



**Einfluss der Mischgutfeuchte, der
Korngrößenverteilung und weiteren
agglomerationsrelevanten Korneigenschaften
von Sintereinsatzmischungen auf den
Druckverlust über die Schüttungen und die
Sinterleistung**

Masterarbeit

eingereicht von

Anna Griesser

am Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie an der Montanuniversität Leoben
zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieurin

in der Studienrichtung Verfahrenstechnik



Kurzfassung

Beim Sinterprozess spielt die Durchgasbarkeit der Sintermischung eine wesentliche Rolle im Hinblick auf die Sinterleistung. Die Korngrößenverteilung der einzelnen Sintereinsatzstoffe sagt nur bedingt etwas über die Sinterleistung der Einsatzmischung aus, da diese durch den Agglomerationsvorgang gezielt verändert wird. In dieser Arbeit wird versucht einen Zusammenhang zwischen der Packungsstruktur und der Korngrößenverteilung der granulierten Einsatzmischungen und deren strömungstechnischen Eigenschaften über das empirische Widerstandsgesetz nach Ergun zu bestimmen. Dafür müssen die Widerstandsbeiwerte dieses Gesetzes für Sintereinsatzmischungen bestimmt werden. Die Koeffizienten der Beiwerte hängen vom Agglomerationsverfahren ab, weil sich durch unterschiedliche Granulationsvorgänge die Kornform und die Porosität (durch die Zusammenpressung und Anlagerung der Körner zu gröberen Agglomeraten) verändern. Um diese Koeffizienten zu bestimmen und das Gedankenbild von Ergun zu testen, werden die wesentlichen Schüttguteigenschaften, wie Lückengrad und ein Kennwert für die Korngrößenverteilung (harmonischer Durchmesser), sowie der Druckverlust über die Schüttungen experimentell bestimmt. Zunächst zeigte sich, dass der Zusammenhang zwischen harmonischem Durchmesser und Lückengrad nicht eindeutig ist und stark streut. Die erhaltenen Ergebnisse veranschaulichen, dass die Widerstandsbeiwerte a und b für Sintereinsatzmischungen nicht konstant sind. Diese Koeffizienten hängen stark vom Granulationsprozess ab. Somit kann allein aus der Bestimmung des harmonischen Durchmessers der Sintereinsatzmischung und der Schüttdichte bzw. dem daraus berechneten Lückengrad nicht auf die Permeabilität bzw. den Druckverlust der Schüttung über die Ergungleichung rückgeschlossen und in weiterer Folge auch keine Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung abgeschätzt werden.

Abstract

The permeability of the burden is a very important factor in view of the productivity at the sinter strand. The grain size distribution of the individual input materials do not correlate with the productivity of the sinter bed, because it will be modified at the granulation process. In this work it is tried to become a link between the structure and the grain size distribution of the agglomerated mixture and the fluidic properties through the empirical law according to Ergun for the pressure loss in a packed bed. For this law the resistance coefficients for the cold sinter bed have to be determined. These coefficients depend on the granulation process, because the grain shape and the porosity change due to the different granulation procedures. For the determination these coefficients and the examination of theoretical model of Ergun, the relevant properties of the agglomerated bulk solids, such as voids fraction and a parameter of the grain size distribution, as well as the pressure drop through the bulk are experimentally determined. First of all it is shown that the link between the parameter of the grain size distribution of the packed beds and the voids fraction is not clear and strew strongly. The received results exemplify, that the resistance coefficients a and b for the cold sinter beds are not constant, because they depend strongly on the granulation process. Consequently the pressure drop through the cold sinter bed cannot be estimated through the Ergun equation and furthermore no indications for the expected productivity can be estimated.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

.....
Anna Griesser

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	I
Allgemeine Formelzeichen	I
Akronyme.....	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	I
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	2
2 Sinterprozess	4
2.1 Einsatzstoffe der Sinteranlage	4
2.2 Vorbereitung der Einsatzstoffe für den Sinterprozess	5
2.3 Ablauf des Sinterprozesses	5
2.4 Ziele des Sinterns	7
2.5 Einflussfaktoren auf die Sinterleistung	7
2.5.1 Korngrößenverteilung der Rohstoffe	8
2.5.2 Wassergehalt.....	9
2.5.3 Permeabilität.....	11

3	Charakterisierung von Feststoffschüttungen und Schüttgutpartikeln	12
3.1	Schüttguteigenschaften	12
3.1.1	Packungsstruktur von Schüttgütern.....	13
3.1.1.1	Einfluss der Korngröße	14
3.1.1.2	Einfluss der Kornform	15
3.1.1.3	Einfluss der Korngrößenverteilung	16
3.1.1.4	Einfluss des Abstandes von der Gefäßwand	16
3.1.2	Lückengrad (Lückenvolumenanteil, Hohlraumvolumenanteil)	17
3.1.2.1	Bestimmung des Lückengrades	18
3.1.3	Schüttdichte	18
3.1.3.1	Bestimmung der Schüttdichte.....	18
3.1.4	Korngröße und Korngrößenverteilung	19
3.1.4.1	Kennwerte für die Korngröße	19
3.1.4.2	Kennwerte für die Korngrößenverteilung.....	21
3.1.4.3	Korngrößenanalyse	22
3.2	Eigenschaften von Schüttgutpartikel	24
3.2.1	Reindichte	25
3.2.1.1	Bestimmung der Reindichte mit dem Helium-Pyknometer.....	25
3.2.2	Rohdichte.....	27
3.2.2.1	Bestimmung der Rohdichte mit der Pyknometermethode.....	27
3.2.2.2	Bestimmung der Rohdichte mit der Aufhängemethode.....	28
3.2.3	Innere Porosität	29
3.2.4	Spezifische Oberfläche.....	29
3.2.5	Kornform	30
3.2.6	Einfluss der chemischen Zusammensetzung und der Korngröße auf die Eigenschaften von Schüttgutpartikel	32
4	Durchströmung von Feststoffschüttungen	36
4.1	Hydraulische Durchmesser	36
4.2	Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Feststoffschüttung	38
4.3	Druckverlust, Widerstandsbeiwert und Reynoldszahl.....	39
4.4	Empirische Durchströmungsgleichung	42
4.4.1	Zähe Durchströmung	43
4.4.2	Zäh-turbulente Durchströmung.....	44
4.5	Widerstandsgesetze	45
4.5.1	Brauer	45

4.5.2	Ergun	46
4.5.3	Jeschar	47
5	Experimentelle Durchführung	53
5.1	Einsatzmaterialien und Zusammensetzung.....	54
5.2	Granulation und Einstellung der Mischgutfeuchte	58
5.3	Bestimmung der Korngrößenverteilung und des harmonischen Durchmessers ..	62
5.4	Bestimmung des Druckverlustes über die Schüttungen	68
5.5	Bestimmung der Schüttdichte	71
5.6	Bestimmung der Reindichte der Komponenten.....	71
5.7	Bestimmung der Rohdichte der Komponenten.....	73
5.8	Bestimmung der Rohdichte der Sintereinsatzmischungen	75
5.9	Bestimmung des Lückengrades.....	80
5.10	Bestimmung der Widerstandsbeiwerte.....	81
6	Diskussion der Ergebnisse.....	84
6.1	Bestimmung der Mischgutfeuchte	84
6.2	Granulation und Auswirkungen auf die Korngrößenverteilung und den harmonischen Durchmesser	85
6.3	Schüttdichte.....	90
6.4	Lückengrad.....	91
6.5	Druckverlust über die Schüttungen	93
6.6	Bestimmung der Widerstandsbeiwerte.....	98
6.7	Schlussfolgerung	101
7	Zusammenfassung	104
	Literaturverzeichnis	106

Allgemeine Formelzeichen

A	Querschnitt der Schüttung
A, B	Konstanten der polynomischen Trendlinie
a, b	Widerstandsbeiwerte
A_i	Oberfläche der Körnermenge
$a_{M,S}$	massenspezifische Oberfläche
A_P	gesamte Oberfläche der Partikel
A_R	Querschnitt der Probenretorte
A_S	Querschnitt der leeren Säule
$a_{V,S}$	volumenspezifische Oberfläche
B	Durchlässigkeit
D	Säulendurchmesser
d_{32}	Sauterdurchmesser
d_{50}, d_{10}, d_{90}	Medianwert der Verteilung
d_h	harmonischer Durchmesser
d_{hyd}	hydraulischer Durchmesser
d_m	mittlere Korngröße
d_{max}	Modalwert der Verteilung
d_{mi}	mittlere Korngröße einer Kornklasse

d_p	Partikeldurchmesser
d_{Pe}	Durchmesser der Nicht-Kreisflächen
d_{pr}	Projektionsfläche-Äquivalentdurchmesser
d_S	Oberflächen-Äquivalentdurchmesser
d_{Sieb}	Siebkorngröße
d_V	Volumen-Äquivalentdurchmesser
f	Heywoodfaktor
H	Höhe der Schüttung
h	vom Messsystem aufgezeichneter Weg des Auflaststempels
k	Klassen, Carman-Kozeny Konstante
K_t	Konstante (turbulent)
K_z	Konstante (zäh)
m_{feucht}	Masse feucht
m_{Fl}	Masse des leeren Pyknometer mit Flüssigkeit und Stopfen
M_i	Masse der Körnermenge
m_{Korb}	Masse des Drahtkorbes
m_{leer}	Masse des leeren Pyknometer samt Stopfen
m_M	Masse des leeren Messgefäßes
m_{MP}	Masse des mit Probe gefüllten Messgefäßes
m_{Pr}	Masse Pyknometer und Probe samt Stopfen, Masse der Probe
m_{Pr+Fl}	Masse Pyknometer, Probe und Wasser samt Stopfen
$m_{Pr+Korb}$	Masse des Drahtkorbes samt Probe
m_{Probe1}	Masse der Probe 1
$m_{trocken}$	Masse trocken
m_{Wasser}	Masse Wasser
n	Stoffmenge
p	Druck
Q	Volumenstrom des Gases

R	ideale Gaskonstante
Re	Reynoldszahl
\tilde{v}	mittlere effektive Fluidgeschwindigkeit
V_A	Volumen der Zusatzzelle
V_{disp}	Volumen der Teilchen
V_{ges}	Gesamtvolumen der Packung
V_i	Volumen der Körnermenge
V_{kont}	Volumen des freien Raumes
V_M	Volumen des Messgefäßes
V_P	Probenvolumen
V_{Pges}	gesamte Volumen der Partikel
V_Z	Volumen des Messgefäßes
w	Leerrohrgeschwindigkeit
$w_{Durchschnitt}$	Durchschnittsfeuchtegehalt
$w_{H_2O, feucht}$	Feuchtegehalt auf kg feucht bezogen
$w_{H_2O, tr}$	Feuchtegehalt auf kg trocken bezogen
w_{Komp}	Massenprozent der einzelnen Komponenten
w_{Soll}	Sollfeuchtegehalt
x	Partikelgröße (je nach Definition)
y	Abstand von der Wand
α	Dispersphasenvolumenanteil
Δp	Druckverlust über die Schüttung
ΔQ_i	Menge einer Kornklasse
ε	Lückengrad
ε_K	Lückengrad der Gleichkornschüttung
ε_M	Lückengrad der Mischung
η	dynamische Viskosität
ν	kinematische Viskosität

π	Pi
ρ_{heimErz}	mittlere Rohdichte des heimischen Erzes
ρ_{Kumba}	mittlere Rohdichte des Kumba Feinerzes
ρ_{mRo}	mittlere Rohdichte
ρ_{MW}	Mittelwert aus Roh- und Reindichte
ρ_{P}	Rohdichte der Probe
ρ_{Re}	Reindichte
ρ_{Ro}	Rohdichte
$\rho_{\text{Ro, SV 4-15 Pr 1}}$	mittlere Rohdichte der Probe 1 der Mischung SV 4-15
ρ_{Sch}	Schüttdichte
φ	Formfaktor
X_{α}, X_{β}	unabhängig voneinander an einem Partikel gemessene Größen
Ψ	Widerstandszahl
Ψ_{C}	Zirkularität
Ψ_{Wa}	Sphärizität nach Wadell
$\Psi_{\alpha, \beta}$	Formfaktor

Akronyme

Agglo	Agglomeration
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CCD	Charge coupled device
CO ₂	Kohlendioxid
const.	konstant
CPA	Computerized Particle Analysis
d	Tag
etc.	et cetera
Fe ₂ O ₃	Hämatit
Glg.	Gleichung
H ₂ O	Wasser
HO	Hochofen
Hz	Hertz
KS	Kellerschlacke
min	Minute
misch+roll	mischen (Intensivmischer) und rollieren
SA	Sinteranlage, schwefelarm

SiO ₂	Siliziumdioxid
SNIM	Société Nationale Industrielle et Minière
SR	schwefelreich
SV	Sinterversuch
t	Tonne
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Sinteranlage [3].	6
Abbildung 2-2: Quasi-Partikel [6].	8
Abbildung 2-3: Verhältnis zwischen dem Wassergehalt nach der Granulation und der Permeabilität des Festbettes [8].	10
Abbildung 2-4: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Permeabilität des Festbettes eines Erzes bei unterschiedlicher Korngrößenverteilung [8].	10
Abbildung 3-1: Schüttgut [12].	13
Abbildung 3-2: Kubische Packung [13].	14
Abbildung 3-3: Dichteste reguläre Kugelpackung [14].	15
Abbildung 3-4: Großer Lückengrad bei sehr feinen Teilchen in Folge von Haftkräften [13].	15
Abbildung 3-5: Kleiner Lückengrad bei breiter Korngrößenverteilung [13].	16
Abbildung 3-6: Abhängigkeit des örtlichen ε vom bezogenen Wandabstand y/d_p für eine monodisperse Kugelschüttung [10].	17
Abbildung 3-7: Äquivalentdurchmesser nach verschiedenen Messmethoden und Partikelform [16].	21
Abbildung 3-8: Gegenüberstellung der Siebanalyse- und CPA-Ergebnisse [18].	23
Abbildung 3-9: Bilddarstellung eines Ausschnittes des gemessenen Partikelstromes [18].	24

Abbildung 3-10: Poröser Festkörper [19].	25
Abbildung 3-11: Darstellung der Reindichte über die Korngröße [11].	34
Abbildung 3-12: Darstellung der Rohdichte der Erze über die Korngröße [11].	35
Abbildung 4-1: Schematisierte Strömungsmodelle für Feststoffschüttungen [10].	37
Abbildung 4-2: Geschwindigkeitsverteilung in der Feststoffschicht [10].	39
Abbildung 4-3: Widerstandsfunktion für die Durchströmung [13].	43
Abbildung 4-4: Widerstandsgesetz nach Brauer (Kugeln) und Ergun (Granulate) [10].	47
Abbildung 4-5: Daten der Gleichkornschüttungen aus Kugeln [15].	48
Abbildung 4-6: Widerstandszahl für Gleichkornschüttungen aus Kugeln nach Messungen von Jeschar [15].	48
Abbildung 4-7: Daten der gemischten Mehrkornschüttungen aus Kugeln [15].	49
Abbildung 4-8: Widerstandszahl für gemischte Mehrkornschüttungen aus Kugeln nach Messungen von Jeschar [15].	50
Abbildung 4-9: Abhängigkeit der Ψ von Verhältnis ϵ_m/ϵ_k für verschieden Re-Zahlen [15].	51
Abbildung 4-10: Erweitertes Widerstandsgesetz für Mehrkornschüttungen [15].	52
Abbildung 5-1: Einsatzmaterialien.	55
Abbildung 5-2: Mischen der Einsatzmaterialien.	57
Abbildung 5-3: Rolliertrommel.	60
Abbildung 5-4: Intensivmischer.	61
Abbildung 5-5: HAVER CPA-Messgerät.	63
Abbildung 5-6: Ausgewertete Daten für die Mischung SV 4-15 Probe 1 mittels CPA-Messgerät.	64
Abbildung 5-7: Vergleich der Sieb- und CPA-Analyse: Heimisches Erz.	67
Abbildung 5-8: Vergleich der Sieb- und CPA-Analyse: Kumba Feinerz.	67
Abbildung 5-9: Vergleich der Sieb- und CPA-Analyse: Gießpfannenschlacke.	68
Abbildung 5-10: Permeabilitätsmessanlage.	69
Abbildung 5-11: Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Luftgeschwindigkeit.	70

Abbildung 5-12: Helium-Ultrapyknometer.....	72
Abbildung 5-13: Aufhängemethode.....	74
Abbildung 5-14: Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Luftgeschwindigkeit für Mischung SV 4-15 Probe 8 ohne Auflast.	81
Abbildung 6-1: Korngrößenverteilungen der Mischungen vor der Agglomeration.	85
Abbildung 6-2: Korngrößenverteilung der Mischung SV 4-15 vor und nach der Agglomeration (Proben 5 – 8).....	86
Abbildung 6-3: Korngrößenverteilung der Mischung SV 10-15 vor und nach der Agglomeration.	87
Abbildung 6-4: Korngrößenverteilung der Mischung SV 23-15 vor und nach der Agglomeration (rolliert).	88
Abbildung 6-5: Korngrößenverteilung der Mischung SV 23-15 vor und nach der Agglomeration (gemischt und rolliert).	88
Abbildung 6-6: Harmonischer Durchmesser über dem Feuchtegehalt (SV 4-15 Probe 1 - 8).....	89
Abbildung 6-7: Harmonischer Durchmesser über dem Feuchtegehalt (alle).....	90
Abbildung 6-8: Schüttdichte der Proben über den harmonischen Durchmesser.....	91
Abbildung 6-9: Lückengrad der Proben über den harmonischen Durchmesser.....	93
Abbildung 6-10: Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Leerrohrgeschwindigkeit der Luft.....	94
Abbildung 6-11: Widerstandszahl über Reynoldszahl.	95
Abbildung 6-12: Druckverlust je Längeneinheit über den hydraulischen Durchmesser....	96
Abbildung 6-13: Druckverlust der granulierten Mischungen über den harmonischen Durchmesser.....	97
Abbildung 6-14: Druckverlust der Schüttungen in Abhängigkeit der Mischgutfeuchte.	98
Abbildung 6-15: Widerstandsbeiwert a über den harmonischen Durchmesser.....	99
Abbildung 6-16: Widerstandsbeiwert b über den harmonischen Durchmesser.....	99
Abbildung 6-17: Widerstandsbeiwert a über den Lückengrad.	100
Abbildung 6-18: Widerstandsbeiwert b über den Lückengrad.	100

Abbildung 6-19: Sinterleistung über die Gasgeschwindigkeit bei 31 Hz. 102

Abbildung 6-20: Gebläsekennlinie bei 31 Hz..... 103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-I: Zusammensetzung der Sintereinsatzmischungen.	56
Tabelle 5-II: Ermittelte durchschnittliche Feuchtegehalte.	58
Tabelle 5-III: Sollfeuchte, Granulationsprogramm und für die Mischgutfeuchte benötigte Wassermenge.	59
Tabelle 5-IV: Tatsächlich eingestellte Mischgutfeuchte.	62
Tabelle 5-V: Berechnung des harmonischen Durchmessers.	65
Tabelle 5-VI: Ergebnisse für den harmonischen Durchmesser der Proben.	66
Tabelle 5-VII: Reindichten der Komponenten.	73
Tabelle 5-VIII: Rohdichten der Komponenten.	74
Tabelle 5-IX: Korngrößenverteilung Heimisches Erz und Kumba zur Berechnung der Rohdichte.	76
Tabelle 5-X: Dichten von Heimischen Erz und Kumba zur Berechnung der Rohdichte. ...	76
Tabelle 5-XI: Mittlere Rohdichten der einzelnen Komponenten für die Berechnung der mittleren Rohdichten der Sintereinsatzmischungen.	78
Tabelle 5-XII: Zusammensetzung der Mischung SV 4-15 Probe 1 und mittlere Rohdichten der Komponenten.	79
Tabelle 5-XIII: Mittlere Rohdichten und Feuchtegehalt (%/kg trocken) der Mischungen. ...	80
Tabelle 5-XIV: Daten der Mischung SV 4-15 Probe 8 (0 Newton) und der Luft für die Berechnung der Widerstandsbeiwerte.	82

1 Einleitung

Feinerze können nicht direkt in den Hochofen eingesetzt werden. Sie wirken sich negativ auf die Permeabilität und die Durchgasbarkeit aus. Daher müssen sie für den Einsatz im Hochofen zuerst in eine stückige Form gebracht werden. Eines der wichtigsten Verfahren zur Agglomeration von Feinerzen ist das Sintern. Vor dem Einsatz im Sinterprozess müssen die Feinerze noch mit Zuschlagstoffen (Basenträger), Koksgrus (Brennstoff) und Wasser in einer Mischtrommel homogenisiert werden. Anschließend wird das aus der Mischtrommel kommende Mischgut in eine Rolliertrommel transportiert. In der Rolliertrommel findet der Granulationsvorgang statt. Dabei werden kleinere Partikel an größere gebunden und somit eine stückige Sinteremischung erzeugt. Dadurch wird die Durchgasbarkeit bzw. Permeabilität in der Sinteranlage gewährleistet. Diese Einsatzmischung wird auf das Sinterband (Wanderrost) aufgebracht. Der Koksgrus der Mischung wird durch eine Zündhaube an der Oberfläche gezündet. Dabei werden die zu agglomerierenden Feinerze bis zum Aufschmelzen der Oberfläche erhitzt, wobei die Teilchen erweichen und zusammenkleben. Unter dem Rost befinden sich Saugkästen, über die Luft von oben nach unten (Unterdruck) durch die Mischung gesaugt wird, damit sich die Brennzone von der Oberfläche Richtung Saugkästen hin bewegt. Am Ende des Sinterbandes wird das gesinterte Gut abgeworfen, gebrochen, gesiebt und abgekühlt. Der Sinter mit einer Korngröße von 4-50 mm kann anschließend im Hochofen eingesetzt werden, die Fraktion < 4 mm wird als Rückgut wieder der Sintermischung zugegeben.

Um bei neuen Erzen bereits im Vorfeld Aussagen über die zu erwartende Sinterproduktivität zu bekommen, werden Sintertopfversuche durchgeführt. Diese Versuche sind aber mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Bevor die Mischung im Sintertopf gezündet werden kann, müssen ca. 200 kg Einsatzstoffe gemischt und granuliert werden.

Um die Anzahl der erforderlichen Versuche zu verringern, soll ein Zusammenhang zwischen den Schüttguteigenschaften der Sintereinsatzmischung im granulierten Zustand, die eine bestimmte strömungstechnische Eigenschaft aufweist, und der Sinterleistung gefunden werden.

1.1 Problemstellung

Beim Sinterprozess spielt die Durchgasbarkeit der Sintermischung eine wesentliche Rolle im Hinblick auf die Sinterleistung. Die Korngrößenverteilung der einzelnen Sintereinsatzstoffe sagt nur bedingt etwas über die Sinterleistung der Einsatzmischung aus, da diese durch den Agglomerationsvorgang gezielt verändert wird. Es ist daher notwendig einen Zusammenhang zwischen der Packungsstruktur und der Korngrößenverteilung der Einsatzmischung im agglomerierten Zustand und deren Durchgasbarkeit (strömungstechnischer Eigenschaft) herzustellen, um mit relativ wenig Untersuchungsaufwand (Bestimmung der Korngrößenverteilung der agglomerierten Mischung mit Bild-auswertendem Verfahren) experimentell gut abgesicherte Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung zu bekommen. Dadurch kann für eine gegebene Sintermischung vorab eine beträchtliche Einengung des mit aufwändigen Labor-Sinterversuchen (Sintertopfversuch) abzudeckenden Versuchsfeldes, vor allem hinsichtlich der Prozessparameter Mischgutfeuchte und Misch- und Agglomerierdauer erfolgen.

1.2 Zielsetzung

Der Zusammenhang zwischen der Packungsstruktur und der Korngrößenverteilung der granulierten Einsatzmischung und deren strömungstechnischen Eigenschaften sollen über das empirische Widerstandsgesetz nach Ergun bestimmt werden. Dafür müssen die Widerstandsbeiwerte dieses Gesetzes für Sintereinsatzmischungen bestimmt werden, da die ermittelten Beiwerte von Ergun nur für Granulate mit relativ engen Korngrößenverteilungen gelten. Die Koeffizienten des Beiwertes hängen vom Granulationsvorgang ab, weil sich durch unterschiedliche Granulationsvorgänge die Kornform und die Porosität (durch das Zusammenpressen der Körner) verändert. Um diese Koeffizienten zu bestimmen, müssen die wesentlichen Schüttguteigenschaften, wie Lückengrad und ein Kennwert für die Korngrößenverteilung, und der Druckverlust über die Schüttungen experimentell bestimmt werden. Die experimentellen Untersuchungen dieser Größen sollen mit Bild-auswertenden

Verfahren (Bestimmung des Kennwertes für die Korngrößenverteilung) und der Kaltpermeabilitätsmessung (Druckverlust über die Schüttung) erfolgen und das Gedankenbild von Ergun für Sintereinsatzschüttungen getestet werden.

2 Sinterprozess

Feinerze können nicht direkt in den Hochofen eingesetzt werden, da sie sich negativ auf die Permeabilität und die Durchgasbarkeit auswirken und zusätzlich teilweise mit dem Gichtgas ausgetragen werden. Die aufgrund hoher Verfügbarkeit und im Vergleich zu stückigen Einsatzstoffen kostengünstigeren Feinerze müssen daher für den Einsatz im Hochofen stückig gemacht werden. Eines der wichtigsten Verfahren dafür ist das Sintern [1,2].

2.1 Einsatzstoffe der Sinteranlage

- Feinerze von unterschiedlichen Lagerstätten
- Brennstoff: überwiegend Koksgrus mit einer Korngröße von ca. 0 – 5 mm
- Kreislaufstoffe: Gichtstaub, Walzzunder, LD-Staub, Sinterstaub etc.
- Zuschlagsstoffe: es werden meist Basenträger (Kalksplitt, Dolomit und Branntkalk) zugegeben
- Rückgut: gesintertes Gut, das die Mindestgröße von 5 mm für den Einsatz im Hochofen unterschreitet
- Rostbelag: Fertigsinter, der direkt auf die Roststäbe unter der Einsatzmischung aufgetragen wird
- Zündgas: üblicherweise Koksofengas, aber auch Gichtgas mit Starkgaszusätzen und Erdgas [1]

2.2 Vorbereitung der Einsatzstoffe für den Sinterprozess

Die Vorbereitung der Einsatzmaterialien für das Sintern besteht aus zwei Schritten:

- Homogenisieren
- Agglomerieren (Granulieren)

Bevor die Rohstoffe (Feinerz, Brennstoff, Zuschläge und Kreislaufstoffe) als Beschickungsgut im Sinterprozess eingesetzt werden, müssen sie homogenisiert werden. Dazu werden sie auf Mischbetten lagenweise übereinander geschichtet. Durch Mischbetten sollen Ungleichmäßigkeiten und Unterschiede (chemische Analyse, Korngröße) der einzelnen Erze ausgeglichen werden. Beim stirnseitigen Abgraben der unterschiedlich aufgetragenen Stoffe kommt es zu einer gleichmäßigen Durchmischung. Anschließend wird diese Grundmischung zusammen mit Koksgrus (ca. 0 – 5 mm) und Zuschlägen in eine Mischtrommel befördert. In der Mischtrommel erfolgt eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten und durch Wasserzugabe wird die Mischgutfeuchte eingestellt. Das aus der Mischtrommel kommende feuchte Mischgut wird in eine Rolliertrommel gegeben, wo es zur Granulation kommt. Feinste Partikel werden an gröbere Teilchen gebunden damit eine gute Durchgasbarkeit bzw. Permeabilität am Sinterband gewährleistet ist. Zusätzlich kann es in der Rolliertrommel zu einem Wasserzusatz kommen, falls dies erforderlich ist. Oft werden die Misch- und Rolliertrommel kombiniert [1].

2.3 Ablauf des Sinterprozesses

In der Sinteranlage werden die zu agglomerierenden Feinerze bis zum Aufschmelzen der Oberfläche erhitzt, wobei die Teilchen erweichen und zusammenkleben. Das Ergebnis ist ein stückiger, poröser Sinterkuchen. Der Koksgrus, der bei der Absiebung des Kokes vor dem Hochofeneinsatz gewonnen wird, dient als Brennstoff im Sinterprozess. Die Sinteranlage besteht in erster Linie aus einem Wanderrost (Sinterband), auf dem die Einsatzstoffe aufgebracht werden und einer Zündhaube, über die der Koksgrus an der Oberfläche gezündet wird. Dafür wird eine Erdgas- oder Koksgasflamme verwendet. Das Mischgut wird auf einer 30-50 mm dicken Schicht aus rezykliertem Sinter (Feinmaterial, das durch Absieben vom Stücksinter gewonnen und in den Prozess zurückgeführt wird) auf das Sinterband aufgebracht. Diese Schicht verhindert, dass das Mischgut durch den Rost sickert, schützt den Rost vor der direkten Hitze und bewirkt eine Verbesserung der

Luftdurchlässigkeit. Das aufgebraute Sinterbett hat eine Schütthöhe von 400-700 mm. Unter dem Rost wird ein Unterdruck (über Saugkästen) angelegt, wodurch die entstehenden Abgase bzw. Luft von oben nach unten durch die Sinterschicht gesaugt werden. Dadurch bewegt sich die Brennzone von der Oberfläche Richtung Saugkästen hin. Die Eisenerze beginnen ab einer Temperatur von 1000 °C zu schmelzen, kleben zusammen und bilden einen Sinterkuchen. Die Schicht oberhalb der Brennzone wird von der durchströmenden Luft abgekühlt, wodurch die geschmolzenen Teile erstarren und eine Kristallisation eintritt. Die noch nicht gesinterte Mischung unterhalb der Brennzone wird durch die heißen Verbrennungsgase vorgewärmt. Durch die ansteigende Temperatur wird zuerst die Feuchte ausgetrieben. Nachdem die Mischung getrocknet ist, erfolgt das Austreiben von Kristallwasser, von flüchtigen Bestandteilen des Brennstoffes, die Zersetzung wenig stabiler Karbonate und das Zünden des Brennstoffes. Die Karbonate (Kalkstein, Dolomit, Siderit) werden durch die freiwerdende Verbrennungswärme gespalten und die zurückbleibenden Oxide verbinden sich mit den Bestandteilen der Eisenerze zu niedrigschmelzenden Bindephasen. Die Temperaturen in der Brennzone können kurzzeitig 1450 °C betragen. Wenn die Temperatur sinkt kommt es zur Erstarrung der Bindephasen und zur Oxidation des Sinters. Die Geschwindigkeit des Sinterbandes wird so gewählt, dass sich der Durchbrennpunkt kurz vor dem Ende des Bandes befindet. Am Durchbrennpunkt ist die Sinterschicht komplett durchgebrannt und der Sintervorgang ist am Bandende abgeschlossen. Hier wird das Sintergut abgeworfen, gebrochen, gesiebt und abgekühlt. Der Sinter mit einer Korngröße von 4-50 mm wird im Hochofen eingesetzt. Das Feingut < 4 mm wird in den Sinterprozess zurückgeführt [1–3].

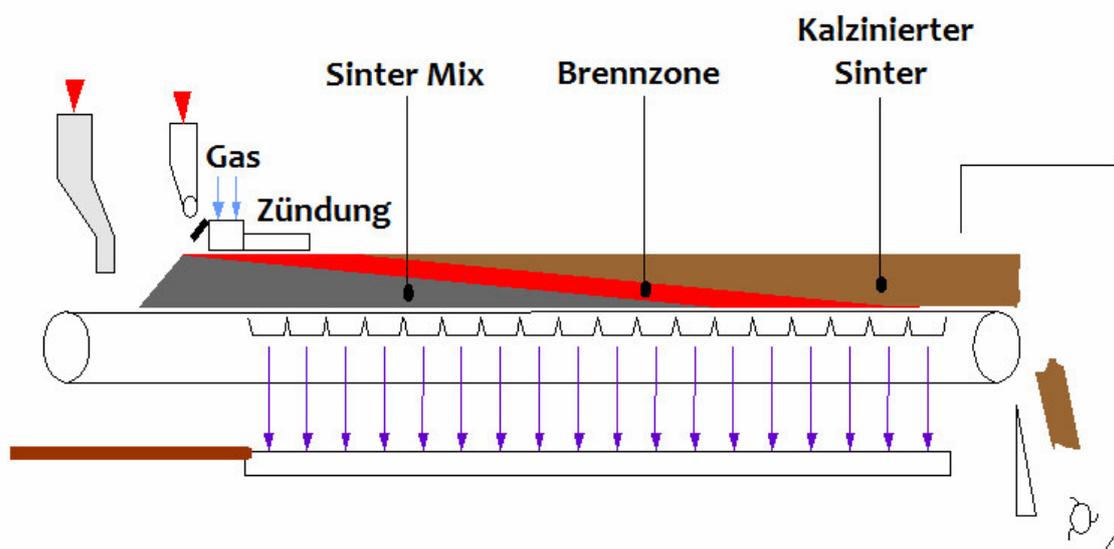


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Sinteranlage [3].

2.4 Ziele des Sinterns

- Feinerze werden vor dem Einsatz im Hochofen agglomeriert
- Unerwünschte Begleitelemente und –verbindungen werden abgetrennt (Alkalien, Kristallwasser, CO₂,...)
- Eisen wird in die höchste (am leichtesten reduzierbare) Oxidationsstufe (Fe₂O₃) überführt
- Hüttenwerkskreislaufstoffe (aufbereitete Schlacken, Stäube, Zunder) können verwertet werden [1]

2.5 Einflussfaktoren auf die Sinterleistung

Die Produktivität der Sinteranlage (Sinterleistung [t/(m².d)]) hängt stark von der Permeabilität des Sinterbettes ab, da beim Vorhandensein einer guten Permeabilität bei gleicher Gebläseleistung eine größere Gasmenge durch das Festbett strömen kann. Durch die Erhöhung des Volumenstroms der Luft durch das Sinterbett kann die Sinterzeit und somit die Sinterleistung erhöht werden. Der Luftvolumenstrom durch das Sinterbett ist wiederum eine Funktion des Luftvolumenstromes durch das kalte Festbett. Um eine hohe Permeabilität gewährleisten zu können, muss das Einsatzmaterial vor dem Sintern granuliert werden. Das Ziel des Granulationsvorganges ist eine geeignete Größe des Granulates für den Einsatz am Sinterband zu erreichen. Die Eigenschaften der Granulate werden von mehreren Faktoren bestimmt:

- Feinerzeigenschaften bezüglich der Korngrößenverteilung, Oberflächenmorphologie der Partikel, Porosität und der Benetzungswinkel zwischen dem Wasser und dem Erz
- Betriebsparameter wie Wassergehalt, Neigungswinkel, Drehzahl und Füllrate der Rolliertrommel

Die wichtigsten Einflussparameter sind die Korngrößenverteilung der Feinerze bzw. der Rohstoffe und der in der Misch- und Rolliertrommel eingestellte Wassergehalt [4,5].

2.5.1 Korngrößenverteilung der Rohstoffe

Die Korngrößenverteilung des Einsatzmaterials für den Granulationsvorgang reicht von 10 mm bis kleiner 0,063 mm. Das Ziel beim Granulieren ist es die feineren Partikel an die grobkörnigen Partikel - die als Partikelkerne agieren - zu benetzen. Die anhaftenden Partikel (Feinpartikel) bilden um die Kernpartikel (grobe Partikel) eine Schicht, wobei sogenannte Quasi-Partikel (größere Granulate) geformt werden. Die Quasi-Partikel sind in der Regel größer und haben einen schmaleren Korngrößenbereich als das Einsatzmaterial.

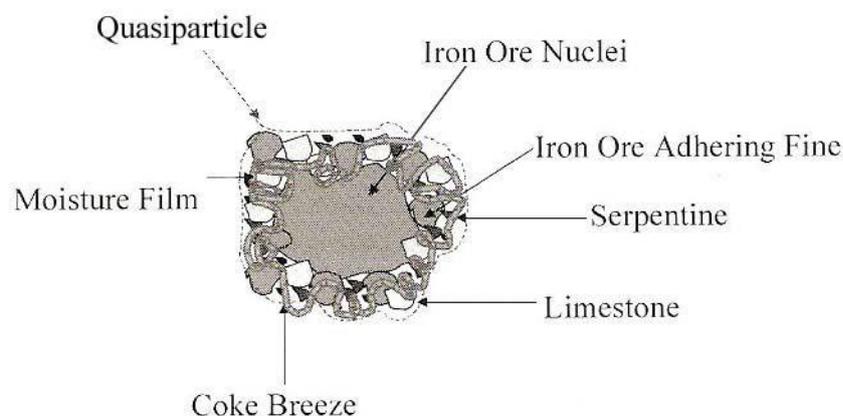


Abbildung 2-2: Quasi-Partikel [6].

Die äußere Schicht dieser Quasi-Partikel ist während des Granulierens immer aktiv, indem sie ständig zusammenbricht und wieder aufgebaut wird. Welche Partikelgröße die Kerne oder die anhaftende Schicht bilden, definieren viele Autoren unterschiedlich. Laut *Bergstrand* bilden Partikel + 1 mm den Kern und - 0,5 mm die Schicht, während *Khosa* und *Manuel* sagen, dass Partikel - 0,1 mm als anhaftenden Partikel agieren. Gemäß *Cores* und *Verdeja* ist der Kernpartikel größer 0,7 mm und die Schicht bilden Partikel kleiner 0,2 mm. Auch der Größenbereich der Zwischenpartikel wirkt sich auf den Granulationsprozess und die Permeabilität aus. *Cores* und *Verdeja*, die den Größenbereich zwischen - 0,7 mm und + 0,2 mm definieren, sagen, dass der Anteil dieser Partikel so gering wie möglich gehalten werden soll, da sie die Permeabilität auf zwei unterschiedliche Weisen beeinflussen: Wenn diese Partikel als Kern fungieren, werden in Summe mehr kleinere Quasi-Partikel gebildet und die Permeabilität dadurch verschlechtert. Als Partikel für die Schicht haften sie zu schlecht am Kern und lösen sich leicht während des Trockenvorganges, wobei es wieder zur Verschlechterung der Permeabilität kommt [4,6,7].

2.5.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt ist einer der wichtigsten Einflussparameter bei der Granulation. Das Wasser dient bei dem Granulationsvorgang als Bindemittel. Ob die feinen Partikel am Kern haften bleiben, hängt stark von der verfügbaren Feuchte (totaler Feuchtegehalt minus der absorbierten Feuchte durch die unterschiedlichen Komponenten der Einsatzmischung) bei der Granulation ab. Wenn der Wasserzusatz erhöht wird, steigt die Permeabilität und die Effizienz der Granulation verbessert sich, weil sich größere Partikel bilden. Aber wenn durch den Wasserzusatz der optimale Wert (Wassergehalt bei maximaler Permeabilität des Festbettes) überstiegen wird verschlechtert sich der Granulationseffekt und die Permeabilität sinkt wieder. Der optimale Wert des Feuchtegehalts variiert je nach Eigenschaften der verschiedenen Komponenten in der Einsatzmischung. Die Einsatzmischung besteht zu einem großen Teil aus den Eisenerzen. Somit haben die Eigenschaften der Erze, wie Porosität, Korngrößenverteilung und Benetzungswinkel zwischen dem Erz und dem Wasser, großen Einfluss auf den Wassergehalt. Zum Beispiel absorbieren poröse Erze das Wasser gut und reduzieren somit den freien Wassergehalt, der für die Granulation benötigt wird. An Erze mit einer hohen Benetzbarkeit, die als Kernpartikel verwendet werden, binden sich die feineren Partikel sehr gut. Bei einem Erz mit geringer Benetzbarkeit, bleiben viele feine Partikel am Kernpartikel nicht haften und es muss der Wassergehalt erhöht werden, damit die Granuliereigenschaften der Feinpartikel verbessert werden. **Abbildung 2-3** zeigt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Permeabilität des Festbettes unterschiedlicher Erze mit der gleichen Korngrößenverteilung.

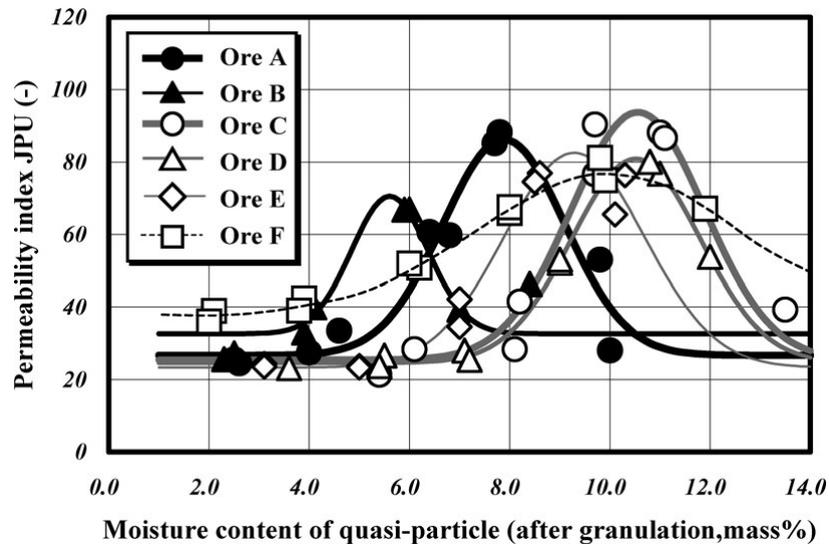


Abbildung 2-3: Verhältnis zwischen dem Wassergehalt nach der Granulation und der Permeabilität des Festbettes [8].

Abbildung 2-4 zeigt Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Permeabilität des Festbettes eines Erzes bei unterschiedlicher Korngrößenverteilung.

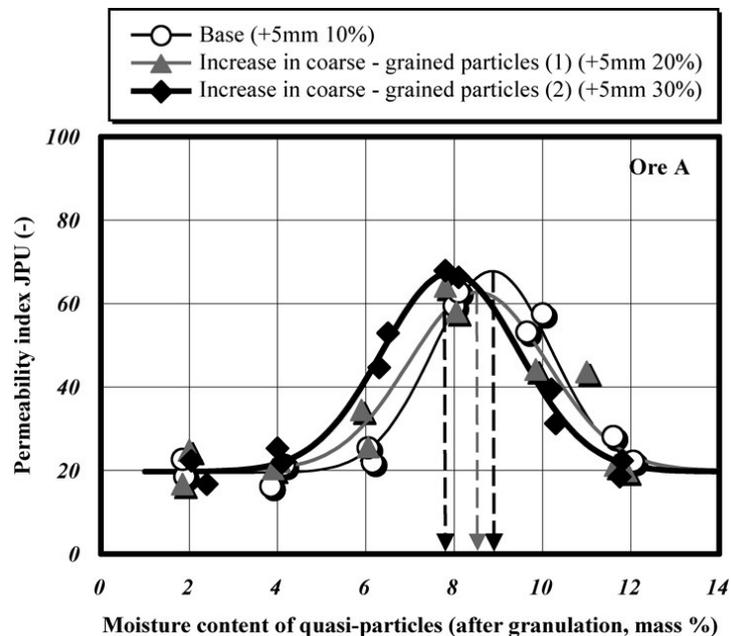


Abbildung 2-4: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Permeabilität des Festbettes eines Erzes bei unterschiedlicher Korngrößenverteilung [8].

Wenn der Anteil an grobkörnigen Partikeln steigt, dann verschiebt sich der optimale Wassergehalt nach links, also Richtung niedrigeren Gehalt. Der Grund dafür ist, dass die gesamte spezifische Partikeloberfläche, durch die Zugabe der größeren Körner verkleinert wird, und somit der benötigte Wassergehalt für die Agglomeration sinkt [7–9].

2.5.3 Permeabilität

Die Messung der Permeabilität wird in einem Permeameter durchgeführt. In dieses Permeabilitätsmessgerät wird eine Probe (Schüttung aus den Granulaten) in ein zylindrisches Gefäß gegeben. Anschließend wird durch die Probe über ein Gebläse ein Gas (meist Luft) durchgesaugt und der Druckverlust über die Schüttung gemessen. Die Permeabilität wird oft als *Japanese Permeability Unit (JPU)* ausgedrückt [7]:

$$JPU = \frac{Q}{A} \frac{H^{0,6}}{\Delta p^{0,6}} \quad (2-1)$$

Wobei Q , A , H und Δp der Volumenstrom des Gases [Nm^3/min], der Querschnitt der Schüttung [m^2], die Höhe der Schüttung [mm] und der Druckverlust über die Schüttung [$\text{mm H}_2\text{O}$] repräsentieren.

Ein Vorteil dieser Kennzahl liegt in der weiten Verbreitung im internationalen Schrifttum. Ein wesentlicher Nachteil ist die dimensionsbehaftete Darstellung, die noch dazu mit einem Exponenten versehen ist. Eindeutig ist diese Zahl somit nur dann, wenn alle Größen immer in der vorgegebenen Einheit angegeben werden.

3 Charakterisierung von Feststoffschüttungen und Schüttgutpartikeln

Schüttgüter sind disperse Systeme bestehend aus im Raum verteilten Feststoffpartikeln (porös oder nicht porös) und einer Gasphase, die den Zwischenraum ausfüllt. Die Schüttguteigenschaften können einerseits durch die Eigenschaften der Feststoffpartikeln (Schüttgutpartikeln), und andererseits durch die Eigenschaften des Partikelkollektives selbst beschrieben werden. Die Eigenschaften der Gasphase (Dichte, dynamische und kinematische Viskosität) werden im experimentellen Teil dieser Arbeit (Kaltpermeabilität) als konstant angesehen und können somit zur Beschreibung der Systemeigenschaften vernachlässigt werden.

3.1 Schüttguteigenschaften

In der technischen Praxis wird eine Feststoffschüttung fast ausnahmslos durch einen Schüttvorgang erzeugt. Dieser Vorgang ist seiner Natur nach ein stochastischer Prozess, da die Struktur der Schüttung vom Zufall abhängt und sich durch Wahrscheinlichkeitsgesetze beschreiben lässt. Zur Beschreibung des Partikelkollektives sind für diese Arbeit vor allem die Korngrößenverteilung, die Schüttdichte und der Lückengrad von besonderer Bedeutung. Die Korngrößenverteilung eines Schüttgutes hängt vom Abbau und der Aufbereitung des Gutes ab. Das abgebaute Gestein wird je nach Zusammensetzung und Härte der einzelnen Mineralien unterschiedlich gut zerkleinert. Die Schüttdichte und der Lückengrad hängen von der Packungsstruktur des Schüttgutes ab [10,11].

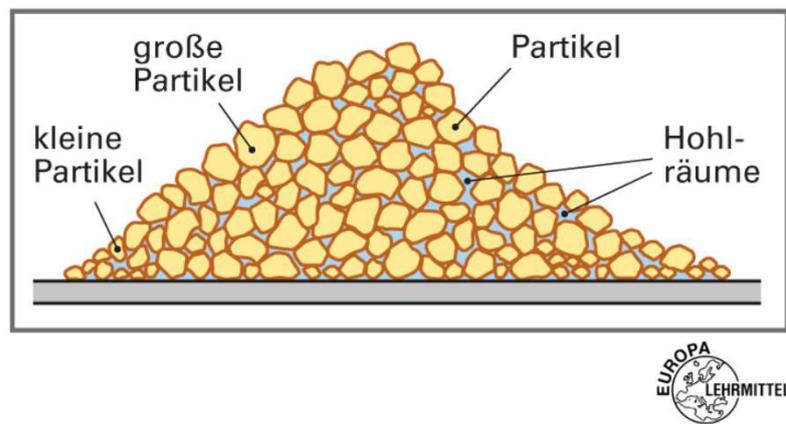


Abbildung 3-1: Schüttgut [12].

3.1.1 Packungsstruktur von Schüttgüter

Die Packungsdichte (auch Dispersphasenvolumenanteil) wird als das Verhältnis des durch die Partikeln eingenommenen Raumes zum gesamten zur Verfügung stehenden Raumes definiert:

$$\alpha = \frac{V_{\text{disp}}}{V_{\text{ges}}} \quad (3-1)$$

Es bezeichne V_{ges} das Gesamtvolumen der Packung (Schüttung) und V_{disp} das Volumen der darin enthaltenen Teilchen. Das Verhältnis des Lückenraumes (mit Gas gefüllter Raum zwischen den Feststoffpartikeln) und des Volumens der Schüttung wird als Lückengrad bezeichnet (**Kapitel 3.1.2**), die Gesamtmasse aller Feststoffpartikel bezogen auf das Gesamtvolumen der Schüttung als Schüttdichte (**Kapitel 3.1.3**). Der Zusammenhang zwischen dem Dispersphasenvolumenanteil und dem Lückengrad lautet:

$$\alpha = 1 - \varepsilon \quad (3-2)$$

Die Packungsdichte, der Lückengrad und die Schüttdichte sind somit von der Struktur der Schichtung der Feststoffpartikel im abgeschlossenen System abhängig [11,13].

3.1.1.1 Einfluss der Korngröße

In einer Packung bestehend aus Körnern einheitlicher Größe bleibt für eine bestimmte reguläre Kornanordnung die Packungsdichte konstant (Kugelpackungstheorie) und unabhängig von der Korngröße. Wenn die Kornform hingegen von der Kugel abweicht spielt neben der Kornanordnung auch die Orientierung der Körner eine Rolle für die Packungsdichte. Bei einer monodispersen Kugelschüttung ist somit der Lückenvolumenanteil unabhängig vom Durchmesser der Kugeln [13].

Für eine regelmäßig kubische Anordnung ergibt sich:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6} = 0,476 \quad (3-3)$$

Für die dichteste reguläre Kugelpackung ergibt sich:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0,26 \quad (3-4)$$

Diese Unabhängigkeit des Lückengrades von der Teilchengröße gilt prinzipiell für alle regulären Gleichkornpackungen [13].

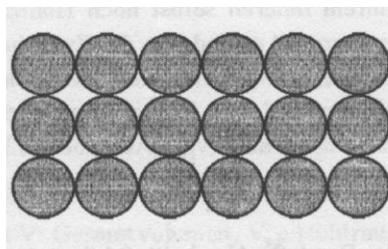


Abbildung 3-2: Kubische Packung [13].

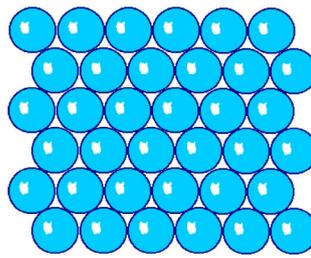


Abbildung 3-3: Dichteste reguläre Kugelpackung [14].

In einer monodispersen Kugelschüttung mit einer regellosen Zufallsanordnung liegt der mittlere ϵ bei etwa 0,4, also zwischen einer regelmäßigen kubischen Anordnung ($\epsilon = 0,476$) und der dichtesten regulären Kugelpackung ($\epsilon = 0,26$). In einer regellosen Anordnung ist ϵ nur dann von der Korngröße unabhängig, wenn keinerlei Haftkräfte zwischen den Teilchen die Packungsstruktur beeinflussen (nur bei kohäsionslosen, freifließenden Schüttgütern mit Korngröße größer $200\ \mu\text{m}$). Je kleiner die Teilchen, umso dominanter werden die Haftkräfte zwischen den Teilchen. Dies kann zur Entstehung unausgefüllter Lücken führen. Daher kann der Lückengrad von feinkörnigen Pulvern größer sein, als die von grobkörnigen Schüttgütern [10,13].

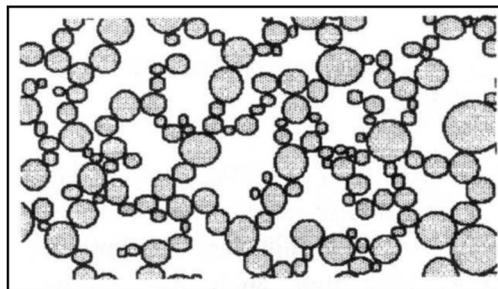


Abbildung 3-4: Großer Lückengrad bei sehr feinen Teilchen in Folge von Haftkräften [13].

Ein weiterer Grund, warum der Lückengrad mit abnehmender Korngröße leicht zunehmen kann, ist, dass beim Feinkorn geringere Massenkräfte wirken. Dadurch erreicht das Einzelkorn beim Füllvorgang die stabile Lage nicht und es bilden sich größere Zwischenräume, welche die Packungsdichte herabsetzen [11].

3.1.1.2 Einfluss der Kornform

Die Packungsstruktur von Gleichkornschüttungen ist nach dem Rütteln der Schüttung von der Kornform abhängig. Wenn die Kornoberfläche rau ist, kommt es durch die Reibung zwischen den Partikeln beim Füllvorgang leichter zur Brückenbildung und damit zur Bildung

von größeren Hohlräumen. Die Packungsdichte ist umso niedriger, je eckiger oder zerklüfteter das Korn ist. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Kornorientierung. Ein extremes Beispiel kann anhand von nadeligen Körnern beschrieben werden: Wenn die Nadeln geordnet vorliegen, ist die Packungsdichte sehr hoch (bis zu 90 %). In einem ungeordneten Haufen jedoch, beträgt die Packungsdichte nur noch bis zu 10 % [11].

3.1.1.3 Einfluss der Korngrößenverteilung

In der verfahrenstechnischen Praxis handelt es sich bei Schüttgütern meist um Korngemische (polydisperse Systeme). Dabei spielt die Korngrößenverteilung für die Packungsdichte eine entscheidende Rolle. Wenn eine Mischung aus großen und kleinen Teilchen vorliegt, können die kleinen Teilchen die Lücken zwischen den großen Körnern ausfüllen, wodurch der Wert des Lückengrades sinkt und die Packungsdichte ansteigt (solange nicht der Feinkornanteil, in Folge von Haftkräften, wie oben erwähnt, den Lückenvolumenanteil wieder erhöht). Je breiter die Korngrößenverteilung und je höher der Anteil an Feinkorn im Korngemisch sind, umso höher ist die Packungsdichte [13].

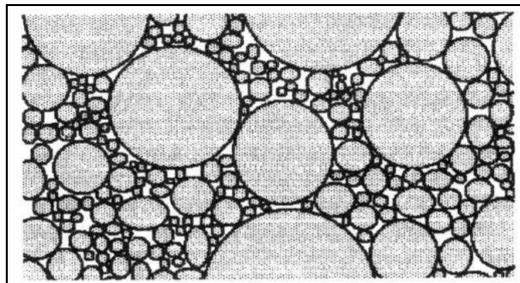


Abbildung 3-5: Kleiner Lückengrad bei breiter Korngrößenverteilung [13].

3.1.1.4 Einfluss des Abstandes von der Gefäßwand

Der Lückengrad, und somit auch die Packungsdichte, hängen auch vom Abstand der Feststoffteilchen von der Behälterwand ab. In allen begrenzten Schüttsäulen steigt der Lückengrad zum Rand hin an. Unmittelbar an der Wand $y/d_p = 0$, wobei y der Abstand von der Wand und d_p der Partikeldurchmesser ist, erreicht er den Wert $\epsilon = 1$, da die Partikel die Wand nur punktuell berühren [10].

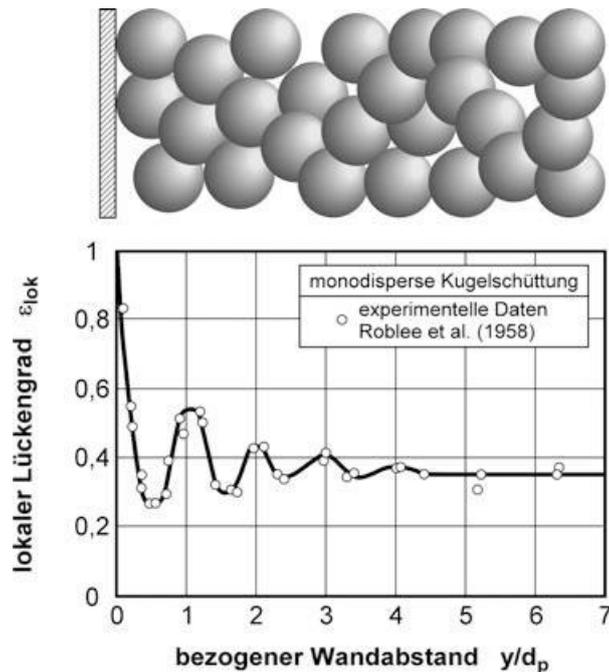


Abbildung 3-6: Abhängigkeit des örtlichen ϵ vom bezogenen Wandabstand y/d_p für eine monodisperse Kugelschüttung [10].

Bei einem halbem Kugeldurchmesser erreicht der Lückengrad einen Tiefstwert, bei einem vollen Kugeldurchmesser einen Höchstwert. Zur Mitte hin nimmt die Höhe der Extremwerte ab. Direkt an der Wand sind also die Kugeln geordnet. Zum Innern der Schüttsäule nimmt diese Ordnung stetig ab, bis sie in der Mitte der Schüttsäule in eine statistisch gleichmäßige Verteilung aller Kugeln übergeht [10,15].

3.1.2 Lückengrad (Lückenvolumenanteil, Hohlraumvolumenanteil)

Die Definition des Lückengrades ist das Verhältnis des freien Volumens zwischen den einzelnen Partikeln einer Schüttung und dem gesamten von der Schüttung eingenommenen Volumen:

$$\epsilon = \frac{V_{kont}}{V_{ges}} \quad (3-5)$$

Es bezeichne V_{ges} das Gesamtvolumen der Packung und V_{kont} das Volumen des freien Raumes zwischen den Partikeln der Schüttung. Die inneren und nach außen offenen Poren

werden dabei volumenmäßig zum Partikel gerechnet und nicht zum Kornzwischenraum gezählt. Der Lückengrad ist von der Packungsstruktur abhängig (**Kapitel 3.1.1**) und Aussagen über die Abhängigkeit des Lückengrades vom Ort sind für die Behandlung der Strömung durch Feststoffschüttungen von großer Bedeutung [11].

3.1.2.1 Bestimmung des Lückengrades

Die Bestimmung des Lückengrades an sich ist nicht genormt. Eine Möglichkeit ist es die Schüttdichte und die Rohdichte der Feststoffteilchen zu bestimmen und den Lückengrad nach folgender Formel zu berechnen:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{Sch}}{\rho_{Ro}} \quad (3-6)$$

ρ_{Sch} bezeichne die Dichte der Schüttung und ρ_{Ro} die Rohdichte der Feststoffteilchen. Die Bestimmung der Dichten ist in diversen DIN Normen festgelegt [11].

3.1.3 Schüttdichte

Die Schüttdichte wird als Quotient der Masse aller Feststoffteilchen und dem eingenommen Volumen der losen Schüttung, einschließlich der Lückenräume zwischen den Körnern und den Porenräumen der Körner, definiert. Wie die Packungsdichte ist auch die Schüttdichte von der Korngröße und Korngrößenverteilung, der Kornform und Kornoberfläche, sowie auch von der Feuchtigkeit und Haftkornneigung abhängig [11].

3.1.3.1 Bestimmung der Schüttdichte

Für die Bestimmung der Schüttdichte gibt es eine Reihe von Normen (je nach dem zu untersuchenden Material). Meist wird sie durch Wägung des Inhaltes eines mit Schüttgut gefülltem Gefäß mit bekanntem Volumen bestimmt. Dafür werden das leere Messgefäß und das Messgefäß mit Probe gefüllt gewogen und die Massen bestimmt. Die Differenz der beiden Massen ergibt die Masse der Probe im Gefäß. Anschließend wird die Probenmasse auf das Volumen des Messgefäßes bezogen [11]:

$$\rho_{Sch} = \frac{m_{MP} - m_M}{V_M} \quad (3-7)$$

Dabei bezeichne m_{MP} die Masse des mit Probe gefüllten Messgefäßes, m_M die Masse des leeren Messgefäßes und V_M das Volumen des Messgefäßes.

3.1.4 Korngröße und Korngrößenverteilung

Wie schon im **Kapitel 3.1.1.3** erwähnt wurde, haben die Korngröße und die Korngrößenverteilung einen großen Einfluss auf die Packungsdichte und den Lückengrad. Je breiter die Verteilung und je höher der Feinkornanteil einer Mischung sind, umso geringer ist der Lückengrad. Darum spielt die Verteilung der Korngröße, bei der Durchströmung eines Schüttgutes, eine entscheidende Rolle für den Druckverlust. Bei der Messung der Korngröße und der Korngrößenverteilung ist darauf zu achten, dass es bei den einzelnen Messverfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann, da die verschiedenen Messverfahren die Korneigenschaften (Kornform, Kornoberfläche etc.) unterschiedlich berücksichtigen [11,13].

Die Korngrößenhäufigkeitsverteilung und die Summenverteilung sind charakteristische Kennlinien für Feststoffschüttungen, jedoch ist es aus Gründen der Vergleichbarkeit oft zweckmäßig, eine Korngrößenverteilung durch eine einzige Zahl zu beschreiben.

3.1.4.1 Kennwerte für die Korngröße

Siebkorngröße: d_{Sieb}

Der Siebkorndurchmesser wird über die Maschenweite einer quadratischen Sieböffnung definiert, durch die das Korn gerade noch durchfallen kann [11].

Volumen – Äquivalentdurchmesser: d_V

Dieser Durchmesser entspricht der volumengleichen Kugel wie das Korn [16].

$$d_V = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}} \quad (3-8)$$

Wobei hier V das Volumen der volumengleichen Kugel darstellt.

Oberflächen – Äquivalentdurchmesser: d_s

Der d_s wird als Durchmesser der oberflächengleichen Kugel wie das Korn definiert [16].

$$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (3-9)$$

Wobei hier S die Oberfläche der oberflächengleichen Kugel darstellt.

Sauterdurchmesser: d_{32}

Als Sauterdurchmesser wird die mittlere Kugelgröße mit der gleichen spezifischen Oberfläche wie das Partikelkollektiv definiert. Das heißt: Wenn das Volumen des Stoffes in gleich große Kugeln aufgeteilt werden würde, dass ihre Oberfläche (und spezifische Oberfläche) genau so groß wäre, wie die des Partikelkollektives, dann hätten diese Kugeln den d_{32} als Durchmesser. Somit ist der Sauterdurchmesser ein Durchmesser eines monodispersen Stoffsystems. Das Gesamtvolumen und die Oberfläche dieses Systems entsprechen dem zugehörigen polydispersen Stoffsystem [13].

$$d_{32} = \frac{6 \cdot (\text{gesamtes Volumen aller Partikel})}{\text{gesamte Oberfläche aller Partikel}} \quad (3-10)$$

Projektionsfläche – Äquivalentdurchmesser d_{pr} (fallend oder in stabiler Lage):

d_{pr} beschreibt den Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises [16].

$$d_{pr} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_p}{\pi}} \quad (3-11)$$

Wobei hier A_p die Fläche des projektionsflächengleichen Kreises darstellt.

Neben den geometrischen gibt es auch hydrodynamische Äquivalentdurchmesser: d_w ist der Durchmesser der Kugel mit der gleichen Sinkgeschwindigkeit, d_{st} ist der Durchmesser der Kugel gleicher Sinkgeschwindigkeit im Stokes-Bereich und d_D ist der Durchmesser einer

Kugel gleichen Widerstandes [16]. In **Abbildung 3-7** sind die verschiedenen Äquivalentdurchmesser, die sich aus unterschiedlichen Messmethoden ergeben, dargestellt.

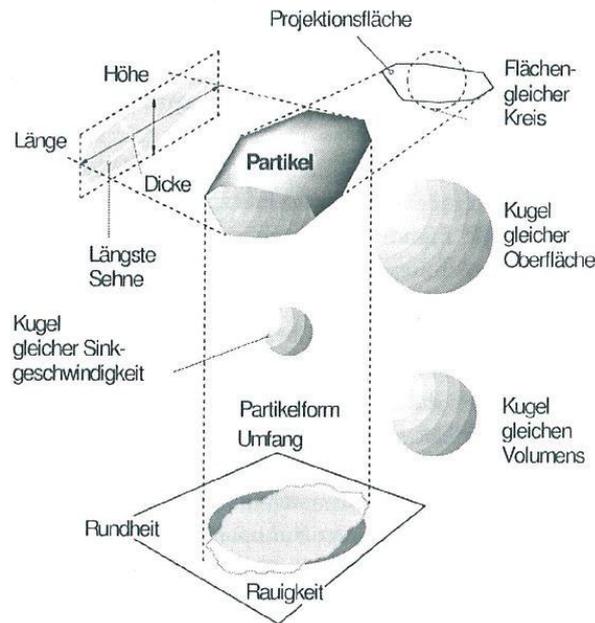


Abbildung 3-7: Äquivalentdurchmesser nach verschiedenen Messmethoden und Partikelform [16].

3.1.4.2 Kennwerte für die Korngrößenverteilung

Mittlere Korngröße: d_m

Die mittlere Korngröße wird durch das arithmetische Mittel der Korngröße unter Berücksichtigung des arithmetisch gewogenen Mittels berechnet. Dabei tragen alle vorkommenden Partikelgrößen entsprechend ihrem Mengenanteil im Kollektiv zur Bildung des Mittelwertes bei [17].

$$d_m = \frac{1}{100} * \sum_{i=1}^k d_{mi} * \Delta Q_i \quad (3-12)$$

Wobei d_{mi} die mittlere Korngröße einer Kornklasse, ΔQ_i die Menge einer Kornklasse (Massen-%) und k die Klassen darstellt.

Medianwert einer Verteilung: d_{50}

Dieser Wert definiert jene Partikelgröße, unterhalb der 50 % der Partikelmenge liegen, also der Durchmesser bei dem die 50 %-Horizontale die Summenverteilung schneidet. Daher ist dieser Wert abhängig von der gewählten Partikelmenge. Analoge Definitionen sind für 10 % und 90 % üblich [13].

Modalwert einer Verteilung: d_{max}

Der Modalwert ist definiert als der Teilchendurchmesser der mengenreichsten Partikelgröße. Dieser Wert kann als Maximum vom höchsten Balken des Häufigkeitsverteilungshistogrammes entnommen werden. Bei diesem Wert muss die Mengenangabe (Anzahl, Fläche, Volumen, Masse) z. B. in Form eines Indexes angegeben werden [13].

Harmonischer Durchmesser: d_h

Der harmonische Durchmesser wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$d_h = 100 * \frac{1}{\sum \frac{\Delta Q_i}{d_{mi}}} \quad (3-13)$$

Bei dieser Berechnungsmethode spielt das Feinkorn eine stärkere Rolle und eignet sich daher besonders für die Charakterisierung von Korngrößenverteilungen, bei denen die Partikeloberfläche eine wesentliche Rolle spielt [11].

3.1.4.3 Korngrößenanalyse

Die Aufgabe der Korngrößenanalyse ist es die Korngrößenverteilung einer polydispersen Schüttung, anhand einer repräsentativen Teilprobe, zu bestimmen. Dabei haben die Probenahme und die Probenteilung einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Analyse. Die bekanntesten Bestimmungsverfahren sind die Siebanalyse, die Sedimentation und die Laserdefraktometrie. Die Korngrößenanalyse der Sintereinsatzmischung für diese Arbeit wurde mit einer CCD-Kamera (HAVER CPA-Messgerät) durchgeführt. Diese Messmethode gehört zu den optischen Zählverfahren. Bei diesem Verfahren werden die Projektionsflächen der freifallenden Partikeln vermessen.

Jedem Messverfahren zur Charakterisierung der Korngröße liegt eine bestimmte Größendefinition zugrunde: Die Siebanalyse ordnet den Partikeln die Seitenlänge einer quadratischen Maschenweite als Größe zu, durch die diese Partikel gerade noch hindurchgehen. Die Sedimentationsanalyse nutzt die Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Dichte und Viskosität zur Korngrößencharakterisierung. Bei der Laserdefraktometrie wird das Licht, das durch die Suspension fällt, an den einzelnen Teilchen in Abhängigkeit von der Korngröße in einem ganz bestimmten Winkel gestreut. Das HAVER CPA-Messgerät hingegen vermisst die Projektionsflächen der freifallenden Partikeln und berechnet daraus Äquivalentdurchmesser, die volumenspezifische Oberfläche, die volumenbezogene Summenhäufigkeitsverteilung etc. Entsprechend dieser zugrunde liegenden Partikelgrößendefinitionen können unterschiedliche Partikelmessverfahren auch unterschiedliche Ergebnisse liefern. Von den Partikeln der Probe wird ein Bild hergestellt. Dabei wird jedes abgebildete Partikel vermessen und nach ihrer „Größe“ einer bestimmten Kornklasse zugewiesen. Das optisch gewonnene Bild wird dann digitalisiert. Das Bild wird anschließend zeilenweise abgetastet und liefert elektrische Signale, deren Höhe, Länge und Anzahl als Basis für die Auswertung dienen. Ein großer Vorteil des HAVER CPA-Messgerätes ist, dass die Möglichkeit geschaffen wurde, die CPA-Ergebnisse für verschiedene Materialarten den Ergebnissen von Referenzmessverfahren anzupassen. Eine Gegenüberstellung der Siebanalyse- und der CPA-Ergebnisse (vom Hersteller) zeigt, dass die Abweichungen beider Verteilungen stets systematisch sind [16,18].

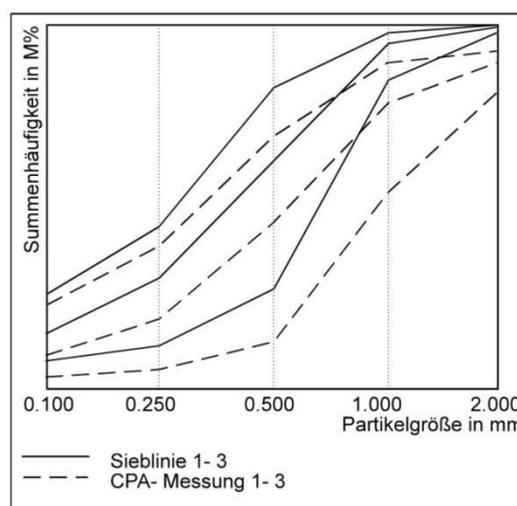


Abbildung 3-8: Gegenüberstellung der Siebanalyse- und CPA-Ergebnisse [18].

Dabei spielt die Größe der Abweichungen zwischen den beiden Messverfahren keine Rolle. Sie ist hauptsächlich von der Materialform und auch anderen Materialeigenschaften abhängig. Die Abweichung wird bei kugelförmigen Materialien geringer als beispielsweise bei länglichen Materialien sein.

Für die Erstellung von Partikelgrößen-Reihen, in denen die Korngrößenverteilung dargestellt werden soll, werden „Siebsätze“ angelegt. Ein Siebsatz besteht aus einer Anzahl von Sieben mit bestimmter Maschenweite.

Zur Durchführung der Analyse wird das zu untersuchende Material über einen Trichter auf die Dosierrinne aufgebracht. Über die Dosierrinne wird das Gut durch Vibration zur CCD-Kamera befördert. Am Ende der Dosierrinne fällt das Material in einen Auffangbehälter. Während des Falles werden die Partikel von der Kamera gefilmt [18].

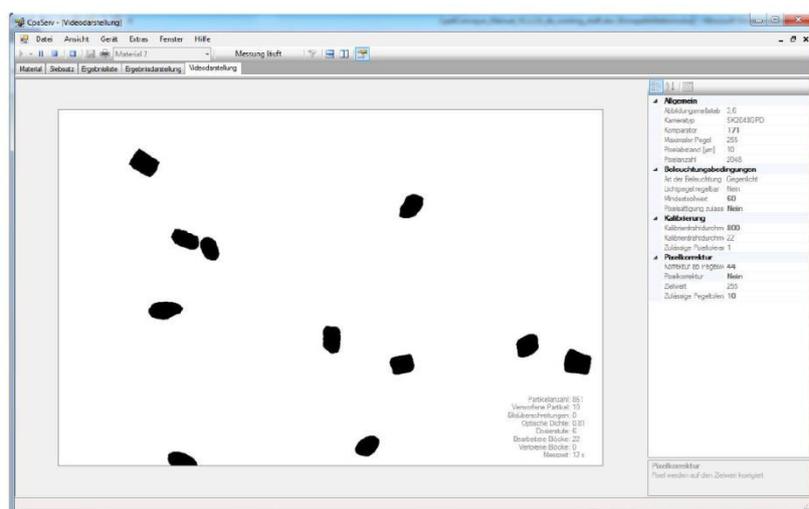


Abbildung 3-9: Bilddarstellung eines Ausschnittes des gemessenen Partikelstromes [18].

3.2 Eigenschaften von Schüttgutpartikel

Die Eigenschaften eines Feststoffteilchens können durch die Reindichte, Rohdichte, Porosität, Kornform und spezifische Oberfläche beschrieben werden. Um diese Eigenschaften bestimmen zu können, sind diese auf ein bestimmtes, durch die Oberfläche abgrenzendes Volumen bezogen, welches zuerst über diese Grenzfläche festgelegt und definiert werden muss. Die Festlegung dieser Oberfläche stellt für geometrisch regelmäßige, nicht poröse Körper, wie eine ideale Kugel, kein Problem dar. Für poröse Körper aber, ist die Wahl der Oberfläche für das Ergebnis entscheidend. Bei der Bestimmung der Dichte kann

die Masse einfach durch Abwägen bestimmt werden, während die Bestimmung des Volumens komplexer verläuft. Hier spielt die Wahl der Oberfläche, die das Volumen abgrenzt, eine wichtige Rolle. Bei regelmäßigen Körpern kann das Volumen einfach aus den Kornabmessungen errechnet werden. Wenn der Körper aber eine unregelmäßige oder poröse Gestalt besitzt, muss das Volumen mit einer entsprechenden Messmethode (z.B. durch Fluidverdrängung) bestimmt werden, da hier das Volumen der Poren berücksichtigt werden muss. Aber auch bei den unterschiedlichen Messmethoden selbst ist auf die Definition der Korngrenzfläche zu achten. Es können bei Messmethoden für poröse Körner, bei denen das Volumen durch die Fluidverdrängung (z.B.: Pyknometermethode, Aufhängemethode) gemessen wird, unterschiedliche Dichten bestimmt werden, da die Eigenschaften des verwendeten Messfluids eine wesentliche Rolle spielt. Benetzende Fluide dringen viel weiter in die Poren ein als nicht benetzende, und somit werden über unterschiedliche Fluidverdrängung andere Kornvolumina gemessen [11].

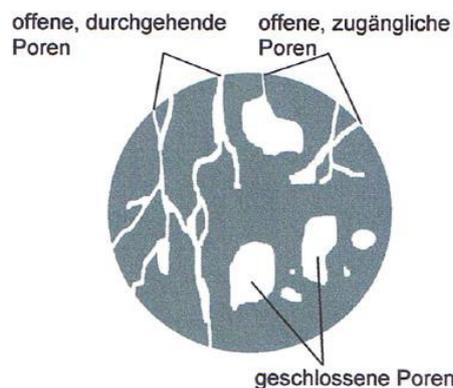


Abbildung 3-10: Poröser Festkörper [19].

3.2.1 Reindichte

Die Reindichte wird definiert als die Masse eines Feststoffes bezogen auf sein Volumen, wobei die nach außen offenen Poren nicht zum Feststoffvolumen gezählt werden. Die Reindichte ist eine Stoffeigenschaft. Sie setzt sich aus den Dichten der Mineralien, aus denen das Feststoffteilchen aufgebaut ist, zusammen [11].

3.2.1.1 Bestimmung der Reindichte mit dem Helium-Pyknometer

Die Dichtebestimmung erfolgt über die Wägung der Masse und die Festlegung des Feststoffvolumens über die Verdrängung eines Messfluides. Wenn ein Körper nicht porös ist, wird zwischen Reindichte und Rohdichte nicht unterschieden und die Bestimmung des

Volumens kann auch nach den Messmethoden für die Rohdichtebestimmung, die in **Kapitel 3.2.2** genannt werden, erfolgen. Bei porösen Partikeln jedoch, sollen die nach außen offenen Poren bei der Reindichte nicht zum Feststoffvolumen mit gemessen werden und müssen bei den Bestimmungsmethoden mit dem Messmedium ausgefüllt werden. Die Feststoffpartikeln sollen vor der Messung getrocknet werden, damit die Poren nicht durch die anhaftende Feuchtigkeit verlegt sind [11].

Mit dem Helium-Pyknometer ist eine sehr genaue Bestimmung der Reindichte möglich. Die Massenbestimmung erfolgt durch Abwägung mit einer Präzisionswaage. Die Bestimmung des Feststoffvolumens erfolgt durch Druckmessung im Zweikammersystem mittels Helium als Messfluid. Das Helium gelangt aufgrund der geringen Molekülgröße in kleinste Poren (im Bereich von 0,1 nm) ohne selbst dabei adsorbiert zu werden. Dadurch kann das wahre Feststoffvolumen, einschließlich der geschlossenen Poren, bestimmt werden. Das Messprinzip erfolgt nach dem idealen Gasgesetz nach Boyle-Mariotte. Das Gesetz besagt, dass für eine definierte Gasmenge der Druck idealer Gase bei gleichbleibender Temperatur und gleichbleibender Stoffmenge umgekehrt proportional zum Volumen ist bzw. das Produkt aus Gasvolumen und Gasdruck eine konstante Größe bleibt [11].

Die Probe mit dem Volumen V_p wird in eine Messzelle eingebracht, von der das Volumen V_z genau bekannt ist. Nach einer ausgiebigen Spülung mit dem Messgas stellt sich ein gewisser Druck p ein:

$$p_1 * (V_z - V_p) = n * R * T \quad (3-14)$$

Wenn nun die Probenzelle mit der zuvor evakuierten Zusatzzelle V_A (zweite Kammer), durch Öffnen des Ventiles, verbunden wird, verringert sich der Gasdruck p_2 , da sich das Volumen um V_A erhöht:

$$p_2 * (V_z - V_p + V_A) = n * R * T \quad (3-15)$$

Da die Stoffmenge und die Temperatur konstant sind, können die beiden Ausdrücke gleich gesetzt werden und anschließend nach Umformen das Probenvolumen berechnet werden:

$$p_1 * (V_Z - V_P) = p_2 * (V_Z - V_P + V_A) \quad (3-16)$$

$$V_P = V_Z + \frac{V_A}{1 - \frac{p_1}{p_2}} \quad (3-17)$$

Das Gerät wird vor Gebrauch kalibriert. Dabei werden die Werte V_Z und V_A bei der Eichung des Gerätes mit exakt bekannten Kalibriervolumen (Stahlkugeln) bestimmt [11].

3.2.2 Rohdichte

Die Rohdichte ist die Masse eines Feststoffteilchens bezogen auf sein Gesamtvolumen. Das heißt, dass die offenen und geschlossenen Poren in den Partikeln zum Partikelvolumen gerechnet werden. Die Rohdichte hängt nicht allein von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von der gewählten äußeren Kornoberfläche und somit von der Wechselwirkung zwischen dem Feststoff und dem Messfluid, ab. Die offenen Poren und die Oberflächenrauigkeit werden je nach dem eingesetzten Messfluid (Wasser, Quecksilber oder Helium) berücksichtigt [11].

3.2.2.1 Bestimmung der Rohdichte mit der Pyknometermethode

Mit dem Pyknometer kann die Kornrohichte bestimmt werden. Das Pyknometer ist ein Behälter mit definierten Volumen. Die gängigste Bauart ist ein Glaskolben mit einem Schliffstopfen, durch den eine Kapillare führt. Für die Bestimmung der Dichte wird die Partikelprobe mit einer Referenzflüssigkeit (meist Wasser) mit bekannter Dichte gemischt. Dabei ist zu beachten, dass die Dichte der Referenzflüssigkeit von der Temperatur abhängig ist. Zur Bestimmung der Kornrohichte ist die Vorgehensweise wie folgt: Zuerst wird die Leermasse des Pyknometers samt Stopfen gewogen. Danach wird eine bestimmte Menge der Partikelprobe im Pyknometer eingewogen. Anschließend wird das Pyknometer mit Probe mit Wasser aufgefüllt. Bei der Befüllung und dem Verschließen des Pyknometers mit dem Glasschliffstopfen muss das gesamte Pyknometervolumen ausgenutzt werden. Das wird durch das Austreten eines Wassertropfens durch die Kapillare im Glasschliffstopfen sichergestellt. Nun können folgende Werte bestimmt werden [20]:

- Masse des leeren Pyknometer samt Stopfen (m_{leer})
- Masse Pyknometer und Probe samt Stopfen (m_{Pr})
- Masse Pyknometer, Probe und Wasser samt Stopfen ($m_{\text{Pr+Fl}}$)
- Masse des leeren Pyknometer mit Flüssigkeit und Stopfen (m_{Fl})

Mit diesen Werten lässt sich die Masse der durch die Partikelschüttung verdrängten Flüssigkeit berechnen. Durch die bekannte Dichte der Flüssigkeit bei gegebener Temperatur kann die Kornrohddichte nach folgender Formel ermittelt werden [20]:

$$\rho_P = \frac{(m_{\text{Pr}} - m_{\text{leer}}) \cdot \rho_{\text{Fl}}}{(m_{\text{Fl}} - m_{\text{leer}}) - (m_{\text{Pr+Fl}} - m_{\text{Pr}})} \quad (3-18)$$

3.2.2.2 Bestimmung der Rohddichte mit der Aufhängemethode

Die Aufhängemethode beruht, wie die Pyknometermethode, auf der Messung der Masse der durch die Probe verdrängten Messflüssigkeit. Bevor die Dichtemessung erfolgt, muss die poröse Probe vorbereitet werden. Die Probe muss auf die zu untersuchende Größe gesiebt und anschließend gewaschen werden. Das Wasser ist von der Probe ablaufen zu lassen. Die vorbereitete Messprobe wird in einen Drahtkorb eingebracht und in einen Behälter eingetaucht, der mit Wasser (Messflüssigkeit) gefüllt. Dabei muss das Wasser mindestens 50 mm über dem oberen Rand des Drahtkorbes stehen. Hier ist wieder auf die Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers zu achten. Der Drahtkorb ist auf einem Stativ befestigt und der Behälter mit Wasser, indem der Drahtkorb hängend eingetaucht ist, steht auf einer Waage. Nach dem Eintauchen ist die eingeschlossene Luft aus der vorbereiteten Messprobe zu entfernen. Dafür wird der Korb etwa 25 mm über den Behälterboden angehoben und einige Male fallen gelassen. Anschließend verbleibt der Korb mit der Probe für eine Dauer von 24 Stunden eingetaucht. Dann wird die Probe im Wasser gewogen und die Masse $m_{\text{Pr+Korb}}$ aufgezeichnet. Der Korb mit der Probe wird aus dem Wasser genommen und die Probe wird vorsichtig aus dem Korb geleert. Der leere Korb wird wieder in den Behälter mit Wasser gehängt, ein paar Mal bewegt, um Luftblasen zu entfernen, und gewogen. Die Masse m_{Korb} ist wieder aufzuzeichnen. Die Probe wird in eine Wärmekammer mit einer Temperatur von 110 °C gegeben, bis eine konstante Masse erreicht wird und anschließend im getrockneten Zustand gewogen (m_{Pr}). Nun kann die Rohddichte aus der getrockneten Masse, aus dem durch die Probe verdrängten Volumen des Wassers und der Dichte des Wassers berechnet werden [21]:

$$\rho_P = \frac{\rho_W * m_{Pr}}{(m_{Pr+Korb} - m_{Korb})} \quad (3-19)$$

3.2.3 Innere Porosität

Unter der Porosität versteht man das Verhältnis des Gesamtporenvolumens aller offenen Poren zum Gesamtvolumen des Kornes inklusive Poren. Eine Pore ist ein offener oder geschlossener Hohlraum in einem Festkörper. Eine Vertiefung mit einem Verhältnis Tiefe zu Durchmesser von mindestens 1 wird als Pore bezeichnet. Die innere Porosität und die innere Oberfläche beziehen sich nur auf die nach außen offenen, also zugänglichen, Poren. Die geschlossenen Hohlräume haben für das Systemverhalten eigentlich keine Bedeutung [11].

3.2.4 Spezifische Oberfläche

Die Oberfläche einer dispersen Phase wird allgemein als ihre Grenzfläche gegenüber dem Umgebungsmedium definiert. Die innere Oberfläche ist die Oberfläche der nach außen offenen Poren und die äußere Oberfläche wird als die äußere Begrenzung einer dispersen Phase gegenüber dem umgebenden Fluid, ohne Berücksichtigung der inneren Oberfläche, bezeichnet. Je nachdem, ob man die jeweilige Oberfläche auf das Volumen oder die Masse des Partikels bezieht, erhält man die spezifische Oberfläche [13].

Die volumenspezifische Oberfläche einer polydispersen Körnermenge ist definiert als Verhältnis der Oberfläche der Körnermenge zum Volumen der Körnermenge:

$$a_{V,S} = \frac{\sum A_i}{\sum V_i} \quad (3-20)$$

Je weiter die Form des Kornes von der Form einer Kugel mit gleichem Volumen abweicht, und je größer die gesamte offene Porengröße, desto größer ist die volumenspezifische Oberfläche.

Die massenspezifische Oberfläche einer polydispersen Körnermenge ist definiert als Verhältnis der Oberfläche der Körnermenge zur Masse der Körnermenge:

$$a_{M,S} = \frac{\sum A_i}{\sum M_i} \quad (3-21)$$

Der Zusammenhang zwischen der volumenspezifischen und massenspezifischen Kornoberfläche ergibt sich aus der mittleren Reindichte der Schüttung:

$$a_{M,S} = \frac{a_{V,S}}{\rho_{Re}} \quad (3-22)$$

Für die Bestimmung der spezifischen Oberfläche gibt es verschiedene Messverfahren. Eine der Bekanntesten ist die Blaine-Methode. Diese Messung beruht auf der Bestimmung des Druckverlustes bei der Durchströmung eines Festbettes mit einem Fluid. Die Berechnung der Oberfläche erfolgt mit Hilfe der Kozeny-Carman Gleichung. Weitere Verfahren sind das Sorptionsverfahren und photometrische Verfahren [13].

3.2.5 Kornform

Eine Beschreibung der Partikelform ermöglicht oft eine Einschätzung der Produkteigenschaften. Sie hat Einfluss auf Fließeigenschaften, Abriebfestigkeit sowie Packungsstruktur und somit auch auf den Strömungswiderstand. Um ein reales Partikel mit einer Kugel vergleichen zu können, wurden spezielle Formfaktoren eingeführt. Eine allgemeine Definition ergibt sich aus dem Vergleich zweier unabhängig voneinander an einem Partikel gemessenen Größen χ_α und χ_β [19]:

$$\Psi_{\alpha,\beta} = \frac{\chi_\alpha}{\chi_\beta} \quad (3-23)$$

Somit sind Formfaktoren dimensionslose Verhältnisse messbarer Teilcheneigenschaften, wie kennzeichnende Länge, Fläche oder Volumen eines Teilchens.

Durch den Formfaktor wird die Abweichung eines unregelmäßig geformten Partikels von der Kugelform berücksichtigt. Der Formfaktor wird auf eine charakteristische Oberfläche bezogen, also erhält man je nach Kornoberfläche unterschiedliche Formfaktoren. Einer der

bekanntesten Formfaktoren ist die Sphärizität nach Wadell. Sie gibt das Verhältnis der Oberfläche einer volumengleichen Kugel zur tatsächlichen Oberfläche des Kornes an. Sie kann durch das Verhältnis von volumenspezifischer Oberfläche einer Kugel zur volumenspezifischen, geometrischen Oberfläche des realen Partikels ausgedrückt werden [19]:

$$\Psi_{Wa} = \frac{\text{Oberfläche der volumengleichen Kugel}}{\text{tatsächliche Oberfläche}} = \frac{d_V^2 \cdot \pi}{A} = \frac{d_V^2}{d_A^2} \leq 1 \quad (3-24)$$

Die Kugel hat von allen Körpern gleichen Volumens die kleinste Oberfläche. Im Nenner stehen die Oberflächen der Nicht-Kugeln. Daher ist der Wert des Nenners immer größer als jener des Zählers. Die Sphärizität ist nur für eine Kugel eins, ansonsten ist sie kleiner 1 [19].

Das zweidimensionale Analogon zur Sphärizität ist die Zirkularität Ψ_C :

$$\Psi_C = \frac{\text{Umfang des projektionsflächengleichen Kreises}}{\text{tatsächlicher Umfang der Partikelprojektion}} = \frac{d_{Pr} \cdot \pi}{U} = \frac{d_{Pr}}{d_{Pe}} \leq 1 \quad (3-25)$$

Der Umfang aller Nicht-Kreisflächen ist größer als der des projektionsflächengleichen Kreises. Somit nimmt auch die Zirkularität nur Werte ≤ 1 ein ($\Psi_C = 1$ für einen Kreis).

Ein weiterer Formfaktor ist der Heywoodfaktor f . Er ist über den Vergleich von spezifischen Oberflächen definiert, wobei hier die Partikelgrößendefinition x offen bleibt [19].

$$f = \frac{\text{gemessene spez.Oberfläche der Partikel}}{\text{spez.Oberfl.einer Kugel mit Durchmesser } x} = \frac{a_S}{6/x} \quad (3-26)$$

Je nach der Festlegung von x muss f mit einem Index versehen werden. f kann anders als Ψ_{Wa} Werte > 1 annehmen. In allgemeiner Form ergibt sich nach **Glg. (3-23)**:

$$f = \frac{d_S^2}{x^2} * \frac{x^3}{d_V^3} = \frac{\psi_{S,x}^2}{\psi_{V,x}^3} \quad (3-27)$$

Die Beziehung des Heywoodfaktors zur Sphärizität ist wie folgt definiert

$$f = \frac{d_S^2}{d_V^2} * \frac{x}{d_V} = \frac{1}{\psi_{Wa}} * \frac{x}{d_V} \quad (3-28)$$

Wird für die offen gebliebene Partikelgröße x in der **Glg. (3–28)** d_V genommen, muss der Heywoodfaktor entsprechend indiziert werden f_V . Er entspricht dann gleich dem Kehrwert der Sphärizität. In dieser speziellen Weise wird er als Formfaktor φ in die Normen zur Darstellung von Korngrößenverteilungen (DIN 66141) eingeführt [19]:

$$\varphi \equiv f_V = \frac{1}{\psi_{Wa}} = \frac{d_S^2}{d_V^2} \quad (3-29)$$

Wenn φ gleich 1 ist entspricht dies einer Kugel und wenn φ größer eins ist entspricht er anders geformten Partikel. Je größer φ ist, desto mehr weicht die Partikelform von der Kugel ab [19].

3.2.6 Einfluss der chemischen Zusammensetzung und der Korngröße auf die Eigenschaften von Schüttgutpartikel

Ein Schüttgut besteht meist nicht aus homogenen Schüttgutpartikeln. Es handelt sich oft um polymineralische Materialien wie z.B. Erze oder Mischungen aus mehreren Erzen. Die unterschiedlichen Erze haben verschiedene Eigenschaften. Mineralien mit einer geringeren Härte und hoher Spaltbarkeit brechen leichter als Mineralien hoher Härte. Die Erze werden schon in der Mine aufbereitet, um ein verkaufsfähiges Produkt zu erzeugen. Dabei durchlaufen sie verschiedene Zerkleinerungs- und Sortierprozesse, um unerwünschte Begleitelemente, wie Silizium oder Aluminium, abzutrennen und Eisen anzureichern. Hämatit hat meistens eine silikatische, manchmal auch eine alkalienreiche Gangart. Hüttenwerke fordern aber eine Begrenzung der Alkalien, da diese im Hochofen im Kreislauf geführt

werden. Durch das unterschiedliche Zerkleinerungsverhalten des Hämatit und der Gangart, kann durch die Feinkornabtrennung gleichzeitig eine Alkalienabtrennung durchgeführt werden. Somit ändert sich die Mineralphasenverteilung mit der Korngröße, je nach Art und Eigenschaften des Erzes. Dieses Phänomen wird auch bei den Verläufen der Eigenschaften der Schüttgutpartikeln, wie Reindichte, innere Porosität und somit Rohdichte und der spezifischen Oberfläche, verfolgt. Im Rahmen der Diplomarbeit „*Systematische Untersuchung von physikalischen und fluiddynamischen Eigenschaften von Feineisenerzen zur Auslegung von Wirbelschichtsystemen*“, von Wall G. wurden die Eigenschaften wie Reindichte, Rohdichte und innere Porosität in Abhängigkeit von der Korngröße und der chemischen Zusammensetzung an unterschiedlichen Erzen genauer untersucht [11,22]:

Die *Reindichte* hängt von der chemischen Zusammensetzung und der Mineralphasenverteilung der Körner in den einzelnen Korngrößenklassen ab. Dabei wird der Gehalt an Hämatit, Goethit und SiO_2 berücksichtigt. Die Reindichte des Goethits beträgt $4,5 \text{ g/cm}^3$ und die des Hämatits $5,2 \text{ g/cm}^3$. Wenn ein Erz einen hohen Goethitgehalt aufweist, macht sich das in einer niedrigeren Reindichte bemerkbar. Auch ein hoher Gehalt an SiO_2 führt zu einer geringeren Dichte. Dies kann bei den Erzen Hamersley und Mt Newman beobachtet werden. Die Reindichte dieser Erze nimmt mit der Korngröße zu (**Abbildung 3-11**). Diese Erze weisen höhere Goethitgehalte und SiO_2 -Gehalte auf. Deshalb ist ihre Reindichte auch niedriger als jene von BHP 7 oder Sishen. BHP 7, Sishen und Carajas weisen einen geringeren Goethitgehalt auf und haben somit eine relativ hohe Reindichte. Bei diesen Erzen nimmt der Goethitgehalt mit zunehmender Korngröße ab. Dadurch gibt es eine leichte Abnahme der Reindichte mit der Korngröße. Die Reindichte von San Isidro nimmt stark mit zunehmender Korngröße ab, aufgrund der Zunahme des Hämatitanteiles und Abnahme des Goethitanteiles mit der Korngröße. Die Messung der Reindichten wurde mit einem Heliumpyknometer durchgeführt [11].

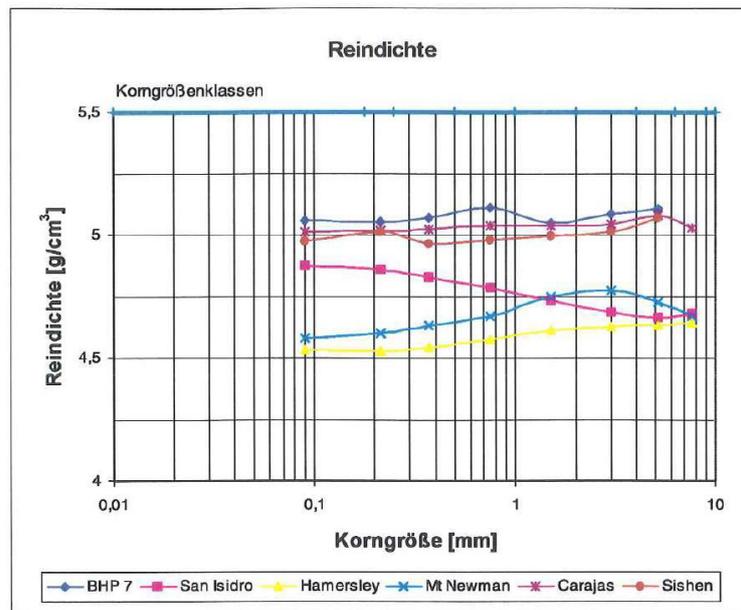


Abbildung 3-11: Darstellung der Reindichte über die Korngröße [11].

Die Messung der *Rohdichte* wurde an denselben Erzen, wie bei der Messung der Reindichte, durchgeführt (**Abbildung 3-12**). Hierbei spielt auch die innere Porosität eine große Rolle. Die Porosität, die Art der Poren, die Größe und die Größenverteilung hängen von der Gesteinsentstehung und der chemischen Zusammensetzung der Erze ab, und sind somit Eigenschaften des Stoffes. Die Porosität ändert sich daher über die Korngröße in Anlehnung an die chemische Zusammensetzung. Bei der Rohdichte würde man annehmen, dass sie mit Zunahme der Korngröße abnimmt, da die relative Anzahl an Poren zunehmen müsste. Dieser Trend ist aber nur bei dem Erz San Isidro stark ersichtlich. Dies liegt an der Zunahme des Goethitgehaltes und der damit verbundenen Zunahme der Porosität zum Grobgut hin. Sishen hat eine relativ hohe Rohdichte, da dieses Erz eine sehr hohe Kompaktheit und geringe innere Porosität aufweist [11].

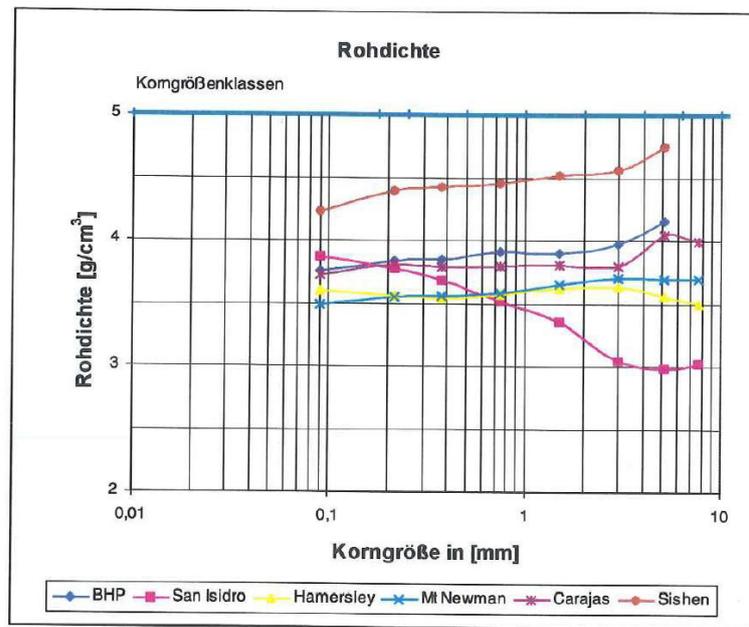


Abbildung 3-12: Darstellung der Rohdichte der Erze über die Korngröße [11].

4 Durchströmung von Feststoffschüttungen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen bei der einphasigen Durchströmung von ruhenden Feststoffschüttungen behandelt. Der Feststoff stellt grundsätzlich zwar eine zweite Phase neben dem strömenden Fluid dar, er wird aber in weiterer Betrachtung nicht als Phase angesehen, sondern als unbeweglich und inert behandelt. Wichtige kennzeichnende Größen der Feststoffschüttungen, wie Form, Abmessungen des Feststoffes selbst und der Lückengrad, sind in **Kapitel 3** genannt.

4.1 Hydraulische Durchmesser

Der hydraulische Durchmesser dient, im Hinblick auf die Strömung in der Schicht, zur Kennzeichnung der Größe der verfügbaren Strömungskanäle. Bei der Untersuchung des Druckverlustes einer Festbettschüttung, die mit einem Medium durchströmt wird, reicht oft die Kenntnis der Größe des verfügbaren freien Volumens oder der verfügbaren freien Querschnittsfläche nicht aus. Das freie Volumen innerhalb einer Schicht ist aus vielen einzelnen Poren zusammengesetzt. Je größer die Partikeln sind, umso größer sind auch die Poren. Eine Schicht, bestehend aus großen Teilchen, wird also wenige große Poren besitzen, während eine aus kleinen Teilchen gebildete Schicht viele kleine Poren besitzt, obgleich der mittlere Lückengrad für beide nahezu gleich ist. Daher ist die Angabe der mittleren Größe der Einzelporen durch den hydraulischen Durchmesser für die Strömung wichtig. Bei der Einführung des hydraulischen Durchmessers geht man also von der Vorstellung aus, dass sich das Lückenvolumen der Feststoffschicht in eine begrenzte Anzahl

von Strömungskanälen unterteilen lässt. Die Kanäle können dabei gerade und parallel in einer Reihe angeordnet sein, die alle denselben Durchmesser aufweisen und deren Länge der Schichthöhe entspricht (**Abbildung 4-1a**). Sie können aber auch unregelmäßig verlaufen. Dabei ist die Länge der unregelmäßig verlaufenden Kanäle größer als die Schichthöhe. Die Querschnittsflächen der Kanäle können längs des Strömungsweges unveränderlich sein (**Abbildung 4-1b**), oder aber sich abschnittsweise ändern (**Abbildung 4-1c**). Es hat sich aber als völlig ausreichend erwiesen den hydraulischen Durchmesser nach der einfachen Vorstellung von in einer Reihe gerader und paralleler Kanäle zu bestimmen [10].

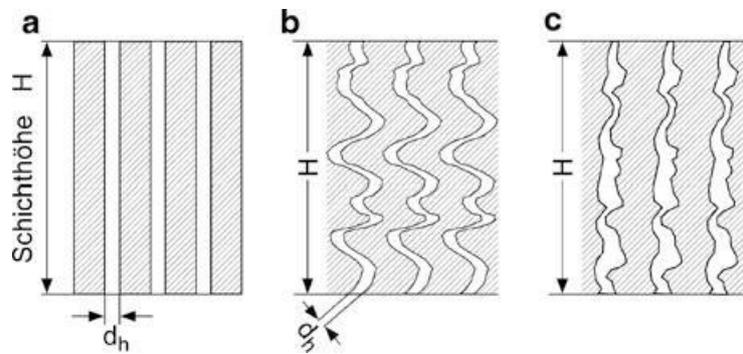


Abbildung 4-1: Schematisierte Strömungsmodelle für Feststoffschüttungen [10].

Der hydraulische Durchmesser ist das Verhältnis des Vierfachen der durchströmten Fläche zu dem benetzten Umfang:

$$d_{hyd} = 4 * \frac{\text{durchströmtes Volumen}}{\text{benetzte Oberfläche}} = 4 * \frac{V_{ges} - V_{Pges}}{A_{Pges}} \quad (4-1)$$

Hierin ist $V_{ges} - V_{Pges}$ das schon oben genannte freie Volumen und A_{Pges} die gesamte Oberfläche aller Partikel in der Schicht. Mit der umgeformten Gleichung des Lückengrades $V_{ges} = V_{Pges}/(1-\epsilon)$ erhält man:

$$d_{hyd} = 4 * \frac{\epsilon V_{Pges}}{1-\epsilon A_{Pges}} \quad (4-2)$$

Für nicht kugelförmige Teilchen wird der charakteristische Partikeldurchmesser d_p als Durchmesser der Kugel mit gleicher volumenbezogener Oberfläche bestimmt:

$$d_p \equiv 6 * \frac{V_P}{A_P} \quad (4-3)$$

Unter Verwendung dieser Gleichung für den charakteristischen Partikeldurchmesser ergibt sich für den hydraulischen Durchmesser:

$$d_{hyd} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} d_p \quad (4-4)$$

Somit ist dieser Durchmesser eine Funktion des Partikeldurchmessers und des Lückengrades. Dabei wird das gesamte in der Schicht vorhandene Lückenvolumen durch den Lückengrad berücksichtigt. Der Partikeldurchmesser stellt ein Maß für die über die Schicht gemittelte Größe der einzelnen Poren dar, da die Poren zwischen den benachbarten Partikeln umso größer sind, je größer der Durchmesser der Partikeln ist [10].

Die **Glg. (4–4)** gilt für monodisperse Schüttungen. Wenn man den Partikeldurchmesser durch einen für polydisperse Systeme geltenden Durchmesser, wie den Sauterdurchmesser, ersetzt, lässt sich diese Gleichung auch für solche Systeme verwenden [10].

4.2 Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Feststoffschüttung

Eine Feststoffschüttung wird aufgrund der ungleichförmigen Verteilung des Lückengrades über den Säulenquerschnitt ungleichmäßig durchströmt. Wie in **Kapitel 3.1.1.4** erwähnt, ist der Lückengrad in der Nähe der Behälterwand besonders groß. Deshalb durchströmt in Wandnähe ein hoher Anteil des gesamten Fluidstromes die Schicht. Je größer der örtliche Lückengrad in Wandnähe wird, umso ausgeprägter ist diese Randgängigkeit der Feststoffschüttung [10].

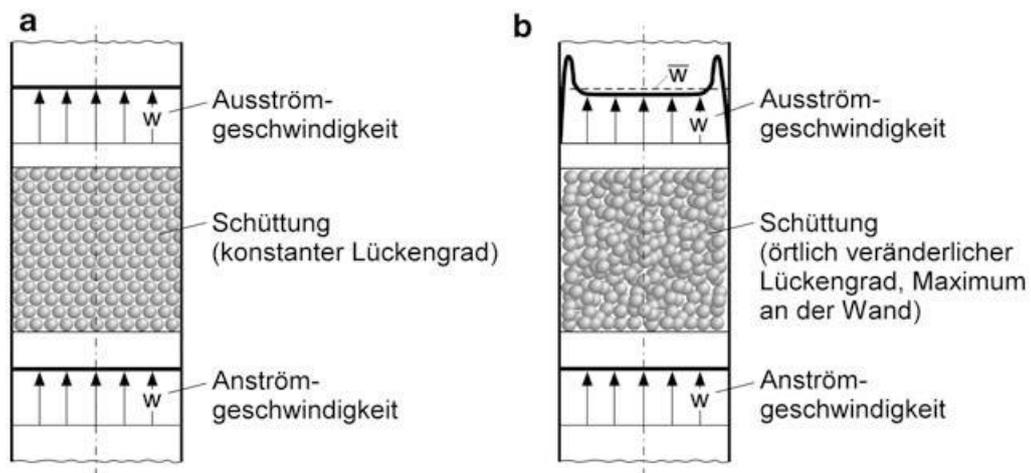


Abbildung 4-2: Geschwindigkeitsverteilung in der Feststoffschicht [10].

In der **Abbildung 4-2a** ist die Geschwindigkeitsverteilung einer Feststoffschüttung bei konstantem Lückengrad und in **Abbildung 4-2b** bei örtlich veränderlichem Lückengrad, mit einem Maximum nahe der Wand, zu sehen. Für den zweiten Fall ergeben sich eine ausgeprägte Randzone und eine Kernzone. Direkt an der Behälterwand ist die Geschwindigkeit aufgrund von Haftbedingungen gleich null. Mit zunehmendem Abstand zur Wand hin steigt die Geschwindigkeit zuerst steil an, durchläuft anschließend ein örtliches Maximum und sinkt dann auf einen annähernd konstanten, vom Ortsradius unabhängigen Wert. Die Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils ist begrenzt. Bei strukturierten Packungen bestehen aufgrund der festgelegten Geometrie kaum noch Probleme einphasige Strömungen zu berechnen. Im Fall von zufälligen Schüttungen ist die Schüttungsgeometrie noch immer schwer exakt zu erfassen [10].

4.3 Druckverlust, Widerstandsbeiwert und Reynoldszahl

Der auf die Längeneinheit bezogene Druckverlust ist nicht nur von der Strömungsgeschwindigkeit und den physikalischen Eigenschaften des Strömungsmittels abhängig, sondern auch von der Partikelform, Partikelgröße und der Anordnung der einzelnen Partikel. Das Widerstandsgesetz für die dimensionslose Beschreibung des Druckverlustes lautet [15]:

$$\Psi = f(Re) \quad (4-5)$$

Hierbei bedeutet Ψ die Widerstandszahl, oder auch Widerstandsbeiwert, und Re die Reynoldszahl. Die Widerstandszahl hängt aber nicht nur von der Reynoldszahl ab. Sie hängt auch von den beiden Längenverhältnissen H/d_p und D/d_p ab, wobei d_p der Partikeldurchmesser, H die Schütthöhe und D der Säulendurchmesser bedeuten. Wenn das Verhältnis ausreichend groß ist, spielen diese nur eine untergeordnete Rolle und können meist weggelassen werden. Das Längenverhältnis H/d_p ist nur dann zu berücksichtigen, wenn die Schüttsäule nur aus wenigen Partikellagen besteht, und d_p/D , wenn die einzelnen Schichten nur wenige Partikel aufnehmen können. Für die Festlegung von Ψ und Re gehen in der Literatur einzelne Autoren von unterschiedlichen Modellbildern aus. Einige vergleichen den Druckverlust in Schüttungen mit dem eines umströmten Einzelpartikels und berücksichtigen die Abweichung mit Beiwerten. Andere wiederum beschreiben den Druckverlust in Analogie zur Durchströmung von Rohren und Kanälen und ersetzen die Schüttung damit gedanklich durch ein Bündel paralleler Rohre (*H. Brauer* und *S. Ergun*). Durchgesetzt hat sich die Analogie zur Rohrströmung. Hierbei gilt für den auf die Längeneinheit bezogenen Druckverlust [10,15]:

$$\frac{\Delta p}{H} = \Psi * \frac{\rho * \tilde{v}^2}{2 * d_{hyd}} \quad (4-6)$$

Dabei wird die tatsächliche Kanallänge L mit der Höhe der Schicht H gleichgesetzt. ρ ist die mittlere Dichte des Fluids in der Schüttung, \tilde{v} ist die mittlere effektive Fluidgeschwindigkeit in den Kanälen und d_{hyd} der hydraulische Durchmesser der Schüttung. Als charakteristische Geschwindigkeit wird die mittlere effektive Fluidgeschwindigkeit in den Bündeln paralleler Kanäle durch die Leerohrgeschwindigkeit ersetzt. Diese Geschwindigkeit wird auf den Querschnitt der leeren Säule A_s bezogen [10]:

$$w = \frac{\dot{V}}{A_s} \quad (4-7)$$

Wird der Hohlraum in der Schüttung durch den Lückengrad ε gekennzeichnet ergibt sich für die mittlere effektive Strömungsgeschwindigkeit:

$$\tilde{v} = \frac{w}{\varepsilon} \quad (4-8)$$

Demzufolge wird die Auswirkung der Ortsabhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit auf den Druckverlust nicht berücksichtigt. Wenn der hydraulische Durchmesser gemäß **Glg. (4-4)** und die mittlere effektive Strömungsgeschwindigkeit gemäß **Glg. (4-8)** in die Gleichung für den auf die Länge bezogenen Druckverlust eingesetzt wird, erhält man [10]:

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{3}{4} \Psi \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho * w^2}{d_P} \quad (4-9)$$

Wird der konstante Faktor 4/3 in den Widerstandsbeiwert einbezogen, ergibt sich für den Beiwert:

$$\Psi = \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \frac{\Delta p}{\rho * w^2} \frac{d_P}{H} \quad (4-10)$$

Dieser Beiwert hängt von der Reynoldszahl der Durchströmung ab. Für die Reynoldszahl der Schüttung werden der hydraulische Durchmesser und die mittlere effektive Geschwindigkeit verwendet [10]:

$$Re = \frac{\tilde{v} * d_{hyd}}{\nu} = \frac{w * d_P}{\nu} \frac{2}{3} \frac{1}{1-\varepsilon} \quad (4-11)$$

Vernachlässigt man den physikalisch bedeutungslosen Zahlenfaktor 2/3 ergibt sich als charakteristische Reynoldszahl für die Strömung in Feststoffschüttungen [10]:

$$Re = \frac{w * d_P}{\nu} \frac{1}{1-\varepsilon} \quad (4-12)$$

mit ν als kinematische Viskosität des Fluids.

4.4 Empirische Durchströmungsgleichung

Eine Durchströmungsgleichung gibt den Zusammenhang zwischen der charakteristischen Durchströmungsgeschwindigkeit w , dem Druckunterschied Δp , den Fluideigenschaften ρ (Dichte) und η (dynamische Viskosität) und der Schichtgeometrie an. Die äußere Schichtgeometrie wird durch die durchströmte Länge und die innere Geometrie der Schicht durch den Lückengrad ε und der Teilchengröße d_p berücksichtigt. Der dimensionslose Druckverlust bei der Durchströmung kann mittels der Euler-Zahl $Eu = \Delta p / (\rho \cdot w^2)$ ausgedrückt werden als [19]:

$$Eu = \frac{L}{D} * f(Re, \varepsilon) \quad (4-13)$$

Wobei D dem Durchmesser des Rohres und die Funktion $f(Re, \varepsilon)$ einer Widerstandsfunktion entspricht. Diese Funktion ist analog dem Rohrreibungswert bei der Durchströmung von rauen Rohren oder dem Widerstandsbeiwert bei der Umströmung von Partikeln [19].

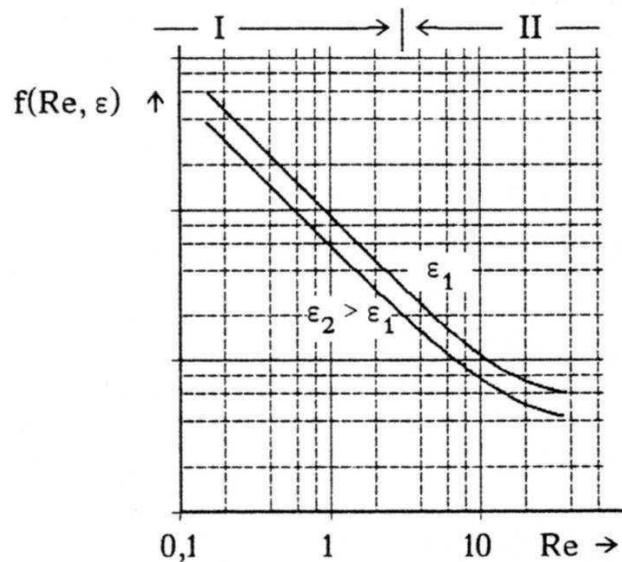


Abbildung 4-3: Widerstandsfunktion für die Durchströmung [13].

Abbildung 4-3 unterteilt sich in einen Bereich zäher Durchströmung (Bereich I) bei kleinen Reynoldszahlen und einen Übergangsbereich (Bereich II) mit zäh-turbulenter Durchströmung bei höheren Reynoldszahlen.

4.4.1 Zähe Durchströmung

Wenn der Durchströmungswiderstand praktisch nur auf Reibungskräften beruht, liegt eine zähe Durchströmung ($Re < 3$) vor. Bei dieser Durchströmung sind die Porenweiten klein, die Geschwindigkeiten langsam und die Zähigkeit der Fluide groß (hohe dynamische Viskosität). In diesem Bereich ist die Widerstandsfunktion umgekehrt proportional zur Re-Zahl [19]:

$$f(Re, \varepsilon) = \frac{\text{const.}(\varepsilon)}{Re} \quad (4-14)$$

Es ist zu beachten, dass die Konstante von ε abhängig sein muss. Die zwei bekanntesten Gleichungen in diesem Bereich sind die Darcygleichung und die Carman-Kozeny-Gleichung [19].

Die Darcygleichung lautet:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\eta * w}{B} \quad (4-15)$$

In dieser Gleichung sind die Eigenschaften der Schicht (ε und mittlere Partikelgröße x) in der sogenannten Durchlässigkeit B , mit der Einheit [m^2], zusammengefasst [19].

$$B \equiv \frac{x^2}{const.(\varepsilon)} \quad (4-16)$$

Diese Konstante ist für die jeweilige Schicht empirisch zu ermitteln, da sie die Porenquerschnitte charakterisiert.

Die Carman-Kozeny-Gleichung gibt die gleichen Abhängigkeiten zwischen dem Druckabfall und der Geschwindigkeit ($\Delta p/L \sim \eta * w$) und zwischen der spezifischen Oberfläche ($\Delta p/L \sim a_{V,S}$) wie bei der Darcygleichung an. Zusätzlich weist sie aber eine Abhängigkeit zur Porosität auf [19]:

$$\frac{\Delta p}{L} = k(\varepsilon) \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} a_{V,S}^2 * \eta * w \quad (4-17)$$

Bei Werten der Porosität im Bereich $0,3 \leq \varepsilon \leq 0,65$ hat sich für $k(\varepsilon)$ nur eine schwache Abhängigkeit ergeben und kann im allgemeinen $k(\varepsilon) = const. \approx 4$ gesetzt werden [19].

4.4.2 Zäh-turbulente Durchströmung

Um den turbulenten Anteil am Gesamtwiderstand der Schicht zu berücksichtigen, wird das „turbulente“ Druckabfallglied $(\Delta p/H)_t = K_t * (1/x) * \rho * w^2$ zu den „laminaren“ Glied addiert. Setzt man für x den hydraulischen Durchmesser nach **Glg. (4-4)** und für w die mittlere effektive Geschwindigkeit nach **Glg. (4-8)** ein, erhält man als turbulentes Glied [19]:

$$\left(\frac{\Delta p}{H}\right)_t = K_t \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho * w^2 * a_{V,S} \quad (4-18)$$

Die Summe aus diesem „turbulenten“ und dem „zähen“ Anteil am Gesamtwiderstand der Schicht lautet:

$$\frac{\Delta p}{L} = K_z \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \eta * w * a_{V,S}^2 + K_t \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho * w^2 * a_{V,S} \quad (4-19)$$

Die Konstanten K_z und K_t müssen experimentell bestimmt werden. Eine der bekanntesten Gleichungen für die zäh-turbulente Durchströmung ist die Ergungleichung (**Glg. (4-22)**) [19].

4.5 Widerstandsgesetze

Das Widerstandsgesetz wird als Zusammenhang zwischen dem Widerstandsbeiwert und der Reynoldszahl bezeichnet. Dieses Gesetz ist von der Geometrie der Feststoffpartikeln und von der Größenverteilung abhängig und muss versuchsmäßig ermittelt werden [15].

4.5.1 Brauer

Das Widerstandsgesetz nach *Brauer H.* (1960) gilt für regellose Schüttungen von Kugeln gleicher Größe. Er wertete eigene und fremde Messungen von ungeordneten Gleichkornschüttungen bis zu Reynoldszahlen von $Re = 8000$ aus. In diesem gemessenen Bereich erreicht der Widerstandsbeiwert Ψ noch keinen unveränderlichen Endwert. Es wird aber für höhere Reynoldszahlen ein konstanter Wert erwartet. Für den gemessenen Bereich ergibt sich folgende Widerstandszahl für die regellose Kugelschüttung [15]:

$$\Psi = \frac{160}{Re} + \frac{3,1}{Re^{0,1}} \quad (4-20)$$

Der erste Summand gilt für den Druckverlust bei laminarer Strömung und erfasst die Reibungsverluste, während der zweite Summand für die turbulente Durchströmung gilt.

4.5.2 Ergun

Sabri Ergun führte umfangreiche Untersuchungen an Gleichkornschüttungen mit statistisch gleichmäßig verteilten scharfkantigen Füllkörpern, mit einem engen Korngrößenbereich, durch. Für diese Untersuchungen, im ganzen Bereich von der laminaren bis zur turbulenten Strömung, erhielt er folgendes Widerstandsgesetz [23]:

$$\Psi = \frac{150}{Re} + 1,75 \quad (4-21)$$

Die Messungen wurden jedoch nur bis zu Reynoldszahlen von $Re = 2500$ durchgeführt. Für größere Re -Zahlen bleibt der Verlauf des Gesetzes unsicher. Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt hier wieder den laminaren Druckverlust nach der Carman-Kozeny-Gleichung. Der zweite Ausdruck beschreibt die vollturbulente Strömung nach Burke und Plummer. Setzt man in die Gleichung der Rohrströmung (**Glg.(4-6)**) für den Widerstandsbeiwert das Gesetz nach Ergun ein, erhält man die Ergungleichung [23]:

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta * w}{d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho * w^2}{d} \quad (4-22)$$

Diese Gleichung gilt gut im Reynoldszahlenbereich von 3 bis 10000. Der Druckverlust in Schüttungen im laminaren Bereich ist von der ersten Potenz der Geschwindigkeit abhängig und im turbulenten Bereich vom Quadrat der Geschwindigkeit. Im turbulenten Bereich ist die Widerstandszahl von der Reynoldszahl unabhängig. Laut Ergun ist also der Druckverlust von vier Faktoren abhängig [23]:

- dem Gasstrom und somit der Gasgeschwindigkeit
- der Dichte und Viskosität des Gases
- der Packungsdichte und –struktur und somit dem Lückengrad des Schüttgutes
- der Größe, Form und Oberfläche der Schüttgutpartikel

Als Durchmesser wird der für die Durchströmung charakteristische Durchmesser eingesetzt. In der Literatur wird hierfür meist der Sauterdurchmesser vorgeschlagen. Der wichtigste Einflussfaktor in dieser Gleichung ist der Lückengrad, da er zur dritten Potenz auftritt. *H. Brauer* hat schon gezeigt, dass bei einer Fehlermittlung des Lückengrades von $\pm 3\%$, der Widerstandsbeiwert um $\pm 10\%$ bis $\pm 20\%$ falsch bestimmt werden kann [15].

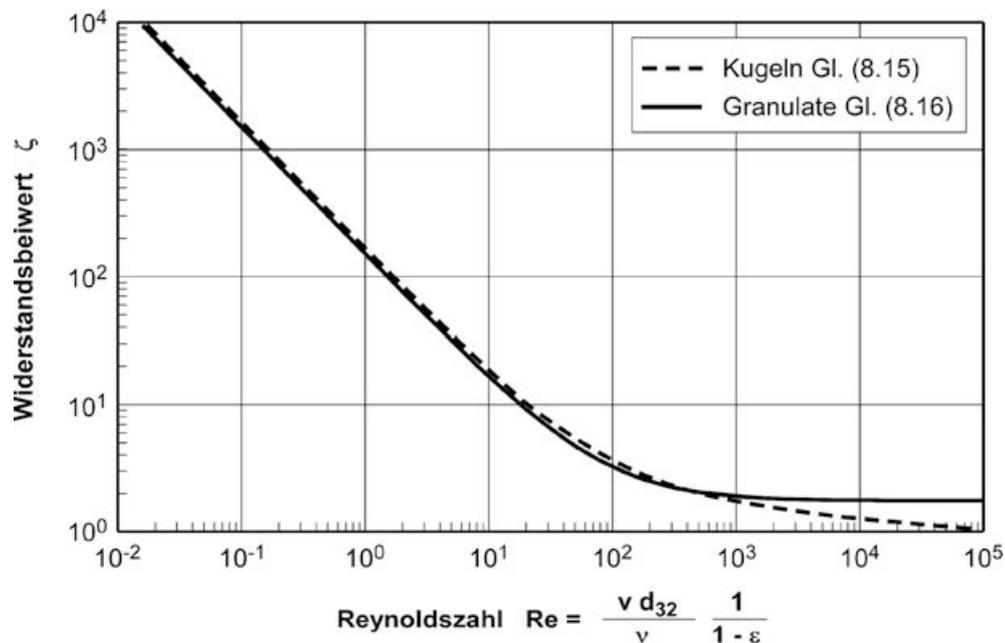


Abbildung 4-4: Widerstandsgesetz nach Brauer (Kugeln) und Ergun (Granulate) [10].

4.5.3 Jeschar

Rudolf Jeschar führte Druckverlustmessungen an durchströmten Gleichkornschüttungen, geschichteten Mehrkornschüttungen und gemischten Mehrkornschüttungen, bei Reynoldszahlen zwischen $2 \leq Re \leq 30000$, durch.

Messergebnisse an Gleichkornschüttungen: Diese Versuche wurden zur Überprüfung der Anlage und zur Überprüfung des Widerstandsgesetzes nach Brauer durchgeführt. Dafür verwendete er Kugeln mit verschiedenen Größen: 10 mm, 20 mm, 30 mm und 80 mm. Die Gültigkeit von Brauer wurde bestätigt, sogar im erweiterten Bereich von $Re = 30000$. Der erwartete unveränderliche Endwert der Widerstandszahl wurde bei dieser Reynoldszahl für die verwendeten Füllkörper noch nicht erreicht [15].

Versuch Nr.	Neendurchmesser der Kugel mm	Mittlerer Kugeldurchmesser d mm	d/D	Dichte der Kugeln kg/m ³	Schütthöhe H mm	Lückengrad ϵ
1	10	9,9	0,0195	2305,4	903	0,378
2	20	19,9	0,0392	2276,2	993	0,375
3	30	33,6	0,0662	2313,8	893	0,388
4	80	80,4	0,1585	2420,1	993	0,421

Abbildung 4-5: Daten der Gleichkornschüttungen aus Kugeln [15].

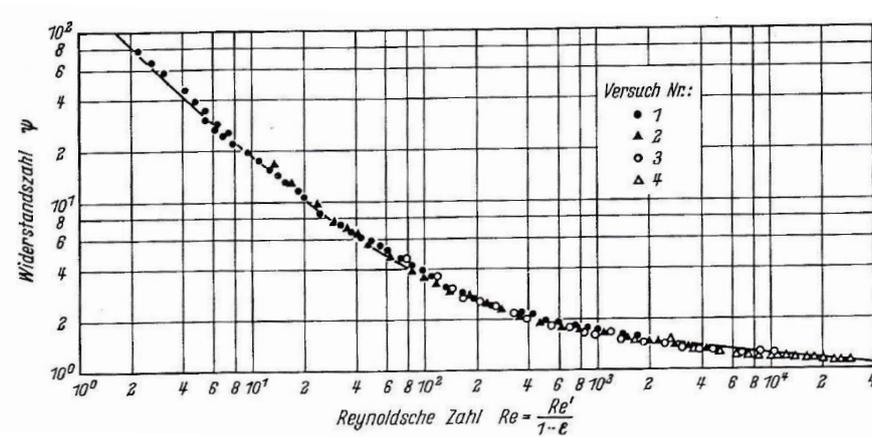


Abbildung 4-6: Widerstandszahl für Gleichkornschüttungen aus Kugeln nach Messungen von Jeschar [15].

Das Widerstandsgesetz nach Brauer ist als durchgezogene Linie eingezeichnet.

Messergebnisse an geschichteten Mehrkornschüttungen: Hierbei sind die Füllkörper in Schichten mit jeweils gleicher Korngröße angeordnet. Eine geschichtete Schüttung kann mit dem für Gleichkornschüttungen gültigen Gesetz berechnet werden. Der Druckverlust kann für jede Schicht getrennt nach Brauer berechnet und anschließend aufsummiert werden. Dafür wurden von Jeschar drei Versuche durchgeführt. Zwei Versuche mit Schüttungen aus zwei Schichten (10 mm und 30mm, 10 mm und 80 mm), und einen Versuch mit einer Schüttung aus vier Schichten(10 mm, 20 mm, 30 mm und 80 mm). Die einzelnen Schichten bestanden aus Kugeln gleicher Größe. Zur besseren Abgrenzung wurden zwischen den einzelnen Schichten Siebe eingelegt, wodurch aber auch der Druckverlust geringfügig erhöht wurde. Jeschar verglich den gemessenen Druck der Versuche mit dem gerechneten Druck (schichtweise nach dem Gesetz von Brauer). Die Rechnung wurde innerhalb der möglichen Fehlergrenzen befriedigend durch die Messungen bestätigt [15].

Messergebnisse an gemischten Mehrkornschüttungen: Bei gemischten Mehrkornschüttungen ist im Gegensatz zu den geschichteten Mehrkornschüttungen nicht zu erwarten, dass das Widerstandsgesetz dieselbe Form hat wie bei Gleichkornschüttungen. Jeschar führte 10 Versuche (Versuch 8 bis 17) mit gemischten Mehrkornschüttungen durch (**Abbildung 4-7**), um ein Widerstandsgesetz für diese Schüttungen zu ermitteln:

Versuch Nr.	Nenn-durchmesser der Kugeln mm	Mittlerer Kugeldurchmesser d mm	Volumenanteil V_n/V	Äquivalenter Kugeldurchmesser d mm	Schütthöhe H mm	Lückengrad der Mischung ϵ_m
8	10	9,9	0,50	13,2	753	0,362
	20	19,9	0,50			
9	30	33,6	0,51	46,9	1000	0,372
	80	80,4	0,49			
10	10	9,9	0,36	22,6	1000	0,263
	80	80,4	0,64			
11	10	9,9	0,26	28,2	993	0,236
	80	80,4	0,74			
12	20	19,9	0,31	41,5	1000	0,312
	80	80,4	0,69			
13	10	9,9	0,65	14,3	1000	0,319
	80	80,4	0,35			
14	2	2,1	0,65	3,2	493	0,313
	30	33,6	0,35			
15	2	2,1	0,28	6,6	500	0,202
	30	33,6	0,72			
16	2	2,1	0,31	6,5	500	0,195
	80	80,4	0,69			
17	10	9,9	0,24	20,9	1000	0,303
	20	19,9	0,26			
	30	33,6	0,24			
	80	80,4	0,26			

Abbildung 4-7: Daten der gemischten Mehrkornschüttungen aus Kugeln [15].

Als äquivalenten Durchmesser der Mischungen verwendete er den harmonischen Durchmesser:

$$d_h = \frac{1}{\frac{V_1}{V} \cdot \frac{1}{d_1} + \frac{V_2}{V} \cdot \frac{1}{d_2} + \dots + \frac{V_n}{V} \cdot \frac{1}{d_n}} = \sum_1^n \frac{1}{\frac{V_n}{V} \cdot d_n} \quad (4-23)$$

Nach der Definition des harmonischen Durchmessers ist der repräsentative Durchmesser für eine gemischte Mehrkornschüttung von dem auf das Gesamtvolumen (V) der Füllkörper bezogenen Einzelvolumen jeder Fraktion (V_1 bis V_n) und von den einzelnen in der Schüttung vorhandenen Korngrößen (d_1 bis d_n) abhängig. Aus dieser Gleichung ist zu sehen, dass die Füllkörper mit dem kleinsten Durchmesser den äquivalenten Füllkörperdurchmesser am stärksten beeinflussen. In **Abbildung 4-8** sind die Versuche 8 bis 17 aufgetragen. Die durchgezogene Linie repräsentiert hier wieder das Widerstandsgesetz nach Brauer. Die drei gestrichelten Linien sind Ausgleichskurven. Diese wurden so gelegt, dass sie parallel zur Kurve von Brauer verlaufen [15].

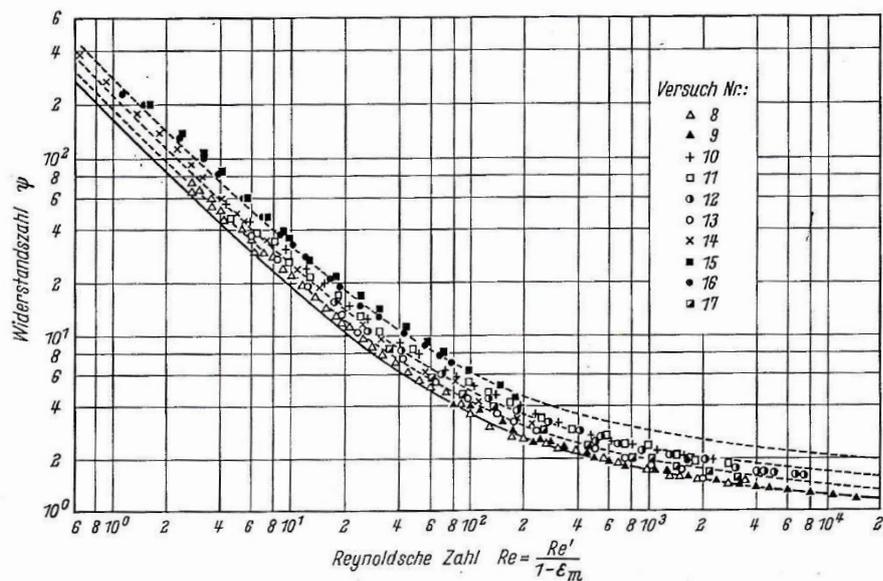


Abbildung 4-8: Widerstandszahl für gemischte Mehrkornschüttungen aus Kugeln nach Messungen von Jeschar [15].

Die Messergebnisse von den Versuchen 8 und 9 fallen mit der Linie von Brauer zusammen. Die Messergebnisse der anderen Versuche sind parallel nach oben verschoben. Die Widerstandszahlen von den Versuchen 10 und 11 sind bei gleichen Reynoldszahlen im Mittel um ungefähr 35 % größer als die von Brauer. Die Widerstandszahlen von den Versuchen 15 und 16 weisen eine noch größere Abweichung von ca. 65 % auf. Nur um 15 % größere Widerstandszahlen ergeben sich bei den Versuchen 13, 14 und 17. Der Verlauf von Versuch 12 ist nicht eindeutig. Wie schon im **Abschnitt 4.5.2** erwähnt wurde, ist das Widerstandsgesetz stark von dem Lückengrad der Mischung abhängig. Wenn der Lückengrad einer Mehrkornschüttung in etwa der einer Gleichkornschüttung gleich ist, dann gilt für beide Schüttungen dasselbe Widerstandsgesetz. Bei einer Mehrkornschüttung mit einem wesentlich kleineren Lückengrad, ergibt sich dagegen eine größere Widerstandszahl. Beim Vergleich der Ergebnisse der Versuche an den Gleichkornschüttungen mit jenen der gemischten Mehrkornschüttung wird dies ersichtlich. Die Mehrkornschüttungen von den Versuchen 8 und 9 ($\epsilon_{m8} = 0,362$ und $\epsilon_{m9} = 0,372$) weisen ähnliche Lückengrade wie die Gleichkornschüttungen von den Versuchen 1 und 2 auf. Deshalb fallen die Ergebnisse von den Versuchen 8 und 9 auch mit der untersten Kurve zusammen. Die Lückengrade von den Versuchen 15 und 16 ($\epsilon_{m15} = 0,0,202$ und $\epsilon_{m16} = 0,195$) sind deutlich kleiner. Darum weichen auch deren Messwerte am stärksten von der durchgezogenen Linie ab [15].

Um ein Widerstandsgesetz für Mehrkornschüttungen zu ermitteln, stellte Jeschar die Widerstandszahl in Abhängigkeit vom Lückengrad der Mischung ϵ_m für unveränderliche

Reynoldszahlen dar. Dabei war es notwendig, den Lückengrad der Mehrkornschüttung auf den Lückengrad einer Gleichkornschüttung, bestehend aus der Fraktion mit dem kleinsten Kugeldurchmesser der betreffenden Mehrkornschüttung, ε_k zu beziehen.

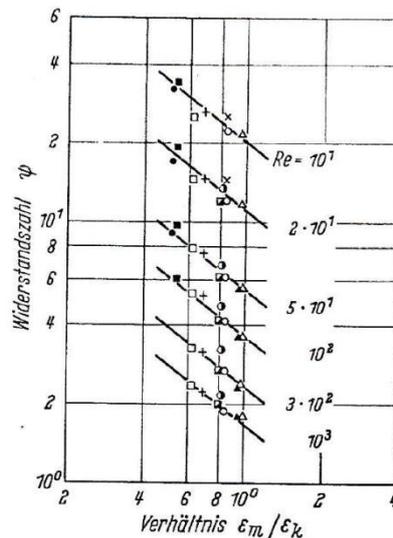


Abbildung 4-9: Abhängigkeit der Ψ von Verhältnis $\varepsilon_m/\varepsilon_k$ für verschieden Re-Zahlen [15].

Die Abhängigkeit der Widerstandszahl von dem Verhältnis dieser Lückengrade kann für alle ausgewählten Reynoldszahlen durch eine Schar von parallelen Geraden dargestellt werden. Aus diesem Zusammenhang, und in Verbindung mit dem Widerstandsgesetz nach Brauer, lässt sich ein für alle untersuchten Gleichkorn- und Mehrkornschüttungen aus Kugeln gültiges Widerstandsgesetz ermitteln [15]:

$$\Psi = \left(\frac{160}{Re} + \frac{3,1}{Re^{0,1}} \right) * \left(\frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_m} \right)^{0,75} \quad (4-24)$$

Somit ändert sich die Widerstandszahl fortlaufend von jeder beliebigen Mehrkornschüttung bis zur Gleichkornschüttung. Die Messwerte von den Versuchen 8 bis 17 wurden für das erweiterte Widerstandsgesetz ausgewertet:

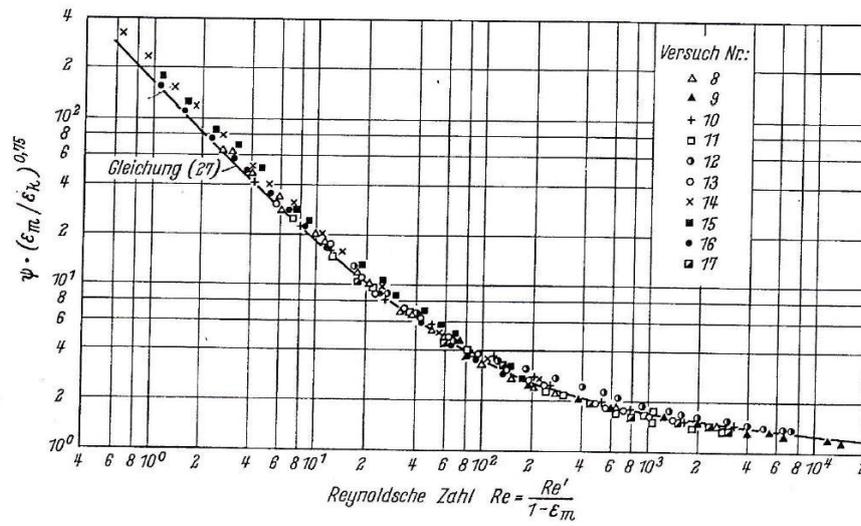


Abbildung 4-10: Erweitertes Widerstandsgesetz für Mehrkornschüttungen [15].

Die durchgezogene Linie gibt das Widerstandsgesetz nach **Glg. (4-24)** an.

5 Experimentelle Durchführung

Die Durchführung der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Versuche zur Ermittlung der Kennwerte (Korngrößenverteilung, Lückengrad, Druckverlust über die Schüttung etc.) der granulierten Mischungen, für die Bestimmung der Widerstandsbeiwerte der Sintereinsatzmischungen, erfolgte im Prüflabor der Abteilung BTT Technik Bramme der voestalpine Stahl GmbH. Die Widerstandsbeiwerte wurden anschließend mit den ermittelten Kennwerten über die Ergungleichung berechnet. Die Gleichung lautet (**Glg. (4–22)**):

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta \cdot w}{\varepsilon^3 d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho \cdot w^2}{\varepsilon^3 d}$$

Wie schon erwähnt wurde, sind die Beiwerte 150 und 1,75 nur für Granulate mit relativ engen Korngrößenverteilungen gültig und mussten deshalb neu bestimmt werden. Die experimentelle Durchführung gliedert sich in:

- Festlegung der Einsatzmaterialien und Zusammensetzung der Sintereinsatzmischungen
- Granulation und Einstellung der Mischgutfeuchte
- Messung der Korngrößenverteilung der granulierten Mischungen und Berechnung eines Kennwertes für die Korngrößenverteilung
- Messung des Druckverlustes über die Einsatzmischungen mit Kaltpermeabilitätsmessungen

- Bestimmung der Rein-, Roh- und Schüttdichte zur Berechnung des Lückengrades der Einsatzmischungen

Ziel ist es, mit den durch die Experimente ermittelten Daten und der Ergungleichung die Widerstandsbeiwerte für die Sintereinsatzmischungen zu bestimmen und einen Zusammenhang zwischen dem gemessenen Druckverlust und der Sinterleistung zu finden. Wenn die Widerstandsbeiwerte konstant, d.h. unabhängig von den freien Prozessvariablen, insbesondere den agglomerationsbedingten Schüttguteigenschaften, sind, kann man für zukünftige Sinterversuche im Labor nur mit der Bestimmung des harmonischen Durchmessers mithilfe der Korngrößenanalyse des CPA-Messgerätes den Druckverlust über die Schüttung berechnen und dadurch mit relativ wenig Untersuchungsaufwand experimentell gut abgesicherte Werte für die Permeabilität der Sintermischung und damit Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung bekommen. Wenn zusätzlich der Lückengrad mit dem harmonischen Durchmesser der agglomerierten Mischung korreliert, wie dies im Schrifttum postuliert wird (Jeschar), kann die Berechnung allein aus der Korngrößenverteilung erfolgen.

5.1 Einsatzmaterialien und Zusammensetzung

Bevor die einzelnen Versuche an den Sintereinsatzmischungen durchgeführt werden konnten, musste die Zusammensetzung der Mischungen festgelegt werden. Dafür wurden drei Rezepte (Mischungen) ausgewählt: SV 4-15, SV 10-15 und SV 23-15. Die Durchgasbarkeit von Sintereinsatzmischungen hängt von der Korngrößenverteilung der Einsatzstoffe ab, da diese den Granulationsprozess, und somit die Korngrößenverteilung der granulierten Mischungen, beeinflussen. Deshalb wurden drei Rezepte ausgewählt, die sich bei der Korngrößenverteilung der Einsatzstoffe unterscheiden. Wie in **Tabelle 5-1** zu sehen ist, ist der Anteil an Konzentraten (Yuzhny Konzentrat und SNIM GMAB) bei der Mischung SV 10-15 höher als bei den beiden anderen Mischungen. Die Mischung SV 4-15 enthält nur das Yuzhny Konzentrat und die Mischung SV 23-15 enthält kein Konzentrat.

Von jedem Rezept wurden 40 kg Material benötigt. Die Mischungen bestehen aus Feinerzen (Heimisches Erz, Assmang, Yuzhny, SNIM, Kumba, Carajas und/oder Zaporoshjer), Kreislaufstoffen (Rückgut Hochofen A, Gichtstaub, Zunder, Feineisen S-arm, Feineisen Kellerschlacke, Feineisen S-reich, Gießhallenstaub, Möllergebäudestaub, Rückgut Sinteranlage, Raumluftentstaubung, Kalkstaub Stahlwerk), Kalk und Koksgas.



Abbildung 5-1: Einsatzmaterialien.

Alle Einsatzstoffe, bis auf Rückgut HO A, Kalkstaub Stahlwerk, Raumluftentstaubung und Rückgut SA, waren feucht. Dies wurde bei der Zusammensetzung der Rezepte mit einberechnet.

Tabelle 5-I: Zusammensetzung der Sintereinsatzmischungen.

Zusammensetzung:	SV 4-15		SV 10-15		SV 23-15	
	kg feucht	Massen %	kg feucht	Massen %	kg feucht	Massen %
Heimisches Erz	16,92	42,29	13,28	33,20	14,15	35,37
Assmang Feinerz	0	0	0	0	2,34	5,85
Yuzhny Konzentrat	3,96	9,89	5,32	13,31	0	0
SNIM GMAB	0	0	5,91	14,76	0	0
Kumba Prem.	2,27	5,68	0	0	2,15	5,36
Carajas	2,13	5,33	0	0	2,38	5,95
Zaporoshjer	0	0	0	0	4,00	10,00
Rückgut HO A	0,15	0,37	0,15	0,38	0,16	0,41
Gichtstaub	0,67	1,67	0,7	1,75	0,75	1,87
Zunder	1,10	2,74	1,15	2,87	1,22	3,06
Feineisen SA	0,23	0,57	0,24	0,6	0,25	0,64
Feineisen KS	0,31	0,78	0,32	0,81	0,35	0,86
Feineisen SR	0,17	0,42	0,18	0,44	0,19	0,47
Gießhallenstaub	0,05	0,11	0,05	0,12	0,05	0,13
Möllergebäudestaub	0,04	0,11	0,05	0,12	0,05	0,12
Rückgut SA	7,16	17,91	7,06	17,65	7,20	18,00
Raumluftentstaubung	0,62	1,56	0,63	1,57	0,62	1,55
Kalkstaub Stahlwerk	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,04
Kalk Steyrling	3,23	8,08	3,96	9,91	3,14	7,86
Koks	0,98	2,45	0,99	2,47	0,98	2,44
Summe	40,01	100,00	40,01	100,00	40,00	100,00

Die Einsatzmaterialien wurden nach Rezept in einen Behälter gegeben. Der Behälter mit den Rohstoffen wurde zwei Minuten lang auf zwei drehende Rollen gelegt, damit sich die Materialien gut miteinander vermischen konnten.

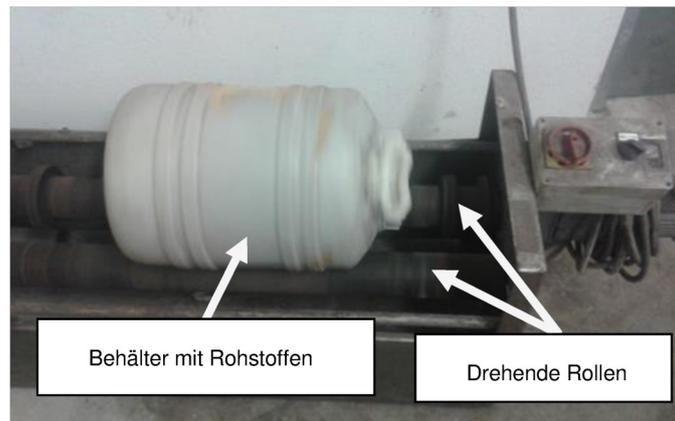


Abbildung 5-2: Mischen der Einsatzmaterialien.

Anschließend erfolgte eine Trennung der vermischten Rohstoffe in jeweils vier Teilproben (Probe 1-4) mithilfe eines Probenteilers: also je vier Teilproben von SV 4-15, SV 10-15 und SV 23-15. Von jeder Teilprobe wurden ca. 50 g Material entnommen und für mehrere Stunden in den Trockenschrank (105 °C) gegeben, um eine Durchschnittsfeuchte für jedes Rezept nach dem thermogravimetrischen Verfahren zu ermitteln. Bei diesem Verfahren werden die eingewogenen Proben bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die Feuchte des Gutes kann dann aus der Differenz der Wägungen vor und nach dem Trocknen nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$w_{H_2O,feucht} = \frac{m_{feucht} - m_{trocken}}{m_{feucht}} * 100 \quad (5-1)$$

Um eine Durchschnittsfeuchte zu erhalten, wurde von den vier ermittelten Feuchtegehalte jeder Mischung ein Mittelwert gebildet.

Tabelle 5-II: Ermittelte durchschnittliche Feuchtegehalte.

Rezept	Durchschnittsfeuchte [%/kg feucht]	Standardabweichung
SV 4-15	3,62	0,15
SV 10-15	2,90	0,29
SV 23-15	2,93	0,24

5.2 Granulation und Einstellung der Mischgutfeuchte

Für den Granulationsvorgang wurden die vier Teilproben der drei Mischungen nochmals geteilt: damit ergaben sich 8 Teilproben mit je 5 kg pro Rezept. Drei dieser Teilproben (1-3) wurden vier Minuten lang in einer Rolliertrommel agglomeriert, die anderen drei (5-7) wurden zuerst zwei Minuten in einen Intensivmischer gegeben und anschließend zwei Minuten in einer Rolliertrommel agglomeriert. Das Einstellen der Mischgutfeuchte erfolgte bei den Proben 1-3 in den ersten 10 Sekunden in der Rolliertrommel und bei den Proben 5-7 im Intensivmischer. Für die gewünschten Feuchtegehalte (Sollfeuchte) wurden 4 % (Probe 1 und 5), 4,5 % (Probe 2 und 6) und 5 % (Probe 3 und 7) gewählt. Die Proben 4 und 8 waren Rückstellproben, falls eine Probe verworfen werden musste oder die Mischgutfeuchte stark von der Sollfeuchte abwich. Bevor das Wasser in die Rolliertrommel bzw. in den Intensivmischer, zur Einstellung der Sollfeuchte, dazugegeben werden konnte, musste die dafür benötigte Wassermenge berechnet werden. Die folgende Berechnung erfolgt für die Mischung SV 4-15 Probe 1:

Die Durchschnittsfeuchte der Mischung SV 4-15 war 3,62 %/kg feucht (**Tabelle 5-II**). In die Rolliertrommel wurden 4700 g der Probe 1 eingewogen. Die Feuchte sollte 4 %/kg feucht ergeben. Die Berechnung der benötigten Wassermenge wurde mit der folgenden Formel durchgeführt:

$$m_{Wasser} = \frac{m_{Probe1} \cdot (w_{soll} - w_{Durchschnitt})}{100} = \frac{4700 \cdot (4 - 3,62)}{100} = 17,86 \text{ g} \quad (5-2)$$

Die benötigte Wassermenge für die anderen Proben wurde nach derselben Gleichung berechnet.

Tabelle 5-III: Sollfeuchte, Granulationsprogramm und für die Mischgutfeuchte benötigte Wassermenge.

SV 4-15			
	Sollfeuchte [%/kg feucht]	Granulation	Benötigte Wassermenge [g]
Probe 1	4	rollieren	17,86
Probe 2	4,5	rollieren	41,36
Probe 3	5	rollieren	64,86
Probe 4	Rückstellprobe		
Probe 5	4	misch+roll	17,86
Probe 6	4,5	misch+roll	41,36
Probe 7	5	misch+roll	64,86
Probe 8	Rückstellprobe		
SV 10-15			
	Sollfeuchte [%/kg feucht]	Granulation	Benötigte Wassermenge [g]
Probe 1	4	rollieren	51,70
Probe 2	4,5	rollieren	75,20
Probe 3	5	rollieren	98,70
Probe 4	Rückstellprobe		
Probe 5	4	misch+roll	51,70
Probe 6	4,5	misch+roll	75,20
Probe 7	5	misch+roll	98,70
Probe 8	Rückstellprobe		
SV 23-15			
	Sollfeuchte [%/kg feucht]	Granulation	Benötigte Wassermenge [g]
Probe 1	4	rollieren	50,29
Probe 2	4,5	rollieren	73,79
Probe 3	5	rollieren	97,29
Probe 4	Rückstellprobe		
Probe 5	4	misch+roll	50,29
Probe 6	4,5	misch+roll	73,79
Probe 7	5	misch+roll	97,29
Probe 8	Rückstellprobe		

Nachdem die benötigte Wassermenge für das Einstellen der Mischgutfeuchte berechnet war, konnte mit dem Granulationsvorgang begonnen werden. Wie schon erwähnt, wurden dafür eine Rolliertrommel und ein Intensivmischer verwendet. Der Vorteil der Verwendung eines Intensivmischers ist, dass sich das Wasser in der Mischung besser verteilt. In die

Rolliertrommel wurde die Wassermenge mit Hilfe einer Sprühflasche, zur gleichmäßigen Verteilung, eingebracht.

Die Rolliertrommel hat einen Durchmesser von 32 cm und eine Tiefe von 34,5 cm. Innen ist sie mit Schaufeln an der Wand bestückt. Sie läuft mit 25 Umdrehungen pro Minute und ist in einem Winkel von 30° nach oben gerichtet.



Abbildung 5-3: Rolliertrommel.

Der Topf des Intensivmischers hat einen Durchmesser von 22 cm, eine Tiefe von 17 cm und bewegt sich mit 50 Umdrehungen pro Minute. Die Welle des Mischers läuft mit 215 Umdrehungen pro Minute und dreht sich entgegen der Richtung des Topfes. An ihr befinden sich 5 Mischwerkzeuge mit jeweils anderen Durchmessern. Die Durchmesser von oben bis unten sind: 14 cm, 12,5 cm, 12 cm, 12,5 cm und 11 cm. Damit sich an der Wand keine Anpackungen bilden, ist an der Seite eine statische Schaufel angebracht, die den Feststoff an der Wand kontinuierlich abstreift.



Abbildung 5-4: Intensivmischer.

Im Anschluss an die Granulation einer Probe wurde ein Teil (ca. 100 g) für die Bestimmung der Mischgutfeuchte, mittels thermogravimetrischen Verfahren, abgewogen und für mehrere Stunden in den Trockenschrank (105 °C) gegeben. Der Rest wurde für den Kaltpermeabilitätsversuch verwendet (**Kapitel 5.4**). Nachdem die Probe getrocknet war, wurde sie abgewogen und die Mischgutfeuchte nach **Glg. 5-1** bestimmt. Das getrocknete Gut wurde anschließend für die Bestimmung der Korngrößenverteilung benötigt (**Kapitel 5.3**). Da die Mischgutfeuchten bei fast allen Proben nicht den Sollfeuchten entsprachen, wurden auch die Proben 4 und 8 der Mischungen granuliert und an diesen versucht, die Sollfeuchte einzustellen. Die Proben 4 der Mischungen SV 4-15 und SV 10-15 wurden rolliert, die restlichen Proben (Probe 4 von SV 23-15 und die Proben 8 von SV 4-15, SV 10-15 und SV 23-15) wurden zuerst gemischt und dann rolliert. Eine Sollfeuchte von 5 %/kg Feuchte wurde nie erreicht. Die Werte der tatsächlich eingestellten Feuchte liegen im Bereich 3 – 4,8 %/kg Feuchte. Für die Untersuchung der Mischungen im Rahmen dieser Arbeit war es nicht das Ziel, dass die Sollfeuchten 4%, 4,5% und 5% genau eingestellt werden mussten. Wichtig war, dass die Mischungen bei unterschiedlichen Feuchtegehalten, untersucht wurden, um zu sehen welchen Einfluss der Feuchtegehalt auf die Korngrößenverteilung und Durchgasbarkeit der Sintereinsatzmischungen hat.

Tabelle 5-IV: Tatsächlich eingestellte Mischgutfeuchte.

SV 4-15							
Tatsächlich eingestellte Feuchte [%/kg feucht]							
Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8
3,56	3,96	4,13	4,63	2,98	3,74	4	4,56
Sollfeuchte [%/kg feucht]							
4	4,5	5	-	4	4,5	5	-
SV 10-15							
Tatsächlich eingestellte Feuchte [%/kg feucht]							
Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8
3,98	3,85	4,59	3,46	3,82	4,06	4,48	1,6
Sollfeuchte [%/kg feucht]							
4	4,5	5	-	4	4,5	5	-
SV 23-15							
Tatsächlich eingestellte Feuchte [%/kg feucht]							
Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8
3,45	3,85	4,74	3,93	3,53	3,37	4,32	4,05
Sollfeuchte [%/kg feucht]							
4	4,5	5	-	4	4,5	5	-

5.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung und des harmonischen Durchmessers

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte mit dem HAVER CPA-Messgerät. Dieses Gerät vermisst mit einer CCD-Kamera die freifallenden Partikeln und berechnet daraus die volumenbezogene Summenhäufigkeitsverteilung (Beschreibung in **Kapitel 3.1.4.3**). Für die Durchführung der Korngrößenanalyse der granulierten Mischungen wurde das Material über einen Trichter in die Dosierrinne des Gerätes aufgebracht. Diese Rinne vibriert und befördert so das Gut zur CCD-Kamera. Am Ende der Dosierrinne fällt das Material in einen Auffangbehälter. Während des Falles werden die Partikel von der Kamera gefilmt. Das Vibrieren der Dosierrinne hat neben der Beförderung des Gutes auch einen weiteren Nutzen. Wenn das Mischgut aufgegeben wird, liegen die agglomerierten Partikeln eng beieinander. Für die CCD-Kamera ist es aber wichtig, dass die Partikeln beim Fall voneinander entfernt sind, damit beim Filmen keine Überlappungen der Partikeln auftreten und somit das Ergebnis verfälscht wird bzw. zu viele Partikeln verworfen werden müssen.

Durch die Vibration werden sie auf der Rinne am Weg zur Kamera voneinander getrennt und fallen über die Länge verteilt von der Rinne in den Auffangbehälter.

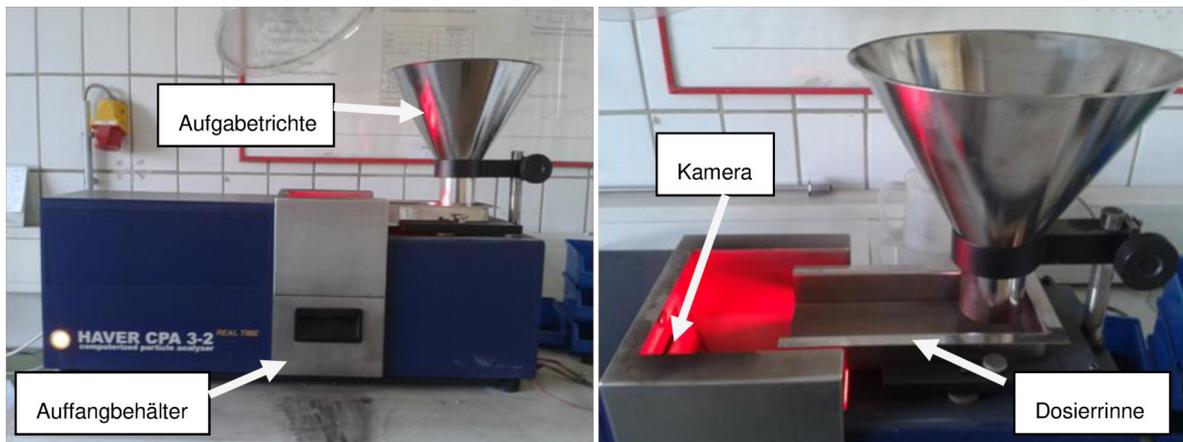


Abbildung 5-5: HAVER CPA-Messgerät.

Während des Falles der Partikeln zählt und vermisst das Gerät diese und teilt sie in sogenannte „Siebsätze“ ein, erstellt eine Summenhäufigkeitsverteilung und berechnet mehrere Größen, wie zum Beispiel die volumenspezifische Oberfläche oder einen Äquivalentdurchmesser. In **Abbildung 5-6** sind die ausgewerteten Daten für die Mischung SV 4-15 Probe 1:

HAVER & BOECKER	
	Mischgut-20151230-00001698.han
Dateiname	Mischgut-20151230-00001698.han
Start Messung	30.12.2015 07:57:14
Bezeichnung	E.NR.: 2939/15
Bemerkungen	SV 4-15_4%_Probe1_roll
Feuchte [M%]	3,56
Partikelanzahl (gesamt)	444494
d10 [mm]	0,393
d50 [mm]	1,888
d90 [mm]	5,14
Uniformity Index	4,8
Size Guide Number	188,8
Feinheitnummer	14,623
Spezifische Oberfläche [cm ² /cm ³]	64,807
Mittlere Zirkularität	0,869
Mittlere Symmetrie	0,814
Unsymmetrischer Anteil [%]	0
Symmetrie min.	
Symmetrie max.	

Mischgut-20151230-00001698.han		
x [mm]	Q ₃ [V%]	ΔQ ₃ [V%]
25	100	0
20	100	0
16	100	0
12,5	100	0
10	100	0
8	100	0
6,3	100	0
5	88,53	11,47
4	82,59	5,95
3,15	71,26	11,32
2,5	60	11,26
2	51,7	8,31
1	30,69	21,01
0,5	14,24	16,44
0,4	10,85	3,39
0,315	7,53	3,32
0,2	3,58	3,96
0,1	0,39	3,18
< 0,1		0,39

Abbildung 5-7: Ausgewertete Daten für die Mischung SV 4-15 Probe 1 mittels CPA-Messgerät.

Aus den Mengen der einzelnen Kornklassen und den Mittelwerten der Korngrößenklassen kann der harmonische Durchmesser nach **Glg. 3–12** berechnet werden. Beispielhaft wird im Folgenden die Berechnung des harmonischen Durchmessers mit den Daten von SV 4-15 Probe 1 (**Abbildung 5-7**) berechnet:

Tabelle 5-V: Berechnung des harmonischen Durchmessers.

SV 4-15 Probe 1				
Obere Kornfraktionengrenze [mm]	Untere Kornfraktionengrenze [mm]	Kornfraktion Mittelwert d_{mi} [mm]	ΔQ_i [Vol.-%]	$\Delta Q_i / d_{mi}$ [Vol.-%/mm]
25	20	22,5	0	0
20	16	18	0	0
16	12,5	14,25	0	0
12,5	10	11,25	0	0
10	8	9	0	0
8	6,3	7,15	0	0
6,3	5	5,65	11,47	2,03
5	4	4,5	5,95	1,32
4	3,15	3,575	11,32	3,17
3,15	2,5	2,825	11,26	3,99
2,5	2	2,25	8,31	3,69
2	1	1,5	21,01	14,01
1	0,5	0,75	16,44	21,92
0,5	0,4	0,45	3,39	7,53
0,4	0,315	0,3575	3,32	9,29
0,315	0,2	0,2575	3,96	15,38
0,2	0,1	0,15	3,18	21,2
0,1	0	0,05	0,39	7,8
Summe			100	111,32

Der harmonische Durchmesser für die Mischung SV 4-15 Probe 1 ist:

$$d_h = \frac{100}{111,32} = 0,898 \approx 0,90 \text{ mm} \quad (5-3)$$

Alle anderen harmonischen Durchmesser wurden nach demselben Schema berechnet.

Tabelle 5-VI: Ergebnisse für den harmonischen Durchmesser der Proben.

SV 4-15							
Harmonische Durchmesser d_h [mm]							
Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8
0,90	1,17	2,08	2,66	1,31	1,67	2,64	3,54
SV 10-15							
Harmonische Durchmesser d_h [mm]							
Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8
0,94	1,29	1,56	0,95	1,21	1,21	2,12	0,96
SV 23-15							
Harmonische Durchmesser d_h [mm]							
Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8
1,64	1,62	2,09	2,15	2,21	2,46	2,69	2,71

Um zu überprüfen, wie weit die Korngrößenanalyse mit dem CPA-Gerät von der einer Siebanalyse abweicht, wurden Versuche am Heimischen Erz, Kumba Feinerz und der Gießpfannenschlacke nach beiden Verfahren durchgeführt. Die Probenmengen für die Siebanalyse waren 1149,99 g vom Heimischen Erz, 589,7 g vom Kumba Feinerz und 655,82 g von der Gießpfannenschlacken. Ein Teil dieser Probe wurde anschließend zur Korngrößenanalyse mit dem CPA-Messgerät verwendet. Weiters wurde noch extra eine Probe der drei Materialien entnommen und auch mit dieser eine CPA-Analyse durchgeführt. Die Siebe der Siebmaschine hatten dieselben Maschenweiten, wie die Siebsätze der CPA-Analyse. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der beiden Analysen aufgetragen. Es ist zu sehen, dass Abweichungen existieren, besonders im größeren Kornbereich. Wie in **Kapitel 3.1.4.3** schon erwähnt wurde, liegt jedem Messverfahren eine bestimmte Größendefinition zur Charakterisierung der Korngröße zugrunde. Somit können unterschiedliche Messverfahren auch unterschiedliche Ergebnisse liefern. Die Abweichungen sind umso größer, je stärker die Materialform von der Form einer Kugel abweicht.

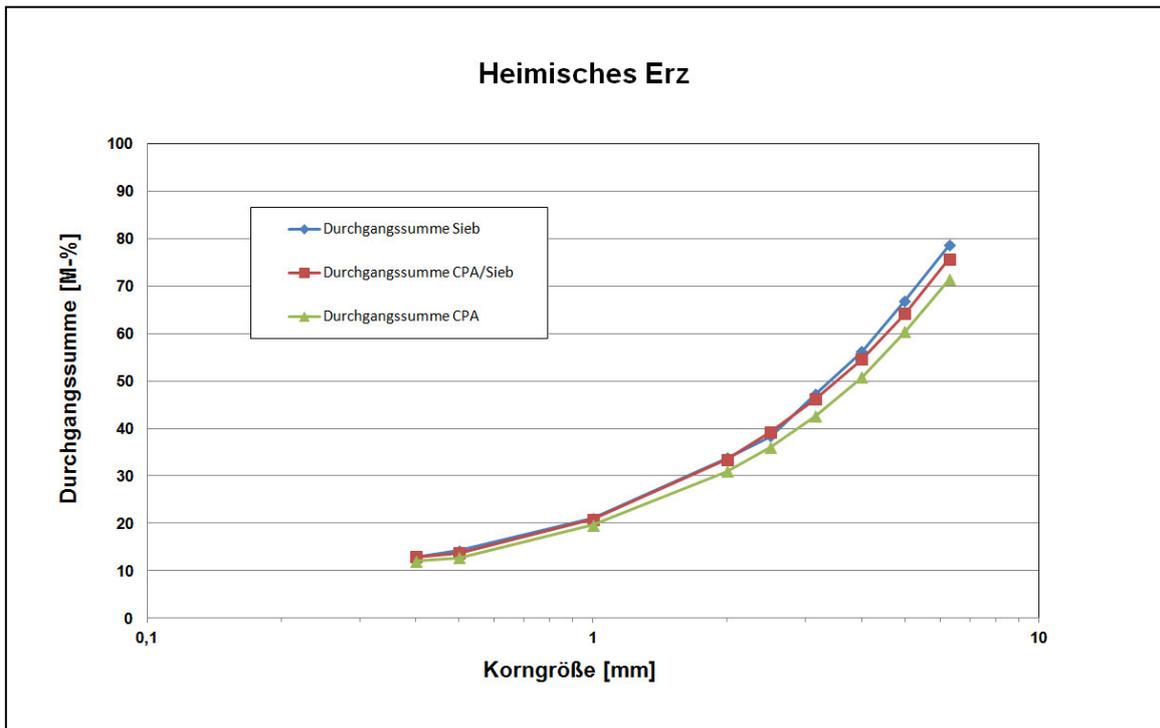


Abbildung 5-8: Vergleich der Sieb- und CPA-Analyse: Heimisches Erz.

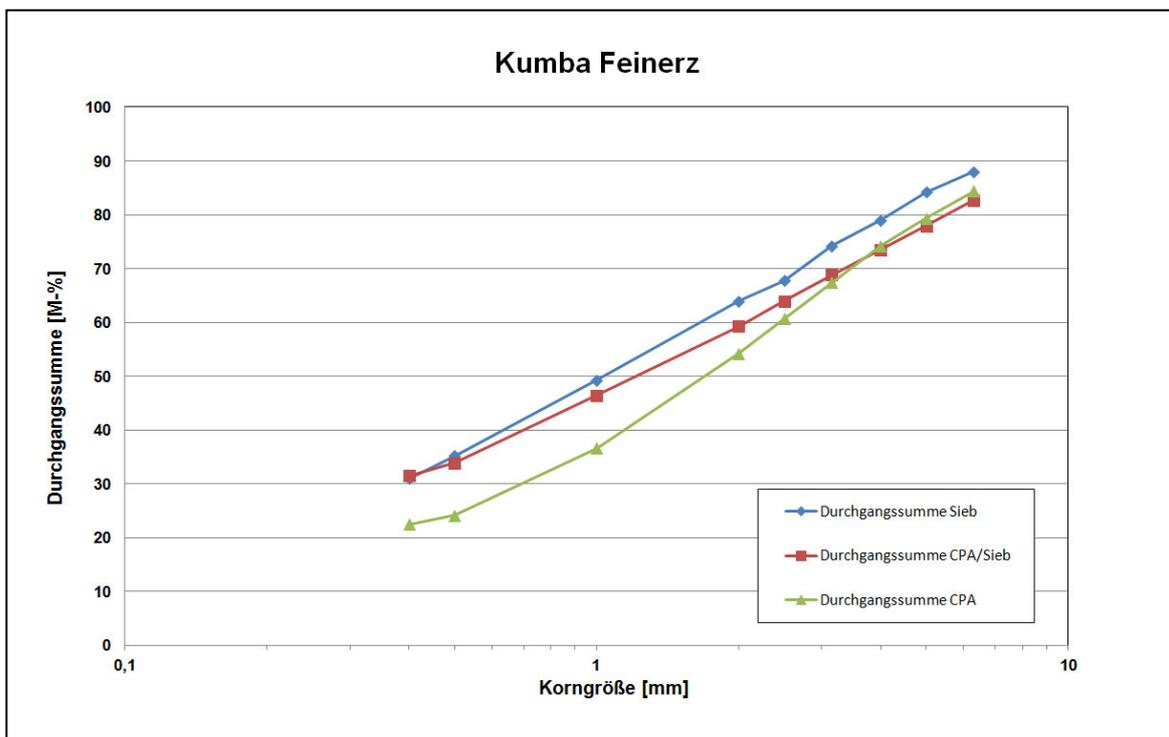


Abbildung 5-9: Vergleich der Sieb- und CPA-Analyse: Kumba Feinerz.

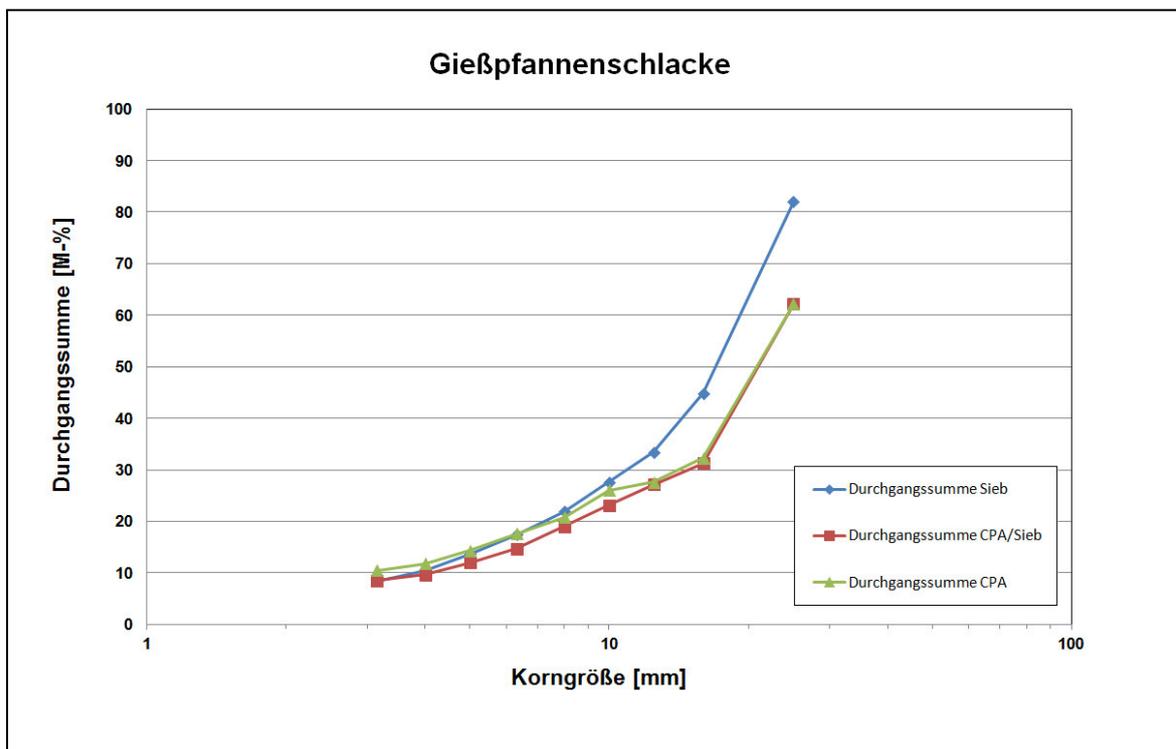


Abbildung 5-10: Vergleich der Sieb- und CPA-Analyse: Gießfannenschlacke.

5.4 Bestimmung des Druckverlustes über die Schüttungen

Die Bestimmung des Druckverlustes über die Sintereinsatzmischungen erfolgte mithilfe einer Permeabilitätsmessanlage (**Abbildung 5-11**). Die wichtigsten Elemente der Anlage sind: die zylindrische Probenretorte in der sich ein Lochsieb befindet, das Gebläse (Sauger), die Messblende (Messbereich 0 – 30 m³/Stunde), der Unterdruckmesser, der Auflaststempel (Lochplatte oben) und das Wegmesssystem. Die Probe wurde in die Retorte in der sich ein Lochsieb befindet eingewogen und die Apparatur eingebaut. Vor dem Versuch waren die Drehzahl des Gebläses und das Auflastgewicht (0 – 50 Newton) einzustellen. Durch die Einstellung des Gewichtes des Auflaststempels (ein Lochsieb) konnte die Schüttdichte während des Versuches verändert werden. Beim Start schaltete sich das Gebläse ein. Die Drehzahl des Gebläses wurde in 50 Sekunden (Dauer eines Versuches) von 10 Hertz auf 50 Hertz, und somit der Luftvolumenstrom, gesteigert. Das Wegmesssystem misst in mm wie weit der Auflaststempel von oben auf die Schüttung gedrückt wird. Dadurch kann anschließend die Höhe der Schüttung berechnet werden. Im Laufe des ganzen Versuches werden der Druckverlust über die Schüttung mit dem Unterdruckmesser und der Luftvolumenstrom mit der Messblende gemessen.

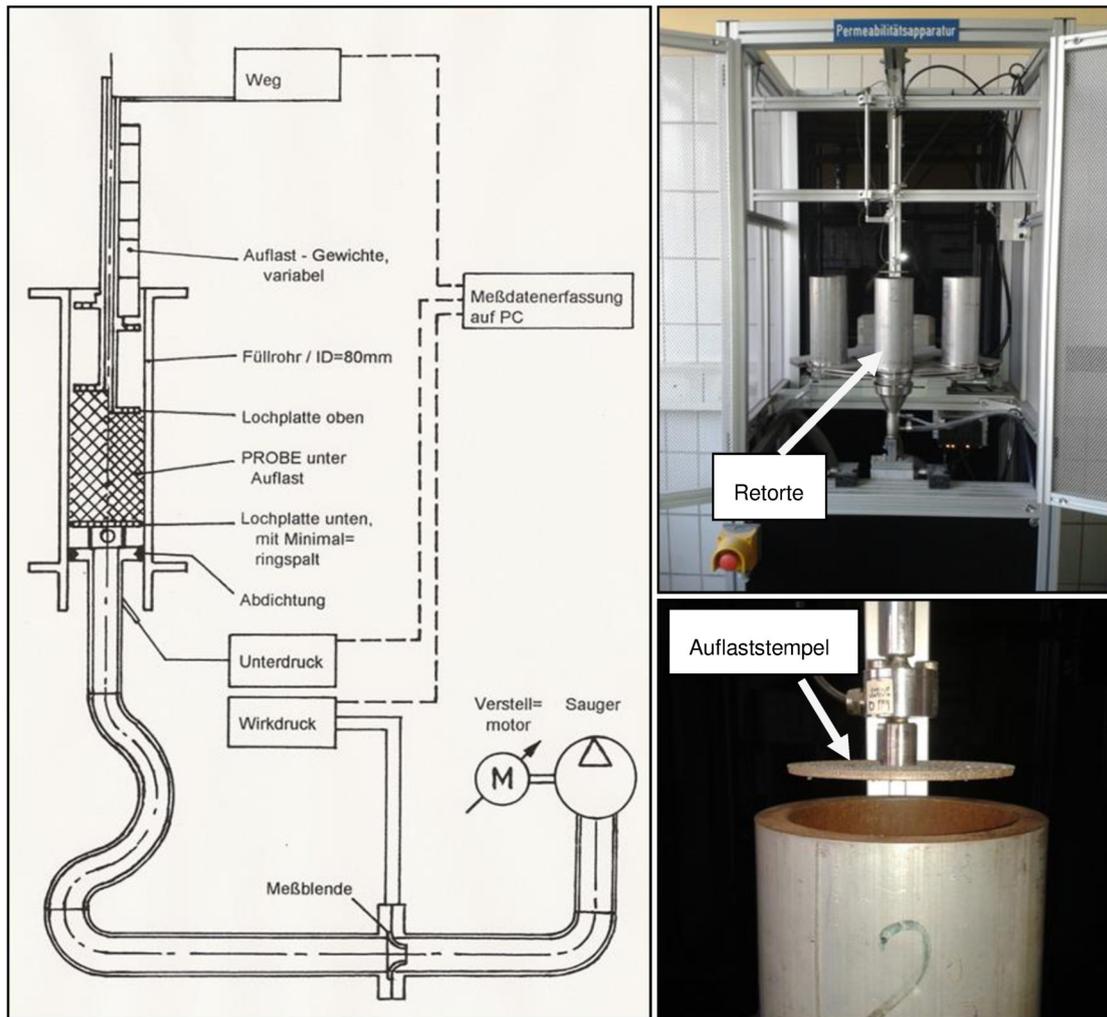


Abbildung 5-11: Permeabilitätsmessanlage.

Von jeder Probe wurden sechs Versuche in der Permeabilitätsmessanlage gemacht. Bei jedem Versuch wurde die Kraft des Auflaststempels gesteigert (0 N, 10 N, 20 N, 30 N, 40 N und 50 N) und unterschiedliche Schüttdichten eingestellt. Die 50 N sollen die Auflast des Eigengewichtes der Sintereinsatzmischung ganz unten in der Sintermischung am Sinterband simulieren. Die Schütthöhe am Sinterband ist 700 mm und die Schüttdichte ca. $1,44 \text{ g/cm}^3$. Bezogen auf die Querschnittsfläche der Retorte ($49,6 \text{ cm}^2$) ergibt dies die 50 Newton, und somit ein Eigengewicht von 5 kg. Es wurden 144 Versuche durchgeführt (3 Mischungen mit jeweils 8 Proben und für jede Probe 6 Versuche mit den unterschiedlichen Auflasten). Für jeden Versuch wurde ein Diagramm erstellt, in dem der Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Luftgeschwindigkeit aufgetragen ist. In **Abbildung 5-12** ist das Diagramm für die Mischung SV 4-15 Probe 3 dargestellt.

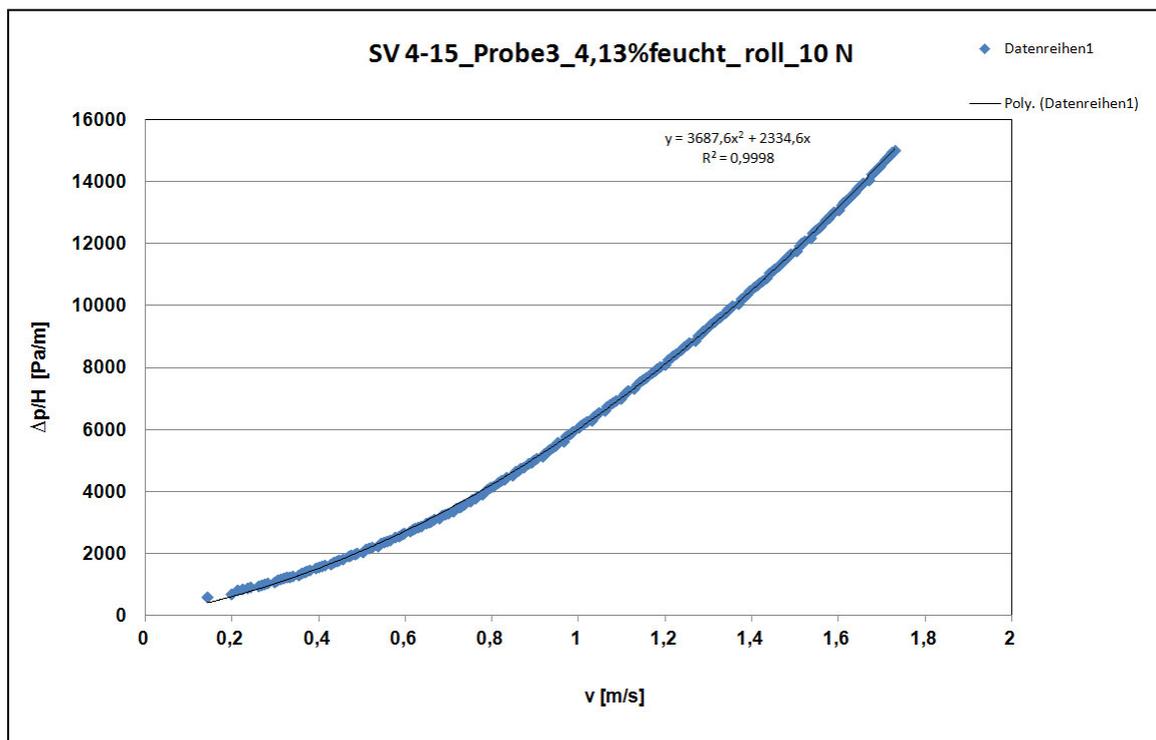


Abbildung 5-12: Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Luftgeschwindigkeit.

Die Kraft des Auflaststempels betrug 10 Newton. Die Höhe vom Lochsieb bis zum oberen Rand der Probenretorte beträgt 124 mm. Das Wegmesssystem hat bei dem im Diagramm dargestellten Versuch 4,185 mm aufgezeichnet. Das heißt der Weg vom oberen Rand der Retorte bis zum Auflaststempel, der auf die Schüttung drückt, betrug 4,185 mm. Mit diesen Daten konnte die Höhe des Schüttgutes berechnet werden:

$$H = \frac{124 - 4,185}{1000} = 0,119815 \text{ m} \approx 0,12 \text{ m} \quad (5-4)$$

Die Geschwindigkeit (Leerrohrgeschwindigkeit) wurde über den Luftvolumenstrom berechnet und auf den Querschnitt der Probenretorte bezogen. Der Querschnitt der Retorte beträgt $0,00496 \text{ m}^2$.

5.5 Bestimmung der Schüttdichte

Die Bestimmung der Schüttdichten der Sinterensatzmischungen erfolgte mit der Probenretorte der Permeabilitätsmessanlage, da das Volumen dieser bekannt ist. Die Schüttdichte errechnete sich aus der Masse des Schüttgutes, das in die Retorte eingewogen wurde, und aus dem bekannten Volumen des Messgefäßes (Retorte). Bei den Versuchen mit Auflasten (10 - 50 N) musste die Höhe des Gefäßes, um den vom Wegmesssystem aufgezeichneten Wert reduziert werden. Beispielhaft wird im Folgenden die Berechnung der Schüttdichte mit den Daten von SV 4-15 Probe 3 bei einer Auflast von 10 Newton berechnet. Die eingewogene Masse m_{Pr} betrug 1087,45 g. Das Wegmesssystem zeichnete einen Weg h von 4,185 mm auf. Der Querschnitt der Retorte A_R beträgt $49,6 \text{ cm}^2$ und die Höhe H 124 mm.

$$\rho_{Sch} = \frac{m_{Pr}}{(H-h) \cdot A_R} = \frac{1087,45}{(124 - 0,4185) \cdot 49,6} = 1,83 \text{ g/cm}^3 \quad (5-5)$$

Die Schüttdichten der anderen Proben wurden nach demselben Schema berechnet.

5.6 Bestimmung der Reindichte der Komponenten

Die Bestimmung der Reindichte der einzelnen Komponenten der Mischungen erfolgte mit einem Helium-Ultrapyknometer der Firma QuantaChrom. Die Messung beruht wie im **Kapitel 3.2.1.1** beschrieben auf dem Prinzip der Fluidverdrängung. Vor dem Beginn jeder Messreihe muss das Gerät mit den beiliegenden Stahlkugeln bekannten Volumens kalibriert werden. Das Helium-Ultrapyknometer misst das wahre Feststoffvolumen der Probe und berechnet über die zuvor eingegebene Masse die Reindichte. Bevor die Proben der einzelnen Komponenten in die Messzelle eingewogen wurden, mussten sie getrocknet und die größeren auf $< 0,5 \text{ mm}$ zerkleinert werden, da die Reindichte als reine Stoffeigenschaft von der chemischen Zusammensetzung und der Mineralphasenverteilungen (bei Erzen) der Körner in den einzelnen Kornbändern abhängig ist. Somit erhielt man durch die Zerkleinerung eine repräsentative Probe für die mittlere Dichte der Komponenten. Die Messzelle wurde dann mit einem Deckel verschlossen und in das Pyknometer eingebracht. Anschließend wurde das Pyknometer noch mit einem verschraubbaren Deckel sorgfältig abgedichtet. Vor Beginn der Messung wurden die Probe und die Messzelle mit Helium

gespült, um Fremdgase zu entfernen. Mit jeder Probe wurden 10 Messungen durchgeführt und dann automatisch der Mittelwert der gemessenen Volumina, die mittlere Dichte sowie die jeweilige Standardabweichung der Messung berechnet. Die Ergebnisse konnten anschließend über das EDV-Programm des Gerätes abgerufen werden.

Die Genauigkeit der Volumenbestimmung mit dem Helium-Pyknometer liegt bei $\pm 0,02\%$. Der Messbereich geht von 0 bis $19,99\text{ g/cm}^3$. Die Probenmasse wurde mit einer Präzisionswaage auf $0,001\text{ g}$ genau bestimmt. Das verwendete Helium als Spülgas hat eine hohe Reinheit (mind. $99,995\%$) und der Eingangsdruck des Gases beträgt $1,5\text{ bar}$.

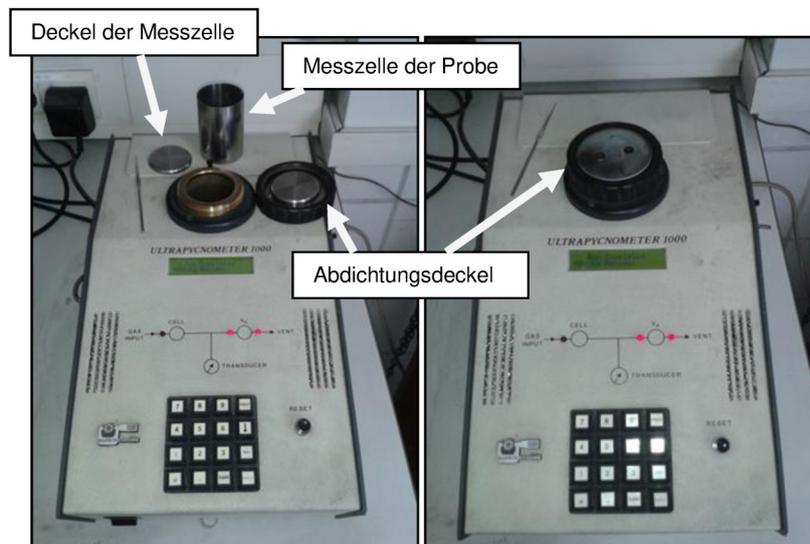


Abbildung 5-13: Helium-Ultrapyknometer.

Es ist wichtig, das Gerät im thermischen Gleichgewicht zu halten, da Temperaturänderungen beim Aus- und Einbauen der Messzelle beim Füll- und Wägevorgang einen Einfluss auf die Messung haben. Eventuelle Temperaturschwankungen werden durch eine ausreichend lange Spülzeit ausgeglichen.

Die Ergebnisse der mittleren Reindichten der einzelnen Komponenten sind in **Tabelle 5-VII** eingetragen:

Tabelle 5-VII: Reindichten der Komponenten.

Komponenten	Mittlere Reindichten [g/cm ³]
Heimisches Erz	3,55
Assmang Feinerz	4,89
Yuzhny Konzentrat	4,86
SNIM GMAB	4,83
Kumba Prem.	4,89
Carajas	4,83
Zaporoshjer	4,57
Rückgut HO A	4,31
Gichtstaub	3,05
Zunder	5,46
Feineisen SA	3,70
Feineisen KS	3,85
Feineisen SR	3,36
Gießhallenstaub	4,50
Möllergebäudestaub	4,50
Rückgut SA	4,11
Raumluftentstaubung	4,31
Kalkstaub Stahlwerk	3,29
Kalk Steyrling	2,76
Koks	1,95

5.7 Bestimmung der Rohdichte der Komponenten

Die Rohdichte der Körner zwischen + 6,3 mm und – 10 mm wurden mit der Aufhängemethode (Beschreibung im **Kapitel 3.2.2.2**) ermittelt. Als Messfluid wurde Wasser mit einer Temperatur von 24,8 °C verwendet. Die Dichte des Wassers bei dieser Temperatur lautet 0,99706 Mg/m³ (Dichtetabelle DIN EN 1097-6 Anhang D). Die Proben wurden vor der Versuchsdurchführung gereinigt, getrocknet und für mehrere Stunden in Wasser eingelegt, damit sich alle Poren vollständig mit Wasser füllen konnten. Anschließend mussten die wassergesättigten Körner an der Oberfläche mit einem Tuch abgetrocknet werden. Die Körner wurden dann in den Drahtkorb, der in einen Behälter mit Wasser eingehängt war, geleert. Der Behälter mit Wasser stand auf einer Waage. Somit konnte die Masse des durch die gesättigten Körner verdrängten Wassers bestimmt werden.



Abbildung 5-14: Aufhängemethode.

Die Probe wurde wieder aus dem Korb genommen und für mehrere Stunden in den Trockenschrank (105 °C) gegeben und nach der Trocknung abgewogen. Die Rohdichte der Probe konnte nach der **Glg. (3–18)** bestimmt werden. Für jede Probe wurden zwei Versuche durchgeführt und der Mittelwert gebildet. In **Tabelle 5-VIII** sind die Ergebnisse eingetragen:

Tabelle 5-VIII: Rohdichten der Komponenten.

Komponenten	Rohdichte [g/cm ³]
Heimisches Erz	3,52
Assmang Feinerz	4,66
Kumba Prem.	4,65
Carajas	3,96
Zaporoshjer	4,00
Rückgut HO A	4,02
Zunder	5,17
Feineisen SA	3,42
Feineisen KS	3,60
Feineisen SR	2,32
Rückgut SA	3,68
Kalk Steyrling	2,68
Koks	1,19

5.8 Bestimmung der Rohdichte der Sintereinsatzmischungen

Da man die Rohdichte eines agglomerierten Teilchens nicht direkt messen kann, mussten die Dichten der einzelnen Komponenten bestimmt werden. Aus den einzelnen bestimmten Dichten (inklusive der Dichte von Wasser) konnte dann eine mittlere Dichte für alle Mischungen berechnet werden.

Zuerst musste aber eine mittlere Rohdichte für jede Komponente einzeln bestimmt werden. Das geschah mit den in **Kapitel 5.6** und **Kapitel 5.7** ermittelten Rein- und Rohdichten und der Korngrößenverteilungen der Komponenten (mittels CPA-Messgerät). Die mit der Aufhängemethode gemessenen mittleren Dichten gelten nur für die Korngröße + 6,3 mm bis - 10 mm. Für die Korngröße + 0,1 mm bis - 6,3 mm wurde ein Mittelwert aus Rein- und Rohdichte gebildet und für die Korngröße - 0,1 mm wurde die Reindichte für die Berechnung verwendet. Man ging davon aus, dass mit abnehmender Korngröße auch die relative Anzahl der Poren abnimmt, und sich dadurch die Rohdichte an die Reindichte nähert. Wie aber im Rahmen der Diplomarbeit *„Systematische Untersuchung von physikalischen und fluiddynamischen Eigenschaften von Feineisenerzen zur Auslegung von Wirbelschichtsystemen,“* von Wall G. (**Kapitel 3.2.6**) gezeigt wurde, ist dieser Trend nicht immer ersichtlich, da bei polymineralischen Materialien (Erze) die Rohdichte stark von der Zusammensetzung in den Kornbändern abhängt. In **Abbildung 3-12** ist zu sehen, dass die Rohdichte der Erze Carajas und Kumba (Sishen) mit zunehmender Korngröße steigt. Dies wurde bei den Berechnungen auch berücksichtigt. Bei diesen beiden Erzen wurden für die Korngröße + 6,3 mm die Reindichten und für - 0,1 mm die Rohdichten zur Berechnung der mittleren Rohdichte verwendet. Beispielhaft wird die Berechnung für die mittlere Rohdichte der Komponenten am Heimischen Erz und Kumba Feinerz dargestellt:

Tabelle 5-IX: Korngrößenverteilung Heimisches Erz und Kumba zur Berechnung der Rohdichte.

Korngrößenverteilungen					
Obere Kornfraktionengrenze [mm]	Untere Kornfraktionengrenze [mm]	ΔQ_i [Vol.-%] Heim. Erz	$\sum \Delta Q_i$ [Vol.-%] Heim. Erz	ΔQ_i [Vol.-%] Kumba	$\sum \Delta Q_i$ [Vol.-%] Kumba
25	20	0		0	
20	16	0		0	
16	12,5	0		0	
12,5	10	2,62		0	
10	8	9,32		4,77	
8	6,3	16,12	28,06	10,31	15,08
6,3	5	13,51		17,11	
5	4	11,18		10,31	
4	3,15	9,71		14,88	
3,15	2,5	7,42		9,72	
2,5	2	7,26		8,86	
2	1	13,72		18,25	
1	0,5	5,64		4,59	
0,5	0,4	0,84		0,43	
0,4	0,315	0,82		0,32	
0,315	0,2	1,03		0,3	
0,2	0,1	0,74	71,87	0,14	84,91
0,1	0	0,07	0,07	0,01	0,01

Tabelle 5-X: Dichten von Heimischen Erz und Kumba zur Berechnung der Rohdichte.

	Rohdichte ρ_{Ro} [g/cm ³]	Reindichte ρ_{Re} [g/cm ³]	Mittelwert ρ_{MW} [g/cm ³]
Heim. Erz	3,52	3,55	3,535
Kumba	4,65	4,89	4,77

Zur Berechnung der mittleren Rohdichte wurde folgende Formel verwendet:

$$\rho_{mRo} = \frac{100}{\sum \Delta Q_i \cdot \frac{1}{\rho}} \quad (5-6)$$

Hier steht ρ für die verschiedenen Dichten: Rohdichte, Reindichte und Mittelwert aus beiden.

Bei der Berechnung der mittleren Rohdichte des heimischen Erzes wurde für die Korngröße + 6,3 mm die Rohdichte, - 0,1 mm die Reindichte und + 0,1 mm bis - 6,3 mm der Mittelwert verwendet:

$$\rho_{\text{heimErz}} = \frac{100}{28,06 * \frac{1}{3,52} + 71,87 * \frac{1}{3,535} + 0,07 * \frac{1}{3,55}} = 3,53 \text{ g/cm}^3 \quad (5-7)$$

Bei der Berechnung der mittleren Rohdichte des Kumba Feinerzes wurde für die Korngröße + 6,3 mm die Reindichte, - 0,1 mm die Rohdichte und + 0,1 mm bis - 6,3 mm der Mittelwert verwendet:

$$\rho_{\text{Kumba}} = \frac{100}{15,08 * \frac{1}{4,89} + 84,91 * \frac{1}{4,77} + 0,01 * \frac{1}{4,65}} = 4,79 \text{ g/cm}^3 \quad (5-8)$$

Für die Komponenten Yuzhny Konzentrat, SNIM GMAB, Gichtstaub, Gießhallenstaub, Möllergebäudestaub, Kalkstaub Stahlwerk und Raumluftentstaubung wurden die Reindichten zur Berechnung der mittleren Rohdichte der Mischungen verwendet, da die d_{90} Werte im Bereich von 50 μm liegen. In **Tabelle 5-XI** sind die Ergebnisse der mittleren Rohdichten aller Komponenten eingetragen:

Tabelle 5-XI: Mittlere Rohdichten der einzelnen Komponenten für die Berechnung der mittleren Rohdichten der Sintereinsatzmischungen.

Komponenten	Mittlere Rohdichte [g/cm ³]
Heimisches Erz	3,53
Assmang Feinerz	4,75
Yuzhny Konzentrat	4,86
SNIM GMAB	4,83
Kumba Prem.	4,79
Carajas	4,55
Zaporoshjer	4,18
Rückgut HO A	4,14
Gichtstaub	3,05
Zunder	5,28
Feineisen SA	3,48
Feineisen KS	3,71
Feineisen SR	2,72
Gießhallenstaub	4,50
Möllergebäudestaub	4,50
Rückgut SA	3,87
Raumluftentstaubung	4,31
Kalkstaub Stahlwerk	3,29
Kalk Steyrling	2,72
Koks	1,52

Über die mittleren Rohdichten der einzelnen Komponenten konnte die mittlere Rohdichte für alle 24 Sintereinsatzmischungen (mit unterschiedlichen Mischgutfeuchten) berechnet werden. Der Feuchtegehalt wurde dafür auf die Einheit %/kg trocken umgerechnet. Die Ermittlung der mittleren Rohdichte wird für die Mischung SV 4-15 Probe 1 gezeigt:

Diese Mischung hat einen Feuchtegehalt von 3,56 %/kg feucht. Die Umrechnung in %/kg trocken erfolgte nach **Glg. (5-9)**:

$$w_{H_2O,tr} = \frac{w_{H_2O,feucht}}{100 - w_{H_2O,feucht} * 100} = \frac{3,56}{100 - 3,56} * 100 = 3,69 \% \quad (5-9)$$

Tabelle 5-XII: Zusammensetzung der Mischung SV 4-15 Probe 1 und mittlere Rohdichten der Komponenten.

Zusammensetzung:	SV 4-15	
	Rohdichte [g/cm ³] ρ_{RO}	Massen % w_{Komp}
Heimisches Erz	3,53	42,29
Assmang Feinerz	-	0
Yuzhny Konzentrat	4,86	9,89
SNIM GMAB	4,83	0
Kumba Prem.	4,79	5,68
Carajas	4,55	5,33
Zaporoshjer	-	0
Rückgut HO A	4,14	0,37
Gichtstaub	3,05	1,67
Zunder	5,28	2,74
Feineisen SA	3,48	0,57
Feineisen KS	3,71	0,78
Feineisen SR	2,72	0,42
Gießhallenstaub	4,50	0,11
Möllergebäudestaub	4,50	0,11
Rückgut SA	3,87	17,91
Raumluftentstaubung	4,31	1,56
Kalkstaub Stahlwerk	3,29	0,04
Kalk Steyrling	2,72	8,08
Koks	1,52	2,45
Wasser	1,00	3,69
Summe	-	103,69

Die Berechnung für die mittlere Rohdichte der Mischung wurde mit der folgenden Gleichung getätigt:

$$\rho_{RO,SV\ 4-15\ Pr\ 1} = \frac{100 + w_{H_2O, trocken}}{\prod w_{Komp} \cdot \frac{1}{\rho_{RO}}} = \frac{103,69}{42,29 \cdot \frac{1}{3,53} + 9,89 \cdot \frac{1}{4,86} + \dots + 3,69 \cdot \frac{1}{1}} = 3,30\ g/cm^3 \quad (5-10)$$

Alle weiteren mittleren Rohdichten der Mischungen wurden nach derselben Gleichung bestimmt:

Tabelle 5-XIII: Mittlere Rohdichten und Feuchtegehalt (%/kg trocken) der Mischungen.

SV 4-15		
	Feuchtegehalt [%/kg trocken]	Mittlere Rohdichte [g/cm ³]
Probe 1	3,69	3,30
Probe 2	4,12	3,27
Probe 3	4,31	3,26
Probe 4	4,85	3,22
Probe 5	3,07	3,35
Probe 6	3,89	3,29
Probe 7	4,17	3,27
Probe 8	4,78	3,23
SV 10-15		
	Feuchtegehalt [%/kg trocken]	Mittlere Rohdichte [g/cm ³]
Probe 1	4,14	3,27
Probe 2	4,00	3,28
Probe 3	4,81	3,22
Probe 4	3,58	3,31
Probe 5	3,97	3,28
Probe 6	4,23	3,26
Probe 7	4,69	3,23
Probe 8	1,63	3,47
SV 23-15		
	Feuchtegehalt [%/kg trocken]	Mittlere Rohdichte [g/cm ³]
Probe 1	3,57	3,31
Probe 2	4,00	3,28
Probe 3	4,98	3,21
Probe 4	4,10	3,27
Probe 5	3,66	3,31
Probe 6	3,49	3,32
Probe 7	4,52	3,24
Probe 8	4,22	3,27

5.9 Bestimmung des Lückengrades

Die Bestimmung des Lückengrades erfolgte mit den ermittelten und berechneten Schüttdichten und Rohdichten der Mischungen. Für die Berechnung wurde **Glg. (3–5)** verwendet. Beispielhaft die Berechnung für die Schüttdichte der Mischung SV 4-15 Probe 3 bei einer Auflast von 10 Newton:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{Sch}}{\rho_{Ro}} = 1 - \frac{1,83}{3,27} = 0,44 \quad (5-11)$$

5.10 Bestimmung der Widerstandsbeiwerte

Mit den experimentell bestimmten Daten und der Ergungleichung konnten die Widerstandsbeiwerte der Mischungen berechnet werden. Die Druckverlustmessungen mit der Permeabilitätsanlage wurden von $Re > 3$ bis $Re < 800$ durchgeführt. Laut Literatur gilt die Ergungleichung gut im Reynoldszahlenbereich von 3 bis 10000. Der gemessene Druckverlust über die Höhe der Schüttung wurde für jede Teilprobe (unter unterschiedlichen Verdichtungen mit dem Auflaststempel) über die Gasgeschwindigkeit in einem Diagramm im Excel aufgetragen:

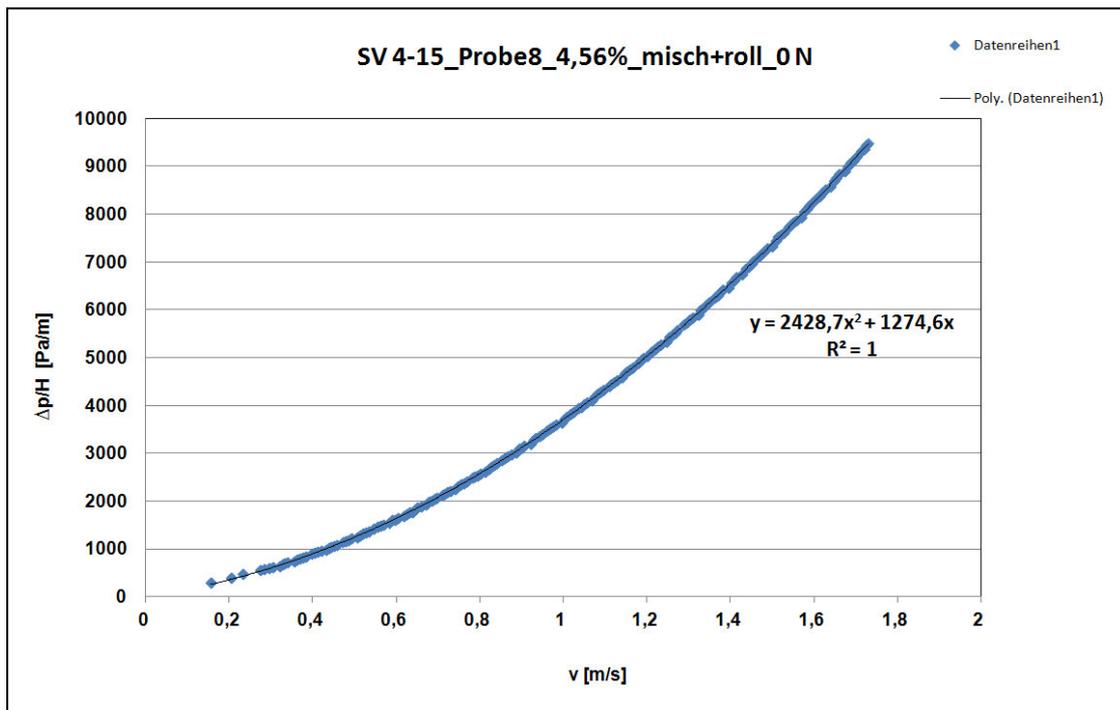


Abbildung 5-15: Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Luftgeschwindigkeit für Mischung SV 4-15 Probe 8 ohne Auflast.

Über die experimentelle Kurve wurde eine polynomische Trendlinie gelegt. Die Formel der polynomischen Trendlinien lautet:

$$y = Ax^2 + Bx \rightarrow \frac{\Delta p}{H} = Aw^2 + Bw \quad (5-12)$$

Wobei y der Druckverlust über die Schüttung und x die Leerrohrgeschwindigkeit darstellen. Aus den Konstanten A und B konnten die Widerstandsbeiwerte aus der Ergungleichung ermittelt werden:

$$\frac{\Delta p}{H} = b \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta * w}{\varepsilon^3 d_h^2} + a \frac{(1-\varepsilon) \rho * w^2}{\varepsilon^3 d_h} \quad (5-13)$$

Die Formel für die Konstante A lautet:

$$A = a \frac{(1-\varepsilon) * \rho}{\varepsilon^3 * d_h} \quad (5-14)$$

Und die Formel für B ist:

$$B = b \frac{(1-\varepsilon)^2 * \eta}{\varepsilon^3 * d_h^2} \quad (5-15)$$

Für die Mischung in **Abbildung 5-15** ergaben sich mit diesen Formeln folgende Widerstandsbeiwerte für die turbulente und laminare Strömung:

Tabelle 5-XIV: Daten der Mischung SV 4-15 Probe 8 (0 Newton) und der Luft für die Berechnung der Widerstandsbeiwerte.

A	B	ε	d_h [m]	$\rho_{\text{Luft}} (25 \text{ °C})$ [kg/m ³]	$\eta_{\text{Luft}} (25 \text{ °C})$ [Pas]
2428,7	1274,6	0,46	0,00354	1,1839	0,0000182

$$a = A \frac{\varepsilon^3 * d_h}{(1-\varepsilon)*\rho} = 2428,7 \frac{0,46^3 * 0,00354}{(1-0,46)*1,1839} \approx 1,30 \quad (5-16)$$

$$b = B \frac{\varepsilon^3 * d_h^2}{(1-\varepsilon)^2 * \eta} = 1274,6 \frac{0,46^3 * 0,00354^2}{(1-0,46)^2 * 0,0000182} \approx 293 \quad (5-17)$$

Alle anderen Widerstandsbeiwerte wurden mit denselben Gleichungen berechnet.

6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse, die nach **Kapitel 5** ermittelt worden sind, besprochen und daraus eine Schlussfolgerung gezogen.

6.1 Bestimmung der Mischgutfeuchte

Wie in **Tabelle 5-IV** zu sehen ist, wurden die Sollfeuchten mit den berechneten Wassermengen fast nie erreicht. Das liegt daran, dass ein Teil der Feuchtigkeit an der Wand des Mixers und der Rolliertrommel haften geblieben ist und das Wasser teilweise verdunstet ist. Ein weiterer Grund kann sein, dass der Branntkalk, der sich in den Kreislaufstoffen, wie Raumluftentstaubung oder Rückgut SA, befindet, das Wasser gebunden hat. Auffallend sind speziell die Proben 1 und 5 von der Mischung SV 4-15 und die Probe 8 der Mischung SV 10-15. Der Durchschnittsfeuchtegehalt der Mischungen, der vor der Granulation bestimmt wurde, beträgt 3,62 %/kg feucht bzw. 2,90 %/kg feucht. Nach der Granulation (und Wasserzugabe) liegt der tatsächlich eingestellte Feuchtegehalt dieser Proben aber unter diesem Wert (3,56 % und 2,98% sowie 1,6 %). Die Probe 8 der Mischung SV 10-15 wurde verworfen, da der Feuchtegehalt zu stark vom Sollwert abweicht.

6.2 Granulation und Auswirkungen auf die Korngrößenverteilung und den harmonischen Durchmesser

Es ist zu sehen, dass die Proben der Mischung SV 10-15 kleinere harmonische Durchmesser, trotz oftmals höheren oder gleichen Feuchtegehalt, aufweisen, als die Proben der Mischungen SV 4-15 und SV 23-15. Das liegt daran, dass die Mischung SV 10-15 die feinste ist und die Mischungen SV 4-15 und SV 23-15 eine sehr ähnliche Korngrößenverteilung besitzen. Die Korngrößenverteilungen der drei Mischungen sind in **Abbildung 6-1** aufgetragen. Der Medianwert d_{50} der drei Mischungen beträgt: $d_{50\text{ SV4-15}} = 2,528\text{ mm}$, $d_{50\text{ SV10-15}} = 0,933\text{ mm}$ und $d_{50\text{ SV23-15}} = 2,325\text{ mm}$.

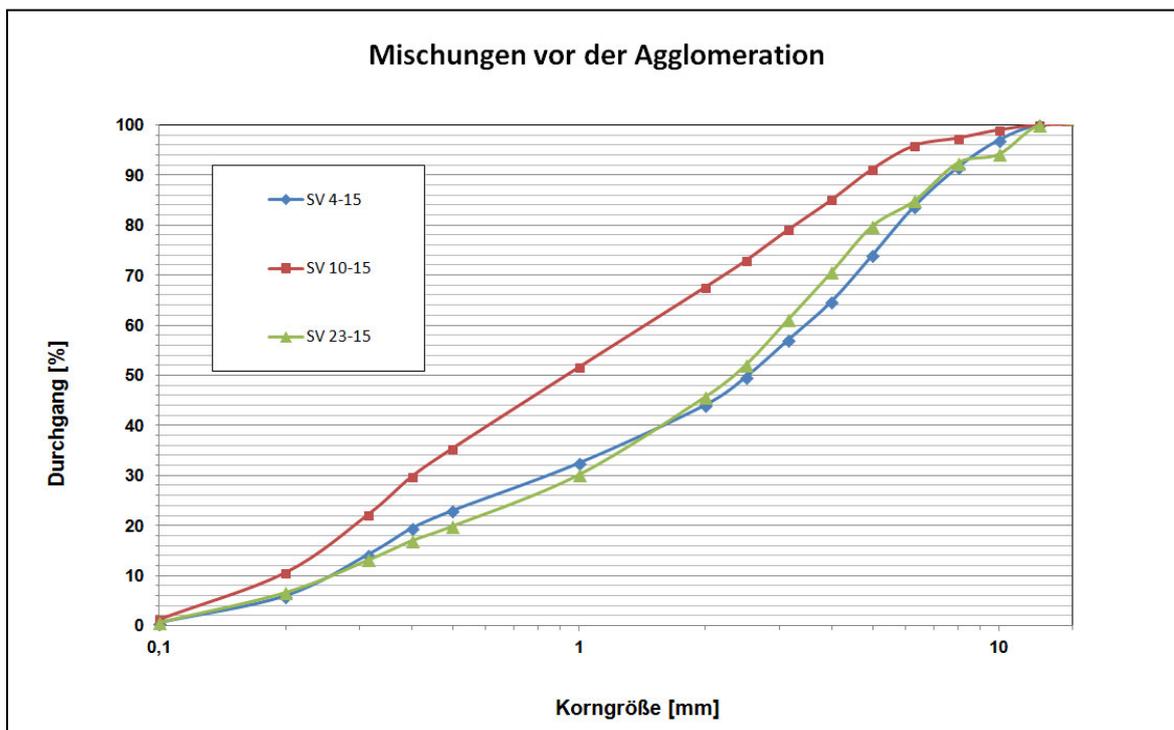


Abbildung 6-1: Korngrößenverteilungen der Mischungen vor der Agglomeration.

Wie schon im **Kapitel 2.5.1** besprochen, ist das Ziel beim Granulieren die feineren Partikeln an die grobkörnigen (Partikelkerne) anzuhafte, um Quasi-Partikel (größere Granulate) zu formen. Welche Partikelgröße die Kerne, die Zwischenpartikel oder die anhaftende Schicht bilden, definieren viele Autoren unterschiedlich. In **Abbildung 6-2** sind

die Summenverteilungen der Mischung SV 4-15 vor der Granulation und die Proben 5 – 8 (gemischt und rolliert) dieser Mischung aufgetragen.

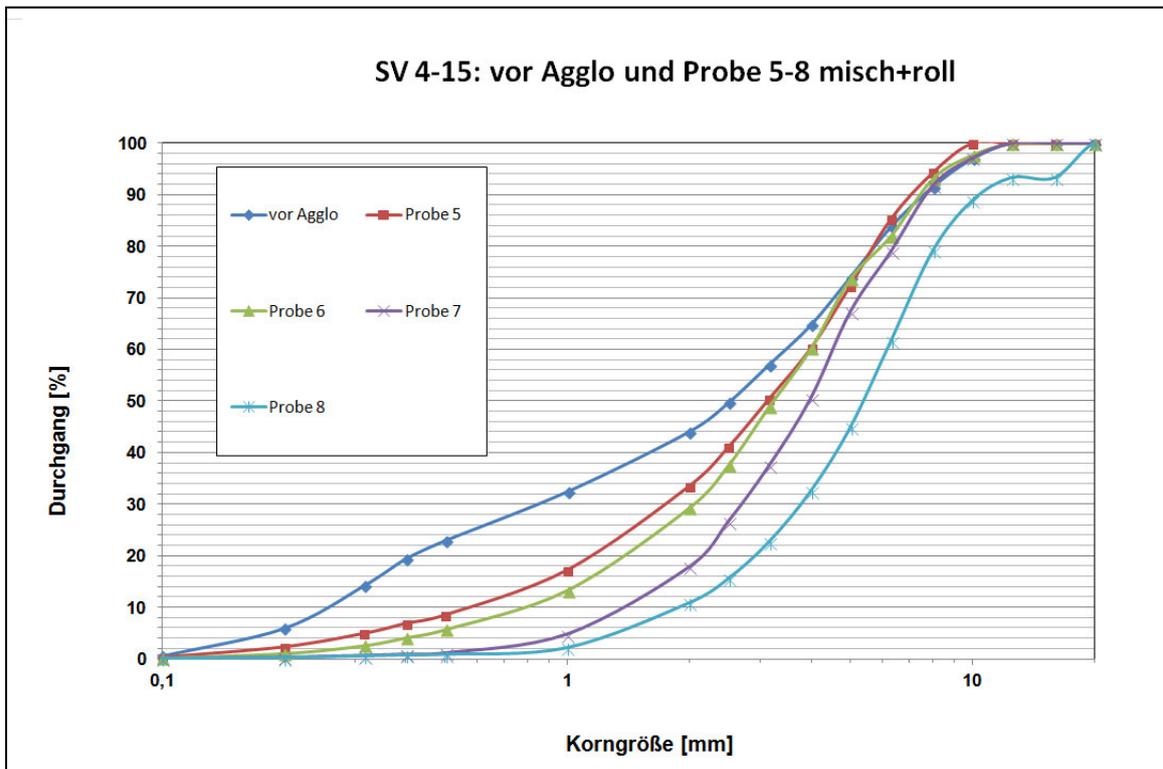


Abbildung 6-2: Korngrößenverteilung der Mischung SV 4-15 vor und nach der Agglomeration (Proben 5 – 8).

Hier ist zu sehen, dass die Partikeln + 2 mm der Mischung vor der Agglomeration die Kernpartikeln bilden und die groben Partikeln (+ 5 mm) der Ausgangsmischung kaum noch durch die Agglomeration vergrößert werden konnten. Anhand dieser Abbildung ist auch gut zu schildern, wie sich die Mischgutfeuchte auf die Granulation auswirkt: je höher der Feuchtegehalt (bis zum optimalen Wert) ist, umso gröbere Quasi-Partikel bilden sich und damit steigt der harmonische Durchmesser. Bei der Probe 8, mit einer Mischgutfeuchte von 4,56 %/kg feucht, konnten sich sogar an den Partikeln + 5 mm feine Partikeln anhaften und weitere Quasi-Partikel gebildet werden. Die Korngrößenverteilungen der Proben der Mischung SV 23-15 weisen einen ähnlichen Verlauf auf.

Einen zum Teil anderen Verlauf zeigt sich bei der Mischung 10-15. Sie weist prozentuell weniger grobe Partikeln, als die anderen beiden Mischungen, auf. Das ist durch den Vergleich des Medianwertes d_{50} der Verteilungen der drei Mischungen vor der Agglomeration

zu sehen. Somit konnten auch die größeren Partikeln dieser Mischung durch den Granulationsvorgang deutlich vergrößert werden (**Abbildung 6-3**).

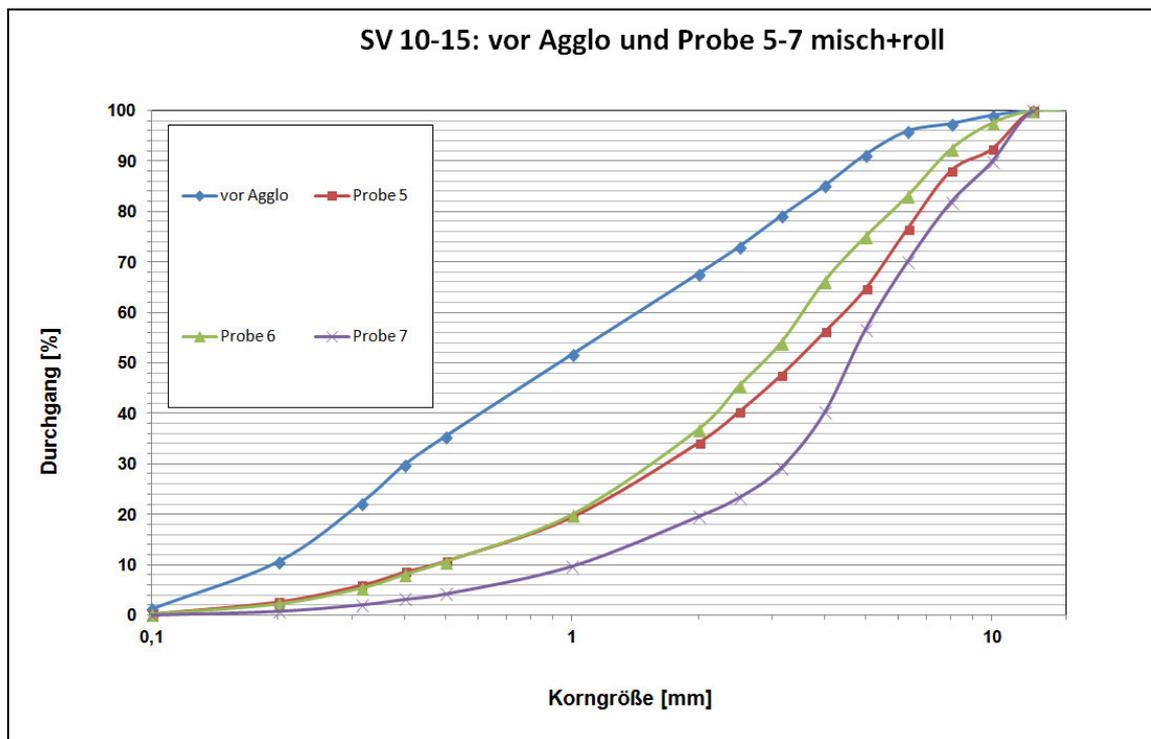


Abbildung 6-3: Korngrößenverteilung der Mischung SV 10-15 vor und nach der Agglomeration.

Die Mischung 10-15 vor der Agglomeration weist auch einen großen Anteil an Zwischenpartikeln im Vergleich zu den anderen beiden Mischungen auf. Der prozentuelle Anteil (M.-%) der Partikeln - 1 mm und + 0,1 mm der Mischung SV 10-15 vor der Agglomeration macht 50,42 % aus. Bei den Mischungen SV 4-15 und 23-15 sind es 31,88 % und 29,5 %, also deutlich geringer. Der Anteil dieser Partikeln sollte aber so klein als möglich gehalten werden, da die Zwischenpartikeln die Durchgasbarkeit negativ beeinflussen: Wenn diese Partikeln als Kern fungieren, werden in Summe mehr kleinere Quasi-Partikeln gebildet (kleinere harmonische Durchmesser) und die Permeabilität dadurch verschlechtert. Als Partikeln für die Schicht haften sie zu schlecht am Kern und lösen sich leicht während des Trockenvorganges, wobei es wieder zur Verschlechterung der Permeabilität kommt.

Einen Unterschied zwischen den Korngrößenverteilungen der Proben sieht man auch anhand der unterschiedlichen Granulationsprozesse: nur rollieren (**Abbildung 6-4**) oder zuerst intensiv mischen und anschließend rollieren (**Abbildung 6-5**).

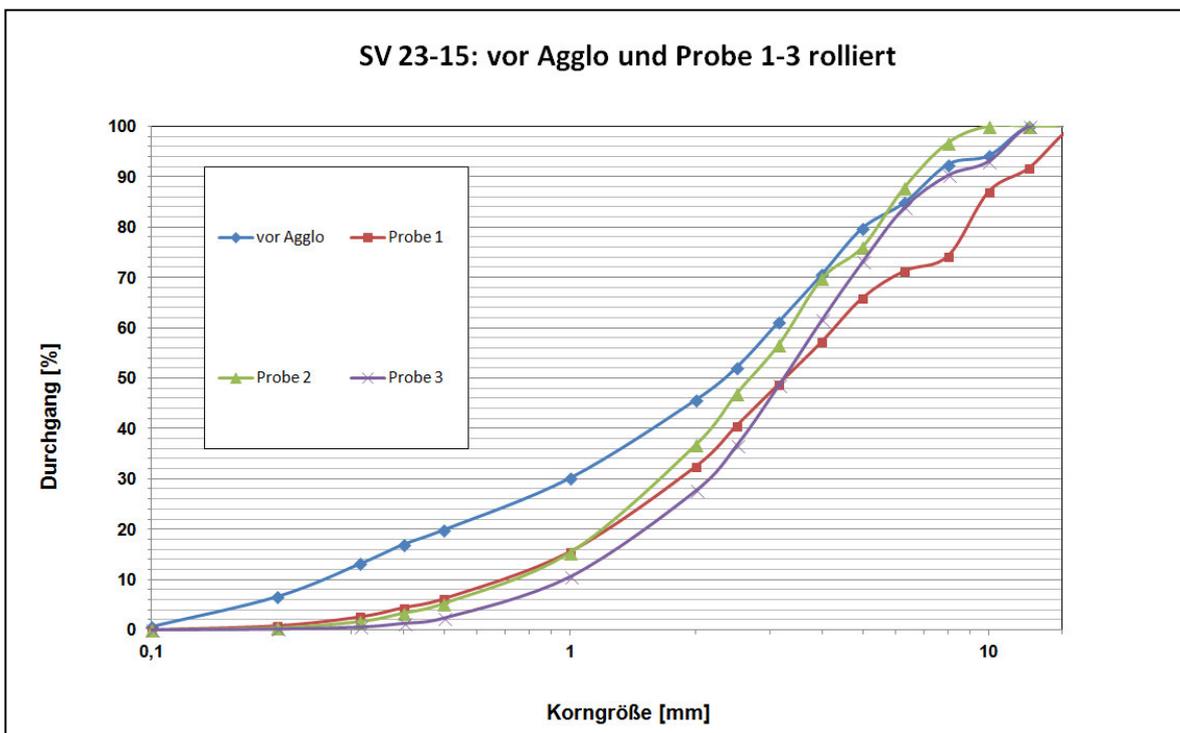


Abbildung 6-4: Korngrößenverteilung der Mischung SV 23-15 vor und nach der Agglomeration (rolliert).

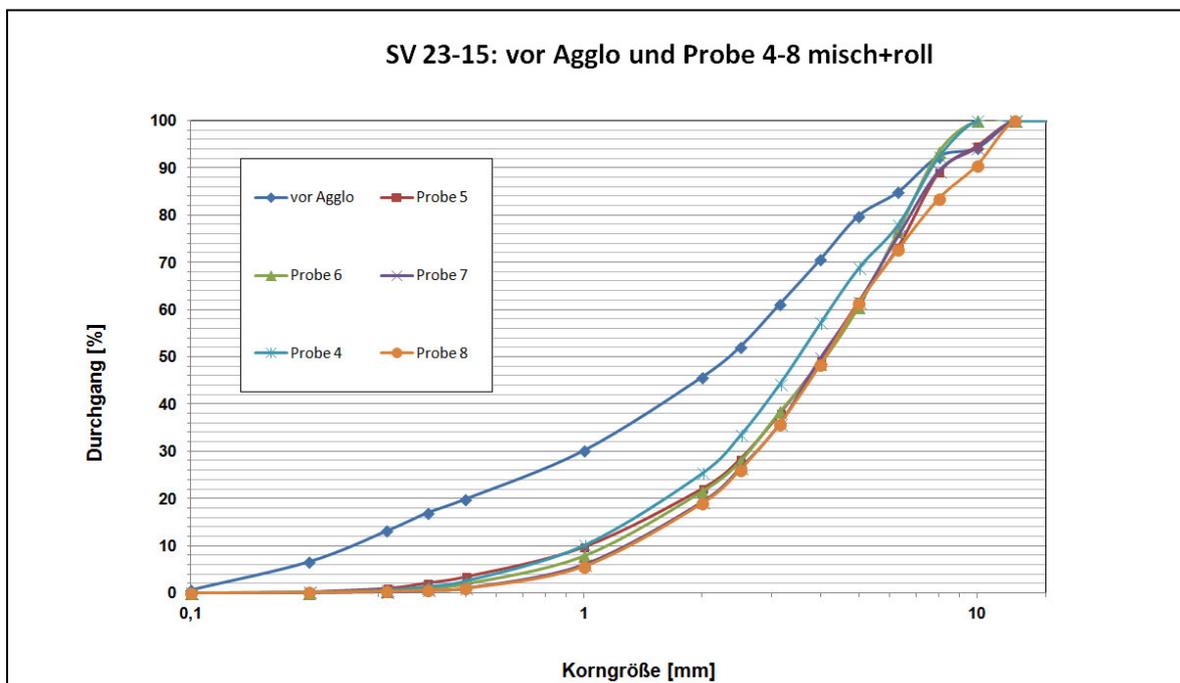


Abbildung 6-5: Korngrößenverteilung der Mischung SV 23-15 vor und nach der Agglomeration (gemischt und rolliert).

Wenn die Mischungen zuerst im Intensivmischer gemischt werden, bilden sich insgesamt größere Quasi-Partikel und die Schüttungen (Proben) sind insgesamt gröber, da sich das Wasser (Bindemittel), schon vor der Rolliertrommel, gleichmäßig verteilen kann und sich die feineren Partikeln besser an die gröberen Körner binden können. Durch diese gleichmäßige Verteilung des Wassers in der Mischung ist die Schüttung auch meist bei einem geringeren Feuchtegehalt, als wenn nur rolliert wird, gröber. Die Probe 3 hat einen Feuchtegehalt von 4,74 %/kg feucht, während die Probe 4 nur einen Feuchtegehalt von 3,93 %/kg feucht aufweist. Trotzdem ist die Probe 4 die gröbere Schüttung mit einem $d_{50} = 3,5$ mm. Probe 4 hat einen d_{50} von 3,2 mm.

In **Abbildung 6-6** sind die harmonischen Durchmesser der Proben 1 – 8 der Mischung SV 4-15 über den Feuchtegehalt aufgetragen. Hier sieht man gut, welchen Einfluss die Feuchte und die Granulationsart auf den harmonischen Durchmesser haben:

- je höher der Feuchtegehalt (bis zu einem optimalen Gehalt), umso größer ist der harmonische Durchmesser
- wenn vor dem Rollieren die Mischung gemischt wird, und sich das Wasser gleichmäßig verteilen kann, ist der harmonische Durchmesser größer
- auch bei gleichem oder geringerem Feuchtegehalt ist der harmonische Durchmesser größer, wenn vor dem Rollieren die Mischung in einem Intensivmischer gemischt wird

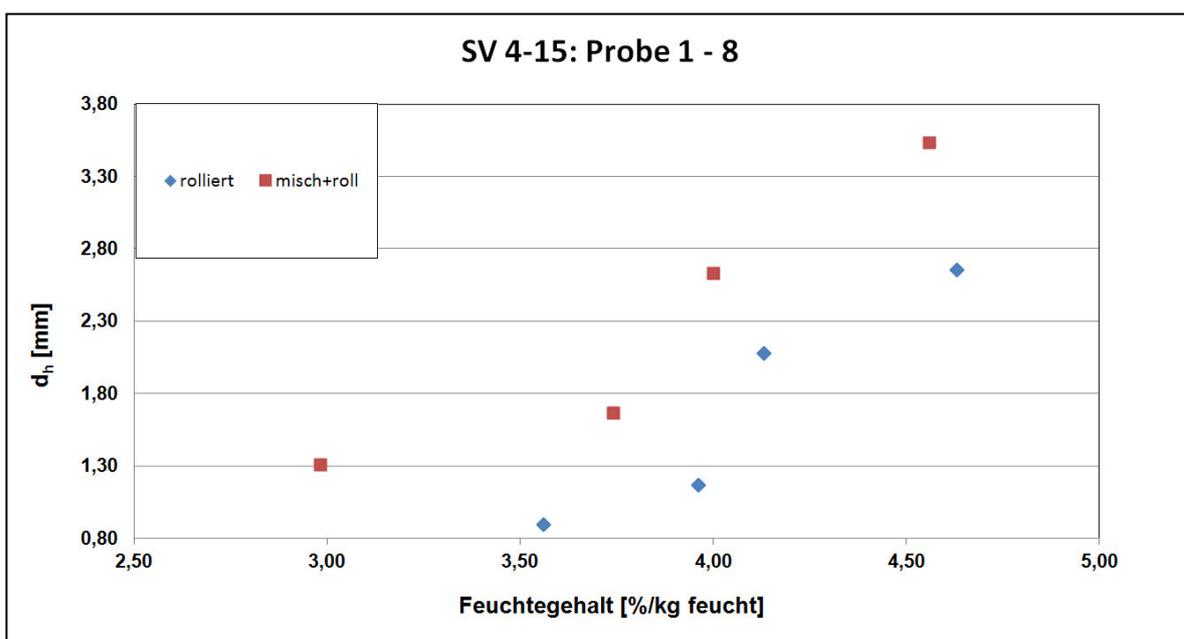


Abbildung 6-6: Harmonischer Durchmesser über dem Feuchtegehalt (SV 4-15 Probe 1 - 8).

In **Abbildung 6-7** sind die harmonischen Durchmesser aller Mischungen und Proben über dem Feuchtegehalt aufgetragen

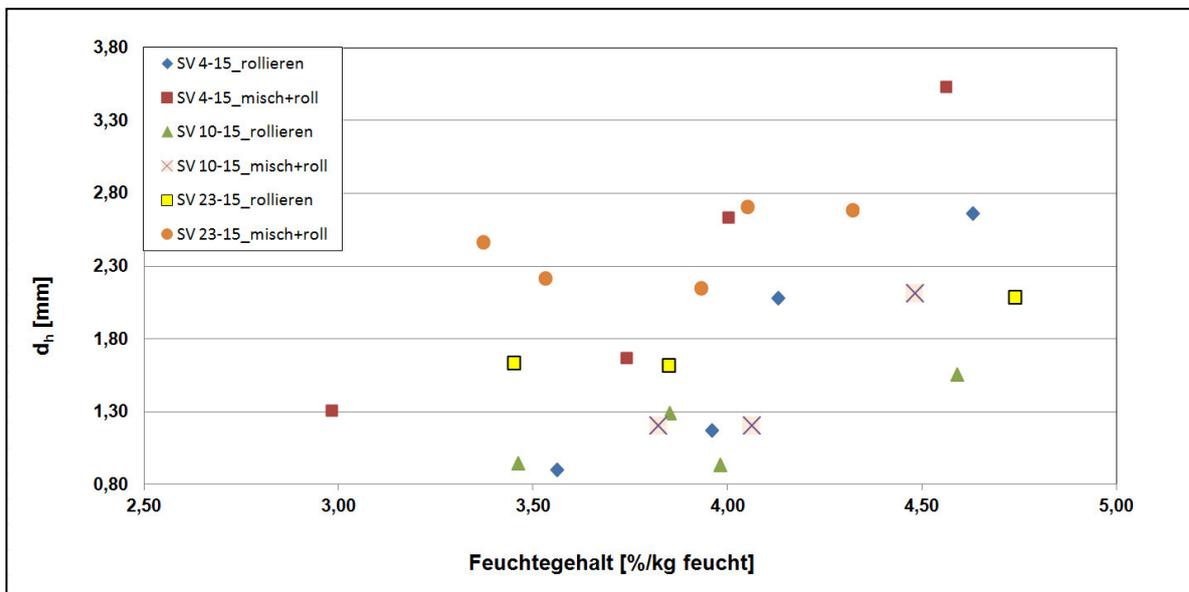


Abbildung 6-7: Harmonischer Durchmesser über dem Feuchtegehalt (alle).

6.3 Schüttdichte

Die Schüttdichte wurde mithilfe der Probenretorte (Zylinder) der Permeabilitätsmessanlage bestimmt. Die Proben mussten zur Ermittlung der Schüttdichte in den Zylinder eingewogen werden. Beim Einwiegen gibt es mehrere Fehlerquellen. Die Proben wurden mit einer kleinen Schaufel aus dem Behälter, in der sich die Proben befanden, genommen und anschließend in die Retorte eingebracht. Dadurch wurden einige Agglomerate (Quasi-Partikel) zerkleinert bzw. zerstört. Weiters wurden die Schüttungen schon beim Einwiegen, obwohl die Proben vorsichtig in die Retorte eingebracht wurden, leicht vorverdichtet. Die überschüssigen Partikeln der Proben, die über den Zylinder hinausragten, wurden mit einer Metallleiste abgestreift. Auch dabei konnte es, zu einer Verdichtung und somit Verfälschung der eigentlichen Schüttdichte kommen. Beim Einbauen der Retorte in die Permeabilitätsmessanlagen kam es durch leichte Rüttelbewegungen zu einer weiteren Verdichtung.

Die einzelnen Proben wurden bei der Druckverlustmessung (Permeabilitätsmessungen), bei unterschiedlichen Auflasten (0 – 50 Newton) verdichtet und somit die Schüttdichte variiert. In **Abbildung 6-8** ist die Schüttdichte der Proben über den harmonischen Durchmesser aufgetragen.

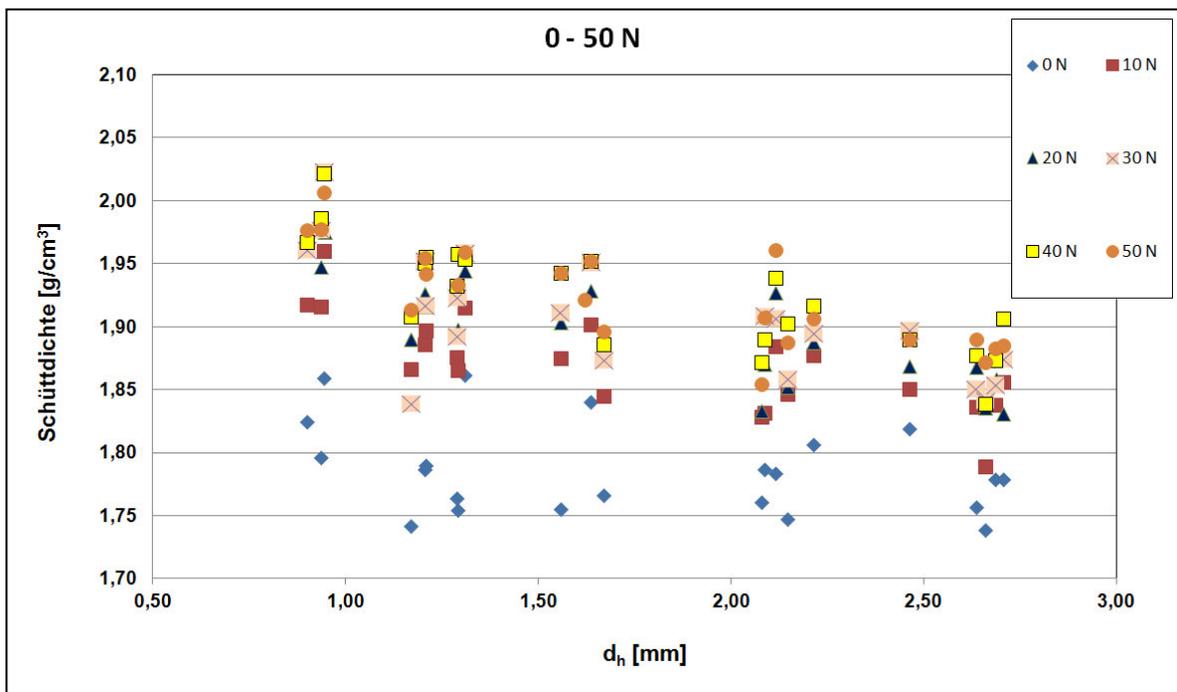


Abbildung 6-8: Schüttdichte der Proben über den harmonischen Durchmesser.

Der Trend in dieser Abbildung ist: je größer der harmonische Durchmesser ist, umso geringer ist die Schüttdichte. Da der harmonische Durchmesser mit steigendem Feuchtegehalt größer wird, gilt auch dasselbe für den Feuchtegehalt – je höher der Feuchtegehalt, umso niedriger ist die Schüttdichte. Hier sieht man auch, dass sich ab einer Auflast von 30 Newton die Schüttdichte kaum mehr ändert bzw. nur mehr eine geringe Verdichtung stattfindet.

6.4 Lückengrad

Der Lückengrad ist der wichtigste Einflussfaktor für die Bestimmung der Widerstandsbeiwerte, da er zur dritten Potenz in der Gleichung auftritt. Bei einer Fehlermittlung des Lückengrades von $\pm 3\%$ können die Widerstandsbeiwerte um $\pm 10\%$ falsch ermittelt werden. Der Lückengrad kann z.B. bei einer monodispersen Kugelschüttung

sehr einfach über das Volumen der Kugelschüttung und das Gesamtvolumen bestimmt werden. Da die Sintereinsatzmischungen aber nicht aus Kugeln oder anderen Granulaten mit einem konstanten Formfaktor und homogener Dichte, sondern aus einem agglomerierten polymineralischen Gemisch bestehen, bei welchem durch unterschiedliche Granulationsvorgänge die Kornform und die Porosität verändert werden, war es sehr komplex den Lückengrad zu bestimmen. Für die Ermittlung mussten die Schüttdichte und die mittlere Rohdichte der Einsatzmischungen berechnet werden. Wie in **Kapitel 6.3** schon besprochen, gab es bei der Bestimmung der Schüttdichte einige Fehlerquellen. Noch fehlerbehafteter ist aber die berechnete mittlere Rohdichte der einzelnen Mischungen. Da es sich um agglomerierte Teilchen handelt, bei denen man die Rohdichte nicht direkt messen kann, mussten die Dichten der einzelnen Komponenten bestimmt werden. Aus den einzelnen bestimmten Dichten (inklusive der Dichte von Wasser) konnte dann eine mittlere Dichte für alle Mischungen berechnet werden. Ein grundsätzliches Problem bei der Bestimmung der Rohdichte ist die Festlegung jener Grenzfläche, die auch das Korn für den Anwendungsfall nach außen charakterisiert. Für den Fall der Durchströmung der Schüttung ist dies praktisch nicht durchzuführen. Es gibt kein Messverfahren für die Rohdichte, die die geometrische Kornoberfläche als Grenzfläche berücksichtigt. Die Rohdichte, und auch die Reindichte, ändern sich mit der Zusammensetzung in den Kornbändern. Die Rohdichten der einzelnen Komponenten wurden aber nur im Bereich von 6,3 – 10 mm mit der Aufhängemethode ermittelt. Bei den Körnern - 6,3 mm bis + 0,1 mm wurde der Mittelwert aus Rein- und Rohdichte gebildet und für die Partikeln - 0,1 mm die Reindichte genommen (Ausnahme Carajas und Kumba, da umgekehrt). Dies ist eine gute Annäherung an die wahre Rohdichte, aber die Bestimmung ist nicht exakt. Da aber auch die Rohdichtebestimmung mit der Aufhängemethode und speziell im feineren Kornbereich mit der Pyknometermethode fehlerbehaftet ist, ist diese Annäherung, wenn man den Aufwand der fehlerhaften Rohdichtebestimmung im Feinkornbereich berücksichtigt, begründet. Die Rohdichte hängt nicht nur mehr von der chemischen Zusammensetzung der Körner in den verschiedenen Kornbändern ab, sondern auch von dem gewählten Messfluid und der Wechselwirkung zwischen dem Fluid und der Partikeloberfläche. Aufgrund der geringen Masse an Probe bei der Pyknometermethode können sich Luftbläschen, die an der Oberfläche haften, erheblich auf das Ergebnis auswirken. Weiters ist der instationäre Zustand Wasser – poröses Partikel eine Fehlerquelle. Man kann nicht sicher sagen, ab welchem Zeitpunkt alle theoretisch füllbaren Poren mit Wasser gefüllt sind. Es kann auch noch während des Messens zu einem Füllvorgang kommen.

Die Korngrößenverteilung spielt für die Packungsdichte bzw. den Lückengrad eine entscheidende Rolle. Wenn eine Mischung aus großen und kleinen Teilchen vorliegt, können

die kleinen Teilchen die Lücken zwischen den großen Körnern ausfüllen, wodurch der Wert des Lückengrades sinkt und die Packungsdichte ansteigt. Je breiter die Korngrößenverteilung und je höher der Anteil an Feinkorn im Korngemisch sind, umso höher ist die Packungsdichte und umso geringer ist der Lückengrad. In **Abbildung 6-9** ist der Lückengrad der Proben (bei unterschiedlichen Verdichtungen) über den harmonischen Durchmesser aufgetragen.

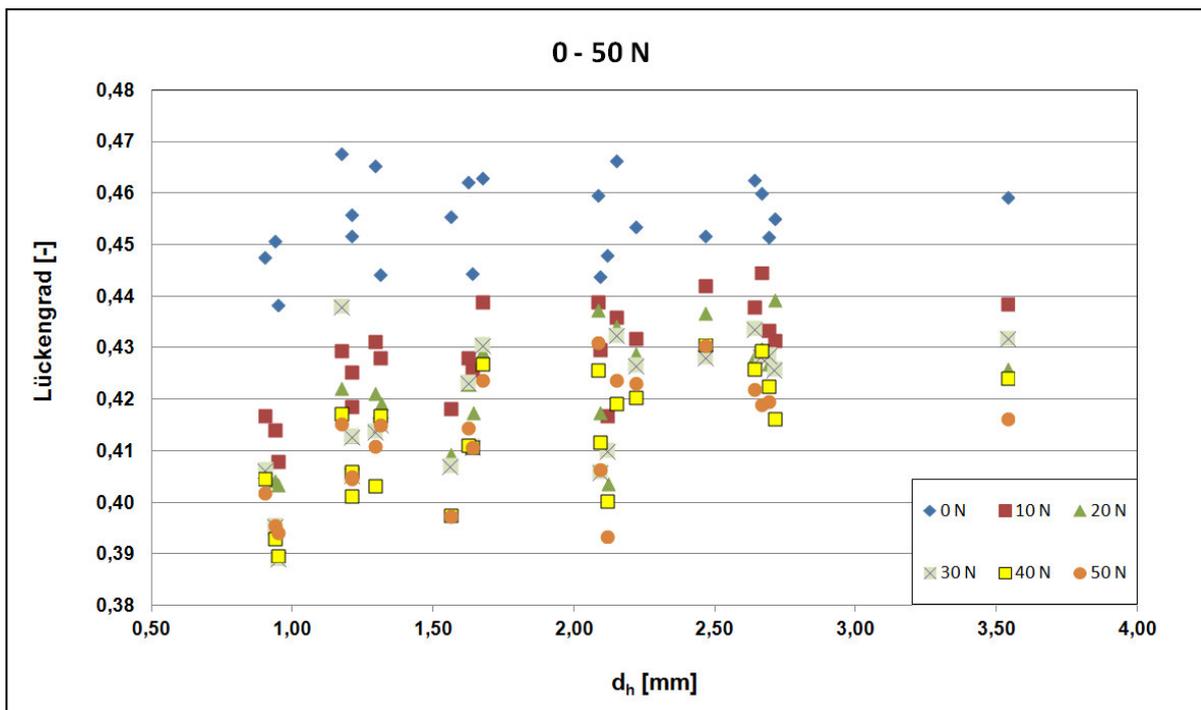


Abbildung 6-9: Lückengrad der Proben über den harmonischen Durchmesser.

Obwohl die Ergebnisse streuen, ist der Trend, dass der Lückengrad mit zunehmenden harmonischen Durchmesser ansteigt, gegeben. Jedoch kann die Berechnung des Lückengrades nicht allein aus der Korngrößenverteilung erfolgen, da der Lückengrad mit dem harmonischen Durchmesser der agglomerierten Mischungen nicht stark korreliert.

6.5 Druckverlust über die Schüttungen

Laut Ergun ist der Druckverlust in Schüttungen im laminaren Bereich von der ersten Potenz der Geschwindigkeit abhängig und im turbulenten Bereich vom Quadrat der

Geschwindigkeit. Im turbulenten Bereich ist die Widerstandszahl von der Reynoldszahl unabhängig. Die Druckverlustmessungen für die Sintereinsatzmischungen wurden in einer Permeabilitätsmessanlage durchgeführt. Dabei wurde für jede Probe der Druckverlust je Längeneinheit der Schüttung über die Leerrohrgeschwindigkeit der durchgesaugten Luft aufgezeichnet. In **Abbildung 6-10** ist der Druckverlust über die Geschwindigkeit für die Probe 1 der Mischung SV 4-15 aufgetragen.

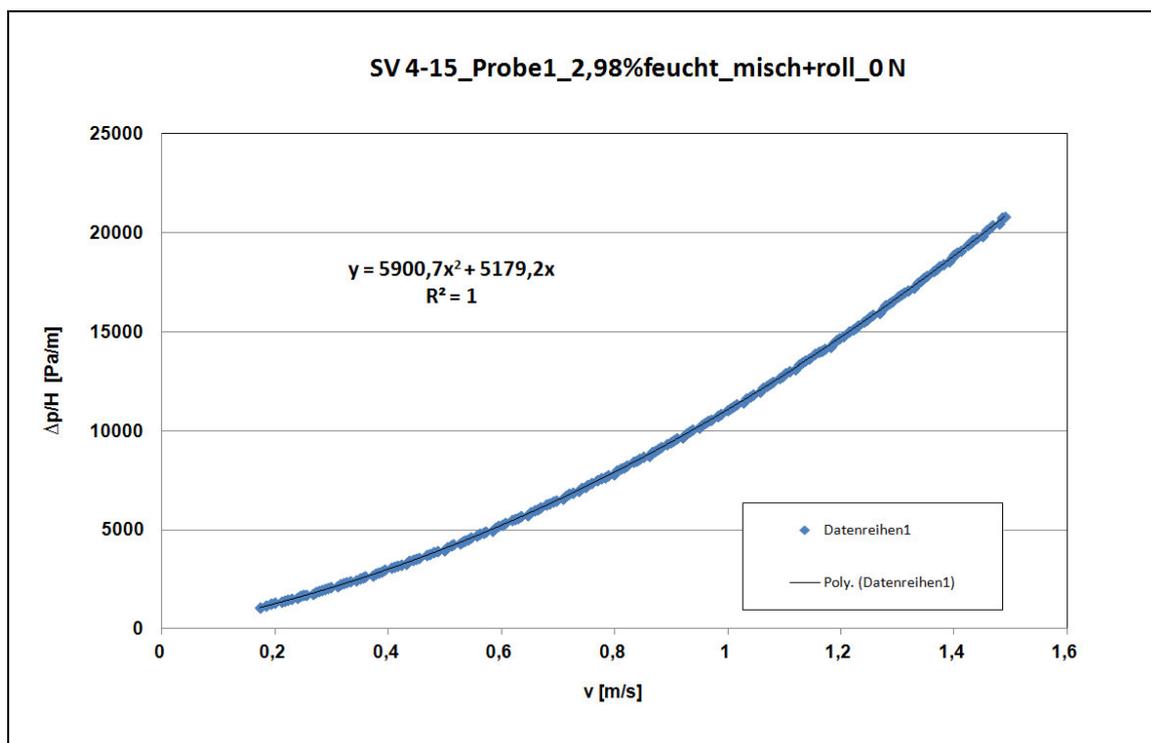


Abbildung 6-10: Druckverlust pro Längeneinheit der Schüttung über die Leerrohrgeschwindigkeit der Luft.

Mit diesen Aufzeichnungen wurden die Annahmen von Ergun bestätigt: Im laminaren Bereich ist der Druckverlust von der ersten Potenz der Geschwindigkeit abhängig und im turbulenten Bereich vom Quadrat der Geschwindigkeit. Jedoch nimmt die Widerstandszahl im turbulenten Bereich bei den Versuchen dieser Arbeit ($Re < 800$) noch keinen konstanten Wert an. Für größere Reynoldszahlen (bis zu 2500) wird aber ein unveränderlicher Wert erwartet. In **Abbildung 6-11** ist der Widerstandswert über die Reynoldszahl für die Probe 1 der Mischung SV 4-15 dargestellt.

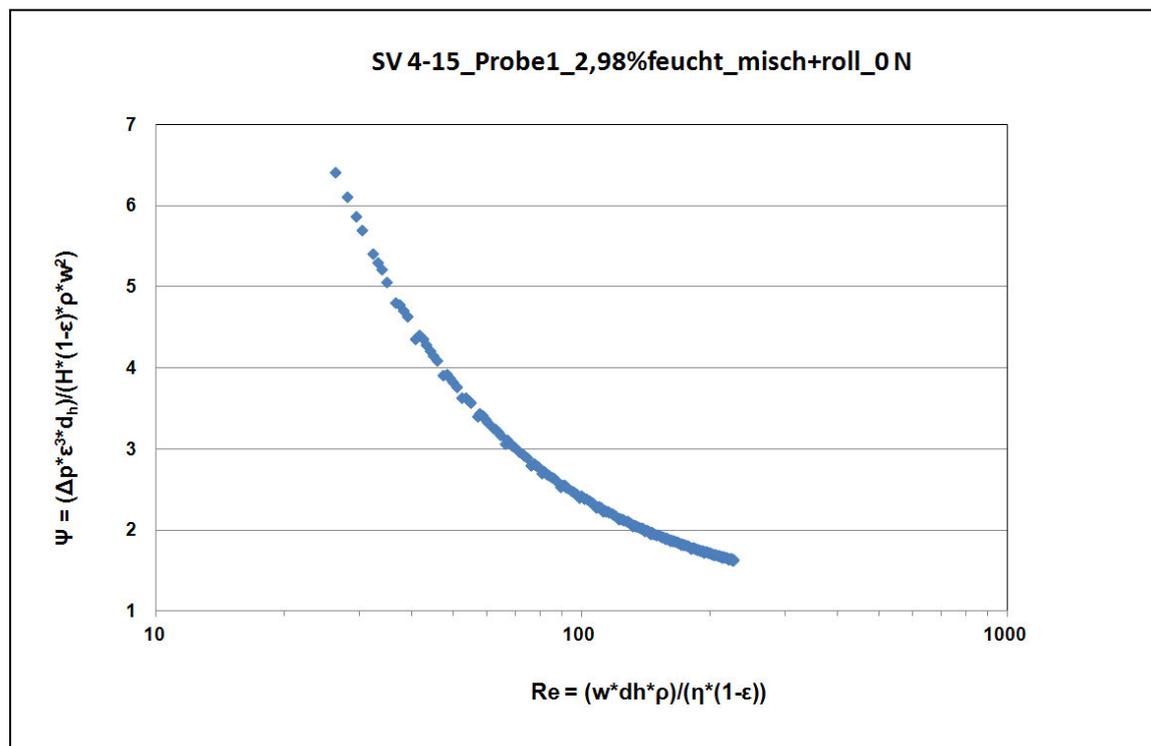


Abbildung 6-11: Widerstandszahl über Reynoldszahl.

Bei der Untersuchung des Druckverlustes einer Festbettschüttung, die mit einem Medium durchströmt wird, reicht oft die Kenntnis der Größe des verfügbaren freien Volumens oder der verfügbaren freien Querschnittsfläche nicht aus. Das freie Volumen innerhalb einer Schicht ist aus vielen einzelnen Poren zusammengesetzt. Je größer die Partikeln sind, umso größer sind auch die Poren. Eine Schicht, bestehend aus großen Teilchen, wird also wenige große Poren besitzen, während eine aus kleinen Teilchen gebildete Schicht viele kleine Poren besitzt, obgleich der mittlere Lückengrad für beide nahezu gleich ist. Daher ist die Angabe der mittleren Größe der Einzelporen durch den hydraulischen Durchmesser für die Strömung wichtig. In **Abbildung 6-12** ist der Druckverlust je Längeneinheit jeder Probe über den hydraulischen Durchmesser nach **Glg. (4-4)** aufgetragen. Der Druckverlust über die Schüttung in dieser Abbildung, und auch in den folgenden, gilt für eine Leerrohrgeschwindigkeit von 0,84 m/s (Sinteranlage). Statt des Partikeldurchmessers wurde der harmonische Durchmesser eingesetzt, da es sich bei Sintermischungen um ein polydisperses System handelt. Nach dieser Gleichung ist der hydraulische Durchmesser eine Funktion des Partikeldurchmessers und des Lückengrades. Dabei wird das gesamte in der Schicht vorhandene Lückenvolumen durch den Lückengrad berücksichtigt. Der Partikeldurchmesser stellt ein Maß für die über die Schicht gemittelte Größe der einzelnen

Poren dar, da die Poren zwischen den benachbarten Partikeln umso größer sind, je größer der Durchmesser der Partikeln ist.

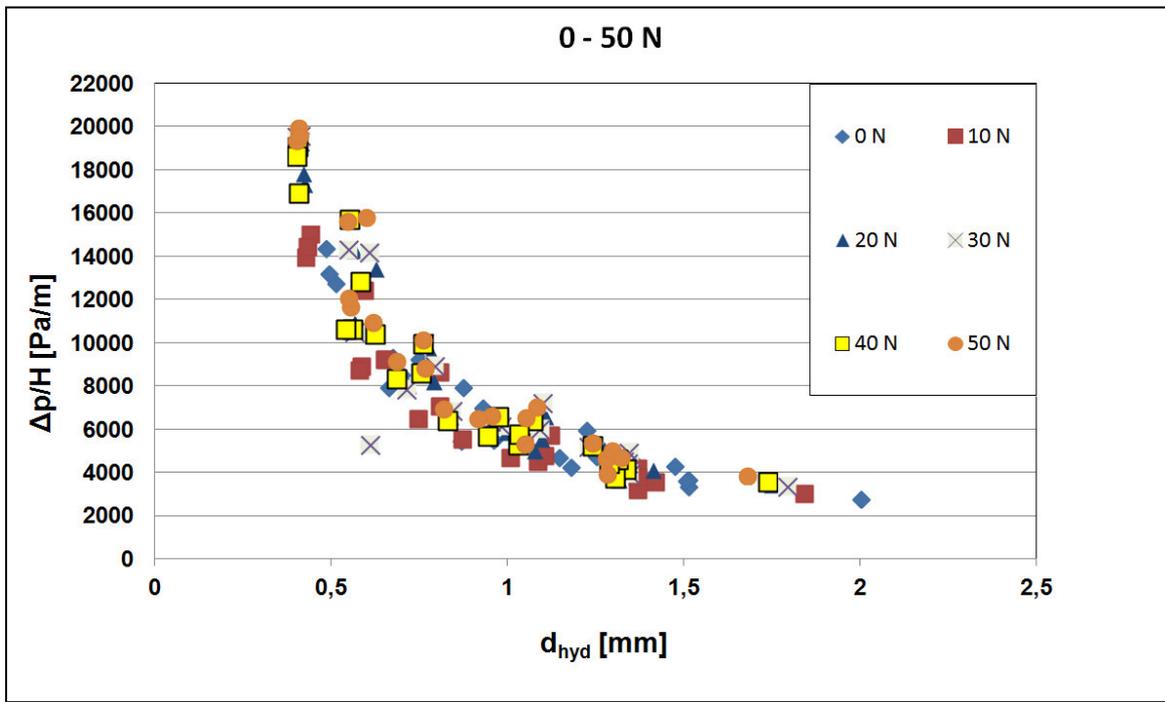


Abbildung 6-12: Druckverlust je Längeneinheit über den hydraulischen Durchmesser.

Wie in **Kapitel 6.2** schon erwähnt wurde, besitzt die Mischung SV 10-15 (vor der Agglomeration) einen hohen Anteil an Zwischenpartikeln. Da dieser Anteil um einiges höher ist, als bei den anderen beiden Mischungen, werden bei der Granulation in Summe mehr kleinere Quasi-Partikel gebildet und somit ergeben sich insgesamt kleinere harmonische Durchmesser. Dies beeinflusst die Durchgasbarkeit negativ, da der Druckverlust während der Durchströmung dieser Schüttungen durch die kleineren gebildeten Partikeln stark ansteigt. Die Mischung SV 23-15 erweist sich als sehr gut durchgasbar. Auch bei kleineren harmonischen Durchmessern und hohen Auflasten ist der Druckverlust gering. In **Abbildung 6-13** ist die Abhängigkeit des Druckverlustes, über die Schüttungen vom harmonischen Durchmesser zu sehen.

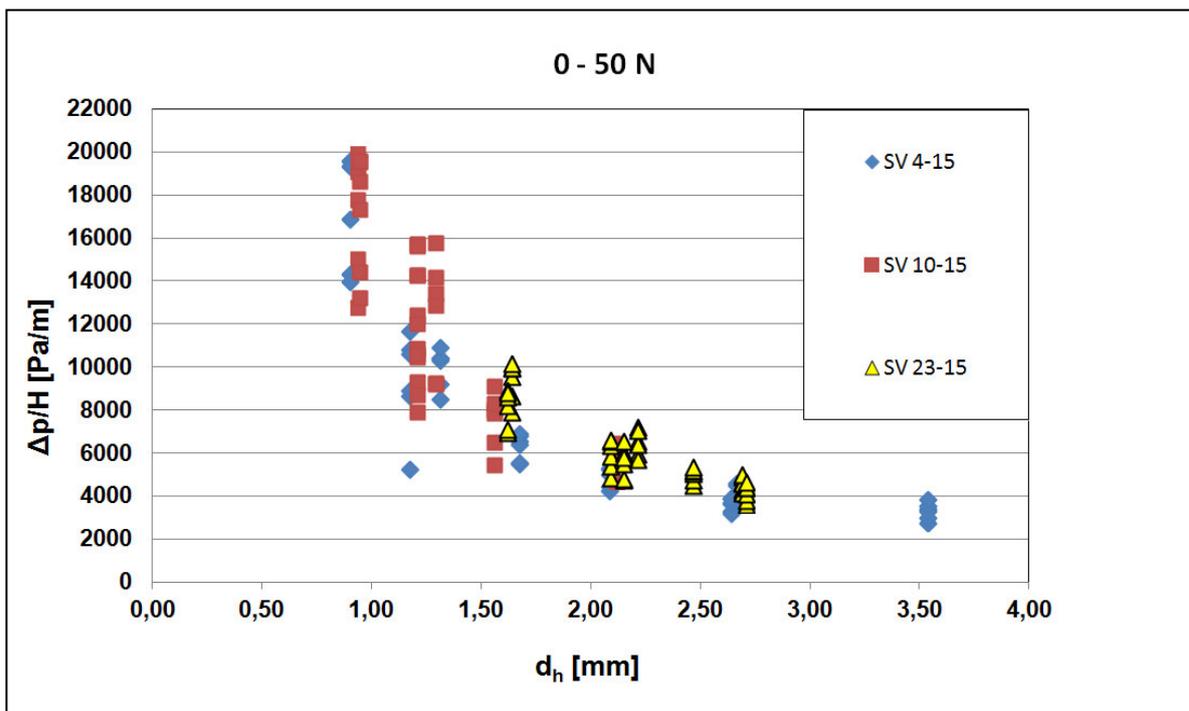


Abbildung 6-13: Druckverlust der granulierten Mischungen über den harmonischen Durchmesser.

Der Wassergehalt ist ein wichtiger Einflussparameter bei der Granulation. Das Wasser dient bei dem Granulationsvorgang als Bindemittel. Ob die feinen Partikel am Kern haften bleiben, hängt stark von der verfügbaren Feuchte (totaler Feuchtegehalt minus der absorbierten Feuchte durch die unterschiedlichen Komponenten der Einsatzmischung) bei der Granulation ab. Wenn der Wasserzusatz erhöht wird, steigt die Permeabilität bzw. sinkt der Druckverlust über die Schüttung, weil sich bei der Granulation größere Partikel bilden. Aber wenn durch den Wasserzusatz der optimale Wert (Wassergehalt bei maximaler Permeabilität des Festbettes) überstiegen wird, verschlechtert sich der Granulationseffekt und die Permeabilität sinkt und der Druckverlust steigt wieder. In dieser Arbeit wurde der optimale Wert nie überstiegen. In **Abbildung 6-14** ist der Druckverlust über die Schüttungen (keine Auflast) über den Feuchtegehalt aufgetragen.

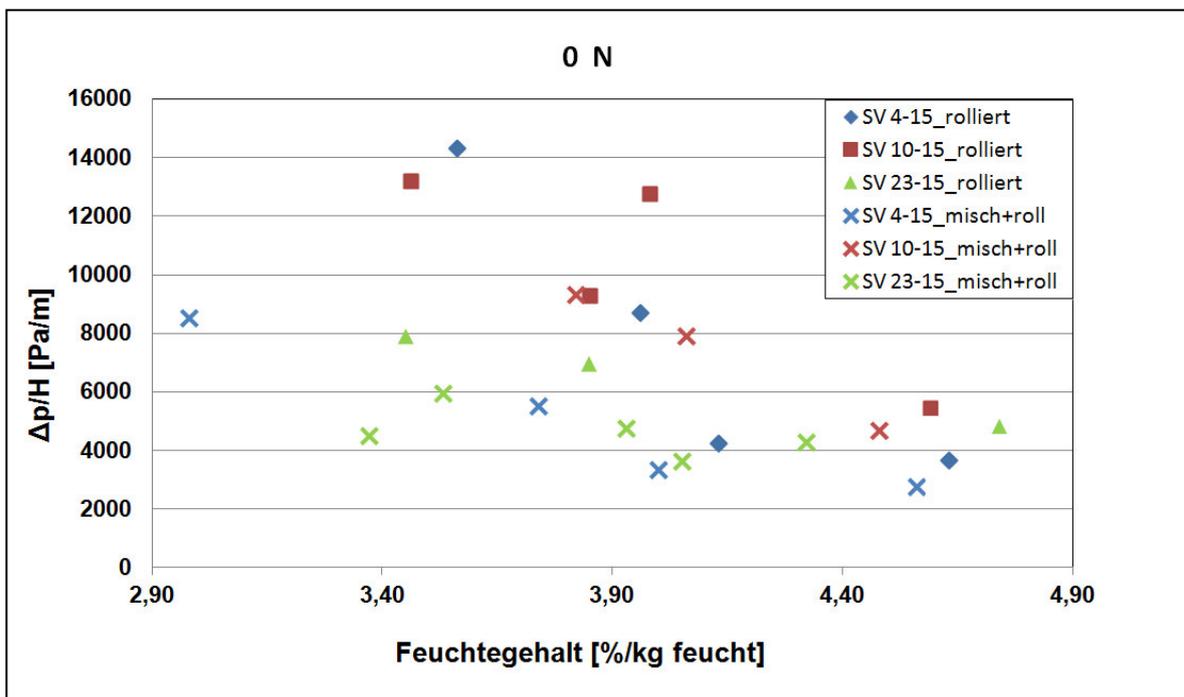


Abbildung 6-14: Druckverlust der Schüttungen in Abhängigkeit der Mischgutfeuchte.

6.6 Bestimmung der Widerstandsbeiwerte

Die Widerstandsbeiwerte, für den laminaren und turbulenten Bereich, wurden nach den Gleichungen in **Kapitel 5.10** für alle Proben unter unterschiedlichen Auflasten bestimmt. In **Abbildung 6-15** und **Abbildung 6-16** sind die Beiwerte a und b über den harmonischen Durchmesser aufgetragen. Die Abbildungen **Abbildung 6-17** und **Abbildung 6-18** zeigen die Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit vom Lückengrad.

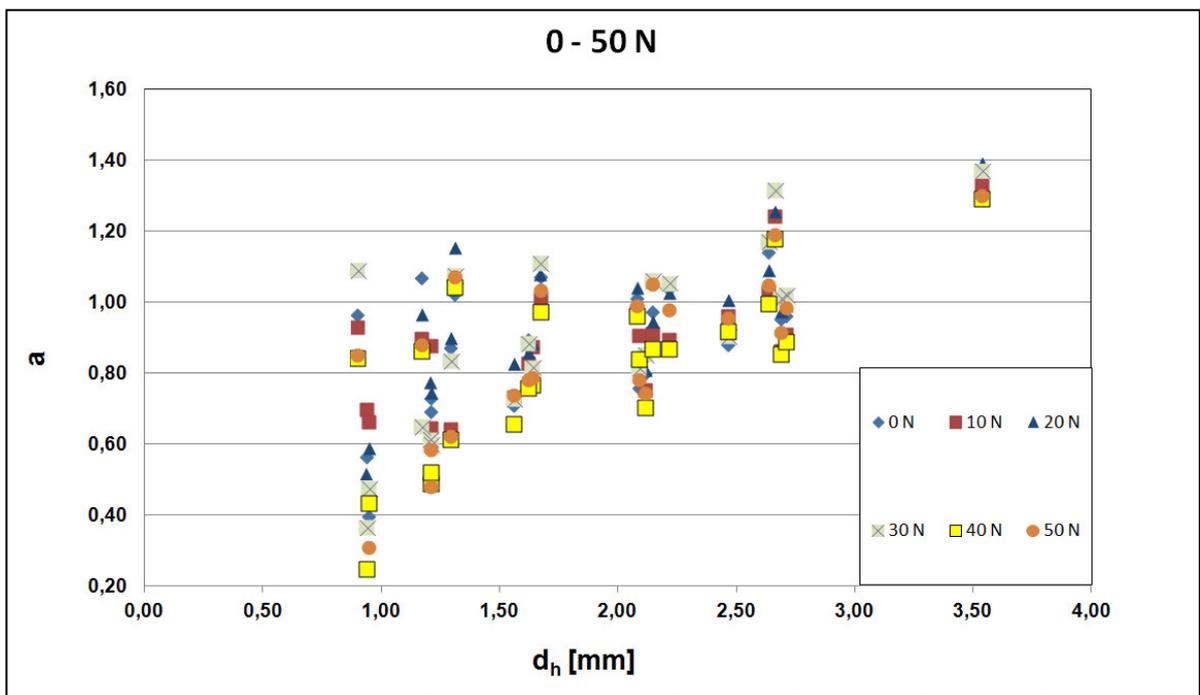


Abbildung 6-15: Widerstandsbeiwert a über den harmonischen Durchmesser.

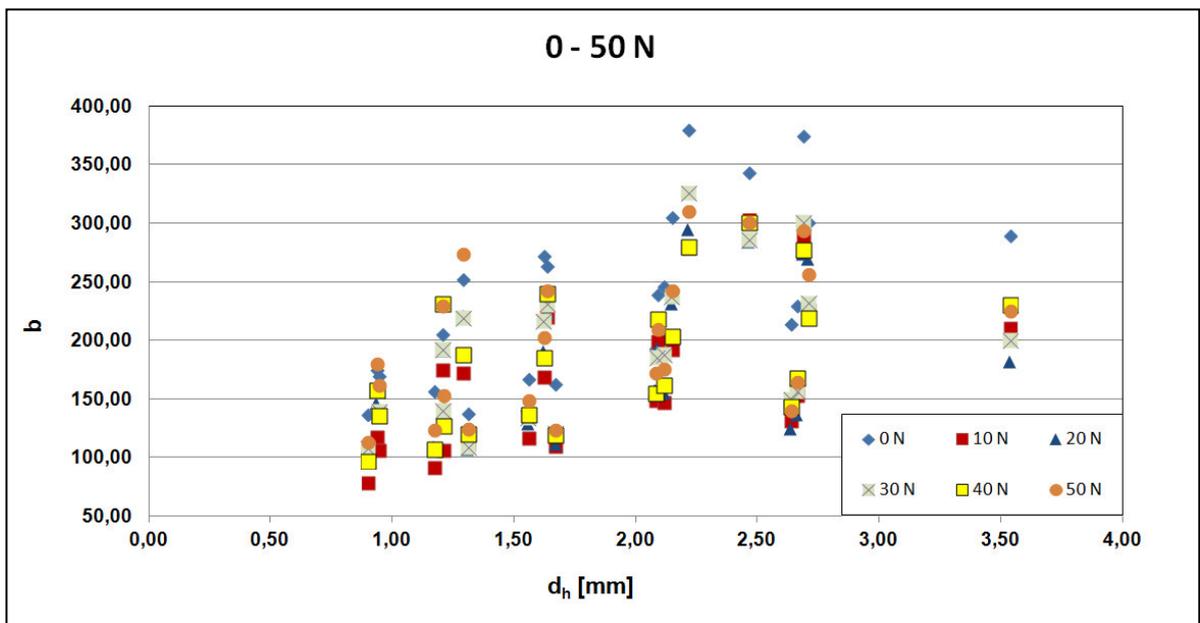
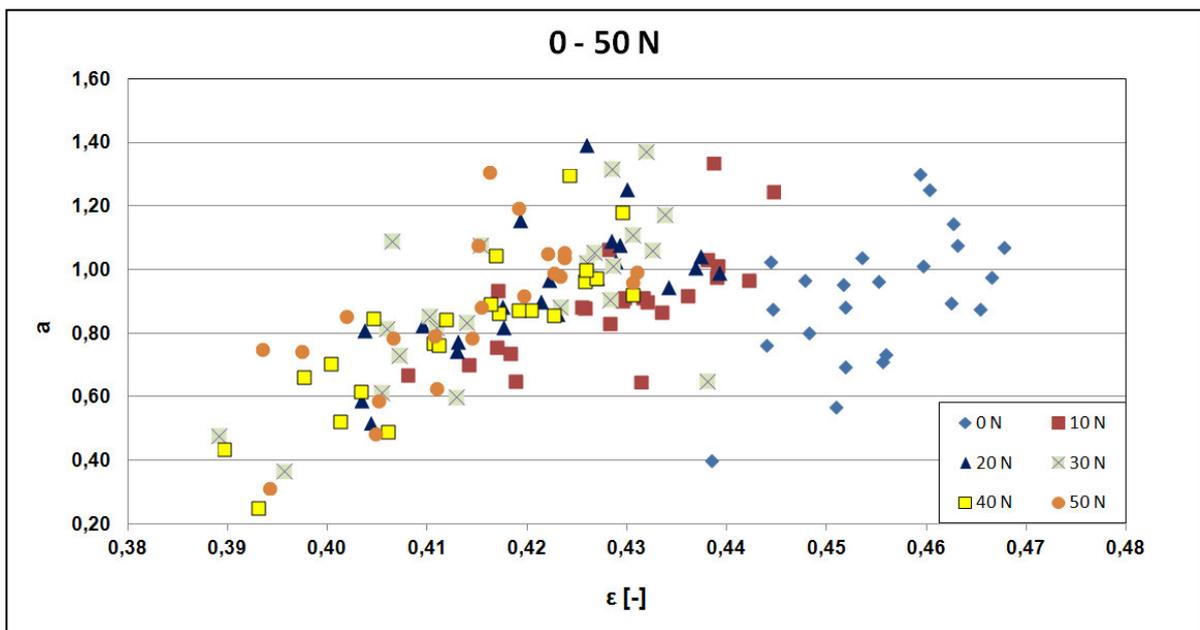
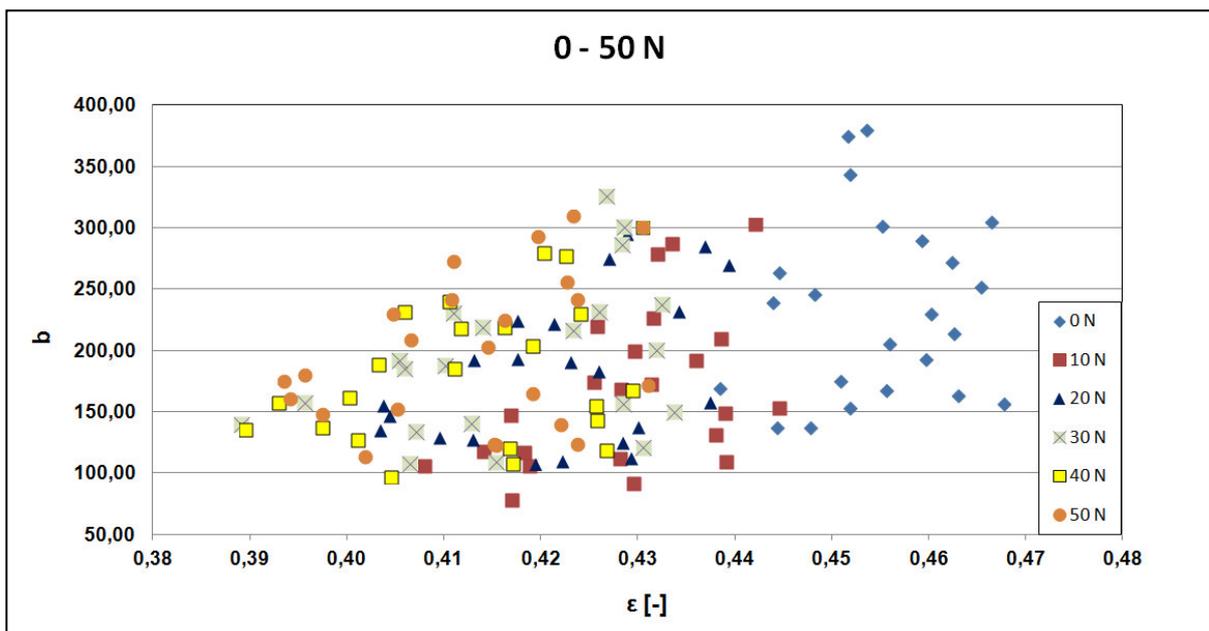


Abbildung 6-16: Widerstandsbeiwert b über den harmonischen Durchmesser.

Abbildung 6-17: Widerstandsbeiwert a über den Lückengrad.Abbildung 6-18: Widerstandsbeiwert b über den Lückengrad.

Die Widerstandsbeiwerte a und b sind nicht konstant, d. h. nicht unabhängig von den freien Prozessvariablen, insbesondere den agglomerationsbedingten Schüttguteigenschaften.

6.7 Schlussfolgerung

Die Widerstandsbeiwerte a und b für Sintereinsatzmischungen sind nicht konstant. Diese Koeffizienten hängen stark vom Granulationsprozess ab. Durch die unterschiedlichen Granulationsvorgänge ändern sich neben der Korngröße und dem Lückengrad auch die Kornform und die Porosität der Quasi-Partikeln. Somit kann allein durch die Bestimmung des harmonischen Durchmessers der Sintereinsatzmischung, mithilfe der Korngrößenanalyse des CPA-Messgerätes und der ermittelten Schüttdichte bzw. dem daraus berechneten Lückengrad nicht auf die Permeabilität bzw. den Druckverlust über die Schüttung über die Ergungleichung rückgeschlossen werden und mit dem berechneten Druckverlust auch keine Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung abgeschätzt werden. Wegen unzureichender Korrelation kann der Lückengrad nicht aus dem harmonischen Durchmesser berechnet werden, sondern muss für jede Mischung experimentell über die Schüttdichte ermittelt werden.

Für die Abschätzung der zu erwartenden Sinterleistung muss daher immer ein Permeabilitätsversuch gemacht werden, um den Druckverlust über die Schüttung oder auch die Gasgeschwindigkeit zu erhalten. Dabei können die Versuche immer bei der gleichen Gebläsedrehzahl 31 Hz durchgeführt werden. In **Abbildung 6-19** ist die Sinterleistung (mit dem Sintertopfversuch bestimmt) über die Gasgeschwindigkeit, mit dem Permeabilitätsmessgerät bestimmt, bei 31 Hz, von alten Sinterversuchen (2012 und 2013) aufgetragen.

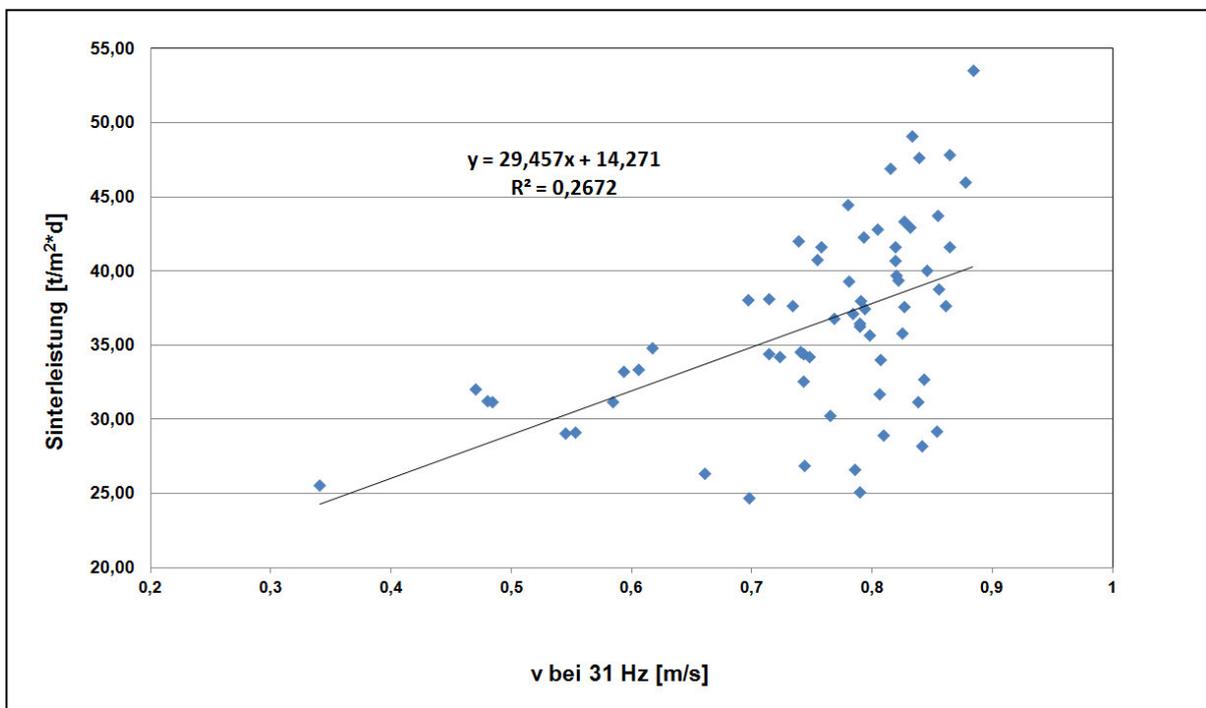


Abbildung 6-19: Sinterleistung über die Gasgeschwindigkeit bei 31 Hz.

Obwohl die Daten speziell bei höheren Gasgeschwindigkeiten streuen, steigt die Sinterleistung mit der durchgesaugten Gasmenge, da beim Sinterprozess der konvektive Wärmeübergang zwischen Feststoff und Gasphase eine wesentliche limitierende Größe für die Brennfront-Geschwindigkeit darstellt. Einerseits erhöht sich die Sinterleistung, wenn eine möglichst große Luftmenge durch das Sinterbett gesaugt wird. Auf der anderen Seite kann eine zu hohe Steigerung der Gasmenge, infolge der zu starken Voreilung der konvektiven Wärmeübertragung gegenüber der Verbrennung, zu einem Erlöschen der Verbrennung und zu einem Kaltblasen des Sinterbettes führen.

In **Abbildung 6-20** ist die Kennlinie für das Gebläse der Kaltpermeabilitätsmessanlage, bei einer Frequenz von 31 Hz, aufgetragen.

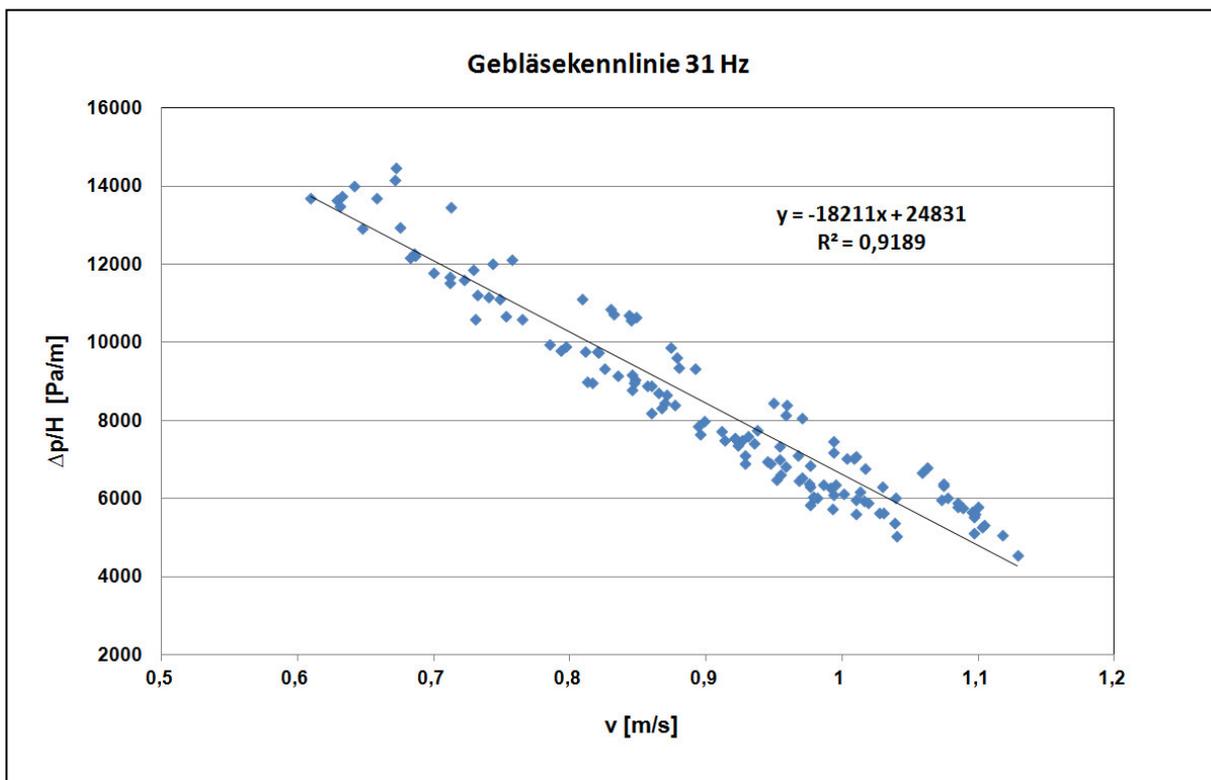


Abbildung 6-20: Gebläsekennlinie bei 31 Hz.

Die Kennlinie wurde mit den Permeabilitätsversuchen dieser Arbeit erstellt.

Allein aus den Kaltpermeabilitätsversuchen wird die Sinterleistung zwar nie exakt vorherzusagen sein, da sie von vielen anderen Faktoren abhängt: Kohlenstoffgehalt (Brennstoff), chemische Reaktionen, Stoff- und Wärmeübergang, Gastemperatur etc.

Allerdings gibt die Bestimmung der Kaltpermeabilität über Gasmenge und Druckverlust bei konstanter Gebläseleistung, eine experimentell leicht zu bestimmende erste Indikation, wie sich die zu erwartende Sinterleistung bei Variation der eingesetzten Mischung und der prozesstechnischen Einflussgrößen ändert.

7 Zusammenfassung

Beim Sinterprozess spielt die Durchgasbarkeit der Sintermischung eine wesentliche Rolle im Hinblick auf die Sinterleistung. Die Korngrößenverteilung der einzelnen Sintereinsatzstoffe sagt nur bedingt etwas über die Sinterleistung der Einsatzmischung aus, da diese durch den Agglomerationsvorgang gezielt verändert wird. Es ist daher notwendig einen Zusammenhang zwischen der Packungsstruktur und der Korngrößenverteilung der Einsatzmischung im agglomerierten Zustand und deren Durchgasbarkeit (strömungstechnische Eigenschaft) herzustellen, um mit relativ wenig Untersuchungsaufwand experimentell gut abgesicherte Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung zu bekommen.

In dieser Arbeit wurde versucht den Zusammenhang zwischen der Packungsstruktur und der Korngrößenverteilung der granulierten Einsatzmischungen und deren strömungstechnischen Eigenschaften über das empirische Widerstandsgesetz nach Ergun zu bestimmen. Dafür mussten die Widerstandsbeiwerte dieses Gesetzes für Sintereinsatzmischungen bestimmt werden, da die von Ergun ermittelten Beiwerte nur für Granulate mit relativ engen Korngrößenverteilungen gelten. Um diese Koeffizienten zu bestimmen und das Gedankenbild von Ergun zu testen, wurden die wesentlichen Schüttguteigenschaften, wie Lückengrad und ein Kennwert für die Korngrößenverteilung, sowie der Druckverlust über die Schüttungen experimentell bestimmt.

Ziel war es mit den durch die Experimente ermittelten Daten und der Ergungleichung die Widerstandsbeiwerte für die Sintereinsatzmischungen zu bestimmen und einen Zusammenhang zwischen dem gemessenen Druckverlust und der Sinterleistung zu finden. Wenn die Widerstandsbeiwerte konstant, d. h. unabhängig von den freien Prozessvariablen,

insbesondere den agglomerationsbedingten Schüttguteigenschaften sind, kann man für zukünftige Sinterversuche im Labor nur mit der Bestimmung des harmonischen Durchmessers aus einer Korngrößenanalyse, z.B. mit einem bildverarbeitenden System wie dem CPA-Messgerät, und des Lückengrades, den Druckverlust über die Schüttung berechnen und dadurch mit relativ wenig Untersuchungsaufwand experimentell gut abgesicherte Werte für die Permeabilität der Sintermischung und damit Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung bekommen. Wenn zusätzlich der Lückengrad mit dem harmonischen Durchmesser der agglomerierten Mischung korreliert, wie dies im Schrifttum postuliert wird (Jeschar), kann die Berechnung allein aus der Korngrößenverteilung erfolgen.

Zunächst zeigte sich, dass der Zusammenhang zwischen harmonischem Durchmesser und Lückengrad nicht eindeutig ist und stark streut. Die erhaltenen Ergebnisse veranschaulichen, dass die Widerstandsbeiwerte a und b für Sintereinsatzmischungen nicht konstant sind. Diese Koeffizienten hängen stark vom Granulationsprozess ab. Durch die unterschiedlichen Granulationsvorgänge ändern sich neben der Korngröße und dem Lückengrad auch die Kornform und die Porosität der Quasi-Partikeln. Somit kann allein aus der Bestimmung des harmonischen Durchmessers der Sintereinsatzmischung und der Schüttdichte bzw. dem daraus berechneten Lückengrad nicht auf die Permeabilität bzw. den Druckverlust der Schüttung über die Ergungleichung rückgeschlossen und in weiterer Folge auch keine Indikationen für die zu erwartende Sinterleistung abgeschätzt werden. Wegen unzureichender Korrelation kann der Lückengrad nicht aus dem harmonischen Durchmesser berechnet werden, sondern muss für jede Mischung experimentell über die Schüttdichte ermittelt werden. Zusätzlich ist ein Permeabilitätsversuch nötig, weil die Ergun-Koeffizienten nicht konstant sind. Weil aber für die Bestimmung des Lückengrades zweckmäßigerweise die Gefäße der Permeabilitätsapparatur verwendet werden können, hält sich der zusätzliche experimentelle Aufwand für einen Permeabilitätstest in Grenzen. Für die Abschätzung der zu erwartenden Sinterleistung muss daher immer ein Permeabilitätsversuch gemacht werden, um den Druckverlust über die Schüttung bei gegebener Gasgeschwindigkeit zu erhalten.

Allein aus den Kaltpermeabilitätsversuchen wird die Sinterleistung zwar nie exakt vorherzusagen sein, da sie von vielen anderen Faktoren abhängt: Kohlenstoffgehalt (Brennstoff), chemische Reaktionen, Stoff- und Wärmeübergang, Gastemperatur etc.

Allerdings gibt die Kaltpermeabilität, bestimmt über Gasmenge und Druckverlust bei konstanter Gebläseleistung, eine experimentell leicht zu bestimmende erste Indikation, wie sich die zu erwartende Sinterleistung bei Variation der eingesetzten Mischung und der prozesstechnischen Einflussgrößen ändert.

Literaturverzeichnis

- [1] Schenk J., Eisen- und Stahlmetallurgie 1 (2015), 5-25 - 5-34.
- [2] Remus R., M.A. Aguado Monsonet, S. Roudier und L.D. Sancho, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production (2013), 89–180.
- [3] Wolf, V., Gesamtskriptum Chemische Technologien: Metallurgie (2012), 225–279.
- [4] Venkataramana R., S. S. Gupta und P. C. Kapur, A combined model for granule size distribution and cold bed permeability in the wet stage of iron ore sintering process, International Journal of Mineral Processing (1999), 57, 43–58.
- [5] Lv X., C. Bai, X. Huang und G. Qiu, Prediction of size distribution of iron ore granules and permeability of its bed, Journal of Mining and Metallurgy 2 (2011), 47, 113–123.
- [6] Cores A., L. F. Verdeja, S. Ferreira, I. Ruiz-Bustinza und J. Mochon, Iron ore sintering part 1. Theory and practice of the sintering process, Journal Dyna (2013), 80.
- [7] Lwamba E. und A.M. Garbers-Craig, Control of the grain size distribution of the raw material mixture in the production of iron sinter, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy (2008), 108, 293–300.
- [8] Matsumura T., T. Maki, S. Amano, M. Sakamoto und N. Iwasaki, Effect of moisture absorption behaviour on optimal granulation moisture value of sinter raw material, ISIJ International 5 (2009), 49, 618–624.

- [9] Maeda T., C. Fukumoto, T. Matsumura, K. Nishioka und M. Shimizu, Effect of adding moisture and wettability of granulation of iron ore, *ISIJ International* 4 (2005), 45, 477–484.
- [10] Kraume, M., *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2012.
- [11] Wall G., *Systematische Untersuchung von physikalischen und fluiddynamischen Eigenschaften von Feineisenerzen zur Auslegung von Wirbelschichtsystemen*, Diplomarbeit, Leoben, 2004.
- [12] Ignatowitz, E., *Chemietechnik*, 10. Auflage, Verl. Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2011.
- [13] Weiß, C., *Stoffbilanzen und Stoffeigenschaften (2011-2012)*, 4-1 - 4-7, 6-12 - 6-17.
- [14] Föll, H., *Einige wichtige Kristalle: Dichteste Kugelpackung*, http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw_for_et/kap_3/backbone/r3_2_1.html#_dum_12, Abgerufen am: 23.08.2016.
- [15] Jeschar, R., *Druckverlust in Mehrkornschüttungen*, *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 35 (1964), 2, 91–108.
- [16] Lehner, M., *Mechanische Verfahrenstechnik (2010)*, 1–9.
- [17] Batel, W., *Einführung in die Korngrößenmesstechnik*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1971.
- [18] Haver und Boecker (Ed.), *Haver CpaServ Professional/Expert: Betriebsanleitung*, 2012.
- [19] Stuess, M., *Mechanische Verfahrenstechnik*, 3., vollst. neu bearb. Aufl., Springer, Berlin, 2009.
- [20] Wolf, V., J. Rieger, M. Bauer, P. Biegger, J. Lubensky und M. Ellersdorfer, *Laborübung zur Verfahrenstechnik (2012)*, 11–12.
- [21] Deutsches Institut für Normung e. V., *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen(1097-6)*.
- [22] Lu, L., *Iron ore: Mineralogy, processing and environmental sustainability*, Elsevier, Heidelberg, 2015.
- [23] Ergun, S., *Fluid flow through packed columns*, *Chemical Engineering Progress* 2 (1952), 48, 89–98.