n-1}$	3 $\sigma_{n-1}$	4 $\sigma_{n-1}$	5 $\sigma_{n-1}$
NaC	65,89 3,64	34,48 2,16	1,28 0,05	0,55 0,08	10,60 0,33
A	37,42 1,49	18,20 2,46	0,95 0,07	0,27 0,08	3,53 0,32
B	29,32 1,58	14,00 0,42	0,88 0,06	0,51 0,04	18,10 0,14
C	70,31 2,54	50,56 0,95	4,48 0,21	3,93 0,25	20,26 0,65





**Abb. 2.10:** Abriebwerte verschiedener Salzproben [22]

Auf den ersten Blick läßt sich feststellen, daß die verschiedenen Methoden das Prüfgut unterschiedlich scharf beanspruchen. Die Tatsache, daß die Kurven für die verschiedenen Materialien jedoch nicht parallel laufen, deutet darauf hin, daß die einzelnen Methoden Materialien unterschiedlicher Härte unterschiedlich beanspruchen.

### Zusammenfassung

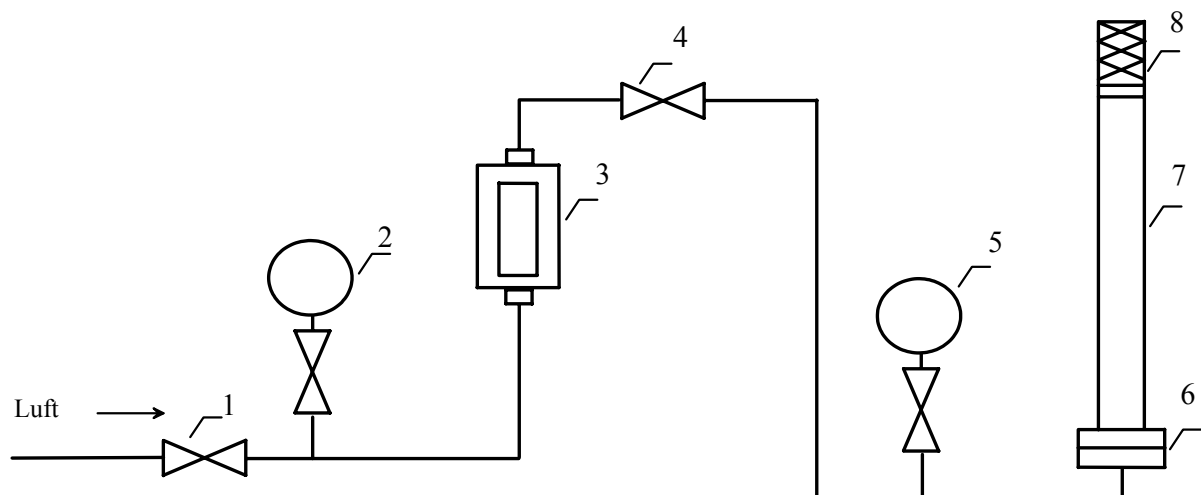
Die Untersuchung zeigt, daß eine internationale Normung dringend erforderlich ist. Für die Normung bieten sich Siebmethoden an, wobei zum Rütteln ein einheitliches Rüttelgerät und Prüfgefäß vorzuschreiben wären, da Rüttelfrequenz und Amplitude sowie die Richtung der Schwingungen einen ungewöhnlich starken Einfluß auf das AbrieBERgebnis ausüben.

## 2.3 Verfahren zur Beurteilung der Zerfallsneigung innerhalb einer Wirbelschicht

### 2.3.1 Versuche von Forsythe und Hertwig [23]

Die Autoren dieser Arbeit definieren einen einfachen Apparat, mit dem sie mittels eines Hochgeschwindigkeitsluftstrahles den Zerfall der Partikel in der Wirbelschicht studieren. Sie untersuchen den Zerfallwiderstand von zerkleinerten (synthetische Si-Al und Si-Mg-Katalysatoren) und von mikrokugelligen Katalysatoren.

Die Autoren vermuteten, daß der Zerfall durch die Kollision der Partikel, die durch den Luftstrahl rapide beschleunigt wurden, mit den langsamer bewegten Partikeln verursacht wurde (Strahlverschleiß der Partikel). Eine Auswirkung von Partikeln, die an die Wand oder an Einbauten schlugen, schlossen sie aus.



**Abb. 2.11:** Versuchsaufbau von Forsythe und Hertwig

1,2- Ventile in Kombination mit Meßgerät zur Anzeige und Regulierung des Druckes

3- Durchflußmesser

5- Nadelventil; 5- Meßgerät zur Anzeige und Regulierung des Druckverlustes am Anströmboden; 6- Anströmboden; 7- Rohr bestehend aus Plexiglas

8- Segeltuchfiltertasche

### Testverfahren

Vor Versuchsbeginn wurde die Segeltuchfiltertasche ausgewogen.

Während des Versuches wurden Segeltuchfiltertasche und Glasrohr periodisch geschlagen, um die Katalysatorpartikel, die an der Wand und dem Filter anhaften, zum Wirbelbett zurückzuführen.

Nach Ablauf der Versuchszeit wurde die Rohrwand mit Aceton ausgewaschen, um alle Katalysatorpartikel möglichst vollständig aus dem Versuchsapparat zu erhalten. Die Segeltuchfiltertasche wurde ausgewogen; die in der Filtertasche gefundenen Partikel wurden den kleinsten Größenfraktionen der Partikelgrößenverteilung zugeordnet.

#### Vorteile des Verfahrens

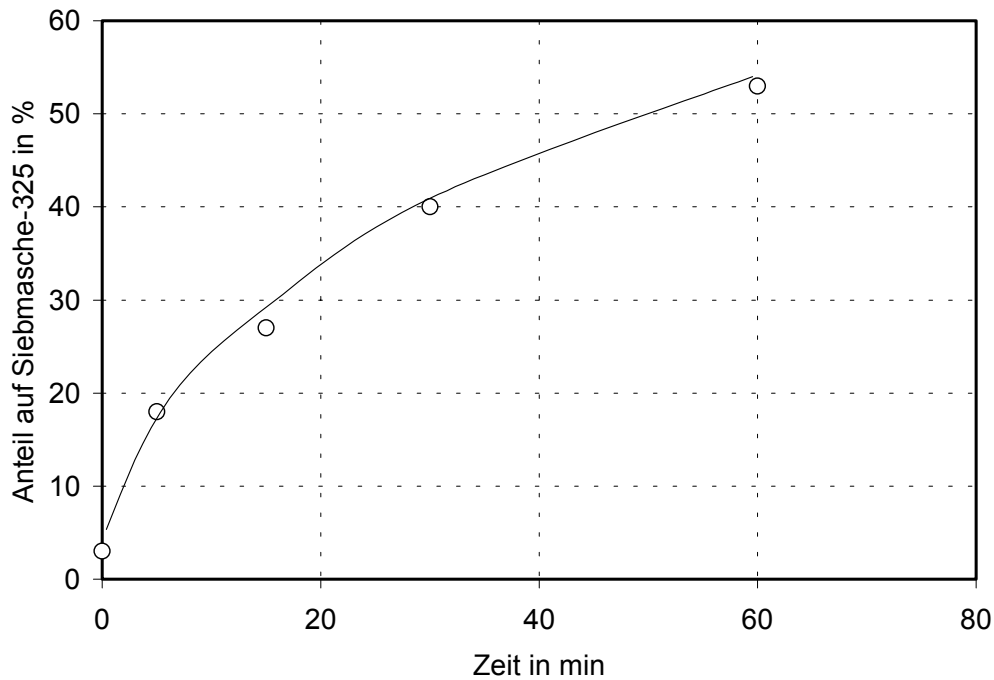
- Untersuchung kleiner Partikelbereiche
- einfacher Apparat und Verfahren
- gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse
- kurze Versuchsdauer

#### Nachteil des Verfahrens

Im Unterschied zu kommerziellen Apparaten wurden die feinen Partikel, die durch den Zerfall entstanden sind, in der Anlage festgehalten. Daraus folgt, daß die Strenge der Zerfallbewertung der restlichen groben Partikel ein wenig reduziert wurde.

Eine Verminderung der Zerfallsrate mit der Zeit, d.h. eine Erhöhung des Zerfallwiderstandes, trat auf, da:

- grobe Ecken glatt geschliffen wurden,
- schwächere Partikel beseitigt wurden,
- der Feinkornanteil erhöht und dadurch die Anzahl der gröberen Partikel, die für den Zerfallprozeß zur Verfügung stehen, reduziert wurde.



**Abb. 2.12:** Erhöhung des Feinanteils bei Verwendung von frisch gemahlene synthetischen Si-Al-Katalysator nach [23].

Die Auswertung erfolgte mittels Sieb- bzw. Wälzanalyse. Bei der Auswertung des Zerfallwiderstandes der zerkleinerten Katalysatoren wies die mittels Siebanalyse ermittelte Zerfallsrate einen beträchtlich höheren Wert auf als bei der Wälzanalyse.

Da aber der Ausgangsfeinanteil bei der Siebanalyse größer war als bei der Wälzanalyse, beschreibt diese die Berechnung der feinanteilfreien Charge besser. Die Zerfallsrate, ermittelt durch Siebanalyse, betrug hier 43,4 %/h für einen Si-Al-Katalysator.

#### Auswertung des Zerfallwiderstandes der mikrokugelligen Katalysatoren

Die mikrokugelligen Katalysatoren weisen einen wesentlich höheren Zerfallswiderstand auf. Die Zerfallsrate ermittelt durch Siebanalyse betrug 27 %/h für einen Si- Al-Katalysator.

### 2.3.2 Versuche von Ray und Jiang

Ray und Jiang [24] führten eine Studie zum Zerfallsverhalten von Partikeln in einer Wirbelschicht mit Blasen durch. Der Gitterstrahlverschleiß wurde weitgehend vermieden. Die Untersuchung bezog sich nur auf stationäre Bedingungen, so daß eine Beeinflussung der Partikeloberfläche durch Mahlung ausgeschlossen werden konnte. Um die Beeinflussung der Gesamtzerfallsrate durch Variierung der Partikel – und Prozeßbedingungen zu ermitteln, wurden die Partikelgröße des untersuchten Kalksteins, die Zugabe von Sand und die Gasgeschwindigkeit in bestimmten Bereichen eingestellt. Die Autoren stellten eine komplette Modelltheorie auf, die aus drei Teilstudien bestand.

#### 1. Eigenschaftsstudie

Sie quantifiziert die Zerfallscharakteristik verschiedener Materialien.

#### 2. Mechanische Modellstudie

Sie schafft den Bezug der Materialeigenschaften zu den mechanischen Variablen.

#### 3. Verteilungsstudie

Sie kann eine Vorhersage der Verteilung der Zerfallsraten in einer Partikelmischung treffen.

Die Experimente wurden durchgeführt in einer Wirbelschicht mit:

Durchmesser:  $D = 0,1 \text{ m}$

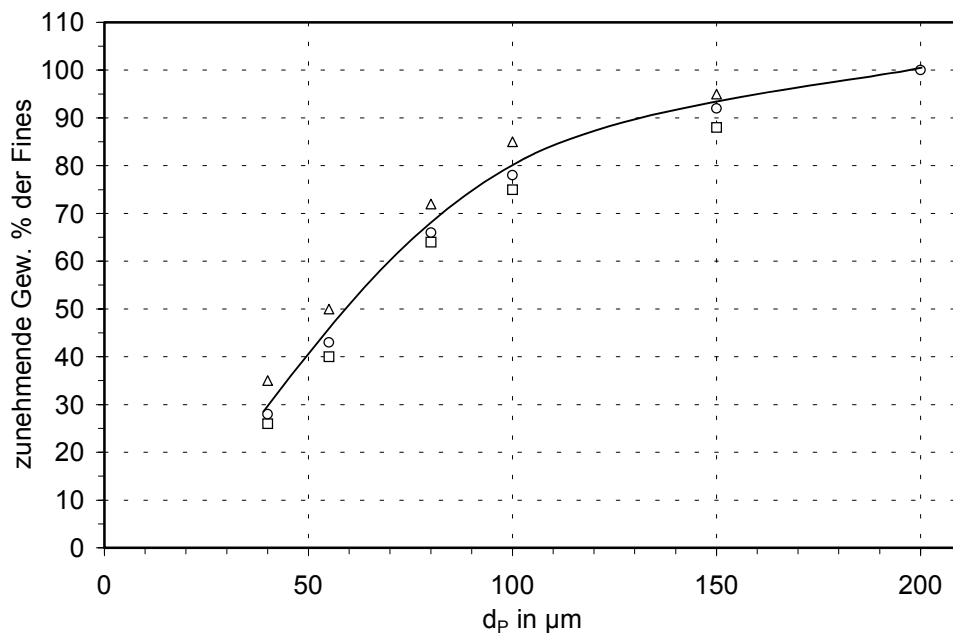
Höhe:  $h = 1,20 \text{ m}$

Anströmboden: poröse Platte

Ein am oberen Ende der Wirbelschicht befindlicher Zyklon und eine Gewebetasche hielten die ausgetragenen Fines zurück. Vor Versuchsbeginn wurde der Kalkstein zu kleinen Partikeln mit einem Radius von 300-1000  $\mu\text{m}$  gemahlen.

Während des Versuches fand eine Filterung der Wirbelbettpartikel statt, um herauszufinden, welche Partikelgröße sich am meisten geändert hat. Dann wurde der Verlust an Fines gemessen. Nach Ablauf der Versuchszeit verursachte der Verlust an Fines eine Masseänderung des Wirbelbettmaterials. Deshalb wurden danach neue Partikel zugeführt.

## Auswertung



**Abb. 2.13:** Größenverteilung der zerfallenen Kalkstein- Fines für verschiedene Ausgangspartikelgrößen und Überschußgasgeschwindigkeiten  $V_{\ddot{u}}$  [24]  
 □  $d_p = 1450 \mu\text{m}$ ;  $V_{\ddot{u}} = 0,78 \text{ m/s}$ ; ○  $d_p = 770 \mu\text{m}$ ,  $V_{\ddot{u}} = 0,83 \text{ m/s}$ ; Δ  $d_p = 770 \mu\text{m}$ ,  $V_{\ddot{u}} = 0,63 \text{ m/s}$

Die frisch gemahlene Partikel verhielten sich so, daß am Anfang ein plötzlicher Zerfall eintritt, welcher sich langsam auf einen bestimmten Wert einstellt.

Der Zerfallsgrad ist der Massebruch, der beim Zerfall der anfangs gemahlene Partikel auftritt. Die Kalksteinpartikel zeigen eine Zerfallsrate gemäß der stationären Bedingungen. Die Autoren bezeichneten dies als stationären Zustand-Zerfall. Als weiterer Fakt ist die Unabhängigkeit der Beziehung der anfänglichen stationären Zustandszerfallsrate und des Zerfallsgrades vom Partikelmassestrom zu erkennen.

Die Partikelgröße und die Überschußgeschwindigkeit  $V_{\ddot{u}} = (V_f - V)$  haben keinen Einfluß auf die Größenverteilung der Fines. Die Autoren gingen davon aus, daß nichtkristallines Material, wie Kohle und Kalkstein, eine natürliche Korngröße aufweist und hier die Rittinger - Oberflächentheorie (die erzeugte Energie ist proportional zur Bildung neuer Oberflächengebiete) und die Kick's Volumentheorie (die Energie ist proportional zum Volumen oder Gewicht des pulverisierten Produktes) zum selben Ergebnis kommen [24].

## 2. Mechanische Modellstudie

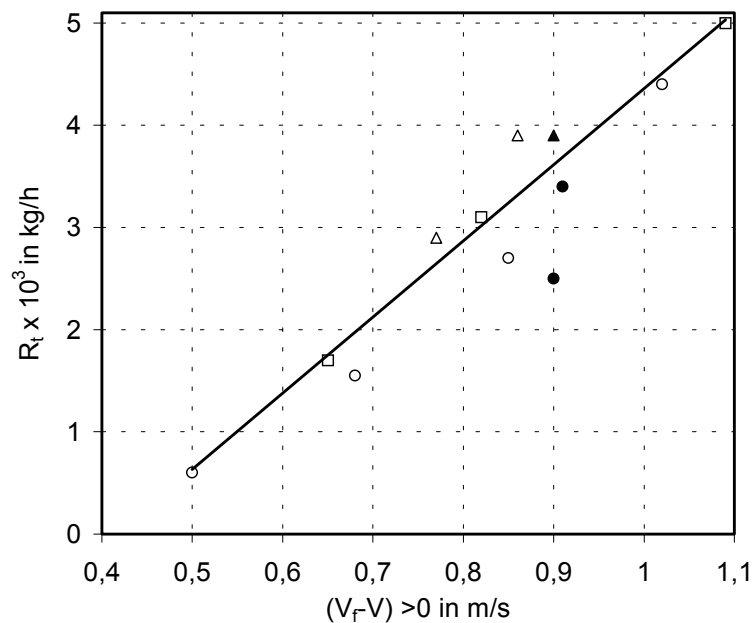
Das mechanische Modell wurde auf ein Blasenwirbelbett mit poröser Gasverteilung angewendet, wobei das Prinzip der Energietransformation zum Tragen kam:

$$E_k = M \cdot g \cdot V_{ii}; \quad E_b = \eta \cdot E_{ki} \quad (2.15)$$

Damit erhielten sie die Gesamtmassenzerfallsrate als verallgemeinerte Funktion der Überschußgeschwindigkeit und der Bettmasse:

$$R_t = a \cdot \eta \cdot E_k; \quad R_t = a \cdot \eta \cdot M \cdot g \cdot V_{ii}. \quad (2.16)$$

Es ist erkennbar, daß bei reiner Kalksteineingabe die Gesamtzerfallsrate unabhängig von der Partikelgröße bei gleicher Überschußgeschwindigkeit ist. Die Partikelgröße beeinflusst nur die Minimalfluidisationsgeschwindigkeit  $V$ .



**Abb. 2.14:** Wirkung der Überschußgeschwindigkeit auf die Zerfallsrate eines Wirbelbettes mit Kalkstein.

**Tabelle 2.5:** Zusammenfassung der Parameter

Symbol	Partikelradius $r_i$ in $\mu\text{m}$	Massenanteil der Komponente $i$ ; $x_i$	Minimalfluidisations- geschwindigkeit; $V$ , m/s
$\Delta$	770	1,00	0,84
$\circ$	545	1,00	0,59
$\square$	385	1,00	0,43
$\blacksquare$	545	0,5	0,52
$\blacksquare$	385	0,5	0,52
$\blacktriangle$	545	0,5	0,72
$\blacktriangle$	770	0,5	0,72
$\bullet$	770	0,25	0,48
$\bullet$	385	0,75	0,48

Die Gerade in Abb. 2.14 beschreibt am besten die Werte für einzelne Partikelgrößen.

Nachteil des Modells: Das mechanische Modell kann den Effekt der Energietransformation vergegenwärtigen aber nicht die Gesamtzerfallsrate.

Die Autoren gingen davon aus, daß die bei der Abrasion wirkende Bruchkraft zerstreud ist. Sie schlagen vor, das Partikel als einen leicht deformierten Körper zu betrachten. Das bedeutet, daß die mechanische Kraft, die auf diesen Körper angewendet wird, sich zerstreut und gemeinsam mit den anderen Partikeln genutzt wird. Sie glauben auf Grund ihrer Versuche, daß es besser ist, das Problem mit Hilfe der Energietransformation zu untersuchen als mit den Gleichungen der mechanischen Kraft.

### 3. Verteilungsstudie

Es wurde ein Zerfallsratenverteilungsmodell erarbeitet.

Folgende Annahmen sind bei diesem Modell zu berücksichtigen:

- Es tritt hauptsächlich Abrasion auf.
- Das Material hat eine natürliche Korngröße (siehe mechanische Modellstudie).
- Es tritt keine Segregation auf.
- Man kann einen repräsentativen Wert für die Minimalfluidisationsgeschwindigkeit  $V$  ermitteln.
- Die Partikel befinden sich im stationären Zustand.
- Die Zerfallseigenschaften jedes Materials können einheitlich definiert werden.



- Der effektive Bruchenergiewert der Komponente  $i$   $E_{bi}$  ist proportional der Gesamtoberfläche derselben Komponente  $A_i$ .

$$b_i = \frac{E_{bi}}{A_i} \quad (2.17)$$

- Prozesse unter den gleichen mechanischen Bedingungen liefern den gleichen Wert der effektiven Gesamtbruchenergie für das Partikelsystem. Daraus folgend können die mechanischen Bedingungen der Einzelpartikel auf die mechanischen Bedingungen der Partikelmischung übertragen werden.

Sie erhielten aus Gleichung:

$$R_{ii} = a_i \cdot E_{bi} = \frac{a_i \cdot b_i \cdot A_i \cdot E_b}{\sum_{j=1}^N b_j \cdot A_j} \quad (2.18)$$

$$A_i = \frac{3 \cdot M \cdot x_i}{e_i \cdot r_i \cdot \rho_i}; \quad E_b = \sum_{j=1}^N E_{bj}; \quad \sum_{j=1}^N x_j = 1 \text{ als verallgemeinerte Funktion der Zerfallsrate}$$

der Komponente  $i$

$$R_{ii} = a_i \cdot \frac{\frac{b_i \cdot x_i}{e_i \cdot r_i \cdot \rho_i}}{\sum_{j=1}^N \left[ \frac{b_j \cdot x_j}{e_j \cdot r_j \cdot \rho_j} \right]} \cdot E_b \quad (2.19)$$

**Tabelle 2.6:** Übereinstimmung der Werte des Oberflächenreaktionsmodells mit den experimentellen Ergebnissen beim Vorliegen von zwei Partikelgrößen  $r_1$  und  $r_2$

$r_1$ in $\mu\text{m}$	$x_1$	$r_2$ in $\mu\text{m}$	$x_2$	$R_{t1} \cdot 10^3$ in kg/h	$R_{t2} \cdot 10^3$ in kg/h	Versuche $r_{12}$	Modell $r_{12}$
385	0,5	545	0,5	0,190	0,140	1,36	1,42
545	0,5	770	0,5	0,225	0,165	1,36	1,41
770	0,25	385	0,75	0,046	0,204	0,23	0,17
770	0,5	385	0,5	0,190	0,330	0,58	0,50
770	0,66	385	0,33	0,190	0,150	1,27	1,00
770	0,5	385	0,5	0,172	0,331	0,52	0,50
770	0,66	385	0,33	0,260	0,219	1,19	1,00

$$r_{12} = \frac{R_{t1}}{R_{t2}} = \frac{\frac{x_1}{r_1}}{\frac{x_2}{r_2}} \quad (2.20)$$

Zusammenfassend stellen die Autoren fest, daß das Oberflächenmodell geeignet ist, die Verteilung der Zerfallsrate der Komponenten einer Mischung vorherzusagen. Dieses Modell beachtet die Wirkung des

- Massenanteiles
- der Dichte
- der Größenverteilung
- und der Zerfalleigenschaften der Mischung.

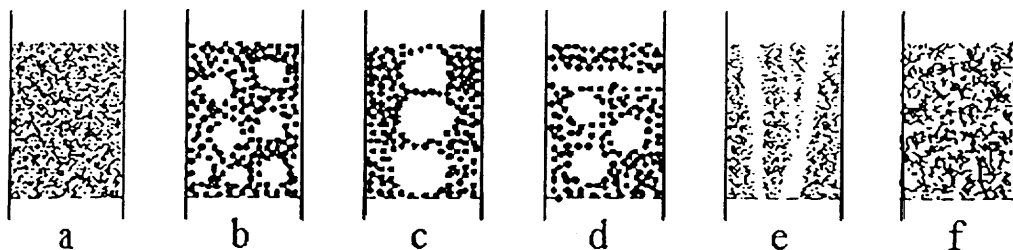
Sie stellten noch fest, daß die Zerfallsrate für jede Komponente proportional ihrer Oberfläche ist. Bei der Bestimmung der Zerfallsrate für Mischungen ist der Verlustanteil durch Zerfall bei den kleineren Partikeln größer. Bei Materialien mit großer Oberfläche ist die Zerfallsrate unabhängig von der mittleren Partikelgröße, wenn der Wert der Bruchenergie für alle Partikel gleich ist. Bei Materialien mit sehr kleiner Oberfläche ist die Zerfallsrate umgekehrt proportional zur mittleren Partikelgröße, wenn der Wert der Bruchenergie für alle Partikel gleich ist. In Mischungen ist das Verhältnis der Zerfallsraten zwischen den Komponenten unabhängig von den mechanischen Prozeßbedingungen.

## 2.4 Der Abrieb in Wirbelschichten

### 2.4.1 Wirbelschichtzustände

Das Verfahrensprinzip der Fluidisation in der Wirbelschicht besteht darin, daß eine Schüttung von Feststoffpartikeln durch einen aufwärts gerichteten Fluidstrom in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt wird. Die zugehörige Geschwindigkeit ( $u_{mf}$ ) ist die minimale Fluidgeschwindigkeit. In diesem fluidisierten Zustand werden die Feststoffteilchen durch den Gasstrom in Schwebelage gehalten [25, 85, 95].

Wird die Strömungsgeschwindigkeit erhöht, kommt es zu einer Expansion der Wirbelschicht bei gleichbleibendem Druckverlust. Die obere Grenze wird durch die Austragsgeschwindigkeit charakterisiert, bei der sich das Kräftegleichgewicht nicht mehr einstellen kann und die Partikel mit dem Fluidstrom ausgetragen werden. Der Zustand der Wirbelschicht ist zudem von Oberfläche, Durchmesser und Dichte der Partikel abhängig und so kann eine Einteilung nach Abb. 2.15 erfolgen:



**Abb.2.15:** Wirbelschichtzustandsformen

a) homogene Wirbelschicht (smooth fluidization)

b) blasenbildende stoßende Wirbelschicht (slugging-axial slugs)

(Blasen füllen fast gesamten Apparatedurchmesser aus, beim Platzen kommt es zu Stoßeffecten)

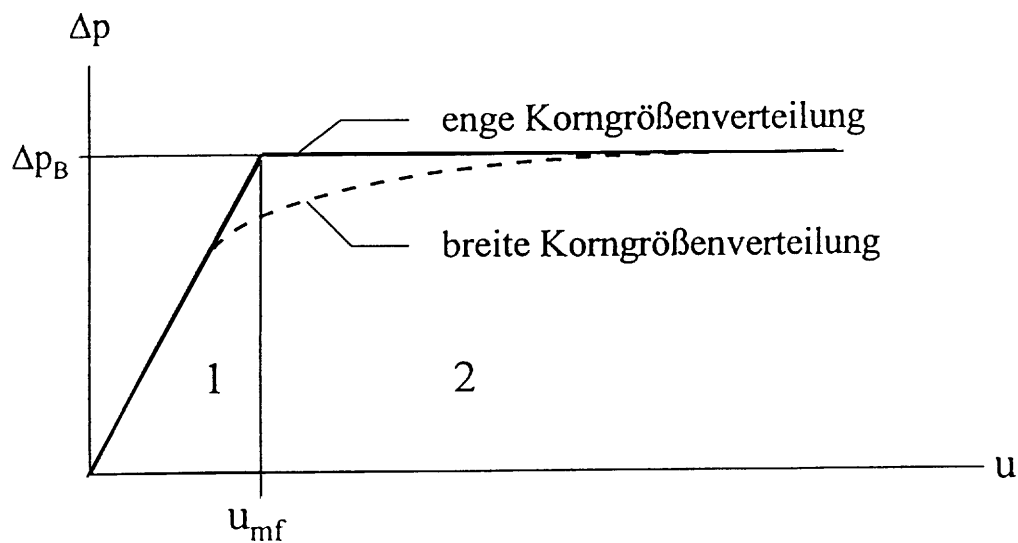
c) blasenbildende Wirbelschicht (bubbling fluidization)

d) stoßende Wirbelschicht (slugging-flat slugs)

(feststofffreie Fluidpolster, die propfenartig wandern)

e) kanaldurchbrochene Wirbelschicht

f) turbulente Wirbelschicht (turbulent fluidization)



**Abb.2.16:** Druckverlust  $\Delta p$  in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit  $u$  eines Fluids in einer Schüttschicht

$u_{mf}$  - Wirbelgeschwindigkeit am Wirbelpunkt;

1 – Festbett;

2 – Wirbelschicht.

Der Lockerungspunkt, der die Grenze zwischen Festbett- und Wirbelschichtzustand markiert, lässt sich über eine Messung des Bettdruckverlustes  $\Delta p$  in Abhängigkeit von der auf den freien Rohrquerschnitt bezogenen Gasgeschwindigkeit  $u$  bestimmen. Allerdings ergibt sich nur für sehr enge Kornfraktionen ein scharf definierter Lockerungspunkt. Die in der Praxis häufigen breiten Korngrößenverteilungen zeigen einen ausgedehnten Lockerungsbereich. Die Beziehung von Ergun gibt den Druckverlust bei der Durchströmung des polydispersen Festbettes an der Stelle  $u = u_{mf}$  an.

$$\Delta p = 4,17 \cdot S_v^2 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \eta \cdot H_{mf} \cdot u_{mf} + 0,29 \cdot S_v \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \rho_f \cdot H_{mf} \cdot u_{mf}^2 \quad (2.21)$$

Man bekommt dann die Minimalfluidisationsgeschwindigkeit, wenn  $\Delta p$  dem Druckverlust der Wirbelschicht gleichgesetzt wird.

$$\Delta p = \Delta p_b = \frac{\text{Gewicht} - \text{Auftrieb}}{\text{Bettquerschnittsfläche}} = A_t \cdot H_{mf} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{A_t} \quad (2.22)$$

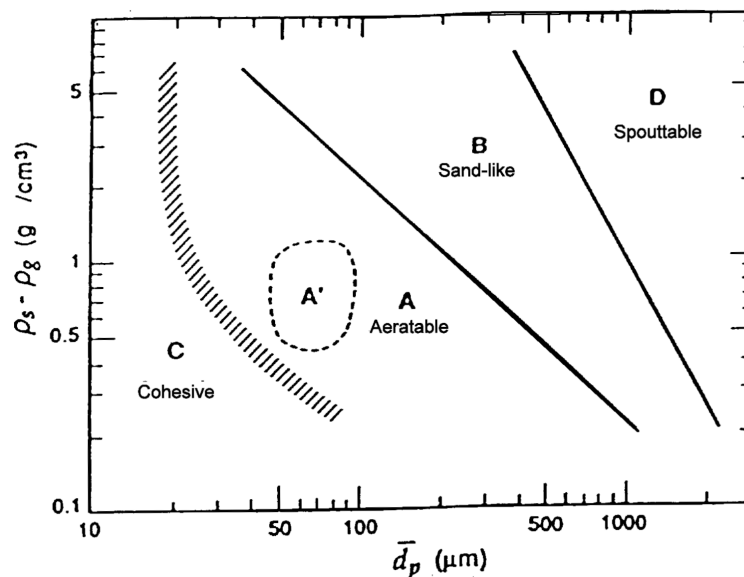
Es folgt:

$$u_{mf} = 7,19 \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot v \cdot S_V \left\{ \sqrt{1 + 0,067 \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot 1}{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \cdot \rho_f \cdot v^2 \cdot S_V^3}} - 1 \right\} \quad (2.23)$$

Um diese Beziehung auswerten zu können, bedarf es der Kenntnis des Gaszustandes ( $\rho_f, v$ ), der Dichte  $\rho_s$  der Partikel, der Porosität  $\varepsilon_{mf}$  der Schicht im Minimalfluidisationszustand und der volumenbezogenen spezifischen Oberfläche  $S_V$  des Feststoffs.  $S_V$  ist definiert als:

$$S_V = \frac{\text{Oberfläche aller Partikeln des Kornkollektivs}}{\text{Volumen aller Partikeln des Kornkollektivs}} \quad (2.24)$$

Es existiert eine Vielzahl von Theorien, welche die Inhomogenitäten einer realen Wirbelschicht berücksichtigen [104]. Sie beinhalten jedoch komplizierte Korrelationen zur Blasencharakteristik und ihrer Wechselwirkungen mit dem Feststoff. Die verschiedenen Fluidisierungszustände für unterschiedliche Materialien können sehr einfach nach der GELDART-Klassifikation in vier Gruppen eingeteilt werden.



**Abb.2.17:** Fluidisierungszustände nach GELDART für Luft bei Umgebungsbedingungen [26]

Klasse A: Partikeldurchmesser  $d_p$  und Partikeldichte  $\rho_F$  klein ( $< 1400 \text{ kg/m}^3$ )  
Leicht fluidisierbare Feststoffe bilden eine homogene Wirbelschicht

Klasse B: sandähnliche Feststoffe,  $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$  und  $1400 \text{ kg/m}^3 < \rho_F < 4000 \text{ kg/m}^3$

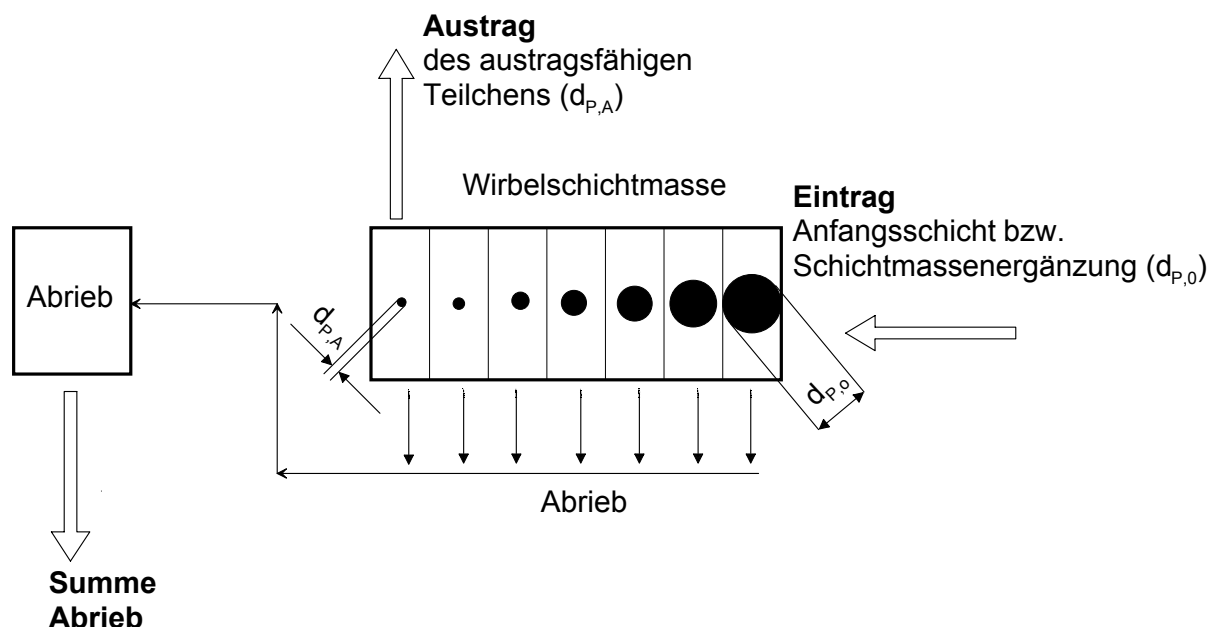
Gut fluidisierbare Feststoffe mit starken Blasenbildungsvorgängen führen zu sehr großen Blasendurchmessern.

- Klasse C: sehr feine Stäube (kohäsive Feststoffe)  
Extrem schwierige Fluidisation, da Teilchenkräfte bedeutend größer als die aus Interaktion mit dem Gas resultierenden sind.
- Klasse D: große und /oder schwere Feststoffpartikel  
Große Wirbelschichten sind schwer zu fluidisieren. Es treten Stöße durch platzende Blasen sowie Kanalbildung durch ungleichmäßige Gasverteilung auf.

#### 2.4.2 In der Wirbelschicht ablaufende Vorgänge und wirkende Mechanismen

Änderungen der Teilchengrößenverteilung spielen eine wichtige Rolle bei Wirbelschichtprozessen. Diese Änderungen werden durch Austrag, Abrieb oder Agglomeration verursacht [86, 90, 91, 103, 105, 106]. Während der Effekt des Austrags auf das Schichtmaterial begrenzt werden kann, indem man die gesammelten Feinteilchen zur Schicht zurückführt, verursachen die produzierten feinen oder groben Partikel durch den Abrieb oder durch die Agglomeration die Änderung des Partikelspektrums des Bettmaterials.

Ein vereinfachtes Schema, das die Vorgänge in der Wirbelschicht beschreibt, ist in der Abbildung 2.18 dargestellt.



**Abb. 2.18:** Prinzipschema für den Abriebsvorgang eines Teilchens in der Wirbelschicht

Eine allgemeine Populationsbilanz könnte theoretisch die sich instationär oder stationär entwickelnde Partikelverteilung durch eine stark vereinfachte Populationsbilanzgleichung wie folgt beschreiben [27, 28, 33, 50, 51, 52, 107]:

$$\frac{\partial(N \cdot q_0)}{\partial t} = - \frac{\partial(W_1 \cdot N \cdot q_0)}{\partial d} + \dot{N}_{ein} \cdot q_{0,ein} - \dot{N}_{aus} \cdot q_{0,aus} + N \cdot (\dot{Q} - \dot{S}) \quad (2.25)$$

mit:

$N$	Anzahl	$W_1$	Abriebsgeschwindigkeit
$q_0$	Anzahldichteverteilung	$\dot{Q}, \dot{S}$	Quelle, Senke (Bruch, Agglomeration)
$t$	Zeit	$d$	Durchmesser

In der Regel können die Quell- und Senke- Glieder der Populationsbilanzgleichung für Partikelzerfall (im Sinne von Entstehen von Partikeln in der gleichen Durchmessergrößenordnung wie das fluidisierte Bettmaterial) und der Agglomeration von Partikeln für die in diesem Beitrag betrachteten Vorgänge vernachlässigt werden. (Dies gilt natürlich nicht für flüssigkeitsbedünte Wirbelschichten, bei denen neben Agglomerationsvorgängen auch Partikelzerfall und stetiges Partikelwachstum auftritt). Agglomeration tritt meistens mit klebrigen Partikeln, in feuchter Luft oder bei hohen Temperaturen auf (Ray et al., 1987) [24].

Eine Zusammenstellung der Kräfte und Mechanismen, die zum Partikelzerfall führen und der Verfahren zur Prüfung des Zerfallsverhaltens geben Demmich[29], Wirth[30], Bemrose, Bridgewater[2], Xi [4].

Man kann folgende Ursachen für das Auftreten von Abrieb beobachten:

- die Kollision von Partikeln gleicher Oberflächenform,
- die Kollision von Partikeln unterschiedlicher Oberflächenform,
- die Kollision von Partikeln mit der Wand oder mit festen bzw. beweglichen Einbauten [96],
- die thermische Beanspruchung, resultierend aus schnellen Temperaturwechseln, denen die Partikel ausgesetzt werden, welche durch Dehnungsbehinderung Spannungen in den Partikeln hervorruft,
- die Partikelwechselwirkung durch Adhäsion
- den Strahlmahlungseffekt an den Wirbelgasverteilungsöffnungen [96],

- statische mechanische Beanspruchung, die durch äußere Lasten auf die Partikeloberfläche, z.B. Innendruck, Schüttgutlasten, hervorgerufen wird.

Baeyens et. al. [31] veranschaulichen thermische und chemische Beanspruchung während der Kalzination von Kalkstein, wo das Verdampfen und die Hydrataufspaltung und Kalzination viel Staub produzieren. Die Abriebsmenge wird von dem Typ des Kalksteins, von der Temperaturdifferenz zwischen der Schicht und der Zufuhr beeinflusst. Bradley und Drown haben zwei empirische Abriebskoeffizienten bei einem Wirbelschichtkalzinationsprozeß benutzt, um das Modell an die experimentellen Daten anzupassen [83]. Der Effekt des Abriebs aber benötigt weitere Studien, da er nicht ausreichend erforscht ist.

Zur Untersuchung des Austragsvorgangs kann man die Vorgänge in vier Bereichen der Wirbelschicht einzeln betrachten:

- Freiraum
- Wirbelschichtoberfläche
- Wirbelschicht
- Anströmboden

Die nächste Abbildung stellt die Phänomenologie des Feststoffaustrags [29,82] dar.

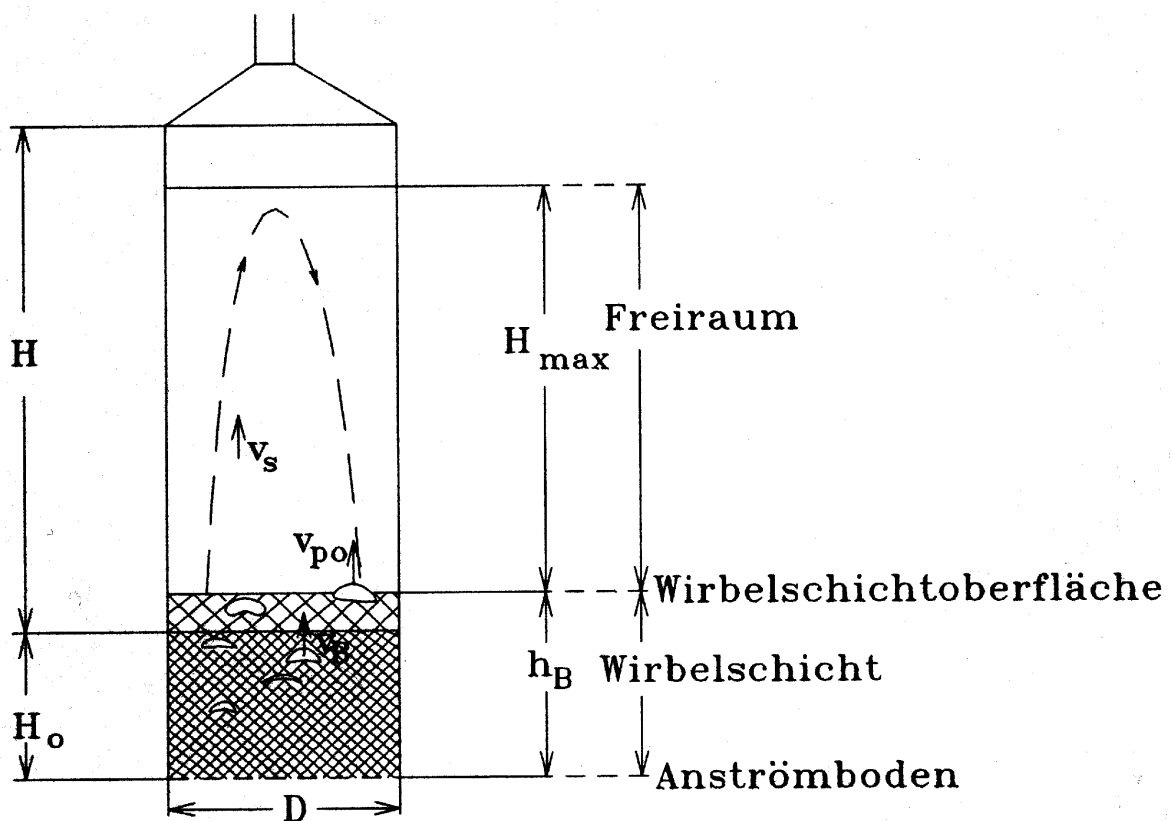


Abb. 2.19: Austragsvorgang in der Wirbelschicht



## Vorgänge im Freiraum

Die bei der heterogenen Fluidisation unmittelbar über dem Anströmboden entstehenden Gasblasen wachsen auf dem Weg zur Wirbelschichtoberfläche durch Koaleszenz. Sie erreichen die Oberfläche mit der Blasensteiggeschwindigkeit  $v_b$  und zerplatzen dort. Dabei schleudern sie Feststoffpartikel mit einer Startgeschwindigkeit  $v_{p0}$  in den Freiraum. Im Freiraum bewegen sich die Partikel längs einer bestimmten Flugbahn und erreichen die maximale Steighöhe  $H_{\max}$ . Die Feststoffpartikel fallen in die Wirbelschicht wieder zurück, wenn die Freiraumhöhe größer als die Partikelsteighöhe ist. Wird die Freiraumhöhe überschritten, erfolgt der Austrag der Feststoffpartikel.

## Vorgänge an der Wirbelschichtoberfläche

Die Feststoffpartikel haben eine über dem Wert der mittleren Gasgeschwindigkeit liegende Sinkgeschwindigkeit. Deshalb müssen sie an der Wirbelschichtoberfläche eine Beschleunigung erfahren. Diese erhalten sie von den an der Wirbelschichtoberfläche zerplatzenden Gasblasen.

## Vorgänge in der Wirbelschicht

Zahlreiche Versuche zeigen, daß eine von Werther [25] abgeleitete Korrelation die Einflüsse des Wirbelschichtdurchmessers und der Wirbelbetthöhe auf die Steiggeschwindigkeit der Gasblasen am besten ausdrückt. Xi [4] weist auch den Einfluß der Betthöhe nach.

Zur Ermittlung des mechanischen Zerfalls in der Wirbelschicht werden in Abhängigkeit von den o.g. Beanspruchungsorten und damit Beanspruchungsarten verschiedene experimentelle Ausrüstungen eingesetzt.

Da der Partikelzerfall den Partikelaustrag beeinflusst, ist es zweckmäßig den Partikelaustrag zu messen. Frühere Austragsversuche haben gezeigt, daß die Gasgeschwindigkeit und die Höhe des Raumes oberhalb der Wirbelschichtoberfläche den Feingutaustrag entscheidend beeinflussen. Die Schwierigkeiten einer genauen Messung einer breiten Schichtkorngrößenverteilung haben es bisher verhindert, den Einfluß der Korngrößenverteilung der Wirbelschicht auf den Austrag experimentell zu

bestimmen. Für die Erfassung des Einflusses der Schichtkorngrößenverteilung wird daher ein neuer Weg beschritten, der von instationären Austragsversuchen ohne Rückführung des Feingutes in die Schicht ausgeht. Aus den gemessenen Daten wird die Änderung der Korngrößenverteilung der Wirbelschicht in Abhängigkeit von der Zeit berechnet, auf diese Art und Weise greift man eine bestimmte Austragszeit heraus und kann die momentanen Austragsvorgänge auf die zu dieser Zeit in der Schicht vorliegende Korngrößenverteilung beziehen [32]. Es zeigt sich, daß bei einem langen Freiraum der mittlere Durchmesser der Austragskorngrößenverteilungen die Schwebekorngröße nicht übersteigt und der größte Kugeldurchmesser des Austrags nicht viel größer als die mittlere Korngröße ist. Bei einem kurzen Rohr geht die mittlere Korngröße weit über die Schwebekorngröße hinaus, und der Austrag besitzt den selben Korngrößenbereich aber nicht die gleiche Korngrößenverteilung wie die Wirbelschicht.

#### **2.4.3 Untersuchung der Quellen, die zum Partikelabrieb führen**

In [41] wurden von Pell und in [35] von Zenz und Kelleher Beziehungen zur Berechnung des Abriebs in Wirbelschichtanlagen in Abhängigkeit vom Entstehungsort angegeben. Es existieren die Quellen Anströmboden (Strahlabrieb), Wirbelschicht mit Blasen (Blasenabrieb) und Zyklon (Zyklonabrieb). Ein anderer wichtiger Schlüsselpunkt für eine systematische Untersuchung der Abriebsphänomene in den Wirbelschichtsystemen ist die Unterscheidung zwischen den einzelnen Bereichen (Quellen), die unterschiedliche mechanische Belastungen hervorrufen [41]. Die entsprechenden einzelnen Abriebsraten werden durch Modellgleichungen berechnet, die die Betriebsbedingungen und die Eigenschaften der Materialien berücksichtigen [114, 115]. Sie werden später betrachtet. Außerdem werden die aus der Schicht ausgetragenen Partikel auf dem Weg zum Zyklon weiter abgerieben. Dieser Effekt muß berücksichtigt werden.

Wenn z. B. ein Katalysator in einem industriellen Wirbelschichtprozeß benutzt wird, können die schwächsten Stellen im Partikelaufbau Ausgang für eine Zerteilung sein. Aber nach dieser ersten Phase sind die Partikel abgeschliffen anstatt gebrochen, wenn ein kritischer mechanischer Druck nicht überstiegen wird [42]. Der Mechanismus, der in einer blasenbildenden Wirbelschicht herrscht, ist reiner Abrieb

und wird in der vorliegenden Arbeit untersucht. Auf dieser Idee beruht der folgende Vorgang:

Da die produzierten Feinteilchen ziemlich klein sind, ist der Abscheidegrad des Zyklons deutlich kleiner. Folglich kann angenommen werden, daß der Abrieb sofort nach seiner Entstehung in den Zyklon ausgetragen wird, selbst wenn er sich im Strahlbereich oder in der sprudelnden Schicht bildet. Die Größenverteilungen des abgeriebenen Materials zeigen keine Abhängigkeit von der Größe des Bettmaterials und den Fluidisierungsbedingungen. Wen und Mitarbeiter [24] und auch Stein [81] haben diese Annahme für den Abrieb bestätigt. Es gilt auch, daß nach einer Ausgangsphase, in der der ursprünglich anhaftende Staub von den Mutterpartikeln abgetrennt ist, das Material völlig innerhalb des Systems gehalten wird. Deshalb ist zweckmäßig, daß man die Abriebsrate erst nach dieser ersten Phase definiert. Nur dann wird der reine Abrieb ausgetragen. Wegen des Mechanismus der Abnutzung ist die Änderung der Teilchengröße klein. Die sich ergebende quasi – stationäre Abriebsrate kann als Summe der Abriebserzeugung durch die einzelnen Abriebsquellen geschrieben werden:

$$\dot{m}_{loss,tot} = \dot{m}_{loss,j} + \dot{m}_{loss,b} + \dot{m}_{loss,c} \quad (2.26)$$

wobei  $\dot{m}_{loss,j}$ ,  $\dot{m}_{loss,b}$  und  $\dot{m}_{loss,c}$  die Massen des ausgetragenen Abriebs sind, die pro Zeiteinheit durch den Abrieb im Strahlbereich, im blasenbildenden Bereich und im Zyklon produziert werden.

#### 2.4.3.1 Strahlabrieb

Eine strenge Trennung des Abriebs, der im Strahl- und Blasenbereich auftritt, ist sehr schwierig, da der von der Strahlgeschwindigkeit abhängig ist. Der Strahl beeinflusst einen entsprechend großen Teil des Schichtvolumens [37]. Der Blasenabrieb tritt gewissermaßen im Bettbereich neben dem Strahl über der porösen Platte infolge der Fluidisierung auf. Die umfangreiche Arbeit von Vaux [34] zeigt, daß man die Auswirkungen der Gasgeschwindigkeit und der Strahlgeschwindigkeit unterscheiden muß. Nach den Untersuchungen scheint die Abriebsrate (kg/kg.s) proportional der Überschußgeschwindigkeit  $(u - u_{mf})$  [38, 78], der Betthöhe und der Feststoffdichte zu sein. Die Auswirkungen der Hochgeschwindigkeit (von Strahlen, im Zyklon) werden als sehr wichtig anerkannt. Die Autoren [34, 75, 76, 99] bestätigen, daß die

Gasgeschwindigkeit am Verteilerboden ein sehr wichtiger Faktor für den Abrieb ist. Es wurde veranschaulicht, daß die Abriebsrate proportional dem Quadrat der Strahlgeschwindigkeit  $u_1^2$ , der Plattengeometrie, der Partikelform, der Teilchengröße, der Härte und Elastizität, den Gaseigenschaften und der Strahlgeometrie ist. Der Einfluß der Geschwindigkeit des Strahles auf die Abriebsrate wurde nach Zenz und Kelleher [35] so beschrieben, daß sie proportional von  $u_1^{2,5}$  ist. Andere Autoren erklären den Strahlabriebeffekt  $u_1^n$  mit verschiedenen Größen für den Exponenten  $n$  [39, 40].

Die experimentellen Arbeiten über den Abrieb von Shu-Yh Wu, Jan Baeyens und Chen- Yeon Chu [3] wurden in einer Gaswirbelschichtanlage mit dem inneren Durchmessers von 6,62 cm und der Höhe 2,5 m durchgeführt. Eine einzelne Düse ist über der perforierten Platte installiert. Das verwendete Material ist Silikonsand mit Siebgrößen von 195, 296 und 421  $\mu\text{m}$ . Ein Zyklon und ein Staubfilter sammeln alle Feinteilchen. Der Einfluß der Partikelgröße, der Schichthöhe, der Fluidisationsgeschwindigkeit und des Öffnungsdurchmessers wurde untersucht. Eine stoßende Wirbelschicht wurde bei höheren Werten des Verhältnisses (Höhe/Durchmesser) beobachtet. Es wurde festgestellt, daß sich die Menge der größeren Partikel in der Schicht infolge der erhöhten Menge der feinen Teilchen und des ausgetragenen Staubs verringert hat. Sie haben festgestellt, daß die Abriebsrate eine Funktion der lokalen höheren Geschwindigkeit an den Öffnungen und der hohen Geschwindigkeiten am Düsenausgang in der Schicht ist. Die Abriebsrate ist nicht konstant, aber sie nimmt linear mit der Geschwindigkeit am Düsenausgang zu. Nach den Ergebnissen dieser Autoren tritt mit einer Verringerung der mittleren Teilchengröße eine höhere Abriebsrate auf. Das liegt an der Tatsache, daß bei gleicher Schichtmasse die Anzahl bei kleinem Partikeldurchmesser höher ist als bei großem Partikeldurchmesser und so erhöht sich die Auswirkung des Abriebs. Die Ergebnisse zeigen, daß die unterschiedlichen Durchmesser der Düse keinen Einfluß auf die Abriebsrate haben. Die Abriebsrate erhöht sich mit dem Bettgewicht (oder Betthöhe). Es ist zu vermuten, daß es ein Resultat der erhöhten Druckschwankungen ist, die in den tieferen Schichten auftreten, wenn es Stöße gibt. Als Zusammenfassung der experimentellen Daten kann die Abriebsrate wie folgt definiert werden:

$$\text{Abriebsrate} = f \left[ \begin{array}{c} \text{Düseggeschw. Überschußgeschw. Partikeleigen-Schichtmasse} \\ \text{Teilchengröße} \\ \text{schaften} \end{array} \right]$$

oder

$$R_t = k_{a0} \cdot u_{or} \cdot (u_T - u_{mf}) \cdot \frac{W_2}{d_{sv}} \quad (2.27)$$

Alle Daten sind entsprechend dieser Gleichung umgewandelt. Vom Anstieg der Kurve, die sich nach Gleichung (2.27) ergibt, wurde der Proportionalitätskoeffizient in s/m für Sand definiert. Eine Annäherung kann entwickelt werden, wenn die Luftblasenströmungsgeschwindigkeit  $(u_T - u_{mf})$  als antreibender Faktor für das Fluidisierungsverhalten betrachtet wird.

$$\frac{Q_B}{A} = \gamma (u_T - u_{mf}) \quad (2.28)$$

und  $\gamma < 1$  mit  $\gamma = 2,27 \cdot Ar^{-0,21}$  für  $Ar > 100$  (Baeyens et al., 1992) Gleichung (2.27) kann geändert werden:

$$R_t = k_{a0}^* \cdot u_{or} \cdot \frac{Q_B}{A} \cdot W_2 \quad (2.29)$$

Die experimentellen Resultate können gut durch Gleichung (2.29) beschrieben werden. Man bekommt die beiden Proportionalitätskoeffizienten  $k_{a0} = 7,4 \cdot 10^{-9}$  (s/m) und  $k_{a0}^* = 2,5 \cdot 10^{-7}$  (s/m<sup>2</sup>) für Sand von den Anstiegen der beiden Gleichungen.

Der Strahlabrieb wurde von Werther [36] unter Berücksichtigung der Energiebilanz des Abriebprozesses untersucht. Nach ihm ist:

$$\dot{m}_{loss,j} = n_{or} \cdot K_j \cdot \rho_f \cdot d_{or}^2 \cdot u_{or}^3 \quad (2.30)$$

$$\dot{m}_{loss,j} = C_j \cdot d_{pb} \cdot \rho_f \cdot \frac{D_t^6}{d_{or}^4 \cdot n_{or}^2} \cdot u^3 \quad (2.31)$$

$C_j$  ist eine Konstante, die in folgender Beziehung steht:  $K_j = C_j \cdot d_{pb}$ , d.h. die Materialanfälligkeit zur Abnutzung erhöht sich linear mit dem mittleren Durchmesser der Partikel in der Schicht.  $n_{or}$  ist die Anzahl der Öffnungen im Verteilerboden,  $\rho_f$  ist die Dichte des Strahlgases,  $d_{or}$  ist der Durchmesser der Öffnungen und  $u_{or}$  ist die Strahlgeschwindigkeit innerhalb einer Öffnung:

$$u_{or} = u \cdot \frac{D_t^2}{n_{or} \cdot d_{or}^2} \quad (2.32)$$

wo  $D_t$  der Durchmesser des Apparates ist.

Experimentelle Daten werden zu dem Strahlabrieb des Calcit- und Silikagels in Wirbelschichten von Ratnam und Viswanathan [111] dargestellt. Das Bruchmodell stellt nicht ausreichend die Daten bezüglich der abgeriebenen Produkt Korngrößenverteilung dar. Es wurde eine gute Korrelation für die Voraussage des Gesamtverschleißmaßes erreicht. Es wurde gefunden, daß sich das Verschleißmaß mit der Strahlgasgeschwindigkeit verringert und dann wieder erhöht, wenn ein Minimum überschritten wird. Die Effekte des Strahles und zusätzlich der Gasgeschwindigkeiten, der Strahlenszahl, der Betthöhe und der Rauheit der Apparatewand auf dem Abrieb wurden ebenfalls untersucht [112].

#### 2.4.3.2 Abrieb, durch Blasen verursacht

Der Mechanismus des blasenverursachten Abriebs ist noch nicht genug erforscht [36, 44, 74, 77, 108, 113] (Werther und Reppenhagen, Vaux).

Es gibt verschiedene theoretische und empirische Annäherungen, die zusammengefaßt werden können wie:

$$\dot{m}_{loss,b} = K_b \cdot m_b^n \cdot (u - u_{min}) \quad (2.33)$$

wo  $m_b$  die Schichtmasse ist, der Exponent variiert zwischen 1 und 2. Im Fall von  $n = 1$  ändert sich der Abriebsdruck nicht mit der Betthöhe. Dort ist einfach eine lineare Zunahme mit der Menge des behandelten Materials angedeutet. Im Gegensatz zu diesem deutet ein Exponent  $n > 1$  eine Zunahme des Abreibungsdruckes mit der Betthöhe an.

Die Geschwindigkeit  $u_{min}$  wird als eine Schwellwertgeschwindigkeit betrachtet, bei deren Überschreiten die Luftblasen Abrieb verursachen. Ihr Wert verändert sich von

$u_{\min} = u_{mf}$  bis  $u_{\min} \gg u_{mf}$ . Folglich wird eine weitere Studie dieses Mechanismus notwendig sein, bevor Gleichung (2.33) angewendet werden kann.

In Übereinstimmung mit Gleichung (2.33) kann der Abrieb durch eine Abriebskonstante  $K_b = 43 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$  und einen Unterschied zwischen der Gasgeschwindigkeit  $u$  und einer Schwellwertgeschwindigkeit  $u_{\min}$ , die deutlich größer als die Minimalfluidisationsgeschwindigkeit des Materials ist, beschrieben werden. ( $u_{\min} = 0,35 \text{ m/s}$ ;  $u_{mf} = 0,005 \text{ m/s}$ ).

Folglich kann in Gleichung (2.26) der verursachte Strahl- und Zyklonabrieb durch Gleichung (2.31) und (2.39) ersetzt werden. Das führt zu dem folgenden Ausdruck für den gesamten Abrieb des Systems:

$$\dot{m}_{\text{loss,tot}} = C_j \cdot d_{pb} \cdot \rho_t \cdot \frac{D_t^6}{d_{or}^4 \cdot n_{or}^2} \cdot u^3 + \dot{m}_{\text{loss,b}} + C_c \cdot d_{pc} \cdot \sqrt{\dot{m}_{c,in}} \cdot \sqrt{\rho_f} \cdot \frac{A_t^{2,5}}{A_{c,in}^2} \cdot u^{2,5} \quad (2.34)$$

Für  $\dot{m}_{\text{loss,b}}$  gilt noch:

$$\dot{m}_{\text{loss,b}} = K_b^* \cdot m_b \cdot (u - u_{mf})^3 \quad (2.35)$$

wo  $K_b^* = 45 \cdot 10^{-9} \text{ s}^2/\text{m}^3$

Die gemessenen Daten werden auch auf die Überschußgasgeschwindigkeit bezogen. Die kleinste Quadratregression ergibt einen Exponenten von 2,89, der auf 3 aufgerundet werden kann. Gleichung (2.35) beschreibt den durch Blasen verursachten Abrieb im ganzen Wirbelschichtsystem.

### 2.4.3.3 Zyklonabrieb

In den Zyklon tritt das Gas/Feststoff- Gemisch mit hoher Eintrittsgeschwindigkeit meistens tangential ein und es entsteht im Zyklon eine wandnahe abwärtsgerichtete Wirbelströmung. Davon werden infolge der Einengung im unteren konischen Teil laufend Volumenelemente zu einer inneren, aufwärts gerichteten Wirbelströmung umgelenkt. Auf Grund ihrer Trägheit bewegen sich die Feststoffteilchen auf die Zyklonwand zu, wo sie abgeschieden werden. Die hohe Geschwindigkeit, die starken Wirbel und die Strömungsumlenkung rufen intensive Zusammenstöße zwischen Wand und Partikeln, Partikeln und Partikeln hervor, als Folge entsteht Abrieb. Zenz

und Kelleher [35] haben eine Testapparatur vorgestellt, mit der sie den Abrieb in einem Zyklon untersucht haben. Obwohl der Zyklon als Gas/Feststoff- Trennapparat ein Bestandteil vieler Wirbelschichtanlagen ist und im Zyklon in der Regel eine nicht vernachlässigbare Menge an Abrieb verursacht wird, wurde diese Problematik bisher viel zu wenig erforscht [43].

Vor kurzem untersuchten Reppenhagen und Werther [36] den Abrieb verschiedener Produkte im Zyklon. Den Abriebprozeß berechneten sie mit der folgenden Gleichung für Zyclone mit einem tangentialen Eingang, unabhängig von der Größe und Geometrie:

$$\dot{m}_{loss,c} = \dot{m}_{c,in} \cdot C_c \cdot d_{pc} \cdot \frac{u_{c,in}^2}{\sqrt{\mu_c}} \quad (2.36)$$

In Gleichung (2.36) ist  $\dot{m}_{c,in}$  der Feststoffmassenstrom, der den Zyklon passiert und  $d_{pc}$  ist der jeweilige oberflächenbezogene mittlere Durchmesser.  $\dot{u}_{c,in}$  ist die Gasgeschwindigkeit am Zycloneingang und  $\mu_c$  ist die Feststoffbeladung, die auf folgende Weise definiert wird:

$$\mu_c = \frac{\dot{m}_{c,in}}{\dot{m}_f} = \frac{\dot{m}_{c,in}}{\rho_f \cdot u_{c,in} \cdot A_{c,in}} \quad (2.37)$$

wobei  $A_{c,in}$  der Querschnitt des Zycloneingangs ist.  $C_c$  ist in Gleichung (2.36) eine von der Teilchengröße unabhängige Konstante, die die Abriebsfähigkeit des Materials kennzeichnet. Die Zycloneingangsgeschwindigkeit kann durch einen Ausdruck mit der Gasgeschwindigkeit ersetzt werden.

$$u_{c,in} = u \cdot \frac{A_t}{A_{c,in}} \quad (2.38)$$

In dem Fall mehrerer Zyclone, die ähnlich angeordnet werden, ist  $A_{c,in}$  die Summe ihrer Eingänge.

Mit Gleichung (2.37) und (2.38) kann Gleichung (2.36) auf folgender Weise geschrieben werden:



$$\dot{m}_{loss,c} = C_c \cdot d_{pc} \cdot \sqrt{\dot{m}_{c,in}} \cdot \sqrt{\rho_f} \cdot \frac{A_t^{2,5}}{A_{c,in}^2} \cdot u^{2,5} \quad (2.39)$$

Da in der vorliegenden Arbeit nur eine blasenbildende Wirbelschicht untersucht wird, wird auf die Untersuchung der Mechanismen im Zyklon nicht näher eingegangen.

#### 2.4.3.4 Vergleich zwischen dem Strahlabrieb, dem Blasenabrieb und dem Zyklonabrieb

Wenn das Wirbelschichtsystem als Ganzes betrachtet wird, wird zwischen den Abriebsmechanismen ein Vergleich durchgeführt. Strahlabrieb und Zyklonabrieb sind aufgrund von Gleichungen (2.31) und (2.36) beschrieben.

Zu diesem Zweck wurden FCC – Katalysatoren einem Strahlabriebstest und einem Zyklonabriebstest unterworfen, um die von der Teilchengröße unabhängige Abriebskonstante  $C_j$  und  $C_c$  festzustellen [36].

Die Materialien wurden in verschiedene Fraktionen geteilt. Die Fraktionen wurden dann dem Strahlabriebstest unterworfen. In diesem Test wurden die Öffnungsgeschwindigkeit  $u_{or}$  und der Öffnungsdurchmesser  $d_{or}$  verändert. Die von der Teilchengröße abhängige Abriebskonstante  $K_j$  wurde nach Umstellen der Gleichung (2.30) berechnet. Die Abriebskonstanten der verschiedenen Fraktionen wurden verwendet, um die von der Teilchengröße unabhängige Abriebskonstante  $C_j$  zu erreichen. Die Werte für  $C_j$  und  $C_c$  hängen mit den jeweiligen Werten der meisten abriebsfesten Katalysatortypen (97 – A(e-cat)) zusammen. Die Katalysatoren werden in einer aufsteigender Reihe mit Bezug zum Wert des Strahlabriebs geordnet. Die Unterschiede, die auftreten, können auf den unterschiedlichen Abriebsmechanismen basieren. Im Fall des Strahlabriebs sind die Interpartikelauswirkungen verantwortlich, während im Fall des Zyklonabriebs die Partikelfriction und die Partikelauswirkung auf die Zyklonwände betrachtet werden müssen. Der durchgeführte Vergleich fügt einen weiteren Beweis der Notwendigkeit hinzu, die unterschiedlichen Abriebsmechanismen separat zu betrachten und zu modellieren. Es gibt keine Möglichkeit der Voraussage des Abriebs einer bestimmten Quelle auf der Grundlage der Ergebnisse für eine andere Quelle. Die gleiche Aussage gilt auch für den Blasenabrieb. Der materielle Verlust einer Wirbelschicht,

der durch Abrieb verursacht wird, entsteht durch verschiedene Quellen mit ziemlich unterschiedlichen Abriebsmechanismen. Der gesamte Verlustmassenstrom kann als die Summe dieser einzelnen Beiträge beschrieben werden, die getrennt modelliert worden sind. Die Berechnungsgleichungen betrachten die Konstruktion des Systems, die Betriebsbedingungen und die Eigenschaften der Feststoffe. Aus dem Vergleich des Strahl- und Zyklontests mit verschiedenen Katalysatormaterialien wurde gefunden, daß das Ranking der unterschiedlichen Materialien im Bezug auf ihren Abriebswiderstand nicht von einer Quelle auf eine andere übertragen werden kann. Für jedes Material müssen die einzelnen Abriebsquellen isoliert untersucht werden, um die jeweiligen Abriebscharakteristiken zu erreichen. Die Simulation der Wirbelschicht stellt dar, daß die relativen Beiträge der einzelnen Mechanismen zum Gesamtabrieb für die unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten unterschiedlich sind. Für die kleineren Gasgeschwindigkeiten scheint der Verteilerboden die Hauptabriebsquelle zu sein, aber nachdem eine kritische Gasgeschwindigkeit überstiegen wird, ist der Zyklonabrieb überwiegend und beeinflusst am meistens den Austrag. Bei Zunahme der Gasgeschwindigkeit erhöht sich die Belastung und folglich die Feststoffmasse, die dem Zyklon pro Zeiteinheit zugeführt wird. Außerdem wird die Materialmenge, die in den Zyklon eintritt, bei Zunahme der Gasgeschwindigkeit größer. Wenn man die Belastungsphänomene betrachtet, ist der Zyklonabrieb durch eine Änderung in der Gasgeschwindigkeit erheblich betroffen. Um eine a-priori Modellierung des Abriebs zu erreichen, die durch die einzelnen Quellen und die Austragseffekte verursacht wird, muß das Modell die Hauptabriebsquelle umfassen, damit der gesamte Abrieb minimiert wird und die Effekte der Änderungen in den Betriebsbedingungen eines gegebenen Systems geschätzt werden. Man kann das Modell bei einem neuen Prozeß anwenden, um die optimale Kombination zwischen der Systemkonstruktion und den Betriebsbedingungen im Bezug auf den Abrieb zu finden.

#### **2.4.4 Einflußfaktoren auf den Partikelabrieb. Beschreibung der wesentlichen Einflußgrößen**

##### **2.4.4.1 Umgebungseigenschaften**

Auf den Abrieb haben die folgenden Parameter Einfluß:

- Bewegungsform- Zustand der Wirbelschicht (homogene, stoßende, zirkulierende), Art der Anströmung;
- technisch – physikalische Parameter – Anströmungsgeschwindigkeit, Temperatur, Eingabe neuer Partikel, Durchmesser der Apparatur, Art und Größe der Einbauten, Wirbelbetthöhe– und dichte, Beanspruchungsdauer, Eigenschaften des Fluidmediums

### **Blasenbildung**

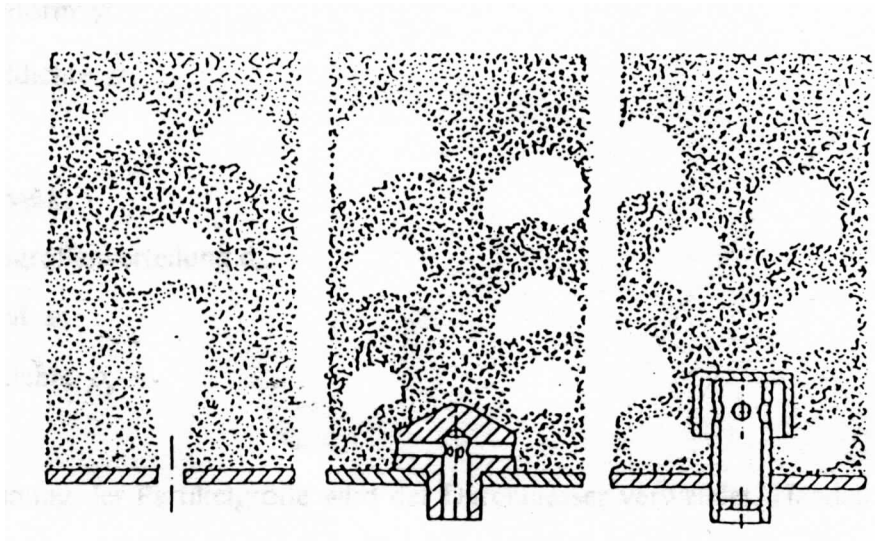
Eine charakteristische Eigenschaft der Gas/ Feststoff – Wirbelschicht ist das Auftreten von Gasblasen. Oberhalb des Lockerungspunktes durchströmt nur ein bestimmter Anteil des Fluidisierungsgases die dichte Phase (Suspensionsphase). Das übrige Gas passiert die Wirbelschicht in Form von praktisch feststofffreien Gasblasen. Es liegen zwei deutlich unterschiedliche Phasen vor [45]:

- Blasenphase (liegt dispers vor)
- Suspensionsphase (liegt kontinuierlich vor)

Vorteilhaft sind die Rührwirkung und der konvektive Feststofftransport durch die aufsteigenden Blasen. Die intensive Feststoffbewegung ist Ursache der einheitlichen Temperatur im Inneren der Wirbelschicht. Die Blasen bringen aber auch Nachteile mit sich. Die Blasen können Abrieb der Feststoffpartikel verursachen, demzufolge muß man die Gasgeschwindigkeit, d.h. die Hydrodynamik der Wirbelschicht untersuchen [113].

Die einfachste Theorie, die die Blasenbildung beschreibt, ist die Zweiphasentheorie (nach Toomey und Johnstone) [45].

## Apparaturstruktur



**2.20:** Industrielle Gasverteiler: Lochboden (links), Düsenboden (Mitte), Glockenboden (rechts).

Es gibt auch einen Einfluß des Verhältnisses Höhe zu Durchmesser.

Beim Lochboden nimmt der Abrieb im Gegenteil zu Glockenboden nur beim Übergang von sehr flachen Betten zu höheren Betten leicht zu und bleibt dann nahezu konstant [79, 100, 109, 113].

## Temperatur

Wenn die Prozeßtemperatur unterhalb eines bestimmten Wertes liegt, brechen die Partikel leichter [89]. Beim Überschreiten einer bestimmten Grenztemperatur beginnen die Partikel zu schmelzen und agglomerieren. Bei der Eingabe neuer Partikel wird der Zerfall in der Wirbelschicht durch das Auftreten des thermischen Schocks begünstigt.

Von Vaux und Fellers [113] wurden verschiedene Kalksteinsorten untersucht. Der Einfluß der Kalzination und eines Hitzeschocks auf die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche, den Abriebanteil und die Korngrößenverteilung wurde dargestellt.

## Zeit

Werther [25] untersucht die Zeitabhängigkeit des Zerfalls. Er stellte eine Abnahme des Abriebes als Funktion der Zeit bis zum Erreichen eines stationären Zustandes

fest und führte dies auf ein stufenweises Hinübergleiten der Partikel in eine annähernde Kugelform zurück.

#### 2.4.4.2 Partikeleigenschaften allgemein

Die für das Problem relevanten Partikeleigenschaften sind:

- Gestalt;
- Größenverteilung;
- Porosität;
- Druckfestigkeit
- Oberflächenhärte;
- Oberflächenrauigkeit;
- Feuchte im Partikel;
- Vorbehandlung;
- Masse;
- Dichte

Dabei muß unterschieden werden zwischen Einzelpartikel und Partikelhaufwerk.

#### Charakterisierung des Einzelpartikels und des Partikelhaufwerkes

Die wichtigsten Einflußgrößen für Einzelpartikel sind:

- Partikelgröße  $d$
- Partikelform  $\psi$
- Partikeldichte  $\rho_p$

Die Partikelgröße steht im Zusammenhang mit:

- 1) geometrischen Merkmalen, wie:  
Oberfläche, Projektionsfläche  
Volumen
- 2) Masse
- 3) Sinkgeschwindigkeit
- 4) Feldstörungen (z.B. Störung eines elektromagnetischen Feldes)

Zur Beschreibung der Partikelgröße wird der Durchmesser verwendet. Handelt es sich um Teilchen, deren Form von einer Kugel abweicht, so wird ein Äquivalentdurchmesser definiert [46, 64, 65, 66].

Den unterschiedlichen Merkmalen entsprechend unterscheidet man verschiedene Äquivalentdurchmesser:

- $d_s$  Durchmesser der Kugel gleicher Oberfläche
- $d_v$  Durchmesser der Kugel gleichen Volumens
- $d_w$  Durchmesser der Kugel gleicher Sinkgeschwindigkeit

Der Formfaktor wird durch folgende Gleichung ermittelt:

$$\psi = \frac{\text{Oberfläche der volumengleichen Kugel}}{\text{Oberfläche des Partikels}} = \left( \frac{d_v}{d_s} \right)^2 \quad (2.40)$$

Die Partikeldichte wird von der Porenstruktur beeinflusst (offene Poren, geschlossene Poren)

In der Regel wird die hydrodynamische Dichte  $\rho_p$  wie folgt berechnet:

$$\rho_p = \frac{\text{Masse des Partikels}}{\text{Volumen des Partikels inklusive Poren}} = \frac{m_p}{V_p} \quad (2.41)$$

Dabei ist:

$$\rho_{abs.} \succ \rho_p$$

Für das Partikelhaufwerk sind die wichtigsten Größen:

- Partikelgrößenverteilung [67, 68, 110]
- Porosität  $\varepsilon$
- Schüttdichte  $\rho_b$

Für Porosität und Schüttdichte gilt:

$$\varepsilon = \frac{\text{Zwischenkornvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{\text{Gesamtvolumen} - \text{Partikelvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}};$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{M}{\rho_p \cdot V_b};$$
(2.42)

$V_b$  – Bettvolumen;  $M$  – Bettmasse;  $\rho_p$  – Partikeldichte,  $\rho_b$  - Schüttdichte

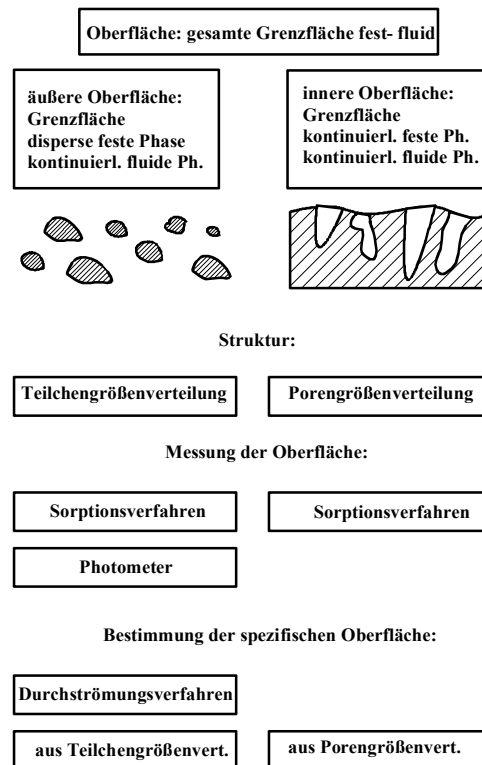
$$\rho_b = \frac{M}{V_b} \Rightarrow \varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \Rightarrow \rho_b = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon)$$
(2.43)

Die Festbettporosität hängt von den Eigenschaften des Materials ab:

- Partikelform: Je niedriger der Formfaktor, desto höher die Festbettporosität.
- Korngrößenverteilung: Je weiter die Verteilung, desto niedriger die Festbettporosität.

Besonders wichtig für das Abriebsverhalten ist die Oberflächenstruktur des Feststoffes [97].

Es ist deshalb wichtig, die Oberflächenstruktur zu kennen, weil die Einschätzung des Zerfalls nach den Oberflächenänderungen erfolgt [89]. Die Oberfläche ist nur für ideale Körper eine eindeutig definierte Größe. Reale Oberflächen unterscheiden sich von solchen idealen Oberflächen durch mehr oder weniger ausgeprägte Rauigkeiten oder Poren. Die gemessene Oberfläche an einem realen Körper hängt davon ab, bis zu welcher Feinheit Rauigkeiten und Poren gemessen werden.



**Abb. 2.21:** Schematische Darstellung der Unterteilung der gesamten Oberfläche [47]

Der geringste Wert für die Oberfläche eines Teilchens ergibt sich dann, wenn Rauigkeiten und Poren nicht berücksichtigt werden. Diese Oberfläche wird als äußere Oberfläche bezeichnet. Die zusätzliche Oberfläche der Rauigkeiten oder Poren nennt man innere Oberfläche [47, 63, 69, 70]. Die feinste Struktur, bis zu der die innere Oberfläche gemessen werden kann, wird durch den Gitterabstand der Atome gekennzeichnet. Die Größe von Atomen oder Molekülen ist auf etwa  $3 \text{ \AA}$  beschränkt, denn bei feineren Strukturen verliert der Begriff der Oberfläche seinen Sinn. Im Unterschied zu der äußeren Oberfläche ist bei der inneren Oberfläche die feste Phase kontinuierlich und die fluide Phase auch kontinuierlich (Porengrößenverteilung). Die Struktur der äußeren Oberfläche wird durch die Teilchengrößenverteilung beschrieben. Die Teilchengrößenverteilung wird z. B. durch Zählverfahren, Sedimentationsverfahren oder Trennverfahren bestimmt. Durch die Teilchengrößenverteilung wird die spezifische Oberfläche errechnet. Aus dieser ermittelt man den Anteil der äußeren Oberfläche. Aus der äußeren Oberfläche kann auf einen Mittelwert der Teilchengröße geschlossen werden. Die innere Oberfläche wird durch das Sorptionsverfahren gemessen. Die spezifische Oberfläche wird mittels Durchströmungsverfahren aus der Porengrößenverteilung bestimmt. Das Prinzip der Durchströmungsverfahren besteht darin, daß der Strömungswiderstand



um so größer ist, je feiner die Teilchen und je enger daher die durchströmten Hohlräume in der Packung sind. Umgekehrt kann man aus der inneren Oberfläche auf einen Mittelwert der Porengrößenverteilung schließen. In den folgenden Arbeiten sind entsprechende Verfahren dargestellt:

- Durchströmungsverfahren zur Messung der spezifischen Oberfläche [47]
- photometrische Oberflächenmessung [47]
- Sorptionsverfahren zur Oberflächenmessung [48]
- Porengrößenanalyse [48]

Als Grenzen der Porenradien zylindrischer Poren bzw. der Weiten ebener Poren werden  $15 \text{ \AA}$  bis  $20 \text{ \AA}$  zwischen Mikro- und Mesoporen und 200 bis  $1000 \text{ \AA}$  zwischen Meso- und Makroporen angenommen.

Es gibt drei verschiedene Methoden, die in den drei genannten Porengrößenbereichen angewandt werden können.

- Mikroporenmethode [48]
- Kapillarkondensationsmethode [48]
- Kapillardruckmethode [48]

## **Festigkeit**

Die Festigkeit und die Partikelgröße können sich gegeneinander beeinflussen. Eine einheitliche Festigkeitshypothese läßt sich nicht formulieren, aber es ist sehr wichtig, die jeweils kritische Festigkeit zu erkennen und zu bestimmen [49, 71, 72, 73]. Es entstehen bei den praktischen Druck-, Prall-, Scher- und Rollbelastungen sowohl Zugspannungen als auch Schubspannungen. Bricht das Partikel spröde, so sind die Zugspannungen bruchauslösend. Dann ist die Zugfestigkeit maßgeblich. Verformt sich das Teilchen plastisch und wird es abgeschert, so sind die Schubspannungen und die Scherfestigkeit maßgeblich. Einem Sprödbbruch kann auch eine plastische Verformung vorangehen, wobei eine gewisse Dehnung auftritt, weil die Partikel einander ausweichen. Die Zugfestigkeit läßt sich bei der bekannten Haftkraft  $F$  für ein Agglomerat aus gleichgroßen Partikeln berechnen:

$$\sigma_z = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{F}{x^2} \quad (2.44)$$

Diese Formel wurde von Schubert [93, 94] experimentell im Porositätsbereich zwischen 0,4 und 0,67 mit Glaskugeln von  $253 \mu\text{m}$  und Flüssigkeitsbrückenbindung

geprüft und bestätigt. Für Kornverteilungen gibt es noch kein befriedigendes theoretisches Modell.

Wird die Dichte des Fluids klein gegenüber der Feststoffdichte, und wird damit die Widerstandskraftkomponente sehr groß gegenüber der Auftriebskomponente, ordnen sich die Teilchen bevorzugt so in der Strömung an, daß sie der Strömung den geringstmöglichen Widerstand bieten.

In Feuchtgranulaten wirkt der Flüssigkeitsbrückenmechanismus nur bis zu einem bestimmten Flüssigkeitsgehalt. Bei größerem Flüssigkeitsgehalt füllen sich die Poren mehr und mehr mit Flüssigkeit an. Der Flüssigkeitsanteil wird durch den Sättigungsgrad  $S$  ausgedrückt. Der Brückenmechanismus reicht etwa bis  $S=0,25$ . Bei  $S>0,8$  sind keine Brücken mehr feststellbar. Also die Zugfestigkeit ist größer beim Entfeuchten als beim Befeuchten. Durch eine Bestimmung des Kapillardruckes erhält man die maximal möglichen Werte der Zugfestigkeit. Bei Entfeuchtung steigt der Kapillardruck steil an. Beim Pressen trockenen Gutes nimmt mit steigendem relativem Wasserdampfdruck die Zugfestigkeit zu. Dazu ist die Kapillarkondensation verantwortlich. Die Scherfestigkeit ist im Hochvakuum wegen der großen Reibung hoch. Mit zunehmender Feuchtigkeit nimmt die Scherfestigkeit ab. Die zwischen den Partikeln befindlichen Flüssigkeitsfilme erleichtern die Gleitung. Die kritische Festigkeit ist die Zugfestigkeit. Brüche werden durch Zugspannungen ausgelöst.

Die Scherfestigkeit hängt von den Druckspannungen ab, unter denen die Scherung stattfindet [49]. Die Festigkeit unterschiedlicher Partikel, die gleich groß sind und aus gleichem Material bestehen, unterscheiden sich, weil die Partikel unterschiedliche Fehlstellen besitzen. Diese Fehlstellen sind statistisch in Größe und Lage auf der Oberfläche der Partikel verteilt und bestimmen ihre Festigkeit. Auch der Einfluß der Partikelgröße auf deren Festigkeit ist eine Folge der Fehlstellen. Es ist unwahrscheinlicher, eine große Fehlstelle auf einem kleinen Partikel zu finden als auf einem großen.

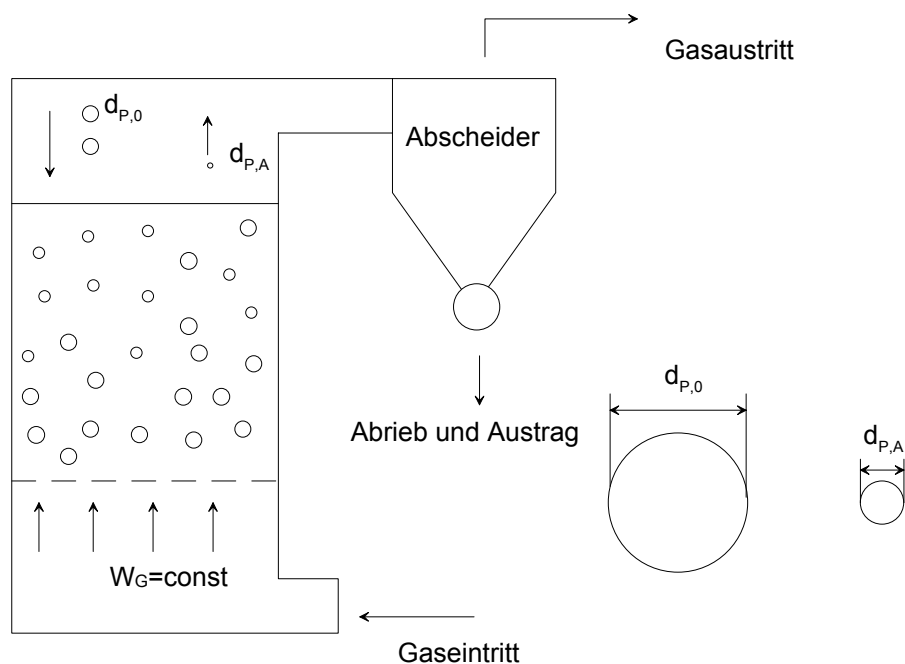
Das erklärt die beobachtete Zunahme der Festigkeit mit abnehmender Partikelgröße. Dieses Verhältnis läßt sich durch eine einfache mathematische Beziehung beschreiben (siehe 2.1.4).

Die absolute Festigkeit der Partikel oder Partikelagglomerate (sowohl Druck- als auch Zugfestigkeit) kann aber nach der vorliegenden Literatur nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Abriebfestigkeit der Partikel gebracht werden. Aus diesem Grund sind gesonderte Untersuchungen für die Abriebfestigkeit unumgänglich.

### 3 Modellierung des Abriebs

In einer kontinuierlich betriebenen Wirbelschicht soll ein Katalysator in Partikelform fluidisiert werden, der mit dem Fluidisationsgas katalytisch reagiert. Der entstehende Partikelabrieb des Katalysators soll aus dem aus der Wirbelschicht austretenden Gas durch geeignete Filter entfernt werden und die Masse des Wirbelbetts soll durch kontinuierliche Zugabe von neuem Katalysatormaterial ersetzt werden.

Das Schema einer derartigen Wirbelschicht und die verwendeten Bezeichnungen sind in Abbildung 3.1 dargestellt.



**Abb. 3.1:** Schema der Wirbelschicht

Für das Modell werden folgende Voraussetzungen getroffen:

1. Alle Partikel sind homogen aufgebaute ideal sphärische Kugeln.
2. Die kontinuierlich zugegebenen Partikel sind monodispers, bestehen aus dem gleichen Material wie die Partikel in der Wirbelschicht und haben den Durchmesser  $d_{P,0}$
3. Die Partikel werden entsprechend ihrer Masse oder ihrer Oberfläche mit den konstanten Abriebskoeffizienten  $R_m$  (Masse) und  $R_A$  (Oberfläche) und mit den zeitabhängigen Abriebskoeffizienten  $R_m$  und  $R_A$  so lange abgerieben, bis sie

den Durchmesser  $d_{P,A}$  erreicht haben, für den in der Wirbelschicht gerade die Schwebegeschwindigkeit überschritten wird. Mit genau diesem Durchmesser sollen die Teilchen aus der Schicht ausgetragen werden.

4. Die Masse der Wirbelschicht wird dadurch konstant gehalten, daß der durch Abrieb und Austrag verlorengelassene Massenstrom kontinuierlich durch Partikelzugabe ausgeglichen wird.
5. Der Partikelabrieb hat einen kleineren Durchmesser als  $d_{P,A}$  und wird unmittelbar nach seinem Entstehen aus der Schicht ausgetragen.

Der Abriebskoeffizient wurde experimentell ermittelt und später näher betrachtet (Kapitel 6.3).

### 3.1 Massenbezogener Abrieb bei konstantem Abriebskoeffizienten

In einer Reihe von Arbeiten [1, 4, 5, 35, 36, 116, 117] wird der Abrieb in Wirbelschichten durch einen massenbezogenen Abriebskoeffizienten beschrieben, d.h. der in Wirbelschichten anfallende Abrieb soll proportional der Masse der in der Wirbelschicht vorhandenen Teilchen sein. Für diesen Fall sollen zunächst alle charakteristischen Größen der Wirbelschicht berechnet werden.

#### 3.1.1 Dimensionsbehaftete Modellbilanzen

- **Zeitabhängiger Partikeldurchmesser**

Mit den Modellannahmen läßt sich die Massenabnahme eines Partikels durch Abrieb über den Ansatz

$$\frac{dm_p}{dt} = -R_m m_p(t) \quad (3.1)$$

beschreiben. Mit Hilfe der Feststoffdichte läßt sich eine Beziehung zwischen Partikelmasse und Partikelvolumen für homogen aufgebaute Partikel aufstellen

$$\frac{dm_p}{dV_p} = \rho_p \quad (3.2)$$

Die Änderung des Partikelvolumens mit dem Durchmesser steht nach

$$\frac{dV_P}{dd_P} = \frac{d\left(\frac{\pi}{6} d_P^3\right)}{dd_P} = \frac{\pi}{2} d_P^2 \quad (3.3)$$

Die Anwendung der Kettenregel ergibt

$$\frac{dd_P}{dt} = \frac{dd_P}{dV_P} \cdot \frac{dV_P}{dm_P} \cdot \frac{dm_P}{dt} = \frac{2}{\pi d_P^2} \frac{1}{\rho_P} \left( -R_m \frac{\pi}{6} d_P^3 \rho_P \right) \quad (3.4)$$

Nach Heraus Kürzen folgt

$$\frac{dd_P}{dt} = -\frac{R_m}{3} d_P \quad (3.5)$$

Danach ist die Änderung des Partikeldurchmessers nach der Zeit eine Funktion des Partikeldurchmessers selbst. Zur Bestimmung der zeitlichen Abhängigkeit des Partikeldurchmessers muß integriert werden, wobei nach Integration von Gl. (3.6)

$$\int_{d_{P,0}}^{d_P} \frac{dd_P}{d_P} = -\frac{R_m}{3} \int_0^t dt \quad (3.6)$$

mit der Anfangsbedingung  $d_P(t=0) = d_{P,0}$

$$\ln\left(\frac{d_P}{d_{P,0}}\right) = -\frac{R_m}{3} t \quad (3.7)$$

und einer Umstellung

$$\frac{d_P}{d_{P,0}} = \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \quad (3.8)$$

der zeitlich veränderliche Durchmesser steht

$$d_P(t) = d_{P,0} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \quad (3.9)$$

Dies ist unter den getroffenen vereinfachenden Annahmen und Voraussetzungen das Modell der Abnahme des Partikeldurchmessers als Funktion der Zeit.

#### • Aufenthaltszeit eines Partikels

Unter der Annahme, daß ein Feststoffteilchen mit dem Durchmesser  $d_{P,0}$  in die Wirbelschicht eintritt und mit dem Durchmesser  $d_{P,A}$  ausgetragen wird, d. h. für  $t = t_A$  gilt  $d_P = d_{P,A}$  folgt aus Gl. (3.7)

$$\ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right) = -\frac{R_m}{3} t_A \quad (3.10)$$

Die mittlere Aufenthaltszeit eines Partikels in der Wirbelschicht ist demnach

$$t_A = -\frac{3}{R_m} \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right) \quad (3.11)$$

### • Mittlere Oberfläche eines Partikels

Die zeitlich veränderliche Oberfläche eines Partikels

$$A_p(t) = \pi d_p^2 = \pi d_{P,0}^2 \left[ \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \right]^2 = \pi d_{P,0}^2 \exp\left(-\frac{2 R_m}{3} t\right) \quad (3.12)$$

kann zu Beschreibung der mittleren Oberfläche eines Partikels herangezogen werden

$$\bar{A}_p = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} A_p(t) dt \quad (3.13)$$

wobei nach Einsetzen von Gl. (3.12) in Gl. (3.13) folgende Beziehung gilt

$$\bar{A}_p = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \pi d_{P,0}^2 \exp\left(-\frac{2 R_m}{3} t\right) dt \quad (3.14)$$

Diese Gleichung lässt sich umformen und mit den Integrationsgrenzen ausdrücken

$$\bar{A}_p = \frac{\pi d_{P,0}^2}{t_A} \int_0^{t_A} \exp\left(-\frac{2 R_m}{3} t\right) dt = \frac{\pi d_{P,0}^2}{t_A} \left(-\frac{3}{2 R_m}\right) \exp\left(-\frac{2 R_m}{3} t\right) \Bigg|_0^{t_A} \quad (3.15)$$

Nach Integration von Gl. (3.15) steht

$$\bar{A}_p = \frac{\pi d_{P,0}^2}{t_A} \left(-\frac{3}{2 R_m}\right) \left[ \exp\left(-\frac{2 R_m}{3} t_A\right) - 1 \right] \quad (3.16)$$

Gl. (3.11) wird in Gl. (3.16) eingesetzt

$$\bar{A}_p = -\frac{\pi d_{P,0}^2 R_m}{3 \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)} \left(-\frac{3}{2 R_m}\right) \left\{ \exp\left[ -\frac{2 R_m}{3} \left(-\frac{3}{R_m} \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)\right) \right] - 1 \right\} \quad (3.17)$$

und nach Herauskürzen steht für die mittlere Oberfläche eines Partikels in der Wirbelschicht

$$\bar{A}_p = \frac{\pi d_{p,0}^2}{2 \ln\left(\frac{d_{p,A}}{d_{p,0}}\right)} \left\{ \exp\left[2 \ln\left(\frac{d_{p,A}}{d_{p,0}}\right)\right] - 1 \right\} \quad (3.18)$$

bzw.

$$\bar{A}_p = \frac{\pi d_{p,0}^2}{2 \ln\left(\frac{d_{p,A}}{d_{p,0}}\right)} \left[ \left(\frac{d_{p,A}}{d_{p,0}}\right)^2 - 1 \right] \quad (3.19)$$

### • Mittlerer oberflächengleicher Durchmesser eines Partikels

Gleichung (3.19) beinhaltet die mittlere Teilchenoberfläche eines Teilchens, das mit dem Teilchendurchmesser  $d_{p,0}$  in die Wirbelschicht eintritt und mit dem Teilchendurchmesser  $d_{p,A}$  aus der Wirbelschicht ausgetragen wird. Somit lässt sich auch ein mittlerer oberflächengleicher Durchmesser der Teilchen in der Wirbelschicht wie folgt definieren:

Aus Gl. (3.19) folgt mit Gl. (3.20)

$$\bar{A}_p = \pi \bar{d}_A^2 \quad (3.20)$$

für diesen mittleren oberflächengleichen Durchmesser:

$$\bar{d}_A = \left\{ \frac{d_{p,0}^2}{2 \ln\left(\frac{d_{p,A}}{d_{p,0}}\right)} \left[ \left(\frac{d_{p,A}}{d_{p,0}}\right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (3.21)$$

### • Mittleres Volumen eines Partikels

Analog zur Oberfläche soll das mittlere Volumen eines Partikels in der Wirbelschicht berechnet werden.

$$\bar{V}_p = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} V_p(t) dt \quad (3.22)$$

Unter Einbeziehung von Gl. (3.9) und Gl. (3.23)

$$V_p(t) = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (3.23)$$

kann mit der bekannten Eintritts- und Austrittsbedingung eine Integration von Gl. (3.24) erfolgen

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{\pi}{6} d_p^3 dt = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{\pi}{6} \left[ d_{P,0} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \right]^3 dt \quad (3.24)$$

wobei einige Umstellungen hilfreich sind

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \int_0^{t_A} \exp\left(-\frac{3 R_m}{3} t\right) dt = \frac{1}{t_A} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \int_0^{t_A} \exp(-R_m t) dt \quad (3.25)$$

Die Wahl der Integrationsgrenzen und deren Einsatz in Gl. (3.26)

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \cdot \frac{1}{-R_m} \exp(-R_m t) \Big|_0^{t_A} \quad (3.26)$$

liefert

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \cdot \frac{1}{-R_m} [\exp(-R_m t_A) - 1] \quad (3.27)$$

Gl. (3.11) eingesetzt in Gl. (3.27) ergibt

$$\bar{V}_P = -\frac{R_m}{3 \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \cdot \frac{1}{-R_m} \left\{ \exp\left[-R_m \left(-\frac{3}{R_m} \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)\right)\right] - 1 \right\} \quad (3.28)$$

Das Umordnen der Gl. (3.28) führt zur mathematischen Beschreibung des mittleren Volumens eines Partikels in der Wirbelschicht mit

$$\bar{V}_P = \frac{\pi d_{P,0}^3}{18 \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)} \left\{ \exp\left[3 \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)\right] - 1 \right\} \quad (3.29)$$

bzw.

$$\bar{V}_P = \frac{\pi d_{P,0}^3}{18 \ln\left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)} \left[ \left(\frac{d_{P,A}}{d_{P,0}}\right)^3 - 1 \right] \quad (3.30)$$



- **Mittlerer volumengleicher Durchmesser eines Partikels**

Aus Gl. (3.30) folgt mit Gl. (3.31)

$$\bar{V}_p = \frac{\pi}{6} \bar{d}_v^3 \quad (3.31)$$

der mittlere volumengleiche Durchmesser eines Partikels in der Wirbelschicht

$$\bar{d}_v = \left\{ \frac{d_{p,0}^3}{3 \ln \left( \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \right)} \left[ \left( \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \right)^3 - 1 \right] \right\}^{1/3} \quad (3.32)$$

- **Mittlere Masse eines Partikels**

Die mittlere Masse eines homogen aufgebauten Partikels in der Wirbelschicht ist definiert zu

$$\bar{m}_p = \bar{V}_p \rho_p \quad (3.33)$$

und kann durch Einsetzen von Gl. (3.30) bestimmt werden

$$\bar{m}_p = \frac{\pi d_{p,0}^3 \rho_p}{18 \ln \left( \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \right)} \left[ \left( \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \right)^3 - 1 \right] \quad (3.34)$$

- **Gesamtpartikelanzahl**

Mit Gl. (3.34) kann die Anzahl aller Partikel in der Wirbelschicht bestimmt werden:

$$n_p = \frac{m_{Sch}}{\bar{m}_p} = \frac{18 m_{Sch} \ln \left( \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \right)}{\pi d_{p,0}^3 \rho_p \left[ \left( \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \right)^3 - 1 \right]} \quad (3.35)$$

- **Gesamtpartikeloberfläche**

Die Oberfläche aller Partikel in der Schicht

$$A_{P,ges} = n_P \bar{A}_P \quad (3.36)$$

ergibt sich aus Gl. (3.19) und Gl. (3.35) zu

$$A_{P,ges} = \frac{9 m_{Sch}}{d_{P,0} \rho_P} \cdot \frac{\left\{ \exp \left[ 2 \ln \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right) \right] - 1 \right\}}{\left\{ \exp \left[ 3 \ln \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right) \right] - 1 \right\}} \quad (3.37)$$

Nach Ausformulierung der Gl. (3.37) folgt

$$A_{P,ges} = \frac{9 m_{Sch}}{d_{P,0} \rho_P} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^2 - 1 \right]}{\left[ \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^3 - 1 \right]} \quad (3.38)$$

#### • Gesamtpartikelvolumen

Das Volumen aller Partikel in der Schicht ist

$$V_{P,ges} = \frac{m_{Sch}}{\rho_P} \quad (3.39)$$

#### • Erforderliche Partikelzugaberate

Nun soll die Berechnung des erforderlichen Massestromes  $\dot{m}_{P,0}$  erfolgen, der mit dem Teilchendurchmesser  $d_{P,0}$  zugegeben werden muß, damit die Schichtmasse konstant bleibt.

Da kein Partikelzerfall und keine Agglomeration zugelassen werden sollen, muß für den Teilchenstrom gelten.

$$\dot{n}_{P,0} = \dot{n}_{P,A} = \dot{n}_P \quad (3.40)$$

Außerdem wird vorausgesetzt, daß sich die Schichtmasse im stationären Betrieb nicht ändern soll

$$m_{sch} = const \quad (3.41)$$

Eine Bilanz der Massenströme um die Wirbelschicht liefert

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,A} + \dot{m}_{\text{Abrieb}} \quad (3.42)$$

mit

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{n}_{P,0} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \rho_P \quad (3.43)$$

und

$$\dot{m}_{P,A} = \dot{n}_{P,A} \frac{\pi}{6} d_{P,A}^3 \rho_P \quad (3.44)$$

sowie

$$m_{\text{Abrieb}} = R_m m_{sch} \quad (3.45)$$

Außerdem gilt

$$\dot{n}_P = \dot{n}_{P,0} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{m_{P,0}} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \rho_P} \quad (3.46)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{n}_P \frac{\pi}{6} d_{P,A}^3 \rho_P + R_m m_{sch} \quad (3.47)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \rho_P} \cdot \frac{\pi}{6} d_{P,A}^3 \rho_P + R_m m_{sch} \quad (3.48)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,0} \left( \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3} \right) + R_m m_{sch} \quad (3.49)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{R_m m_{sch}}{1 - \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^3} \quad (3.50)$$

Wie sich aus Gleichung (3.50) ergibt, ist der erforderliche zuzugebende Partikelmassenstrom also nur von den 4 Parametern:

- Schichtmasse
- Abriebsrate

- Durchmesser der zuzugebenden Partikel
  - Durchmesser der ausgetragenen Partikel
- abhängig.

Für den Fall:

$$d_{P,A} \ll d_{P,0} \quad (3.51)$$

gilt:

$$\dot{m}_{P,0} = R_m m_{sch} \quad (3.52)$$

### 3.1.2 Dimensionslose Darstellung

Die dimensionslose Darstellung wurde für weitere Anwendungen zum Vergleich mit verschiedenen Vorstellungen eingeführt.

Der dimensionslose Partikeldurchmesser soll wie folgt definiert werden:

$$d_p^*(t^*) = \exp\left(-\frac{t^*}{3}\right) \quad (3.53)$$

Für die dimensionslose Aufenthaltszeit steht:

$$t_A^* = -3 \ln d_{P,A}^* \quad (3.54)$$

Daraus ergibt sich der mittlere dimensionslose Durchmesser:

$$\bar{d}_p^* = \frac{1}{t_A^*} \int_0^{t_A^*} d_p^*(t^*) dt^* = \frac{1}{t_A^*} \int_0^{t_A^*} \exp\left(-\frac{t^*}{3}\right) dt^* \quad (3.55)$$

und nach der Integration:

$$\bar{d}_p^* = \frac{d_{P,A}^* - 1}{\ln d_{P,A}^*} \quad (3.56)$$

Mit Gl. (3.54) ergibt sich für den dimensionslosen Austragspartikeldurchmesser:

$$d_{P,A}^*(t^*) = \exp\left(-\frac{t_A^*}{3}\right) \quad (3.57)$$

Die mittlere dimensionslose Partikeloberfläche lautet:

$$\bar{A}_p^* = \frac{d_{P,A}^{*2} - 1}{2 \ln d_{P,A}^*} \quad (3.58)$$

und der mittlere oberflächengleiche dimensionslose Partikeldurchmesser kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\bar{d}_A^* = \sqrt{\frac{d_{P,A}^{*2} - 1}{2 \ln d_{P,A}^*}} \quad (3.59)$$

Analog ergeben sich das mittlere dimensionslose Partikelvolumen:

$$\bar{V}_P^* = \frac{d_{P,A}^{*3} - 1}{3 \ln d_{P,A}^*} \quad (3.60)$$

und der dimensionslose mittlere volumengleiche Partikeldurchmesser:

$$\bar{d}_V^* = \sqrt[3]{\frac{d_{P,A}^{*3} - 1}{3 \ln d_{P,A}^*}} \quad (3.61)$$

Für die mittlere dimensionslose Partikelmasse steht demnach:

$$\bar{m}_P^* = \frac{d_{P,A}^{*3} - 1}{3 \ln d_{P,A}^*} \quad (3.62)$$

Die dimensionslose Gesamtoberfläche aller Teilchen in der Schicht folgt nach Gl. (3.63):

$$A_{P, ges}^* = \frac{A_{P, ges}}{A_0} = \frac{9 m_{sch}}{d_{P,0} \rho_P} \left( \frac{\frac{d_{P,A}^2 - 1}{d_{P,0}^2}}{\frac{d_{P,A}^3 - 1}{d_{P,0}^3}} \right) \frac{1}{\pi d_{P,0}^2} \quad (3.63)$$

Nach Vereinfachungen folgt:

$$A_{P, ges}^* = \frac{9 m_{sch}}{\pi d_{P,0}^3 \rho_P} \left( \frac{d_{P,A}^{*2} - 1}{d_{P,A}^{*3} - 1} \right) \quad (3.64)$$

Wenn in Gl. (3.50) das dimensionslose Durchmesser Verhältnis  $d_{P,A}^*$  eingeführt wird, läßt sich die Zugaberate in dimensionsloser Form ausdrücken:

$$\dot{m}_{P,0}^* = \frac{\dot{m}_{P,0}}{R_m m_{sch}} = \frac{I}{I - \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^3} = \frac{I}{I - (d_{P,A}^*)^3} \quad (3.65)$$

Mit der getroffenen Vereinfachung gilt auch  $d_{P,A}^* \approx 0$ , und somit kann für die dimensionslose Zugaberate für diesen Fall geschrieben werden:

$$\dot{m}_{P,0}^* = 1 \quad (3.66)$$

### 3.2 Oberflächenbezogener Abrieb bei konstantem Abriebskoeffizienten

Obwohl in der Literatur bisher in fast allen Fällen davon ausgegangen wird, daß der Abrieb der Feststoffteilchen proportional der Feststoffmasse in der Schicht ist, soll in der vorliegenden Arbeit ein alternatives Modell entwickelt werden, das von einem oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten ausgeht. Es soll angenommen werden, daß der anfallende Abrieb proportional der Oberfläche in der Wirbelschicht ist. Wie die nachfolgenden Berechnungen zeigen, führt dies für den Fall der stationären blasenbildenden Wirbelschicht mit konstanter Schichtmasse zu anderen Berechnungsgleichungen als bei der Annahme eines massenbezogenen Abriebskoeffizienten.

#### 3.2.1 Dimensionsbehaftete Modellbilanzen

##### • Zeitabhängiger Partikeldurchmesser

Mit den getroffenen Voraussetzungen und Bezeichnungen gilt für die Massenabnahme eines Teilchens in der Wirbelschicht durch Abrieb:

$$\frac{dm_P}{dt} = -R_A \cdot A_P(t) \quad (3.67)$$

Für ein homogen aufgebautes Feststoffpartikel läßt sich mit Hilfe der Feststoffdichte die Beziehung zwischen Partikelmasse und Partikelvolumen aufstellen:

$$\frac{dm_P}{dV_P} = \rho_P \quad (3.68)$$

Die Änderung des Partikelvolumens mit dem Durchmesser ergibt sich zu:

$$\frac{dV_P}{dd_P} = \frac{d\left(\frac{\pi}{6} \cdot d_P^3\right)}{dd_P} = \frac{\pi}{2} \cdot d_P^2 \quad (3.69)$$

Mit Anwendung der Kettenregel folgt:

$$\frac{dd_p}{dt} = \frac{dd_p}{dV_p} \cdot \frac{dV_p}{dm_p} \cdot \frac{dm_p}{dt} \quad (3.70)$$

Mit (3.68), (3.69), (3.70) folgt für die Durchmesseränderungsgeschwindigkeit durch Abrieb

$$\frac{dd_p}{dt} = -\frac{2 \cdot R_A}{\rho_p} \quad (3.71)$$

Demnach ändert sich für jedes Partikel der Durchmesser mit einer zeitlich konstanten Geschwindigkeit. Zur Bestimmung der zeitlichen Abhängigkeit des Partikeldurchmessers muß integriert werden:

$$\int dd_p = \int -\frac{2 \cdot R_A}{\rho_p} \cdot dt \quad (3.72)$$

Nach Integration von Gleichung (3.72) folgt mit  $d_p(t=0) = d_{p,0}$  für den Partikeldurchmesser:

$$d_p = d_{p,0} - \frac{2 \cdot R_A}{\rho_p} \cdot t \quad (3.73)$$

#### • Aufenthaltszeit eines Partikels

Unter der Annahme, daß ein Feststoffteilchen mit dem Durchmesser  $d_{p,0}$  in die Wirbelschicht eintritt und mit dem Durchmesser  $d_{p,A}$  ausgetragen wird, beträgt seine Verweilzeit in der Wirbelschicht nach Gleichung (3.74):

$$t_A = f(d_{p,A}) = \frac{(d_{p,0} - d_{p,A}) \cdot \rho_p}{2R_A} \quad (3.74)$$

#### • Mittlere Oberfläche eines Partikels

Die zeitlich veränderliche Oberfläche eines Partikels

$$A_p(t) = \pi d_p^2 = \pi \left( d_{p,0} - 2 \cdot R_A \frac{1}{\rho_p} t \right)^2 \quad (3.75)$$

kann zu Beschreibung der mittleren Oberfläche eines Partikels herangezogen werden

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} A_P(t) dt \quad (3.76)$$

wobei nach Einsetzen von Gleichung (3.75) in Gleichung (3.76) folgende Beziehung gilt

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \pi \left( d_{P,0} - 2 \cdot R_A \frac{1}{\rho_P} t \right)^2 dt \quad (3.77)$$

Nach Integration und einigen Umstellungen ergibt sich mit Gleichung (3.74)

$$\bar{A}_P = \frac{\pi}{3} \left( \frac{d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right) \quad (3.78)$$

Gleichung (3.78) beinhaltet die mittlere Oberfläche eines Teilchens, das mit dem Durchmesser  $d_{P,0}$  in die Wirbelschicht eintritt und mit dem Durchmesser  $d_{P,A}$  aus der Wirbelschicht ausgetragen wird.

#### • Mittlerer oberflächengleicher Durchmesser eines Partikels

Aus Gleichung (3.78) lässt sich mit Gleichung (3.79) ein mittlerer oberflächengleicher Durchmesser eines Partikels in der Wirbelschicht wie folgt definieren:

$$\bar{A}_P = \pi \bar{d}_A^2 \quad (3.79)$$

$$\bar{d}_A = \sqrt{\frac{1}{3} \left( \frac{d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right)} \quad (3.80)$$

#### • Mittleres Volumen eines Partikels

Analog zur Oberfläche soll das mittlere Volumen eines Partikels in der Wirbelschicht berechnet werden.

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} V_P(t) dt \quad (3.81)$$

Unter Einbeziehung von Gleichung (3.73) und Gleichung (3.82)



$$V_P(t) = \frac{\pi}{6} d_P^3 \quad (3.82)$$

kann mit der bekannten Eintritts- und Austrittsbedingung eine Integration von Gleichung (3.83) erfolgen

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{\pi}{6} d_P^3 dt = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{\pi}{6} \left[ d_{P,0} - 2R_A \frac{1}{\rho_P} t \right]^3 dt \quad (3.83)$$

Nach Integration und einigen Umstellungen ergibt sich mit Gleichung (3.74)

$$\bar{V}_P = \frac{\pi}{24} \left( \frac{d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right) \quad (3.84)$$

#### • Mittlerer volumengleicher Durchmesser eines Partikels

Aus Gleichung (3.84) folgt mit Gleichung (3.85)

$$\bar{V}_P = \frac{\pi}{6} \bar{d}_V^3 \quad (3.85)$$

der mittlere volumengleiche Durchmesser eines Partikels in der Wirbelschicht

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{\frac{1}{4} \frac{(d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4)}{(d_{P,0} - d_{P,A})}} \quad (3.86)$$

#### • Mittlere Masse eines Partikels

Die mittlere Masse eines homogen aufgebauten Partikels in der Wirbelschicht ist definiert zu

$$\bar{m}_P = \bar{V}_P \rho_P \quad (3.87)$$

und kann durch Gleichung (3.84) bestimmt werden

$$\bar{m}_P = \frac{\pi \rho_P}{24} \left( \frac{d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right) \quad (3.88)$$

### • Gesamtpartikelanzahl

Mit Gleichung (3.88) kann die Anzahl aller Partikel in der Wirbelschicht bestimmt werden:

$$n_{P,ges} = \frac{m_{sch}}{m_P} = \frac{24 m_{sch} (d_{P,0} - d_{P,A})}{\pi \rho_P (d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4)} \quad (3.89)$$

### • Gesamtpartikeloberfläche

Die Oberfläche aller Partikel in der Schicht

$$A_{P,ges} = n_{P,ges} \bar{A}_P \quad (3.90)$$

ergibt sich aus Gleichung (3.78) und Gleichung (3.89) zu

$$A_{P,ges} = \frac{8 m_{sch} (d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3)}{\rho_P (d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4)} \quad (3.91)$$

### • Gesamtpartikelvolumen

Das Volumen aller Partikel in der Schicht ist

$$V_{P,ges} = \frac{m_{sch}}{\rho_P} \quad (3.92)$$

### • Erforderliche Partikelzugaberate

Nun soll die Berechnung des erforderlichen Massestromes  $\dot{m}_{P,0}$  erfolgen, der mit dem Teilchendurchmesser  $d_{P,0}$  zugegeben werden muß. Da kein Partikelzerfall und keine Agglomeration zugelassen werden sollen, muß für den Teilchenstrom gelten

$$\dot{n}_{P,0} = \dot{n}_{P,A} = \dot{n}_P \quad (3.93)$$

Außerdem wird vorausgesetzt, daß sich die Schichtmasse nicht ändern soll:

$$m_{sch} = const \quad (3.94)$$

Eine Bilanz der Massenströme um die Wirbelschicht liefert:

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,A} + \dot{m}_{Abrieb} \quad (3.95)$$

Dabei sind:

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{n}_{P,0} \frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \rho_P \quad (3.96)$$

und

$$\dot{m}_{P,A} = \dot{n}_{P,A} \frac{\pi}{6} d_{P,A}^3 \rho_P \quad (3.97)$$

sowie

$$m_{Abrieb} = R_A A_{P, ges} \quad (3.98)$$

Außerdem gilt

$$\dot{n}_P = \dot{n}_{P,0} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{m_{P,0}} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \rho_P} \quad (3.99)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{n}_P \frac{\pi}{6} d_{P,A}^3 \rho_P + R_A A_{P, ges} \quad (3.100)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} d_{P,0}^3 \rho_P} \cdot \frac{\pi}{6} d_{P,A}^3 \rho_P + R_A A_{P, ges} \quad (3.101)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,0} \left( \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3} \right) + R_A A_{P, ges} \quad (3.102)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{R_A A_{P, ges}}{1 - \left( \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^3} \quad (3.103)$$

Da  $A_{P, ges}$  bereits berechnet wurde (3.91), kann schließlich der erforderliche Massenstrom an zuzuführenden Partikeln wie folgt ausgedrückt werden:

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{8R_A m_{sch}}{\rho_P} \left\{ \frac{(d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3)}{(d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4) \left( 1 - \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3} \right)} \right\} \quad (3.104)$$

Für den Fall:

$$d_{P,A} \ll d_{P,0} \quad (3.105)$$

ergibt sich für den Massenstrom der zuzuführenden Feststoffteilchen die Beziehung:

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{8R_A m_{sch}}{\rho_P d_{P,0}} \quad (3.106)$$

### 3.2.2 Dimensionslose Darstellung

Nun sollen dimensionslose Durchmesserhältnisse folgender Art eingeführt werden:

$$d_{P,A}^* = \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \quad (3.107)$$

$$\bar{d}_A^* = \sqrt[3]{\frac{1 - d_{P,A}^{3*}}{1 - d_{P,A}^*}} \quad (3.108)$$

Der mittlere dimensionslose volumengleiche Durchmesser ergibt sich aus:

$$\bar{d}_V^* = \sqrt[3]{\frac{1 - (d_{P,A}^*)^4}{1 - d_{P,A}^*}} \quad (3.109)$$

Die dimensionslose Feststoffoberfläche beträgt:

$$A_{P, ges}^* = \frac{A_{P, ges}}{\pi d_{P,0}^2} \quad (3.110)$$

$$A_{P, ges}^* = \frac{4}{3} \left( \frac{1 - (d_{P,A}^*)^3}{1 - (d_{P,A}^*)^4} \right) m_{sch}^* \quad (3.111)$$

Dabei ist:

$$m_{sch}^* = \frac{m_{sch}}{m_{P,0}} \quad (3.112)$$

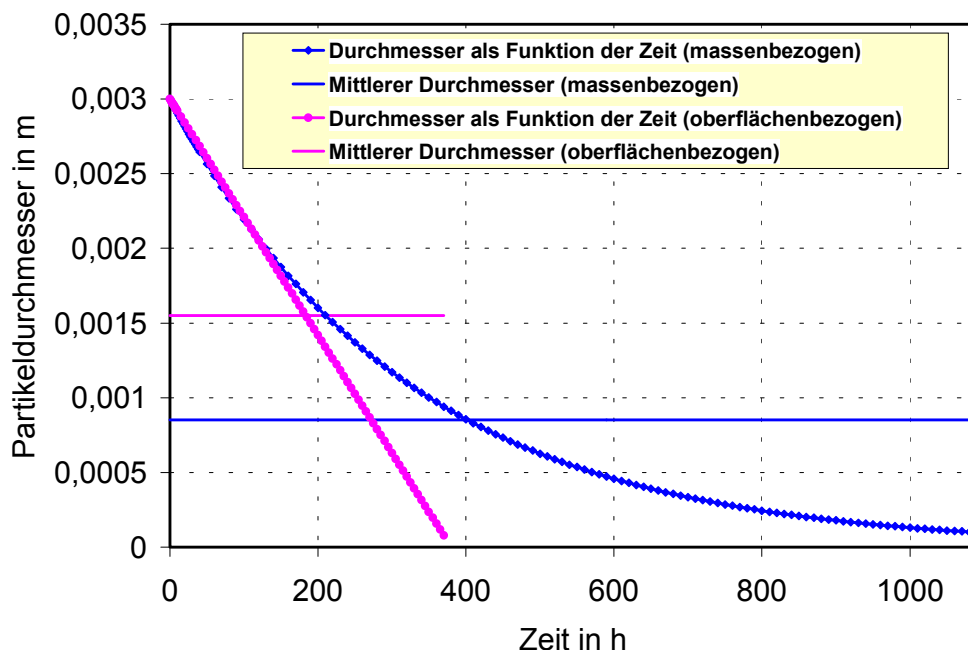
Wenn in der Gleichung für den erforderlichen Partikelmassenstrom das dimensionslose Durchmesserhältnis  $d_{P,A}^*$  eingeführt wird, lässt sich die Zugaberate in dimensionsloser Form wie folgt ausdrücken:

$$\dot{m}_{P,0}^* = \frac{\dot{m}_{P,0}}{R_A A_{P, ges}} = \frac{1}{1 - (d_{P,A}^*)^3} \quad (3.113)$$

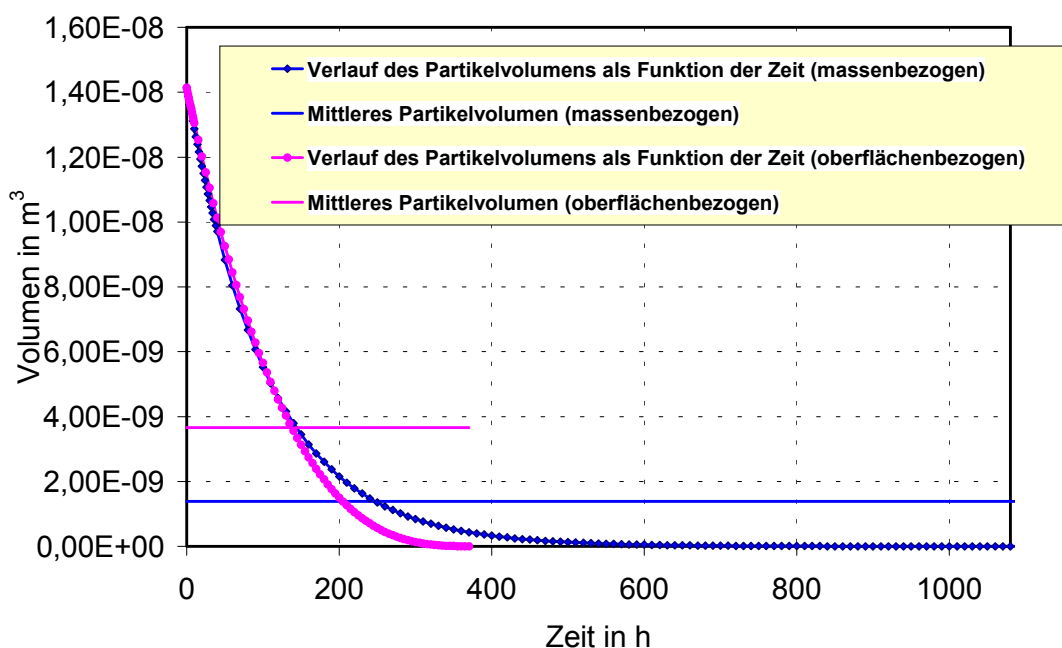
Wenn  $d_{p,A} \ll d_{p,0}$  ist, dann gilt:

$$\dot{m}_{p,0}^* = 1 \quad (3.114)$$

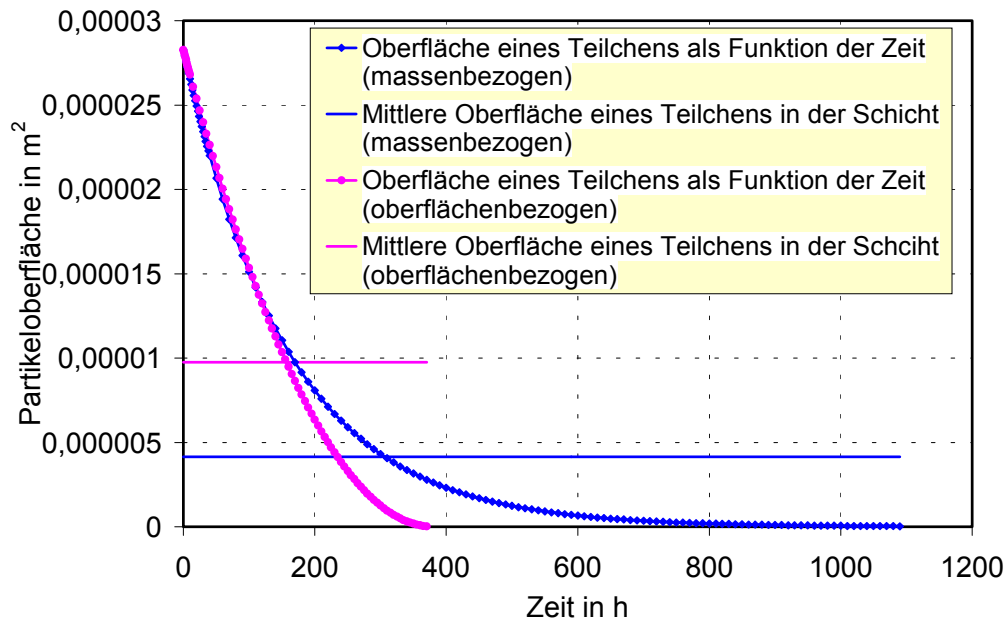
Auf den nächsten Abbildungen sind anhand eines Beispiels die berechneten Verläufe des Durchmessers, der Oberfläche und des Volumens als Funktion der Zeit mit den entsprechenden Mittelwerten für die beiden Fälle der Modellierung (mit einem massenbezogenen und mit einem oberflächenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten) dargestellt.



**Abb. 3.2:** Vergleich zwischen den Verläufen des Partikeldurchmessers



**Abb. 3.3:** Vergleich zwischen den Verläufen des Partikelvolumens



**Abb. 3.4:** Vergleich zwischen den Verläufen der Partikeloberfläche

Die Ausgangsparameter für das Berechnungsbeispiel sind folgende:

Schichtmasse:  $m_{sch} = 2,5 \text{ kg}$

Ausgangsdurchmesser:  $d_{p,0} = 0,003 \text{ m}$

Austragsdurchmesser:  $d_{p,A} = 0,0001 \text{ m}$

Partikeldichte:  $\rho_p = 1500 \text{ kg/m}^3$

massenbezogener Abriebskoeffizient:  $R_m = 0,0094 \text{ kg/kg h}$

oberflächenbezogener Abriebskoeffizient:  $R_A = 0,005922 \text{ kg/m}^2\text{h}$

In Tabelle 3.1 sind die berechneten Werte für die beiden Modelle zusammengefasst.

**Tabelle 3.1:** Vergleich zwischen den beiden Modellvorstellungen

Massenbezogen	Oberflächenbezogen
$t_A = 1085 \text{ h}$	$t_A = 367 \text{ h}$
$\bar{d}_p = 0,85 \text{ mm}$	$\bar{d}_p = 1,55 \text{ mm}$
$\bar{A}_p = 4,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	$\bar{A}_p = 9,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
$\bar{V}_p = 1,39 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$	$\bar{V}_p = 3,65 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$
$n_{p,ges} = 1202972 \text{ Stück}$	$n_{p,ges} = 455851 \text{ Stück}$
$A_{p,ges} = 4,99 \text{ m}^2$	$A_{p,ges} = 4,44 \text{ m}^2$

Es ist zu sehen, daß bis 180 Stunden kein Unterschied zwischen den beiden Modelldarstellungen (massenbezogen und oberflächenbezogen) besteht. Erst danach unterscheiden sich die Verläufe für den Partikeldurchmesser, für die Partikeloberfläche und für das Partikelvolumen. Die Aufenthaltszeit eines Teilchens in der Wirbelschicht ist bei dem oberflächenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten viel kürzer als bei dem massenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten. Der Partikeldurchmesser nimmt bei einem oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten schneller ab, da er nach einer linearen Gleichung berechnet ist. Es wurden keine Versuche durchgeführt, die 180 Stunden überschreiten. Diese Versuche wären notwendig, um die gemessenen Werte den berechneten gegenüberzustellen und signifikante Abweichungen zu bemerken.

### 3.3 Abrieb bei zeitabhängigem Abriebskoeffizienten

Bei den Überlegungen in Punkt 3.1 und 3.2 wurde davon ausgegangen, daß der jeweilige Abriebskoeffizient  $R_m$  (massenbezogen) bzw.  $R_A$  (oberflächenbezogen) konstant ist.

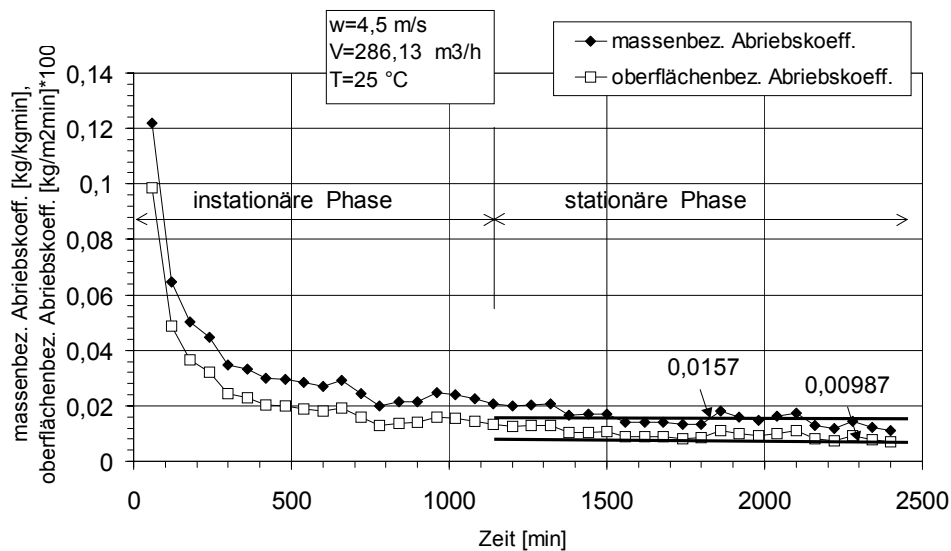
Wie aber experimentelle Untersuchungen u.a. von Werther und auch die eigenen Ergebnisse zeigen, ist der Abriebskoeffizient ebenfalls eine Funktion der Zeit. Dabei können zwei Bereiche unterschieden werden:

1. Bereich: Die neuen in die Wirbelschicht eintretenden Teilchen verlieren ihre Unebenheiten an der Partikeloberfläche und werden „rund“ geschliffen.
2. Bereich: Ab einer bestimmten Oberflächenrauigkeit bleibt der Abriebskoeffizient konstant.

Für den ersten Fall eines zeitabhängigen Abriebskoeffizienten sollen die relevanten Werte für die stationäre blasenbildende Wirbelschicht mit konstanter Schichtmasse berechnet werden.

Hier ist es zweckmäßig, daß der Abriebskoeffizient eindeutig definiert wird. Am Anfang, d.h. in der Anfangsphase des Wirbelschichtprozesses, wenn der Staub aus der Schichtmasse noch ausgetragen wird, kann man keinen Abriebskoeffizienten definieren, da bis zu diesem Zeitpunkt noch kein Abrieb ausgetragen wird, sondern nur der ursprüngliche Staub, der sich im Material befindet. Später ist der Abrieb immer noch groß, da die Rauigkeiten und die Kanten der Teilchen abgerieben

werden. Je kugelförmiger die Form wird, desto weniger Abrieb tritt auf. Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt der Abriebskoeffizient ab, bis ein annähernd konstanter Wert erreicht wird. Für diesen stationären Zustand (konstanter Wert des Abriebskoeffizienten) kann man den Abriebskoeffizienten definieren. Die Frage ist aber, ob man die instationäre Phase ignorieren kann. Wenn diese Phase von Bedeutung ist, muß man einen Abriebskoeffizienten als Funktion der Zeit definieren. In Abbildung 3.5 sind die Abriebskoeffizienten aus eigenen experimentellen Untersuchungen (oberflächenbezogen und massenbezogen) dargestellt.



**Abb. 3.5:** Oberflächen- bzw. massenbezogener Abriebskoeffizient als Funktion der Zeit (umhüllte Senfkörner)

Wenn der Abriebskoeffizient als eine Funktion der Zeit  $R = f(t)$  betrachtet wird, kann der Verlauf des Abriebskoeffizienten durch eine Potenzfunktion angenähert werden, die am besten die Versuchswerte beschreibt. Die Konstanten  $a$  und  $b$  sind experimentell zu ermitteln.

$$R = a \cdot t^b \quad (3.115)$$

### 3.3.1 Anwendung des massenbezogenen Abriebskoeffizienten

Zunächst soll hier wieder von einem massenbezogenen Abriebskoeffizienten ausgegangen werden.

Mit der Anwendung des massenbezogenen Abriebskoeffizienten gilt:



$$\frac{dd_p}{dt} = -\frac{R_m(t)}{3} \cdot d_p \quad (3.116)$$

Mit Gleichung (3.115) folgt:

$$\int \frac{dd_p}{d_p} = \int -\frac{(a \cdot t^b)}{3} dt \quad (3.117)$$

Nach Integration von Gleichung (3.117) ergibt sich bei  $b \neq -1$  die Veränderung des Partikeldurchmessers mit der Zeit:

$$d_p(t) = d_{p,0} \cdot \exp\left(-\frac{1}{3} \frac{a}{1+b} \cdot t^{(1+b)}\right) \quad (3.118)$$

Unter Verwendung der Gleichung (3.118) gilt für die Abhängigkeit der Partikeloberfläche, des Volumens und der Masse eines Teilchens als Funktion der Zeit:

$$A_p(t) = \pi \cdot d_{p,0}^2 \cdot \exp\left[-\frac{2}{3} \cdot \frac{a}{1+b} \cdot t^{(1+b)}\right] \quad (3.119)$$

$$V_p(t) = \frac{\pi}{6} \cdot d_{p,0}^3 \cdot \exp\left[-\frac{3}{3} \cdot \frac{a}{1+b} \cdot t^{(1+b)}\right] \quad (3.120)$$

$$m_p(t) = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_p \cdot d_{p,0}^3 \cdot \exp\left[-\frac{3}{3} \cdot \frac{a}{1+b} \cdot t^{(1+b)}\right] \quad (3.121)$$

Für die Verweilzeit eines Teilchens in der Wirbelschicht kann analog geschrieben werden:

$$t_A = f(d_{p,A}) = \left(-\ln \frac{d_{p,A}}{d_{p,0}} \cdot \frac{3(1+b)}{a}\right)^{\frac{1}{1+b}} \quad (3.122)$$

Die mittlere Oberfläche eines Teilchens in der Wirbelschicht lässt sich wie folgt berechnen:

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} A_p(t) dt = \frac{\pi \cdot d_{p,0}^2}{t_A} \int_0^{t_A} \exp\left[-\frac{2}{3} \cdot \frac{a}{1+b} \cdot t^{1+b}\right] dt \quad (3.123)$$

Dieses Integral kann nicht in geschlossener Form gelöst werden. Zur Integration dieser Funktion wird ihre Taylor – Reihe benutzt:

$$f(x) = \exp[x]; \quad x_0 = 0; \quad f^{(n)}(0) = 1 \quad \text{für alle } n. \quad (3.124)$$

Mit (3.124) folgt für  $\exp[x]$ :

$$\exp[x] = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + R_n(x) \quad (3.125)$$

$R_n$  ist ein Restglied und kann dann beliebig klein gemacht werden, wenn  $n$  groß genug gewählt wird. Die Approximation  $f(x) \approx T_n(x)$  wird dann beliebig gut, wenn nur  $n$  groß genug ist:

$$|R_n(x)| \leq K_s \cdot \frac{|x - x_0|^n}{(n+1)!} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0. \quad (3.126)$$

$K_s$  ist eine von  $n$  unabhängige Schranke.

Unter der Zugrundelegung der Gleichung (3.125) und der Substitution  $k = -\frac{a}{1+b}$  ergibt sich für Gleichung (3.123):

$$\bar{A}_P = \frac{\pi \cdot d_{P,0}^2}{t_A} \int_0^{t_A} \left[ 1 + \frac{2}{3} k \cdot t^{b+1} + \frac{4}{9} k^2 \cdot t^{2(b+1)} + \frac{8}{27} k^3 \cdot t^{3(b+1)} \dots \right] dt \quad (3.127)$$

Nach der Integration folgt:

$$\bar{A}_P = \frac{\pi \cdot d_{P,0}^2}{t_A} \left( t_A + \frac{2}{3} k \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + \frac{4}{9} k^2 \cdot \frac{t_A^{2b+3}}{2!(2b+3)} + \frac{8}{27} k^3 \cdot \frac{t_A^{3b+4}}{3!(3b+4)} \dots \right) \quad (3.128)$$

Bei  $n = 10$  ist das Restglied  $R_n \approx 0$ . Die Reihenentwicklung wurde mit dem Programm Excel durchgeführt.

Es lässt sich ein mittlerer oberflächengleicher Durchmesser wie folgt definieren:

$$\bar{d}_A = \left( \frac{\bar{A}_P}{\pi} \right)^{0,5} \quad (3.129)$$

Für die Massenabnahme eines Teilchens in der Wirbelschicht durch Abrieb gilt:

$$\frac{dm_P}{dt} = -R_m(t) \cdot m_P(t) \quad (3.130)$$

Unter Einbeziehung von Gleichung (3.115) in Gleichung (3.130) und einigen Vereinfachungen gilt für die Masse eines Feststoffteilchens in der Wirbelschicht:

$$m_P(t) = m_{P,0} \cdot \exp\left[-\frac{a}{b+1} \cdot t^{(b+1)}\right] \quad (3.131)$$

Dann gilt für die mittlere Masse eines Teilchens:

$$\bar{m}_P = m_{P,0} \cdot \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \exp\left[-\frac{a}{b+1} \cdot t^{(b+1)}\right] dt \quad (3.132)$$

Unter der Zugrundelegung von Gleichung (3.125) und der Substitution  $k = -\frac{a}{b+1}$

folgt für Gleichung (3.132):

$$\bar{m}_P = m_{P,0} \cdot \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \left[1 + k \cdot t^{(b+1)} + \frac{k^2 \cdot t^{2(b+1)}}{2!} + \frac{k^3 \cdot t^{3(b+1)}}{3!} \dots\right] dt \quad (3.133)$$

Nach Integration von (3.133) ergibt sich:

$$\bar{m}_P = \frac{m_{P,0}}{t_A} \left[ t_A + k \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + k^2 \cdot \frac{t_A^{2b+3}}{2!(2b+3)} + \frac{k^3 \cdot t_A^{3b+4}}{3!(3b+4)} \dots \right] \quad (3.134)$$

Bei  $n=10$  ist das Restglied  $R_n \approx 0$ . Die Reihenentwicklung wurde mit dem Programm Excel durchgeführt.

Aus der Gleichung für  $\bar{m}_P$  kann man die Gleichung für das mittlere Volumen eines Teilchens ableiten:

$$\bar{V}_P = \frac{\bar{m}_P}{\rho_P} = \frac{m_{P,0}}{\rho_P \cdot t_A} \int_0^{t_A} \exp\left[-\frac{a}{b+1} \cdot t^{(b+1)}\right] dt \quad (3.135)$$

$m_{P,0}$  ist die Masse eines Teilchens in der Ausgangsschicht und wird wie folgt ausgedrückt:

$$m_{P,0} = \frac{\pi}{6} \cdot d_{P,0}^3 \cdot \rho_P \quad (3.136)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichung (3.136) und der Potenzreihenentwicklung gilt:

$$\bar{V}_P = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{d_{P,0}^3}{t_A} \cdot \left[ t_A + k \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + k^2 \cdot \frac{t_A^{2b+3}}{2!(2b+3)} + k^3 \cdot \frac{t_A^{3b+4}}{3!(3b+4)} \dots \right] \quad (3.137)$$

Daraus kann der mittlere volumengleiche Partikeldurchmesser in der Schicht berechnet werden:

$$\bar{d}_V = \left( \frac{6 \cdot \bar{V}_P}{\pi} \right)^{1/3} \quad (3.138)$$

Da die mittlere Oberfläche und das mittlere Volumen eines Teilchens in der Wirbelschicht bekannt sind, kann mit (3.128) und (3.137) die gesuchte Gesamtoberfläche aller Teilchen in der Schicht berechnet werden:

$$A_{P,ges} = \frac{m_{sch} \bar{A}_P}{\bar{V}_P \rho_P} \quad (3.139)$$

Nach einigen Vereinfachungen kann die Gesamtoberfläche berechnet werden:

$$A_{P,ges} = \frac{m_{sch} \cdot 6}{\rho_P d_{P,0}} \cdot \frac{\left[ t_A + k_1 \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + k_1^2 \cdot \frac{t_A^{2b+3}}{2!(2b+3)} + k_1^3 \cdot \frac{t_A^{3b+4}}{3!(3b+4)} \dots \right]}{\left[ t_A + k \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + k^2 \cdot \frac{t_A^{2b+3}}{2!(2b+3)} + k^3 \cdot \frac{t_A^{3b+4}}{3!(3b+4)} \dots \right]} \quad (3.140)$$

wobei

$$k_1 = \frac{2}{3} \cdot k \quad \text{bedeutet.} \quad (3.141)$$

Wenn die Gesamtoberfläche der Teilchen in der Wirbelschicht und auch die mittlere Oberfläche eines Teilchens bekannt sind, gilt für die Anzahl aller Feststoffteilchen in der Wirbelschicht:

$$n_{P,ges} = \frac{A_{P,ges}}{A_P} \quad (3.142)$$

Unter der Zugrundelegung von Gleichungen (3.128) und (3.140) ergibt sich für die Anzahl der Teilchen:

$$n_{P,ges} = \frac{6 \cdot m_{sch} \cdot t_A}{\pi \cdot d_0^3 \cdot \rho_{fest} \left[ t_A + k \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + k^2 \cdot \frac{t_A^{2b+3}}{2!(2b+3)} + k^3 \cdot \frac{t_A^{3b+4}}{3!(3b+4)} \dots \right]} \quad (3.143)$$

Als Nächstes soll die Berechnung des erforderlichen Massenstromes  $\dot{m}_{P,0}$  erfolgen, der mit dem Durchmesser  $d_{P,0}$  zugegeben werden muß, damit der Verlust der Partikel durch Abrieb ausgeglichen wird.

Es wird vorausgesetzt, daß sich die Schichtmasse nicht ändern soll:

$$m_{sch} = const \quad (3.144)$$

Außerdem werden Zerfall und Agglomeration ausgeschlossen. Für den Teilchenstrom gilt:

$$\dot{n} = \dot{n}_{P,0} = \dot{n}_{P,A} \quad (3.145)$$

Die Bilanz der Massenströme liefert:

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,A} + \dot{m}_{Abrieb} \quad (3.146)$$

Dabei sind:

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{n} \cdot m_{P,0} = \dot{n} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_{P,0}^3 \cdot \rho_P \quad (3.147)$$

$$\dot{m}_{P,A} = \dot{n} \cdot m_{P,A} = \dot{n} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_{P,A}^3 \cdot \rho_P \quad (3.148)$$

Der Massenstrom des Abriebs ist:

$$\dot{m}_{Abrieb} = R_m(t) \cdot m_{sch} \quad (3.149)$$

Es gilt auch:

$$\dot{n} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{m_{P,0}} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} \cdot d_{P,0}^3 \cdot \rho_P} \quad (3.150)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} \cdot d_{P,0}^3 \cdot \rho_P} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_{P,A}^3 \cdot \rho_P + R_m(t) \cdot m_{sch} \quad (3.151)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,0} \cdot \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3} + R_m(t) \cdot m_{sch} \quad (3.152)$$

Für den erforderlichen Massenstrom ergibt sich:

$$\dot{m}_P = \frac{R_m(t) \cdot m_{sch}}{\left(1 - \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3}\right)} \quad (3.153)$$

Da der Abriebskoeffizient eine Funktion der Zeit ist, wird der Mittelwert gebildet:

$$\bar{R}_m = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} R_m(t) dt = \int_0^{t_A} a \cdot t^b dt \quad (3.154)$$

Nach der Integration bekommt man:

$$\bar{R}_m = \frac{1}{t_A} \cdot a \cdot \frac{t_A^{b+1}}{b+1} \quad (3.155)$$

Wenn die Gleichung für  $t_A$  zugrundegelegt wird, bekommt man:

$$\bar{R}_m = \frac{a}{b+1} \cdot \left( \frac{-3(b+1)}{a} \cdot \ln \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^{\frac{b}{b+1}} \quad (3.156)$$

Dann gilt für den erforderlichen Massenstrom:

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{\frac{a}{b+1} \cdot \left( \frac{-3(b+1)}{a} \cdot \ln \frac{d_{P,A}}{d_{P,0}} \right)^{\frac{b}{b+1}} \cdot m_{sch}}{1 - \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3}} \quad (3.157)$$

Aus Gleichung (3.157) ergibt sich, daß der erforderliche zuzugebende Partikelmassenstrom von folgenden Parametern abhängig ist:

- Schichtmasse
- Konstanten a, b
- Durchmesser der zugegebenen Partikel
- Durchmesser der ausgetragenen Partikel

### 3.3.2 Anwendung des oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten

Die unter Punkt 3.3.1 gemachten Überlegungen für den massenbezogenen Abriebskoeffizienten sollen nun ebenfalls für den oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten angestellt werden.

Es gilt analog:

$$\frac{dd_p}{dt} = - \frac{2 \cdot R_A(t)}{\rho_p} \quad (3.158)$$

Mit Gleichung (3.115) folgt:

$$\int dd_p = \int \frac{-2(a \cdot t^b)}{\rho_p} dt \quad (3.159)$$

Nach Integration von Gleichung (3.159) folgt für den Partikeldurchmesser bei  $b \neq -1$  und mit  $d_p(t=0) = d_{P,0}$

$$d_p = d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_p} \cdot \frac{t^{(1+b)}}{1+b} \quad (3.160)$$

Dies ist die zeitliche Veränderung des Partikeldurchmessers unter Anwendung eines oberflächenbezogenen zeitabhängigen Abriebskoeffizienten.

Wenn die Gleichung (3.160) zugrundegelegt wird, bekommt man für die Partikeloberfläche, das Partikelvolumen und die Partikelmasse eines Teilchens als Funktion der Zeit:

$$A_P(t) = \pi \cdot \left[ d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_P} \cdot \frac{t^{(1+b)}}{1+b} \right]^2 \quad (3.161)$$

$$V_P(t) = \frac{\pi}{6} \left[ d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_P} \cdot \frac{t^{(1+b)}}{1+b} \right]^3 \quad (3.162)$$

$$m_P(t) = \frac{\pi}{6} \cdot \left[ d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_P} \cdot \frac{t^{(1+b)}}{1+b} \right]^3 \cdot \rho_P \quad (3.163)$$

Die Aufenthaltszeit eines Teilchens in der Wirbelschicht ist eine Funktion des Austragsdurchmessers:

$$t_A = f(d_{P,A}) \quad (3.164)$$

Dann kann man folgende Gleichung schreiben:

$$d_{P,A} = d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_P} \cdot \frac{t_A^{(1+b)}}{1+b} \quad (3.165)$$

$$t_A = \left( -\frac{(d_{P,A} - d_{P,0}) \cdot \rho_P \cdot (1+b)}{2 \cdot a} \right)^{\frac{1}{1+b}} \quad (3.166)$$

Die mittlere Oberfläche eines Teilchens in der Wirbelschicht berechnet sich über die Verweilzeit wie folgt:

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} A_P(t) dt = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \pi \cdot \left[ d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_P} \cdot \frac{t^{(1+b)}}{1+b} \right]^2 dt \quad (3.167)$$

Nach der Integration ergibt sich:

$$\bar{A}_P = \frac{\pi}{t_A} \left[ d_{P,0}^2 \cdot t_A - \frac{4 \cdot a \cdot d_{P,0}}{\rho_P \cdot (1+b)} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + \frac{4 \cdot a^2}{\rho_P^2} \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{(1+b)^2 \cdot (3+2b)} \right] \quad (3.168)$$

Analog soll das mittlere Volumen ermittelt werden:

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{\pi}{6} \left[ d_{P,0} - \frac{2 \cdot a}{\rho_P} \cdot \frac{t^{(1+b)}}{1+b} \right]^3 dt \quad (3.169)$$

Die Integration liefert:

$$\bar{V}_P = \frac{\pi}{6 \cdot t_A} \left[ d_{P,0}^3 \cdot t_A - \frac{3 \cdot d_{P,0}^2 \cdot 2 \cdot a}{\rho_P (1+b)} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{(b+2)} + \frac{3 \cdot d_{P,0} \cdot 4 \cdot a^2}{\rho_P^2 \cdot (1+b)^2 \cdot (3+2b)} \cdot t_A^{3+2b} - \frac{8 \cdot a^3}{\rho_P^3 (1+b)^3 \cdot (4+3b)} \cdot t_A^{4+3b} \right] \quad (3.170)$$

Man kann jetzt analog einen mittleren oberflächengleichen Durchmesser und einen mittleren volumengleichen Durchmesser berechnen:

$$\bar{d}_A = \left( \frac{\bar{A}_P}{\pi} \right)^{0,5} = \left( \frac{1}{t_A} \left[ d_{P,0}^2 \cdot t_A - \frac{4 \cdot a \cdot d_{P,0}}{\rho_P \cdot (1+b)} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{(b+2)} + \frac{4 \cdot a^2}{\rho_P^2 \cdot (1+b)^2} \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{(3+2b)} \right] \right)^{0,5} \quad (3.171)$$

$$\bar{d}_V = \left( \frac{6 \cdot \bar{V}_P}{\pi} \right)^{1/3} = \left( \frac{1}{t_A} \left[ d_{P,0}^3 \cdot t_A - \frac{3 \cdot d_{P,0}^2 \cdot 2 \cdot a}{\rho_P \cdot (1+b)} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{(b+2)} + \frac{3 \cdot d_{P,0} \cdot 4 \cdot a^2}{\rho_P^2 (1+b)^2} \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{3+2b} - \frac{8 \cdot a^3}{\rho_P^3 (1+b)^3} \cdot \frac{t_A^{4+3b}}{4+3b} \right] \right)^{1/3} \quad (3.172)$$

Bei homogen aufgebauten Feststoffteilchen gilt für die mittlere Masse eines Teilchens:

$$\bar{m}_P = \bar{V}_P \cdot \rho_P = \rho_P \cdot \frac{\pi}{6 \cdot t_A} \left[ d_{P,0}^3 \cdot t_A - \frac{3 \cdot d_{P,0}^2 \cdot 2 \cdot a}{\rho_P \cdot (1+b)} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{(b+2)} + \frac{3 \cdot d_{P,0} \cdot 4 \cdot a^2}{\rho_P^2 \cdot (1+b)^2 \cdot (3+2b)} \cdot t_A^{3+2b} - \frac{8 \cdot a^3}{\rho_P^3 \cdot (1+b)^3 \cdot (4+3b)} \cdot t_A^{4+3b} \right] \quad (3.173)$$

Da nun die mittlere Oberfläche eines Teilchens und das mittlere Volumen bekannt sind, kann mit (3.168) und (3.170) die Gesamtoberfläche aller Teilchen in der Schicht berechnet werden:

$$A_{P,ges} = \frac{6 \cdot m_{sch} \cdot \left[ d_{P,0}^2 \cdot t_A - 2 \cdot w \cdot d_{P,0} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + \frac{w^2 \cdot t_A^{3+2b}}{3+2b} \right]}{\rho_P \cdot \left[ d_{P,0}^3 \cdot t_A - 3 \cdot w \cdot d_{P,0}^2 \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + 3 \cdot w^2 \cdot d_{P,0} \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{3+2b} - w^3 \cdot \frac{t_A^{4+3b}}{4+3b} \right]} \quad (3.174)$$

mit  $w = 2a$

Für die Anzahl aller Feststoffteilchen in der Wirbelschicht gilt:

$$n_{P,ges} = \frac{A_{P,ges}}{A_P} = \frac{6 \cdot m_{sch} \cdot A}{\rho_P \cdot B} \cdot \frac{t_A}{\pi \cdot A} \quad (3.175)$$

Mit  $A$  und  $B$  sind folgende Ausdrücke bezeichnet:



$$A = d_{P,0}^2 \cdot t_A - 2 \cdot w \cdot d_{P,0} \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + w^2 \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{3+2b} \quad (3.176)$$

$$B = d_{P,0}^3 \cdot t_A - 3 \cdot w \cdot d_{P,0}^2 \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + 3 \cdot w^2 \cdot d_{P,0} \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{3+2b} - w^3 \cdot \frac{t_A^{4+3b}}{4+3b} \quad (3.177)$$

Mit (3.176) und (3.177) gilt für die Partikelanzahl in der Wirbelschicht:

$$n_{P,ges} = \frac{6 \cdot m_{sch} \cdot t_A}{\pi \cdot \rho_P \cdot \left[ d_{P,0}^3 \cdot t_A - 3 \cdot w \cdot d_{P,0}^2 \cdot \frac{t_A^{b+2}}{b+2} + 3 \cdot w^2 \cdot d_{P,0} \cdot \frac{t_A^{3+2b}}{3+2b} - w^3 \cdot \frac{t_A^{4+3b}}{4+3b} \right]} \quad (3.178)$$

Die Ableitung des erforderlichen Massenstrom an zuzuführenden Partikeln erfolgt ähnlich wie bei dem massenbezogenen Koeffizienten. Es ist nur zu berücksichtigen, daß:

$$\dot{m}_{Abrieb} = R_A(t) \cdot A_{P,ges} \quad (3.179)$$

Genauso wie bei massenbezogenem Abriebskoeffizienten gilt für den Partikelmassenstrom:

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{R_A(t) \cdot A_{P,ges}}{\left( 1 - \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3} \right)} \quad (3.180)$$

Da  $R_A(t)$  eine Funktion der Zeit ist, bildet man einen Mittelwert des Abriebskoeffizienten.

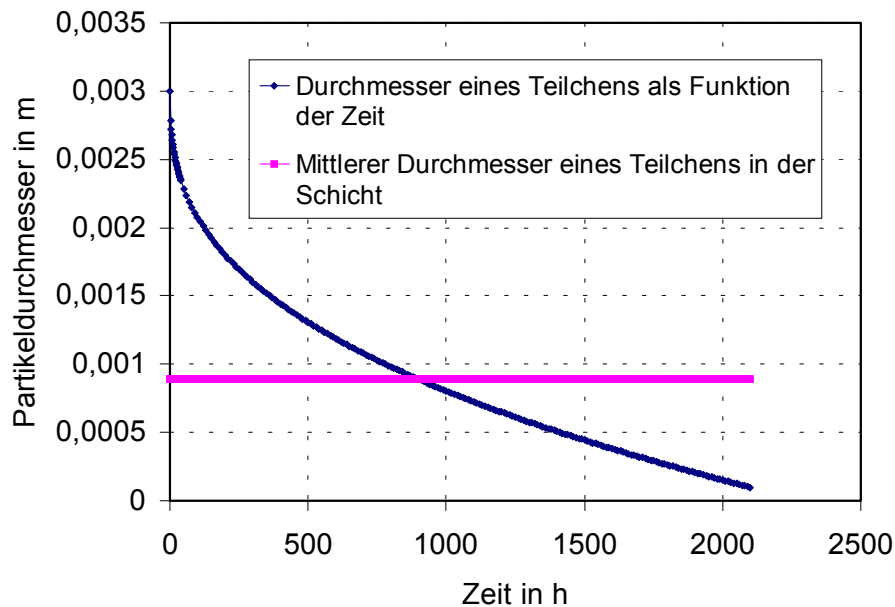
$$\bar{R}_A = \frac{a}{b+1} \cdot \left( -\frac{(d_{P,A} - d_{P,0}) \cdot \rho_P \cdot (1+b)}{2a} \right)^{\frac{b}{b+1}} \quad (3.181)$$

Mit (3.181) folgt für  $\dot{m}_{P,0}$ :

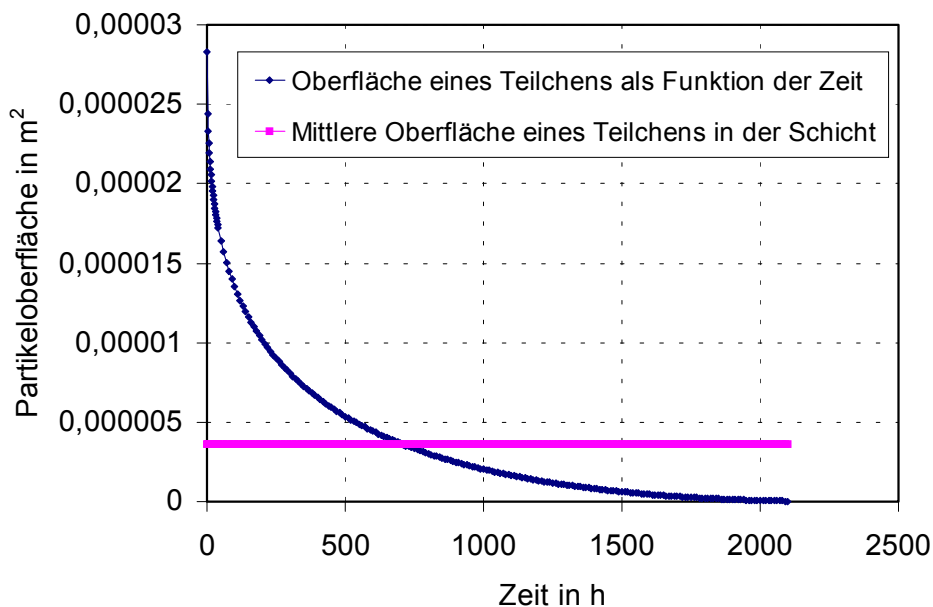
$$\dot{m}_{P,0} = \frac{\frac{a}{b+1} \cdot \left( -\frac{(d_{P,A} - d_{P,0}) \cdot \rho_P \cdot (1+b)}{2a} \right)^{\frac{b}{b+1}} \cdot A_{P,ges}}{1 - \frac{d_{P,A}^3}{d_{P,0}^3}} \quad (3.182)$$

Analog zu der Modellierung mit den konstanten Abriebskoeffizienten ist es hier zweckmäßig anhand des selben Beispiels die Verläufe der berechneten Werte darzustellen. Diesmal wird von einem oberflächenbezogenen zeitabhängigen

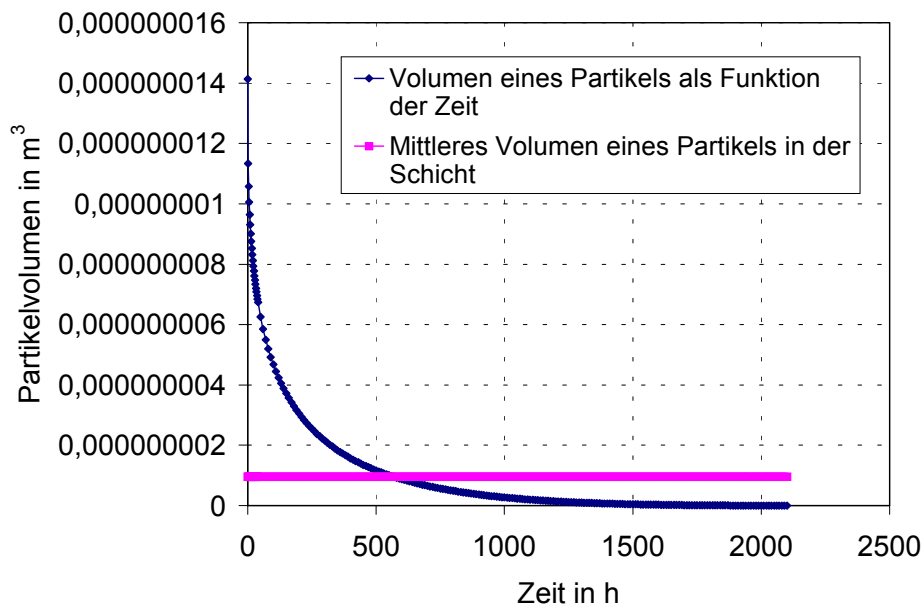
Abriebskoeffizienten ausgegangen. Die Ergebnisse sind auf den nächsten Abbildungen dargestellt.



**Abb. 3.6:** Verlauf des Partikeldurchmessers bei einem oberflächenbezogenen zeitabhängigen Abriebskoeffizienten



**Abb. 3.7:** Verlauf der Partikeloberfläche bei einem oberflächenbezogenen zeitabhängigen Abriebskoeffizienten



**Abb. 3.8:** Verlauf des Partikelvolumens bei einem oberflächenbezogenen zeitabhängigen Abriebskoeffizienten

In der Tabelle 3.2 sind die berechneten Werte zusammengefaßt.

**Tabelle 3.2:** Berechnete Parameter der Wirbelschicht bei einem oberflächenbezogenen zeitabhängigen Abriebskoeffizienten  $\bar{R}_A = 0,001554 \text{ kg/m}^2\text{h}$

Aufenthaltszeit eines Teilchens	h	2098,21
Mittlere Teilchenoberfläche	m <sup>2</sup>	3,62E-06
Mittleres Teilchenvolumen	m <sup>3</sup>	9,58E-10
Mittlere Teilchenmasse	kg	1,44E-06
Anzahl der Teilchen in der Schicht	-	1739763
Gesamtoberfläche aller Teilchen	m <sup>2</sup>	6,293887
Gesamtvolumen der Teilchen	m <sup>3</sup>	0,001667
erforderliche Zugaberate	kg/h	0,009782

### 3.4 Modellierung unter Berücksichtigung der Dichteveränderung des Granulates

Wenn die Partikel nicht mehr als homogen angenommen werden, sondern wenn sie mehrschichtig sind, ändert sich beim Abreiben oder Abplatzen von Teilen der äußeren Schale die mittlere Dichte des Gesamtpartikels.

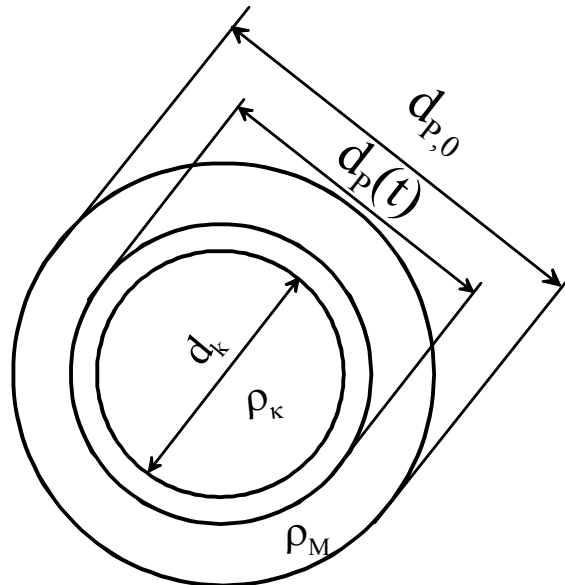
Aus der Durchmesseränderung lässt sich die Feststoffdichte des Granulates unter folgenden Festlegungen berechnen:

Kerndurchmesser -  $d_k$

Dichte des Kerns -  $\rho_k$

Dichte des Mantels -  $\rho_M$

Die Bezeichnungen sind in Abbildung 3.9 dargestellt.



**Abb. 3.9:** Schematische Darstellung eines nicht homogenen Partikels

Geltungsbereich:  $d_p(t) \geq d_k$

Die Partikel sind ideal sphärische Kugeln.

$$\rho_p(t) = \rho_M + \frac{d_k^3(\rho_k - \rho_M)}{d_p(t)^3} \quad (3.183)$$

$d_p(t)$  ist der Durchmesser zum jeweiligen Zeitpunkt.

Der Abrieb der Teilchen soll nur so lange erfolgen, wie noch Mantelmaterial vorhanden ist.

### 3.4.1 Anwendung eines massenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten

Analog zu 3.1.1 soll zunächst für diesen Fall ein konstanter massenbezogener Abriebskoeffizient angenommen werden.

#### • Zeitabhängiger Partikeldurchmesser

Es gilt:

$$\frac{dm_P}{dt} = -R_m m_P(t) \quad (3.184)$$

Die Masse der Kugel berechnet man nach der Formel:

$$m_P = \frac{\pi}{6} d_k^3 (\rho_k - \rho_M) + V_P \rho_M \quad (3.185)$$

Aus (3.185) lässt sich das Volumen eines Partikels ausdrücken:

$$V_P = \frac{m_P - \frac{\pi}{6} d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{\rho_M} \quad (3.186)$$

Da der Abrieb nur erfolgen soll, solange noch Mantelmaterial vorliegt, gilt:

$$\frac{dV_P}{dm_P} = \frac{1}{\rho_M} \quad (3.187)$$

Außerdem ist:

$$\frac{dV_P}{dd_P} = \frac{d\left(\frac{\pi}{6} d_P^3\right)}{dd_P} = \frac{\pi}{2} d_P^2 \quad (3.188)$$

Die Änderung des Partikeldurchmessers als Funktion der Zeit nach der Kettenregel ist:

$$\frac{dd_P}{dt} = \frac{dd_P}{dV_P} \cdot \frac{dV_P}{dm_P} \cdot \frac{dm_P}{dt} = \frac{2}{\pi d_P^2} \cdot \frac{1}{\rho_M} \cdot (-R_m m_P(t)) \quad (3.189)$$

$$\frac{dd_P}{dt} = \frac{2}{\pi d_P^2} \cdot \frac{1}{\rho_M} \cdot \left\{ \left[ -R_m \cdot \left( \frac{\pi}{6} (d_k^3 (\rho_k - \rho_M) + d_P^3 \rho_M) \right) \right] \right\} \quad (3.190)$$

Nach Herauskürzen folgt:

$$\frac{dd_P}{dt} = \frac{1}{3d_P^2} \cdot (-R_m) \cdot \left\{ \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{\rho_M} + d_P^3 \right\} \quad (3.191)$$

Nach Einführen einer Konstante  $K_1$  ist die Gleichung (3.191) in Gleichung (3.193) umzuformen.

$$K_1 = \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{\rho_M} \quad (3.192)$$

$$\frac{dd_P}{dt} = \frac{-R_m}{3d_P^2} (K_1 + d_P^3) \quad (3.193)$$

Nach Integration von Gleichung (3.194)

$$\int_{d_{P,0}}^{d_P} \frac{d_P^2}{(K_1 + d_P^3)} dd_P = \frac{-R_m}{3} \int_0^t dt \quad (3.194)$$

mit der Anfangsbedingung  $d_P(t=0) = d_{P,0}$

$$\ln \left| \frac{d_P^3 + K_1}{d_{P,0}^3 + K_1} \right| = -R_m t \quad (3.195)$$

und einer Umstellung

$$\left| \frac{d_P^3 + K_1}{d_{P,0}^3 + K_1} \right| = \exp(-R_m t) \quad (3.196)$$

steht für den zeitlich veränderlichen Durchmesser

$$d_P = \left\{ (d_{P,0}^3 + K_1) \exp(-R_m t) - K_1 \right\}^{1/3} \quad (3.197)$$

### • Aufenthaltszeit eines Partikels

Für  $t = t_A$  gilt  $d_P = d_{P,A}$ . Es folgt aus Gleichung (3.195)

$$\ln \left| \frac{d_{P,A}^3 + K_1}{d_{P,0}^3 + K_1} \right| = -R_m \cdot t_A \quad (3.198)$$

Die Aufenthaltszeit eines Partikels in der Wirbelschicht ist:

$$t_A = -\frac{1}{R_m} \cdot \ln \left| \frac{d_{P,A}^3 + K_1}{d_{P,0}^3 + K_1} \right| \quad (3.199)$$

### • Mittlere Dichte eines Partikels

Die zeitlich veränderliche Dichte eines Partikels

$$\rho_P(t) = \rho_M + \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{d_P^3(t)} \quad (3.200)$$

kann zu Beschreibung der mittleren Dichte eines Partikels herangezogen werden

$$\bar{\rho}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \rho_P(t) dt \quad (3.201)$$

wobei nach Einsetzen der Gleichung (3.200) in Gleichung (3.201) folgende Beziehung gilt

$$\bar{\rho}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \left( \rho_M + \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{(d_{P,0}^3 + K_1) \exp(-R_m t) - K_1} \right) dt \quad (3.202)$$

Nach einigen Umstellungen folgt:

$$\bar{\rho}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \rho_M dt + \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{t_A K_1} \int_0^{t_A} \frac{1}{\left( \frac{d_{P,0}^3 + K_1}{K_1} \right) \exp(-R_m t) - 1} dt \quad (3.203)$$

Zur Vereinfachung wird die Konstante  $K_2$  eingeführt.

$$K_2 = \frac{d_{P,0}^3 + K_1}{K_1} \quad (3.204)$$

Damit folgt:

$$\bar{\rho}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \rho_M dt + \frac{\rho_M}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{1}{K_2 \exp(-R_m t) - 1} dt \quad (3.205)$$

Nach der Integration und einigen Umstellungen folgt:

$$\bar{\rho}_P = \rho_M + \frac{\rho_M}{t_A} \cdot \frac{1}{R_m} \ln \left\{ \frac{1 - K_2}{\exp(R_m t_A) - K_2} \right\} \quad (3.206)$$

### • Mittlere Oberfläche eines Partikels

Die mittlere Oberfläche eines Teilchens in der Wirbelschicht lässt sich wie folgt berechnen:

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} A_P(t) dt = \frac{\pi}{t_A} \int_0^{t_A} \left\{ (d_{P,0}^3 + K_1) \exp(-R_m t) - K_1 \right\}^{2/3} dt \quad (3.207)$$

Zum Vereinfachen wird eine Konstante eingeführt:

$$K_3 = d_{P,0}^3 + K_1 \quad (3.208)$$

Damit folgt:

$$\bar{A}_P = \frac{\pi}{t_A} \int_0^{t_A} \left\{ K_3 \exp(-R_m t) - K_1 \right\}^{2/3} dt \quad (3.209)$$

Nach dem Integrieren ist die mittlere Oberfläche eines Partikels:

$$\bar{A}_p = \frac{\pi}{t_A} \quad (3.210)$$

$$\left[ \begin{aligned} & \sqrt{3} K_1^{2/3} a \tan \left[ \frac{\sqrt{3} \exp(R_m t_A / 3) (2(K_3 - K_1 \exp(R_m t_A)))^{1/3} - \exp(R_m t_A / 3) K_1^{1/3}}{3 K_1^{1/3}} \right] \\ & \frac{R_m}{\sqrt{3} K_1^{2/3} a \tan \left[ \frac{\sqrt{3} (2(K_3 - K_1)^{1/3} - K_1^{1/3})}{3 K_1^{1/3}} \right]} \\ & \frac{3 \exp(-2 R_m t / 3) (K_3 - K_1 \exp(R_m t))^{2/3}}{2 R_m} \\ & + \frac{K_1^{2/3} \ln \left[ \frac{(K_3 - K_1 \exp(R_m t))^{2/3} - \exp(R_m t / 3) K_1^{1/3} (K_3 - K_1 \exp(R_m t))^{1/3}}{\exp(2 R_m t / 3) K_1^{2/3}} \right]}{2 R_m} \\ & - \frac{K_1^{2/3} \ln \left( (K_3 - K_1 \exp(R_m t))^{1/3} + \exp(R_m t_A / 3) K_1^{1/3} \right)}{R_m} \\ & - \frac{K_1^{2/3} \ln \left( (K_3 - K_1)^{2/3} - K_1^{1/3} (K_3 - K_1)^{1/3} + K_1^{2/3} \right)}{2 R_m} \\ & + \frac{K_1^{2/3} \ln \left( (K_3 - K_1)^{1/3} + K_1^{1/3} \right)}{R_m} + \frac{3 (K_3 - K_1)^{2/3}}{2 R_m} \end{aligned} \right]$$

### • Mittleres Volumen eines Partikels

Das mittlere Volumen berechnet sich analog zur mittlere Oberfläche.

$$\bar{V}_p = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} V_p(t) dt \quad (3.211)$$

Unter Einbeziehung der Gleichung (3.197) und Gleichung (3.212) und einigen Umstellungen

$$V_p(t) = \frac{\pi}{6} d_p^3(t) \quad (3.212)$$

kann eine Integration von Gleichung (3.213) erfolgen



$$\bar{V}_P = \frac{\pi K_1}{6 t_A} \int_0^{t_A} [K_2 \exp(-R_m t_A) - 1] dt \quad (3.213)$$

wobei gilt:

$$K_2 = \frac{d_{P,0}^3 + K_1}{K_1} \quad (3.214)$$

Die Integration liefert:

$$\bar{V}_P = \frac{\pi K_1}{6 t_A} \left\{ -\frac{K_2}{R_m} [\exp(-R_m t_A) - 1] - t_A \right\} \quad (3.215)$$

### • Mittlere Masse eines Partikels

Die Masse eines heterogenen Partikels ergibt sich nach der Gleichung (3.216):

$$\frac{dm_P}{dt} = -R_m m_P(t) \quad (3.216)$$

Nach Integration der Gleichung (3.217)

$$\int_{m_0}^m \frac{dm_P}{m_P(t)} = -R_m \int_0^t dt \quad (3.217)$$

und einigen Umstellungen ergibt sich

$$m_P(t) = m_{P,0} \exp(-R_m t) \quad (3.218)$$

Aus der zeitlich veränderliche Masse ist die mittlere Masse eines Partikels zu berechnen:

$$\bar{m}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} m_P(t) dt \quad (3.219)$$

Nach Einbeziehen der Gleichung (3.218) und Integrieren ergibt sich für die mittlere Masse eines Partikels:

$$\bar{m}_P = \frac{m_{P,0}}{t_A} \left( \frac{1}{R_m} \right) [1 - \exp(-R_m t_A)] \quad (3.220)$$

Es ist:

$$m_{P,0} = \frac{\pi}{6} [d_k^3 \rho_k + (d_{P,0}^3 - d_k^3) \rho_M] \quad (3.221)$$

und  $t_A$  ist nach Gleichung (3.199) zu berechnen, wobei nach Einsetzen von Gleichung (3.199) und (3.221) in Gleichung (3.220) folgende Beziehung gilt:

$$\bar{m}_p = \frac{\pi [d_k^3 \rho_k + (d_{P,0}^3 - d_k^3) \rho_M]}{6 \left[ -\ln \left[ \frac{d_{P,A}^3 + K_1}{d_{P,0}^3 + K_1} \right] \right]} [1 - \exp(-R_m t_A)] \quad (3.222)$$

### • Gesamtpartikelanzahl

Wenn man  $\bar{m}_p$  eines Partikels kennt, kann man die Gesamtpartikelanzahl berechnen.

$$n_p = \frac{m_{sch}}{\bar{m}_p} = \frac{-m_{sch} \cdot \ln \left[ \frac{d_{P,A}^3 + K_1}{d_{P,0}^3 + K_1} \right]}{\frac{\pi}{6} [d_k^3 \rho_k + (d_{P,0}^3 - d_k^3) \rho_M] \cdot [1 - \exp(-R_m t_A)]} \quad (3.223)$$

### • Gesamtpartikeloberfläche

Die Oberfläche aller Partikel in der Schicht

$$A_{P,ges} = n_p \bar{A}_p \quad (3.224)$$

ergibt sich aus Gleichung (3.210) und (3.223)

### • Gesamtpartikelvolumen

Das Volumen aller Partikel in der Schicht ist:

$$V_{P,ges} = \frac{m_{sch}}{\bar{\rho}_p} \quad (3.225)$$

### • Erforderliche Partikelzugaberate

Für den Teilchenstrom muß gelten:

$$\dot{n}_P = \dot{n}_{P,0} = \dot{n}_{P,A} \quad (3.226)$$

Es wird auch vorausgesetzt, daß die Schichtmasse konstant bleibt:

$$m_{sch} = const \quad (3.227)$$

Eine Bilanz der Massenströme um die Wirbelschicht liefert:

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,A} + \dot{m}_{Abrieb} \quad (3.228)$$

mit

$$\dot{m}_{P,A} = \dot{n}_P m_{P,A} = \dot{n}_P \frac{\pi}{6} [d_k^3 \rho_k + (d_{P,A}^3 - d_k^3) \rho_M] \quad (3.229)$$

und

$$\dot{n}_P = \dot{n}_{P,0} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{m_{P,0}} = \frac{\dot{m}_{P,0}}{\frac{\pi}{6} [d_k^3 \rho_k + (d_{P,0}^3 - d_k^3) \rho_M]} \quad (3.230)$$

sowie

$$\dot{m}_{Abrieb} = R_m m_{sch} \quad (3.231)$$

Demnach gilt:

$$\dot{m}_{P,0} = \dot{m}_{P,0} \frac{m_{P,A}}{m_{P,0}} + R_m m_{sch} \quad (3.232)$$

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{R_m m_{sch} m_{P,0}}{(m_{P,0} - m_{P,A})} \quad (3.233)$$

$$m_{P,0} - m_{P,A} = \frac{\pi \rho_M}{6} (d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3) \quad (3.234)$$

$$\dot{m}_{P,0} = R_m \frac{m_{P,0} m_{sch}}{\frac{\pi \rho_M}{6} (d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3)} \quad (3.235)$$

Der erforderliche zuzugebende Partikelmassenstrom ist von folgenden Parametern abhängig:

- Schichtmasse
- massenbezogener Abriebskoeffizient
- Durchmesser der zuzugebenden Partikel

- Durchmesser der ausgetragenen Partikel
- Manteldichte
- Masse eines Ausgangspartikels

### 3.4.2 Anwendung eines oberflächenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten

Nun soll auch für den Fall heterogen aufgebauter Partikel die Annahme eines oberflächenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten untersucht werden.

#### • Zeitabhängiger Partikeldurchmesser

Es gilt:

$$\frac{dm_P}{dt} = -R_A A_P(t) \quad (3.236)$$

Die Masse der Kugel berechnet man nach Gleichung (3.185).

Das Differenzieren des Volumens nach der Masse ergibt Gleichung (3.187).

Außerdem ist:

$$\frac{dV_P}{dd_P} = \frac{\pi}{2} d_P^2 \quad (3.237)$$

Die Änderung des Partikeldurchmessers als Funktion der Zeit ist:

$$\frac{dd_P}{dt} = \frac{dd_P}{dV_P} \cdot \frac{dV_P}{dm_P} \cdot \frac{dm_P}{dt} = \frac{2}{\pi d_P^2} \cdot \frac{1}{\rho_M} \cdot (-R_A) \pi d_P^2 \quad (3.238)$$

Nach Herauskürzen folgt:

$$\frac{dd_P}{dt} = -\frac{2R_A}{\rho_M} \quad (3.239)$$

Die Integration von Gleichung (3.240) mit  $d_P(t=0) = d_{P,0}$

$$\int_{d_{P,0}}^{d_P} dd_P = -\frac{2R_A}{\rho_M} \int_0^t dt \quad (3.240)$$

liefert die zeitliche Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

$$d_P = d_{P,0} - \frac{2R_A}{\rho_M} t \quad (3.241)$$

### • Aufenthaltszeit eines Partikels

Für  $t = t_A$  gilt  $d_P = d_{P,A}$ . Es folgt aus Gleichung (3.241) die Aufenthaltszeit eines Partikels in der Wirbelschicht.

$$t_A = \frac{(d_{P,0} - d_{P,A})}{2R_A} \cdot \rho_M \quad (3.242)$$

### • Mittlere Dichte eines Partikels

Die zeitlich veränderliche Dichte eines Partikels aus Gleichung (3.183) kann zur Beschreibung der mittleren Dichte eines Partikels herangezogen werden, wobei folgende Beziehung gilt

$$\bar{\rho}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \rho_M dt + \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M)}{\left( d_{P,0} - \frac{2R_A}{\rho_M} t \right)^3} dt \quad (3.243)$$

Zur Vereinfachung wird die Konstante  $K_4$  eingeführt.

$$K_4 = d_k^3 (\rho_k - \rho_M) \quad (3.244)$$

Damit folgt:

$$\bar{\rho}_P = \rho_M + \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{K_4}{\left( d_{P,0} - \frac{2R_A}{\rho_M} t \right)^3} dt \quad (3.245)$$

Nach der Integration folgt:

$$\bar{\rho}_P = \rho_M + \frac{K_4}{t_A} \cdot \frac{\rho_M}{2 \cdot 2R_A} \left( d_{P,0} - \frac{2R_A}{\rho_M} t \right)^{-2} \Bigg|_0^{t_A} \quad (3.246)$$

Nach Gleichung (3.242) steht

$$\frac{2R_A}{\rho_M} t_A = d_{P,0} - d_{P,A} \quad (3.247)$$

und nach einigen Umstellungen ergibt sich

$$\bar{\rho}_P = \rho_M + \frac{K_4}{2(d_{P,0} - d_{P,A})} \left( \frac{1}{d_{P,A}^2} - \frac{1}{d_{P,0}^2} \right) \quad (3.248)$$

Gleichung (3.249) beinhaltet die mittlere Dichte eines Partikels, das mit dem Durchmesser  $d_{P,0}$  in die Wirbelschicht eintritt und mit dem Durchmesser  $d_{P,A}$  aus der Wirbelschicht ausgetragen wird. Es gilt noch  $d_{P,0} \geq d_P \geq d_k$  und  $d_{P,A} \geq d_k$ .

$$\bar{\rho}_P = \rho_M + \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M) (d_{P,0} + d_{P,A})}{2d_{P,0}^2 d_{P,A}^2} \quad (3.249)$$

### • Mittlere Oberfläche eines Partikels

Die mittlere Oberfläche ergibt sich aus der zeitlich veränderliche Oberfläche nach

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} A(t) dt = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \pi \left( d_{P,0}^2 - \frac{2R_A}{\rho_M} t \right)^2 dt \quad (3.250)$$

Nach der Integration folgt für die mittlere Oberfläche eines Partikels

$$\bar{A}_P = \frac{1}{t_A} \cdot \frac{\pi}{3} \left\{ \left( d_{P,0} - \frac{2R_A}{\rho_M} t_A \right)^3 - \left( d_{P,0} - \frac{2R_A}{\rho_M} 0 \right)^3 \right\} \cdot \left( -\frac{\rho_M}{2R_A} \right) \quad (3.251)$$

Nach einigen Umstellungen ergibt sich mit Gleichung (3.242)

$$\bar{A}_P = \frac{\pi}{3} \left( \frac{d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right) \quad (3.252)$$

Die Gleichung gilt für  $d_{P,0} \geq d_{P,A} \geq d_k$ , also nur solange noch Mantelmaterial um den Kern vorhanden ist.

### • Mittleres Volumen eines Partikels

Das mittlere Volumen eines Partikels ist analog zur mittleren Oberfläche zu berechnen.

$$\bar{V}_P = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} V_P(t) dt = \frac{1}{t_A} \int_0^{t_A} \frac{\pi}{6} \left( d_{P,0} - 2R_A \frac{1}{\rho_M} t \right)^3 dt \quad (3.253)$$

Nach Integration und einigen Umstellungen ergibt sich mit Gleichung (3.242)

$$\bar{V}_P = \frac{\pi}{24} \left( \frac{d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right) \quad (3.254)$$

### • Mittlere Masse eines Partikels

Die mittlere Masse eines heterogen aufgebauten Partikels in der Wirbelschicht ist definiert zu

$$\bar{m}_P = \bar{V}_P \bar{\rho}_P \quad (3.255)$$

und kann durch Gleichung (3.254) und Gleichung (3.249) bestimmt werden.

$$\bar{m}_P = \frac{\pi}{24} \left( \frac{d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4}{d_{P,0} - d_{P,A}} \right) \left[ \rho_M + \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M) (d_{P,0} + d_{P,A})}{2d_{P,0}^2 d_{P,A}^2} \right] \quad (3.256)$$

### • Gesamtpartikelanzahl

Mit Gleichung (3.256) kann die Anzahl aller Partikel in der Wirbelschicht bestimmt werden:

$$n_{P,ges} = \frac{m_{sch}}{\bar{m}_P} = \frac{24 m_{sch} (d_{P,0} - d_{P,A})}{\pi (d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4) \left[ \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M) (d_{P,0} + d_{P,A})}{2d_{P,0}^2 d_{P,A}^2} + \rho_M \right]} \quad (3.257)$$

### • Gesamtpartikeloberfläche

Die Oberfläche aller Partikel in der Wirbelschicht

$$A_{P,ges} = n_{P,ges} \bar{A}_P \quad (3.258)$$

ergibt sich aus Gleichung (3.257) und Gleichung (3.252) zu

$$A_{P,ges} = \frac{8 m_{sch} (d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3)}{(d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4) \left[ \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M) (d_{P,0} + d_{P,A})}{2d_{P,0}^2 d_{P,A}^2} + \rho_M \right]} \quad (3.259)$$

### • Gesamtpartikelvolumen

Das Volumen aller Partikel in der Schicht ist

$$V_{P,ges} = \frac{m_{sch}}{\bar{\rho}_P} = \frac{m_{sch}}{\frac{d_k^3(\rho_k - \rho_M)(d_{P,0} + d_{P,A})}{2d_{P,0}^2 d_{P,A}^2} + \rho_M} \quad (3.260)$$

### • Erforderliche Partikelzugaberate

Die Berechnung des erforderlichen Massenstromes erfolgt auf ähnliche Weise wie bei dem massenbezogenen Abriebskoeffizienten.

$$\dot{m}_{P,0} = \frac{R_A m_{P,0} A_{P,ges}}{\frac{\pi \rho_M}{6} (d_{P,0}^3 - d_{P,A}^3)} \quad (3.261)$$

Nach Einsetzen der Gleichung (3.259) und einigen Umstellungen ergibt sich:

$$\dot{m}_{P,0} = R_A \frac{8m_{sch} [d_k^3 \rho_k + (d_{P,0}^3 - d_k^3) \rho_M]}{\rho_M (d_{P,0}^4 - d_{P,A}^4) \left[ \rho_M + \frac{d_k^3 (\rho_k - \rho_M) (d_{P,0} + d_{P,A})}{2d_{P,0}^2 d_{P,A}^2} \right]} \quad (3.262)$$

Mit den obigen Überlegungen wurden die wesentlichen möglichen Fälle für die Veränderung der Partikelpopulation in einer blasenbildenden stationären Wirbelschicht infolge Abrieb theoretisch hergeleitet und einer geschlossenen Lösung zugeführt. Die Lösungen gelten jeweils für eine stationäre Fahrweise bei konstanter Schichtmasse. Instationäre Zustände sind mit der vorliegenden Modellvorstellung nicht zu erfassen. Für solche Zustände müssen numerische Ansätze für die Populationsbilanzgleichung verwendet werden. Die vorliegenden Ergebnisse bieten eine gute Möglichkeit, die Gültigkeit numerischer Ansätze beim Übergang in den stationären Zustand zu überprüfen.

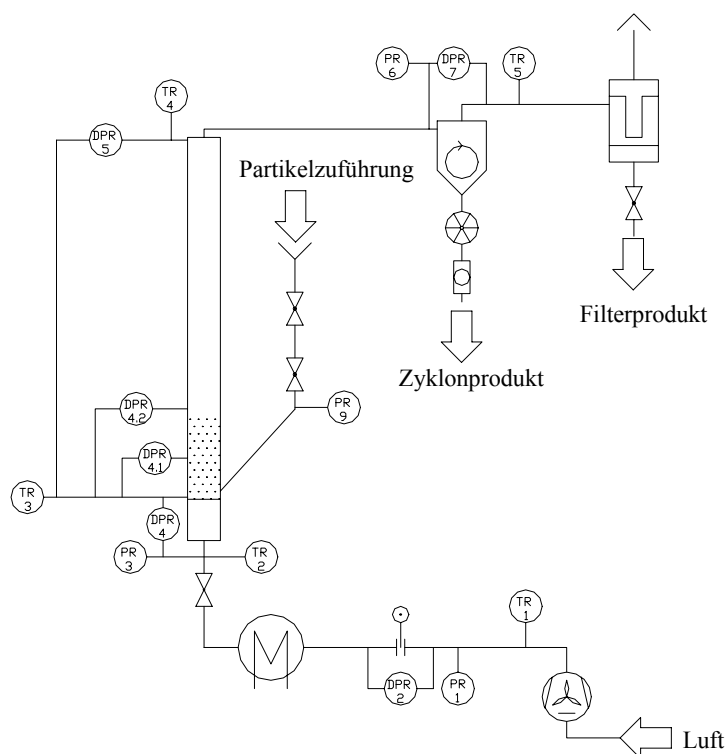


## 4 Versuchsanlage

### 4.1 Anlagenbeschreibung

Die Wirbelschichtanlage DN150 kann als stationäre oder als zirkulierende Wirbelschicht betrieben werden. Die Rohrleitung der Anlage hat einen inneren Durchmesser von 150 mm. Die Rückführung in die Wirbelkammer ist unterbrochen. Die Anlage besteht aus dem eigentlichen Wirbelschichtapparat mit klappbarem Boden (Schlitzlänge 4 mm, Schlitzbreite 0,19 mm, Öffnungsverhältnis 9,1%), einem Zyklon mit Zellenradschleuse und Rückführleitung zum Wirbelschichtapparat und einem Staubfilter (Schlauchfilter mit Druckluftabreinigung). Die Luft wird von dem Gebläse geliefert. Es besteht die Möglichkeit die Umdrehungszahl (RPM) des Gebläses mit einem Frequenzumrichter zu regulieren. Das Gebläse ist mit einem Heizer mit Lufttemperaturregelung verbunden. Wenn die Anlage als zirkulierende Wirbelschicht betrieben wird, führt die Staubleitung des Zyklons in die Wirbelkammer. In der vorliegenden Arbeit wurde die Anlage stationär betrieben.

### 4.2 Installierte Meßtechnik



**Abb. 4.1:** Meßstellenschema der Anlage

Die Wirbelschichtanlage ist mit üblichen Sensoren zur Erfassung von Temperaturen und Drücken versehen. Abb. 4.1 zeigt das Meßstellenschema der Anlage. Die Meßwerterfassung erfolgt computergestützt.

Die einzelnen Meßstellen bedeuten:

- PR 1- Druck vor der Meßblende
- DPR 2- Differenzdruck der Meßblende
- PR 3- Druck unterhalb des Bodens
- DPR 4- Differenzdruck des Bodens (Bodendruckverlust)
- DPR 4.1-4.2- Differenzdruck in Abhängigkeit von der Apparatehöhe
- DPR 5- Differenzdruck des Wirbelschichtapparates
- PR 6- Druck vor dem Rohrbogen
- DPR 7- Differenzdruck des Zyklons (Zyklondruckverlust)
- TR 1- Temperatur an der Meßblende
- TR 2- Temperatur unterhalb des Bodens
- TR 3- Temperatur in der Wirbelkammer
- TR 4- Temperatur vor dem 180° Bogen
- TR 5- Temperatur vor dem Staubfilter

- Temperatursensoren

Zur Erfassung des Temperaturprofils in der Versuchsanlage werden Platin-Dünnfilmsonden eingesetzt. Sie können in einem Bereich von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+250^{\circ}\text{C}$  betrieben werden und haben bei  $0^{\circ}\text{C}$  einen Widerstand von 100 Ohm. Die Temperaturbeziehung ist nach DIN 43760 berechnet.

- Drucksensoren

Zur Messung der Absolutdrücke und der Differenzdrücke werden Differenzdruckmesser für den Bereich 0-350 mbar eingesetzt. Der Absolutdruck wird als Differenz zum Luftdruck gemessen. Die Sensoren sind temperaturkompensiert, wodurch sie ohne Neukalibrierung ausgetauscht werden können.

- Datenlogger

Die Kopplung zwischen den Sensoren und der Datenerfassungsanlage wird durch drei Datenlogger der Firma Gantner- Electronic realisiert. Durch die Möglichkeit, die Meßsensoren an jeden Eingang direkt anzuschließen und mehrere unterschiedliche Sensortypen auf einem Modul zu vereinen, ergibt sich eine hohe Flexibilität in der Anschlußbelegung und die Einsparung der Meßwertumwandlung.

- Meßwertdarstellung, -auswertung und -sicherung

Zur Auswertung, Darstellung und Sicherung der Meßwerte wurde eine eigene Meßwerterfassungssoftware entwickelt, die auf dem von der Firma Hewlett- Packard vertriebenen Entwicklungssystem HP-VEE 4.0 aufsetzt. Diese entwickelte Software bietet folgende Möglichkeiten:

- Abfrage der Meßwerte aus dem Zwischenspeicher

- Konvertierung der im IEE 745 Format vorliegenden Werte in ein Gleitkommaformat

- Zuordnung der Werte zu konfigurierten Kanälen

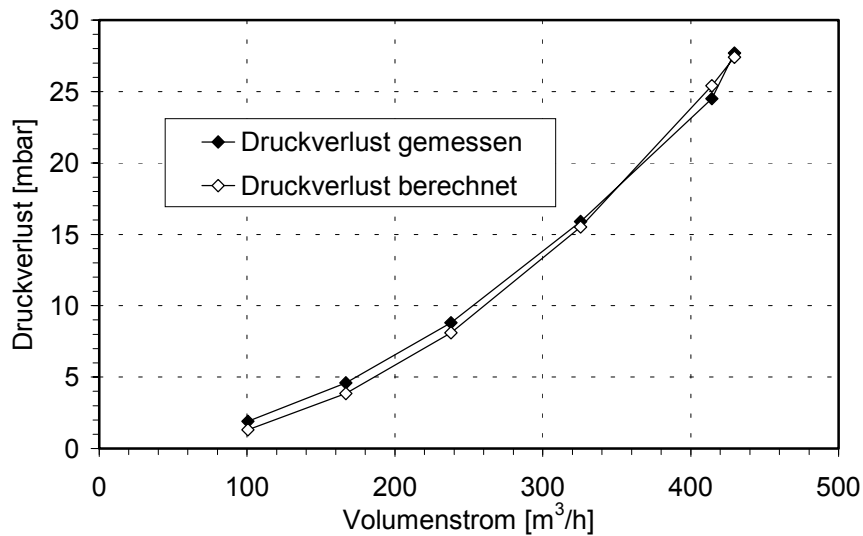
- Sicherung der Meßwerte in einer Excel- Datei

- konfigurierbare Darstellung der Werte in Diagrammform, wobei jeweils für Druck, Temperatur usw. selbständige Diagramme zur Verfügung stehen.

Die installierte Meßtechnik an der Wirbelschichtversuchsanlage wurde durch Parallelmessungen mit anderen Meßaufnehmern überprüft. Die installierten Druckmeßsensoren wurden dabei durch Parallelmessungen mit einem U- Rohr- Manometer überprüft.

Zur Überprüfung der Genauigkeit der installierten Meßblende zur Durchsatzmessung der Fluidisierungsluft wurde ein Flügelrad- Anemometer verwendet.

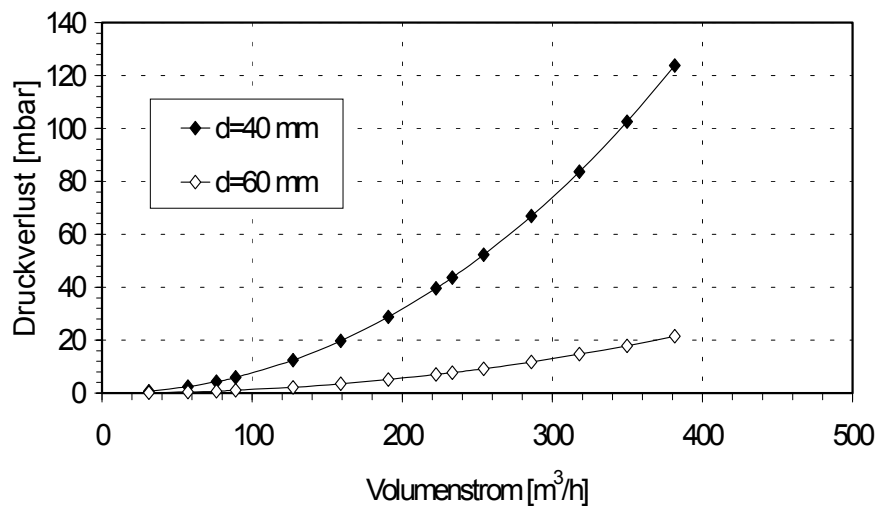
Es wurde die mittlere Luftgeschwindigkeit im Rohrquerschnitt mittels eines Flügelrad- Anemometers für verschiedene Blendendruckverluste ermittelt. Aus den gemessenen Blendendruckverlusten wurden nach DIN EN ISO 5167-1 die Luftvolumenströme bzw. Luftgeschwindigkeiten berechnet und mit den Anemometer- Messungen verglichen. Das Ergebnis der Vergleichsmessung zeigt Abb. 4.2.



**Abb. 4.2:** Blendendruckverlust in Abhängigkeit von dem Volumenstrom für 60 mm Blende

Man sieht eine relativ gute Übereinstimmung. Deshalb kann die Blendenmessung bei den weiteren Messungen an der Wirbelschichtenanlage benutzt werden.

Die nächste Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Blendendruckverlustes von dem Volumenstrom für verschiedene Blendendurchmesser.



**Abb. 4.3:** Blendendruckverlust als Funktion des Luftvolumenstromes bei  $d=40$  mm und  $d=60$  mm

## 4.3 Verwendete Meßgeräte

### 4.3.1 EKGM – System (Elektronische Korngrößenmessung)

Die EKGM- Korngrößenanalytoren sind universelle Geräte zur automatischen Messung der Durchmesser fester und flüssiger Partikel im Bereich von 40 bis 10000  $\mu\text{m}$ . Bei einer Arbeitstemperatur von 278-313 K umfaßt der Anwendungsbereich sowohl Labor- als auch Produktionsbedingungen.

Das Gerät besteht aus einem fotoelektrischen Sensor, einer speziellen Auswertelektronik und einem IBM XT/AT- kompatiblen Computer. Der Sensor kann zusammen mit der Elektronik in einem Gerät integriert werden. Das elektronische System analysiert die Form und die Größe des Signals. Aus der Signalamplitude wird danach der Partikeldurchmesser errechnet. In Abhängigkeit vom installierten Sensor ist das EKGM- System zur Messung von Partikeln verschiedener Durchmesser, Aggregatzustände (fest oder flüssig) geeignet.

Die Messung wird über einer einstellbaren Zeit (0,01 Sekunden bis 10 Minuten) oder für eine angegebene Anzahl von Partikeln durchgeführt. Der Analysator ordnet die gemessenen Partikel während jeder Messung automatisch einem von 64 Größenkanälen zu. Der EKGM- Partikelgrößenanalysator wird über eine parallele Schnittstelle mit dem Computer verbunden. Die Software des Analysators ermöglicht es, vollständig Charakteristiken der untersuchten Partikelproben zu erhalten.

#### Technische Daten

- maximale Oberfläche des Meßsensors –  $28 \cdot 60 = 1680 \text{ mm}^2$
- Empfindlichkeit und Schwankungen auf der Sensoroberfläche- kleiner 5%
- Sensoreinlaßfläche- stufenweise von 85 bis  $533 \text{ mm}^2$
- Meßzeit- 0,01 bis 600 Sekunden
- Theoretische Zählrate- rd. 10000 Partikel je Sekunde
- Anzahl der Kanäle- bis 64
- Antikoinzidenzsystem - automatisch nachgeführt in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser
- Steuerung- automatische Bestimmung des Nullpunkts und der Verstärkung
- Lichtquelle- Infrarotdiode
- Arbeitstemperatur- 278-313 K
- Sensorabmessungen-  $440 \times 100 \times 120 \text{ mm}^3$

- „Black box“- Maße- 460x270x250 mm<sup>3</sup>
- Sensorgewicht- 4,5 kg
- Stromversorgung- 220V, 50 Hz
- Mikrorechner- kompatibel zum IBM PC/XT/AT

### Der Programmalgorithmus

Der Programmalgorithmus wurde für sphärische Partikel aufgestellt. Für  $p$  durchgeführte Messungen erhält man folgende Ergebnisse:

$$\text{Ergebnisse: } \begin{bmatrix} d_1 \\ \cdot \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{11} & \cdot & n_{1j} & \cdot & n_{1p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ n_{i1} & \cdot & n_{ij} & \cdot & n_{ip} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ n_{ki} & \cdot & n_{kj} & \cdot & n_{kp} \end{bmatrix}$$

$d$  - Partikeldurchmesser;  $n$  - Anzahl der gemessenen Partikel;  $i$  - Nummer der Kanäle;  $j$  - Nr. der Durchläufe;  $k$  - Endnummer der Kanäle (64);

Auf der Grundlage der erhaltenen Resultate lassen sich sowohl die Äquivalentdurchmesser in einem bestimmten Bereich der Probe als auch über der gesamten Probe bestimmen. Kennt man die Anzahl der Partikel in den einzelnen Kanälen, so kann man berechnen:

- die Äquivalentdurchmesser für die gesamte Probe

$$d_n = \sum_i A_i \cdot d_i; \quad d_a = \sqrt{\sum_i A_i \cdot (d_i)^2 \cdot 1/p_i}; \quad d_v = \sqrt[3]{\sum_i A_i \cdot (d_i)^3 \cdot 6/p_i}; \quad d_m = (d_v)^3 / (d_a)^2 \quad (4.1)$$

- die vollständigen Volumen-, Oberflächen – und Durchmesseranteile der einzelnen Fraktionen (nach Durchmesser) in der gesamten Probe:

$$\text{a) der vollständige Volumenanteil des } i\text{-ten Kanals: } B_{v1} = A_1 \cdot (d_1 / d_v)^3 \quad (4.2)$$

$$\text{b) der vollständige Oberflächenanteil des } i\text{-ten Kanals: } B_{a1} = A_1 \cdot (d_1 / d_a)^2 \quad (4.3)$$

$$\text{c) der vollständige Durchmesseranteil des } i\text{-ten Kanals: } B_{n1} = A_1 \cdot (d_1 / d_n), \quad (4.4)$$

wobei  $A_1 = \sum_i n_{1j} / \sum_i \sum_j n_{1j}$  der quantitative Anteil ist.

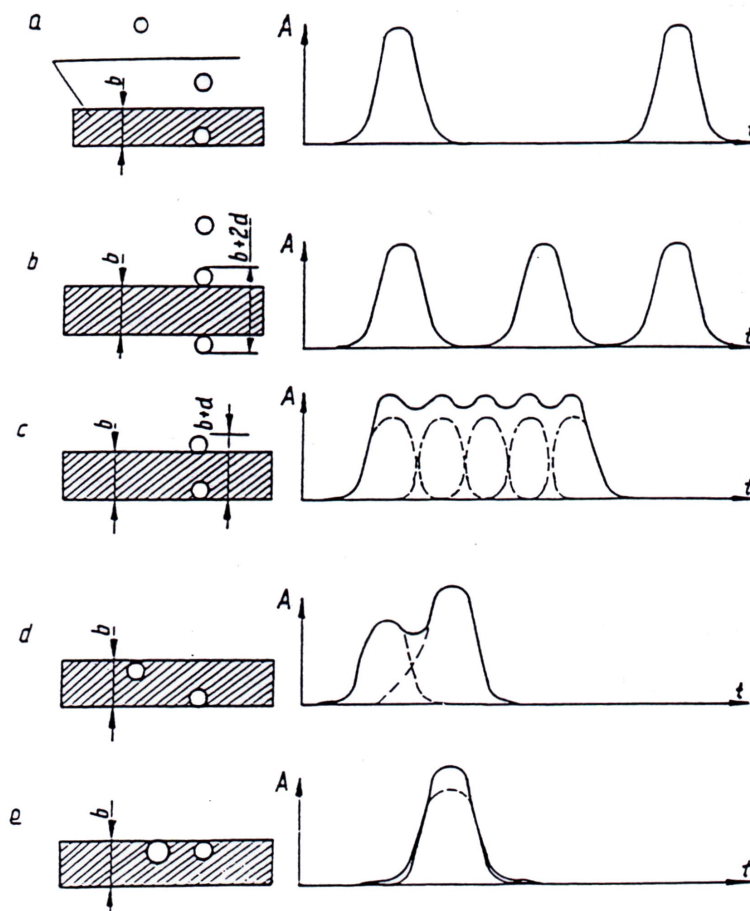
Dies ist das Verhältnis der Anzahl der Partikel eines gegebenen Kanals  $d_1$  zur Gesamtzahl der Partikel.

Die Umwandlung der durch die Partikel hervorgerufenen Lichtsignale in elektrische Impulse findet im optoelektronischen Block des Sensors oder genauer in seinem

Probenraum statt. Die Partikel passieren dort in vielen verschiedenen Gestalten, weswegen die elektrischen Impulse verschiedene Formen haben.

Abb. 4.4 zeigt verschiedene Impulsformen, die von Partikeln mit gleichem Durchmesser verursacht wurden. Nur die erste und die zweite Gruppe Impulse sind für die Messung interessant, der Rest muß eliminiert werden. Zu diesem Zweck wurde das Anti-Koinzidenz-System konstruiert. Es analysiert die Form jedes Impulses und eliminiert die (c) und (d) gezeigten Kombinationen von Impulsen. Partikel, die sich in reiner Koinzidenz befinden (e) – werden inkorrekt gemessen. Das EKGM-Serviceprogramm besteht aus folgenden Teilen, die das Hauptmenü bilden:

- a) Vorbereitung der Meßparameter- „Preparation“
- b) Eigentliche Messung- „Measurment“
- c) Darstellung der Meßergebnisse- „Results“
- d) Auswahl von Schnittstelle, Datenerfassungsart und Dateien- „Options“
- e) Auswahl der Grafik für die Darstellung der Meßergebnisse- „Graphics“
- f) Siebanalyse- „Sieve“
- g) Verlassen des Programms – „Quit“

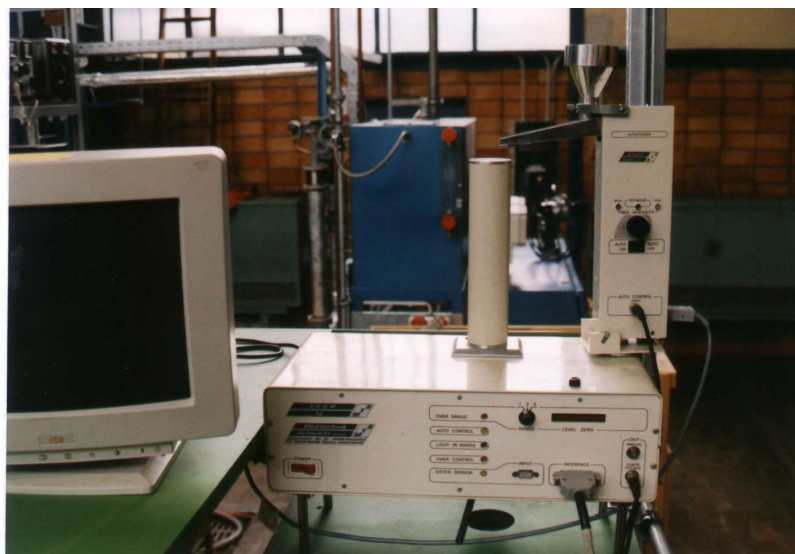


**Abb. 4.4:** Darstellung von Impulsformen

## Beschreibung der Anzeigen des EKG- Systems

Das EKG- System beinhaltet folgende Indikatoren:

1. Die rote LED „Over Range“ leuchtet bei Überschreitung des Meßbereiches des A/D- Wandlers auf.
2. Die gelbe LED „Auto Control“ zeigt durch Blinken die Arbeit der automatischen Nullpunktkontrolle an. Das Blinken stoppt nach 1-3 Minuten, wenn der Nullpunkt bestimmt ist.
3. Die grüne LED „Licht in Range“ leuchtet dauernd und zeigt an, daß die Lichtquelle des Sensors im optimalen Bereich arbeitet.
4. Die rote LED „Over Control“ leuchtet auf, wenn beim automatischen Nullpunktgleich ein Fehler aufgetreten ist. Dies kann z.B. bei starker Verschmutzung oder einem Defekt der Fall sein.
5. Die Leuchtbandanzeige „Level Zero“ signalisiert den Pegel der automatischen Nullpunktkontrolle. Die Nullpunktbestimmung arbeitet korrekt, wenn 2 (plus minus 1) Segmente leuchten. Dieser Indikator zeigt außerdem die Amplitude des Sensorsignals an.
6. Der Dreifachbereichsschalter „Range“ zeigt den gewählten Meßbereich an:
  - 1- Grundmeßbereich (225  $\mu\text{m}$   $\div$  12064  $\mu\text{m}$ )
  - 2- Grundmeßbereich (144  $\mu\text{m}$   $\div$  6053  $\mu\text{m}$ )
  - 3- Grundmeßbereich (95  $\mu\text{m}$   $\div$  3092  $\mu\text{m}$ )
7. Die gelbe LED „External Sensor“ leuchtet dauernd, wenn ein externer Sensor oder ein Testgenerator (der interne Sensor wird automatisch abgeschaltet) angeschlossen sind.



**Abb. 4.5:** Bild des Gerätes EKG

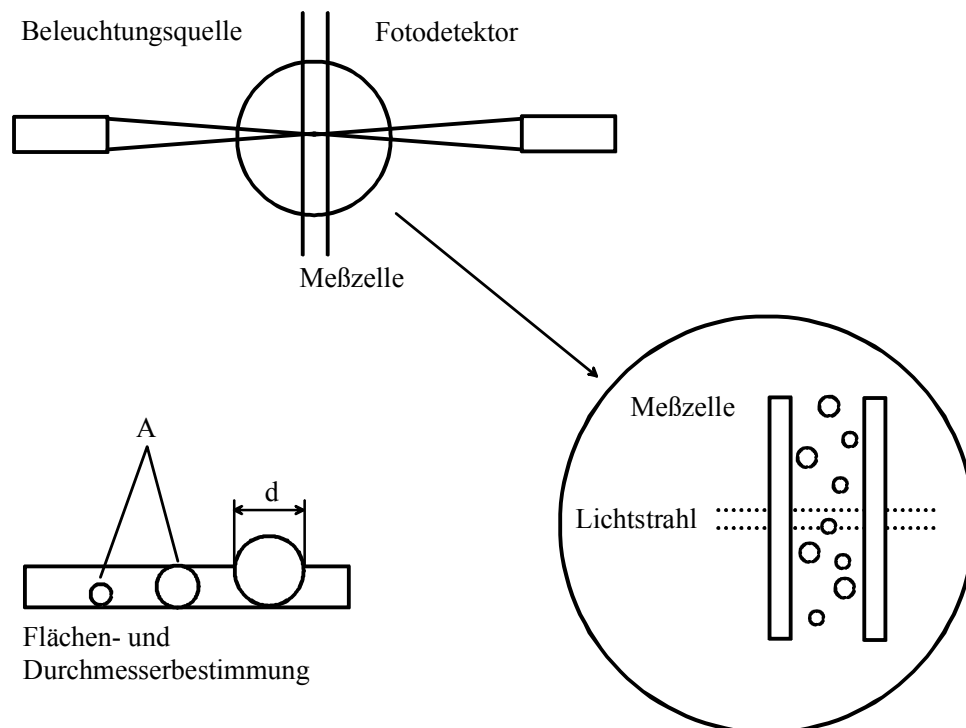


### 4.3.2 Partikel Analyse System für Feststoffpartikel in Flüssigkeiten (TOPAS-Gerät) Serie FAS 360

Unter den optischen Meßmethoden ist die Ermittlung der Extinktion vereinzelter Partikel als Partikelmerkmal ein leistungsfähiges Prinzip zur Detektion von Partikelgrößen in einem breiten Meßbereich. Genutzt wird der physikalische Effekt, daß mit Lichtwellen beaufschlagte Partikel eine ihrer Größe entsprechende Extinktion erzeugen. Dazu durchströmt das partikelbeladene Medium kontinuierlich einen definierten Meßraum. Die Konzentration im Medium und das Meßvolumen müssen so aufeinander abgestimmt sein, daß sich zum Zeitpunkt der Messung mit hoher Wahrscheinlichkeit immer nur ein Partikel im Meßvolumen befindet. Die von den vereinzelt Partikeln erzeugten Signale werden als Partikelgrößeninformation anzahlmäßig in definierte Klassen eingeordnet. Diesem Meßprinzip liegt der Vorteil zugrunde, daß die Partikelgrößenverteilung unabhängig und voraussetzungsfrei bei gleichzeitigem Informationsgewinn über die Partikelanzahl ermittelt werden kann. Die wesentliche Einschränkung für dieses Meßprinzip ist mit der zu analysierenden Partikelanzahlkonzentration gegeben. Die zwei Hauptkomponenten des Meßgerätes sind Sensor- und Signalverarbeitungseinheit. Die Sensoreinheit besteht aus der optischen Meßanordnung (Beleuchtungsquelle, Meßzelle, Fotodetektor, Vorverstärker), einer Halterung mit Probengefäß, dem Magnetventil zur Steuerung der Probe und dem Stativ. In der nebenstehenden Signalverarbeitungseinheit erfolgt die weitere signaltechnische Behandlung und Vielkanalanalyse der Signale sowie die Datenverdichtung und -übertragung. Der für die Arbeit mit dem Meßinstrument notwendige PC ist über eine serielle Schnittstelle verbunden.

#### Vorderfront der Signalverarbeitungseinheit

LED Bezeichnung	Funktionsanzeige
Power	Stromversorgung
Counts	Einzelimpuls wurde registriert
Intensity	Beleuchtungsintensität ist innerhalb des vorgegebenen Intervalls
Fluid Valve	Magnetventil ist offen
Halogenlamp	Halogenlampe ist eingeschaltet

Bild des Gerätes:

**Abb. 4.6:** Optische Meßanordnung (TOPAS- Meßgerät)

Die optische Meßanordnung basiert auf dem Köhler'schen Beleuchtungsschema. Das Licht einer speziellen Halogenlampe gelangt durch eine Schlitzeblende und über eine Optik als paralleles Strahlenbündel auf einen Fotodetektor. Dazwischen befindet

sich der von einer Küvette gebildete Meßquerschnitt, der zusammen mit der Höhe des durchstrahlenden Lichtes den Meßraum bildet. Die hindurchtretenden Partikel bewirken eine Intensitätsschwächung (Extinktion), die als Maß für die Partikelgröße auf dem Fotodetektor erfaßt wird.

Für eine saubere Extinktionmessung ist der Empfängeröffnungswinkel, d.h. der Winkelbereich zwischen der optischen Achse und dem Detektorradius von entscheidender Bedeutung. Zusammen mit der verwendeten Weißlichtquelle und dem Küvettenquerschnitt wird damit die Leistungsfähigkeit der Meßanordnung (Meßbereich, Stoffabhängigkeit, Meßkonzentration) festgelegt.

Die von den Partikeln ausgesendeten Signale werden von einem Fotodetektor in elektrische Impulse gewandelt. Als Größeninformation wird die Höhe der Impulse verwendet.

### **Durchführung von Messungen**

Für die Durchführung von Analysenaufgaben sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Probenahme
2. Abtrennen von Partikeln größer 500  $\mu\text{m}$
3. Inbetriebnahme des FAS
4. Spülen mit partikelfreier Flüssigkeit
5. Überprüfung der Beleuchtungsintensitätseinstellung
6. Befüllen des Probengefäßes
7. Probemessung zur Überprüfung der Meßkonzentration
8. Verdünnung auf Meßkonzentration mit partikelfreier Flüssigkeit, wenn dies notwendig ist.
9. Voreinstellung und starten der Messungen.
10. Spülen mit partikelfreier Flüssigkeit

Als partikelfreie Flüssigkeit wird filtriertes destilliertes Wasser empfohlen.

### **Berechnungsvorschriften**

Die Vielkanalanalyse registriert während der Messung in 64 Größenklassen ( $i = 1-64$ ) mit den unterschiedlichen Klassenbreiten  $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$  die Partikelanzahlen  $N_i$ . Die anzahlmäßige Verteilungssummenfunktion  $Q_0(x_i)$  gibt den Anzahlanteil in Prozent pro Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) an, der kleiner als die betrachtete Partikelgröße  $x_i$  in dem gewählten Integrationsbereich ist. Die anzahlmäßige Dichtefunktion  $q_0(x_i)$  ist die

erste Ableitung der Verteilungssummenfunktion nach der Partikelgröße und gibt den Anzahlanteil einer betrachteten Klasse  $i$ , bezogen auf die Klassenbreite  $\Delta x_i$  in  $\frac{1}{\mu m}$

$$\text{an. } q_0(x_i) = \frac{\Delta Q_0(x_i)}{\Delta x_i} \quad (4.5)$$

Weiterhin werden die folgenden Berechnungsgleichungen verwendet:

$$\text{Relative Häufigkeit } q_i(x_i) = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (4.6)$$

$$\text{Dichtefunktion } q_i(x_i) = \frac{N_i}{\sum N_i \cdot \Delta x_i} \quad (4.7)$$

$$\text{Mittelwert } x_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{UL}^{OL} (x_i \cdot \rho_{r,i}(x_i)) \quad (4.8)$$

$$\text{Standardabweichung } s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{UL}^{OL} (x_i \cdot q_{r,i}(x_i) - x_m)^2} \quad (4.9)$$

$$\text{GMD } x_g = \frac{1}{n} \cdot \sum_{UL}^{OL} (\log(x_i) \cdot q_{0,i}(x_i)) \quad (4.10)$$

#### Parameter der berechneten Partikelgrößenverteilung:

Zeit	Meßzeit
Volumen	analysiertes Volumen
Total	Summe aller gezählten Partikel
Anteil	Anteil im Integrationsbereich analysierter Partikel an Gesamtanzahl in Prozent
Mode	Modalwert, der dem Maximum der Häufigkeitsverteilung entspricht
Mean	Mittelwert der gewählten Häufigkeitsverteilung
StAbw	Standardabweichung
GMD	geometrischer Mittelwert der Häufigkeitsverteilung

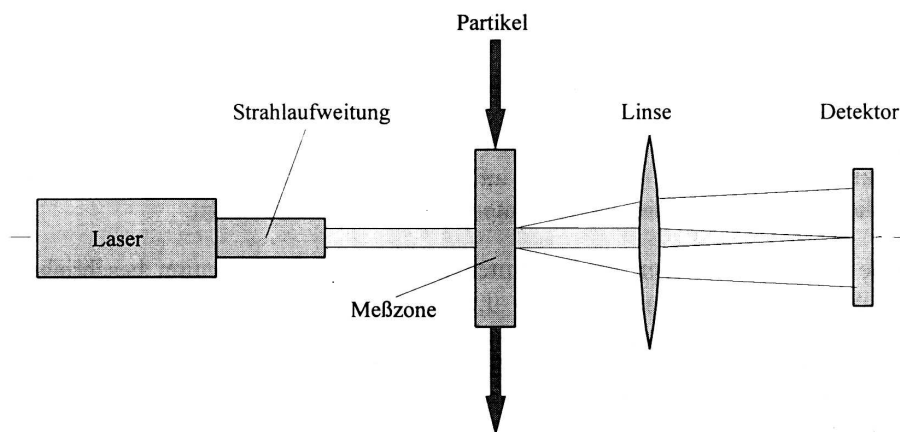
#### 4.3.3 Laserbeugungsmeßgerät (HELOS der Firma Sympa TEC)

Das Laserbeugespektrometer benutzt ein optisches Partikelgrößen-Meßverfahren, bei dem die beobachtbaren Effekte benutzt werden, wenn Licht auf die Grenzfläche zweier optisch unterschiedlicher Medien trifft.

Mit dieser Methode können in wenigen Minuten gut reproduzierbare Partikelgrößenverteilungen ermittelt werden.

Der Nachteil dieses Meßgeräts ist, daß die Auswertung nur auf der Kugelform der Partikel basiert. Deshalb muß ein Formfaktor als zweite Kontrollgröße hinzugefügt werden.

Das Prinzip, mit dem dieses Gerät arbeitet, ist in Abb. 4.7 dargestellt.



**Abb. 4.7:** Prinzipschema des Laserbeugungsspektrometers

Das Laserbeugungsspektrometer ist ein Meßgerät zur Erfassung von Partikelgrößenverteilungen (PGV) in Suspensionen, feststoffbeladenen Gasen und Sprays durch Laserbeugung (LB). Mit LB können verschiedene disperse Stoffe vermessen werden, deren optische Eigenschaften sich vom Umgebungsmedium unterscheiden, unabhängig davon, ob es sich um Tröpfchen oder Feststoff in Gas oder Flüssigkeit handelt.

Das HELOS-Laserbeugungsspektrometer besteht aus einer Laserlichtquelle mit Strahlformung, einer Meßzone in der die zu vermessenden Partikel mit dem Laserlicht wechselwirken, einem Abbildungsoptikum, welche die Winkelverteilung des gebeugten Laserlichtes in eine Ortsverteilung auf einem Photodetektor umwandelt, die schließlich in der Auswerteeinheit, einem PC, mittels der Auswertesoftware in die gewünschte Partikelgrößenverteilung umgerechnet wird.

Die Anwendung von Dispergiergeräten ist nur dann erforderlich, wenn die spezifischen Bedingungen es erfordern. In Abhängigkeit vom Medium unterscheidet man folgende Geräte:

- für Gase(Aerodispersionen) :Rodos, Gradis
- für Flüssigkeiten (Suspensionen): Succell;Cuvette.

## GRADIS

Der Schwerkrafttrockendispergierer GRADIS wurde speziell zur Dispergierung von gut rieselfähigen, größeren Produkten entwickelt, die einen geringen Feinanteil haben.

Der Anwendungsbereich ist von 200  $\mu\text{m}$  ÷ 3500  $\mu\text{m}$ .

Die Dosierung erfolgt aus einem Vorratsbehälter mit einem geeigneten Schwingrinnendosierer in den Fallschacht des GRADIS.

Die Dispergierung in die Einzelpartikel beginnt mit der Beschleunigung im Fallschacht. Der Energieeintrag in das System erfolgt durch die Erdbeschleunigung.

Die Dispergierung erfolgt durch Partikel – Partikel - und Partikel – Wand - Stöße in der Kaskade des Gradis. Nachdem der dispergierte Partikelstrahl den Meßstrahl des Laserbeugungsspektrometers HELOS passiert hat, wird er von der Absaugung erfaßt und abgesaugt.

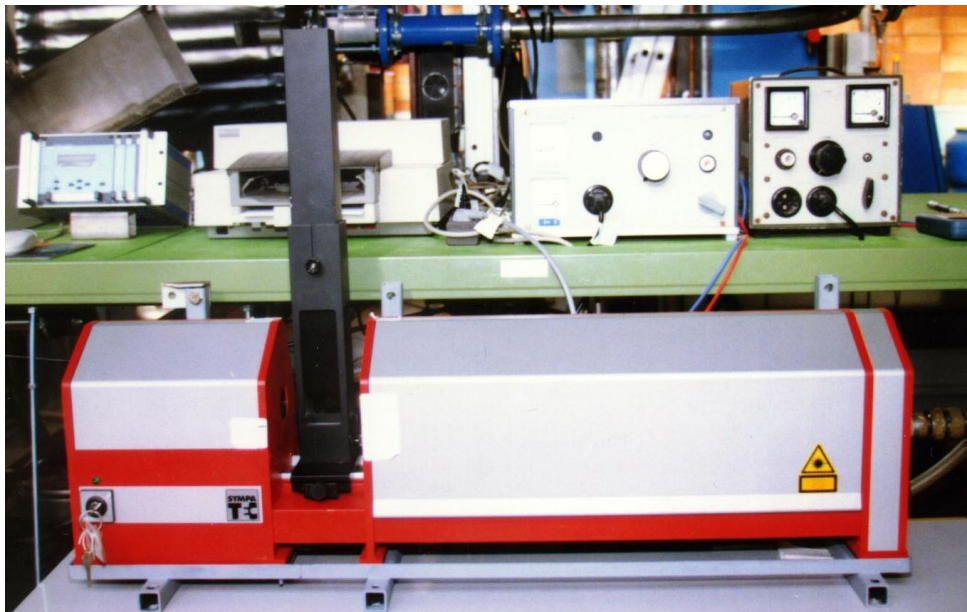


Abb. 4.8: Dispergiergerät Gradis

## RODOS

Das Dosier– Dispergier- System RODOS wird als Aerosolgenerator in Kombination mit Meßgeräten zur trockenen Partikelgrößenanalyse eingesetzt, z.B als Zusatzgerät

zum Laserbeugungsspektrometer HELOS. Als Vorteil gegenüber der herkömmlichen Suspensionsanalyse kann die größere Probenmenge pro Analyse hervorgehoben werden, durch die zeitintensive Probenteilung vermieden wird.

Die Dosierung erfolgt aus einem Vorratsbehälter mit einer geeigneten Schwingrinne und einem rotierenden Teller, dessen Drehzahl regulierbar ist. Die Dispergierung in die Einzelpartikel beginnt mit der Aufnahme des Materials mit der Absaugereinheit.

Der RODOS ist nicht für toxische Materialien zu empfehlen, denn bei ihm haben die Partikel direkten Kontakt zur umgebenden Luft. Es wurde speziell zur Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen an trockenen Pulvern entwickelt.



**Abb.4.9:** Dispergiergerät Rodos

#### **4.3.4 Bildanalysessystem (Carl Zeiss Jena Mikroskop)**

##### **Allgemeines**

Die Stereokörper SV 6 und SV 11 sind Teleskop-Typen. Sie haben ein Hauptobjektiv und sind für plane Proben besonders gut geeignet. Die beiden Teilstrahlengänge verlaufen in ihnen parallel. Das Objektiv führt beide Strahlengänge in der Objektebene zusammen.

Zusatzgeräte (z.B. Zeichenapparat, koaxiale Auflichtbeleuchtung oder ein Zwischentubus) können daher problemlos angesetzt werden.

## **Objektive**

Es werden verschiedene Objektive angeboten, die leicht gegeneinander ausgetauscht werden können. Die Objektive unterscheiden sich durch ihre Brennweite und ihre Vergrößerung, bzw. ihren freien Arbeitsabstand und die Detailauflösung. Die beiden Parameter sind gegenläufig.

## **Objektivzwischenplatte**

Sie nutzt für die Abbildung das Zentrum des Objektivs. Damit wird senkrechte monokulare Beobachtung und optimale Abbildungsqualität erreicht.

Die Objektivzwischenplatte wird zwischen Objektiv und Stereokörper eingefügt.

## **Richtungsweisendes Design**

AnalySIS ist die führende Software für die Bildaufnahme, -archivierung, -verarbeitung und -analyse. Es bietet Schnittstellen für fast alle Mikroskope und Kameratypen und ist für biomedizinische, materialwissenschaftliche, aber auch allgemeine Anwendung der Bildverarbeitung entwickelt. Mit seiner hohen Flexibilität setzt analySIS Maßstäbe und Standards auf dem Gebiet der digitalen Bildanalyse.

## **Bildaufnahme**

Die intelligente und benutzerfreundliche Auswahl der verschiedenen Bildaufnahmefunktionen gehört zu den starken Seiten von analySIS. Neben dem Konzept der logischen Eingangskanäle für verschiedene Kameras oder wechselnde Kamera-/ Mikroskopeinstellungen, ist analySIS für die Bildaufnahme von beinahe jeder Quelle entwickelt und für die Integration aller Mikroskoptypen geschaffen.



#### **4.4 Entnahme der Analysenprobe aus der Grundgesamtheit und Dispergieren**

##### *Probenahme:*

Bei einer Zufallmischung der Grundgesamtheit oder einer Probenteilung sind Probenfehler unvermeidlich. Der Grund dazu liegt in der begrenzten Zahl der Teilchen in der Probe. Zusätzliche Probenfehler treten auf, wenn die Proben aus einer nicht zufällig gemischten Grundgesamtheit entnommen werden.

Zur Probennahme aus großen Gutmengen sind Verfahren entwickelt worden, die den jeweiligen Stoffarten und dem Zustand der Stoffe (Suspension, Aerosol oder Schüttgut) angepaßt sind.

Die zu vermessende Probe soll repräsentativ sein. Es ist besser von einer zu untersuchenden Gesamteinheit möglichst viele, statistisch gleichwertige, örtlich verteilte Teilproben zu nehmen.

##### *Probenteilung:*

Bei der Probenteilung wird die gesamte Laborprobe in möglichst viele Teilproben unterteilt.

Bei Schüttgütern ist allein die Probenteilung zu empfehlen, da selbst in Mischern oft keine gleichmäßige Zufallmischung von Schüttgütern erreicht wird.

Ein Probenteilungsverfahren ist um so besser, je größer die Zahl der Teilproben ist, in die die Laborprobe zerlegt wird.

##### *Probenvorbereitung:*

Es ist besser für die Messungen frisch probegeteiltes Material zu verwenden.

Die Probenvorbereitung umfaßt die Meßbereichanpassung und die Mengenanpassung. Bei der Meßbereichanpassung sollen sich alle zugeführten Partikel der Probe unterhalb der Obergrenze des gewählten Meßbereiches befinden.

*Dosierung:*

Eine Dosierung der Probe ist notwendig, um die Konzentration des untersuchten Materials an die Meßerfordernisse des LBS anzupassen. Der Massenstrom der Probe muß während der Versuchsdurchführung konstant gehalten werden.

*Dispergieren:*

Bei der Teilchengrößenanalyse kann die Aufgabe gestellt sein, die Größenverteilung in einem bestimmten Agglomerationszustand oder die Größenverteilung der Einzelteilchen zu messen.

Soll die Größenverteilung der Einzelteilchen bestimmt werden, so muß für eine praktisch vollständige Dispergierung während des gesamten Meßvorgangs gesorgt werden [15].

Da die Agglomeration zusätzlich nicht nur von der Korngrößenverteilung und der Feststoffkonzentration, sondern auch teilweise sehr empfindlich von geringen Verunreinigungen des Feststoffs oder der Suspensionsflüssigkeit abhängt, sollte grundsätzlich vor jeder Teilchengrößenanalyse eine experimentelle Prüfung auf vollständige Dispergierung erfolgen. Für viele Arten von Feststoffen liegen Erfahrungen über geeignete Suspensionsflüssigkeiten und Dispergiermittel vor. Eine umfangreiche Tabelle ist in der DIN 66111 angegeben. Hinweise auf Agglomeration oder Dispergierung können durch eine mikroskopische Prüfung oder eine photometrische Prüfung gewonnen werden [15].

**• Einflußgrößen auf die Agglomeration**

Für Agglomeration oder Dispergierung sind der Verlauf der gesamten Wechselwirkungsenergie zwischen je zwei Teilchen als Funktion ihres Abstandes und die kinetische Energie des Systems maßgeblich. Bei feuchten Feststoffen spielt der Kapillareffekt eine entscheidende Rolle. In diesen Fällen muß der Feststoff grundsätzlich zuvor getrocknet werden. Zur Vermeidung der Ausbildung von Festkörperbrücken sollen die Teilchen während der Trocknung gegeneinander bewegt werden. Die kinetische Energie besteht aus der thermischen Energie und auch aus mechanischer Energie, die dem System durch Rühren, Schütteln oder

Beschallung zugeführt werden kann. Elektrostatische, van - der Waals- und kinetische Energie bestimmen die Haftwahrscheinlichkeit beim Stoß und die Trennwahrscheinlichkeit von Agglomeraten. Die Stoßwahrscheinlichkeit wird von der Teilchenkonzentration und von den Transportmechanismen bestimmt. Höhere Feststoffkonzentration und intensiverer Transport führen zu einer stärkeren und schnelleren Agglomeration.

- **Van- der- Waals- Anziehung**

Van – der – Waals – Kräfte bewirken eine Anziehung zwischen allen Stoffen und fallen steil mit wachsendem Abstand zwischen den wechselwirkenden Teilchen ab. Daher kann ihre Wirkung durch eine Vergrößerung des Mindestabstandes stark verringert werden. Bei in Gas dispergierten Feststoffen wird die Vergrößerung des Mindestabstandes durch die Zugabe von äußerst feinen Feststoffteilchen erreicht, die sich auf der Feststoffoberfläche anlagern. In Suspensionen wird die Vergrößerung des Mindestabstandes durch grenzflächenaktive Stoffe bewirkt, die in der Suspensionsflüssigkeit gelöst und an der Grenzfläche fest/flüssig adsorbiert werden. Die resultierende Anziehung von Feststoffen in Flüssigkeiten ist geringer, je besser die Hamaker- van- der- Waals- Konstanten von Feststoff und Flüssigkeit miteinander übereinstimmen. Während die van- der- Waals- Wechselwirkung der Feststoffteilchen mit einer umgebenden Gasphase vernachlässigbar klein ist im Vergleich zur Wechselwirkung zwischen den Feststoffteilchen untereinander, bestehen zwischen suspendierten Feststoffteilchen und der sie umgebenden Flüssigkeit ebenfalls erhebliche Anziehungskräfte.

- **Elektrostatische Wechselwirkung**

Bei trockenen Feststoffen auch aus einheitlichem Material können Inhomogenitäten der Ladungsverteilung zu elektrostatischen Anziehungskräften führen. Sie sind in der Regel bei Berührung geringer als die van - der - Waals - Kräfte, haben aber eine größere Reichweite. Die Adsorption von Teilchen, die, wie z.B. Aerosil, elektrostatische Ladungen tragen, kann zu einem Ladungsausgleich oder einer gleichsinnigen Aufladung der Oberfläche und damit zu einer Abstoßung führen.

## 5 Versuchsgüter

### 5.1 Natriumpercarbonat

Natriumpercarbonat ist ein industrielles Granulat (NPC). Deshalb ist die Untersuchung des Abriebs für die praktische Anwendung dieses Materials von großer Bedeutung. Die Formel von Natriumpercarbonat ist  $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$ . Die Molarmasse ist 157 g/mol. NPC ist Weißsalz mit einer orthorombischen Zelle [53]. Das Handelsprodukt besteht aus groben, kompakten Körnern, die eine regelmäßige sphärische Kristallform haben. Die Schüttdichte kann von 800 bis 1200 g/l reichen, abhängig von den Synthese-zuständen. Die Löslichkeit in 100 cm<sup>3</sup> Wasser ist 13,1 g bei 10 °C, 15,4 g bei 20 °C und 18,0 g bei 30 °C.

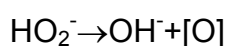
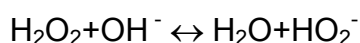
Die Löslichkeit wird verringert, wenn andere Salze wie  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  und  $\text{NaCl}$  anwesend sind. Der aktive Sauerstoffinhalt des technischen Natriumcarbonat-peroxohydrat schwankt zwischen 13,4 Mass.-% und 14,5 Mass.-% (theoretisch: 15,28 Mass.-%).

Wenn es unter kühlen, trockenen Bedingungen aufbewahrt wird, ist die Kinetik des Verlustes des aktiven Sauerstoffes kleiner als 0,3 % pro Monat. Auch bei Anwesenheit von Stabilisatoren hat Natriumpercarbonat viel schlechtere Aufbewahreigenschaften als Natriumperoxoborate, besonders in der feuchten Atmosphäre. Ohne stabilisierende Zusätze verliert NPC 82-86 % des aktiven Sauerstoffes innerhalb von 10 Tagen bei einer relativen Feuchtigkeit von 96 % und 30 °C. Eine wässrige Lösung von Natriumpercarbonat verhält sich wie eine alkalische Lösung des Wasserstoffperoxids.

Der pH-Wert von einer Lösung mit 1 Mass.-% beträgt 10,5.

$2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$  wird als Bleichmittel verwendet. NPC zerstört den Schmutz vor allem durch Oxidation. Die Bleichwirkung bei der Sauerstoffbleiche geht von atomarem Sauerstoff (aktiver Sauerstoff) aus, der wesentlich reaktionsfreudiger ist als molekularer Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ).

Die Bleichwirkung von Percarbonat beruht auf der Bildung von Wasserstoffperoxid. Dies geschieht aber erst bei Temperaturen ab 60 °C. Das abgespaltene  $\text{H}_2\text{O}_2$  reagiert unter Freisetzung von „aktivem“ Sauerstoff



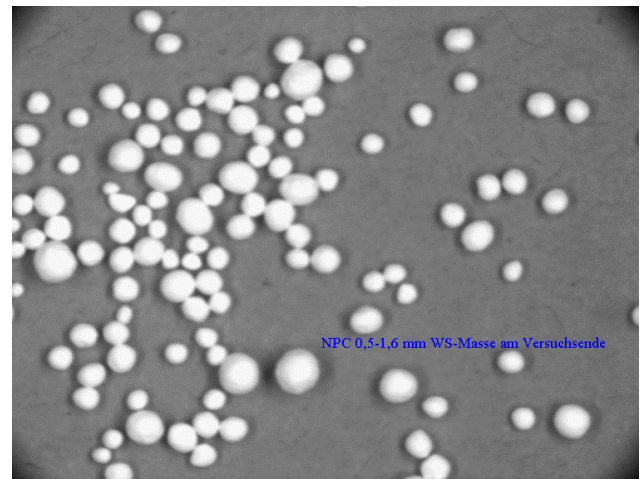
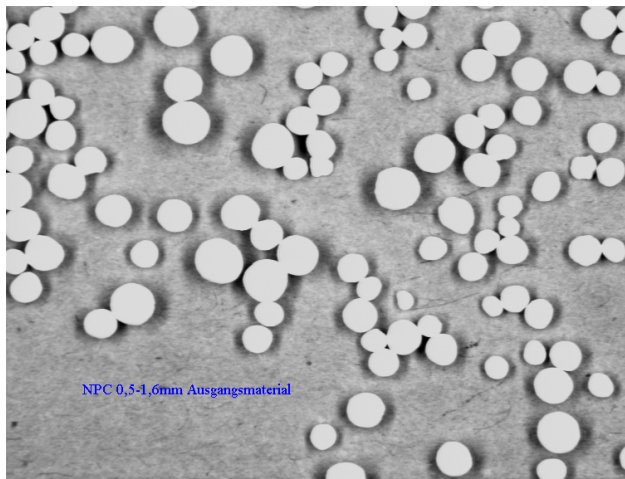
Die Stoffwerte von NPC sind folgende:

**Tabelle 5.1:** Stoffwerte von NPC

Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1620
Porosität	[%]	24
Reindichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2132
Formfaktor	[-]	0,96
Partikelgröße	[mm]	0,5-1,6
Sauterdurchmesser	[mm]	1,3

Der Sauterdurchmesser beträgt 1,3 mm.

Die Aufnahmen zum Natriumpercarbonat vor der Beanspruchung in einer Wirbelschicht und danach sind auf folgenden Abbildungen dargestellt.



**Abb. 5.1:** NPC vor der Belastung

NPC nach der Belastung

## 5.2 Umhüllte Senfkörner

Es wurde zunächst ein definiertes Produkt hergestellt, um das grundsätzliche Verhalten eines Produktes in einer Wirbelschicht zu untersuchen. Es wurden durch Aufdüsung von Kalkmilch auf Senfkörner annähernd kugelförmige Teilchen hergestellt. Diese Teilchen bestehen also aus einem Kern (Senfkorn) und einem Mantel (Kalk). Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) existiert in zwei verschiedenen Modifikationen, die sich in ihrer Kristallform unterscheiden: hexagonal als Calcit oder Kalkspat und rhombisch als Aragonit. In der Natur kommt es als Kalkstein, Marmor und Kreide vor, die aus feinen Calcitkristallen bestehen [54, 55, 56]. Kalkstein ist ein Calciumcarbonat, das stark verunreinigt ist. Es enthält als Beimengung vor allem

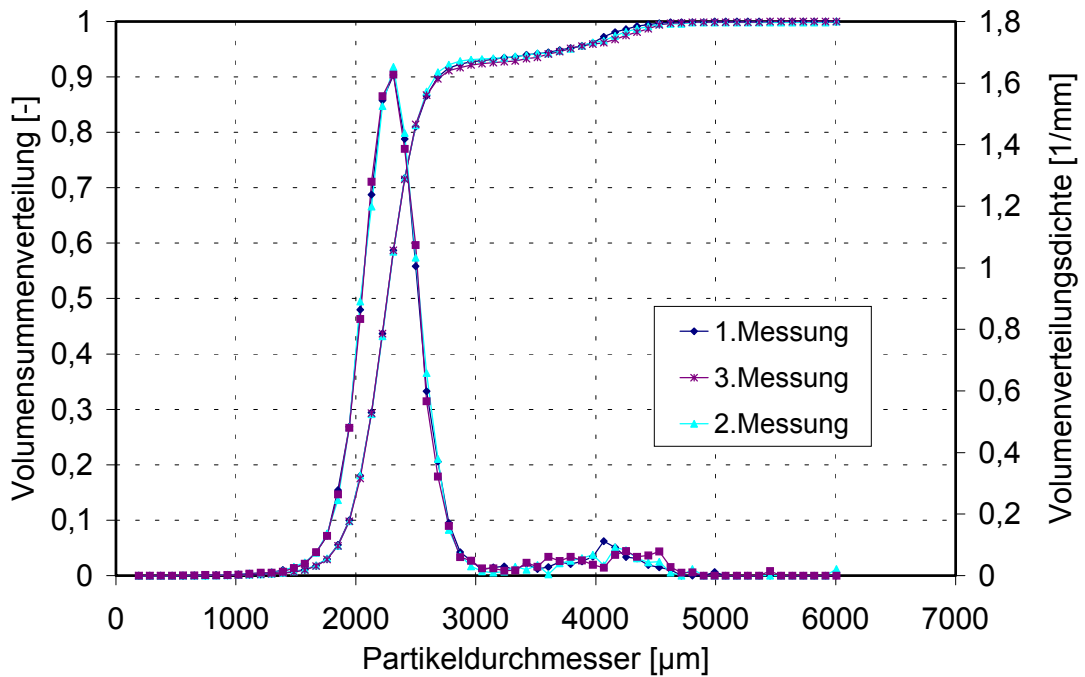
Ton. Bei höheren Tongehalten bezeichnet man es als Mergel. Die Mergel stehen zwischen dem Kalkstein und dem Ton: bei höherem Kalkgehalt bezeichnet man sie als Kalkmergel (75 bis 90 %  $\text{CaCO}_3$ ), bei niedrigem Kalkgehalt als Tonmergel (10 bis 40 %  $\text{CaCO}_3$ ). Kalke, Tone und Mergel sind wichtige Grundstoffe in der Baustoffindustrie. Marmor ist sehr reines, feinkristallines Calciumcarbonat. Kreide stellt eine weiche, erdige Masse dar, die vorwiegend aus den Schalenresten mikroskopisch kleiner Schnecken und Muscheln (Muschelkalk) besteht. Calciumcarbonat ist in Wasser schwer löslich (100 g  $\text{H}_2\text{O}$  lösen bei 25 °C etwa 1,4 mg  $\text{CaCO}_3$ ) und fällt deshalb aus Lösungen von Calciumsalzen bei Zugabe löslicher Carbonate als weißer Niederschlag aus. Folgende Werte bilden die Grundlage für das Ausgangsprodukt:

1. Senfkörner
2. Kalkmilchsuspension, die auf Senfkörner aufgedüst wird.

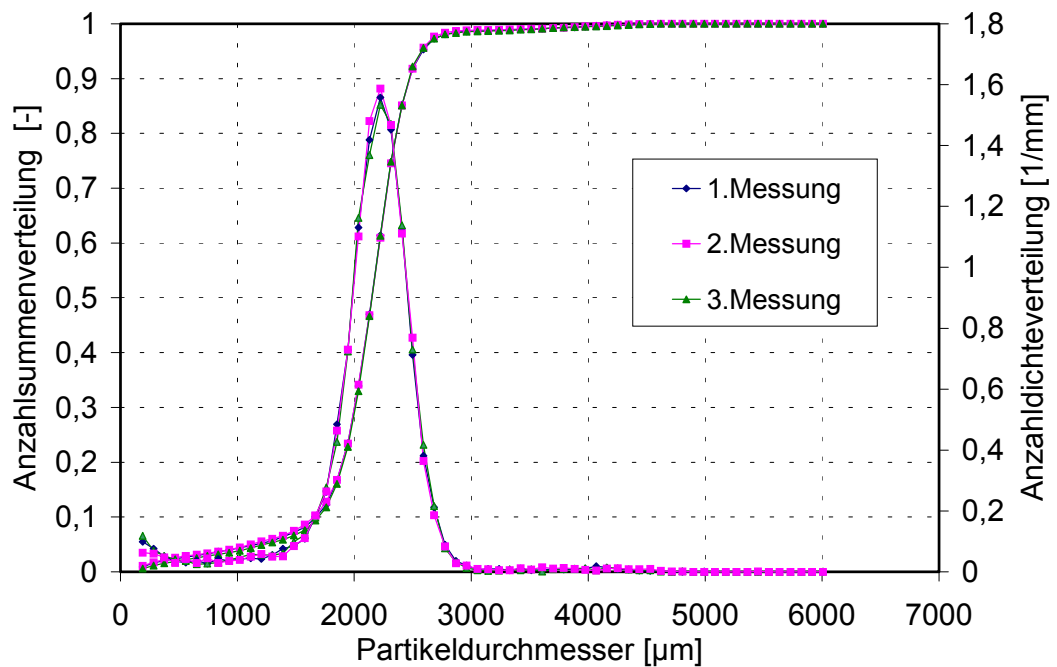
### **Senfkörner:**

Senf ist der Samen verschiedener in Europa und Nordamerika heimischer Brassica- und Sinapis- Arten [57, 58, 59]. Man unterscheidet vor allem zwischen dem weißen Senf (*Sinapis alba*) und dem von verschiedenen Brassicaarten hervorgebrachten schwarzen und braunen Senf. Die Samen enthalten neben viel Eiweiß und Fett vor allem zwei Senfölglykoside: Sinigrin und Sinalbin. Das Senfkorn enthält ca. 30 % Senföl, sowie 28 % Protein. Die Senfkörner haben eine glatte Oberfläche. Die Samen aller drei Arten sind relativ groß und kugelförmig. Senfsamen sind fast geruchlos, aber beim Kochen gewinnen sie ein scharfes Aroma, das an gebrannten Ton erinnert. Senfkörner müssen in einem trockenen Gefäß aufbewahrt werden. Wenn sie feucht werden, sind sie schlecht zu verwenden.

Das Kornbandspektrum der verwendeten Senfkörner wurde mit einem lichtoptischen Gerät (EKGM der Fa. Schwartz) gemessen und ist in Abb. 5.2 als  $Q_3$  und  $q_3$ -Verteilungsdiagramm dargestellt. In Abb. 5.3 ist es als  $Q_0$  und  $q_0$ -Verteilungsdiagramm dargestellt. Die scheinbare Dichte der Senfkörner betrug  $1180 \text{ kg/m}^3$ .



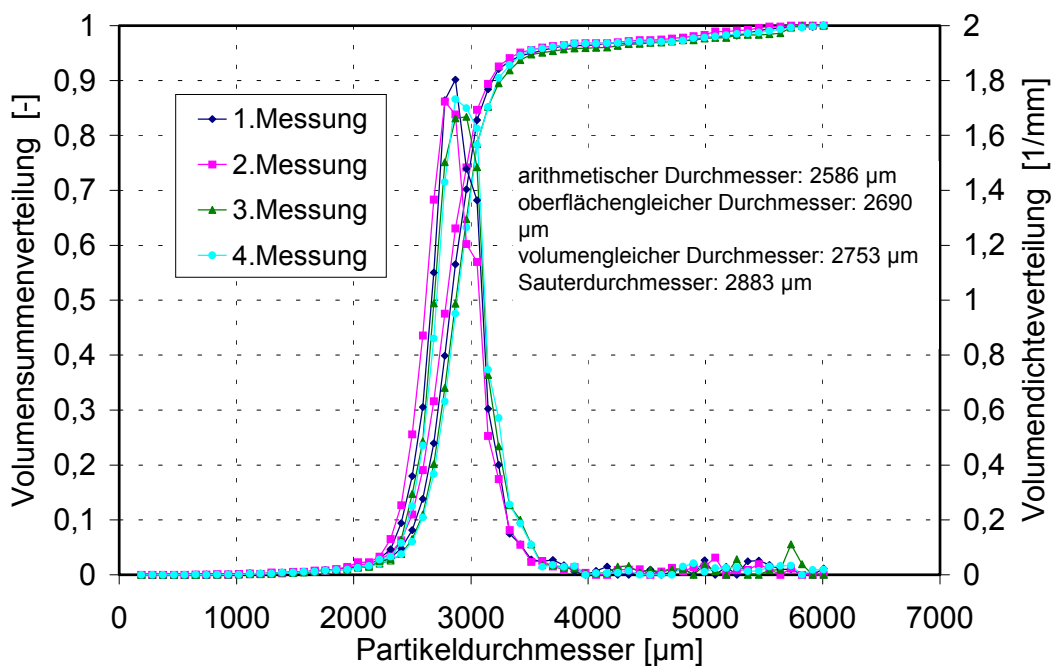
**Abb. 5.2:** Kornbandspektrum der als Ausgangsmaterial verwendeten Senfkörner ( $Q_3, q_3$ -Verteilungen)



**Abb. 5.3:**  $Q_0, q_0$ -Verteilungen der Senfkörner

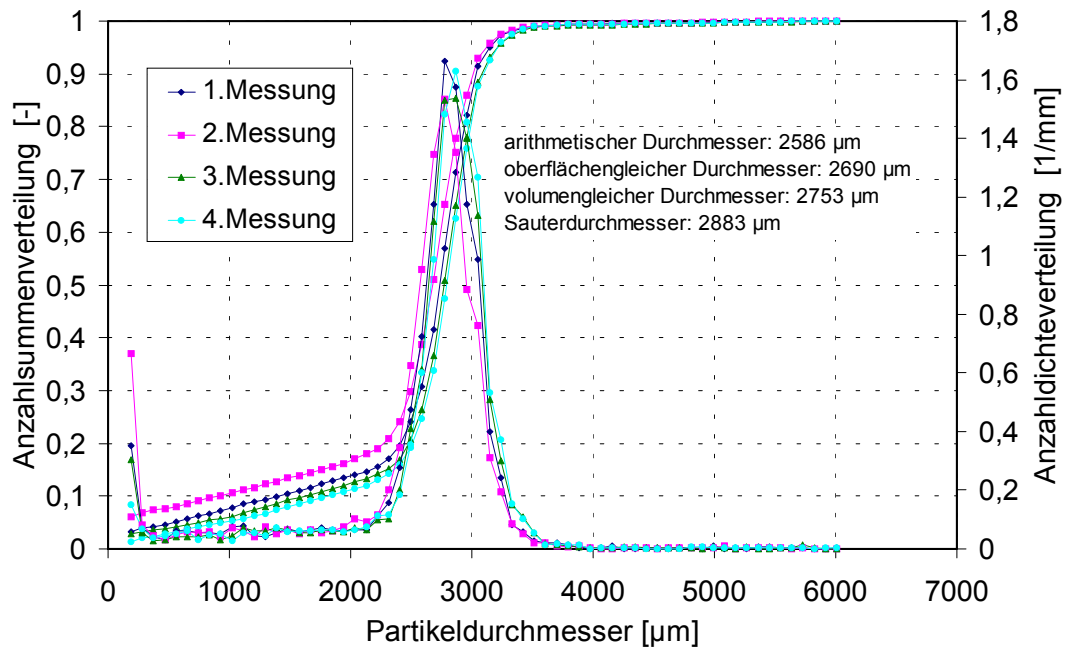
### Durch Wirbelschichtcoating hergestelltes annähernd kugelförmiges Produkt:

Das Kornbandspektrum des Ausgangsproduktes für die Abriebversuche wurde ebenfalls mit einem lichtoptischen Gerät (EKGM der Fa. Schwartz) gemessen und ist in Abb. 5.4 als  $Q_3, q_3$ - Verteilungsdiagramm und in Abb. 5.5 als  $Q_0, q_0$ - Verteilungsdiagramm dargestellt. Die scheinbare Dichte dieses Produktes betrug  $1450 \text{ kg/m}^3$ . Um das Kornbandspektrum des Versuchsproduktes möglichst eng zu halten, wurde das Ausgangsmaterial im Bereich von 2,8 mm bis 3,15 mm abgesiebt.



**Abb. 5.4:** Kornbandspektrum des Produktes nach 0 Stunden Belastung (Einsatzmaterial,  $Q_3, q_3$ - Verteilungen)





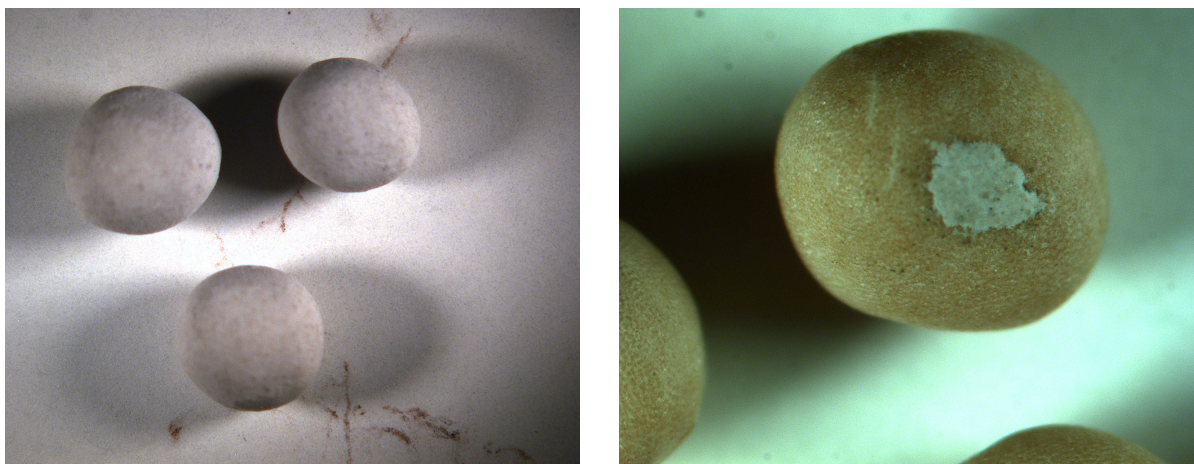
**Abb. 5.5:** Kornbandspektrum des Produktes nach 0 Stunden Belastung  
 $Q_0$ ,  $q_0$  - Verteilungen

Aus dem Kornbandspektrum des Produktes ergeben sich folgende charakteristische Parameter:

Mittlerer arithmetischer Durchmesser: 2586 µm

Sauterdurchmesser: 2883 µm

Abbildung 5.6 zeigt ein Foto der Senfkörner und des daraus hergestellten Granulates.



**Abb. 5.6:** Mikroskopaufnahmen des Produktes

## 6 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

### 6.1 Versuchsstrategie zur Ermittlung des Einflusses der Gasgeschwindigkeit

#### 6.1.1 Ermittlung des Existenzbereiches der Wirbelschicht

Der Existenzbereich der Wirbelschicht ist von der Wirbelgeschwindigkeit und von der Austragsgeschwindigkeit begrenzt. Für das verwendete Natriumpercarbonat betragen sie  $W_w = 0,46$  m/s und  $W_A = 6,28$  m/s. Für das selbst hergestellte Granulat sind sie  $W_w = 0,89$  m/s und  $W_A = 9,2$  m/s. Die Geschwindigkeiten wurden mit folgenden Beziehungen bestimmt:

$$\text{Re}_w = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} \quad (6.1)$$

$$W_w = \frac{\text{Re}_w \cdot v_{gas}}{d_p} \quad (6.2)$$

$$\text{Re}_A = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}} \quad (6.3)$$

$$W_A = \frac{\text{Re}_A \cdot v_{gas}}{d_p} \quad (6.4)$$

Die o. g. Berechnungen sind für NPC mit dem Sauterdurchmesser  $d_p = 1,3$  mm durchgeführt worden. Es wurde angenommen, daß die Schicht monodispers ist.

$\rho_{gas} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{fest(NPC)} = 1619,7 \text{ kg/m}^3$ ;  $v = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\rho_{fest(Kalk-Gran)} = 1450 \text{ kg/m}^3$   
Für das selbst hergestellte Granulat beträgt der Sauterdurchmesser  $d_p = 2,9$  mm.

Die Archimedes-Zahl lautet für beide Fälle:

$$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 (\rho_{fest} - \rho_{gas})}{v_{gas}^2 \cdot \rho_{gas}} \quad (6.5)$$

Das Lückenvolumen der Schicht wird mit folgender Formel berechnet:

$$\varepsilon = \left( \frac{18 \cdot \text{Re} + 0,36 \text{Re}^2}{Ar} \right)^{0,21} \quad (6.6)$$

$$\text{Re} = \frac{W_{\text{Arb.}} \cdot d_P}{v_{\text{gas}}} \quad (6.7)$$

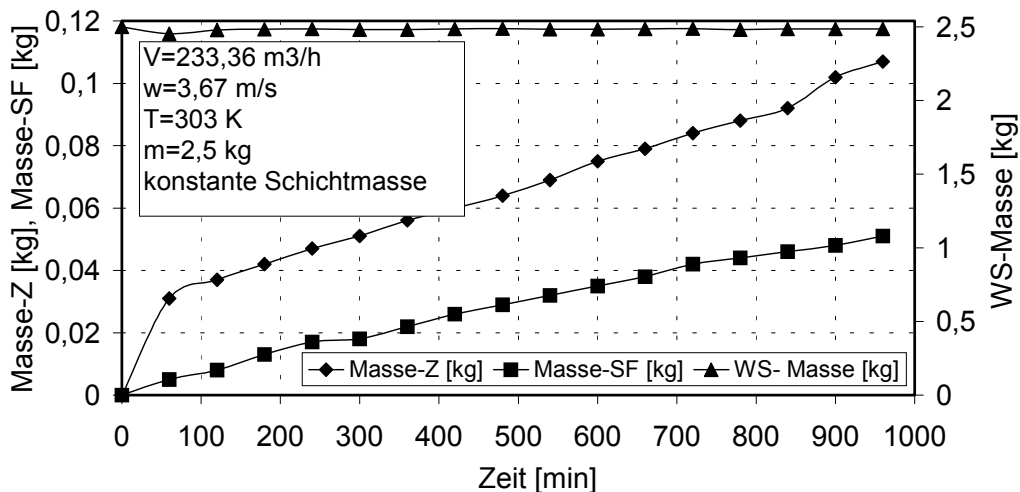
### 6.1.2 Auswahl von verschiedenen Geschwindigkeiten im berechneten Existenzbereich

Die Arbeitsgeschwindigkeiten wurden so gewählt (3,67 m/s), daß sich eine Wirbelschicht mit Lückenvolumen  $\varepsilon = 0,79$  ausbildet. Die zweite Geschwindigkeit (2,0 m/s) liegt näher zu der Wirbelgeschwindigkeit und die dritte (5,5 m/s) näher zu der Austragsgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit 5,5 m/s war jedoch zu hoch, es wurden auch größere Partikel aus der Schicht ausgetragen. Mit dieser Geschwindigkeit kann man einen Versuch bei der zirkulierenden Fahrweise fahren.

Die Schichtmasse beträgt 2,5 kg.

Später wurden weitere Versuche bei anderen Gasgeschwindigkeiten und Schichtmassen durchgeführt.

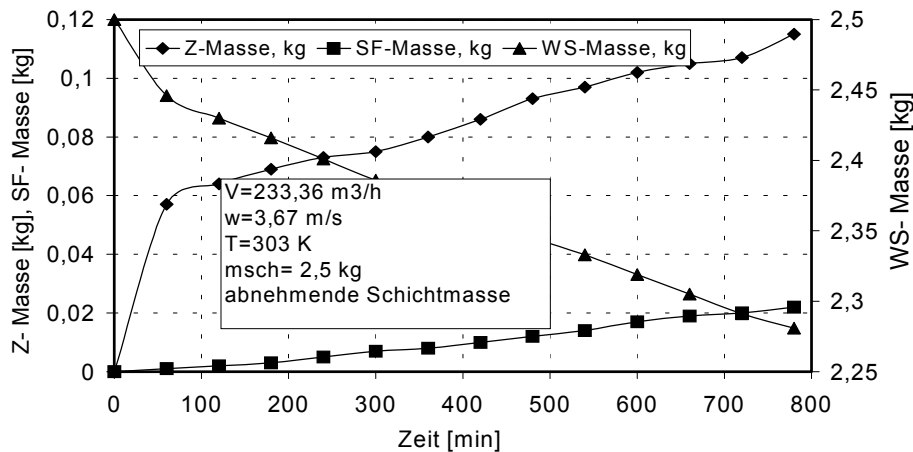
Alle Versuche wurden mit konstanter Schichtmasse durchgeführt. Das bedeutet, daß die ausgetragene Menge durch Frischmaterial ersetzt wurde (quasistationäre Fahrweise). Abb. 6.1 zeigt, daß im Laufe der Zeit die Schichtmasse konstant bleibt.



**Abb. 6.1:** Massenänderung von Natriumpercarbonat in der Wirbelschicht in Abhängigkeit von der Zeit

Z- Zyklonprodukt, SF- Staubfilterprodukt, WS- Wirbelschichtmasse

Es wurde noch parallel dazu ein Versuch mit einer abnehmenden Schichtmasse durchgeführt. Die Anfangsschichtmasse betrug 2,5 kg und die Gasgeschwindigkeit 3,67 m/s. Auf diese Art und Weise konnte man den Versuch mit dem bei quasistationärer Fahrweise bei den selben Bedingungen vergleichen. Der Unterschied zu den anderen Versuchen besteht darin, daß die Schichtmasse infolge des Feststoffaustrags abnimmt. Abb. 6.2 verdeutlicht das.



**Abb. 6.2** Massenänderung von Natriumpercarbonat in der Wirbelschicht in Abhängigkeit von der Zeit bei abnehmender Schichtmasse

### 6.1.3 Beschreibung und Auswertung der Versuche

Am Anfang ist das getestete Material (Natriumpercarbonat) im Bereich 0,5 mm -1,6 mm zu sieben. Es ist der Einfluß der Arbeitsgeschwindigkeit zu untersuchen. Deshalb wurden die verschiedenen Gasgeschwindigkeiten gewählt, und die Versuche wurden bei quasistationärer Fahrweise durchgeführt. In gleichen Zeitintervallen sind die Proben aus dem Zyklon und Staubfilter entnommen und gewogen worden. Dann wurde die gleiche Masse Ausgangsmaterial der Schicht zugeführt.

Es ist ein Vergleichsversuch mit abnehmender Schichtmasse gefahren worden.

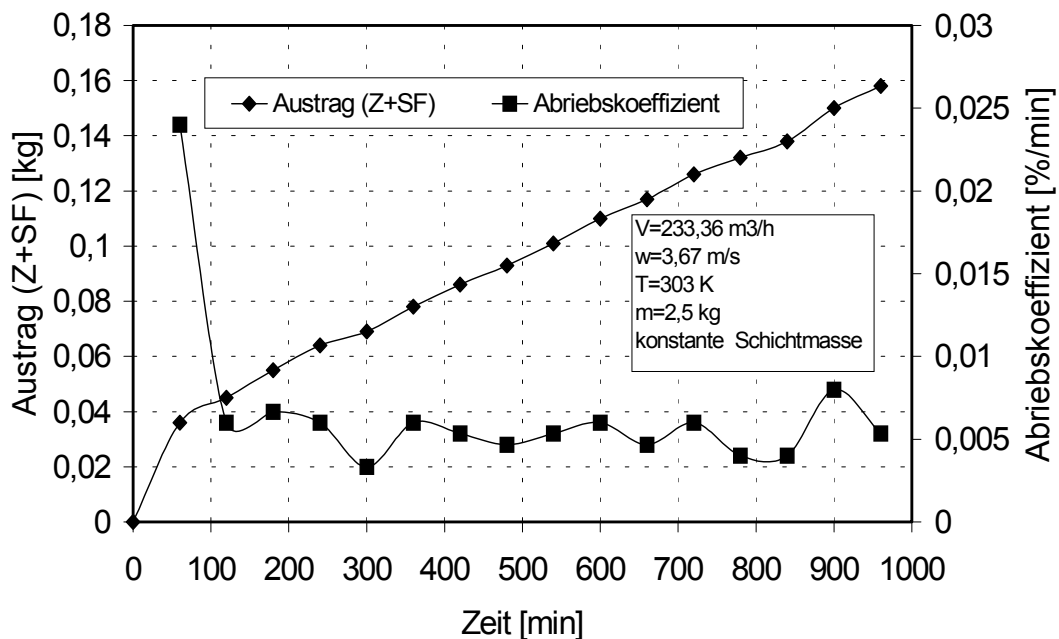
Vor jedem Versuch wurde die Anlage bei der ausgewählten Luftgeschwindigkeit leer betrieben, um die Widerstände der Anlage zu bestimmen.

Die entnommenen Mengen wurden danach mit dem Probenteiler geteilt, um später ihre Partikelgrößenverteilung mit dem Laserbeugungsspektrometer zu ermitteln.

Kurz vor jeder Probeentnahme wurden der Zyklon, der Staubfilter und die Rohrleitung abgeklopft, um den Staub zu entfernen. Während des Versuches ist die

Staubfilterreinigung eingeschaltet. Das sorgt für eine bessere Staubentfernung. Nach dem Versuchsende wurde die Anlage bei maximaler Geschwindigkeit gereinigt. Die Form von den Natriumpercarbonatteilchen nähert sich der Kugelform. Das hat einen Einfluß auf den Abriebswiderstand. Partikel mit einer regelmäßigen Form, die wenig scharfe Ecken haben, weisen einen großen Abriebswiderstand auf. Das bedeutet, daß die glatten Oberflächen weniger abriebanfällig sind. Die regelmäßige sphärische Kristallform bestimmt die größere Festigkeit von Natriumpercarbonat im Vergleich zu anderen Materialien wie z.B. Kalkstein. Deswegen ist ein kleinerer Abriebskoeffizient zu erwarten.

Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt der Abriebskoeffizient ab, bis ein konstanter Wert des Abriebskoeffizienten erreicht wird. Von diesem Zeitpunkt wird nur der Abrieb ausgetragen, d.h. der Austrag wird sicher als Abrieb festgelegt. Am Anfang ist der Abrieb größer, da die Rauigkeiten und die Kanten der Teilchen abgerieben werden. Je kugelförmiger die Form wird, desto weniger Abrieb ist zu verzeichnen.



**Abb. 6.3:** Gesamte Austragsmasse und Abriebskoeffizient von Natriumpercarbonat

Mit dem Bildanalysegerät wurden der Formfaktor und der mittlere Durchmesser gemessen. Der Unterschied zwischen der Ausgangsprobe und dem Endprodukt ist klein. Das bedeutet, daß schon vor dem Versuch das Material fast Kugelform besitzt und daß es nicht so viele ausgeprägte Kanten hat. Der Formfaktor hat am Ende des

Versuches nur wenig zugenommen. Der Durchmesser hat abgenommen. Das ist auch ein Nachweis, daß die Partikel in der Wirbelschicht abgerieben werden. Der Vergleich ist in der Tabelle 6.1 dargestellt.

**Tabelle 6.1:** Formfaktor und Durchmesser von Natriumpercarbonat

Darstellung vom $d$ und Formfaktor der Ausgangsprobe			
	Anzahl der Partikel	Mittelwert des $d$ , $\mu\text{m}$	Mittelwert des Formfaktors
NPC 0,5-1,6mm			
1.Messung	71	1380,108	0,96144
2.Messung	71	1455,918	0,95387
3.Messung	50	1316,859	0,96448
Mittelwert	64	1384,295	0,95993
Darstellung vom Formfaktor und $d$ des Endprodukts als Abriebscharackteristik			
	Anzahl der Partikel	Mittelwert des $d$ , $\mu\text{m}$	Mittelwert des Formfaktors
NPC 0,5-1,6			
1.Messung	88	1361,523	0,96190286
2.Messung	66	1415,542	0,95804302
3.Messung	38	1368,343	0,96530194
4. Messung	111	1051,591	0,96402788
Mittelwert	75	1299,25	0,96231893

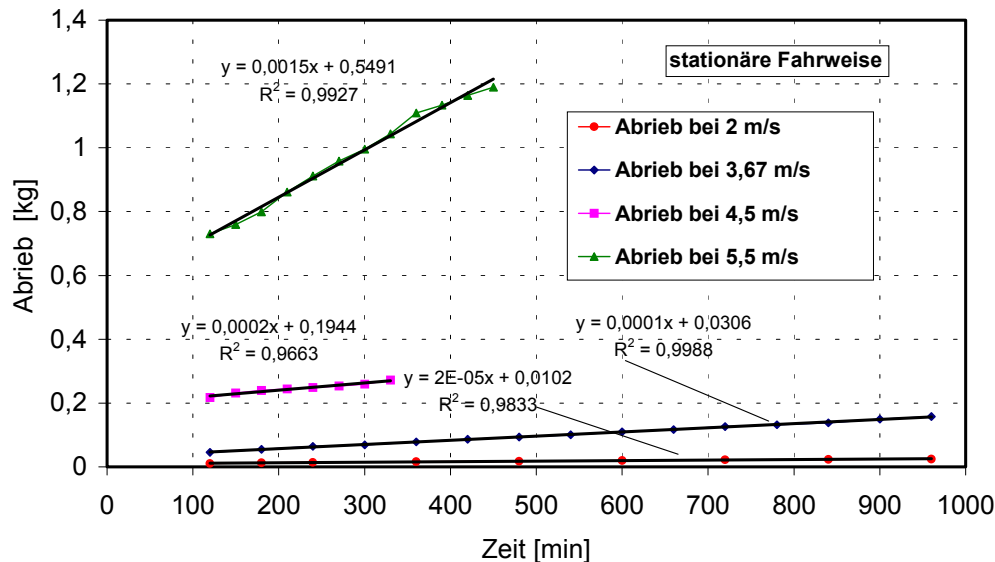
Mit steigender Arbeitsgeschwindigkeit nimmt der Austrag zu. Die Versuchsergebnisse sind in der Abb. 6.4 dargestellt, aufgetragen ist die ausgetragene Masse (vom Zyklon und vom Staubfilter) als Funktion der Zeit bei den unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten. Die einzelnen Meßpunkte werden mit einer Geraden aproxiert. Die Schwankungen sind auf Meßfehler zurückzuführen, die dadurch erklärbar sind, daß man den Blendendruckverlust nicht genau wegen der Pulsationen einstellen kann. Zum Beispiel wurde für die Wirbelgeschwindigkeit 3,67 m/s eine Gerade mit der Gleichung  $y = 0,0001x + 0,0306$  und ein Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,9988$  erhalten.  $y$  ist der Abrieb und  $x$  ist die Zeit. Aus der folgenden

Beziehung kann man den Abriebskoeffizienten bestimmen:

$$\text{Abriebskoeffizient} = \frac{\text{Abrieb} \cdot 100}{\text{Gesamte Schichtmasse} \cdot \text{Zeit}}$$

Dieser Koeffizient gilt für den

stationären Zustand, wenn sein Wert konstant ist.



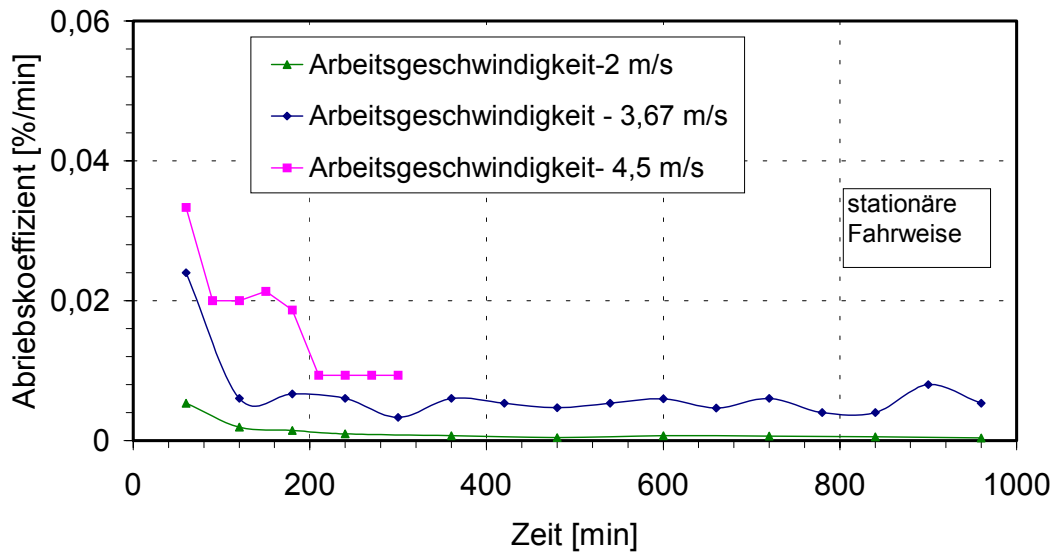
**Abb. 6.4:** Vergleich der Austragsmassen bei verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten (Natriumpercarbonat)

Je größer die Arbeitsgeschwindigkeit ist, desto größer ist der Abriebskoeffizient.

Ganz hoch liegt die Gerade bei der Gasgeschwindigkeit 5,5 m/s. Bei dieser Gasgeschwindigkeit kann man keinen Abriebskoeffizienten definieren, denn es sind aus der Schicht nicht nur Abrieb, sondern auch größere Teilchen ausgetragen worden. Deshalb ist es empfehlenswert eine stationäre Wirbelschicht mit niedrigeren Geschwindigkeiten zu fahren. Die hohen Gasgeschwindigkeiten sind von Bedeutung für eine zirkulierende Wirbelschicht. Damit diese Geschwindigkeit berücksichtigt wird, muß der Staub von den größeren Partikeln (größer als 200  $\mu\text{m}$ ) abgetrennt werden. Das Material läßt sich schlecht sieben und man kann die richtige Staubmenge nicht bestimmen. Deshalb wird diese Geschwindigkeit bei den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.

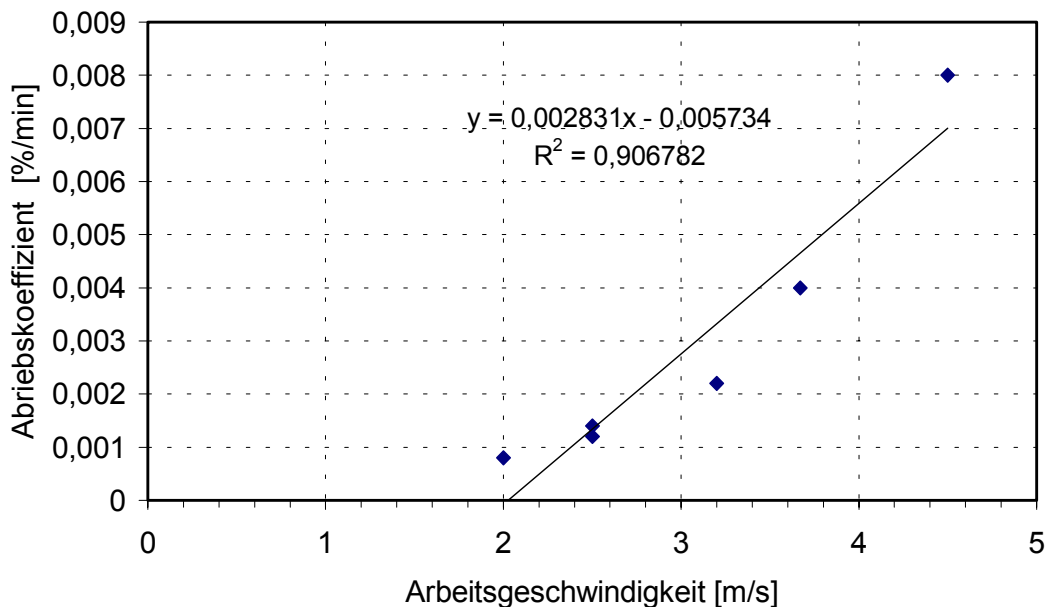
Die Abriebskoeffizienten für die anderen Arbeitsgeschwindigkeiten kann man ebenfalls berechnen.

Die Abriebskoeffizienten sind in der Abb. 6.5 gezeigt:



**Abb. 6.5:** Vergleich der Abriebskoeffizienten bei verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten (Natriumpercarbonat)

Die Abhängigkeit der Abriebskoeffizienten von der Arbeitsgeschwindigkeit bekommt man, wenn man die Abriebskoeffizienten von der linearen Beziehung des Austrags (siehe Abb.6.4) berechnet und sie als Funktion der Geschwindigkeit darstellt.



**Abb. 6.6:** Der Abriebskoeffizient als Funktion der Arbeitsgeschwindigkeit (Natriumpercarbonat)

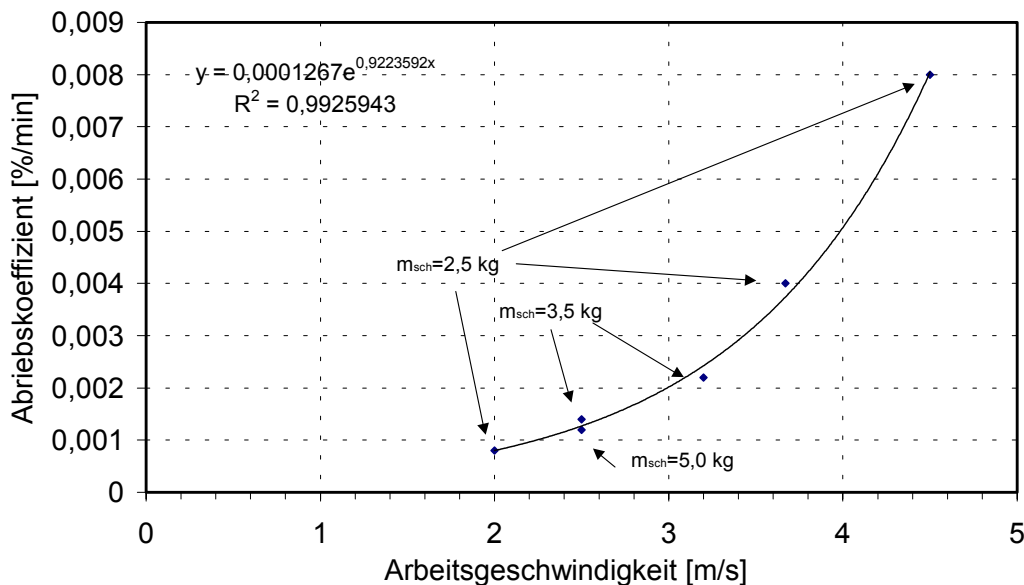


Bei  $u < u_{mf}$  kann kein Abrieb erzeugt werden. Deshalb muß die Gerade die  $x$ - Achse bei  $u = u_{mf}$  schneiden. Aus der Abb. 6.6 ist aber zu sehen, daß der Abriebskoeffizient proportional des Wertes  $(u - u_{min})$  ist und die Gerade einen Achsenabschnitt  $u_{min}$  hat.  $u_{min} = 2$  m/s. Es ergibt sich die folgende Beziehung:

$$r_{a,b} = k(u - u_{min}) \quad (6.8)$$

$$r_{a,b} = 0,002831(u - 2) \quad (6.9)$$

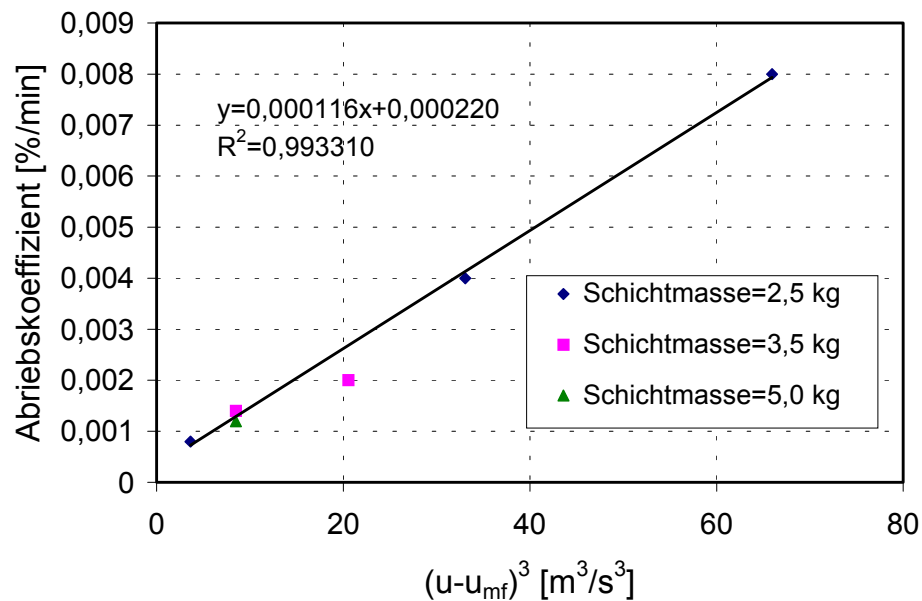
Den obigen Überlegungen liegt die Modellvorstellung von Werther [4] zugrunde. Das Ergebnis widerspricht aber dem Versuch mit der Geschwindigkeit 2 m/s, denn bei 2 m/s wurde Abrieb festgestellt. Die Meßwerte lassen sich sehr gut mit einer Exponentialfunktion beschreiben.



**Bild 6.7:** Der Abriebskoeffizient in Abhängigkeit von der Arbeitsgeschwindigkeit (Natriumpercarbonat)

Theoretisch ist denkbar, daß der Schnittpunkt mit der  $x$ - Achse die Minimalfluidisationsgeschwindigkeit ist. Das erste Erscheinen von Abrieb kann auch von der Festigkeit des Materials abhängen. Da Natriumpercarbonat eine gute Festigkeit aufweist, wird eine höhere Geschwindigkeit als die Minimalfluidisationsgeschwindigkeit den ersten Abrieb verursachen.

Eine bessere Darstellung bekommt man, wenn der Abriebskoeffizient als Funktion der Überschußgeschwindigkeit hoch drei  $(u - u_{mf})^3$  aufgetragen ist.



**Abb. 6.8:** Der Abriebskoeffizient als Funktion von  $(u - u_{mf})^3$  für Natriumpercarbonat

Man kann diese Abhängigkeit auf folgender Weise beschreiben:

$$r_{a,b} = k^* (u - u_{mf})^3 \quad (6.10)$$

mit  $u_{mf} = 0,46$  m/s als Minimalfluidisationsgeschwindigkeit.

$$r_{a,b} = 0,000116(u - 0,46)^3 \quad (6.11)$$

Die Parameter der Versuche sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

**Tabelle 6.2:** Parameter der Versuche mit Natriumpercarbonat (0,5-1,6 mm),  $u_{mf} = 0,46$  m/s

$u$ m/s	$m_{sch}$ kg	Abrieb kg/min	Abriebskoeffi- zient %/min	$(u - u_{mf})$ m/s	$(u - u_{mf})^3$ m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup>
2,0	2,5	0,00002	0,0008	1,54	3,652264
2,5	5,0	0,00006	0,0012	2,04	8,489664
2,5	3,5	0,00005	0,0014	2,04	8,489664
3,2	3,5	0,00007	0,002	2,74	20,570824
3,67	2,5	0,0001	0,004	3,21	33,076161
4,5	2,5	0,0002	0,008	4,04	65,939264

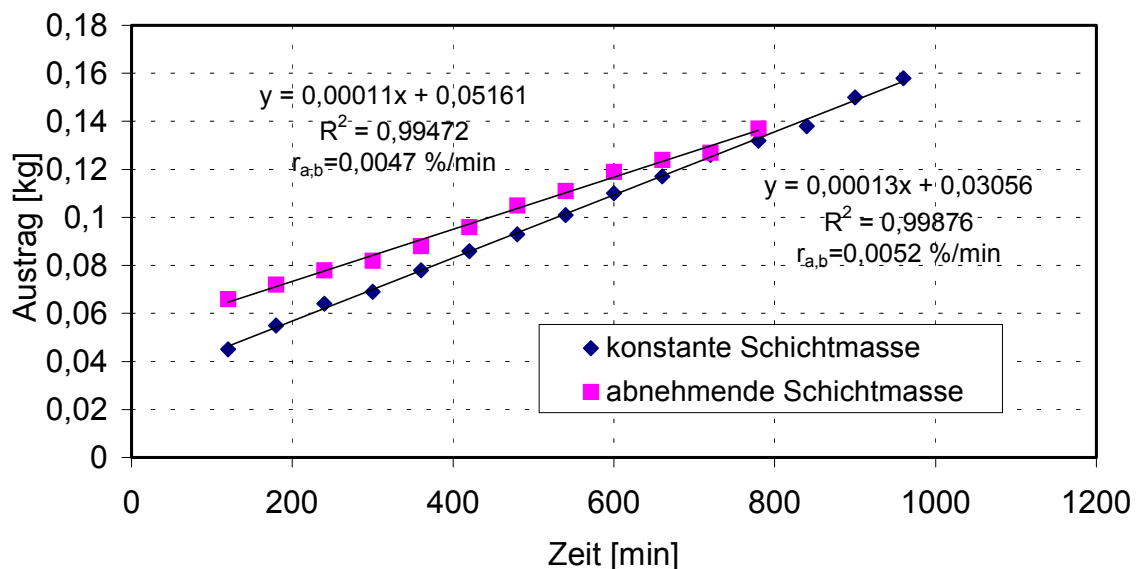
Der Vergleich zwischen den beiden Versuchen mit konstanter und abnehmender Schichtmasse bei gleicher Arbeitsgeschwindigkeit (3,67 m/s) und gleicher Ausgangsschichtmassen (2,5 kg) ergibt folgende Abriebskoeffizienten:

konstante Schichtmasse – 0,0052 %/min

abnehmende Schichtmasse – 0,0047 %/min

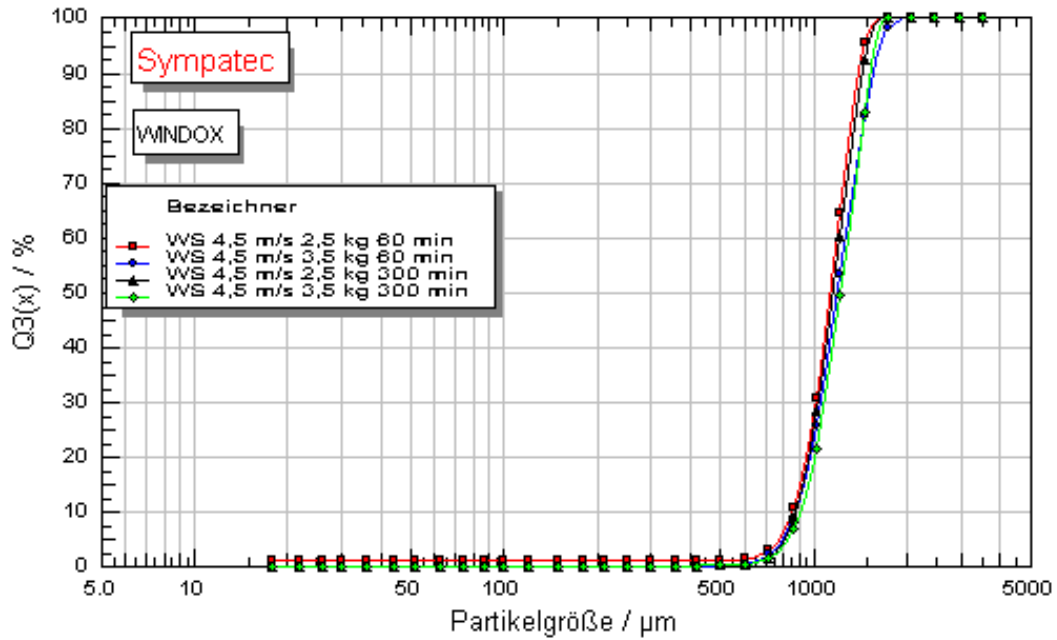
Der Abriebskoeffizient bei konstanter Schichtmasse ist größer, da durch die ständige Zuführung von „frischen“ Teilchen auch deren am Anfang noch rauhe Oberfläche glatt geschliffen wird.

Der Vergleich zwischen den beiden Fahrweisen ist in Abb. 6.9 verdeutlicht.

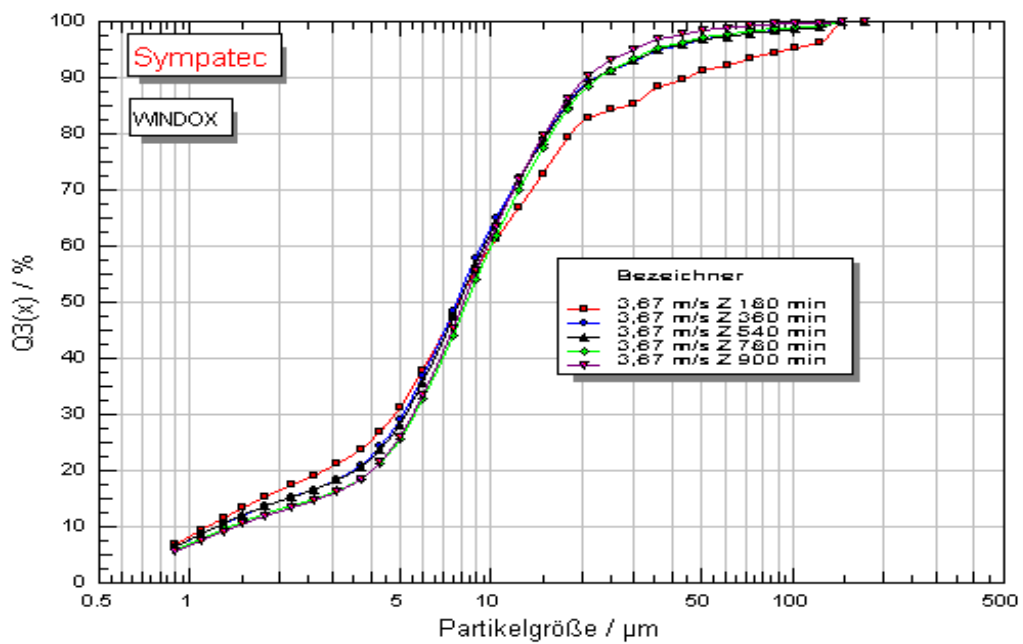


**Abb. 6.9:** Der Austrag in Abhängigkeit von der Zeitdauer für eine konstante und eine abnehmende Schichtmasse (Natriumpercarbonat)

In Abb. 6.10 sind die Partikelgrößenverteilungen der Wirbelschichtmassen von zwei Versuchen ( $m_{sch} = 2,5 \text{ kg}$  und  $m_{sch} = 3,5 \text{ kg}$ ) mit unterschiedlicher Beanspruchungsdauer dargestellt. Man kann sehen, daß sich die Größe der Teilchen fast nicht verändert hat.



**Abb. 6.10:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse (Natriumpercarbonat)



**Abb. 6.11:** Summenverteilung des Zyklonprodukts bei Variation der Beanspruchungsdauer (Natriumpercarbonat)

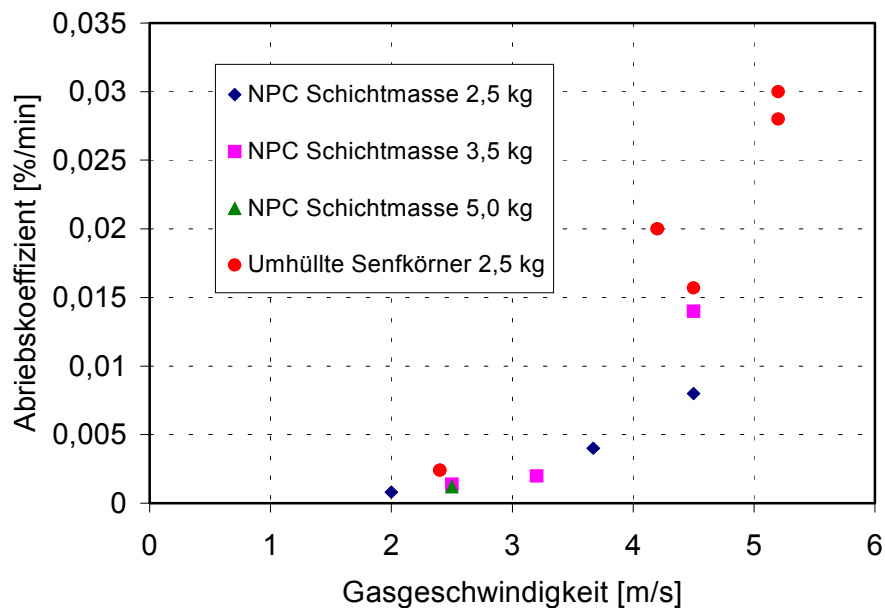
Der Austrag wurde auch mittels Laserbeugungsspektrometer analysiert. Als Beispiel gibt Abb. 6.11 die Korngrößenverteilung des Zyklonprodukts wieder. Die größten Partikeln liegen im Bereich unterhalb von 100  $\mu\text{m}$ . Das ist deutlich unter der Korngröße des Bettmaterials. Die kleinsten Teilchen des Bettmaterials haben eine Größe von 500  $\mu\text{m}$ . Das zeigt, daß alle Partikeln während des Abriebsversuches kugelförmiger wurden und keine Fragmente gebildet wurden.

Es wurde noch ein anderes Produkt bei verschiedenen Gasgeschwindigkeiten untersucht, und die Ergebnisse sind mit denen von Natriumpercarbonat verglichen worden. Das untersuchte Produkt ist das selbst hergestellte Granulat. Die Ergebnisse für Natriumpercarbonat und Kalk-Senf-Granulat sind in folgender Tabelle zusammengefaßt. Die Tabelle der Versuchsparameter und der abgeriebenen Menge für das selbst hergestellte Granulat ist im Anhang 6 dargestellt.

**Tabelle 6.3:** Vergleich zwischen Natriumpercarbonat (NPC) und dem selbst hergestellten Granulat (K-S)

$u$ m/s	$m_{sch}$ kg		Abrieb kg/min		Abriebskoeffizient %/min		
	NPC	K-S	NPC	K-S	NPC	K-S	
2,0		2,5			0,00002	0,0008	
	2,4		2,5		0,00006	0,0024	
	2,4		2,5		0,00006	0,0024	
2,5		5,0			0,00006	0,0012	
2,5		3,5			0,00005	0,0014	
3,2		3,5			0,00007	0,002	
3,67		2,5			0,0001	0,004	
	4,2		2,5		0,0005	0,02	
	4,2		2,5		0,0005	0,02	
4,5	4,5	2,5	2,5	0,0002	0,0004	0,008	0,0157
4,5		3,5			0,0005	0,014	
	5,2		2,5		0,0007	0,028	
	5,2		2,5		0,0008	0,030	

Der Vergleich zwischen den beiden untersuchten Produkten ist auf der nächsten Abbildung dargestellt.



**Abb. 6.12:** Der Abriebskoeffizient in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit

Auf der Abbildung sind drei Werte des Abriebskoeffizienten für das Produkt Natriumpercarbonat (NPC) bei einer Gasgeschwindigkeit von 2 m/s; 3,67 m/s und 4,5 m/s und einer Schichtmasse von 2,5 kg aufgetragen. Drei Werte des Abriebskoeffizienten für den Versuchen mit Natriumpercarbonat sind mit einer Gasgeschwindigkeit von 2,5 m/s; 3,2 m/s und 4,5 m/s und einer Schichtmasse von 3,5 kg. Bei einer Gasgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer Schichtmasse von 5 kg wurde noch ein Versuch mit dem Produkt Natriumpercarbonat gefahren. Die restlichen Werte sind von dem selbst hergestellten Granulat bei verschiedenen Zeiten und Arbeitsgeschwindigkeiten aufgenommen. Es ist zu sehen, daß die abgeriebene Menge für die beiden Produkten ungefähr die selbe ist. Aus den Abbildungen 6.6 und 6.12 erkennt man, daß die Abhängigkeit des Abriebs von der Gasgeschwindigkeit für die beiden Produkte gleich ist.

## 6.2 Versuchsstrategie zur Ermittlung des Einflusses der Schichtmasse

### 6.2.1 Rechenweg für die Ermittlung der Staubkonzentration und des Abriebsstroms

Um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu überprüfen, wurden die selben Versuchsparameter von dem langen (40 h) Versuch eingestellt und es wurde das selbe Granulat (das selbst hergestellte Granulat) benutzt.

#### Versuchsparameter:

Luftdurchsatz: 286,13 m<sup>3</sup>/h im Betriebszustand

Gastemperatur: 25°C

Daraus folgt:

Luftmassenstrom: 343,4 kg/h

Luftdurchsatz in Normalkubikmetern pro Stunde (bei 0°C und 1 bar):  
=343,4/1,29=266,17 m<sup>3</sup>N/h

Weiterhin wurden gemessen:

Schichtmasse zu Beginn des Versuches:  $m_0=2500$  g

Schichtmasse nach 5 Stunden Versuchszeit:  $m_{5h}=2050$  g

Schichtmasse nach 12 Stunden Versuchszeit:  $m_{12h}=1811$  g

Die Partikelkonzentrationen in der Abluft wurden durch eine gravimetrische Methode bestimmt. Mit dieser Methode wird der Staubgehalt von Abgasen bestimmt. Die Methode besteht darin, daß ein Teilstrom des Abgases isokinetisch abgesaugt und über ein Filter abgeleitet wird [61]. Der Staubgehalt wird aus der Gewichtszunahme des Filters und dem durchgesaugten Gasvolumen berechnet. Das Verfahren ist dadurch aufwendig, daß isokinetisch, d.h. geschwindigkeitsgleich mit dem Gasstrom abgesaugt wird. Dabei ist die Bestimmung der Geschwindigkeit des Abgasstromes sehr wichtig. Bei zu geringer Absaugegeschwindigkeit oder bei zu großer Absaugegeschwindigkeit können Fehler auftreten. Der Fehler hängt auch von der Korngröße und von der Dichte der Partikel ab. Je kleiner und leichter die Teilchen sind, desto früher können sie eine Umlenkung machen und um so kleiner wird der Fehler. Bei dieser standardisierten gravimetrischen Methode handelt es sich um eine manuelle und diskontinuierliche Methode. Das bedeutet, daß vor der eigentlichen Staubmessung die Geschwindigkeit des Abgasstromes, verteilt über den Abgaskanalquerschnitt, bestimmt werden muß. In der vorliegenden Arbeit wurde die

sog. Nulldrucksonde benutzt. Im Gegenteil zu der standardisierten Methode bietet die Anwendung einer Nulldrucksonde die Möglichkeit, die aufwendige Geschwindigkeitsbestimmung zu umgehen. Hierbei wird der statische Druck auf der Innenseite und auf der Außenseite des Absaugrohrs gemessen und die Druckdifferenz durch Einregulierung des Teilstromes auf Null gestellt. Auf dieser Art und Weise wird der Abgasstrom automatisch bestimmt.

Die Meßwerte, die durch die Sonde aufgenommen wurden, wurden der Auswertung zugrunde gelegt. Sie sind im Anhang 6 dargestellt. Der Berechnung wurden die folgenden Gleichungen zugrundegelegt.

Getrockneter Probevolumenstrom (Normzustand) als Funktion der Zeit:

$$\dot{V}_{Pr,N}^*(t) = \frac{\dot{m}_{Pr}^*(t)}{\rho_{Tr,N}^*} \quad (6.12)$$

Getrocknetes Probevolumen (Normzustand):

$$V_{Pr,N}^* = \int_{t_B}^{t_E} \dot{V}_{Pr,N}^*(t) dt \quad (6.13)$$

Feuchtes Probevolumen (Normzustand):

$$V_{Pr,N} = V_{Pr,N}^* \cdot \frac{1}{1 - C_{H_2O}} \quad (6.14)$$

Partikelkonzentration im feuchten Probevolumen (Normzustand):

$$c = \frac{m'' - m'}{V_{Pr,N}} \quad (6.15)$$

Es bedeuten:

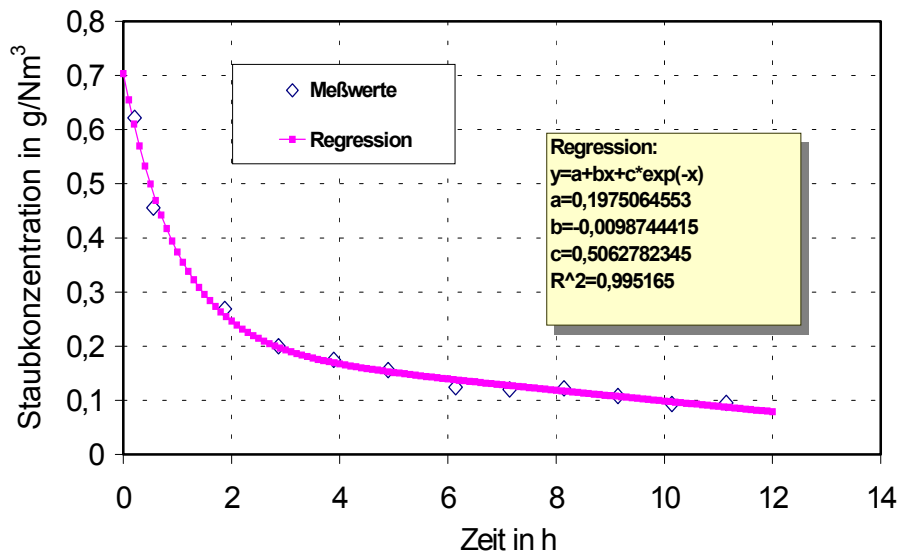
$m'$  [g]: Masse der getrockneten, leeren Filterhülse vor der Probenahme,  
(Trocknung und Wägung im Labor)

$m''$  [g]: Masse der getrockneten, partikelbeladenen Filterhülse nach der Probenahme,  
(Trocknung und Wägung im Labor)

$V_{Pr,N}$  [ $m_N^3$ ]: Feuchtes Probevolumen (Normzustand)

In der Abb. 6.13 sind die gemessenen Werte für die Staubkonzentration im Abluftstrom als Funktion der Zeit dargestellt.





**Abb. 6.13:** Staubkonzentration bei dem Abriebversuch mit der Sonde (umhüllte Senfkörner)

## 6.2.2 Beschreibung und Auswertung der Versuche

Um den Gesamtabrieb als Funktion der Zeit zu bestimmen, wurden die Funktionswerte für die Staubkonzentration in der Abluft als Funktion der Zeit zunächst durch eine Regressionsfunktion angenähert. Diese Funktion lautet:

Regression:

$$y = a + bx + c \exp(-x) \quad (6.16)$$

$$a = 0,1975$$

$$b = -0,0099$$

$$c = 0,5063$$

$$R^2 = 0,9952$$

Dabei ist  $y$  in  $\text{g}/\text{Nm}^3$  die Staubkonzentration im Abluftstrom und  $x$  in h die Zeit.

Der absolute Staubmassenstrom in der Abluft wird nun wie folgt ermittelt:

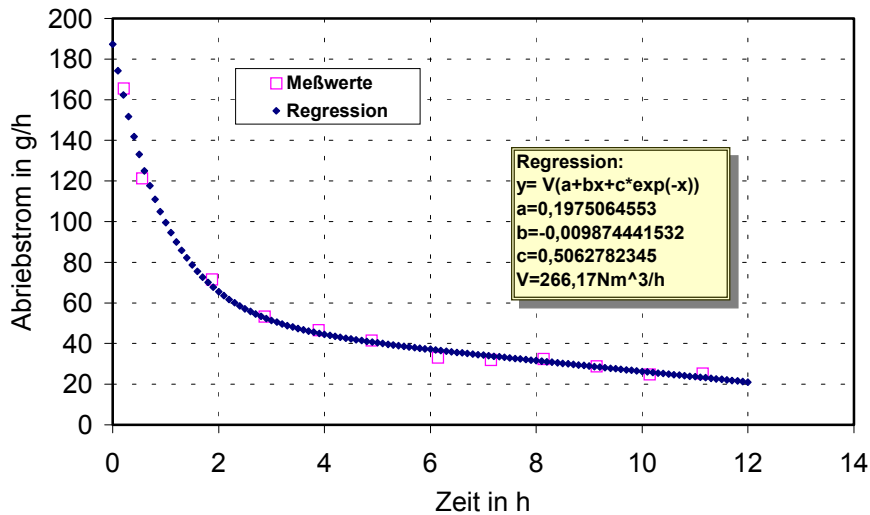
$$m_{\text{Staub}} = \text{Staubkonzentration im Abluftstrom} \cdot \text{Gasvolumenstrom}$$

Dabei:  $m_{\text{Staub}}$  in g/h

Staubkonzentration im Abluftstrom in  $\text{g}/\text{Nm}^3$

Gasvolumenstrom in  $\text{Nm}^3/\text{h}$

In Abb. 6.14 sind die gemessenen Werte für den Abriebstrom auf der Basis des gemessenen Volumenstromes als Funktion der Zeit dargestellt. Die Fläche unter der Kurve stellt den Gesamtabrieb zum Zeitpunkt  $t$  dar.



**Abb. 6.14:** Abriebstrom in Abhängigkeit von der Zeit (umhüllte Senfkörner)

Die Fläche unter der Kurve (der Gesamtabrieb) läßt sich durch Integration der Regressionsfunktion ermitteln:

Für die ausgetragene Staubmenge absolut ergibt sich somit:

$$m_{\text{Staub absolut}}(t) = V_{\text{gas}} \left( a \cdot t + \frac{b}{2} t^2 - c \cdot \exp(-t) + C \right) \quad (6.17)$$

mit  $a = 0,1975$

$b = -0,0099$

$c = 0,5063$

$V_{\text{gas}} = 266,17 \text{ Nm}^3/\text{h}$

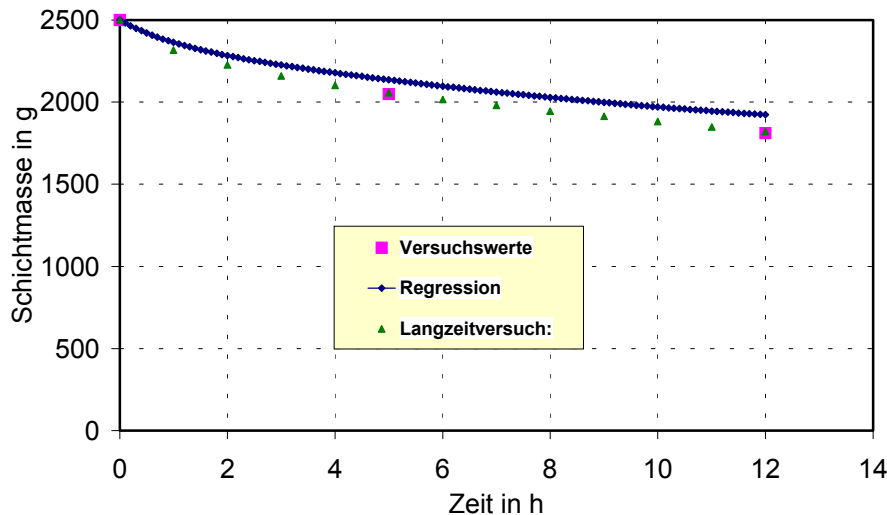
$C = c$

$t$  in h und  $m_{\text{Staub absolut}}$  in g

Die Funktion für die verbleibende Schichtmasse in Abhängigkeit von der Zeit ergibt sich daraus nun wie folgt:

$$m_{\text{sch}}(t) = m_{\text{sch}0} - m_{\text{Staub absolut}}(t) \quad (6.18)$$

Diese Abhängigkeit ist in Abb. 6.15 dargestellt und mit den Messungen aus dem Langezeitversuch sowie den 2 Messungen während des Versuches gegenübergestellt.

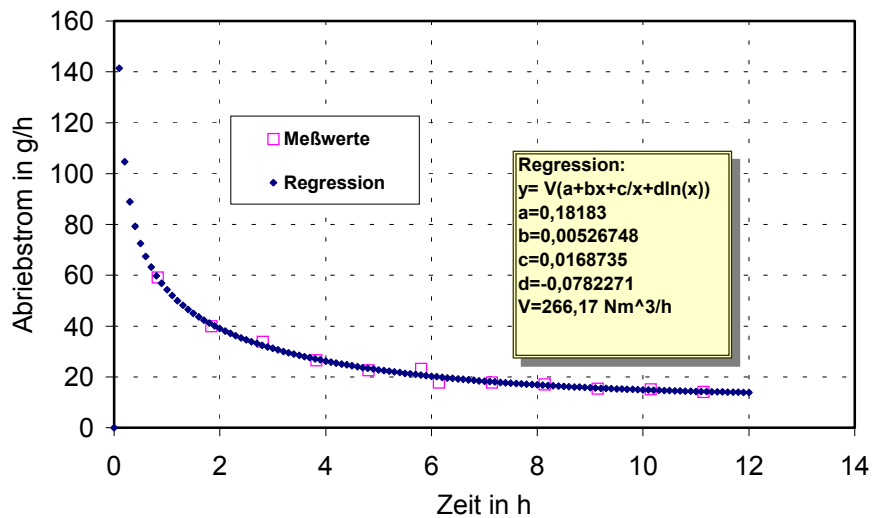


**Abb. 6.15:** Verlauf der Schichtmasse in Abhängigkeit von der Zeit ( $m_{sch_0} = 2500$  g) (umhüllte Senfkörner)

Die gute Übereinstimmung zwischen dem Langezeitversuch und der parallelen Vergleichsmessungen der Schichtmasse beweist die Reproduzierbarkeit der Versuche, die in der Anlage durchgeführt werden. Es sind Abweichungen zwischen der Sondenmessung und dem Langezeitversuch zu sehen. Diese Abweichungen können nur in der Meßtechnik liegen.

Es wurden noch zwei weitere Messungen nach der selben Art und Weise nur mit verschiedenen Schichtmassen durchgeführt. Zuerst mit einer Schichtmasse von 1500 g und danach mit einer Schichtmasse von 3500 g. Die Meßwerte, die durch die Sonde aufgenommen wurden, sind im Anhang 6 dargestellt.

In Abb. 6.16 sind die gemessenen Werte für den Abriebstrom auf der Basis des gemessenen Volumenstromes als Funktion der Zeit dargestellt. Die Fläche unter der Kurve stellt den Gesamtabrieb zum Zeitpunkt  $t$  dar.



**Abb. 6.16:** Abriebstrom in Abhängigkeit von der Zeit ( $m_{sch_0} = 1500$  g) (umhüllte Senfkörner)

Die ausgetragene Staubmenge absolut ergibt sich durch Integration der

Regressionsfunktion  $y = V \left( a + b \cdot x + \frac{c}{x} + d \cdot \ln(x) \right)$ :

$$m_{Staub\ absolut}(t) = V_{gas} \left( a \cdot t + \frac{b}{2} t^2 + c \cdot \ln t + d \cdot t \cdot \ln t - d \cdot t + C \right) \quad (6.19)$$

$$a = 0,1818$$

$$b = 0,0053$$

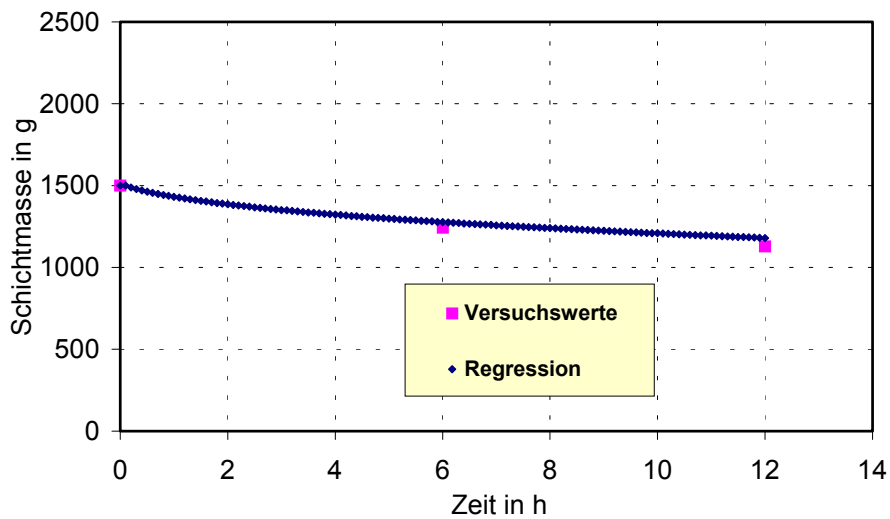
$$c = 0,0169$$

$$d = -0,0782$$

$$V_{gas} = 266,17 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

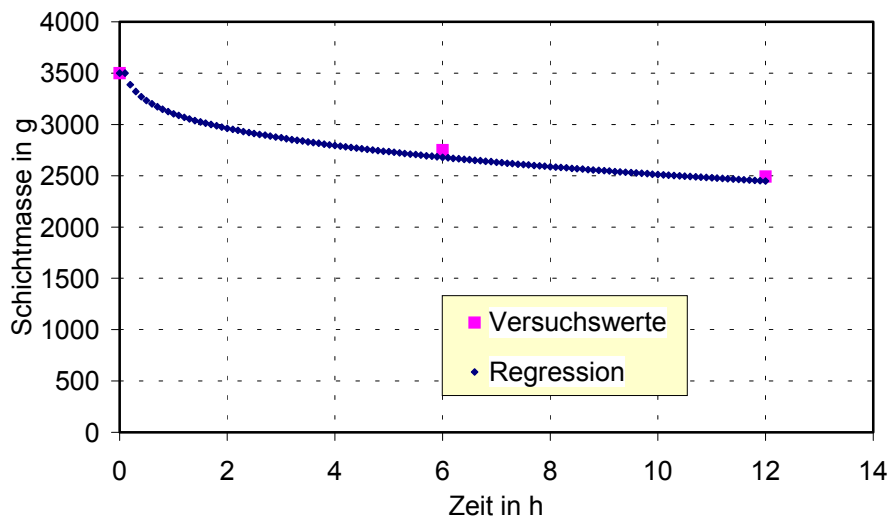
$$C = -0,0052$$

Danach berechnet sich die Schichtmasse aus Gleichung (6.18). In Abb. 6.17 ist die Schichtmasse mit den zwei Messungen während des Versuches verglichen.



**Abb. 6.17:** Verlauf der Schichtmasse ( $m_{sch_0} = 1500$  g, umhüllte Senfkörner)

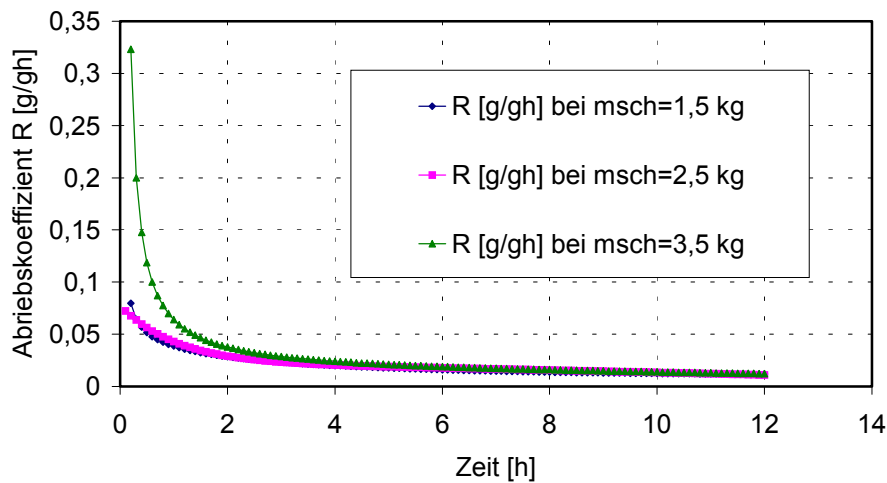
Bei dem Versuch mit einer Schichtmasse von 3500 g ergibt sich auch eine gute Übereinstimmung. Die Werte für die Staubkonzentration in der Abluft als Funktion der Zeit wurden durch die selbe logarithmische Regressionsfunktion wie bei  $m_{sch_0} = 1500$  g angenähert. Die Funktion für die verbleibende Schichtmasse in Abhängigkeit von der Zeit ist in der nächsten Abbildung dargestellt.



**Abb. 6.18:** Verlauf der Schichtmasse ( $m_{sch_0} = 3500$  g, umhüllte Senfkörner)

Die gute Übereinstimmung der Regression mit den gemessenen Werten für die Schichtmasse beweist, daß die sich ergebende Verlustmenge während der Versuche dem Abrieb zugeordnet werden kann. Die Sonde wurde vor dem Zyklon eingebaut

und das bestätigt die Annahme, daß Staub im Zyklon oder Staubfilter verbleibt. Die Reproduzierbarkeit der Versuche wurde ebenfalls nachgewiesen.



**Abb. 6.19:** Der Abriebskoeffizient in Abhängigkeit von der Zeit bei drei verschiedenen Schichtmassen (umhüllte Senfkörner)

In Abb. 6.19 ist eine Zusammenfassung der drei Versuche mit  $m_{sch} = 1,5; 2,5; 3,5$  kg dargestellt. Im instationären Bereich gibt es einen kleinen Unterschied zwischen den Schichtmassen  $m_{sch} = 1,5$  kg und  $m_{sch} = 2,5$  kg und einen größeren Unterschied mit der Schichtmasse  $m_{sch} = 3,5$  kg. Nach den ersten 2- 3 h stimmt der Verlauf der Abriebskoeffizienten für die einzelnen Schichtmassen überein. In der ersten Phase wird der ursprüngliche Staub ausgetragen und die Kanten der Partikel werden abgeschliffen. Es wurde immer das selbe Granulat mit dem Ausgangskornspektrum 2,8- 3,15 mm benutzt. Deshalb besitzt die höchste Schichtmasse die größte Anzahl der Partikel in der Schicht. Wegen der Wechselwirkungen zwischen den Teilchen miteinander und mit den Wänden des Apparates erhöht sich der Anfall des Abriebs. Eine andere Erklärung ist, daß die höhere Schichtmasse am Anfang, bis sie nach 2- 3 h einen kleineren Wert erreicht, viel mehr Energie braucht, damit die Partikel in Bewegung gebracht werden. Dann wird diese Energie in Abrieb umgewandelt. Aber nach dieser ersten Phase, wenn die Rauigkeiten abgeschliffen sind, spielt die Schichtmasse keine Rolle für den Abrieb.

### 6.3 Versuchsstrategie zur Ermittlung der Abriebskoeffizienten

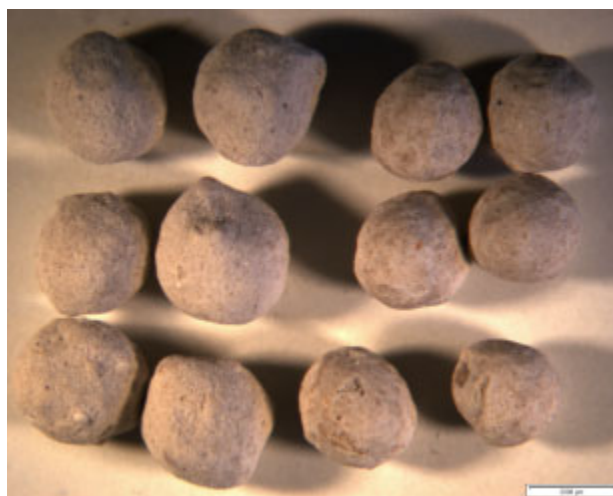
In der vorliegenden Arbeit werden an dem selbst hergestellten Granulat experimentelle Arbeiten zur Ermittlung der Veränderung der Partikelspektren durch

die Beanspruchung in Wirbelschichten und zur Ermittlung der Abriebskoeffizienten durchgeführt. Folgende Versuchsparameter wurden für die Fluidisierung des Produktes eingestellt.

**Tabelle 6.4:** Versuchsparameter

Parameter	Werte
1. Kornbandspektrum des Produktes	2,8 - 3,15 mm
2. Schichtmasse am Anfang des Versuches	2,5 kg
3. Fluidisationsgas	Luft
4. Gewählter Gasdurchsatz	343,4 kg/h
5. Gastemperatur	25°C
6. Gasvolumenstrom beim Eintritt in der Wirbelschicht	286,13 m <sup>3</sup> /h
7. Gasgeschwindigkeit in der Schicht (auf den freien Querschnitt bezogen)	4,5 m/s
8. Feststoffdichte	1450 kg/m <sup>3</sup>
9. Gasdichte	1,2 kg/m <sup>3</sup>
10. relatives Lückenvolumen	0,74
11. Beanspruchungsdauer	40 h

Die Abbildung 6.20 zeigt Mikroskop – Aufnahmen des Granulates, das auf diese Weise im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen beansprucht wurde.



**Abb. 6.20:** Mikroskopaufnahmen des Granulates

**Links:** Vor der Beanspruchung

**Rechts:** Nach der Beanspruchung

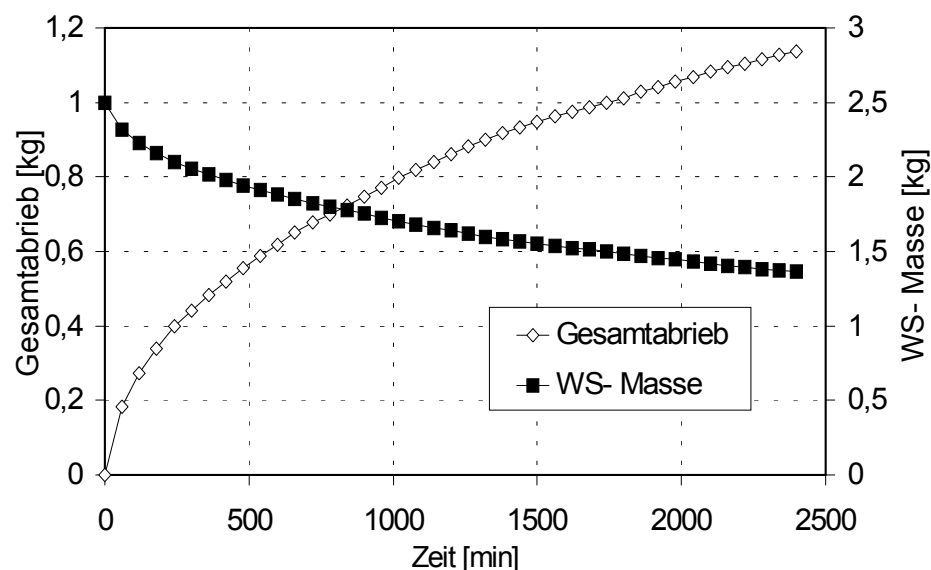
Der Versuch wurde so durchgeführt, daß nur Staub ausgetragen wurde und keine Teilchen in der Größenordnung von  $d_{p,A}$ . Der Existenzbereich der Wirbelschicht wird von der Wirbelgeschwindigkeit und von der Austragsgeschwindigkeit bestimmt. Sie betragen  $W_A = 9,2$  m/s und  $W_W = 0,89$  m/s. Unter den in Tabelle 6.4 genannten Bedingungen wurde das Produkt fluidisiert. Dabei wurde im Abstand von 1 h bzw. von 2 h gemessen:

1. Angefallenes Produkt im Zyklon
2. Angefallenes Produkt im Staubfilter
3. Schichtmasse

Zur Messung wurde der Versuch jeweils unterbrochen, die Schichtmasse wurde durch Umklappen des Anströmbodens aus dem Apparat herausgenommen, gewogen und danach wieder in den Apparat zurückgegeben.

Es stellte sich heraus, daß es einen Produktverlust gab, der durch in der Anlage angelagertes staubförmiges Produkt bzw. durch Produkt, das den Staubfilter passierte, hervorgerufen wurde. Dieser Verlust wurde komplett dem Abrieb zugeordnet, da er aus der Schicht ausgetragen sein muß. Die Staubmessungen durch die Sonde haben dies auch bewiesen, da sie mit den parallelen Messungen der Schichtmasse übereinstimmen (Kapitel 6.2.2). Im Folgenden wird also die Differenz zwischen am Anfang zugegebenen Produkt (2,5 kg) und dem zum jeweiligen Zeitpunkt in der Schicht gemessenen Produkt als Abrieb angenommen.

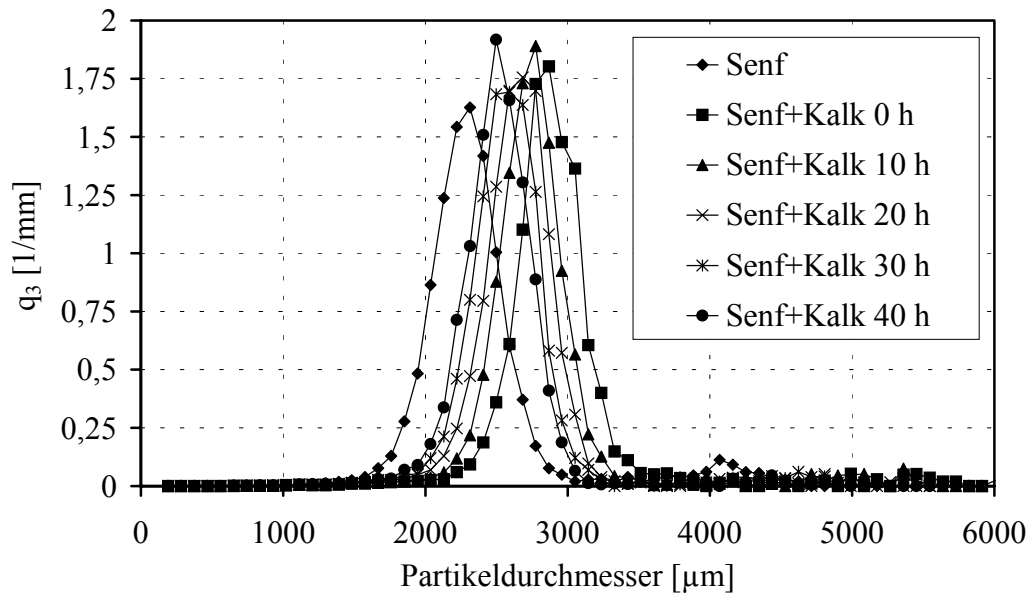
Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den folgenden Bildern dargestellt.



**Abb. 6.21:** Abrieb und Schichtmasse als Funktion der Zeit (umhüllte Senfkörner)



In bestimmten Zeiträumen wurde von der entnommenen Schicht mit dem EKG-Meßgerät das Kornbandspektrum bestimmt. Die Partikelverteilungen der einzelnen Messungen sind in Abhängigkeit von der Fluidisationszeit in Abbildung 6.22 dargestellt.



**Abb. 6.22:** Entwicklung der Massenverteilungsdichte des Produktes

Im Einzelnen wird das Ergebnis für die verschiedenen Messungen durch Tabellen veranschaulicht, die im Anhang 3 dargestellt sind.

Wenn man die einzelnen Tabellen auswertet, können die in Tabelle 6.5 dargestellten Ergebnisse zusammengefaßt werden, indem die mittleren Werte der Messungen zu jedem Zeitpunkt verwendet wurden.

**Tabelle 6.5:** Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Partikelgrößenverteilungen

$t, h$	$n_p$	$A_{p,ges}, m^2$	$V_{p,ges}, m^3$	$d_V, \mu m$	$d_A, \mu m$	$d_S, \mu m$
0	158151	3,58	0,001724	2753,5	2690,3	2883
4	136324	3,08	0,0014496	2728,6	2684,8	2824
10	130891	2,83	0,0012979	2665,6	2623,4	2752
20	129925	2,56	0,0011303	2551,8	2505,7	2646
30	129510	2,41	0,001026	2473,6	2433,4	2556
40	127334	2,25	0,0009407	2416	2372	2507

Für die Bestimmung des Abriebskoeffizienten stehen zur Verfügung:

- gemessene Daten für die Abnahme der Schichtmasse als Funktion der Zeit

- gemessene Daten für den Abrieb
- Messungen der Partikelspektren

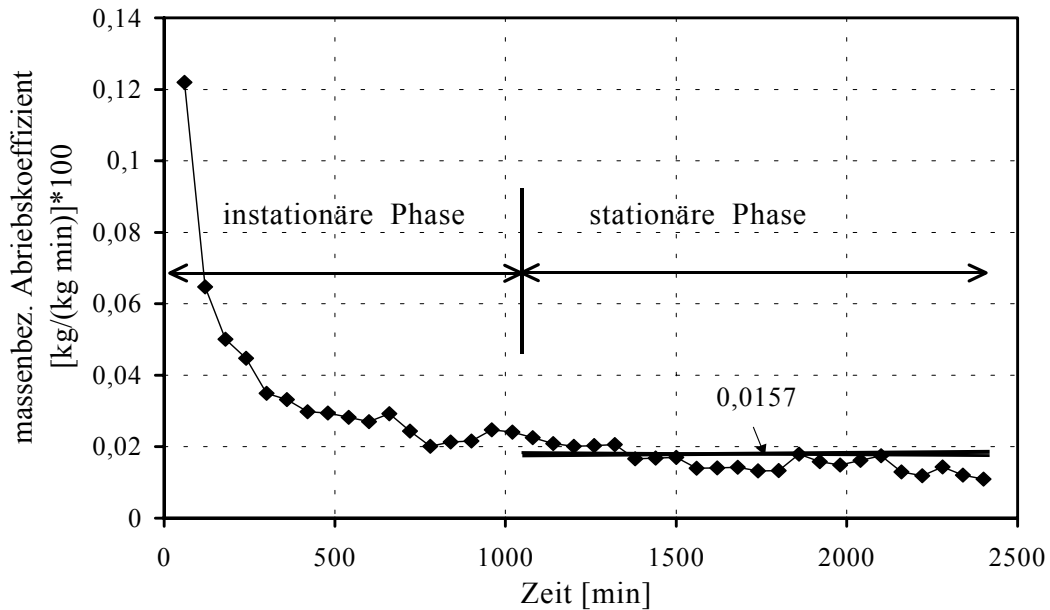
Aus den Versuchswerten ist deutlich zu erkennen, daß die Masse des abgeriebenen Produktes mit zunehmender Versuchsdauer kumulativ zunimmt. Da aber auch die Schichtmasse und die Schichtoberfläche kontinuierlich abnehmen, ist es zweckmäßig, einen spezifischen Wert für den Abriebskoeffizienten zu bilden. Dies kann auf zwei verschiedene Arten geschehen. Wenn davon ausgegangen wird, daß die Schichtmasse den entscheidenden Einfluß auf den Abrieb hat, kann das Modell nach Werther [1,5] Verwendung finden. Wenn jedoch die Partikeloberfläche für diesen Prozeß die ausschlaggebende Größe ist, muß der jeweilige Abrieb zu dieser ins Verhältnis gesetzt werden. Im Folgenden sollen die beiden Betrachtungsweisen näher untersucht werden.

### 6.3.1 Massen- bzw. volumenbezogener Abriebskoeffizient

Der momentane massenbezogene Abriebskoeffizient wird aus den Messungen gemäß Abb. 6.21 wie folgt bestimmt:

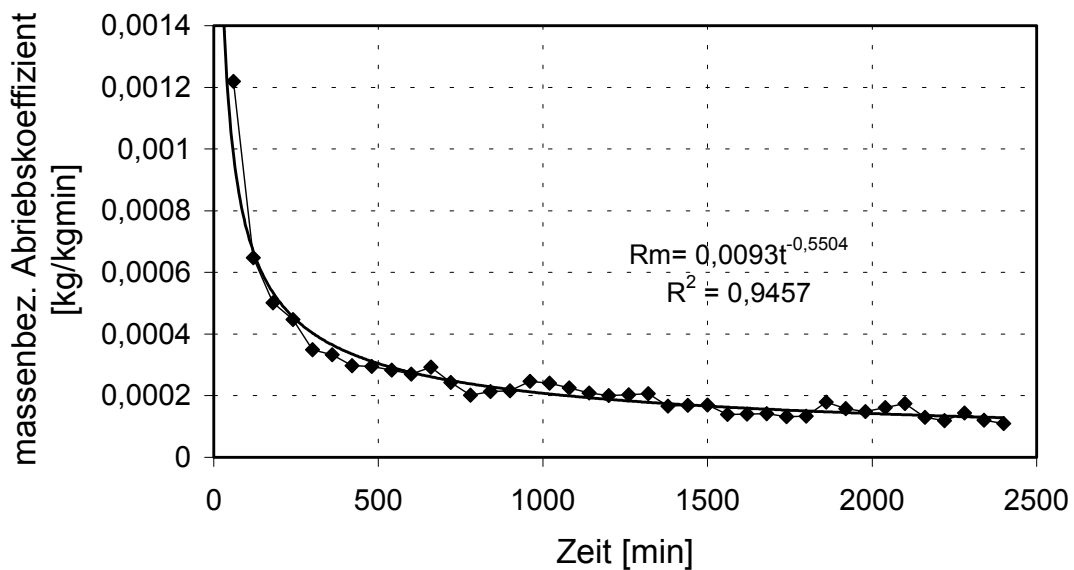
$$R_{m i} = \frac{\Delta m_{\text{Abrieb } i}}{\Delta t_i \cdot m_{i-1}} \quad [\text{kg/kg min}] \quad (6.20)$$

Es zeigt sich, daß der Abriebskoeffizient zunächst höhere Werte besitzt und im Laufe der Zeit degressiv fällt (Abb. 6.23). Um die Ergebnisse handhabbarer zu machen, wird der Verlauf des Abriebskoeffizienten entweder für die zweite Phase (stationäre Phase) als konstant angenommen oder durch eine Potentialfunktion angenähert. Der stationäre Bereich liegt für die durchgeführten Versuche zwischen  $t = 1140$  und  $t = 2400$  min ( $R_m \approx 0,000157$  kg/kgmin).



**Abb. 6.23:** Massenbezogener Abriebskoeffizient in Abhängigkeit von der Zeit (umhüllte Senfkörner)

Wenn der Verlauf des Abriebskoeffizienten durch eine Potentialfunktion angenähert wird, lautet diese Funktion:  $R_m = 0,0093 \cdot t^{-0,5504}$ .



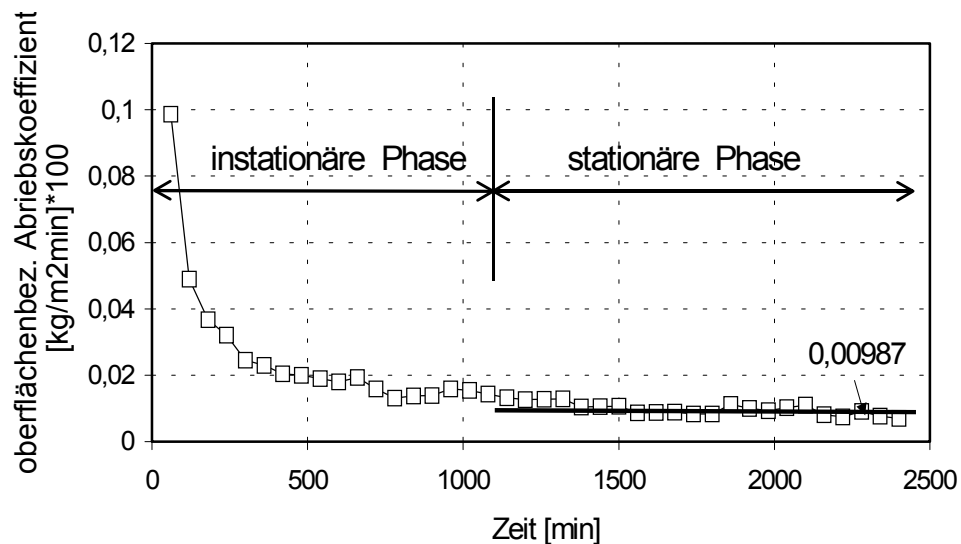
**Abb. 6.24:** Massenbezogener Abriebskoeffizient als Funktion der Zeit (umhüllte Senfkörner)

### 6.3.2 Oberflächenbezogener Abriebskoeffizient

Der momentane oberflächenbezogene Abriebskoeffizient wird wie folgt bestimmt:

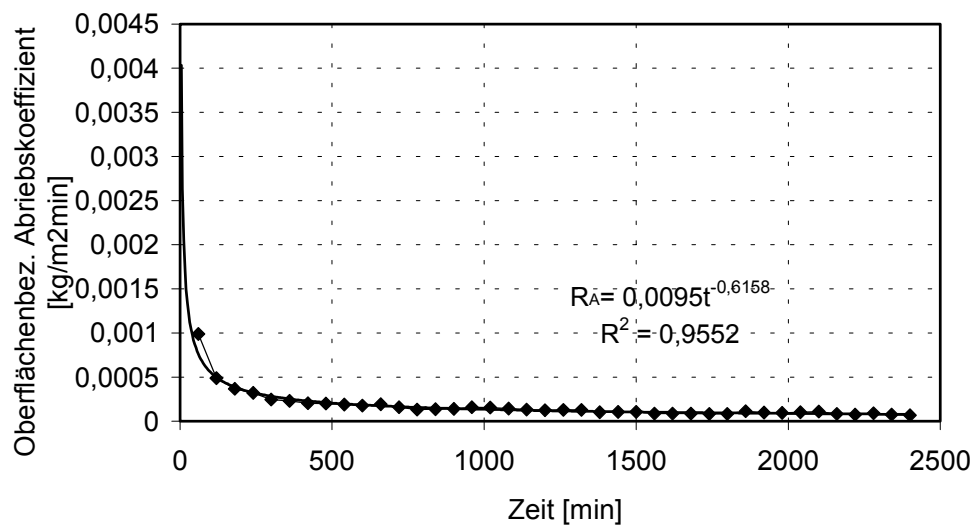
$$R_{Ai} = \frac{\Delta m_{Abrieb i}}{\Delta t \cdot A_{i-1}} \quad [\text{kg/m}^2 \text{ min}] \quad (6.21)$$

Da im Gegensatz zu den Meßwerten der Schichtmasse nicht für jeden Zeitwert die Teilchenoberflächen bestimmt werden konnten, wird für die gemessene Entwicklung der Teilchenoberfläche als Funktion der Zeit zunächst eine Extrapolation aus den Versuchswerten vorgenommen, um eine kontinuierliche Auswertung zu ermöglichen. Der stationäre Bereich liegt zwischen  $t = 1140$  und  $t = 2400$  min ( $R_A \approx 0,000987$  kg/m<sup>2</sup>min).



**Abb. 6.25:** Oberflächenbezogener Abriebskoeffizient (umhüllte Senfkörner)

Wenn der Verlauf des Abriebskoeffizienten durch eine Potentialfunktion angenähert wird, lautet diese Funktion:  $R_A = 0,0095 \cdot t^{-0,6158}$ .



**Abb. 6.26:** Oberflächenbezogener Abriebskoeffizient als Funktion der Zeit

## 7 Vergleich zwischen dem Modell und dem Experiment

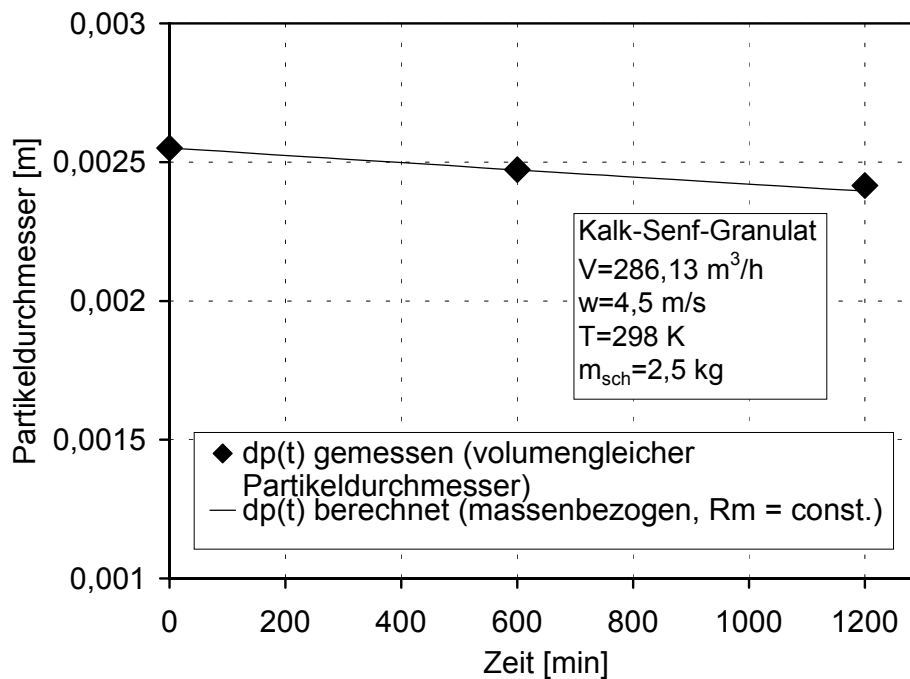
### 7.1 Vorausberechnung mit einem konstanten Abriebskoeffizienten

#### • Massenbezogener Abriebskoeffizient

Wie sich aus den Versuchsergebnissen erkennen läßt, ist der Abrieb in der ersten Phase bei frischem Produkt stark zeitabhängig. Um den kontinuierlichen Prozeß zu beschreiben, wird deshalb die erste Phase zunächst ausgeklammert. Das heißt, daß die Werte für den Zeitpunkt 19 h (1140 min) als Startwerte angenommen werden. Das ist materialabhängig und bei einem anderen Produkt kann die zweite Phase bei einem anderen Startwert anfangen. Wenn man von dem Wert 19 h als Startwert ausgeht, so kann bei Kenntnis des Abriebskoeffizienten ( $R_m = 0,000157 \text{ kg/kg min}$ ) der Verlauf des Partikeldurchmessers vorausberechnet werden. Es gilt:

$$d_p(t)_{(t>1140 \text{ min})} = d_{p,0(1140 \text{ min})} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \quad (7.1)$$

Der Durchmessererlauf ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



**Abb. 7.1:** Durchmesserabnahme nach massenbezogenem Abriebskoeffizienten  $R_m = \text{const}$

Da die Dichte des eingesetzten Materials sich wenig im Laufe des Versuches verändert hat, kann man mit einem mittleren Wert zwischen der Anfangsdichte und der Dichte am Ende des Versuches die Schichtmasse vorausberechnen. Die Labormessungen ergaben am Versuchsanfang  $1453 \text{ kg/m}^3$  und am Versuchsende  $1448 \text{ kg/m}^3$ . Unter der Zugrundelegung der Teilchenanzahl ( $127334$ ) läßt sich der Verlauf der Schichtmasse vorausberechnen und mit den kontinuierlich gemessenen Schichtmassen vergleichen.

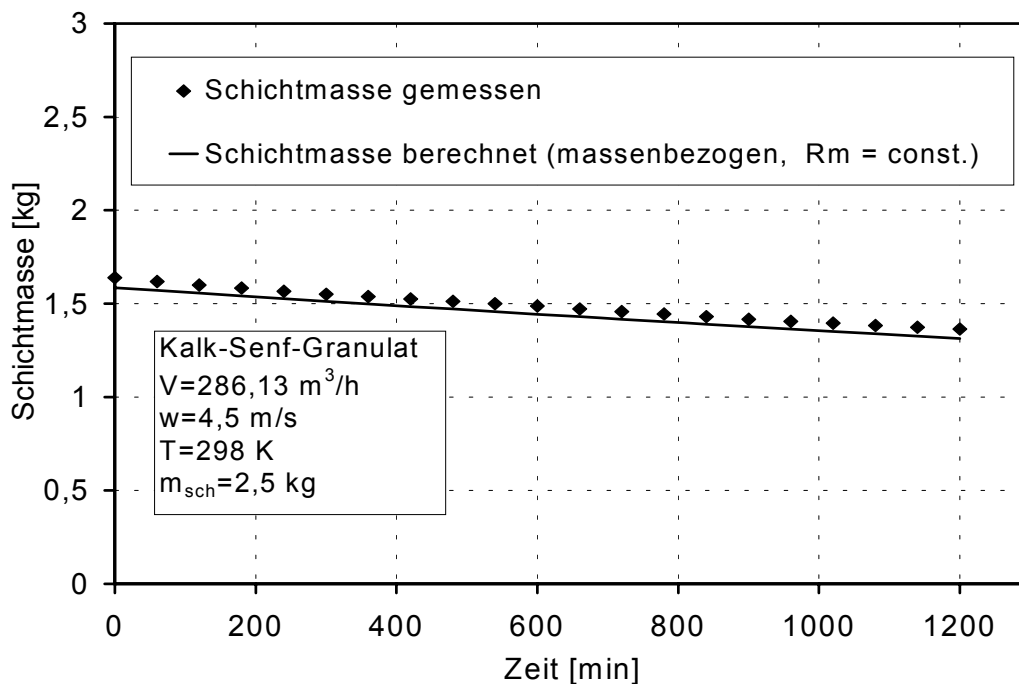
Mit der Modellgleichung und der Anwendung des massenbezogenen konstanten Abriebskoeffizienten kann man die Schichtmasse wie folgt ausdrücken:

$$m_p = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_p \cdot d_p(t)^3 \quad (7.2)$$

$$d_p(t) = d_{p,0} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \quad (7.3)$$

$$m_p = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_p \cdot \left(d_{p,0} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right)\right)^3 \quad (7.4)$$

$$m_{sch} = n_p \cdot m_p = n_p \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \rho_p \cdot \left(d_{p,0} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right)\right)^3 \quad (7.5)$$



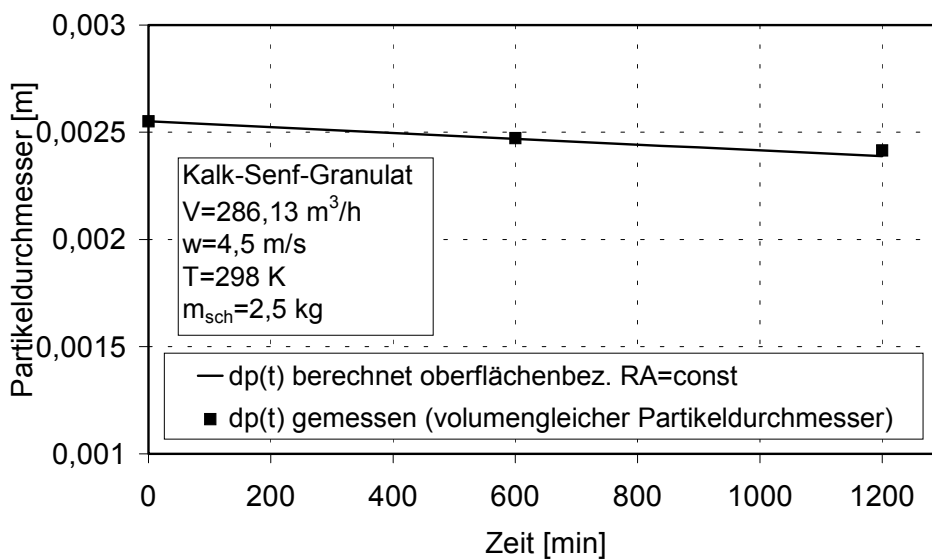
**Abb. 7.2:** Verlauf der Schichtmasse ( $R_m = \text{const}$ )

### • Oberflächenbezogener Abriebskoeffizient

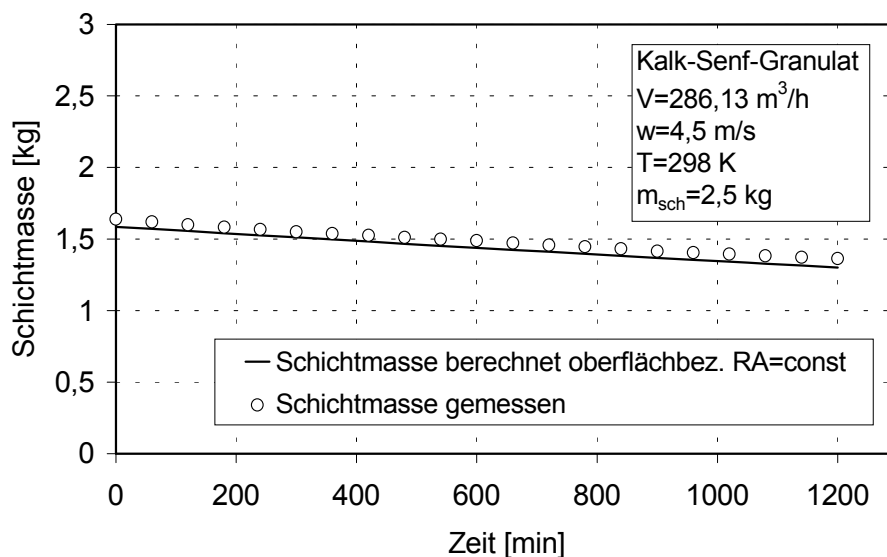
Die Vorausberechnung erfolgt auf ähnlicher Weise nur unter Berücksichtigung der Modellgleichung (3.73), die im Kapitel 3 beschrieben worden ist. Durch Gleichung (3.73) lässt sich die Schichtmasse auf folgende Weise ausdrücken und berechnen:

$$m_{sch} = n_P \cdot m_P = n_P \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \rho_P \cdot \left( d_{P,0} - \frac{2 \cdot R_A}{\rho_P} \cdot t \right)^3 \quad (7.6)$$

$R_A$  beträgt  $0,0000987 \text{ kg/m}^2 \text{ min}$



**Abb. 7.3:** Durchmesserabnahme nach oberflächenbezogenem Abriebskoeffizienten  $R_A = \text{const}$



**Abb.7.4:** Verlauf der Schichtmasse  $R_A = \text{const}$

## 7.2 Vorausberechnung mit einem zeitabhängigen Abriebskoeffizienten

### • Anwendung des massenbezogenen Abriebskoeffizienten

Unter der Zugrundelegung der Gleichungen (3.115) und (3.118) im Kapitel 3 lässt sich der Verlauf des Partikeldurchmessers und der Schichtmasse vorausberechnen und mit den gemessenen Werten vergleichen. Die erhaltenen Ergebnisse sind graphisch dargestellt.

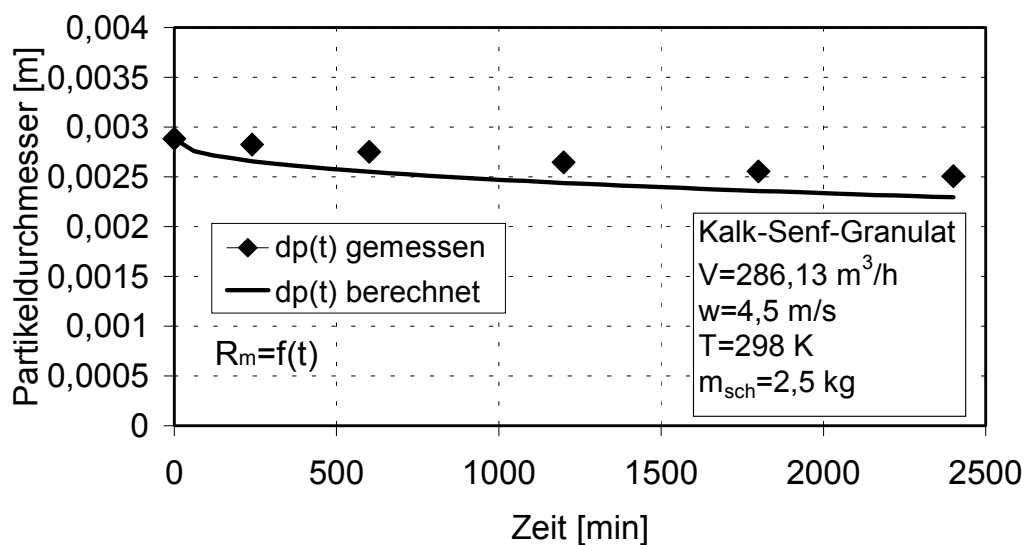


Abb. 7.5: Verlauf des Partikeldurchmessers

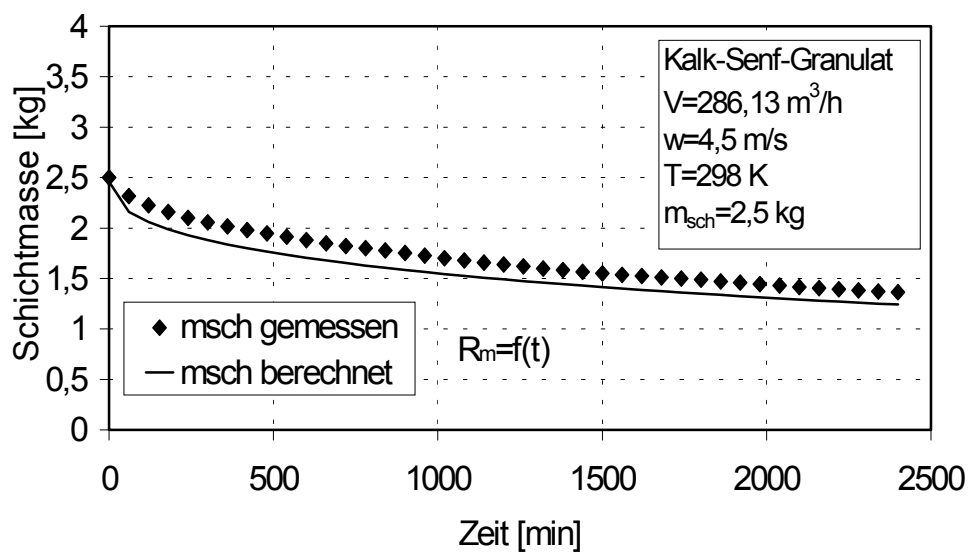


Abb. 7.6: Verlauf der Schichtmasse



### • Anwendung des oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten

Unter der Zugrundelegung der Gleichungen (3.115) und (3.160) lässt sich der Verlauf des Partikeldurchmessers und der Schichtmasse genauso vorausberechnen und mit den gemessenen Werten vergleichen. Die erhaltenen Ergebnisse sind graphisch dargestellt.

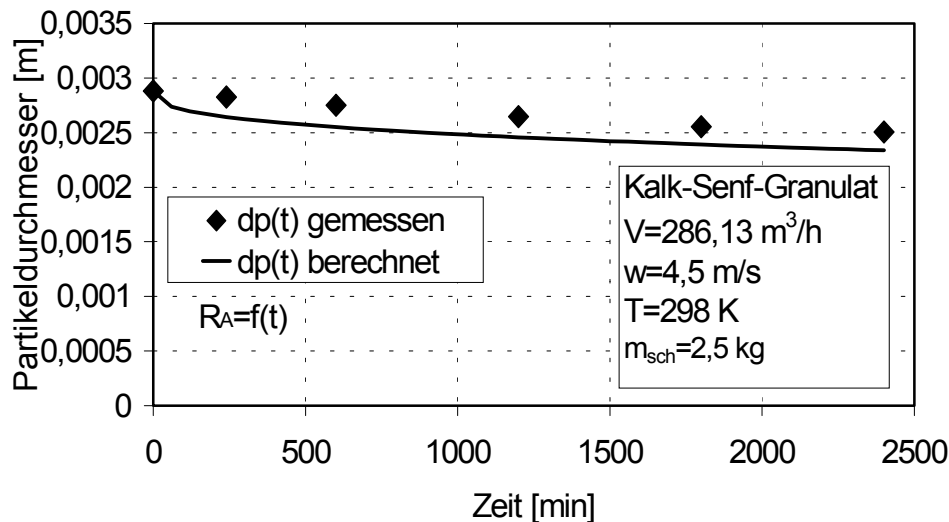


Abb. 7.7: Verlauf des Partikeldurchmessers

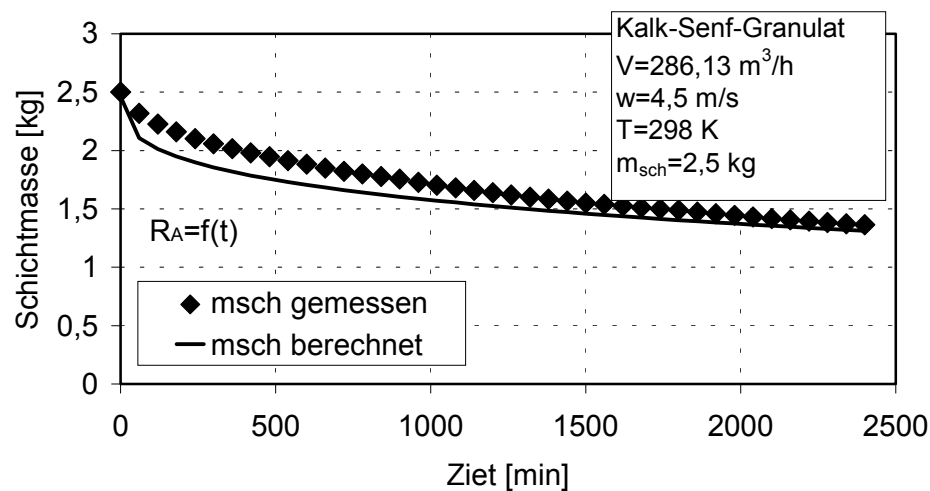


Abb. 7.8: Verlauf der Schichtmasse

### 7.3 Vorausberechnung unter Berücksichtigung der Dichteveränderung

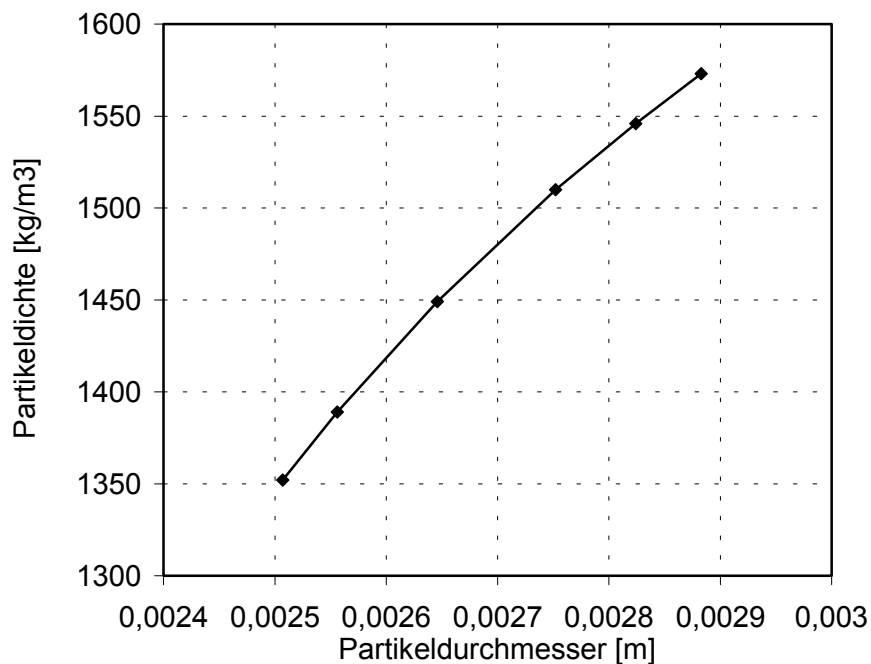
Unter Anwendung der Gleichung (3.183) und folgenden Festlegungen lässt sich der Feststoffdichteverlauf berechnen:

Durchmesser der Senfkörner (Kerndurchmesser): 0,002317 m

Dichte des Kerns: 1180 kg/m<sup>3</sup>

Dichte des Mantels (Kalksteinmehl): 2000 kg/m<sup>3</sup>

In der nächsten Abbildung ist die Abhängigkeit der Partikeldichte vom Partikeldurchmesser dargestellt.



**Abb. 7.9:** Verlauf der Partikeldichte in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser

Es war möglich nur am Anfang und am Ende des Versuches die Dichte im Labor zu bestimmen. Da der Unterschied zwischen den beiden Dichten nicht groß war, wurde zunächst die Dichteänderung vernachlässigt und mit einem mittleren Wert berechnet. Der Wert beträgt 1450 kg/m<sup>3</sup>. Die Labormessungen ergaben am Versuchsanfang 1453 kg/m<sup>3</sup> und am Versuchsende (40 h) 1448 kg/m<sup>3</sup>. Es zeigt sich, daß die Messung der Berechnung nicht entspricht. Im Labor wurde die Dichte durch ein Helium – Pyknometerverfahren ermittelt, das aber für die Bestimmung der Reindichte und der scheinbaren Dichte von Granulaten, die keine Poren aufweisen, gut geeignet ist. Die scheinbare Dichte (inklusive Poren) ist für einen Wirbelschichtprozess von Bedeutung. Beim Pyknometerverfahren verfälscht die Gasverdrängung in den Poren das Ergebnis. Eine andere Möglichkeit die scheinbare Dichte zu berechnen besteht in der Ermittlung der Schüttdichte.

$$\rho_s = \frac{m_{sch}}{V_{sch}} \quad (7.7)$$

$$\rho_P = \frac{\rho_s}{(1-\varepsilon)} \quad (7.8)$$

Mit dieser Methode hat sich für die scheinbare Dichte ein Wert von  $1274 \text{ kg/m}^3$  ergeben. Der Unterschied zu der Berechnung ergibt sich infolge des Wertes von  $\varepsilon$ , da für eine ruhende Schicht und für sphärische Teilchen  $\varepsilon \approx 0,4$  ist.

Wenn das behandelnde Material hochporös ist, kann man die Dichte dieses Materials mit Hilfe einer experimentell bestimmten Minimalfluidisierungsgeschwindigkeit aus Gleichung (7.9) bestimmen [79].

$$u_{mf} = \frac{\mu}{\rho_f d_V} \left[ (1135,7 + 0,0408 \cdot Ar)^{0,5} - 33,7 \right] \quad (7.9)$$

wo  $d_V$  der Äquivalentdurchmesser der volumengleichen Kugel und  $\mu$  die dynamische Viskosität sind.

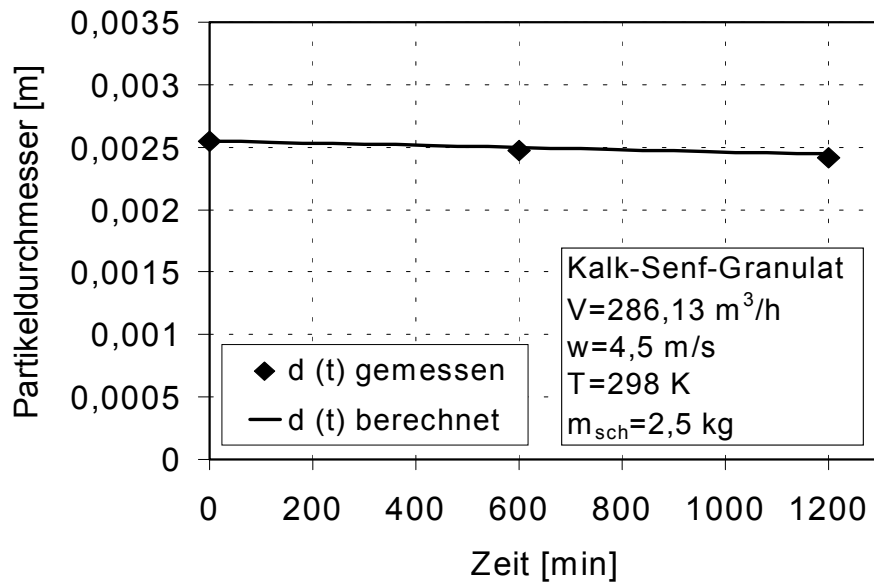
Gleichung (7.9) gilt nach Geldart für Partikelgrößen oberhalb von  $100 \text{ }\mu\text{m}$ . Für kleinere Partikel ergibt die Gleichung von Baeyens (7.10) eine gute Übereinstimmung mit Experimenten.

$$u_{mf} = \frac{(\rho_P - \rho_f)^{0,934} \cdot g^{0,934} \cdot d_P^{1,8}}{1,111 \cdot \mu^{0,87} \cdot \rho_f^{0,066}} \quad (7.10)$$

Da die Partikel zwischen  $2,8 \text{ mm}$  und  $3,15 \text{ mm}$  gesiebt wurden, ist die Feststoffdichte nach Gleichung (7.9) zu berechnen. Es ergibt sich eine scheinbare Dichte von  $1220 \text{ kg/m}^3$ .

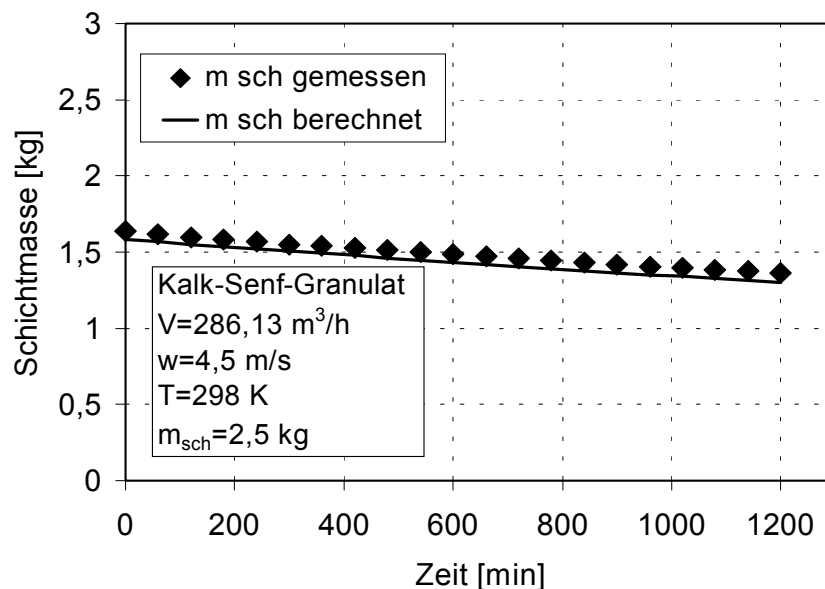
#### • Anwendung eines massenbezogenen Abriebskoeffizienten

In der nächsten Abbildung ist der gemessene Partikeldurchmesser mit dem durch einen konstanten massenbezogenen Abriebskoeffizienten berechneten verglichen. Dabei ist auch die Dichteveränderung berücksichtigt worden.



**Abb. 7.10:** Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen Partikeldurchmesser unter Berücksichtigung der Dichteveränderung

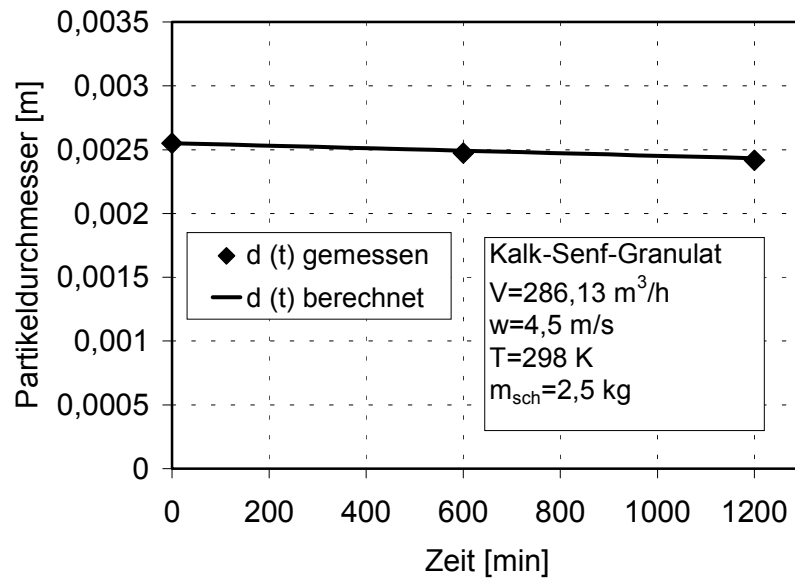
In Abb. 7.11 ist die gemessene Schichtmasse mit der unter der Berücksichtigung der Dichteveränderung bei einem konstanten massenbezogenen Abriebskoeffizienten berechneten Schichtmasse verglichen. Unter der Anwendung der Gleichung (3.197) ist der Partikeldurchmesser vorausberechnet und für die Schichtmassenberechnung verwendet worden.



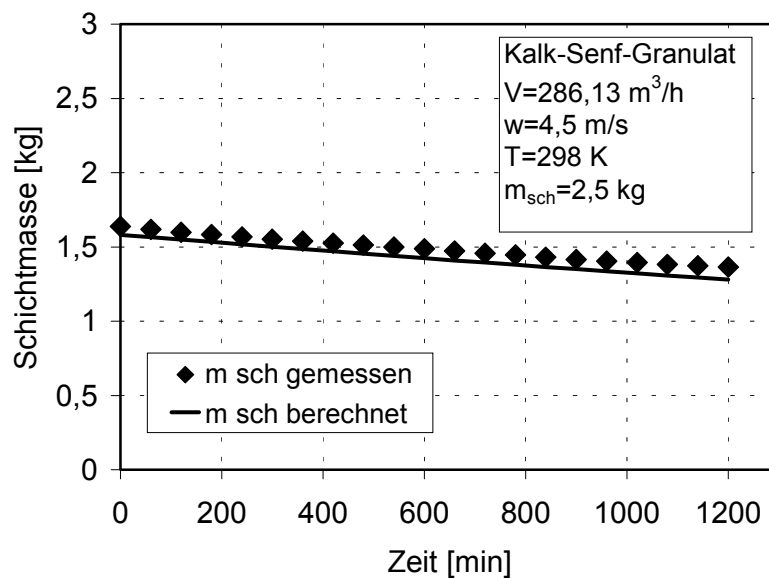
**Abb. 7.11:** Vergleich zwischen der berechneten und der gemessenen Schichtmasse

### • Anwendung eines oberflächenbezogenen Abriebskoeffizienten

Unter der Zugrundelegung der Gleichungen (3.183) und (3.241) lassen sich der Verlauf des Partikeldurchmessers und der Schichtmasse genauso vorausberechnen und mit den gemessenen Werten vergleichen. Die erhaltenen Ergebnisse sind auf den nächsten Abbildungen zu sehen.



**Abb. 7.12:** Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen Partikeldurchmesser



**Abb 7.13:** Vergleich zwischen der gemessenen und der berechneten Schichtmasse

#### 7.4 Berechnung der Korngrößenverteilung des Bettmaterials

Die Berechnung der Korngrößenverteilung des Bettmaterials beruht auf dem Populationsbilanzmodell. Das Modell geht von folgenden Gedanken aus. In einer kontinuierlich betriebenen Wirbelschicht mit einer konstanten Zahl von Partikeln (disperse Phase) verringert sich der Partikeldurchmesser durch Abrieb mit der Verweilzeit in der Schicht. Der Abrieb wird ausgetragen und zählt entweder zur dispersen Phase bzw. kann bei zu starker mechanischen Beanspruchung auch als kontinuierliche Phase (Staub) anfallen. Die verbleibenden Partikel verändern weiter ihren Durchmesser bis sie eine Größe erreicht haben, bei der sie selbst ausgetragen werden. Unterteilt man den Bereich vom Eintragsdurchmesser bis zum Austragsdurchmesser mit Hilfe eines Diskretisierungsintervalls in verschiedene Klassen, so durchläuft jedes Partikel während der Verweilzeit diese Klassen. Die in einer Klasse enthaltenen Partikel besitzen den gleichen Durchmesser und bilden somit ein monodisperses System. Für dieses monodisperse System gelten alle analytischen Gleichungen der Modellierung.

Wird die Schichtmasse nun durch Zugabe neuer Partikel mit dem Eintragsdurchmesser konstant gehalten und Agglomeration ausgeschlossen, so treten ständig Partikel einer Klasse größeren Partikeldurchmessers in die Klasse mit dem nächst kleineren Durchmesser über. Der Vorteil dieser Herangehensweise besteht in der numerischen Handhabbarkeit derartiger Systeme mit mehreren Milliarden Partikel. Einerseits ist es möglich, den Abrieb eines monodispersen Partikelhaufwerkes zu berechnen und mit analytischen Lösungen zu vergleichen. Andererseits verfolgt die Populationsbilanz das Hauptziel, reale Partikelgrößenverteilungen zu betrachten.

Zum Zeitpunkt  $t$  existieren die Klassen  $i, i+1, \dots, n$ . Für jede Klasse gilt die Modellgleichung, z. B. beim massenbezogenen Abrieb:

$$d_p(t)_i = d_{p,0i} \exp\left(-\frac{R_m}{3} t\right) \quad (7.11)$$

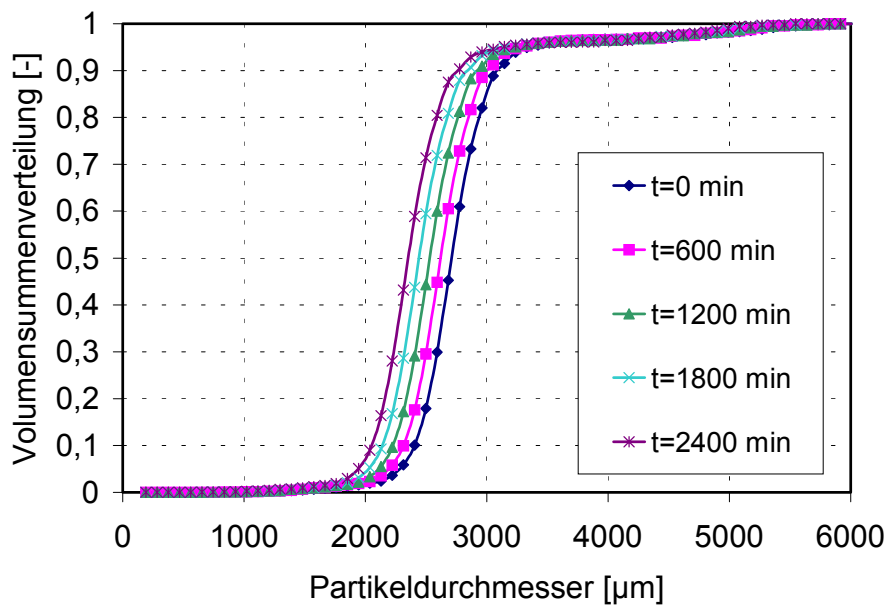
Danach kann man das Volumen für jede Klasse mit Gleichung (7.12) berechnen:

$$V_i = \frac{\pi d_{pi}^3}{6} n_{pi} \quad (7.12)$$

Letztendlich ergibt sich die Partikelverteilung:

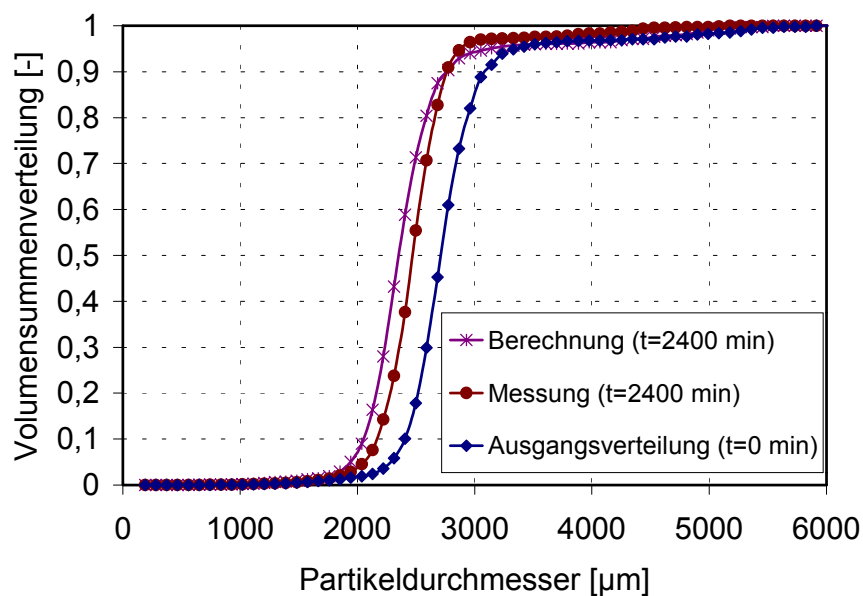
$$Q_3 = \frac{V_i}{\sum V_i} \quad (7.13)$$

Wenn man  $Q_3$  für jeden Zeitpunkt berechnet, bekommt man die Entwicklung der Partikelverteilung und kann sie mit der gemessenen vergleichen. Auf der nächsten Abbildung ist die berechnete Entwicklung der Partikelgrößenverteilung dargestellt.



**Abb. 7.14:** Berechnung der Summenverteilung der Wirbelschichtmasse

Auf der Abbildung 7.15 ist die gemessene Partikelgrößenverteilung bei 40 h mit der entsprechenden berechneten verglichen.



**Abb. 7.15:** Vergleich zwischen der berechneten und der gemessenen Partikelgrößenverteilung

## 7.5 Vorbehandlung und Bearbeitung des Materials zur Verminderung des Abriebs

Bei den verschiedenen Belastungen, denen die Partikel in der Wirbelschicht ausgesetzt sind, können Veränderungen im Spektrum und auch in der Struktur der Partikel auftreten. Dafür spielt die Festigkeit der Partikel eine sehr große Rolle. Manchmal kann man bewußt die Festigkeit beeinflussen, da bei vielen Prozessen die Partikel möglichst lange unverändert bleiben müssen. Die Vorbehandlung z.B. kann den Abriebskoeffizienten erniedrigen. Partikel mit einer unregelmäßigen Form durch scharfe Kanten und Ecken weisen einen kleinen Anfangszerfallswiderstand auf. Die Kugelgestalt dagegen und auch glatten Oberflächen sind weniger zerfallanfällig.

Das vorherige Entfeuchten, bevor die Partikel im Prozeß eingesetzt werden, führt zu niedrigeren Abriebskoeffizienten.

Die Festigkeits- und Abriebeigenschaften der Partikel lassen sich nur bedingt verändern, da sie von der „Hauptaufgabe“ der Partikel (Katalyse, Adsorption, Desorption usw.) bestimmt werden. Die Entwicklung von abriebfesten Partikeln zur Katalyse, Adsorption und Desorption kann durch eine Umhüllung der Partikel erfolgen [62, 87]. Der Partikelkern übernimmt die Prozessaufgabe (z. B. katalytisch aktiver Kern), eine poröse durchlässige Schale erhöht die Abriebfestigkeit. Die Partikel können bis zu einer minimalen Umhüllungsdicke, d.h. bis zu  $d_{p,A}$  in der Wirbelschicht verbleiben, und werden bei Unterschreitung ausgetragen. Sie können außerhalb des Apparates erneut beschichtet und der Wirbelschicht wieder zugeführt werden.

Der Abrieb von Molekularsieben wurde z. B. in [98] in einer Wirbelschicht festgestellt. Die Hinzuführung von festen Schmiermitteln, z. B. Graphit, Molybdädisulfid und Polytetrafluoroäthylen, in Form von feinen Pulvern, verringert das Verschleißmaß. Ihre Wirksamkeit hängt von der Größe des Koeffizienten der Friktion und der Konzentration ab.

Die Größe der Partikel kann auch einen Einfluß auf ihre Festigkeit haben [80]. Einerseits gilt je kleiner die Partikel sind, desto weniger Fehlstellen besitzen sie. Die Wahrscheinlichkeit, daß kleine Teilchen abreiben, ist kleiner. Andererseits wird die Wirbelgeschwindigkeit kleiner und damit reduziert sich das Blasenwachstum, das wiederum auf den Abriebskoeffizienten eine Auswirkung hat.



Bei Prozessen mit stationärer Fahrweise wird der Abrieb erwartungsgemäß kleiner als bei der zirkulierenden Wirbelschicht sein. Grund dafür sind die niedrigeren Gasgeschwindigkeiten bei der stationären Fahrweise. Im Gegensatz dazu arbeitet die zirkulierende Wirbelschicht bei hohen Gasgeschwindigkeiten, die viel mehr Abrieb hervorrufen.

Für eine bestimmte statische Betthöhe ist der Abriebskoeffizient konstant. Das zeigt, daß der Strahl dann völlig in das Bett eintaucht. Der Strahlabriebseffekt ist nur für ein begrenztes Bettvolumen gültig.

Eine Vorfluidisierung führt zur Abnahme der Abriebskoeffizienten. Eine Erklärung dafür könnte sein, daß der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Partikeln im Strahl und Partikeln in der umgebenden Schicht größer ist, wenn die Schicht keine Vorfluidisierung hat. Dieses führt zu größeren relativen Geschwindigkeiten, die wiederum die höheren Abriebskoeffizienten verursachen.

## 8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Literaturübersicht zum Kenntnisstand der Beurteilung der Kräfte und wirkenden Mechanismen, die den Vorgang der Partikelbeanspruchung in Wirbelschichten beeinflussen, dargelegt. Der erarbeitete aktuelle Kenntnisstand zum Zerfallsverhalten und zum Abrieb von Partikeln in Wirbelschichten soll zur Auswahl geeigneter Prüfverfahren beitragen. Die Literaturübersicht zeigt, daß die bis jetzt bekannten Kenntnisse über den Abrieb in Wirbelschichten nicht ausreichend sind, um den Abrieb einer großtechnischen Anlage vorausberechnen zu können. Viele Autoren haben den Abrieb untersucht, aber alle definieren eine eigene meistens Laborapparatur und untersuchen unterschiedliche Materialien. Das führt zur Schwierigkeiten für eine Modellentwicklung, die eine großtechnische Anlage gut beschreibt. Damit die Abschätzung des Abriebs im voraus ermöglicht wird, muß der Partikelabrieb unter möglichst prozeßnahen Bedingungen experimentell erfaßt werden. So eine Vorgehensweise wurde in dieser Arbeit beschrritten.

Von den Versuchen, die in einer Wirbelschicht gemacht worden sind, kann man folgende Schlußfolgerungen ableiten. Der Abriebskoeffizient steigt mit Zunahme der Fluidgeschwindigkeit. Der Abriebskoeffizient ist unabhängig vom Partikelgrößenbereich bei gleicher Überschußgeschwindigkeit und von der Schichtmasse.

Verfahren außerhalb der Wirbelschicht können sehr gut die den Zerfall bestimmenden Partikeleigenschaften untersuchen. Es ist wichtig diese Parameter zu kennen, denn sie wirken auch in der Wirbelschicht.

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Materialien ( Natriumpercarbonat und das selbst hergestellte Granulat ) untersucht.

Natriumpercarbonat wurde bei verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten an der Wirbelschichtanlage DN 150 untersucht. Durch die Versuche kann man feststellen, daß Natriumpercarbonat ein abriebfestes Material ist. Das ist auch durch seine Struktur erklärbar [62]. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde festgestellt, daß in dieser Wirbelschicht nur Abrieb vorkommt. Der Abriebskoeffizient steigt mit Zunahme der Arbeitsgeschwindigkeit. Es wurde eine exponentielle Beziehung gefunden. An dieser Stelle ist zu erwähnen, daß die Anlage stationär bei niedrigeren Arbeitsgeschwindigkeiten gefahren wurde. Die hohen Geschwindigkeiten gelten für zirkulierende Wirbelschichten. Es wurde festgestellt, daß der Abriebskoeffizient proportional der Überschußgeschwindigkeit  $(u-u_{mf})^3$  ist. Das

Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,99$  zeigt, daß sich die Meßwerte sehr gut durch eine Gerade annähern lassen. Der Vergleichsversuch mit abnehmender Schichtmasse zeigt, daß der Abriebskoeffizient bei einer konstanten und einer abnehmenden Schichtmasse mit dem Produkt Natriumpercarbonat gleich ist. Das bedeutet, daß der Abrieb, bezogen auf die Schichtmasse pro Zeiteinheit (min), für die beiden Fälle gleich ist. Allein der Austrag mit der Zunahme der Zeit ist bei der abnehmenden Schichtmasse größer im Vergleich zu der konstanten Schichtmasse. Man kann vermuten, daß das durch die Verminderung des Lückenvolumens infolge des abnehmenden Durchmessers der Schichtpartikel und die dadurch entstehende größere Blasenwirkung verursacht wird.

Die mit einer Sonde durchgeführte Vergleichsstaubmessung (selbst hergestelltes Granulat) hat ebenfalls den Abrieb in der Wirbelschicht nachgewiesen. Die Sondenmessung wurde mit drei unterschiedlichen Schichtmassen durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, daß die Schichtmasse keinen Einfluß auf den spezifischen Abrieb (stationäre Phase) hat. Es wurden auch Versuche mit ein und derselben Schichtmasse und unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit denen von Natriumpercarbonat verglichen.

Zur Beschreibung des Abriebs in der Wirbelschicht sind Modellvorstellungen abgeleitet worden.

In dieser Arbeit wurden zunächst mit einem selbst hergestellten Granulat experimentell die Abriebskoeffizienten ermittelt, die im Modell Verwendung finden.

Das entwickelte Modell ermöglicht unter vereinfachenden Voraussetzungen die Vorausberechnung des Abriebs bei einem kontinuierlichen Wirbelschichtprozeß, z.B. einer katalytischen Reaktion. Für so einen Prozeß ist es wichtig, daß man die Abnahmegeschwindigkeit des Partikeldurchmessers, die Schichtmasse, die Oberfläche, die Teilchenanzahl, die Aufenthaltszeit von Partikeln und den erforderlichen Partikelmassenstrom vorausberechnen kann.

In der Arbeit wurden verschiedene Betrachtungsweisen dargestellt. Es wurde mit einem konstanten und einem zeitabhängigen Abriebskoeffizienten gearbeitet. Dabei wurde sowohl von einem oberflächenbezogenen als auch von einem massenbezogenen Abriebskoeffizienten ausgegangen. Die entsprechenden Modellgleichungen wurden abgeleitet. Es gibt eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten für den Partikeldurchmesser und für die Schichtmasse. Eine Erhöhung der Genauigkeit könnte durch Verbesserung der

Meßtechnik erreicht werden. Damit ist gemeint, daß die Teilchenzahl der Partikel in der Schicht zum jeweiligen Zeitpunkt aus den entsprechenden Partikelgrößenverteilungen ermittelt wird, was durch die Meßfehler bei der Bestimmung des Partikelspektrums beeinflußt wird. Ein weiteres Problem ist die genaue Bestimmung der scheinbaren Dichte.

Die Dichteänderung des Granulates im Laufe der Beanspruchung in der Wirbelschicht wurde in die Modellierung einbezogen.

Eine Vorgehensweise für die Berechnung der Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit wurde beschrieben.

Es wurden Maßnahmen, die zur Verminderung des Abriebs führen, vorgeschlagen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß in der vorliegenden Arbeit, ausgehend vom Stand der Literatur eine Modellvorstellung erarbeitet wurde, die es ermöglichen soll, den Abrieb der Feststoffteilchen in einer blasenbildenden stationären Wirbelschicht vorauszuberechnen. Grundlage dieser Modellvorstellung ist die Formulierung eines Abriebskoeffizienten, der zeitabhängig sein kann. Es wurde experimentell nachgewiesen, daß insbesondere bei neuen Partikeln dieser Koeffizient zunächst nach einer Potenzfunktion abnimmt (1. Phase) und sich danach einem stationären Wert annähert (2. Phase). Bei der Herleitung der Modellvorstellung wurden zwei Ansätze verwendet:

1. Der Abrieb ist der in der Schicht vorhandenen Feststoffoberfläche proportional.
2. Der Abrieb ist der Masse der Teilchen in der Wirbelschicht proportional.

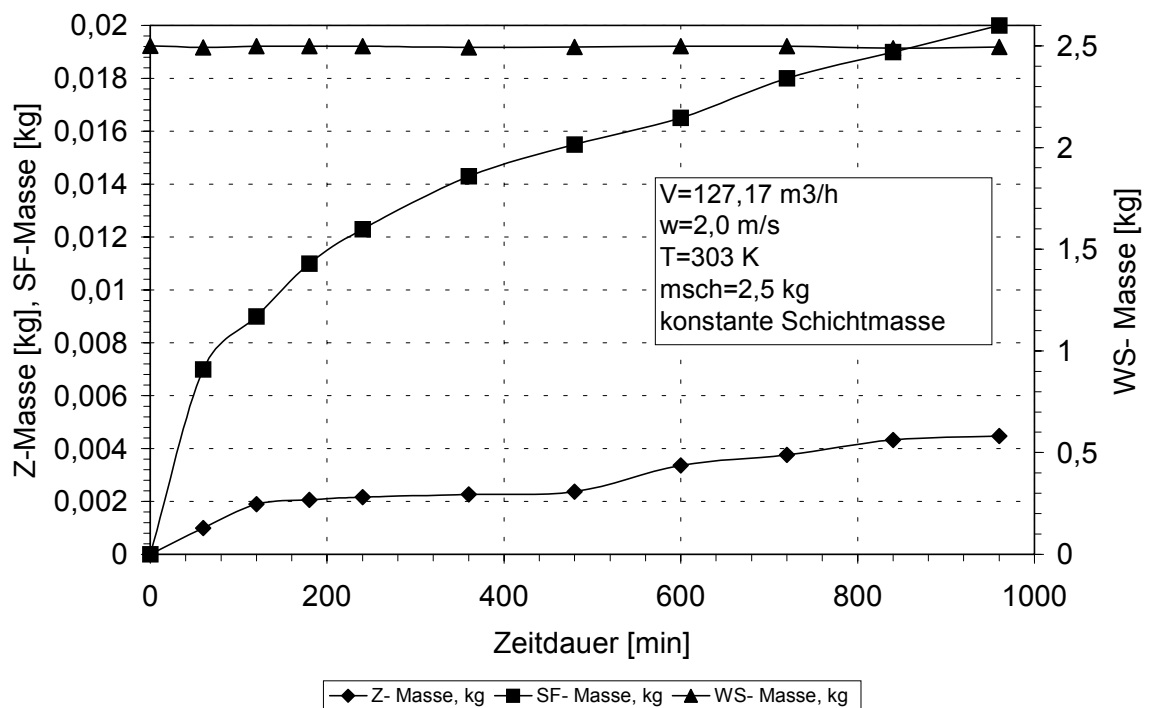
Für beide Annahmen wurden die geschlossenen analytischen Lösungen der entsprechenden Differentialgleichungen hergeleitet. Die experimentellen Untersuchungen zeigten, daß die Vorgehensweise recht gut mit der Theorie übereinstimmt. Die endgültige Entscheidung, welches der beiden Modelle besser mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt, muß jedoch weiteren Arbeiten mit verbesserter Meßtechnik vorbehalten bleiben.

## Anhang

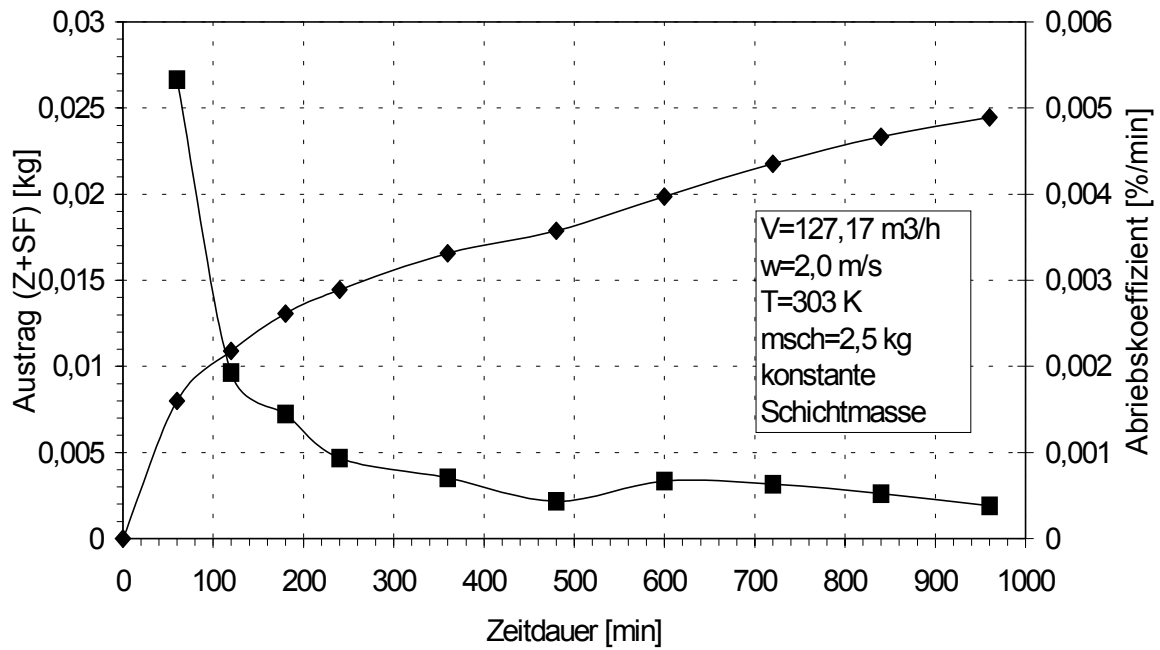
- Anhang 1:** Bild der Wirbelschichtanlage DN 150 und Meßergebnisse mit Natriumpercarbonat
- Anhang 2:** Partikelgrößenverteilungen von Natriumpercarbonat (Laserbeugungsspektrometer HELOS)
- Anhang 3:** Tabellen der Messung des Partikelkollektives (selbst hergestelltes Granulat)
- Anhang 4:** Partikelgrößenverteilungen von dem selbst hergestellten Granulat (EKGM)
- Anhang 5:** Partikelgrößenverteilungen (TOPAS)
- Anhang 6:** Tabellen von der Sondenmessung
- Anhang 7:** Rasterelektronenmikroskopaufnahmen



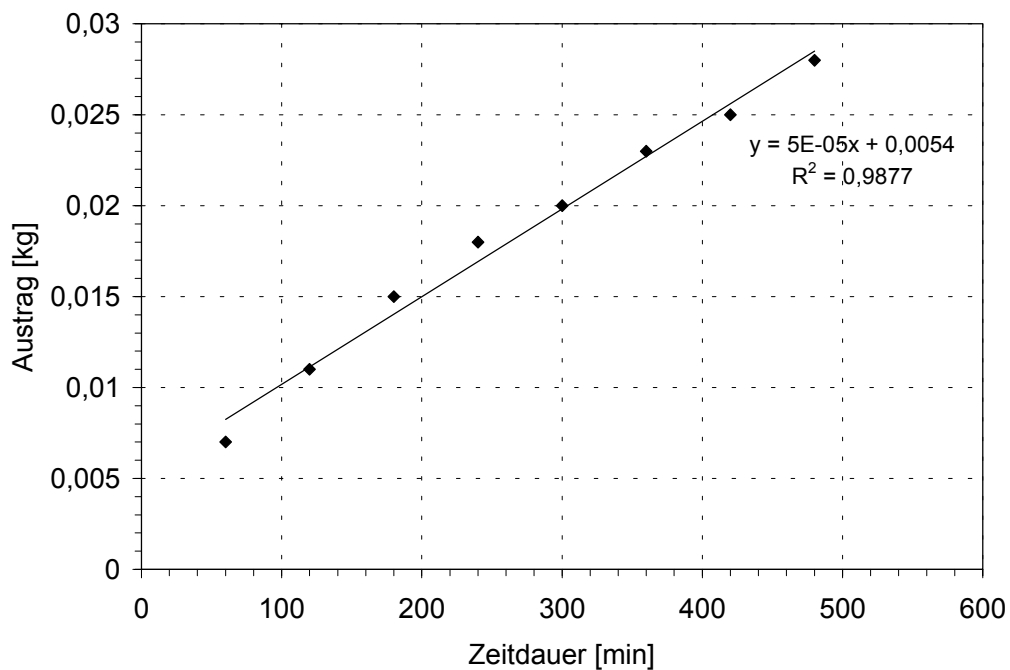
**Bild 1:** Wirbelschichtversuchsanlage DN 150



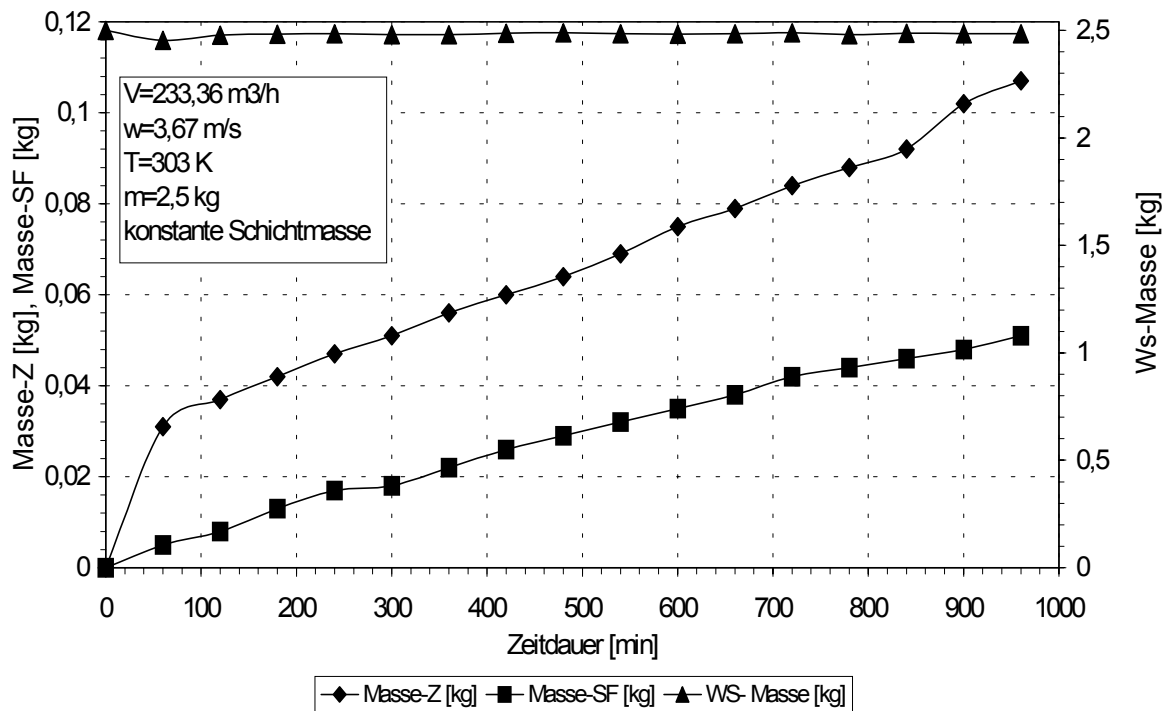
**Bild 2:** Masseänderung von Natriumpercarbonat bei  $w=2$  m/s in Abhängigkeit von der Zeit



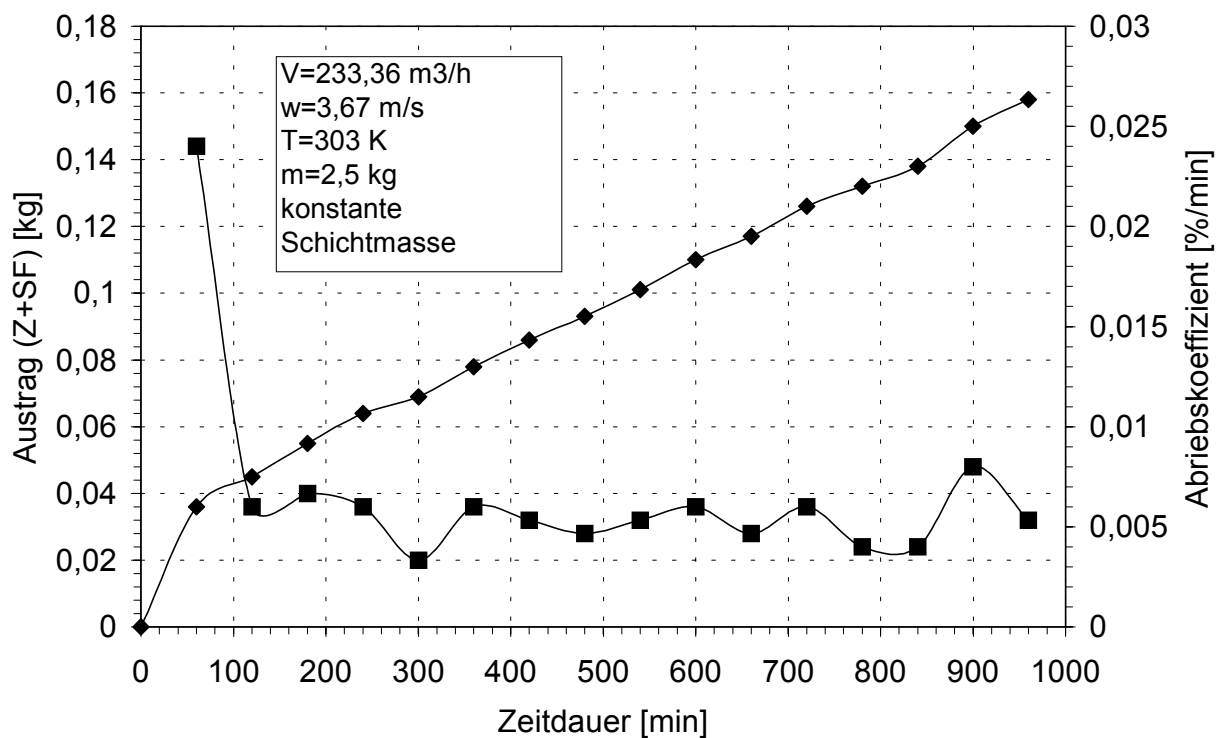
**Bild 3:** Gesamte Austragsmasse und Abriebskoeffizient von NPC bei  $w=2\text{m/s}$  in Abhängigkeit von der Zeit



**Bild 4:** Der Austrag bei  $w=2,5 \text{ m/s}$  und  $m_{sch}=3,5 \text{ kg}$  in Abhängigkeit von der Zeit

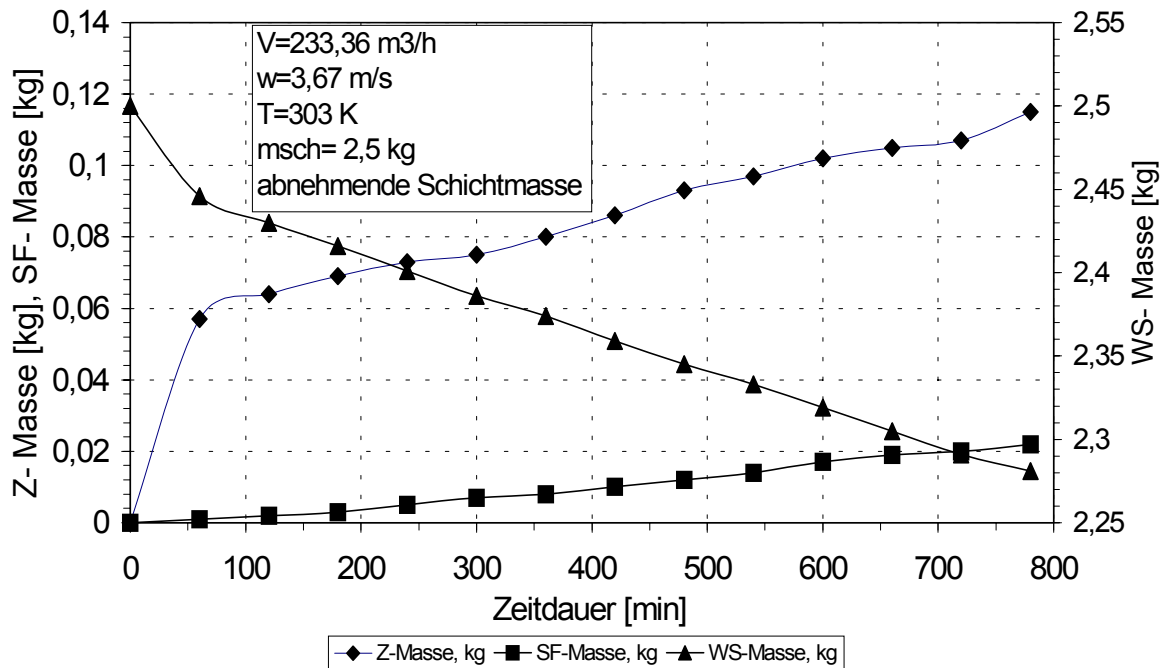


**Bild 5:** Massenänderung von NPC bei  $w=3,67$  m/s und  $m_{sch}=2,5$  kg in Abhängigkeit von der Zeit

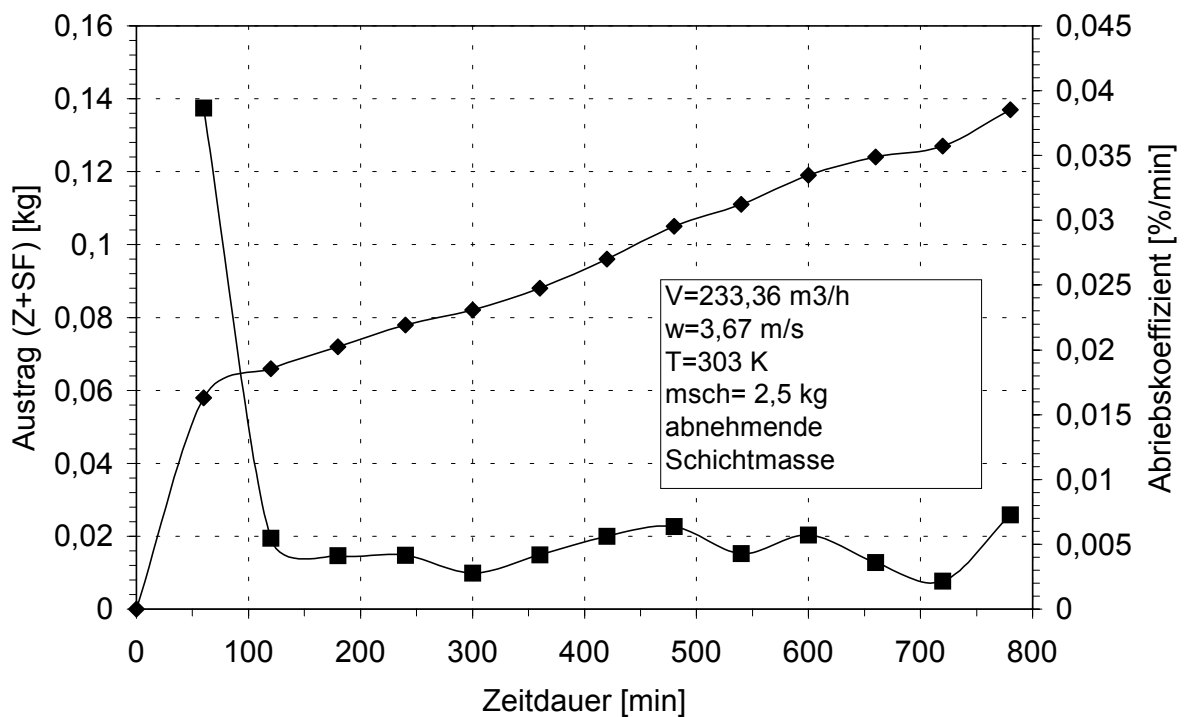


**Bild 6:** Gesamte Austragsmasse und Abriebskoeffizient bei  $w=3,67$  m/s und  $m_{sch}=2,5$  kg in Abhängigkeit von der Zeit

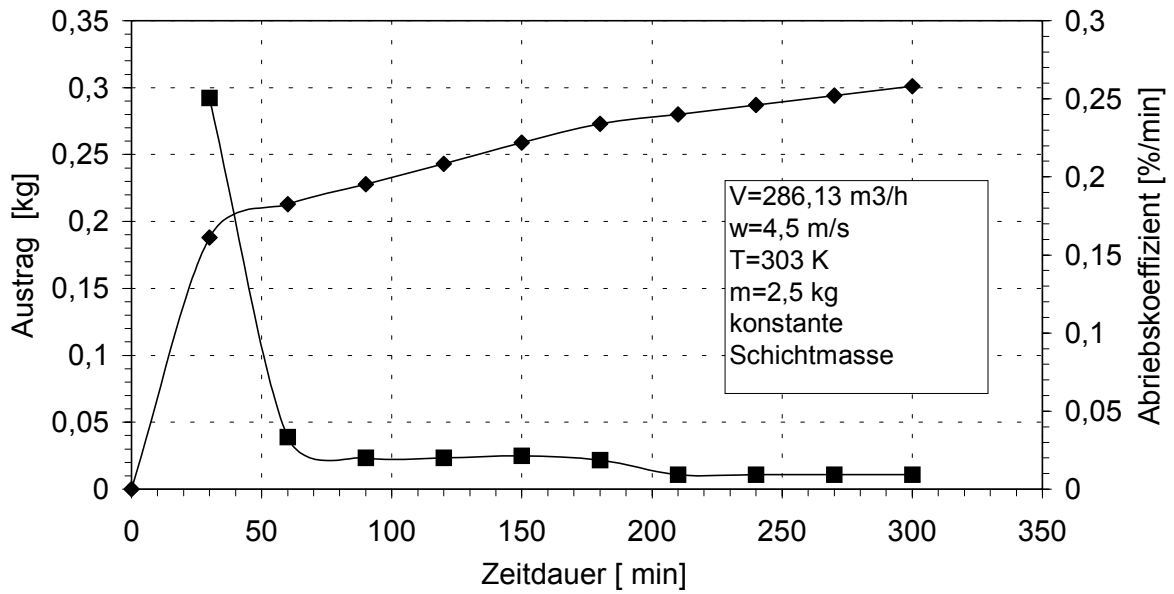




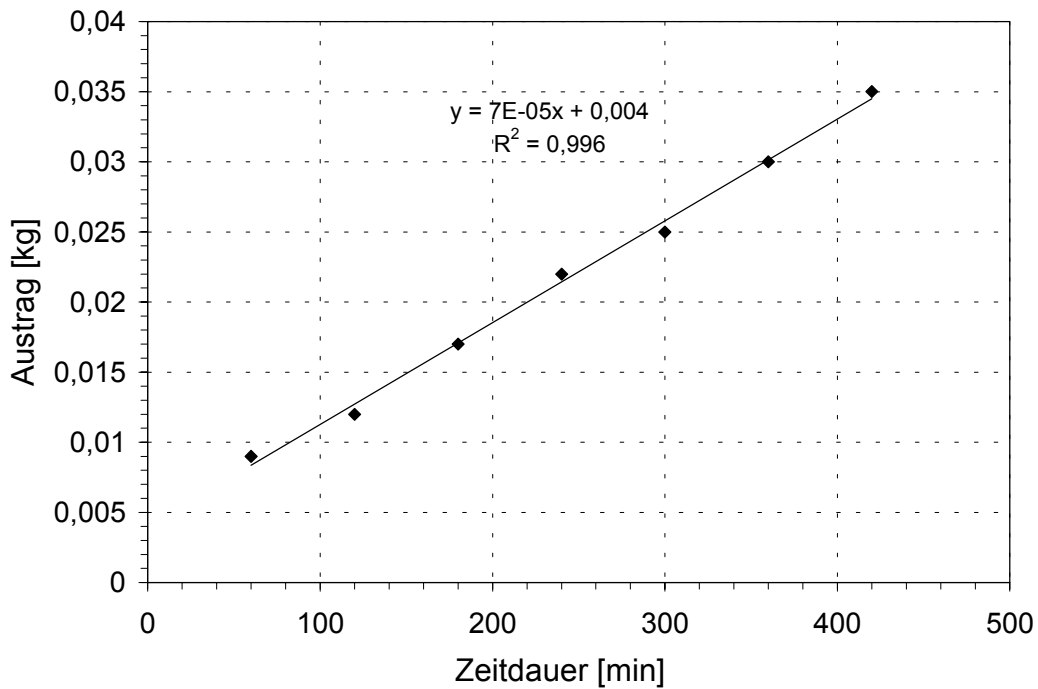
**Bild 7:** Massenänderung von NPC bei  $w=3,67 \text{ m/s}$  und  $m_{sch}=2,5 \text{ kg}$  (abnehmende Schichtmasse) in Abhängigkeit von der Zeit



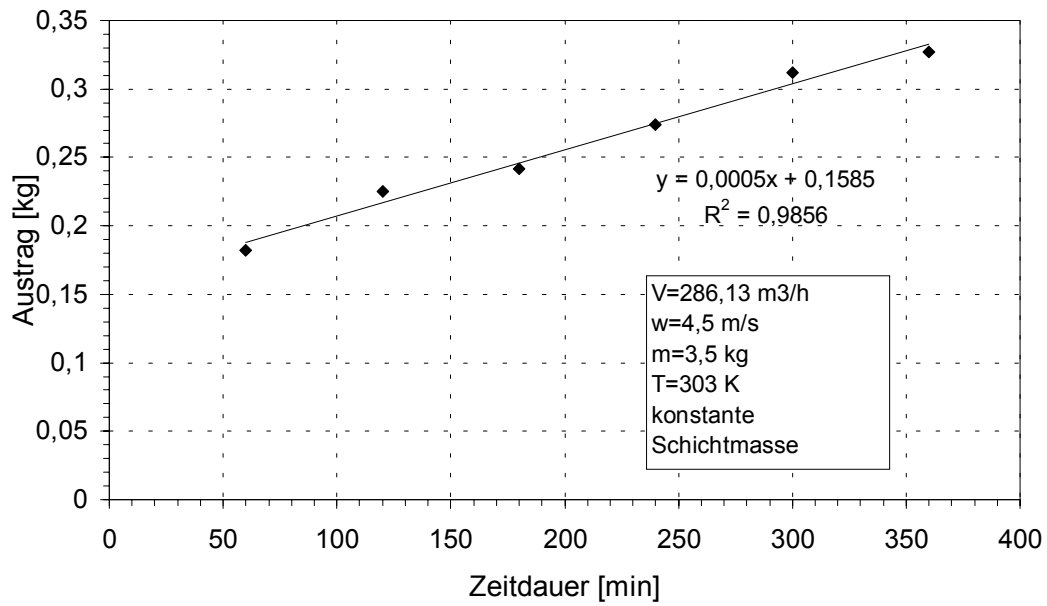
**Bild 8:** Gesamte Austragsmasse und Abriebskoeffizient bei  $w=3,67 \text{ m/s}$  und  $m_{sch}=2,5 \text{ kg}$  (abnehmende Schichtmasse) in Abhängigkeit von der Zeit



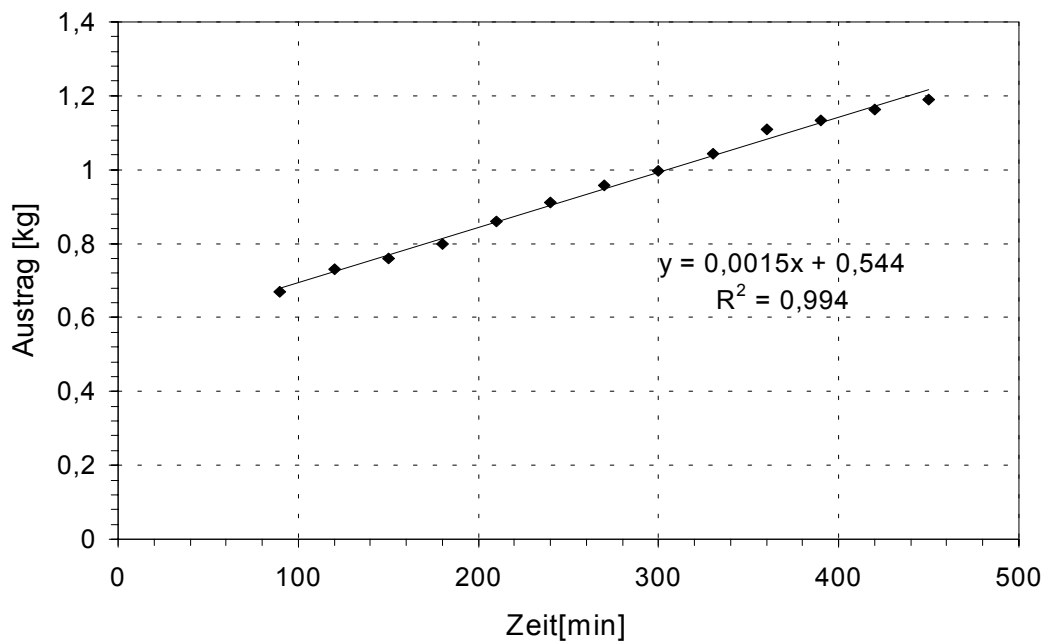
**Bild 9:** Gesamte Austragsmasse und Abriebskoeffizient bei  $w=4,5$  m/s und  $m_{sch}=2,5$  kg in Abhängigkeit von der Zeit



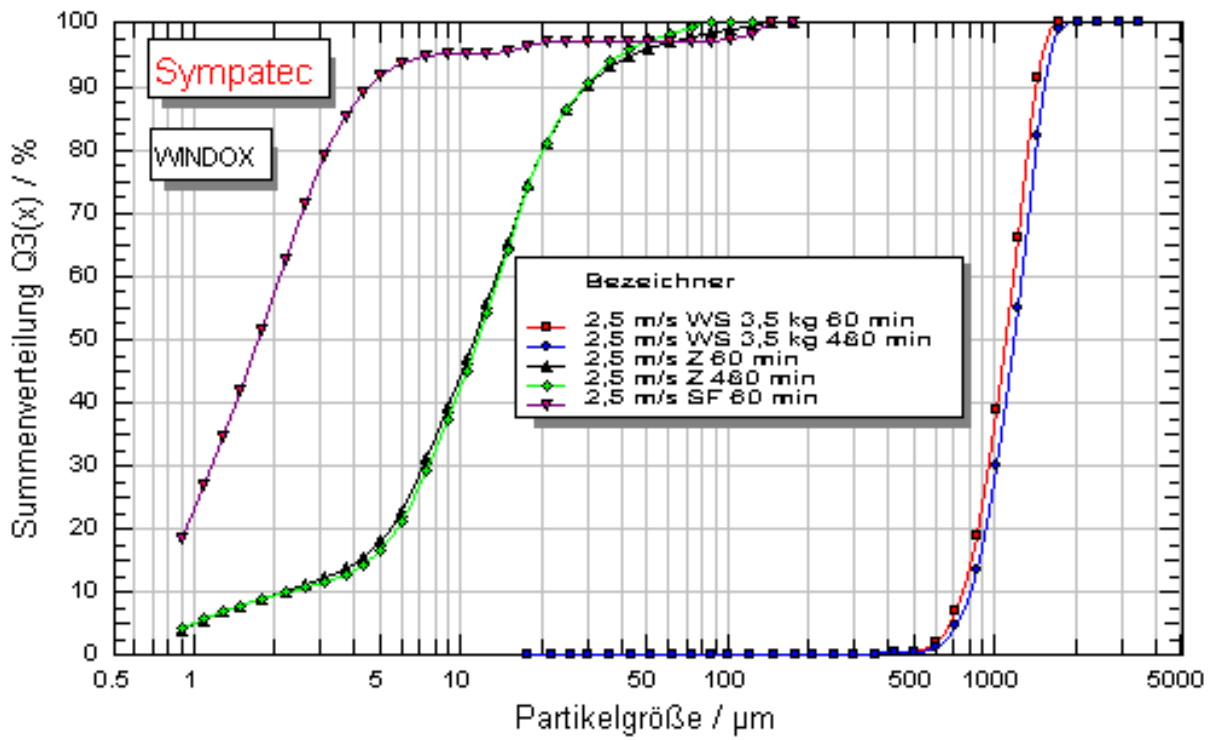
**Bild 10:** Der Austrag bei  $w=3,2$  m/s und  $m_{sch}=3,5$  kg in Abhängigkeit von der Zeit



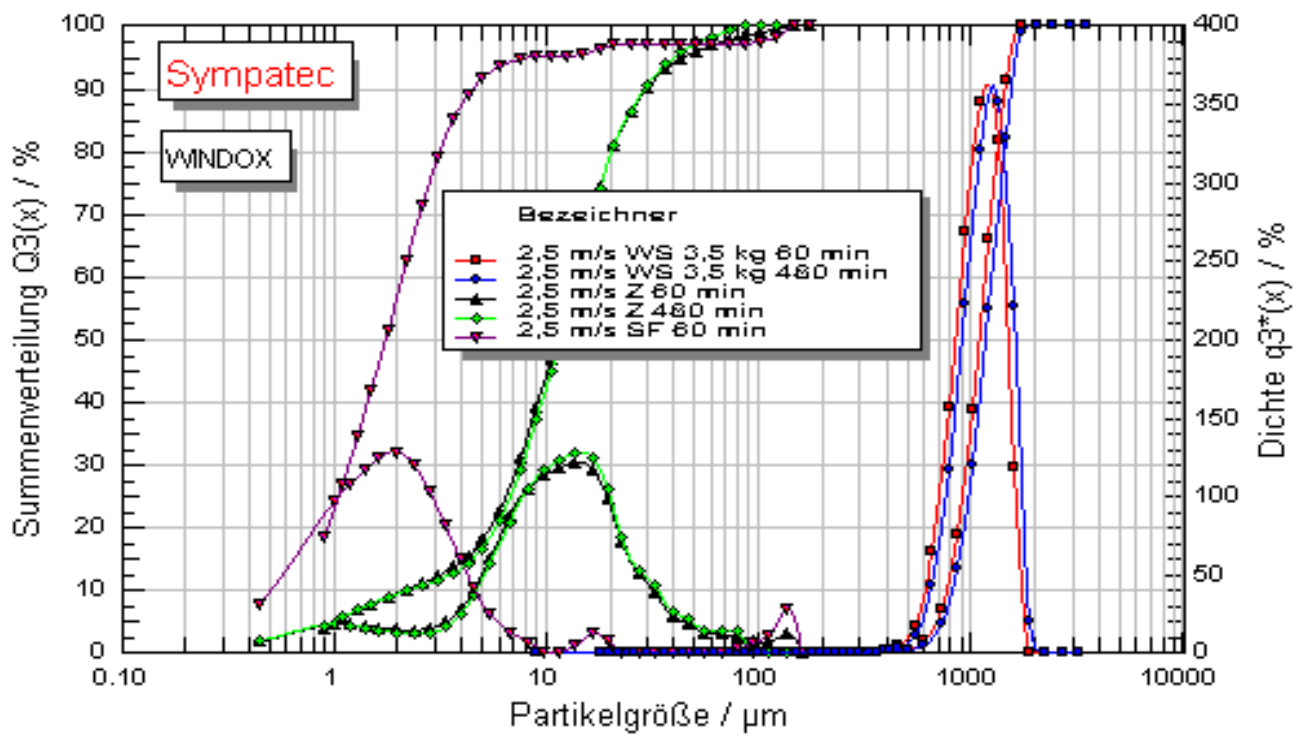
**Bild 11:** Der Austrag bei  $w=4,5$  m/s und  $m_{sch}=3,5$  kg in Abhängigkeit von der Zeit



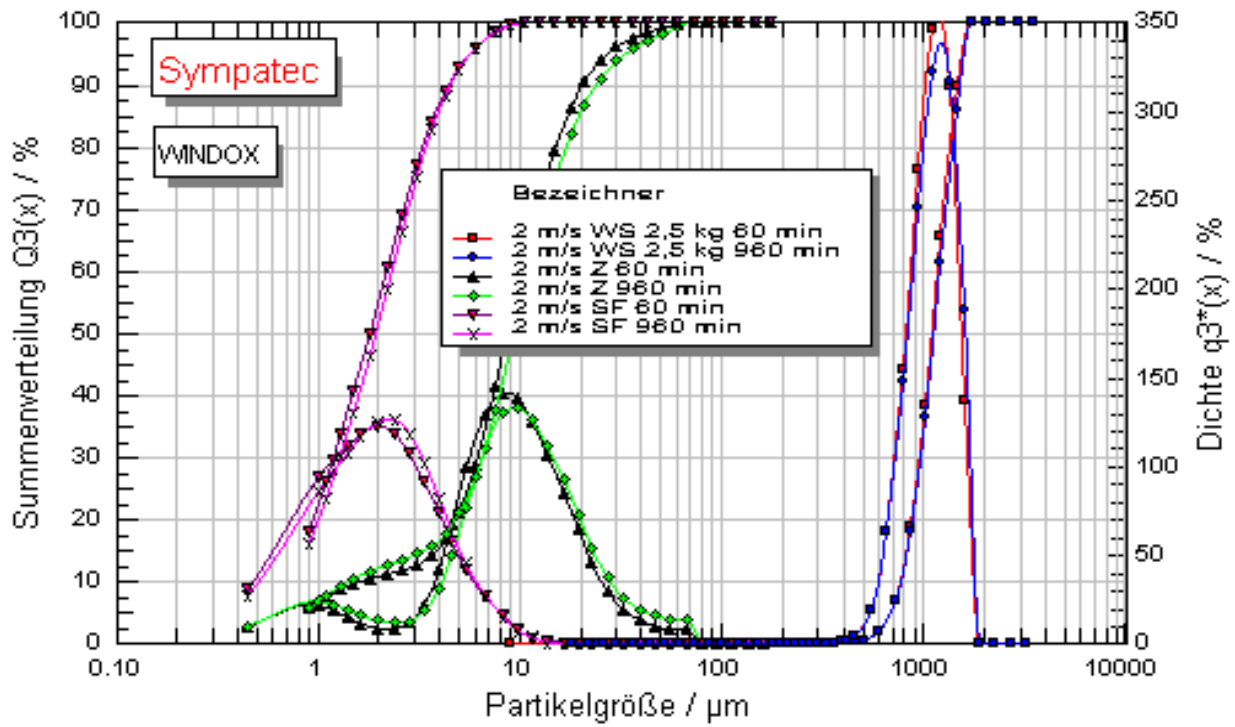
**Bild 12:** Der Austrag bei  $w=5,5$  m/s und  $m_{sch}=2,5$  kg in Abhängigkeit von der Zeit



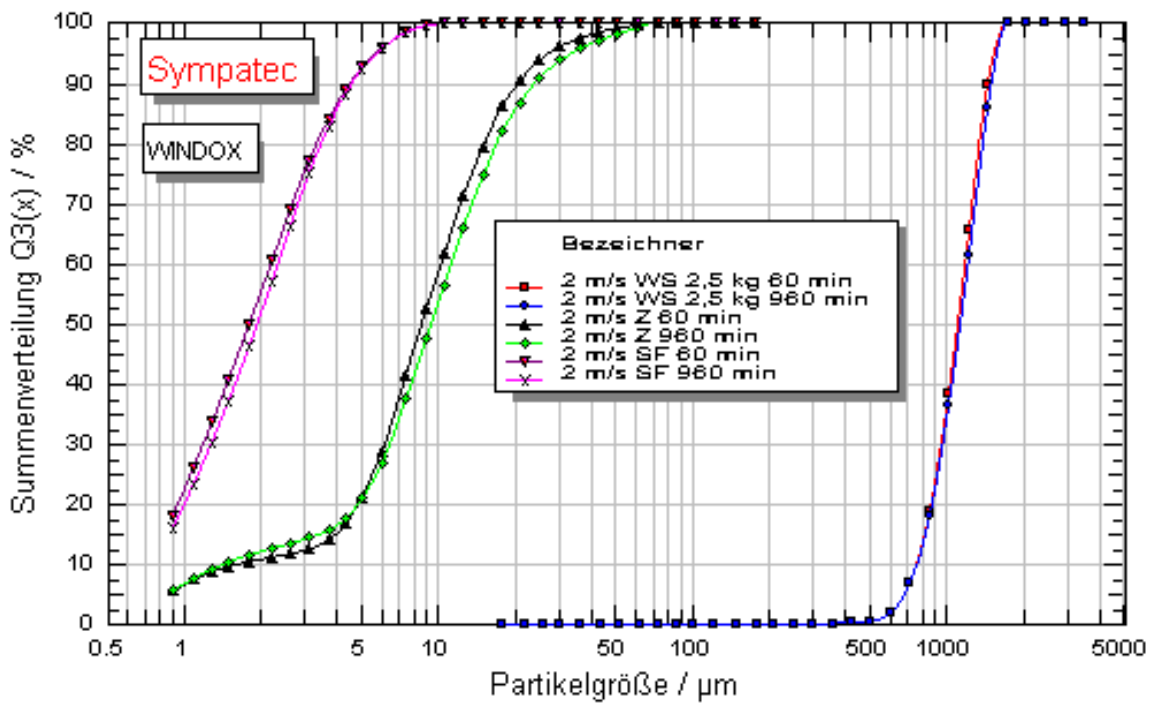
**Bild 1:** Summenverteilung von Natriumpercarbonat (NPC)



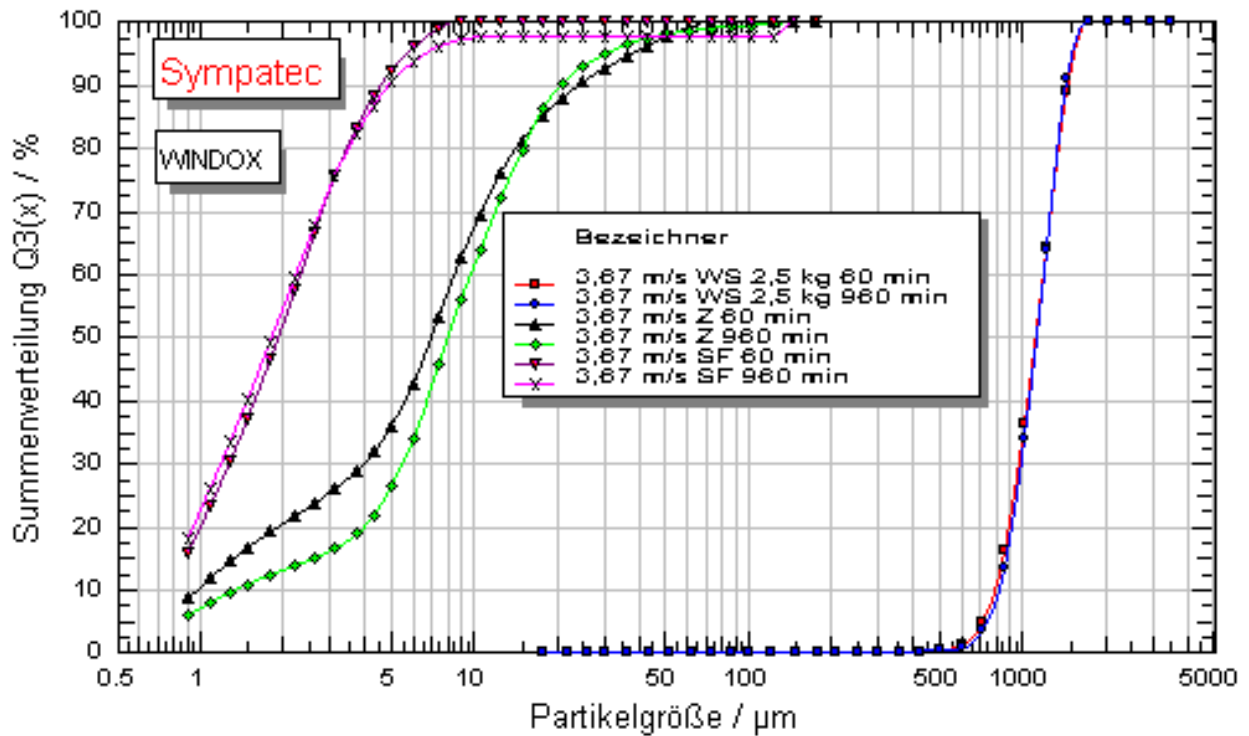
**Bild 2:** Dichteverteilung von NPC



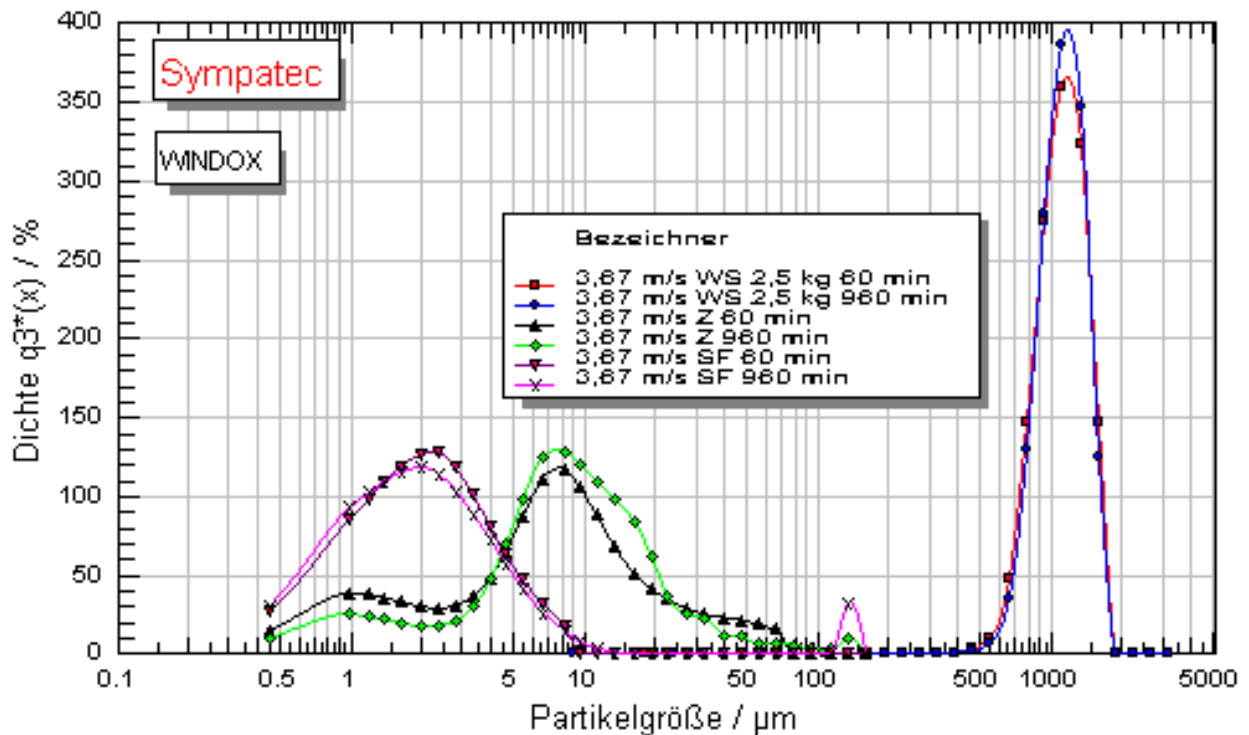
**Bild 3:** Dichte- und Summenverteilung von NPC



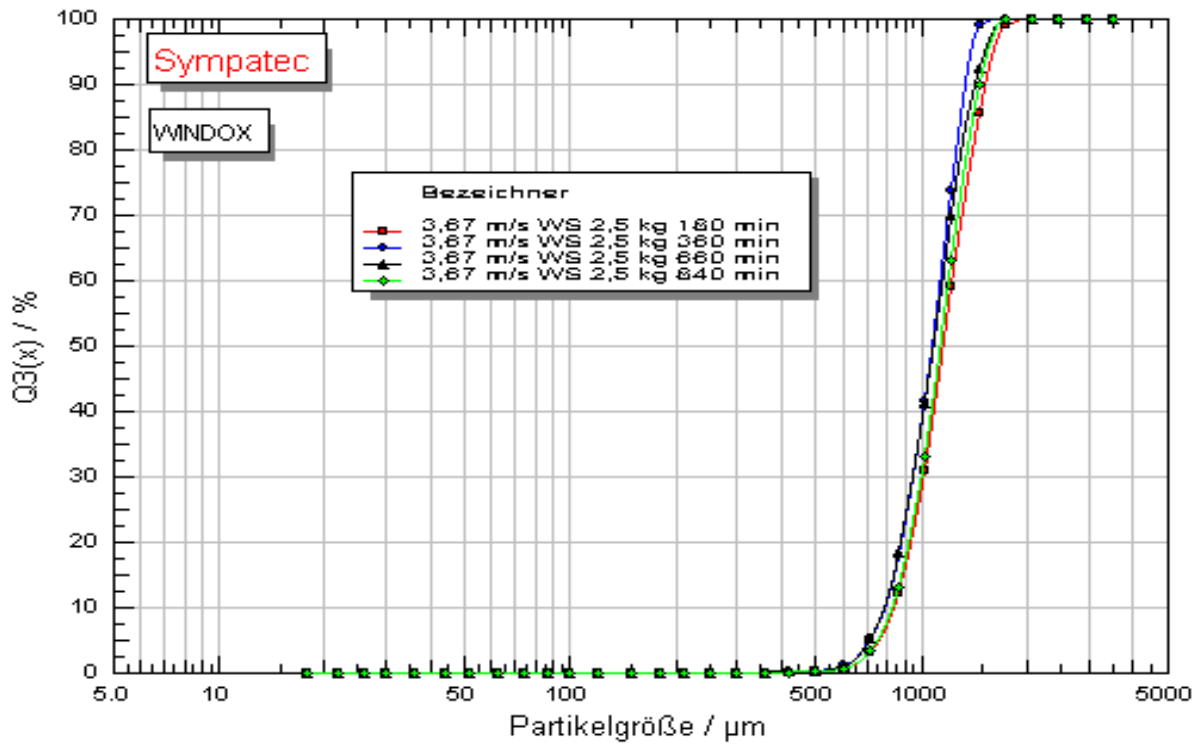
**Bild 4:** Summenverteilung von NPC



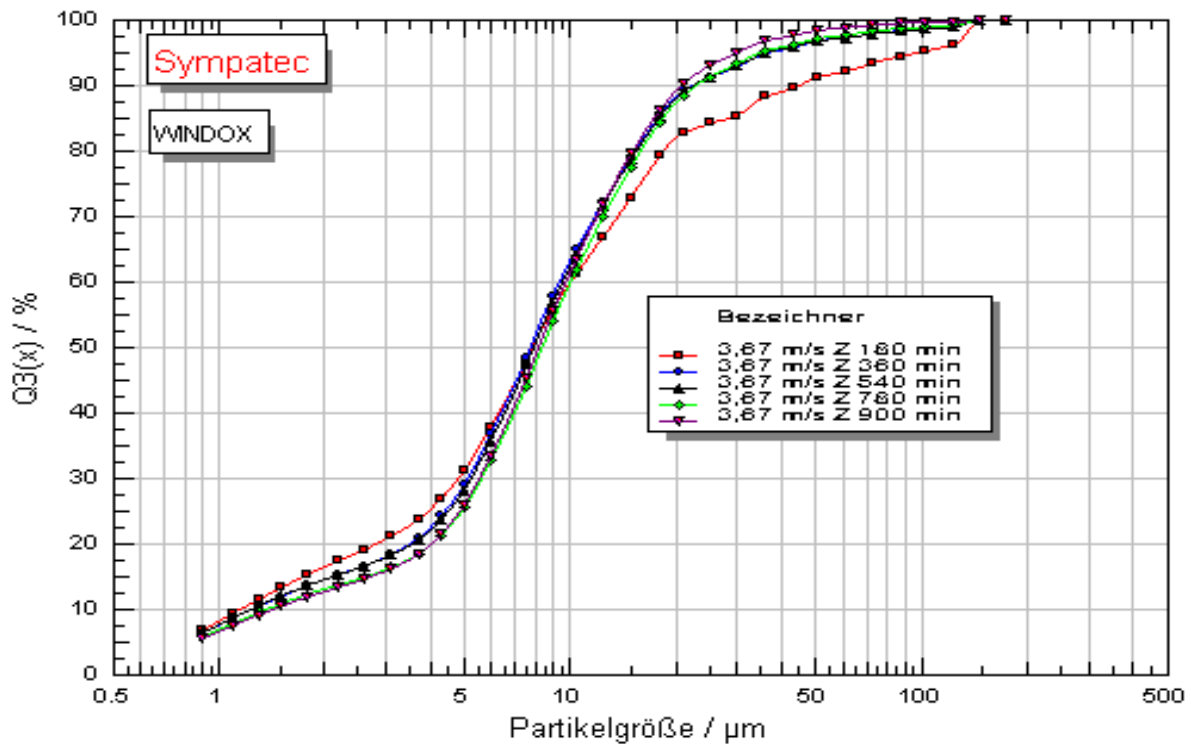
**Bild 5:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts am Anfang und am Ende des Versuches



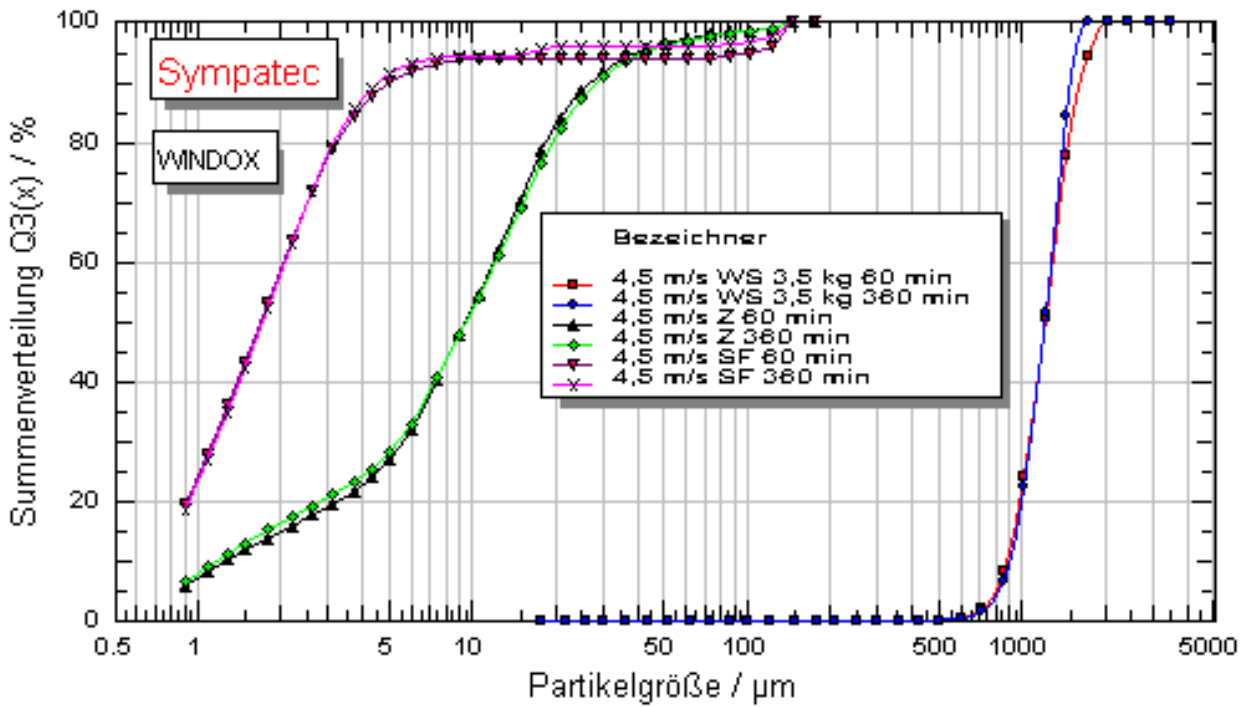
**Bild 6:** Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts am Anfang und am Ende des Versuches



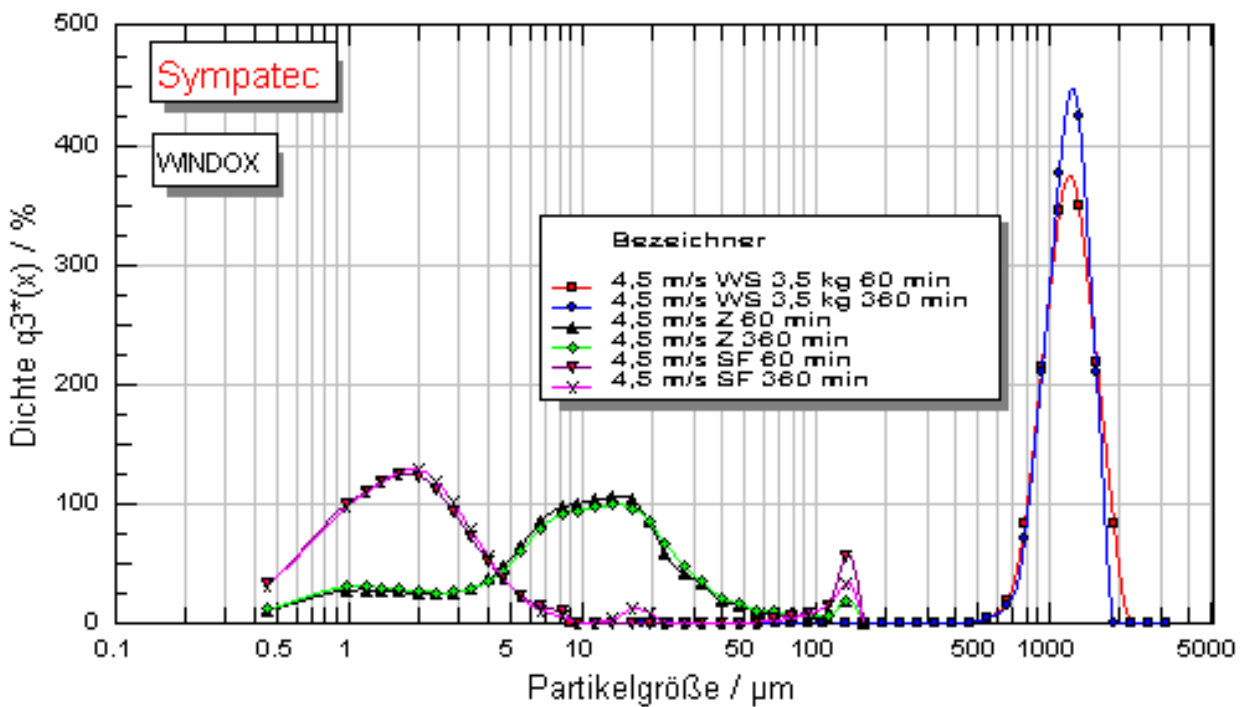
**Bild 7:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



**Bild 8:** Summenverteilung des Zyklonprodukts bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches

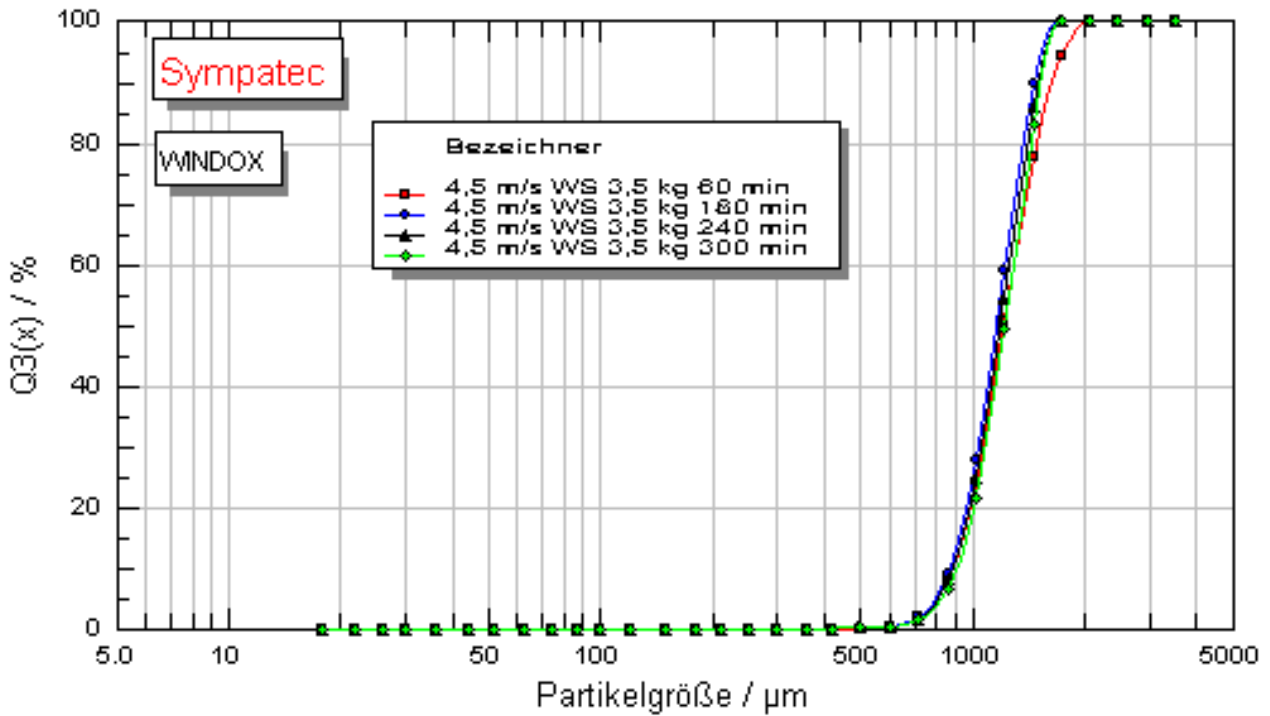


**Bild 9:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts am Anfang und am Ende des Versuches

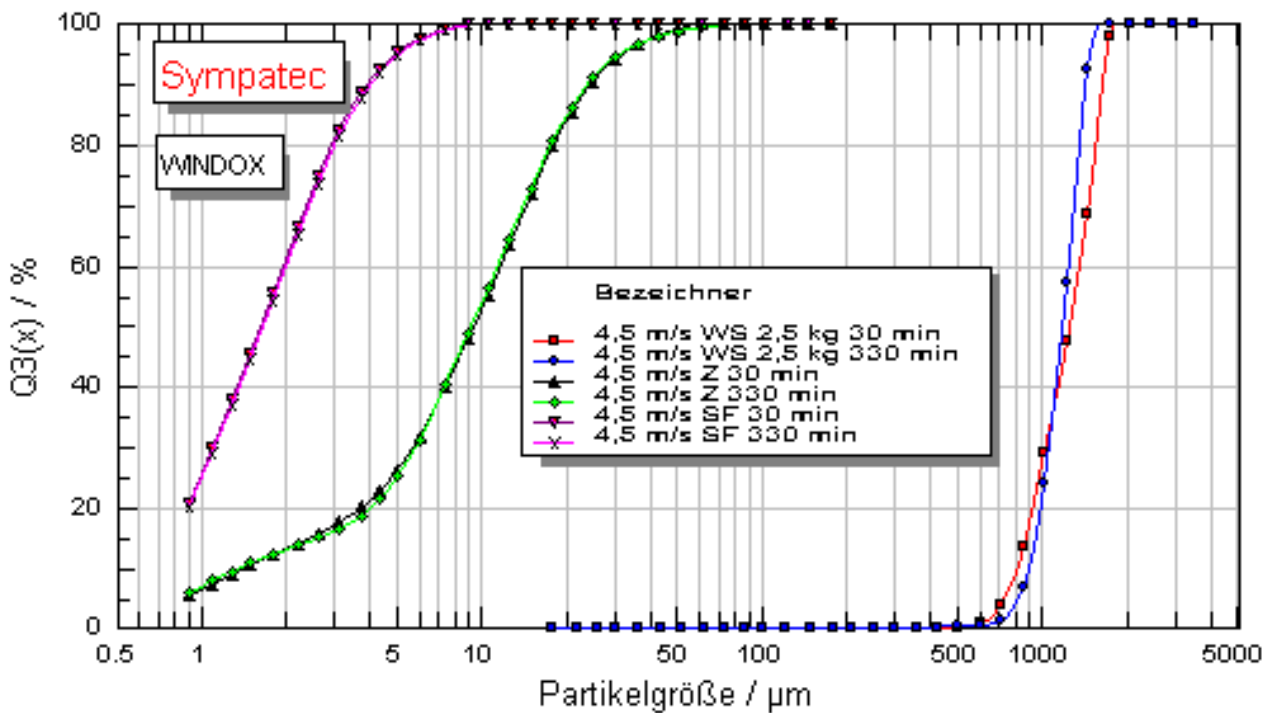


**Bild 10:** Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts

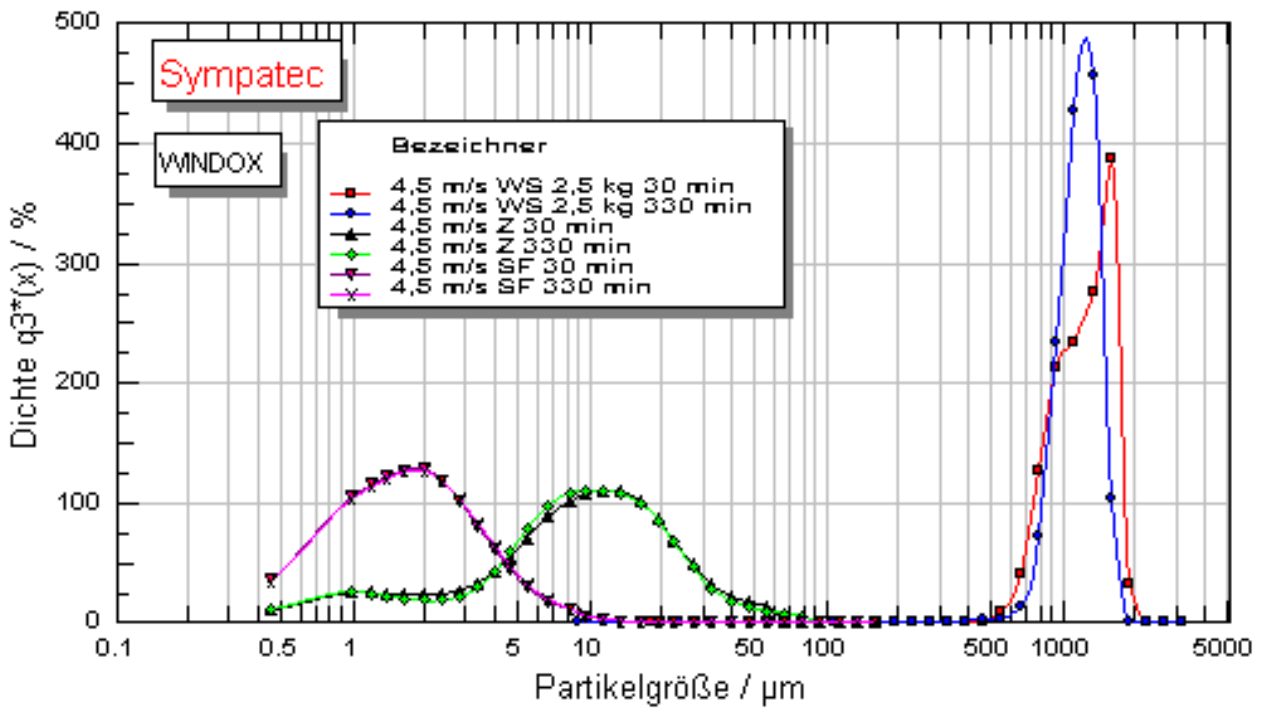




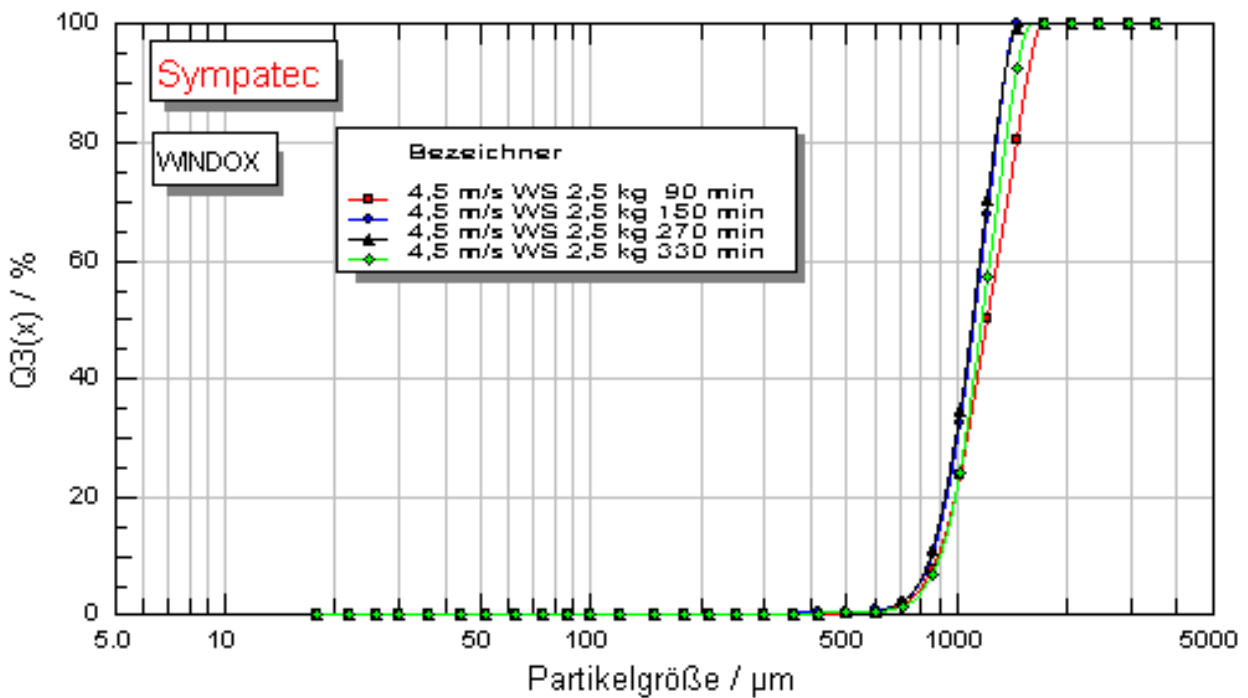
**Bild 11:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



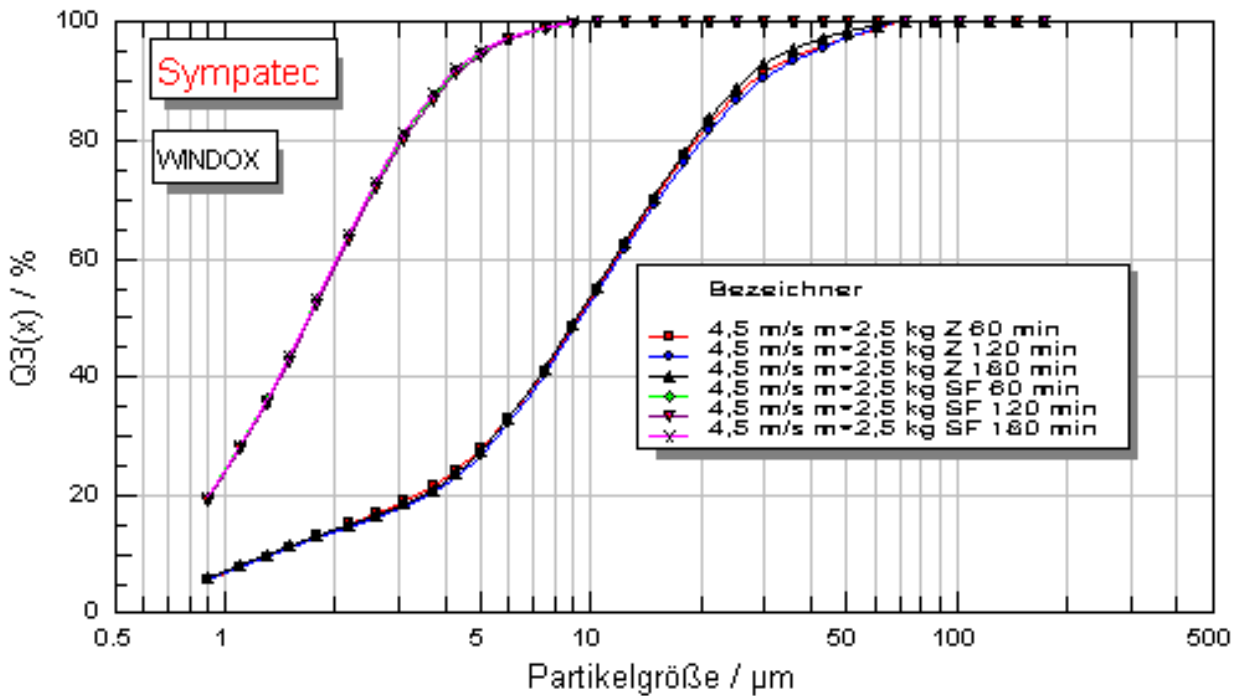
**Bild 12:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts am Anfang und am Ende des Versuches



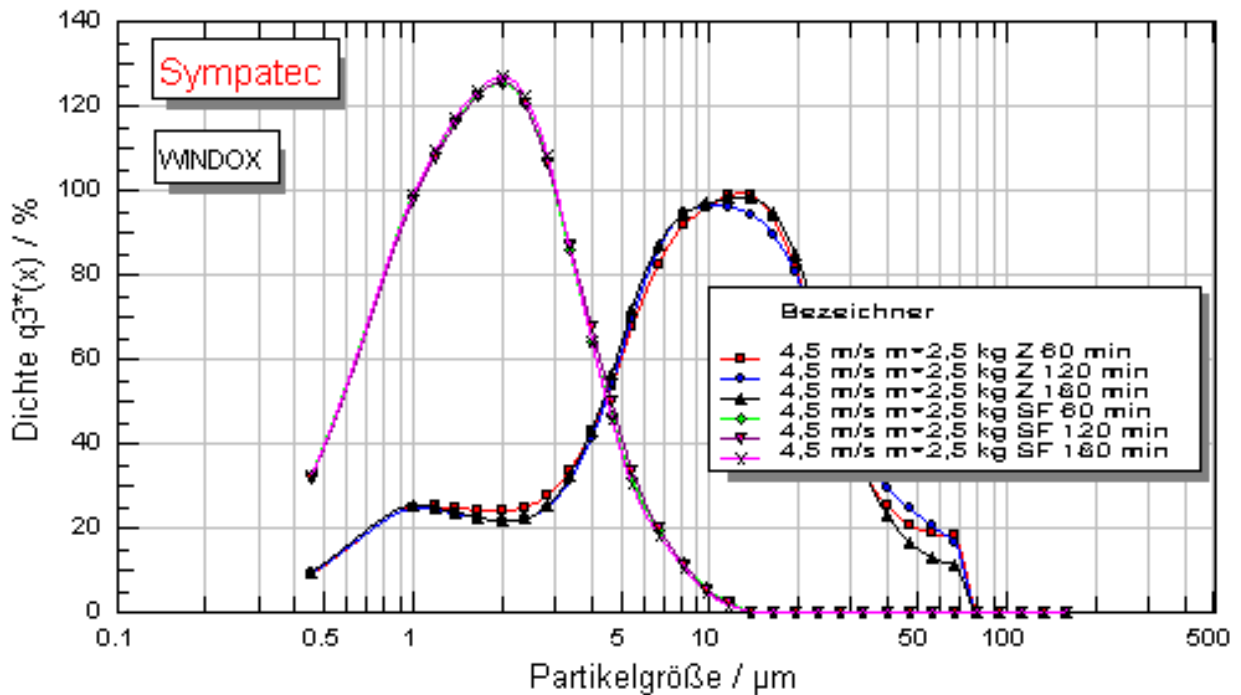
**Bild 13:** Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts am Anfang und am Ende des Versuches



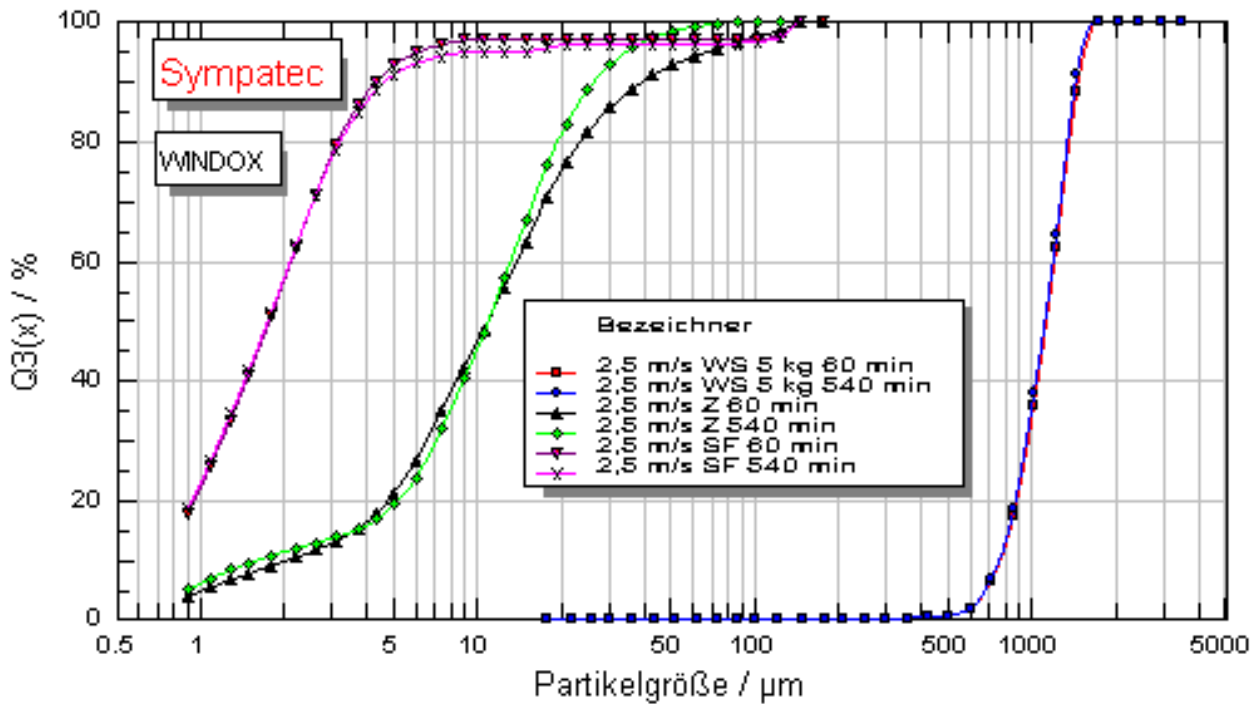
**Bild 14:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



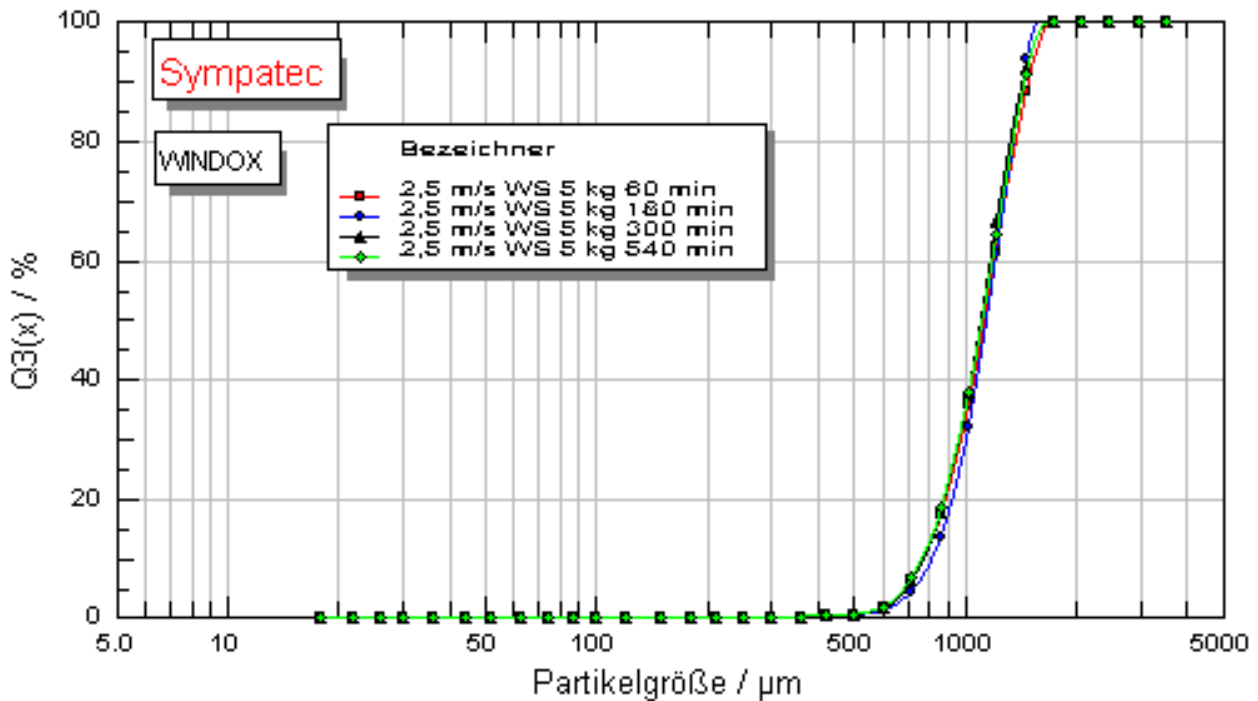
**Bild 15:** Summenverteilung des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



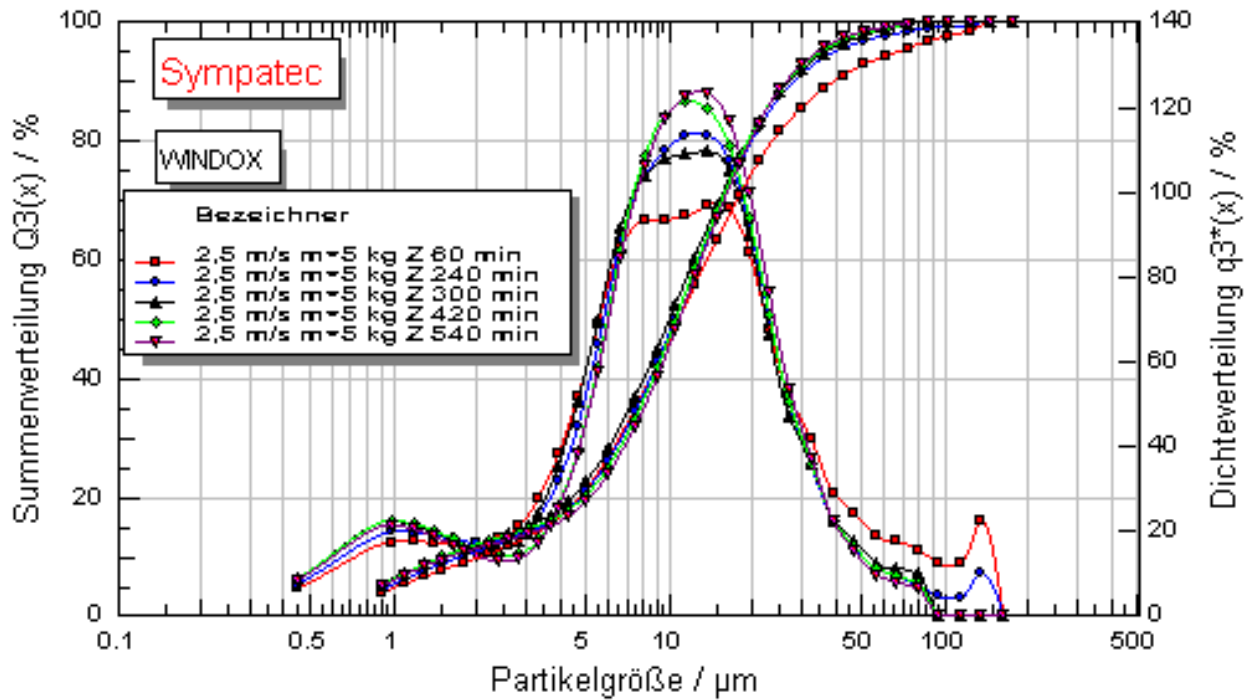
**Bild 16:** Dichteverteilung des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



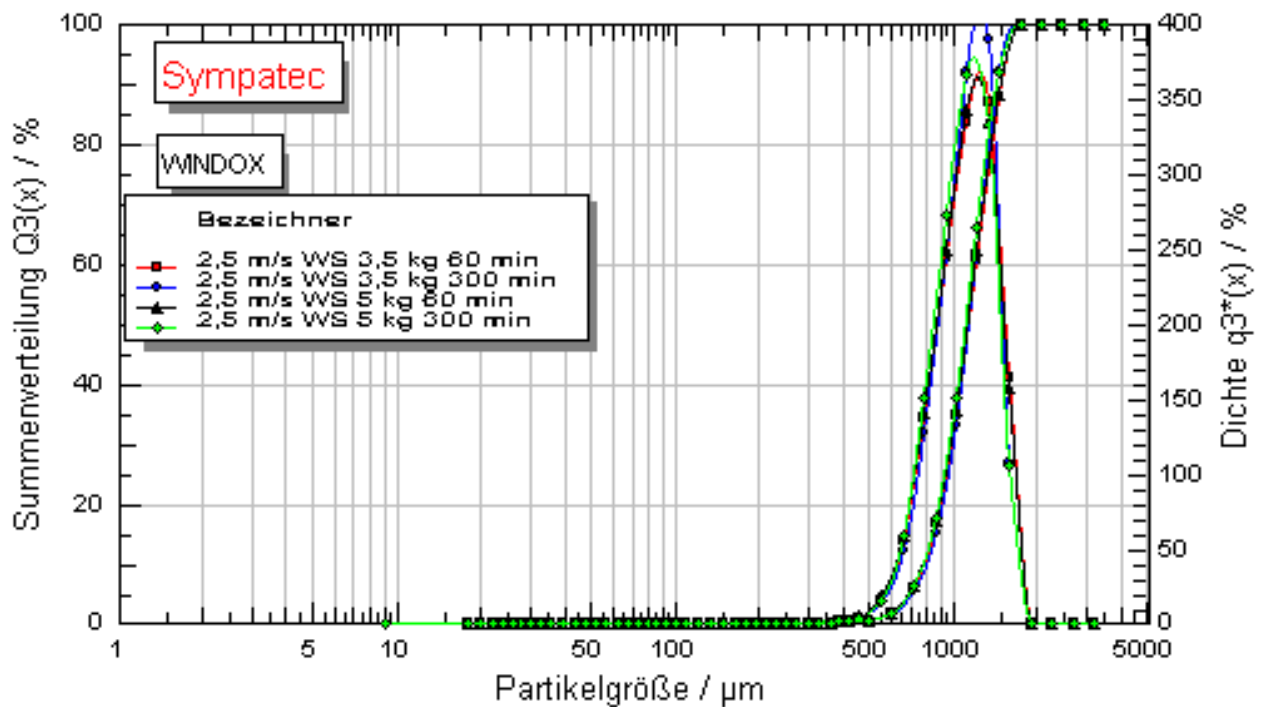
**Bild 17:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts am Anfang und am Ende des Versuches



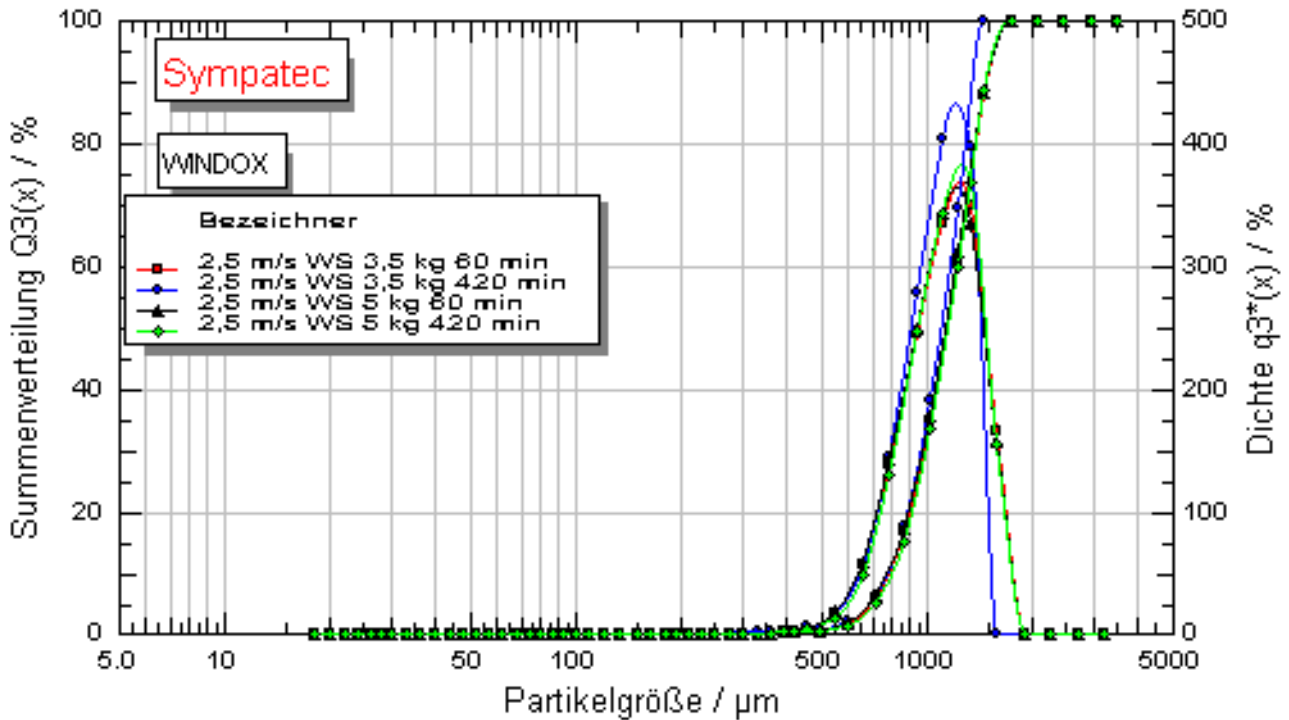
**Bild 18:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



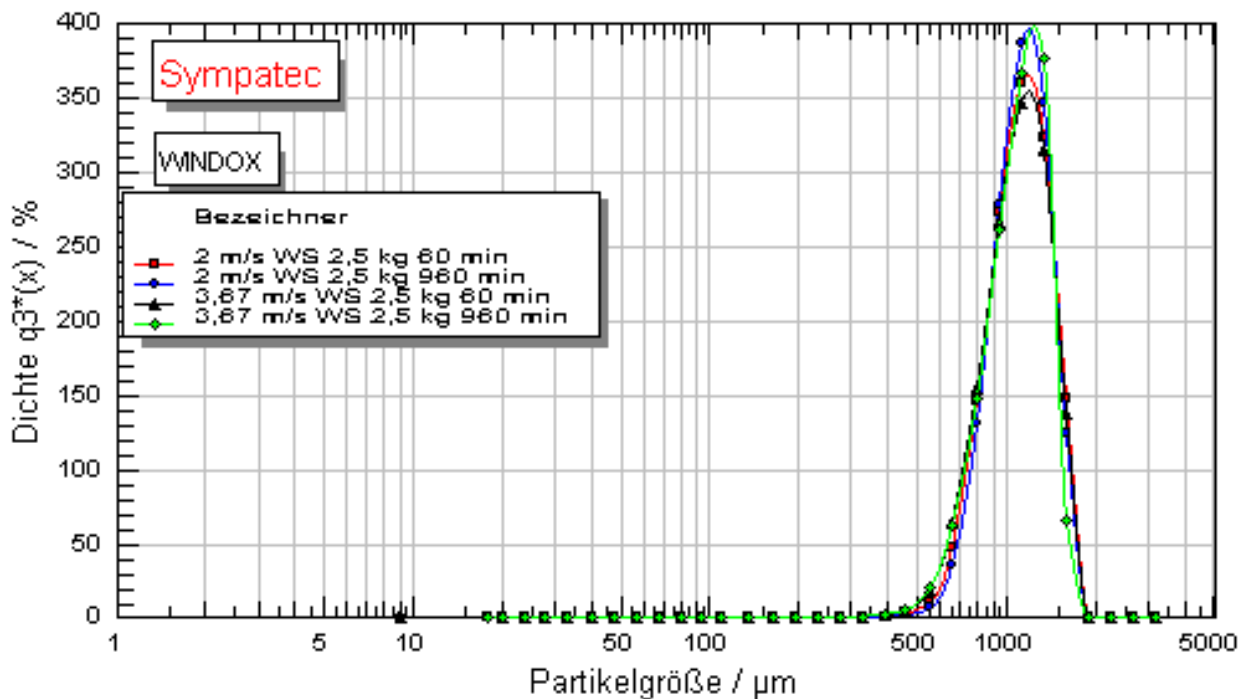
**Bild 19:** Summenverteilung und Dichteverteilung des Zyklonprodukts bei verschiedenen Zeitpunkten des Versuches



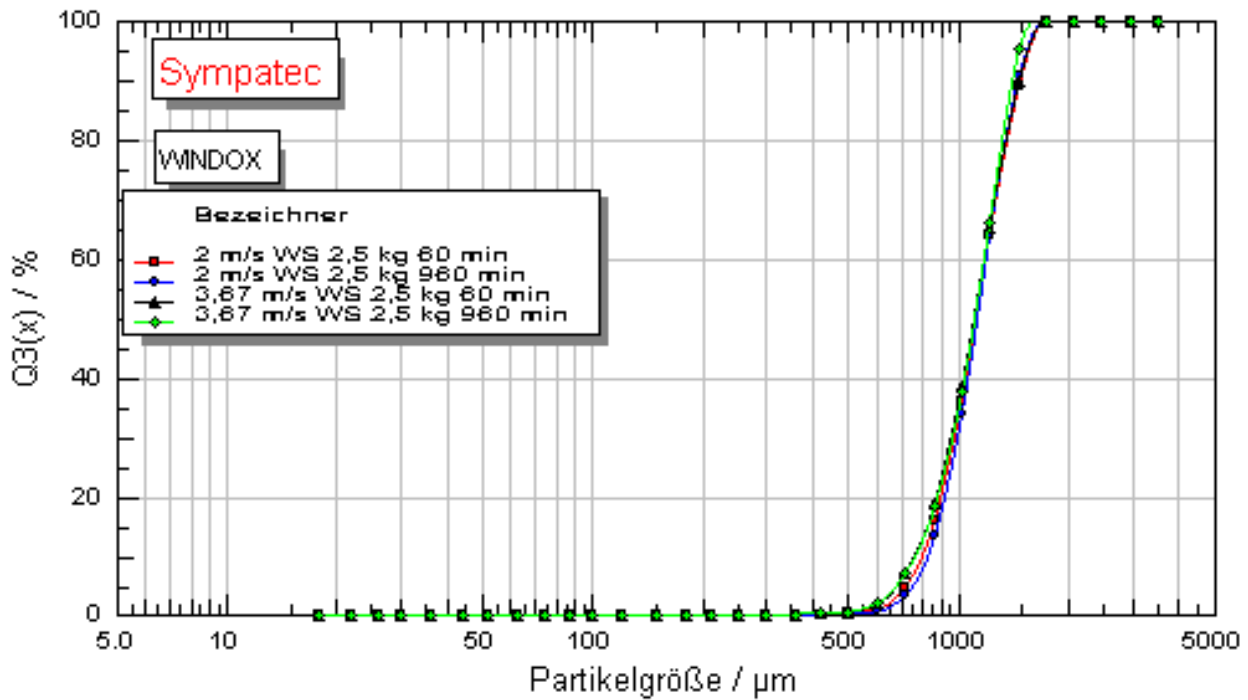
**Bild 20:** Summenverteilung und Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse (3,5 kg und 5 kg) bei 60 min und 300 min



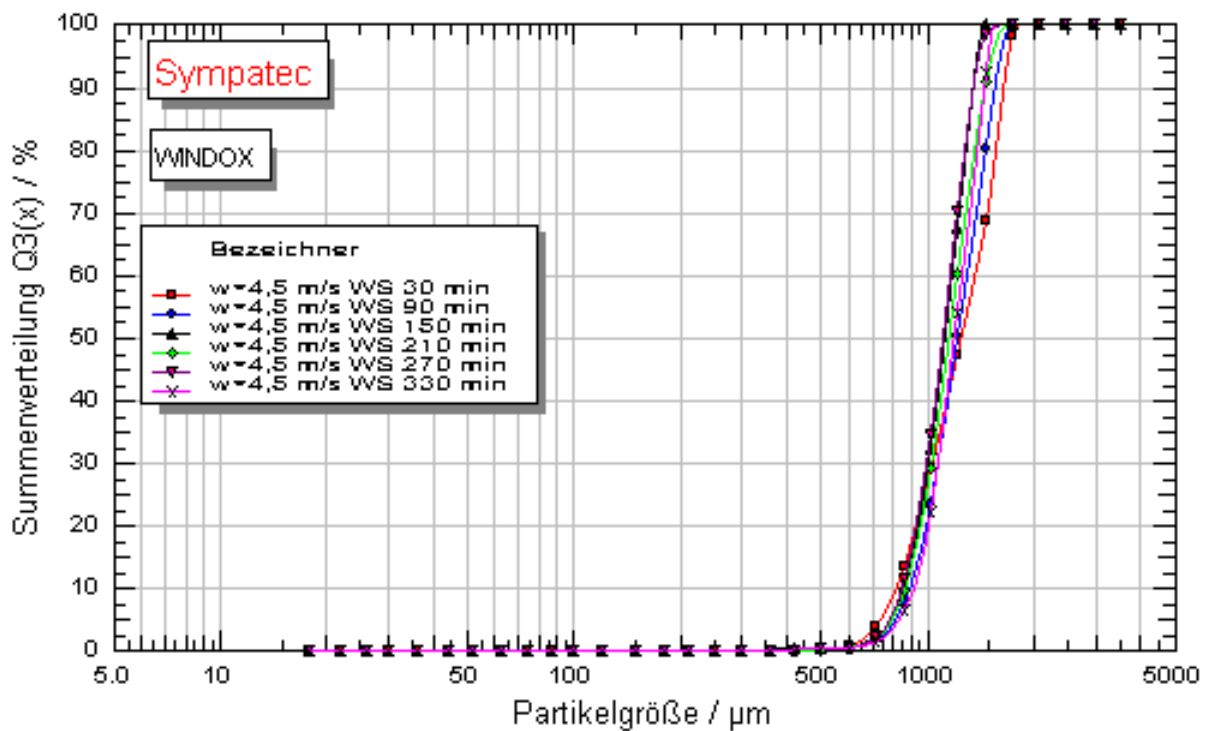
**Bild 21:** Summenverteilung und Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse (3,5 kg und 5 kg) bei 60 und 420 min



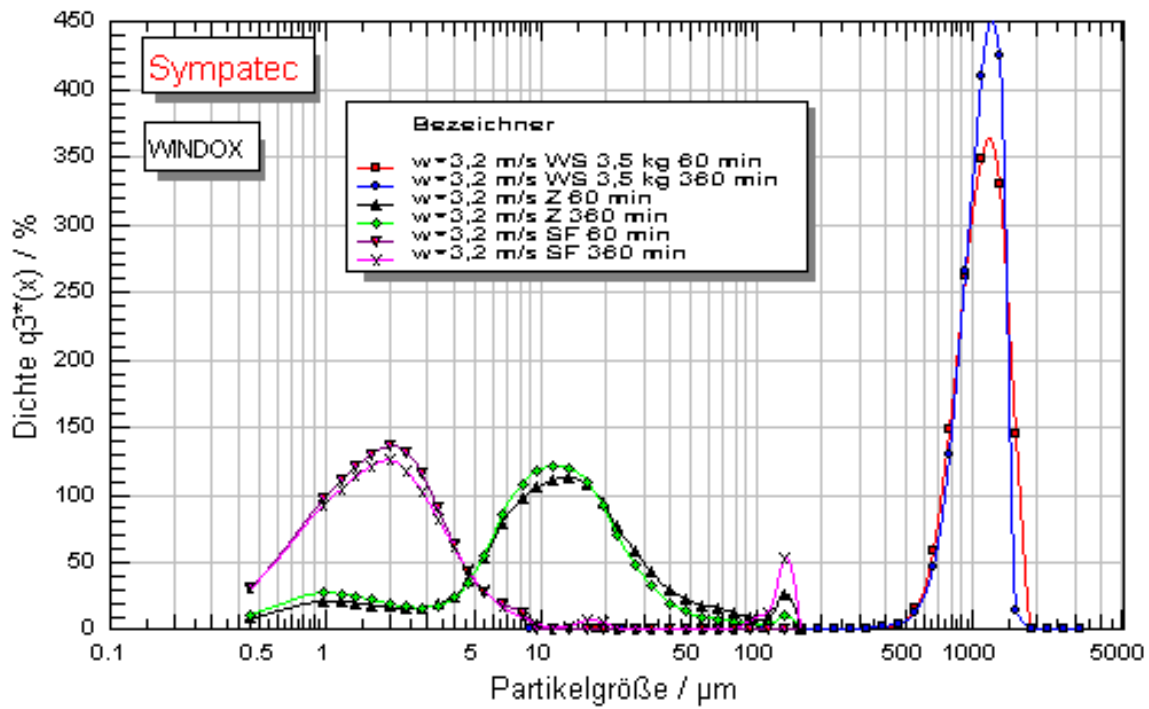
**Bild 22:** Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse (2,5 kg) bei 2 m/s und 3,67 m/s am Anfang und am Ende des Versuches



**Bild 23:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse (2,5 kg) bei 2 m/s und 3,67 m/s am Anfang und am Ende des Versuches



**Bild 24:** Summenverteilung der Wirbelschichtmasse (NPC, 2,5 kg) zu unterschiedlichen Zeitpunkten



**Bild 25:** Dichteverteilung der Wirbelschichtmasse, des Zyklonprodukts, des Staubfilterprodukts bei  $w=3,2$  m/s und  $m_{sch}=3,5$  kg



### Messung des Partikelkollektives zum Zeitpunkt t=0 Minuten (Ausgangsprodukt)

Partikelmasse in der Schicht: 2,5 kg

Abrieb bis zu diesem Zeitpunkt: 0 kg

Die gemessenen Werten von 4 Meßreihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

		1. Mess.	2. Mess.	3. Mess.	4. Mess.	Mittelwert
d arithmetisch	µm	2571,5	2459,0	2637,5	2675,0	2585,8
d Oberfl. gleich	µm	2677,4	2594,5	2733,2	2757,1	2690,6
d Vol-gleich	µm	2740,8	2669,5	2792,8	2810,0	2753,3
d sauter	µm	2872,2	2826,1	2915,7	2918,7	2883,2

#### Oberfläche der Teilchen

1. Messung	m <sup>2</sup>	3,60
2. Messung	m <sup>2</sup>	3,66
3. Messung	m <sup>2</sup>	3,55
4. Messung	m <sup>2</sup>	3,54
Mittelwert	m <sup>2</sup>	3,59

#### Anzahl der Teilchen in der Schicht

1. Messung	Stück	159926,00
2. Messung	Stück	173093,00
3. Messung	Stück	151173,00
4. Messung	Stück	148412,00
Mittelwert	Stück	158151,00

### Messung des Partikelkollektives zum Zeitpunkt t=240 Minuten (4 h)

Partikelmasse in der Schicht: 2,102 kg

Abrieb bis zu diesem Zeitpunkt: 0,398 kg

Die gemessenen Werte von 5 Meßreihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

	µm	1. Mess.	2. Mess.	3. Mess.	4.Mess.	5.Mess.	Mittelwert
d arithmetisch	µm	2593,5	2595,8	2606,4	2630,6	2666,9	2618,7
d Oberfl. gleich	µm	2662,0	2666,9	2674,5	2684,4	2721,2	2681,8
d Vol-gleich	µm	2710,8	2719,1	2722,6	2727,9	2762,4	2728,6
d sauter	µm	2811,1	2826,6	2821,4	2817,0	2846,7	2824,6

#### Oberfläche der Teilchen

1. Messung	m <sup>2</sup>	3,09
2. Messung	m <sup>2</sup>	3,08
3. Messung	m <sup>2</sup>	3,08
4. Messung	m <sup>2</sup>	3,09
5. Messung	m <sup>2</sup>	3,06
Mittelwert	m <sup>2</sup>	3,08

#### Anzahl der Teilchen in der Schicht

1. Messung	Stück	138988
2. Messung	Stück	137719
3. Messung	Stück	137184
4. Messung	Stück	136394
5. Messung	Stück	131336
Mittelwert	Stück	136324

### Messung des Partikelkollektives zum Zeitpunkt t=600 Minuten (10 h)

Partikelmasse in der Schicht: 1,882 kg

Abrieb bis zu diesem Zeitpunkt: 0,618 kg

Die gemessenen Werte von 4 Meßreihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

		1. Mess.	2. Mess.	3. Mess.	4. Mess.	Mittelwert
d arithmetisch	µm	2564,6	2574,8	2574,7	2548,4	2565,6
d Oberfl. gleich	µm	2622,6	2632,6	2632,5	2606,0	2623,4
d Vol-gleich	µm	2665,1	2675,6	2674,8	2646,9	2665,6
d sauter	µm	2752,2	2763,6	2761,6	2730,7	2752,0

#### Oberfläche der Teilchen

1. Messung	m <sup>2</sup>	2,83
2. Messung	m <sup>2</sup>	2,82
3. Messung	m <sup>2</sup>	2,82
4. Messung	m <sup>2</sup>	2,85
Mittelwert	m <sup>2</sup>	2,83

#### Anzahl der Teilchen in der Schicht

1. Messung	Stück	130950
2. Messung	Stück	129417
3. Messung	Stück	129529
4. Messung	Stück	133668
Mittelwert	Stück	130891

### Messung des Partikelkollektives zum Zeitpunkt t=1200 Minuten (20 h)

Partikelmasse in der Schicht: 1,639 kg

Abrieb bis zu diesem Zeitpunkt: 0,861 kg

Die gemessenen Werte von 3 Messereihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

		1. Mess.	2. Mess.	3. Mess.	Mittelwert
d arithmetisch	µm	2452,7	2437,6	2428,0	2439,4
d Oberfl. gleich	µm	2512,7	2506,6	2497,7	2505,7
d Vol-gleich	µm	2554,6	2555,8	2545,0	2551,8
d sauter	µm	2640,4	2656,9	2642,3	2646,5

#### Oberfläche der Teilchen

1. Messung	m <sup>2</sup>	2,57
2. Messung	m <sup>2</sup>	2,55
3. Messung	m <sup>2</sup>	2,57
Mittelwert	m <sup>2</sup>	2,56

#### Anzahl der Teilchen in der Schicht

1. Messung	Stück	129493
2. Messung	Stück	129315
3. Messung	Stück	130967
Mittelwert	Stück	129925

### Messung des Partikelkollektives zum Zeitpunkt t=1800 Minuten (30 h)

Partikelmasse in der Schicht: 1,488 kg

Abrieb bis zu diesem Zeitpunkt: 1,012 kg

Die gemessenen Werte von 3 Meßreihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

		1. Mess.	2. Mess.	3. Mess.	Mittelwert
d arithmetisch	µm	2379,9	2358,9	2388,4	2375,7
d Oberfl. gleich	µm	2439,4	2417,2	2443,6	2433,4
d Vol-gleich	µm	2480,5	2456,2	2484,1	2473,6
d sauter	µm	2564,8	2536,2	2567,3	2556,1

#### Oberfläche der Teilchen

1. Messung	m <sup>2</sup>	2,40
2. Messung	m <sup>2</sup>	2,43
3. Messung	m <sup>2</sup>	2,40
Mittelwert	m <sup>2</sup>	2,41

#### Anzahl der Teilchen in der Schicht

1. Messung	Stück	128415
2. Messung	Stück	132262
3. Messung	Stück	127854
Mittelwert	Stück	129510,33

### Messung des Partikelkollektives zum Zeitpunkt t=2400 Minuten (40 h)

Partikelmasse in der Schicht: 1,364 kg

Abrieb bis zu diesem Zeitpunkt: 1,136 kg

Die gemessenen Werte von 3 Meßreihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

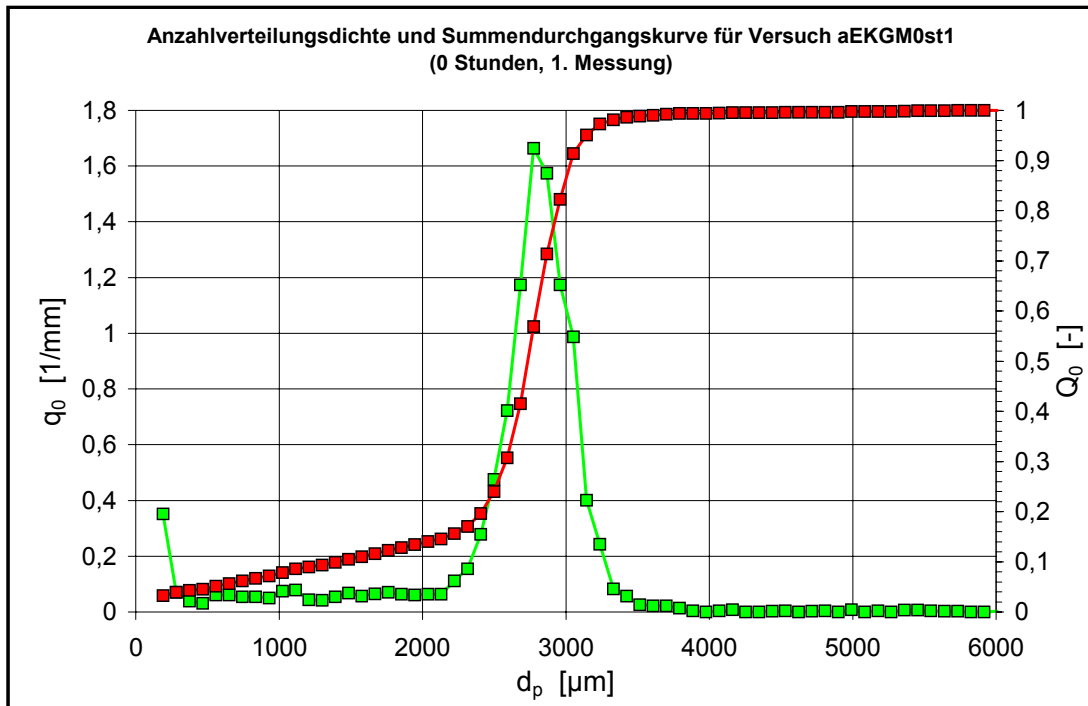
		1. Mess.	2. Mess.	3. Mess.	Mittelwert
d arithmetisch	µm	2303,8	2316,9	2310,2	2310,3
d Oberfl. gleich	µm	2364,9	2378,3	2374,0	2372,4
d Vol-gleich	µm	2405,7	2423,2	2420,4	2416,4
d sauter	µm	2489,5	2515,6	2515,8	2506,9

#### Oberfläche der Teilchen

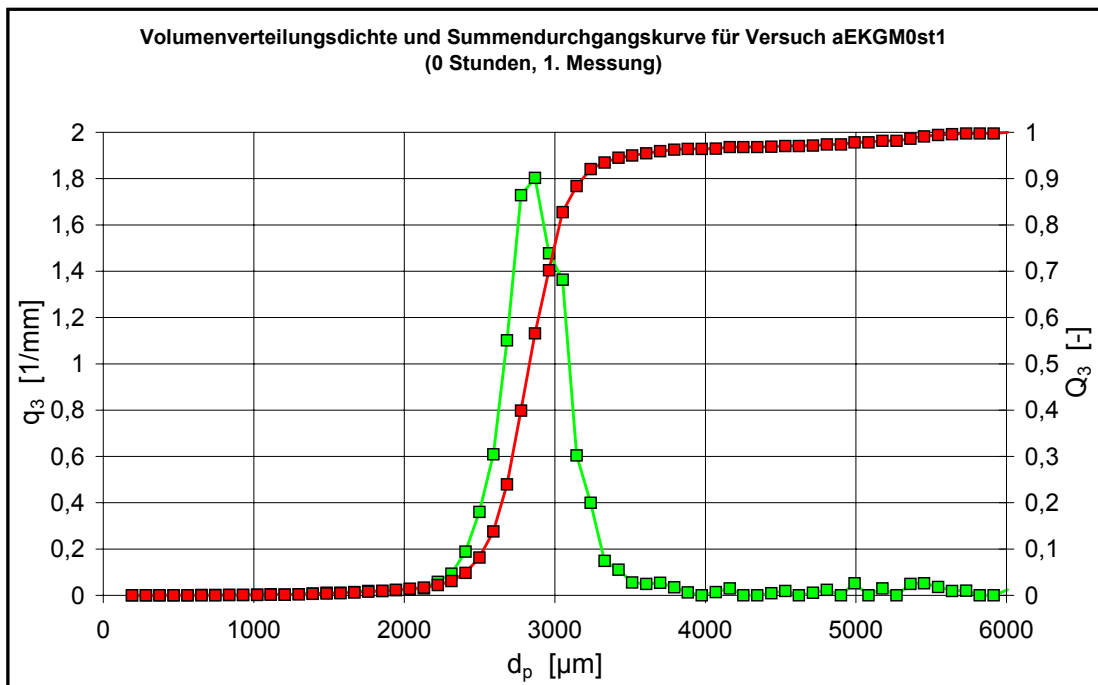
1. Messung	m <sup>2</sup>	2,267
2. Messung	m <sup>2</sup>	2,244
3. Messung	m <sup>2</sup>	2,243
Mittelwert	m <sup>2</sup>	2,251

#### Anzahl der Teilchen in der Schicht

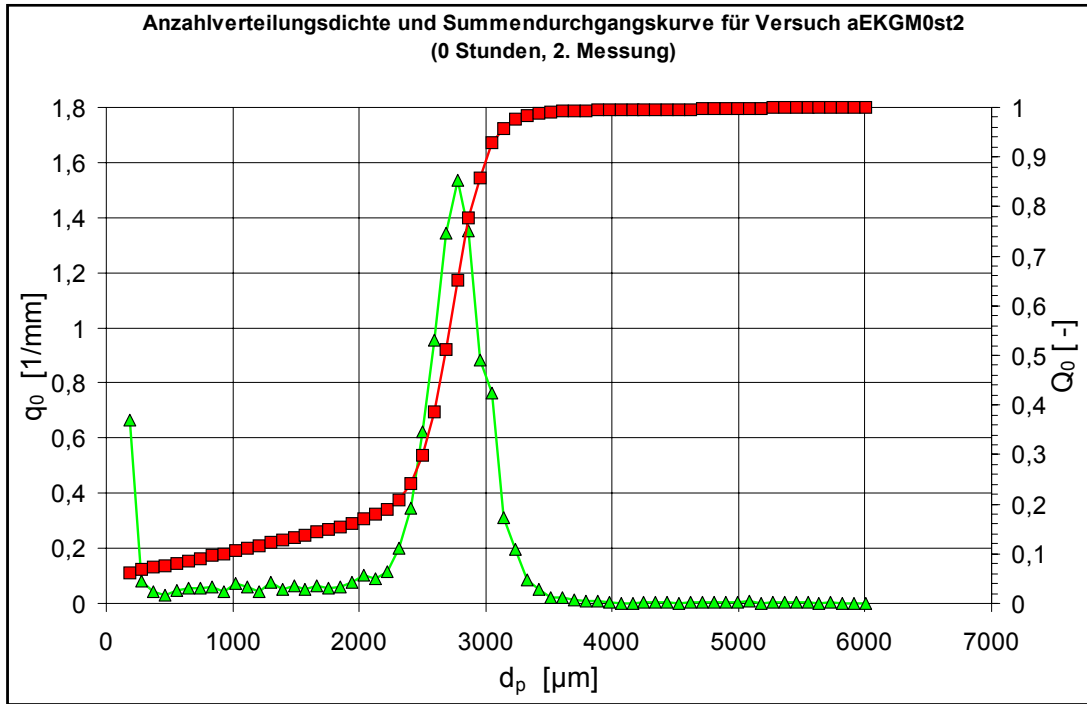
1. Messung	Stück	129034
2. Messung	Stück	126264
3. Messung	Stück	126706
Mittelwert	Stück	127334,7



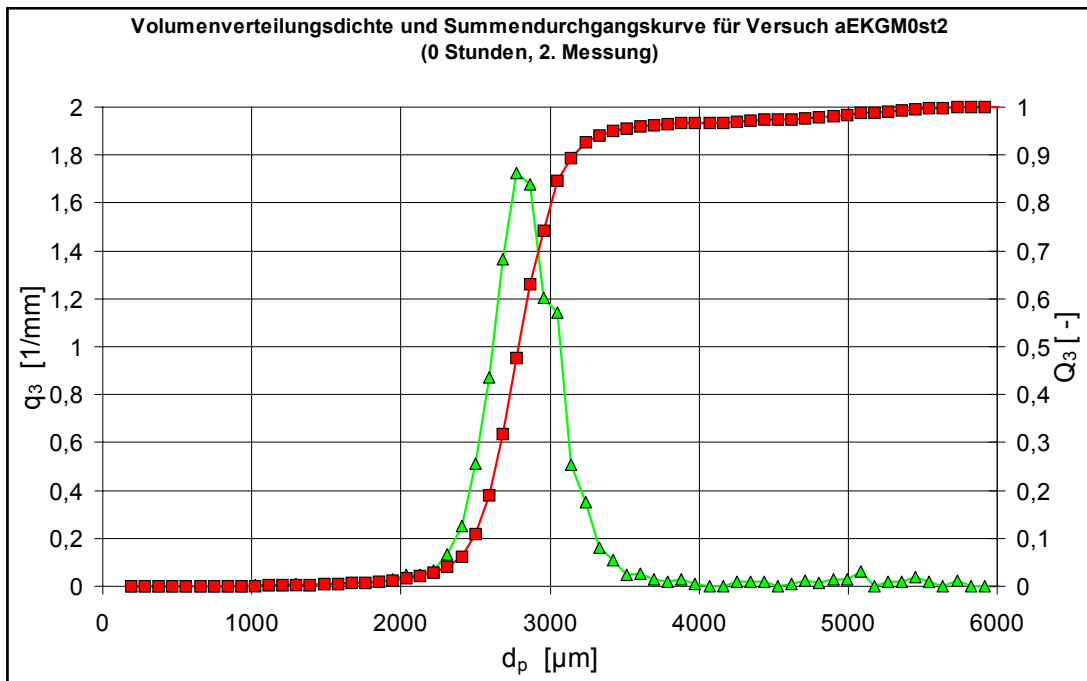
**Bild 1:** Anzahlverteilung des Ausgangsmaterials



**Bild 2:** Volumenverteilung des Ausgangsmaterials

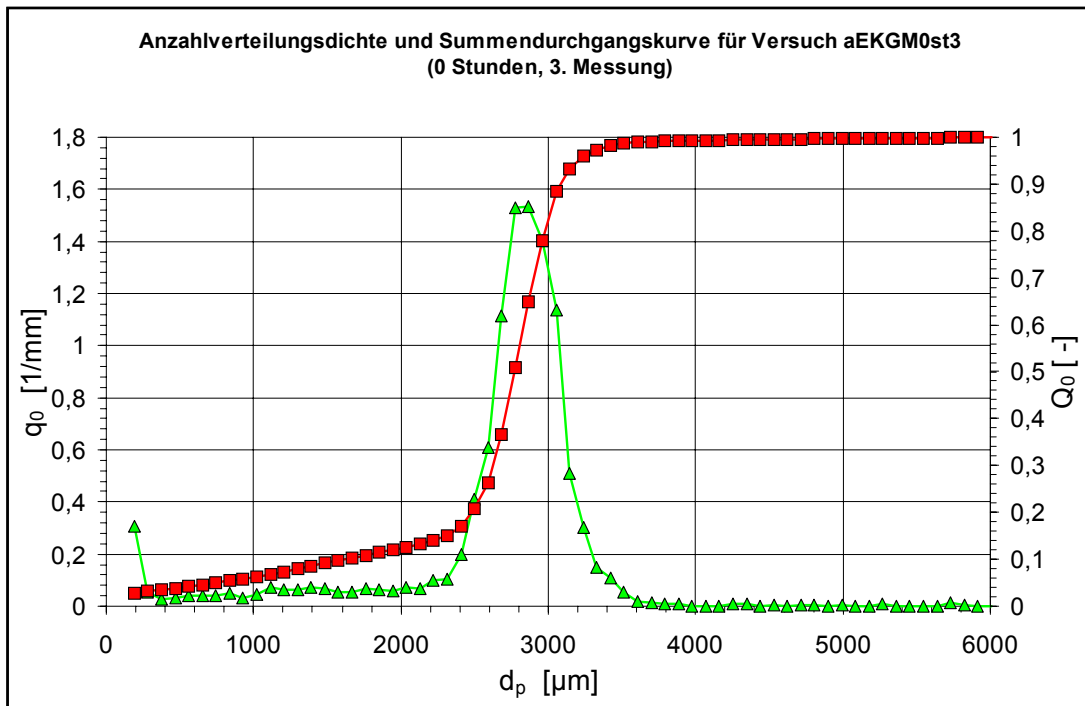


**Bild 3:** Anzahlverteilung des Ausgangsmaterials

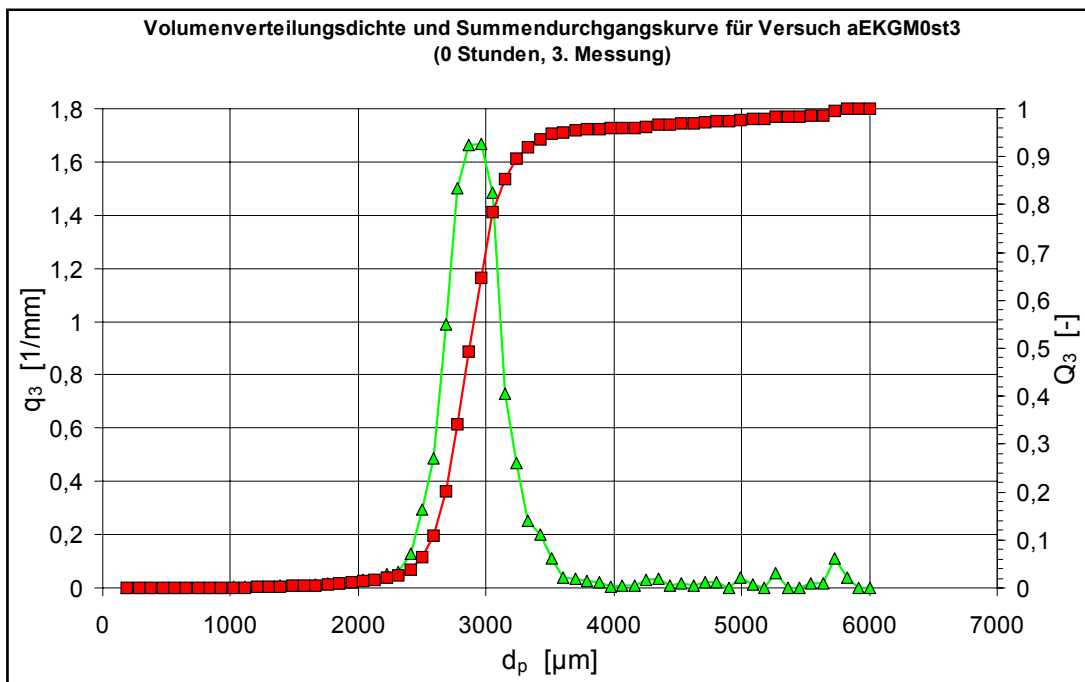


**Bild 4:** Volumenverteilung des Ausgangsmaterials

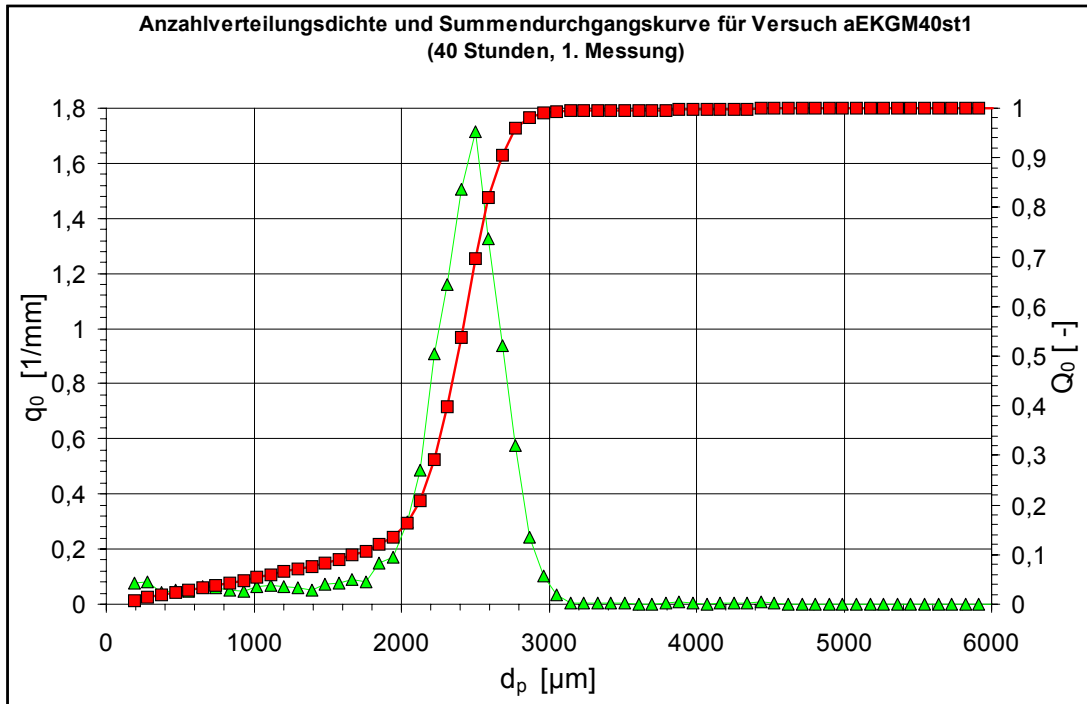




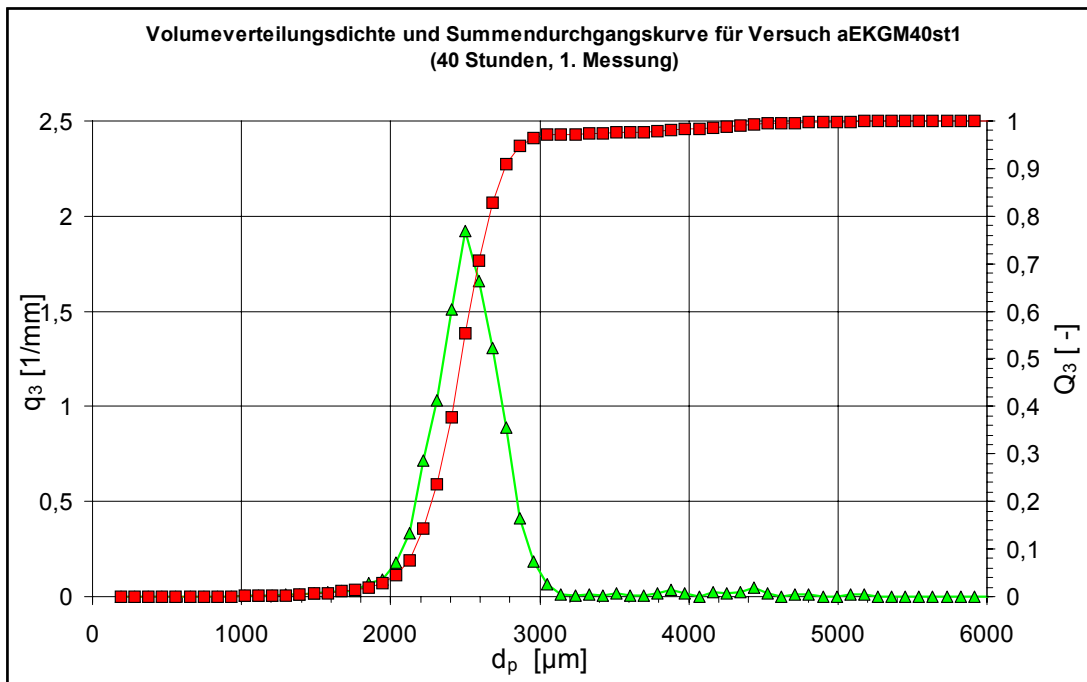
**Bild 5:** Anzahlverteilung des Ausgangsmaterials



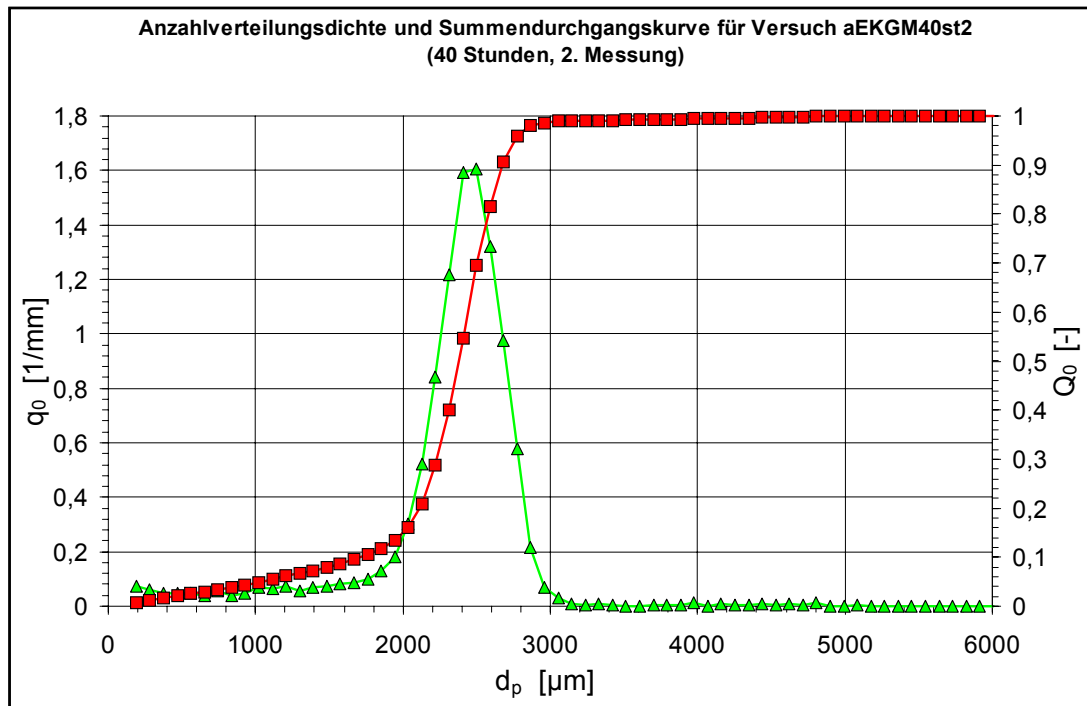
**Bild 6:** Volumenverteilung des Ausgangsmaterials



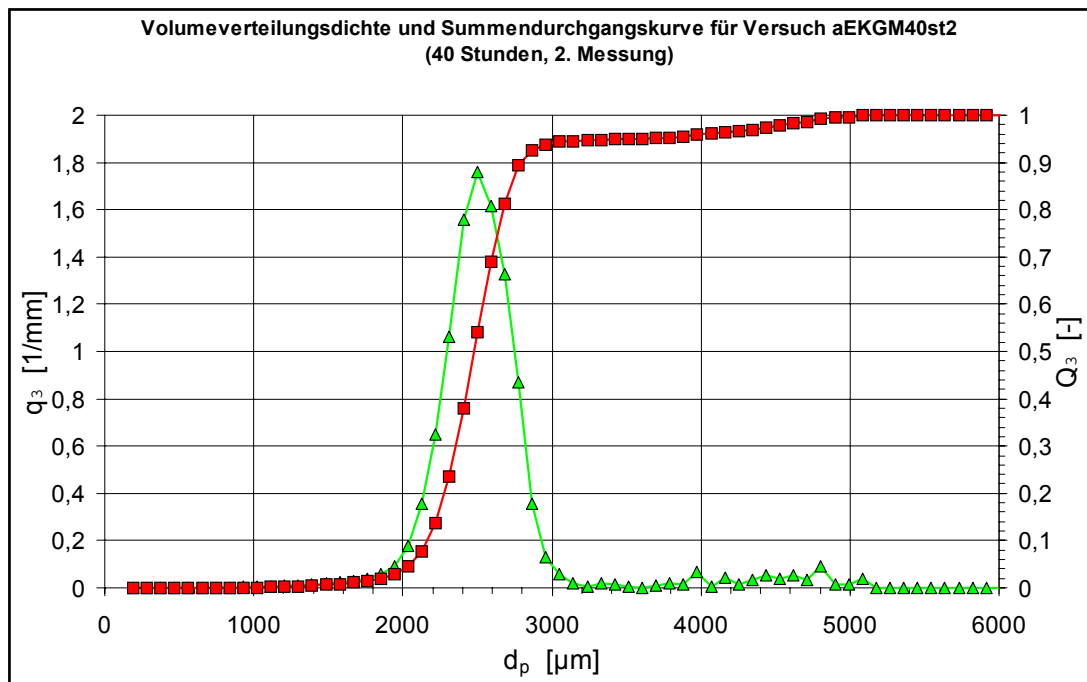
**Bild 7:** Anzahlverteilung des Endproduktes



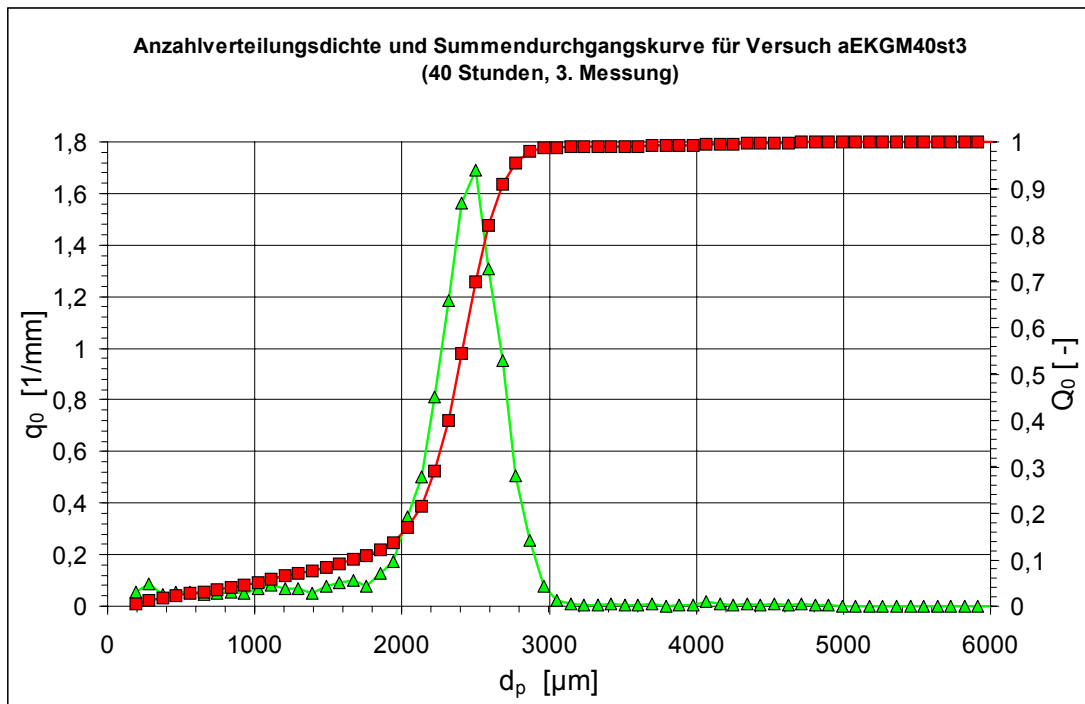
**Bild 8:** Volumenverteilung des Endproduktes



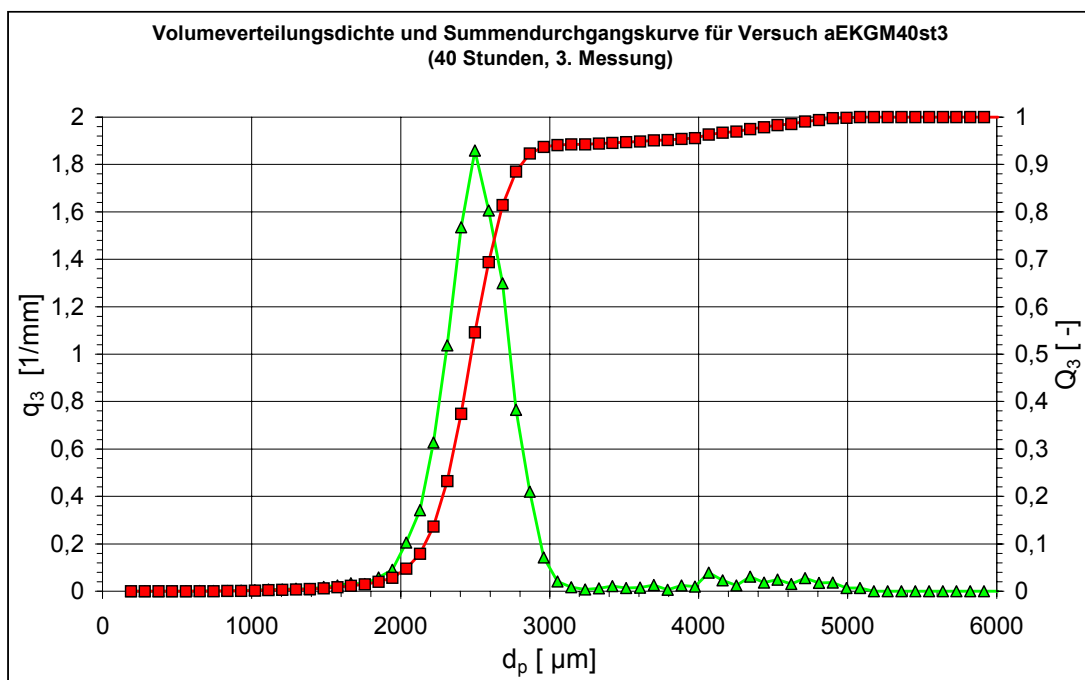
**Bild 9:** Anzahlverteilung des Endproduktes



**Bild 10:** Volumenverteilung des Endproduktes



**Bild 11:** Anzahlverteilung des Endproduktes



**Bild 12:** Volumenverteilung des Endproduktes





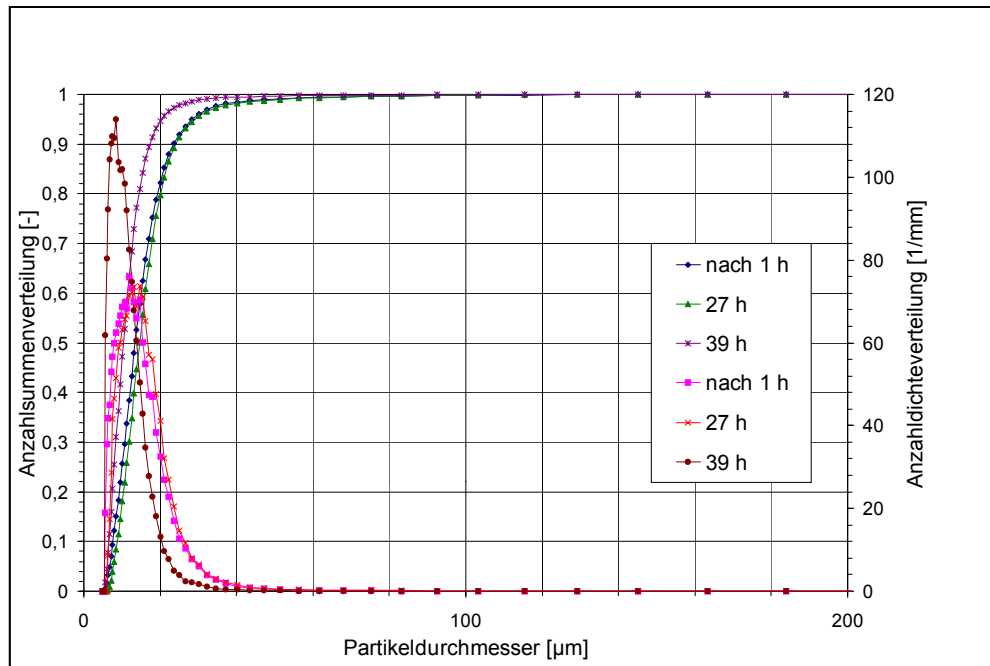




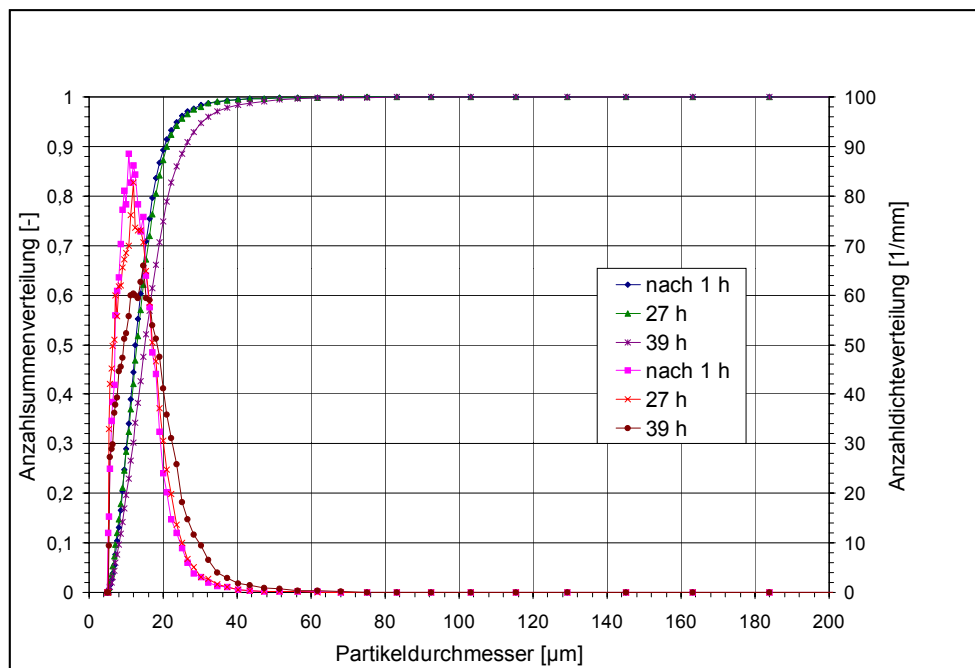


Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g Z-Mess.											
Klassenbreite [µm]		Messbereich 1		Messbereich 2		Messbereich 3		Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g Z-Mess.		Spezifische Teilchenanzahl	
dp	dp	dp	dp	dp	dp	dp	dp	dp	dp	dp	dp
225	410	144	236	95	142	336	95	142	190	190	190
2	410	595	329	142	188	329	142	188	282,6	31	50
3	595	780	329	421	235	421	235	421	374,9	31	41
4	780	965	511	606	329	511	606	329	467,2	32	33
5	965	1150	606	688	329	606	688	329	556,6	32	33
6	1150	1335	688	770	423	688	770	423	646,0	36	38
7	1335	1520	770	852	516	770	852	516	735,4	37	39
8	1520	1705	852	935	606	852	935	606	824,8	39	41
9	1705	1890	935	1017	699	935	1017	699	914,2	40	42
10	1890	2075	1017	1100	792	1017	1100	792	1003,6	41	43
11	2075	2260	1100	1183	885	1100	1183	885	1093,0	42	44
12	2260	2445	1183	1266	978	1183	1266	978	1182,4	43	45
13	2445	2630	1266	1349	1071	1266	1349	1071	1271,8	44	46
14	2630	2815	1349	1432	1164	1349	1432	1164	1361,2	45	47
15	2815	3000	1432	1515	1257	1432	1515	1257	1450,6	46	48
16	3000	3185	1515	1598	1350	1515	1598	1350	1540,0	47	49
17	3185	3370	1601	1681	1443	1601	1681	1443	1629,4	48	50
18	3370	3555	1714	1764	1536	1714	1764	1536	1718,8	49	51
19	3555	3740	1806	1848	1629	1806	1848	1629	1808,2	50	52
20	3740	3925	1898	1931	1722	1898	1931	1722	1897,6	51	53
21	3925	4110	1991	2014	1815	1991	2014	1815	1987,0	52	54
22	4110	4295	2083	2107	1908	2083	2107	1908	2076,4	53	55
23	4295	4480	2176	2190	2001	2176	2190	2001	2165,8	54	56
24	4480	4665	2268	2273	2094	2268	2273	2094	2255,2	55	57
25	4665	4850	2360	2357	2187	2360	2357	2187	2344,6	56	58
26	4850	5035	2452	2447	2280	2452	2447	2280	2434,0	57	59
27	5035	5220	2545	2540	2373	2520	2540	2373	2523,4	58	60
28	5220	5405	2637	2632	2466	2637	2632	2466	2612,8	59	61
29	5405	5590	2729	2724	2559	2729	2724	2559	2709,2	60	62
30	5590	5775	2822	2817	2652	2822	2817	2652	2802,6	61	63
31	5775	5960	2914	2909	2745	2914	2909	2745	2892,0	62	64
32	5960	6145	3006	3001	2838	3006	3001	2838	2981,4	63	65
33	6145	6330	3098	3093	2931	3098	3093	2931	2970,8	64	66
34	6330	6515	3191	3186	3024	3191	3186	3024	3060,2	65	67
35	6515	6699	3283	3278	3117	3283	3278	3117	3149,6	66	68
36	6699	6884	3376	3371	3210	3376	3371	3210	3239,0	67	69
37	6884	7069	3468	3463	3303	3468	3463	3303	3328,4	68	70
38	7069	7254	3560	3555	3396	3560	3555	3396	3417,8	69	71
39	7254	7439	3652	3647	3489	3652	3647	3489	3507,2	70	72
40	7439	7624	3744	3739	3582	3744	3739	3582	3596,6	71	73
41	7624	7809	3837	3832	3675	3837	3832	3675	3686,0	72	74
42	7809	7994	3930	3925	3768	3930	3925	3768	3776,4	73	75
43	7994	8179	4022	4017	3861	4022	4017	3861	3870,8	74	76
44	8179	8364	4114	4109	3954	4114	4109	3954	3960,2	75	77
45	8364	8549	4207	4202	4047	4207	4202	4047	4050,6	76	78
46	8549	8734	4299	4294	4140	4299	4294	4140	4145,0	77	79
47	8734	8919	4391	4386	4233	4391	4386	4233	4237,4	78	80
48	8919	9104	4483	4478	4326	4483	4478	4326	4331,8	79	81
49	9104	9289	4576	4571	4419	4576	4571	4419	4424,2	80	82
50	9289	9474	4668	4663	4512	4668	4663	4512	4518,6	81	83
51	9474	9659	4761	4756	4605	4761	4756	4605	4610,0	82	84
52	9659	9844	4853	4848	4698	4853	4848	4698	4704,4	83	85
53	9844	10029	4945	4940	4791	10029	4940	4791	4798,8	84	86
54	10029	10214	5038	5033	4884	10214	5033	4884	4888,2	85	87
55	10214	10399	5130	5125	4977	10399	5125	4977	4981,6	86	88
56	10399	10584	5222	5217	5070	10584	5217	5070	5074,0	87	89
57	10584	10769	5315	5310	5163	10769	5310	5163	5167,4	88	90
58	10769	10954	5407	5402	5256	10954	5402	5256	5260,8	89	91
59	10954	11139	5499	5494	5349	11139	5494	5349	5353,2	90	92
60	11139	11324	5592	5587	5442	11324	5587	5442	5446,6	91	93
61	11324	11509	5684	5679	5535	11509	5679	5535	5539,0	92	94
62	11509	11694	5776	5771	5628	11694	5771	5628	5632,4	93	95
63	11694	11879	5869	5864	5721	11879	5864	5721	5725,8	94	96
64	11879	12064	5961	5956	5814	12064	5956	5814	5818,2	95	97
65	12064	12249	6053	6048	5907	12249	6048	5907	5911,6	96	98
66	12249	12434	6145	6140	5999	12434	6140	5999	6003,0	97	99
67	12434	12619	6237	6232	6092	12619	6232	6092	6096,4	98	100
68	12619	12804	6329	6324	6184	12804	6324	6184	6188,8	99	101
69	12804	12989	6421	6416	6277	12989	6416	6277	6281,2	100	102
70	12989	13174	6513	6508	6369	13174	6508	6369	6373,6	101	103
71	13174	13359	6605	6600	6462	13359	6600	6462	6466,0	102	104
72	13359	13544	6697	6692	6554	13544	6692	6554	6558,4	103	105
73	13544	13729	6789	6784	6647	13729	6784	6647	6651,8	104	106
74	13729	13914	6881	6876	6739	13914	6876	6739	6743,2	105	107
75	13914	14099	6973	6968	6832	14099	6968	6832	6836,6	106	108
76	14099	14284	7065	7060	6924	14284	7060	6924	6928,0	107	109
77	14284	14469	7157	7152	7017	14469	7152	7017	7021,4	108	110
78	14469	14654	7249	7244	7109	14654	7244	7109	7113,8	109	111
79	14654	14839	7341	7336	7202	14839	7336	7202	7206,2	110	112
80	14839	15024	7433	7428	7294	15024	7428	7294	7298,6	111	113
81	15024	15209	7525	7520	7387	15209	7520	7387	7391,0	112	114
82	15209	15394	7617	7612	7479	15394	7612	7479	7483,4	113	115
83	15394	15579	7709	7704	7572	15579	7704	7572	7576,8	114	116
84	15579	15764	7801	7796	7664	15764	7796	7664	7668,2	115	117
85	15764	15949	7893	7888	7757	15949	7888	7757	7761,6	116	118
86	15949	16134	7985	7980	7849	16134	7980	7849	7853,0	117	119
87	16134	16319	8077	8072	7942	16319	8072	7942	7946,4	118	120
88	16319	16504	8169	8164	8034	16504	8164	8034	8038,8	119	121
89	16504	16689	8261	8256	8127	16689	8256	8127	8131,2	120	122
90	16689	16874	8353	8348	8219	16874	8348	8219	8223,6	121	123
91	16874	17059	8445	8440	8312	17059	8440	8312	8316,0	122	124
92	17059	17244	8537	8532	8404	17244	8532	8404	8408,4	123	125
93	17244	17429	8629	8624	8497	17429	8624	8497	8501,8	124	126
94	17429	17614	8721	8716	8589	17614	8716	8589	8593,2	125	127
95	17614	17799	8813	8808	8682	17799	8808	8682	8686,6	126	128
96	17799	17984	8905	8900	8774	17984	8900	8774	8778,0	127	129
97	17984	18169	8997	8992	8867	18169	8992	8867	8871,4	128	1

Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g 3 Mess.																						
Korngrößenbestimmung mit EKGM		Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g 3 Mess.		Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g 3 Mess.		Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g 3 Mess.		Kalk auf Sent 40 h m - 95,76 g 3 Mess.														
Klassengrenze [µm]	dp.o	dp.u	dp.o	dp.u	dp.o	dp.u	dp.o	dp.u	dp.o													
2	92,33	2516	92,33	2516	92,33	2516	92,33	2516	92,33													
Verwendeter Meßbereich [Klassengrenze [µm]]	92,33	2516	92,33	2516	92,33	2516	92,33	2516	92,33													
Sauterdurchmesser dp. 1,2	2516	2516	2516	2516	2516	2516	2516	2516	2516													
Meßbereich 1	Meßbereich 2	Meßbereich 3	Meßbereich 4	Meßbereich 5	Meßbereich 6	Meßbereich 7	Meßbereich 8	Meßbereich 9	Meßbereich 10													
1	225	410	144	236	95	142	1902	36	0,1269382	2,415E-06	2,618E-05	0,00492719	0,05300851	0,00492719	180,05948	3426,46511	2,415E-06	0,00492719	0,94666114	4091,41373	129692815	
2	410	595	329	142	188	236	3749	29	0,6756119	1,254E-05	0,0013686	1,4989E-05	0,00788055	0,08559197	0,01288774	629,36273	177857,778	1,254E-05	0,00788055	2,2270422	1430,0868	673501190
3	595	780	329	421	188	235	5826	24	0,8009519	1,49E-05	0,0016131	1,989E-05	0,01040094	0,1434469	0,01668714	563,52140	1712641,73	1,49E-05	0,01040094	1,50312457	1280,49755	800097952
4	780	965	421	513	235	282	8212	46,2	1,9764472	5,96E-05	0,00511544	0,05540391	0,02196559	0,11657764	0,37915602	847974,313	5,96E-05	0,00511544	2,38993502	253271487	1935644723	
5	965	1150	513	606	282	375	5586	35	3,2143979	0,00042949	0,00483893	0,05404091	0,02688251	0,15153222	0,487974313	5,96E-05	0,00483893	2,70385272	343282874	3211430991		
6	1150	1335	606	688	375	423	4357388	34	4,3573788	0,0008771	0,0020249	0,00442766	0,04942929	0,03098371	0,78264989	11,9068001	0,00442766	0,0020249	2,70385272	405281931	4317389799	
7	1335	1520	688	769	423	483	3373474	34	6,0739538	0,0013686	0,0029498	0,00597366	0,03596365	0,23033953	0,7374453	10,9013686	0,00597366	0,0029498	3,4962156	59152386	731027482	
8	1520	1705	769	850	483	546	1891919	34	8,2128707	0,0020249	0,0040768	0,0080167	0,04531477	0,28520403	0,8657628	13,8262214	0,0080167	0,0040768	4,9645928	82155146	102673492	
9	1705	1890	850	935	546	606	9299	47	26,207694	0,0028269	0,0058255	0,0118477	0,06501147	0,40530403	1,2676234	18,9500403	0,0118477	0,0058255	6,3645928	92155146	116268100	
10	1890	2075	935	1021	606	670	26203	47	30,046316	0,0037213	0,0078735	0,0150934	0,09531149	0,59283508	1,76743508	25,3508	0,0150934	0,0078735	10,948783	15981783	20208100	
11	2075	2260	1021	1116	670	734	41385	45	41,318542	0,0046746	0,0098336	0,0196976	0,12653149	0,80523149	2,494275	35,080	0,0196976	0,0098336	15,948783	21037850	30406100	
12	2260	2445	1102	1202	734	797	62092	45	54,046547	0,0055854	0,0118477	0,0239697	0,15153222	0,947251	2,821	45,080	0,0239697	0,0118477	21,037850	285601948	4131E+10	
13	2445	2630	1252	1344	797	860	8212	46,2	70,469547	0,0064954	0,0128877	0,0259697	0,17646514	1,0951225	3,125	50,080	0,0259697	0,0128877	27,037850	364846158	5384E+10	
14	2630	2815	1344	1437	797	923	10212	46,2	85,219850	0,0074171	0,0138361	0,0279697	0,1910403	1,2003395	3,520	55,080	0,0279697	0,0138361	32,037850	4317389799	6029E+10	
15	2815	3000	1437	1529	797	986	11902	46,2	100,06954	0,0083486	0,0148265	0,0299697	0,2059697	1,3103395	3,910	60,080	0,0299697	0,0148265	37,037850	49152386	673501190	
16	3000	3185	1529	1624	797	1049	13592	46,2	114,91985	0,0092901	0,0158210	0,0319697	0,2209697	1,4203395	4,320	65,080	0,0319697	0,0158210	42,037850	5500506	731027482	
17	3185	3370	1624	1714	844	891	15083	68	135,08003	0,0102362	0,0168055	0,0339697	0,2359697	1,5303395	4,730	70,080	0,0339697	0,0168055	47,037850	6090194	800097952	
18	3370	3555	1714	1806	891	954	17599	68	151,28505	0,0111819	0,0177934	0,0359697	0,2509697	1,6403395	5,140	75,080	0,0359697	0,0177934	52,037850	703501190	92155146	
19	3555	3740	1806	1898	891	985	19852	68	168,28233	0,0121363	0,0187893	0,0379697	0,2659697	1,7503395	5,550	80,080	0,0379697	0,0187893	57,037850	80781783	102673492	
20	3740	3925	1898	1991	985	1031	22122	68	185,48013	0,0130907	0,0194422	0,0399697	0,2809697	1,8603395	5,960	85,080	0,0399697	0,0194422	62,037850	90152386	116268100	
21	3925	4110	1991	2083	1031	1078	24619	68	202,67844	0,0140426	0,0200939	0,0419697	0,2959697	1,9703395	6,370	90,080	0,0419697	0,0200939	67,037850	100000000	13091783	
22	4110	4295	2083	2175	1078	1125	27182	68	220,04654	0,0149954	0,0210454	0,0439697	0,3109697	2,0803395	6,780	95,080	0,0439697	0,0210454	72,037850	110000000	145000000	
23	4295	4480	2175	2267	1125	1172	29745	68	237,44086	0,0159482	0,0220972	0,0459697	0,3259697	2,1903395	7,190	100,080	0,0459697	0,0220972	77,037850	120000000	160000000	
24	4480	4665	2267	2359	1125	1219	32308	68	254,83518	0,0169010	0,0230500	0,0479697	0,3409697	2,3003395	7,600	105,080	0,0479697	0,0230500	82,037850	130000000	170000000	
25	4665	4850	2359	2452	1219	1266	34871	68	272,22950	0,0178538	0,0240028	0,0499697	0,3559697	2,4103395	8,010	110,080	0,0499697	0,0240028	87,037850	140000000	180000000	
26	4850	5035	2452	2545	1266	1313	37434	68	289,62382	0,0188066	0,0249556	0,0519697	0,3709697	2,5203395	8,420	115,080	0,0519697	0,0249556	92,037850	150000000	190000000	
27	5035	5220	2545	2637	1313	1359	40587	68	307,01814	0,0197594	0,0259084	0,0539697	0,3859697	2,6303395	8,830	120,080	0,0539697	0,0259084	97,037850	160000000	200000000	
28	5220	5405	2637	2729	1359	1406	43740	68	324,41246	0,0207122	0,0268612	0,0559697	0,4009697	2,7403395	9,240	125,080	0,0559697	0,0268612	102,037850	170000000	210000000	
29	5405	5590	2729	2822	1406	1453	46893	68	341,80678	0,0216650	0,0278140	0,0579697	0,4159697	2,8503395	9,650	130,080	0,0579697	0,0278140	107,037850	180000000	220000000	
30	5590	5775	2822	2914	1453	1500	50046	68	359,20110	0,0226178	0,0287668	0,0599697	0,4309697	2,9603395	10,060	135,080	0,0599697	0,0287668	112,037850	190000000	230000000	
31	5775	5960	2914	3006	1500	1547	53199	68	376,59542	0,0235706	0,0297196	0,0619697	0,4459697	3,0703395	10,470	140,080	0,0619697	0,0297196	117,037850	200000000	240000000	
32	5960	6145	3006	3098	1547	1594	56352	68	393,98974	0,0245234	0,0306724	0,0639697	0,4609697	3,1803395	10,880	145,080	0,0639697	0,0306724	122,037850	210000000	250000000	
33	6145	6330	3098	3191	1594	1640	59505	68	411,38406	0,0254762	0,0316252	0,0659697	0,4759697	3,2903395	11,290	150,080	0,0659697	0,0316252	127,037850	220000000	260000000	
34	6330	6515	3191	3283	1640	1687	62658	68	428,77838	0,0264290	0,0325780	0,0679697	0,4909697	3,4003395	11,700	155,080	0,0679697	0,0325780	132,037850	230000000	270000000	
35	6515	6699	3283	3376	1687	1734	65811	68	446,17270	0,0273818	0,0335308	0,0699697	0,5059697	3,5103395	12,110	160,080	0,0699697	0,0335308	137,037850	240000000	280000000	
36	6699	6884	3376	3468	1734	1781	68964	68	463,56702	0,0283346	0,0344836	0,0719697	0,5209697	3,6203395	12,520	165,080	0,0719697	0,0344836	142,037850	250000000	290000000	
37	6884	7069	3468	3560	1781	1827	72117	68	480,96134	0,0292874	0,0354364	0,0739697	0,5359697	3,7303395	12,930	170,080	0,0739697	0,0354364	147,037850	260000000	300000000	
38	7069	7254	3560	3652	1827	1874	75270	68	498,35566	0,0302402	0,0363892	0,0759697	0,5509697	3,8403395	13,340	175,080	0,0759697	0,0363892	152,037850	270000000	310000000	
39	7254	7439	3652	3744	1874	1921	78423	68	515,75000	0,0311930	0,0373420	0,0779697	0,5659697	3,9503395	13,750	180,080	0,0779697	0,0373420	157,037850	280000000	320000000	
40	7439	7624	3744	3836	1921	1968	81576	68	533,14432	0,0321458	0,0382948	0,0799697	0,5809697	4,0603395	14,160	185,080	0,0799697	0,0382948	162,037850	290000000	330000000	
41	7624	7809	3836	3928	1968	2015	84729	68	550,53864	0,0330986	0,0392476	0,0819697	0,5959697	4,1703395	14,570	190,080	0,0819697	0,0392476	167,037850	300000000	340000000	
42	7809	7994	3928	4020	2015	2062	87882	68	567,93296	0,0340514	0,0401994	0,0839697	0,6109697	4,2803395	14,980	195,080	0,0839697	0,0401994	172,037850	310000000	350000000	
43	7994	8179	4020	4112	2062	2109	91035	68	585,32728	0,0350042	0,0411522	0,0859697	0,6259697	4,3903395	15,390	200,080	0,0859697	0,0411522	177,037850	320000000	360000000	
44	8179	8364	4112	4204	2109	2156	94188	68	602,72160	0,0359570	0,0421050	0,0879697	0,6409697	4,5003395	15,800	205,080	0,					



**Bild 1:** Anzahldichteverteilung und Anzahlsummenverteilung (Zyklonprodukt)



**Bild 2:** Anzahldichteverteilung und Anzahlsummenverteilung (Staubfilterprodukt)

d A  
-0,0782271 0,18183  
B  
0,00526748  
C  
0,0168735

**Tabelle 1**

**Schichtmasse 1,5 kg**

Staubmessung_7_00															
am 12. Und 13. 7. 2000 Anlage DN150															
Zeit	Zeit	Konzentration		Daraus abgeleitet:	Zeit kummulat.	Zeit kummulat.	Konzentration	Staub absolut							
Uhr	Uhr	g/m <sup>3</sup> N	Min	Uhr	h	h	g/m <sup>3</sup> N	g/h							
09:01	Versuchsanfang 08:20	0,222	von 09:01 bis 09:18	09:09,5	49,5	0,825	0,222	59,08974							
10:02		0,15	von 10:02 bis 10:19	10:10,5	110,5	1,841666667	0,15	39,9255							
11:00		0,127	von 11:00 bis 11:17	11:08,5	168,5	2,808333333	0,127	33,80359							
12:01		0,1	von 12:01 bis 12:18	12:09,5	229,5	3,825	0,1	26,617							
13:00		0,085	von 13:00 bis 13:17	13:08,5	288,5	4,808333333	0,085	22,62445							
14:00	Versuchsende 14:20	0,087	von 14:00 bis 14 :17	14:08,5	348,5	5,808333333	0,087	23,15679							
09:00	Versuchsanfang 9:00	0,067	von 9:00 bis 9:17	09:08,5	368,5	6,141666667	0,067	17,83339							
10:00		0,067	von 10:00 bis 10:17	10:08,5	428,5	7,141666667	0,067	17,83339							
11:00		0,064	von 11:00 bis 11:17	11:08,5	488,5	8,141666667	0,064	17,03488							
12:00		0,058	von 12:00 bis 12:17	12:08,5	548,5	9,141666667	0,058	15,43786							
13:00		0,057	von 13:00 bis 13:17	13:08,5	608,5	10,14166667	0,057	15,17169							
14:00	Versuchsende 15:00	0,053	von 14:00 bis 14 :17	14:08,5	668,5	11,14166667	0,053	14,10701							
				15:00	720	12									

Masse am Anfang = 1,5 kg  
 Masse nach 6 h = 1,244 kg  
 Masse am Versuchsende (12h) = 1,128 kg

Koeffizienten

- A 0,197506455
- B -0,009874442
- C 0,506278235

**Tabelle 2**

**Schichtmasse 2,5 kg**

Staubmessung_6_00 am 27. Und 28. 6. 2000 Anlage DN150																		
Zeit	Zeit	Konzentration				Daraus abgeleitet:	Zeit kummulat.	Zeit kummulat.	Konzentration	Zeit kummulat.	Konzentration	Staub absolut						
Uhr	Uhr	g/m <sup>3</sup> N				Uhr	Min	h	g/m <sup>3</sup> N	h	g/m <sup>3</sup> N	g/h						
10:04	Versuchsanfang 10:00	0,622	von 10:04 bis 10:21			10:12,5	12,5	0,2083333333	0,622	0,2083333333	0,622	165,55774						
10:25		0,456	von 10:25 bis 10:42			10:33,5	33,5	0,5583333333	0,456	0,5583333333	0,456	121,37352						
11:44		0,269	von 11:44 bis 12:01			11:52,5	112,5	1,875	0,269	1,875	0,269	71,59973						
12:43		0,2	von 12:43 bis 13:01			12:52,0	172	2,8666666667	0,2	2,8666666667	0,2	53,234						
13:45		0,175	von 13:45 bis 14:02			13:53,5	233,5	3,8916666667	0,175	3,8916666667	0,175	46,57975						
14:45		0,156	von 14:45 bis 15:02			14:53,5	293,5	4,8916666667	0,156	4,8916666667	0,156	41,52252						
09:00	Versuchsanfang 8:00	0,124	von 9:00 bis 9:17			1h+00:09:09	368,5	6,1416666667	0,124	6,1416666667	0,124	33,00508						
10:00		0,12	von 10:00 bis 10:17			10:08,5	428,5	7,1416666667	0,12	7,1416666667	0,12	31,9404						
11:00		0,122	von 11:00 bis 11:17			11:08,5	488,5	8,1416666667	0,122	8,1416666667	0,122	32,47274						
12:00		0,108	von 12:00 bis 12:17			12:08,5	548,5	9,1416666667	0,108	9,1416666667	0,108	28,74636						
13:00		0,093	von 13:00 bis 13:17			13:08,5	608,5	10,1416666667	0,093	10,1416666667	0,093	24,75381						
14:00	Versuchsende 15:00	0,095	von 14:00 bis 14:17			14:08,5	668,5	11,1416666667	0,095	11,1416666667	0,095	25,28615						
						15:00	720	12										

Masse am Anfang = 2,5 kg  
 Masse nach 5 h = 2,05 kg  
 Masse am Versuchsende (12h) = 1,811 kg

Koeffizienten

d A 0,132947  
 -0,0111376  
 B -0,00353492  
 C 0,590692

**Tabelle 3**

**Schichtmasse 3,5 kg**

Staubmessung_7_00																				
am 17. Und 18. 7. 2000 Anlage DN150																				
Zeit	Zeit	Konzentration																		
Uhr	Uhr	g/m <sup>3</sup> N	g/m <sup>3</sup> N	Min	h	Zeit kumulat.	Zeit kumulat.	Konzentration	g/m <sup>3</sup> N	Staub absolut	g/h									
09:00	Versuchsanfang 08:20		0,875	08:20	0	0	0	0,875	0,875	232,89875										
10:00			0,42	09:08,0	48	09:08,0	0,8	0,42	0,42	111,7914										
11:00			0,35	10:08,0	108	10:08,0	1,8	0,35	0,35	93,1595										
12:00			0,275	11:08,0	168	11:08,0	2,8	0,275	0,275	73,19675										
13:00			0,234	12:08,0	228	12:08,0	3,8	0,234	0,234	62,28378										
14:00	Versuchsende 14:20		0,189	13:08,0	288	13:08,0	4,8	0,189	0,189	50,30613										
09:00	Versuchsanfang 9:00		0,153	14:08,0	348	14:08,0	5,8	0,153	0,153	40,72401										
10:00			0,167	09:08,0	368	09:08,0	6,133333333	0,167	0,167	44,45039										
11:00			0,156	10:08,0	428	10:08,0	7,133333333	0,156	0,156	41,52252										
12:00			0,141	11:08,0	488	11:08,0	8,133333333	0,141	0,141	37,52997										
13:00			0,136	12:08,0	548	12:08,0	9,133333333	0,136	0,136	36,19912										
14:00	Versuchsende 15:00		0,122	13:08,0	608	13:08,0	10,133333333	0,122	0,122	32,47274										
				14:08,0	668	14:08,0	11,133333333													
				15:00	720	15:00	12													

Masse am Anfang = 3,5 kg  
 Masse nach 6 h = 2,752 kg  
 Masse am Versuchsende (12h) = 2,491 kg

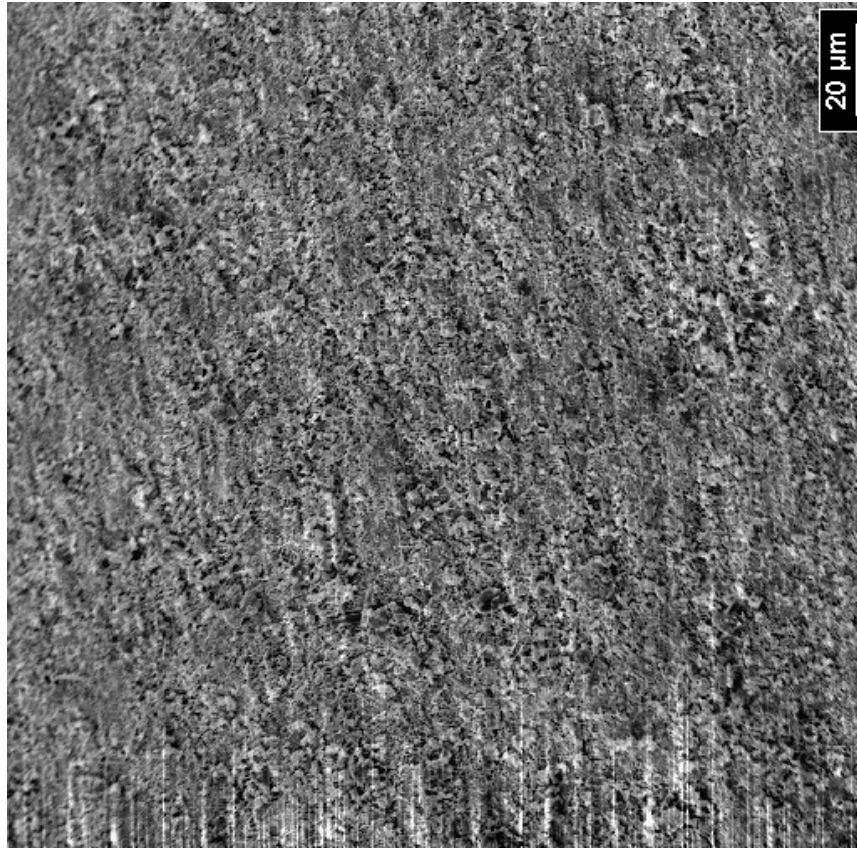
Tabelle 4

**Schichtmasse 2,5 kg  
Gasgeschwindigkeiten 2,4 m/s; 4,2 m/s; 5,2 m/s**

Staubmessung_3_01 am 01.03.2001 Anlage DN150		Daraus abgeleitet:		Zeit kummulat.		Zeit kummulat.		Konzentration		Staub absolut		W	
Zeit	Zeit	Uhr	Min	Uhr	Min	h	h	g/m <sup>3</sup> N	g/m <sup>3</sup> N	g/h	g/h	m/s	m/s
						0	0	0			0	0	0
08:45	Versuchsanfang 07:00			07:00		0	0	0					
				08:53,5		113,5	1,891666667	0,175	0,175	43,295	43,295	4,2	4,2
09:06				09:14,5		134,5	2,241666667	0,133	0,133	32,9042	32,9042	4,2	4,2
09:26				09:34,0		154	2,566666667	0,12	0,12	29,688	29,688	4,2	4,2
12:37				12:45,5		345,5	5,758333333	0,025	0,025	3,535	3,535	2,4	2,4
13:01				13:09,5		369,5	6,158333333	0,027	0,027	3,8178	3,8178	2,4	2,4
13:47				13:54,0		414	6,9	0,175	0,175	53,6025	53,6025	5,2	5,2
14:04	Versuchsende 15:00			14:11,0		431	7,183333333	0,148	0,148	45,3324	45,3324	5,2	5,2
				15:00,0		480	8						

Masse am Anfang = 2,5 kg

Masse am Versuchsende (8 h) = 2,226 kg

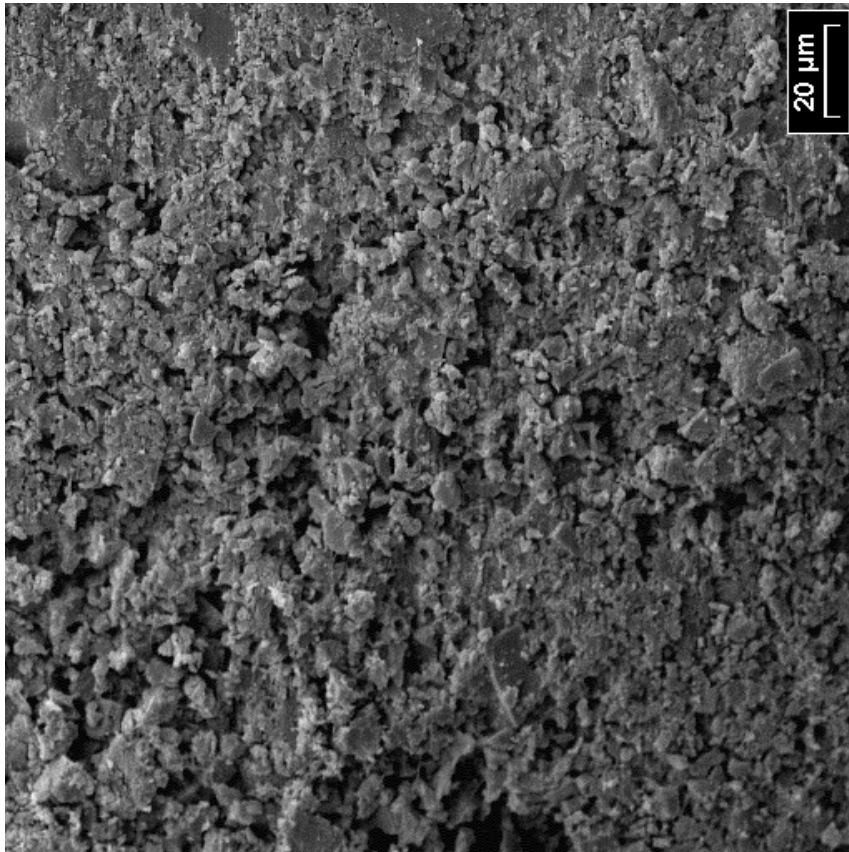


Natriumpercarbonat nach der Beanspruchung

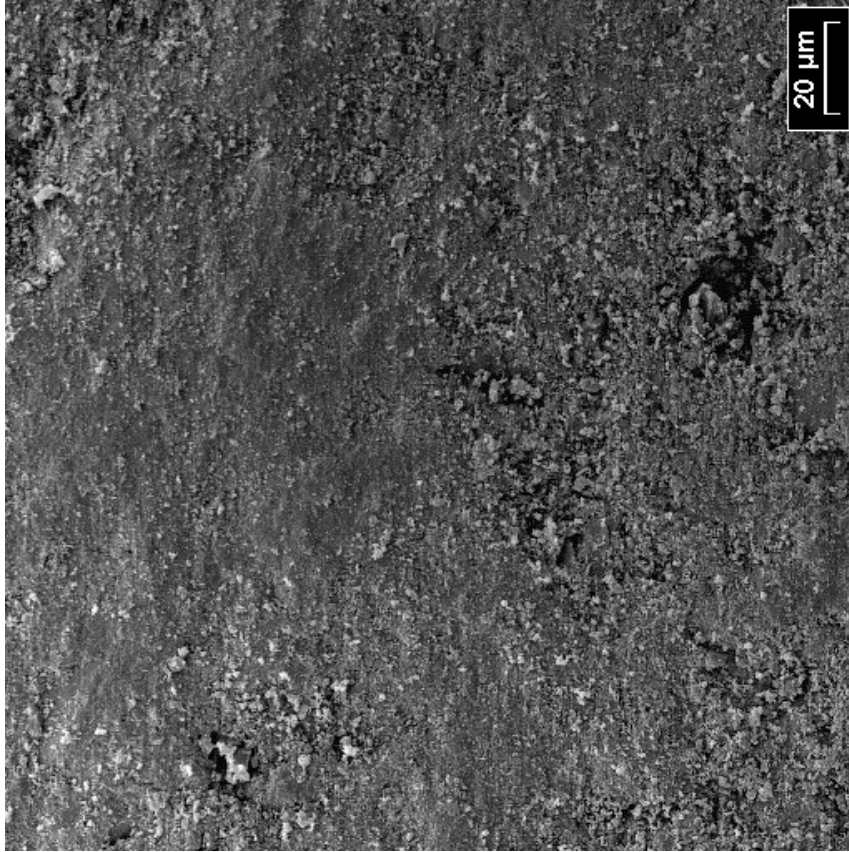


Natriumpercarbonat vor der Beanspruchung





Selbst hergestelltes Granulat vor der Beanspruchung



Selbst hergestelltes Granulat nach der Beanspruchung

**10 Literatur**

- [1] Werther, J., Xi, W.: Jet attrition of catalyst particles in gas fluidized beds, Powder Technology, 76 (1993), s. 39-46
- [2] Bemrose, C. R., Bridgewater, J.: A Review of Attrition And Attrition Test Methods, Powder Technology 49 (1987), s. 97-126
- [3] Shu- Jh Wu, Baeyens, J., Chen- Jeou Chu: Effect of the Grid- Velocity on Attrition in Gas Fluidized Beds, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volume 77, August, 1999, s. 738-744
- [4] Xi, W.: Katalysatorabrieb in Wirbelschichtreaktoren, TU Hamburg- Harburg, Diss. 1993, Reihe Verfahrenstechnik, Verlag Shaker, Hamburg 1993
- [5] Werther, J., Reppenhagen, J.: Catalyst attrition in fluidized bed systems, AIChE Journal 45 (1999), s. 2001-2010
- [6] Benz: Entwicklung eines Testverfahrens zur Beurteilung der Abriebstabilität von Granulaten, GVC- Jahrestagung, Dortmund (1996)
- [7] Vogel, L., Peukert, W.: Zerkleinerungsverhalten verschiedener Kunststoffe unter Einzelkornbedingungen, Tagung des GVC- Fachausschusses „ Agglomeration und Schüttguttechnik“, 04. April, Erfurt (2000)
- [8] Vauck, Müller: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik, 11. überarbeitete und erweiterte Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart 2000
- [9] Weichert, R.: Anwendung von Fehlstellenstatistik und Bruchmechanik zur Beschreibung von Zerkleinerungsvorgängen, Zement- Kalk- Gips 45, Nr. 1, 1992, s. 1-8
- [10] Rittinger, P.: Lehrbuch der Aufbereitungskunde, Ernst & Korn, Berlin 1967
- [11] Hukki, R., T.: Proposal for a Solomonic Settlement Between the Theories of Rittinger, Kick and Bond, Trans AIME223, 1962, s. 403-408
- [12] Rumpf, H.: Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft, Chemie- Ing.- Techn. 37 (1965), s. 187-202
- [13] Rumpf, H., Schönert, K.: Über die Beurteilung der Aufbereitung feiner und feinsten Körnungen mit Hilfe der Einzelkornzerkleinerung, Freiberg Forschungsh. A4 15 (1967), s. 15-24
- [14] Weibull, W.: Investigations into Strength Properties of Brittle Materials, Ingeniörsvetenskapsakademiens, handlingar (1938) 149
- [15] Leschonski, K., Alex, W.: Probenahme, Chemie Ing.- Techn. 46 (1974), Nr.7, s.289-292

- [16] Panagopoulos, C., Fasoula, E.: The abrasive wear of borosilicateglass, *Journal of Materials Science*, Band 29 (1994), Heft 3, s. 773-777
- [17] Pis, J., J., Fuertes, A., B., Artos, V., Suarez, A., Rubiera, F.: Attrition of coal/ Ash Particles in a Fluidized Bed, *Powder Technology* 66 (1991), s. 41-46
- [18] Ayazi Shamlou, P., Lim, Z., Yates, J.G.: Hydrodynamic Influences on Particle Breakage in Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science*, Vol. 45 Nr. 4, 1990, s. 809-817
- [19] Rwei, P., S., Manas – Zloczower, I.: Characterization of Agglomerate Dispersion by Erosion in Simple Shear Flows, *Polymer Engineering and Science*, Greenwich, Band 31 (1991), Heft 8, s. 558-562
- [20] DIN 50320: Verschleißbegriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgänge, Gliederung des Verschleißgebietes, Ausg. Dez. 1979
- [21] Menning, Günter: Verschleiß in der Kunststoffverarbeitung, Phänomene und Schutzmaßnahmen, Carl Hauser Verlag München Wien 1990, s. 22-35
- [22] Rieschel, H., Zech, K.: Vergleich verschiedener Prüfmethode zur Qualitätsprüfung von Kaligranulat, *Aufbereitungs – Technik* Nr.9 (1981)
- [23] Forsythe, W.L., Hertwig, W.R.: Attrition Characteristics of Fluid Cracking Catalysts, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.41 Nr.6, s. 1200-1206
- [24] Yia- Ching Ray, Tsung- Shann Jiang: Particle Attrition Phenomena In A Fluidized Bed, *Powder Technology* 49 (1987), s. 193-206
- [25] Joachim Werther: Grundlagen der Wirbelschichttechnik, *Chem. Ing. Tech.* 54 (1982) Nr.10, s.876-883
- [26] Kunii, D., Levenspiel, O.: *Fluidization Engineering*, Verlag Butterworth-Heinemann, 1991
- [27] Knebel: Zur Populationsbilanz für die Wirbelschichtsprühgranulation, Vortrag auf der Tagung des GVC- Fachausschußes „Trocknungstechnik“, 25,26. März, Weimar 1999
- [28] Heinrich, S., Mörl,L.: „Zeitlich veränderliche Partikelgrößenverteilung beim Granulieren, Coaten und Agglomerieren in Wirbelschichten“, Vortrag auf der Tagung des GVC- Fachausschußes „Agglomeration- und Schüttguttechnik“, 04. April, Erfurt 2000
- [29] Demmich, J.: Untersuchungen zum Feststoffaustrag aus Wirbelschichten, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Technische Universität Carolowilhelmina zu Braunschweig, Diss.1986
- [30] Wirth, K.-E.: *Zirkulierende Wirbelschichten*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1990

- [31] Baeyens, J., Cuvelier, P., Geldart, D.: The Development, Design and Operation of a Fluidized Bed Limestone Calciner, Zement- Kalk- Gips (12), 1989, s. 620-627
- [32] Harald Hoffman, Otto Molerus: Feingutaustrag aus Wirbelschichten, Chemie-Ing.- Techn. 47 (1975), Nr. 23, s.995
- [33] Heinrich, S., Peglow, M., Mörl, L.: Unsteady and steady state particle size distributions in batch and continuous fluidized bed granulation systems, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 2000), Noordwijkerhout, The Netherlands, august 28-31, 2000, paper Nr. 212, s. 1-10
- [34] Vaux, W.G., Keairns, D.L.: Particle Attrition in Fluidized Bed Process, Fluidisation, J.R. Grace, J.M. Matsen, Eds., Plenum Press, New York, 1980, s.437-444
- [35] Zenz, F.A., Kelleher, E.G.: Studie on attrition rates in fluidpartiele system via free fall, grid jets, and cyclone impact, J. of Powder & Bulk Solids, Technology 4, 1980 2/3, s. 13- 20
- [36] Werther, J., Reppenhagen, J.: Catalyst attrition in fluidized bed systems, paper, Technikal University Hamburg- Harburg, 1999
- [37] Ghadiri, M., J.A.S. Cleaver, V.G. Tuponogov: Modelling Attrition Rates in the Jetting Region of a Fluidized Bed, Preprints of the symposium Attrition and Wear, The Netherlands, 79, 1992
- [38] Seville, J.P.K., Mullier, M.A., Adams, M.J.: Attrition of Agglomerates in Fluidized Beds, Proc. Of the 7<sup>th</sup> Eng. Found. Conf. on Fluidization, Broadbeach, Australia, 1992, s. 587
- [39] Patel, K., Nienow, A.W., Milne, I.P.: Attrition of Urea in a Gas- Fluidized Bed, Powder Technology 47, 1986, s. 257
- [40] Blinichev, V.N., Streltsov, V.V., Lebedeva, E.S.: An Investigation of the Size Reduction of Granular Materials during their Processing in Fluidized Beds, Int. Chem. Eng., 8(4), 1968, s. 615
- [41] Pell, M.: Gas Fluidization, Handbook of Powder Technology, Elsevier, Amsterdam, 8, 97, 1990
- [42] Reppenhagen, J., Werther, J.: Catalyst Attrition in Cyclones, Preprints of the Third International Particle Technology Forum, Brighton, UK, 1998
- [43] Trefz, M., Muschelknautz, E.: Extended Cyclone Theory for Gas Flows with High Solids Concentration, Chem. Eng. Technol. 16, 153, 1993
- [44] British Materials Handling Board, Particle Attrition, Trans Tech Publications, Clausthal- Zellerfeld, Germany, 1987

- [45] Michel, W.: Wirbelschichttechnik in der Energiewirtschaft, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1994
- [46] Leschonski, K., Alex, W.: Darstellung und Auswertung von Teilchengrößenverteilungen, Chemie- Ing.-Techn. 46, Nr. 1, s.23-26, 1974
- [47] Kolgin, B., Leschonski, K.: Oberflächenmessung, 33. Folge, Chemie-Ing.-Techn. 46, Nr.23, s. 984-987, 1974
- [48] Kolgin, B., Leschonski, K.: Oberflächenmessung, 34. Folge, Chemie- Ing.-Techn. 47, Nr. 1, s. 21-24, 1975
- [49] Rumpf, H: Die Wissenschaft des Agglomerierens, Chemie- Ing.- Techn. 46, Nr.1, s. 1-10, 1974
- [50] Heinrich, S., Mörl, L.: Modellierung und Untersuchung der Granulatverteilungsspektren bei der Wirbelschicht-Sprühgranulationstrocknung, Chem. Ing.-Tech. 71, 9, s. 963,964, 1999
- [51] Heinrich, S.: Modellierung des Wärme- und Stoffübergangs sowie der Partikelpopulationen bei der Wirbelschicht- Sprühgranulation, VDI-Fortschrittbericht, Nr. 675, Reihe 3, VDI- Verlag, Düsseldorf (2001), ISBN 3-18-36 7503-X
- [52] Heinrich, S., Peglow, M., Ihlow, M., Henneberg, M., Mörl, L.: Modellierung der Partikelpopulationen bei der Wirbelschicht- Sprühgranulation, Analyse des Partikelwachstums und- abriebs unter Berücksichtigung verschiedener Fahrweisen, interne Arbeitssitzung des GVC- Fachausschußes „Agglomerations- und Schüttguttechnik“, 15./16. März, Freiburg/ Breisgau, 2001
- [53] C.T. Carrondo et al.: X-Ray Crystal Structure of the Industrial Bleaching Agent 'Sodium Percarbonate' [Sodium Carbonate-Hydrogen Peroxide (2/3)], J. Chem. Soc. Dalton Trans, s. 2323- 2327, 1977
- [54] Westermann, Näser, Brandes: Anorganische Chemie, 12. bearbeitete Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie- Leipzig, 1982
- [55] Schröter, W., Lautenschläger, K., Bibrack, H., Schnabel, A.: Chemie, 15 neubearbeitete Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1984
- [56] Backe, H.: Werkstoffkunde für die Bauindustrie, 18. bearbeitete Auflage, VEB Verlag für Bauwesen Berlin 1982
- [57] Eisenbrand, G., Schreier, P.: Lebensmittelchemie, Rompp Lexikon, Georg Thieme Verlag, Stuttgart- New York, 1995
- [58] Baltes, W.: Lebensmittelchemie, 3. Auflage, Springer- Lehrbuch, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1992

- [59] Frohne, D., Jensen, U: Systematik des Pflanzenreichs, 5. Auflage, wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart, 1998
- [60] Reimann, E., Mörl, L.: Gravimetrische Bestimmung der Partikelkonzentration, Bericht, Otto- von- Guericke- Universität Magdeburg, 2000 (unveröffentlicht)
- [61] Baumbach, G.: Luftreinhaltung (Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen- Meßtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften), Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1990
- [62] Offenlegungsschrift, DE 4338401 A1: Verfahren zur Herstellung von abriebfestem Natriumpercarbonat mit hoher Lösegeschwindigkeit, Degussa AG, 60311 Frankfurt, 11.05.1995
- [63] Rumpf, H., Ebert, K.F.: Darstellung von Korngrößenverteilungen und Berechnung der spezifischen Oberfläche, Chemie- Ing.- Techn. 36, s.523-537, 1964
- [64] DIN 66141: Darstellung von (Korn-) Teilchengrößenverteilungen
- [65] DIN 66145: Darstellung von (Korn-) Teilchengrößenverteilungen: RRSB- Netz
- [66] DIN 66144: Darstellung von (Korn-) Teilchengrößenverteilungen: Logarithmisches Normalverteilungsnetz
- [67] Leschonski, K., Alex, W., Kolgin, B.: Teilchengrößenanalyse, Darstellung und Auswertung von Teilchengrößenverteilungen (Fortsetzung), Chemie- Ing.- Techn. 46, s.101-104, 1974
- [68] Allen, T.: Particle Size Measurement, 2<sup>nd</sup> Edition, Chapman and Hall Ltd, London, 1975
- [69] Schuhmann, R.: Size Distribution an Surface Calculations, Amer. Inst. Mining Met. Engr. Techn. Publ., 1189, 1940
- [70] Heywood, H.: Calculation of the Specific Surface of a Powder, Inst. of Mech. Eng., London, 1933
- [71] Muchlenov, I. P., Dobkina, E. I.: Technologie von Katalysatoren, Chemie Verlag, L. 1979
- [72] Awdeew, B. A.: Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Materialien, Maschinenbau, s. 488, M. 1965
- [73] Kurnosow, B. I.: Messen der mechanischen Charakteristiken von Materialien, M., Verlag Standartow, s. 239, 1976
- [74] Vaux, W. G.: Attrition of Particles in the Bubbling Zone of a Fluidized Bed, Proceedings of the American Power Conference 40, s. 793-802, 1978

- [75] Ghadiri, M., Cleaver, J.A.S., Tuponogov, V.G., Werther, J.: Attrition of FCC Powder in the Jetting Region of a Fluidized Bed, Powder Technology 80, s. 175- 178, 1994
- [76] Mullier, M. A., Seville, J.P.K., Herbert, F., Adams, M.J.: The Abrasive Wear of Silica Sand Agglomerates, Tribology International 26, s. 329- 334, 1993
- [77] Kono, H.: Attrition Rates of Relatively Coarse Solid Particles in Various Types of Fluidized Beds, Recent Advances in Fluidization and Fluid- Particle Systems, AIChE Symposium Series 205, s. 96-106, 1981
- [78] Mullier, M.A., Seville, J.P.K., Adams, M.J.: The Effect of Agglomerate Strength on Attrition during Processing, Powder Technology 65, s. 321-333, 1991
- [79] Fleck, S.: Abscheidung und Agglomeration feinsten Aerosole in einer Wirbelschicht, Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Dissertation, Januar 2000
- [80] Patentschrift DE 4201615C2: Verfahren zur Herstellung von keramischen Kugeln, inoceramic Gesellschaft für innovative Keramik mbH, 07629 Hermsdorf
- [81] Stein, M., Seville, J.P.K., Parker, D.J.: Attrition of Porous Glass Particles in a Fluidized Bed, Powder Technology 100, s.242-250, 1998
- [82] Tasirin, S.M., Geldart, D.: Entrainment of FCC from fluidized beds- a new correlation for the elutriation rate constants, Powder Technology 95, s. 240-247, 1998
- [83] Bradley Eldredge, H., Drown, D.C.: Solids flow and mixing model for a fluidized bed coating and calcination process, Chemical Engineering Science 54, s. 1253-1264, 1999
- [84] Schultz, P., Kleinebudde, P.: Determination of Pellet Friability by Use of an Air Stream Apparatus, Pharm. Ind. 57, Nr. 4, s. 323-328, 1995
- [85] Uhlemann, H., Mörl, L.: Wirbelschicht- Sprühgranulation, Springer Verlag (2000)
- [86] Behns, W., Dalichau, J., Käferstein, P., Mörl, L.: Zerfallsverhalten von Partikeln in Wirbelschichten, Chem.- Ing.- Tech. 70, 9, s. 1061, 1998
- [87] Patentschrift EP 0109525 A2: Attrition resistant molecular sieve, Union Carbide Corporation
- [88] Boerefijn, R.; Ghadiri, M.: Untersuchung der Bildung von Abrieb beim katalytischen Wirbelschichtkracken, World Congr. Chem. Eng., 1996, VI, 273-278, Conference

- [89] Lee, S.-K.; Jiang, X.; Keener, T.C.; Khang, S.J.: Abrieb von Calciumoxid-Sorbens bei der Fluidisierung in einem Adsorber nach dem Prinzip des zirkulierenden Fließbetts, *Ind. Eng. Chem. Res.* (1993), 32(11), s. 2758-2766
- [90] Liu, Y.-D., Kimura, S.: Fluidisierung und Austrag von schwierig zu fluidisierenden Pulvern, gemischt mit leicht fluidisierbaren Partikeln, *Powder Technol.* (1993), 75(2), s. 189-196
- [91] Buczek, B.; Czepirski, L.: Measurements of attrition tendency of adsorbents, *Symposium Attrition and Wear in Powder Technology*, 12.-14.10.1992, NL (1992) 2, s. 465-466, Conference
- [92] Bond, F.C.: *The laws of rock breakage (Symposium Zerkleinern)*, Verlag Chemie 1982
- [93] Schubert, H.: *Dissertation, Universität Karlsruhe*, 1972
- [94] Schubert, H.: Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen, *Chemie- Ing.-Techn.* 45, 1973, s. 396-401
- [95] Brereton, C.M.H., Grace, J.R.: Der Übergang zum turbulenten Fließbett, *Chem. Eng. Res. Des.* (1992), 70(A3), s.246-251
- [96] Szalay, A.: Studies on the effects of particle circulation during drying of suspensions in a mechanically spouted bed dryer with inert packing, *Drying Technol.* (1991), 9(2), s. 521-523
- [97] Jong, J.A.H.: Mechanische Eigenschaften von Tabletten aus in einem Fließbett hergestellten Granulaten, *Powder Technol.*, (1991), 65(1-3), s. 293-303
- [98] Kokkoris, A., Turton, R.: The reduction in attrition in fluidized beds by the addition of solid lubricants, *AIChE Symp. Ser.* (1991) 87, s. 20-31
- [99] Yates, J.G., Cobbinah, S.S., Cheeseman, D.J., Jordan, S.P.: Particle attrition in fluidized beds containing opposing jets, *AIChE Symp. Ser.*(1991) 87, s. 13-19
- [100] Kono, H.O., Huang, C.-C., Xi, M., Botros, P.E.: The effect of bed configuration on the forces prevailing in fluidized beds, *Powder Technol.* (1990) 62(1), s. 13-20
- [101] Nelson, T.B.; Skaates, J.M.: Attrition in a liquid fluidized-bed bioreactor, *Ind. Eng. Chem. Res.* (1988) 27(8),s. 1502-1505
- [102] Liu, Zhonghai; Chen, Chaoyu; Fu, Jujie: Particle attrition phenomena in a spouted- fluidized bed with a draught tube, *J. Chem. Eng. Chin. Univ.*, (1991) 5(2), s. 129-134



- [103] Nassar, R.; Chon, S.T.; Fan, L.T.: Stochastic analysis of particle degradation in a semi- continuous flow system containing solid particles, Hung. J. Ind. Chem. (1987), 15(1), s. 73-82
- [104] Kono, H.O.; Soltani- Ahmadi, A.; Suzuki, M.: Kinetic forces of solid particles in coarse particles fluidized beds, Powder Technol. (1987), 52(1), s. 49-58
- [105] Ray, Y.C.; Jiang, T.S.; Jiang, T.L.: Particle population model for a fluidized bed with attrition, Powder Technol. (1987), 52(1), s. 35-48
- [106] Mörl, L.: Growth of granules in fluidized- bed drying, taking into account the formation of nuclei, Int. Chem. Eng.,(1986), 26(2), s. 236-242
- [107] Austmeyer, K.E., Frankenfeld, T.: Crystallization, Chem.-Ing.-Tech., (1985), 57(11), s. 1000-1004
- [108] Schruben, J. S., Vaux, W.G.: Attrition in the bubbling zone of a steady- state fluidized bed, Chem. Eng. Commun, 1985, s. 337-347
- [109] Geldart, D.: The design of distributors for gas- fluidized beds, Powder Technol., 1985, 42(1), s. 67-78
- [110] Bellagi, A., Hammer, H.: Methanisierung von Kohlenmonoxid in der Wirbelschicht, Chem.-Ing.-Tech., 1984, 56(2), s. 122-123
- [111] Ratnam, S.R., Viswanathan, K.: Studies on attrition in fluidized beds, J.Powder Bulk Solids Technol., 1984, 8(4), s. 1-9
- [112] Arastoopour, H., Chen, Chen-Ya: Attrition of char agglomerates, Powder technol., 1983, 36(1), s. 99-106
- [113] Vaux, W.G., Fellers, A.W.: Measurement of attrition tendency in fluidization, AIChE Symp. Ser., 1981, 77(205), s. 107-115
- [114] Ewell, R.B., Gadmer, G., Turk, W.J.: FCC catalyst management, Hydrocarbon Process, 1981, 60(9), s. 103-112
- [115] Kono,H.: Attrition rates of relatively coarse solid particles in various types of fluidized beds, AIChE Symp. Ser., 1981, 77(205), s. 96-106
- [116] Rangelova, J., Mörl, L., Heinrich, S., Dalichau, J.: Zerfallsverhalten von Partikeln in Wirbelschichten- Anwendung eines konstanten massenbezogenen Abriebskoeffizienten, Chem.-Ing.-Tech.73 (2001) 9, s. 1124-1131
- [117] Rangelova, J., Mörl, L., Dalichau, J., Heinrich, S.: Attrition of particles in fluidized beds, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Congress of Chemical Engineering ECCE-3, Nürnberg, june 26-28, 2001, Chem.-Ing.-Tech.73 (2001) 6, s. 703-704



## Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name: Rangelova  
Vorname: Janitza  
geboren wann: am 27.12.1973  
geboren wo: in Russe, Bulgarien  
Nationalität: bulgarisch  
vorheriger Wohnsitz: „Orphei“ 38, Eingang B, Wohnung 88,  
Haskovo 6300, Bulgarien  
jetziger Wohnsitz: J.-G.- Nathusius- Ring 8 (WH 5), Zimmer 201,  
39106 Magdeburg  
Familienstand: ledig

### Schulbildung:

- Grundschule: von 1979 bis 1988, in Haskovo,  
Name der Schule „Schandor Petöfi“
- Gymnasium: von 1988 bis 1992, in Haskovo,  
Fremdsprachiges Gymnasium: „Prof.Dr.A.  
Zlatarov“, nach erfolgreich bestandenem  
Aufnahmeprüfungen in Mathematik und  
Bulgarisch, Richtung- deutsche Sprache mit der  
Gesamtnote „ausgezeichnet“ abgeschlossen

### Studium:

- von 1992 bis 1997, an der Universität für  
Chemische Technologie und Metallurgie- Fach  
Verfahrenstechnik in Sofia studiert, nach den  
Lehrplänen der Technischen Universität  
Hamburg-Harburg
- von 29.08.1995 bis 02.10.1995- Praktikum in  
Hannover zum Thema „Inbetriebnahme und  
Kalibrierung eines Sensorsystems für die  
konduktive Tomographie“
- im 5. Studienjahr- Praktikum in einem

Weinbetrieb in Bulgarien

- 03.02.1997 bis 02.07.1997- Anfertigung der Diplomarbeit in Magdeburg am Institut für Apparate- und Umwelttechnik, Thema der Diplomarbeit: „Zerfallsverhalten von Partikeln in Wirbelschichten“, Verteidigung in einem öffentlichen Kolloquium an der Otto-von-Guericke- Universität Magdeburg mit der Note „Sehr gut“ 1
- Erhaltung des Diploms am 23.10.1997 an der Universität in Sofia (Bulgarien)

**Berufliche Tätigkeit:**

- November 1997- August 1998- arbeitslos
- August 1998-Februar 1999-Praktikum nach dem

Studium am Institut für Ziegelforschung Essen E.V., Abteilung Umwelt- und Verfahrenstechnik, „Meßaufgaben zur Entwicklung eines keramischen Wärmedämmverbundsystems“

- Februar 1999- Februar 2002-Promotion an der Otto-von-Guericke- Universität Magdeburg am Institut für Apparate- und Umwelttechnik, Thema der Doktorarbeit: „Abriebsverhalten von Feststoffpartikeln in Wirbelschichten“
- April 2002-Mai 2002-Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Apparate- und Umwelttechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Seit Juni 2002-Stipendiantin am Institut für Apparate- und Umwelttechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Verteidigung der Dissertation am 07.06.2002