



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

# Beitrag zur Kennzeichnung von Aufschluss- und Trennerfolg am Beispiel der Magnetscheidung

Der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg  
genehmigte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von Dipl.-Ing. Thomas Leißner  
geboren am 25.08.1984 in Sangerhausen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Urs A. Peuker, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. Jan Rosenkranz, Luleå (Schweden)

Tag der Verleihung: 01.12.2015

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2011 und 2015 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg. In dieser Zeit arbeitete ich an den durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten Projekten „Hybride Lithiumgewinnung“ [03WKP18A] und „SMSB - Gewinnung strategischer Metalle und anderer Mineralien aus sächsischen Bergbauhalden“ [033R095].

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Urs Peuker, der mir die Promotion an seinem Institut ermöglichte. Mit konstruktiver Kritik in zahlreichen Diskussionen spornte er mich an, mich nicht zu früh mit den gewonnenen Erkenntnissen zufrieden zu geben. Er gewährte mir die nötige Freiheit meinem Forscherdrang nachzukommen und auf nationalen und internationalen Tagungen den Austausch mit anderen Wissenschaftlern zu suchen.

Prof. Dr.-Ing. Jan Rosenkranz danke ich dafür, dass er sich kurzfristig bereit erklärt hat, Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Tomas (†) als Zweitgutachter zu ersetzen. Dr. Bernd Kubier danke ich für die Zeit seines wohlverdienten Ruhestandes, die er für das Korrekturlesen der Dissertation aufbrachte.

Ich danke allen gegenwärtigen und ehemaligen Kollegen für ihr kritisches Hinterfragen, für Denkanstöße und Hilfestellungen verschiedenster Art sowie das lockere und aufgeschlossene Verhältnis untereinander. Zu Dank verpflichtet bin ich weiterhin dem technischen Personal des Instituts, welches mir bei Problemen immer eine schnelle und qualifizierte Hilfe war. Hierbei gilt ein besonderer Dank Yvonne Volkmar für die große Zahl durchgeführter chemischer Aufschlüsse und Ines Reinl für das Messen der magnetischen Suszeptibilität unzähliger Proben. Von unschätzbarem Wert waren für mich die vielen praxisbezogenen Tipps, die mir Thomas Zschoge (†) während unserer gemeinsamen Zeit am Institut gegeben hat.

Stellvertretend für die Mitarbeiter des Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie danke ich Prof. Dr. (PhD ZA) Jens Gutzmer und Kai Bachmann, die entscheidend an der Anfertigung wissenschaftlicher Veröffentlichungen beteiligt waren und darüber hinaus mit fachlichen Hinweisen sowie dem zur Verfügung stellen von Probenmaterial und MLA-Messungen unterstützten.

Darüber hinaus danke ich allen Studenten, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder als Hilfskraft an der Durchführung von Versuchen beziehungsweise an der Messung von Probeneigenschaften beteiligt waren.

Meinen Eltern und meinen Geschwistern danke ich, dass sie mich auf meinem Lebensweg begleiten und mit gutem Rat, finanzieller Unterstützung sowie dem Gegenlesen von Arbeiten zum Erfolg meines Studiums beigetragen haben.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Elisabeth, die mir während der Promotion über Tiefs hinweggeholfen hat und mich immer wieder neu motivierte. Ich danke ihr auch für ihr Verständnis, gemeinsame Zeit für die Anfertigung dieser Arbeit zu opfern.

## Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Prof. Dr.-Ing. Urs A. Peuker (Betreuung)
- Dr. rer. nat. Bernd Kubier (Korrekturleser)
- Prof. Dr. (PhD ZA) Jens Gutzmer, Dr. Saeed Chehreh Chelgani, Dr.-Ing. Thomas Mütze, Dr.-Ing. Martin Rudolph, Petya Atanasova, Kai Bachmann, Sören Rode (Koautoren eigener Veröffentlichungen)
- Sabine Heinisch, Christoph Kuchinke, Katja Urban, Matthias Ziller (Erzeugen von Messdaten im Rahmen studentischer Arbeiten)

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Freiberg, den 06.03.2015

Thomas Leißner

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	VI
Symbolverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung.....	- 1 -
2 Theoretische Grundlagen zum Aufschluss- und Trennerfolg .....	- 3 -
2.1 Mechanisches Aufschließen .....	- 4 -
2.1.1 Grundvorgänge beim mechanischen Aufschließen .....	- 5 -
2.1.2 Kennzeichnung von Aufschluss- und Verwachsungsverhältnissen .....	- 9 -
2.1.3 Verwachsungskurven .....	- 12 -
2.1.4 Aufschlussmodellierung .....	- 15 -
2.1.5 Messung der Verwachsungsverhältnisse .....	- 18 -
2.1.6 Stereologie.....	- 23 -
2.2 Sortieren .....	- 33 -
2.2.1 Grundvorgänge beim Sortierprozess .....	- 35 -
2.2.2 Kennzeichnung des Sortierergebnisses .....	- 36 -
2.2.3 Anreicherungskurven und abgeleitete Kennzahlen.....	- 39 -
2.2.4 Anpassungsfunktionen zur Darstellung von Anreicherungskurven .....	- 44 -
2.2.5 Trennfunktionen.....	- 46 -
2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg.....	- 48 -
2.3.1 Aufschluss- und Trennerfolgswahlen.....	- 50 -
2.3.2 Abgrenzung der Bewertung auf Grundlage von Trennungskenn- zahlen zur Bewertung nach Trennschnittkennzahlen .....	- 53 -
2.3.3 Einfluss des Trennmerkmals.....	- 55 -
2.3.4 Lage der Grenzkurven .....	- 57 -
2.3.5 Prozesskennzahl .....	- 59 -
2.3.6 Lage des Arbeitspunktes .....	- 61 -
2.3.7 Einfluss stereologischer Effekte.....	- 63 -
2.4 Magnetscheidung.....	- 64 -
2.4.1 Grundlagen des Magnetismus .....	- 65 -
2.4.2 Magnetismus bei Festkörpern und Mineralen .....	- 66 -
2.4.3 Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität .....	- 69 -
2.4.4 Magnetische Suszeptibilität von Kompositpartikeln .....	- 70 -
2.4.5 Messung magnetischer Eigenschaften .....	- 71 -
2.4.6 Trennung in Magnetscheidern .....	- 77 -
3 Materialien und Methoden .....	- 80 -
3.1 Untersuchte Stoffsysteme .....	- 80 -
3.1.1 Synthetische Mischungen .....	- 80 -
3.1.2 Greisen .....	- 81 -
3.1.3 Nephelin-Syenit .....	- 82 -
3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche.....	- 83 -
3.2.1 Zerkleinerung und Klassierung .....	- 84 -
3.2.2 Magnetscheidung .....	- 85 -
3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden .....	- 88 -
3.3.1 Probenteilung, Probenvorbereitung und Mindestprobenmenge.....	- 89 -

3.3.2	Chemische Analysen .....	- 89 -
3.3.3	Mineralogische Analysen .....	- 91 -
3.3.4	Suszeptibilitätsmessungen .....	- 92 -
3.4	Berechnung von Grenzkurven und Stoffdaten .....	- 94 -
3.4.1	Berechnung der Mineralsuszeptibilität .....	- 94 -
3.4.2	Berechnung der Aufschluss-, Trennungs- und Anreicherungsdaten.....	- 95 -
4	Ergebnisse und Diskussion .....	- 97 -
4.1	Magnetische Eigenschaften der Minerale .....	- 97 -
4.1.1	Eigenschaftsermittlung mithilfe des Isodynamik-Scheiders und der Suszeptibilitätswaage .....	- 97 -
4.1.2	Suszeptibilitätsverteilungen .....	- 99 -
4.1.3	Messung der Suszeptibilität reiner Stoffe.....	- 101 -
4.1.4	Suszeptibilität und Zusammensetzung .....	- 102 -
4.1.5	Rechnerische Ermittlung der Suszeptibilität.....	- 107 -
4.2	Aufschluss und Verwachsungsverteilungen.....	- 108 -
4.2.1	Partikelgrößenverteilungen und Gehalte .....	- 109 -
4.2.2	Aufschlusskennwerte und Verwachsungsverhältnisse .....	- 112 -
4.2.3	Verwachsungskurven in Abhängigkeit vom Trennmerkmal .....	- 120 -
4.2.4	Stereologische Transformation .....	- 124 -
4.3	Sortierergebnisse .....	- 129 -
4.3.1	Sortierkennwerte.....	- 129 -
4.3.2	Anreicherungskurven .....	- 133 -
4.3.3	Anpassungsfunktionen .....	- 136 -
4.3.4	Trennfunktionen.....	- 139 -
4.4	Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg .....	- 143 -
4.4.1	Aufschluss- und Trennerfolgswerte.....	- 144 -
4.4.2	Maximaler und erreichter Trennungsgrad .....	- 147 -
4.4.3	Prozesskennzahl .....	- 151 -
4.4.4	Vergleich von Trennschnitt und Trennungskennzahlen .....	- 154 -
4.4.5	Kombination der Kennzahlen mit der Partikelgrößenverteilung .....	- 155 -
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	- 156 -
	Literaturverzeichnis .....	- 159 -
	Abbildungsverzeichnis .....	- 170 -
	Tabellenverzeichnis .....	- 181 -
	Anlagen .....	- 186 -

## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A$	Fläche, Aufschlusskennwert	mm <sup>2</sup> , % <sup>2</sup> , %
$a$	Anpassungsparameter	-
$\alpha$	Seitenneigung, Steigung	°
$B$	Sortierkennzahl	%
$b$	Anpassungsparameter	-
$\beta$	Längsneigung	°
$C$	Gerätekonstante	-
$c$	Gehalt, Anpassungsparameter	%, -
$d$	Durchmesser, Anpassungsparameter	mm, -
$\Delta$	Abweichung	-
$E$	Entmagnetisierungsfaktor, Effizienz	-
$F$	Kraft	N
$G$	Verwachsungsverteilungssumme (Volumen)	-
$g$	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$H$	Magnetische Feldstärke	A/m
$h$	Füllhöhe	mm
$\eta$	Trennungsgrad	%
$I$	Stromstärke	A
$i$	Zählvariable	-
$j$	Zählvariable	-
$K$	Konstante	-
$\kappa$	Trennschärfe	-
$M$	Magnetisierung	A/m
$M$	Verwachsungsverteilungssumme (Masse)	-
$m$	Masse	g
$\mu$	Masseanteil	-
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante ( $12,56637 \cdot 10^{-7}$ )	N/A <sup>2</sup>
$\mu_r$	relative Permeabilität	-
$n$	Anzahl	-
$\xi$	beliebiges Merkmal	-
$\pi$	Kreiszahl (3,14159)	-
$Q(\xi)$	Verteilungssumme	%
$q(\xi)$	Verteilungsdichte	1/[ $\xi$ ]
$R$	Ausbringen	%
$R, R_0$	Messsignal der Suszeptibilitätswaage, Leerwert	-
$r(\xi)$	Kurve der idealen Teilung	%
$\rho$	Dichte	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_r$	relative Dichte	-
$\rho_0$	relative Dichte aller verwachsenen Partikel	-
$s$	Spaltweite	mm

$s$	Feststoffdichte im Modell von MELLOY [1]	$\text{g/cm}^3$
$s(\xi)$	Sortierkurve	%
$T$	Temperatur	K
$T(\xi)$	Trennfunktion	%
$t(\xi)$	Kurve der idealen Trennung und Rückvermischung	%
$u(\xi)$	Verwachsungskurve	%
$V$	Volumen	$\text{cm}^3$
$v$	Volumenanteil	-
$w$	Masseanteil, Maschenweite	-, mm
$x$	Partikelgröße	mm
$\chi$	Volumenbezogene Suszeptibilität des Stoffes	-
$\chi_g$	Massenbezogene Suszeptibilität des Stoffes	$10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$
$\chi_p$	Volumenbezogene Suszeptibilität des Körpers	-
$\chi'_v$	Volumensuszeptibilität von Luft	-
$Z$	Prozessparameter	%

### Indizes

1	Komponente 1 (Wertstoff)
2	Komponente 2 (Berge)
3	Mengenart Volumen
A	Aufschluss
AM	arithmetischer Integralmittelwert
a	Aufgabegut
B	BÉRUBÉ
b	Berge
c	Konzentrat
G	GAUDIN
ges	gesamt
H	spezifisch schwere Phase (heavy)
i	innen
id	ideal
L	spezifisch leichte Phase (light)
m	magnetisch, mittlere, Masse
o	oben
P	Partikel
r	reiner Wertstoff
S	Sortierung
T	Trennung
u	unten
v, Vol	Volumen
w	Wertstoff

## Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsspektrometer
BSE	Rückstreuelektronen (back-scattered electrons)
cgs	GAUß'sches Einheitensystem (centimeter-gram-second)
Col	Columbit
CT	Computertomographie
EDX	Energiedispersive Röntgenanalyse (energy dispersive X-ray spectroscopy)
GXMAP	grain based X-ray mapping
GZ	Greisen Zinnwald
HGMS	Hochgradient-Magnetscheidung
HM	Hammermühle
IAC	Intergranular Area Conservation
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (inductively coupled plasma optical emission spectrometry)
KB	Kegelbrecher
KM	Kugelmühle
MLA	Automatische mineralogische Analyse (englisch: Mineral Liberation Analysis)
MSB	Suszeptibilitätswaage (magnetic susceptibility balance)
NK	Norra Kärr
REE	Seltenerdenelemente (rare earth elements)
RFM	Random Fracture Model
RUIF	Random Uniform Isotropic Fragmentation
SEM	Rasterelektronenmikroskop (scanning electron microscope)
SI	Internationales Einheitensystem (Système international d'unités)
SM	Schwingmühle
SN	Schlagnasenmühle
VBA	Skriptsprache (Visual Basic for Applications)
WM	Walzenmühle
XBSE	extended BSE liberation analysis
Zin	Zinnwaldit

## **Begriffserklärungen**

### Anreicherungskurven

Anreicherungskurven stellen den Zusammenhang unterschiedlicher Produktkennwerte nach der Zerlegung eines Materials in zwei Produkte dar.

### Klaubungskurve

Unter der Klaubungskurve wird im Rahmen dieser Arbeit die Anreicherungskurve einer idealen Klaubung nach dem Wertstoffgehalt des Partikels verstanden.

### Rückvermischung

Rückvermischung bezeichnet einen Prozess, bei dem frei vorliegende Bergepartikel in das Konzentrat ausgetragen werden, welches bereits den gesamten Wertstoff enthält.

### Sortierkurve

Die Sortierkurve ist eine Anreicherungskurve, die für einen Sortierschritt unter Variation eines Prozessparametes gewonnen wurde.

### Trennmerkmal

Das Trennmerkmal ist ein Partikelmerkmal, das zum Trennen des Aufgabematerials ausgenutzt wird.

### Trennschnitt

Unter Trennschnitt wird der Merkmalwert des Partikels verstanden, das mit gleicher Wahrscheinlichkeit in das eine oder in das andere Produkt ausgetragen wird.

### Trennschnittkennzahlen

Trennschnittkennzahlen stellen Kennwerte dar, welche eine Trennung bei einem vorgegebenen Trennschnitt beschreiben.

### Trennungskennzahlen

Trennungskennzahlen beschreiben die gesamte Trennung nach einem Merkmal, das heißt, sie berücksichtigen die gesamte Anreicherungskurve.

### Trennungsgraddiagramm

Das Trennungsgraddiagramm stellt den Zusammenhang des Trennungsgrades mit dem Wertstoffausbringen ins Konzentrat dar.

### Verwachsungsklasse

Partikel eines Mineralgehalts zwischen einer unteren und einer oberen Grenze werden einer Verwachsungsklasse zugeordnet.

### Verwachsungsverteilung

Die Verwachsungsverteilung stellt die Verteilung der Mineralmasse über die Verwachsungsklassen dar.

### Verwachsungskurven

Verwachsungskurven sind die kumulative Darstellung der Verwachsungsverteilungen in Form von Anreicherungskurven.

# 1 Einleitung

Das Gewinnen mineralischer oder metallischer Wertstoffe aus Erzen erfordert das Anreichern der werthaltigen Bestandteile und das Abstoßen der wertlosen Begleitminerale. Hierfür müssen die Komponenten des Verbunds (Wert- und Begleitminerale) über Zerkleinerung mechanisch aufgeschlossen und anschließend voneinander getrennt werden. Die Trennung erfolgt dabei im einfachsten Fall über eine Klassierung oder aber über geeignete Sortierprozesse. Im Ergebnis ist die Anreicherung von allen zum Einsatz gekommenen Prozessschritten abhängig [2-6].

Zerkleinerungsprozesse sind in ihrem Charakter hauptsächlich von zufällig verlaufenden Brüchen geprägt [5-10], welche nur selten selektiven Phänomenen folgen [11-14]. Das Produkt einer Zerkleinerung sind Gemische von Partikeln unterschiedlicher Größe und Zusammensetzung (Verwachsung). Die Eigenschaften der Partikel im Gemisch stellen somit verteilte Größen dar. Je komplexer ein Erz aufgebaut ist, desto komplexer werden gezwungenermaßen auch die Verteilungen der Partikelmerkmale.

Ein der Zerkleinerung nachgeschalteter Sortierprozess hat die Aufgabe, das Partikelgemisch, im Idealfall nach einem Trennmerkmal, in ein Konzentrat und ein Abprodukt zu trennen. Diese Trennung läuft nicht scharf, sondern nach einer gewissen Wahrscheinlichkeit ab, mit der Partikel in das eine oder das andere Produkt ausgetragen werden [3, 4, 15]. Je weiter das Partikelmerkmal vom Merkmalswert am Trennschnitt entfernt liegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit in das entsprechende Produkt ausgetragen zu werden. Dabei gilt in den meisten Fällen, dass eine Trennung in realen Sortiermaschinen oder –apparaten nicht exakt nach einem Merkmal abläuft. Oft haben weitere Partikelmerkmale (beispielsweise die Partikelgröße) einen Einfluss auf die Trennung und verursachen so eine gewisse Unschärfe [2, 3, 5, 6, 15]. Hieraus wird ersichtlich, dass das Ergebnis der Trennung einerseits von der Arbeitsweise der Sortiermaschine abhängt und andererseits durch die Verteilung der Merkmale im Aufgabegut bestimmt wird. Die Aufgabe bei der Optimierung der Anreicherung besteht somit im Finden des bestmöglichen Arbeitspunktes des Sortierapparates aber auch im Liefern eines gut vorbereiteten Aufgabematerials für den Sortierprozess.

Zur Beschreibung des Aufschlusses durch Zerkleinerung und der nachfolgenden Anreicherung über Sortierprozesse wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von

Modellen und Kennwerten entwickelt, welche in der Lage sind, jeweils einen der Teilprozesse zu beschreiben [3, 15-18]. Kennwerte, die den Aufschluss und die Anreicherung auf einer vergleichbaren Basis beschreiben existieren bisher nicht, beziehungsweise konnten aufgrund der fehlenden analytischen Möglichkeiten nicht bis zur Anwendung gebracht werden [2, 19, 20].

Im Rahmen dieser Arbeit werden vorhandene Modelle zur Beschreibung von Sortiererergebnissen [17, 19-22] aufgegriffen und durch das Ergänzen von Verwachsungskurven um die fehlenden Aufschlusskennwerte erweitert [23-25]. Daten der Verwachsungsverteilungen und Partikeleigenschaften stammen aus einem modernen automatischen 2D-Mineralanalysesystem [26, 27]. Solche Analysengeräte liefern eine Vielzahl hochwertiger Daten über das Partikelgemisch der Probe, welche auszugsweise vorgestellt werden. Sie bergen aber auch einen in seiner Ausprägung oft unbekanntem stereologischen Fehler bei der Übertragung der im Schriff ermittelten Daten auf die räumliche Grundgesamtheit in sich [9, 10, 28-32]. Mithilfe eines einfachen stereologischen Transformationsmodells wird der Fehler anhand zweier untersuchter Erzsysteeme verdeutlicht.

Am Beispielsortierschritt Magnetscheidung werden die erweiterten Modelle getestet sowie der Einfluss des gewählten Trennmerkmals auf Verwachsungskurven [25] und Anreicherungsergebnisse gezeigt und diskutiert. Es erfolgt darüber hinaus eine Berechnung von Trennfunktionen basierend auf den Einzelpartikeldaten der Aufschlussanalyse und der Kombination mit dem Sortiermerkmal „magnetischer Suszeptibilität“. Hierbei erfolgt die Berechnung der Partikelsuszeptibilität aus der mineralogischen Partikelzusammensetzung und der Mineralsuszeptibilität.

Die für solche Betrachtungen erforderlichen Daten zur magnetischen Suszeptibilität der Minerale sind in der Literatur nur spärlich verfügbar [33-36]. Erschwerend kommt hinzu, dass die Mineralsuszeptibilität stark von der chemischen Zusammensetzung abhängig [34, 35, 37, 38], somit oft lagerstättenspezifisch [34, 39, 40] und selbst innerhalb der Lagerstätte nicht zwingend eine konstante Größe ist. Mithilfe von Suszeptibilitätsmessungen an definierten Merkmalklassen wird die Suszeptibilität der Hauptkomponenten der Erzsysteeme bestimmt. Hierbei ist es gelungen, durch die Kombination von Aufschlussanalysen und Suszeptibilitätsmessungen ein alternatives Vorgehen zur Bestimmung von Mineralsuszeptibilitäten vorzuschlagen, welches ohne das Auslesen von Reinmineralproben aus Streupräparaten auskommt.

## 2 Theoretische Grundlagen zum Aufschluss- und Trennerfolg

Metallische oder mineralische Rohstoffe liegen in Erzen verwachsen mit Gangmineralen und mit umgebendem taubem Gestein vor. Eine Aufbereitung erfordert folglich immer ein mechanisches Aufschließen zum Freilegen der werthaltigen Strukturen und ein Trennen dieser werthaltigen Strukturen von den Begleitmineralen. Über den Erfolg einer Aufbereitung entscheiden sowohl das Ergebnis der Aufschlusszerkleinerung als auch das Ergebnis der anschließenden Trennung mithilfe von Klassier- und Sortierverfahren. Letzteren sind durch die vorliegenden Verwachsungsverhältnisse nach der Zerkleinerung theoretische Grenzen vorgegeben, die nur über eine Verbesserung des mechanischen Aufschlusses und nicht über eine Optimierung des Trennverfahrens verschoben werden können [40]. Der mechanische Aufschluss verbessert sich allgemein mit zunehmender Zerkleinerung [5, 10]. Sortierverfahren weisen in Bezug auf die Partikelgröße eine untere Grenze auf, deren Unterschreiten zu Einbußen in der Selektivität des Verfahrens führt [2, 32]. Daraus wird ersichtlich, dass die dem Sortierschritt zuzuführende optimale Aufgabekörnung von beiden Teilschritten (mechanischer Aufschluss und Trennung) abhängig ist.

Die Beschreibung des Aufbereitungserfolgs und im Speziellen von Sortierergebnissen erfolgt üblicherweise mithilfe der Größen Masse bzw. Massestrom und Konzentration. Viele weitere aus der Literatur bekannte Kennzahlen stellen aus ihnen abgeleitete Größen dar [3, 15, 16]. Im einfachsten Fall betrachtet man ein Gemisch (Erz) aus zwei Komponenten, dem Wertstoff (Index 1) und den als Berge bezeichneten wertstofffreien Anteil (Index 2). Der Gehalt  $c_{i,j}$  ist die Konzentration einer Komponente  $i$  im Produkt  $j$  (Formel (1)). Unter dem Produkt  $j$  kann man das Aufgabematerial (Index a), die Abgänge (Index b) oder das Konzentrat (Index c) verstehen. Betrachtet man das reine werthaltige Mineral (Index r), so stellt der Gehalt dessen Konzentration an Wertelementen (Wertstoff) dar.

$$c_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{m_{j,\text{ges}}} \cdot 100 \text{ in\%} \quad (1)$$

Das Masseausbringen  $R_{m,j}$  kennzeichnet die im Produkt  $j$  ausgetragene Masse bezogen auf die Gesamtmasse bzw. auf die Masse an Aufgabegut.

$$R_{m,j} = \frac{m_j}{m_{\text{ges}}} \cdot 100 \text{ in\%} \quad (2)$$

Für das Masseausbringen im Konzentrat gilt:

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

$$R_{m,c} = \frac{m_c}{m_{\text{ges}}} \cdot 100 = \frac{c_{1,a} - c_{1,b}}{c_{1,c} - c_{1,b}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (3)$$

Unter Wertstoffausbringen  $R_{1,c}$  versteht man den im Konzentrat ausgebrachten Anteil des Wertstoffes oder Wertminerals. Es berechnet sich aus dem Masseausbringen im Konzentrat multipliziert mit dem Quotienten aus Konzentratgehalt zu Aufgabengehalt, welcher allgemein als Anreicherungsverhältnis bezeichnet wird.

$$R_{1,c} = R_{m,c} \frac{c_{1,c}}{c_{1,a}} \cdot 100 = \frac{c_{1,a} - c_{1,b}}{c_{1,c} - c_{1,b}} \cdot \frac{c_{1,c}}{c_{1,a}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (4)$$

Das Bergeausbringen  $R_{2,c}$  ist demzufolge der im Konzentrat ausgebrachte Anteil an wertstofffreier Masse.

$$R_{2,c} = \frac{c_{1,a} - c_{1,b}}{c_{1,c} - c_{1,b}} \cdot \frac{c_r - c_{1,c}}{c_r - c_{1,a}} \cdot 100 = R_{m,c} \cdot \frac{c_r - c_{1,c}}{c_r - c_{1,a}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (5)$$

Setzt man die Konzentration des Wertstoffs mit  $c_r = 100 \%$  (Wertstoff = Wertmineral) folgt für das Bergeausbringen:

$$R_{2,c} = R_{m,c} \cdot \frac{100 - c_{1,c}}{100 - c_{1,a}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (6)$$

Sofern keine genauere Eingrenzung erforderlich ist, wird im Folgenden unter den angegebenen Ausbringenswerten (Wertstoff, Berge und Masse) der jeweilige Wert für das Konzentrat verstanden.

Die nachfolgenden Abschnitte geben einen grundlegenden Einblick in die Thematik des mechanischen Aufschließens (Abschnitt 2.1) und des Sortierens (Abschnitt 2.2) sowie der Kennzeichnung der Prozesse über Diagramme und Kennzahlen, bevor die Verwachsungs- und Anreicherungskurve in einem gemeinsamen Diagramm auf eine vergleichbare Basis gestellt werden (Abschnitt 2.3). Im Abschnitt 2.4 wird auf den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Sortierprozess Magnetscheidung sowie das für die Magnetscheidung entscheidende Trennmerkmal Suszeptibilität eingegangen.

### 2.1 Mechanisches Aufschließen

Unter dem mechanischen Aufschließen versteht man das Freilegen werthaltiger Bestandteile aus einer Matrix nicht werthaltigen Materials durch Einbringen mechanischer Energie [5, 10]. Im Sinne der Aufbereitung von Primärrohstoffen können diese werthaltigen Bestandteile der Wertstoff selbst oder eine den Wertstoff ent-

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

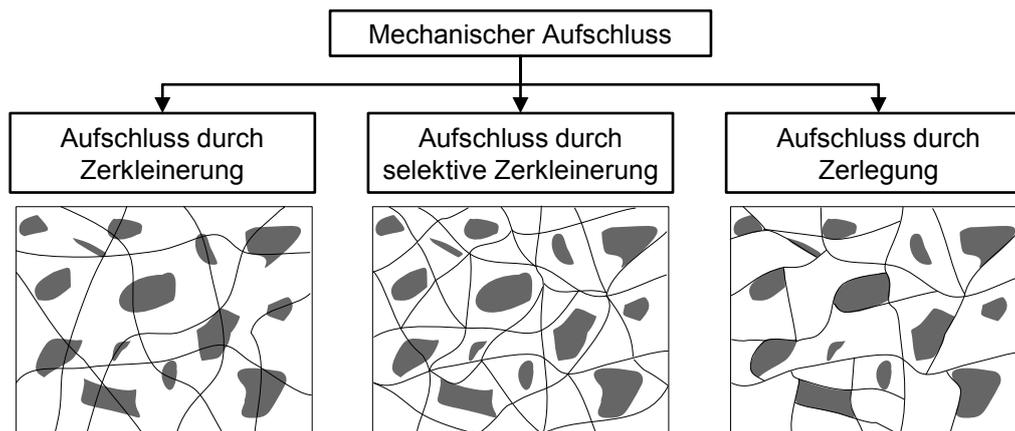
haltende Phase beziehungsweise ein Mineral sein. Berücksichtigt man die dem mechanischen Aufschließen nachfolgenden Anreicherungsprozesse, kann man unter Wertstoff auch alle Phasen beziehungsweise Minerale verstehen, die eine ausgeprägte, zur Trennung herangezogene Eigenschaft aufweisen. Unter den Verwachsungsverhältnissen eines zerkleinerten Erzes wird im Folgenden die Verteilung des Wertstoffs auf die Partikel des Rohstoffs verstanden. Hierbei liegt der Fokus auf für die Aufbereitung relevanten Größen wie dem Wertstoffgehalt der Partikel oder dem Anteil freigelegter Oberfläche des Wertstoffs.

### 2.1.1 Grundvorgänge beim mechanischen Aufschließen

GAUDIN [5] führt das Aufschließen des Wertstoffs auf zwei wesentliche Mechanismen zurück: Aufschluss über ungerichtete Brüche („Aufschluss durch Zerkleinerung“) und durch Brüche entlang der Korn- bzw. Phasengrenzen („Aufschluss durch Freilegung“). Der Aufschluss durch Zerkleinerung zeichnet sich durch einen ungerichteten, zufälligen Bruchverlauf aus, welcher unabhängig von Mineraleigenschaften und Partikelzusammensetzung durch das Material verläuft. Beim Aufschluss durch Freilegung verlaufen die Brüche hingegen gerichtet, vorzugsweise entlang der Phasen- bzw. Mineralkorngrenzen. Hierbei wird die freigelegte Komponente im Partikelgrößenbereich angereichert, der dem Mineralkorngrößenbereich im Erzkörper entspricht [5, 12]. Diese Mechanismen werden als Grenzfälle angegeben, zwischen denen sich je nach Erztyp die reale Aufschlusszerkleinerung einordnet. Durch SCHRANZ [12] wurde eine Untergliederung der gerichteten Brüche in selektive Zerkleinerung und Zerlegung (Freilegung) getroffen, wodurch Festigkeiten der Minerale und der Mineralkorngrenzen Berücksichtigung finden. Selektive Zerkleinerung tritt auf, wenn ein Mineral des Erzes eine geringere Festigkeit oder eine höhere Fehlstellendichte bzw. Fehlstellengröße aufweist [12, 41]. Selektive Zerkleinerung führt zur Anreicherung der Komponenten in verschiedenen Partikelgrößenbereichen [12].

Typischerweise erfolgt der mechanische Aufschluss bei der Zerkleinerung von Erzen durch Reduzierung der Partikelgröße [42, 43]. Dies gilt vor allem, wenn sich die mechanischen Eigenschaften der miteinander verwachsenen Minerale ähneln und diese feste Bindungen zueinander aufweisen [12, 42].

## 2.1 Mechanisches Aufschließen



**Abbildung 1: Untergliederung des mechanischen Aufschlusses in drei wesentliche Brucharten**

KING [14] unterscheidet bei der Modellierung der Aufschlusszerkleinerung 6 gerichtete Bruchphänomene, die von zufälligen Bruchverläufen abweichen. Diese Bruchphänomene lassen sich jedoch mehr oder weniger der selektiven Zerkleinerung und der Zerlegung zuordnen, wobei die Übergänge fließend sind.

**Selektive Zerkleinerung:** Die Zerkleinerung der Minerale läuft selektiv ab, was bedeutet, dass ein Mineral stärker als das andere zerkleinert wird. Hieraus resultiert eine größenabhängige Variation der Partikelzusammensetzung. Die selektive Zerkleinerung ist abhängig von Fehlstellengrößenverteilungen in den Mineralen und der Mineralbruchzähigkeit.

**Unterschiedliches Bruchverhalten der Partikel:** Hierunter wird die Abhängigkeit der partikelgrößenabhängigen Bruchfunktion zur Partikelzusammensetzung verstanden. Ist ein Partikel aus Mineralen zusammengesetzt, die Unterschiede in ihren physikalischen Eigenschaften aufweisen, so herrschen in diesem Partikel Spannungen vor, die das Bruchverhalten beeinflussen. Die Spannungen werden nur über den Bruch des Partikels abgebaut, sodass der Bruch dieser Partikel begünstigt ist.

**Bevorzugte Bruchverläufe:** Bevorzugte Bruchverläufe treten auf, wenn das Verzweigen von Rissen besonders in einem Mineral vonstattengeht. Hierdurch resultiert eine Anreicherung der bevorzugt gebrochenen Minerale in feineren Größenklassen der entstehenden Verteilung. Dieses Bruchphänomen tritt in der Praxis häufig auf.

**Brüche entlang von Phasengrenzen:** Bei diesem Bruchphänomen verlaufen die Risse bevorzugt entlang der Phasengrenzen. Solange dieses Phänomen nicht so stark ausgeprägt ist, dass vermehrt Mineralfreilegung auftritt, hat es keinen nennenswerten Einfluss auf den mechanischen Aufschluss.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

**Aufschluss durch Zerlegung (Freilegung):** Dieses Bruchphänomen stellt einen Sonderfall der Brüche entlang von Phasengrenzen dar. Ein Aufschluss durch Freilegung tritt auf, wenn zwischen den miteinander verwachsenen Minerale nur schwache Bindungskräfte vorliegen. Brüche verlaufen somit nur noch entlang der Phasengrenzen. Es resultiert eine Anreicherung freigelegter Minerale im Größenbereich der Mineralkörner in den Aufgabepartikeln. Dieser Effekt kann im Modell von KING [14] berücksichtigt werden, indem im ANDREWS-MIKA-Diagramm [44] für den Bereich des vollkommenen Aufschlusses ein größerer Wert angenommen und die Bruchfunktion für den entsprechenden Größenbereich angepasst wird (Beispiel im Anhang A.3).

**Grenzbereichsbrüche:** In der Nähe der Phasengrenze unterschiedlicher Minerale treten bei Beanspruchung hohe Spannungen auf, wenn sich die Elastizitätsmoduln deutlich unterscheiden. Als Ergebnis verlaufen und verzweigen sich Risse besonders in diesem Bereich. Dadurch entstehen dort feinere Partikel, welche zudem schlechter aufgeschlossen sein können als größere.

Ein Nachweis des Aufschlusses durch Brüche entlang von Korngrenzen ist schwer möglich, weshalb dieses Phänomen für typische Erzsysteeme lange ganz verneint wurde [42, 43]. Der erste Beweis für das Aufschließen durch Freilegung wurde von HSIH [11] geliefert. Er zeigte, dass bei Unterschieden in den mechanischen Eigenschaften der Minerale ein Bruch auch entlang der Korngrenzen verläuft. Der wesentliche Einflussfaktor ist der Härteunterschied zwischen den Mineralen, wobei auch eine geringe Abhängigkeit zur Spaltbarkeit der Minerale besteht. Dies wies er anhand von Untersuchungen zweier Erzsysteeme mit großem Härteunterschied und an 4 Datensätzen verschiedener anderer Wissenschaftler nach. HSIH [11] gibt auch Ausnahmen von den gefundenen Zusammenhängen an, die er auf die Festigkeitsverhältnisse des Wertminerals, der Gangart und der Grenzfläche zurückführt. Weiterhin sind Bruchrichtung und Bruchverlauf von der Richtung der Krafteinleitung und vom Verlauf der Korngrenzen abhängig. Ein weiterer Nachweis von Brüchen entlang der Phasengrenzen gelang FANDRICH [45] bei der Untersuchung von Bruchphänomenen bei der Gutbettzerkleinerung über den Vergleich der Gesamtphasengrenzfläche zwischen den Komponenten vor und nach der Zerkleinerung. Darüber hinaus gelang der Nachweis von Brüchen im Phasengrenzbereich über das Betrachten des Verlaufes der Gesamtphasengrenzfläche in Abhängigkeit der Partikelgröße. Hierbei wurden feine, schlecht aufgeschlossene Partikel aufgefunden,

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

die nur aufgrund von selektiven Bruchverläufen im Phasengrenzbereich entstanden sein konnten. Entgegen den Aussagen von HSIH sind nach FANDRICH die ausschlaggebenden Mineraleigenschaften für selektives Zerkleinerungsverhalten unklar, da in seinen Untersuchungen die miteinander verwachsenen Minerale die gleiche Härte aufwiesen. Als Ursache wird die Sprödigkeit der Minerale vermutet.

Selektive Bruchphänomene wurden experimentell durch mehrere Arbeiten nachgewiesen [46, 47]. Als Ursachen selektiver Bruchverläufe konnten neben den oben genannten theoretischen Betrachtungen zwei Effekte angegeben werden. Bei ausgebildeten Spaltflächen im Mineral (Spaltbarkeit), verlaufen Brüche entlang dieser Flächen. Reste des gut spaltbaren Minerals haften am weniger gut spaltbaren Mineral [12]. Besteht ein großer Unterschied in der Sprödigkeit der Minerale, so unterscheidet sich in ihnen auch die Anzahl der Fehlstellen. Minerale mit Neigung zum Sprödbbruch haben eine größere Anzahl von Fehlstellen und dadurch eine Tendenz Risse zu verzweigen [13, 41]. Aus diesem Grund finden sich spröde Minerale angereichert im Feingut.

Dem Bereich des Aufschlusses durch Zerkleinerung wurde in der Vergangenheit große Beachtung geschenkt. MELOY [7] stellte 1984 acht wesentliche Theoreme auf, die den mechanischen Aufschluss bei der Zerkleinerung beziehungsweise die Zerkleinerung durch ungerichtete, zufällige Bruchverläufe beschreiben. Den Beweis der Gültigkeit seiner Theoreme führt er auf Basis von Zerkleinerungsmodellierungen an einem simulierten binären Erzsystern aus monodispersen Kugeln. An dieser Stelle sollen nur die wichtigsten Aussagen wiedergegeben werden: 1. Die Größe der Gesamtphasengrenzfläche ist konstant (Dieses Theorem geht ursprünglich auf STEINER [43] zurück.); 2. Die Oberfläche verwachsener Partikel ist konstant und 3. Die Masse verwachsener Partikel ist direkt proportional zur Partikelgröße. In weitergehenden Untersuchungen stellte MELOY [1] 11 weitere, ergänzende Theoreme auf. Diese Theoreme wurden durch BARBERY [9] kritisch überprüft, korrigiert und ergänzt, so dass zur Beschreibung der Zerkleinerung und des Aufschlusses durch zufällige, ungerichtete Brüche insgesamt 30 Theoreme existieren. Die Theoreme zum Aufschluss durch Zerkleinerung finden sich sowohl in den Arbeiten zur Aufschlussmodellierung (Abschnitt 2.1.4) als auch in einem Teil der Modelle zur stereologischen Transformation zweidimensional gewonnener Verwachsungsverteilungen (Abschnitt 2.1.6) wieder.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Zerkleinerungsprozesse weisen im Allgemeinen einen geringen Wirkungsgrad auf [10]. Stellt die Zerkleinerung nur das Mittel zum Aufschließen des Wertstoffes dar, so ist der Wirkungsgrad sogar noch geringer, da der Energieeintrag als nicht selektiv anzusehen ist. Über verschiedene Methoden ist versucht worden, die Selektivität zu steigern, um einerseits weniger Wertstoff zu übermahlen und andererseits bessere Aufschlussresultate zu erzielen [48]. Der Weg, eine effizientere Aufschlusszerkleinerung des Wertstoffes zu erreichen, liegt in der Anpassung der Beanspruchungsmechanismen, sodass Brüche entlang der Phasengrenzen (Aufschluss durch Freilegung) bevorzugt werden. Hierfür muss beispielsweise die Beanspruchungsgeschwindigkeit gesenkt werden. Das reduziert den bis zum Bruch eingetragenen Anteil mechanischer Energie, womit ungerichtete Bruchverläufe und eine starke Verzweigung der Brüche verringert werden können [13]. Weiterhin sollte die Kraftübertragung von Partikel zu Partikel erfolgen, wie es bei autogener Mahlung oder in Gutbettwalzenmühlen der Fall ist. Darüber hinaus ist eine gezielte Vorbehandlung des Gutes, beispielsweise durch thermische Energie, in Betracht zu ziehen [13].

Der oben getroffenen Aussage zur Verbesserung des Aufschlusses durch Verringerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit stehen die Beobachtungen von SCHRANZ [12] entgegen, wonach Maschinen mit Schlag- und Prallbeanspruchung als besonders positiv für die Zerlegung verwachsener Partikel beschrieben werden. Diese Selektivität wird auf das bessere Ausnutzen tektonisch gegebener Schwachstellen zurückgeführt.

Eine Zerkleinerungstechnik, welche als besonders selektiv gilt, stellt die elektrohydraulische Zerkleinerung durch gepulste Stromstöße in Wasser dar [49, 50]. Die von einer Elektroden Spitze eingeleiteten Stromstöße müssen durch das Gemisch aus Feststoff und Wasser zur gegenüberliegenden Elektrode durchschlagen. Der Durchschlag erfolgt in Form eines Plasmakanals, welcher den sich ausbildenden elektrischen Feldern durch das Material folgt [50, 51]. Die Felder sind besonders dort groß, wo Minerale unterschiedlicher Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante aneinander grenzen [50]. Hierdurch zerkleinert dieses Verfahren besonders entlang der Phasengrenzen unterschiedlicher Minerale, wodurch es besonders selektiv ist [49, 50].

### 2.1.2 Kennzeichnung von Aufschluss- und Verwachsungsverhältnissen

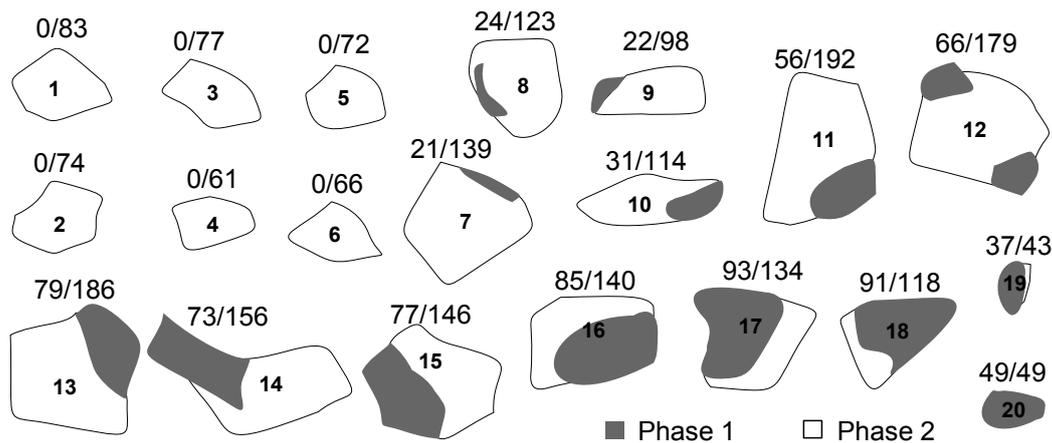
Die erste formale Beschreibung des mechanischen Aufschlusses geht auf GAUDIN [5] zurück. Er definierte einen Aufschlussgrad als Verhältnis der frei vorliegenden

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Wertstoffmasse zur Masse aus frei und in Verwachsung vorliegendem Wertstoff (Gleichung (7)).

$$A_G = \frac{m_{\text{frei}}}{m_{\text{frei}} + m_{\text{verwachsen}}} \cdot 100 \text{ in\%} \quad (7)$$

Betrachtet man das Beispiel verwachsener Partikel in Abbildung 2 unter der Annahme einer Dichte von  $4 \text{ g/cm}^3$  für Phase 1 und  $2,6 \text{ g/cm}^3$  für Phase 2, so ergibt sich der Aufschlussgrad zu rund  $6,1 \%$  (siehe auch Abbildung 3).



**Abbildung 2: Zerkleinertes binäres Erzsystme. Die erste Zahl gibt die Fläche der Phase A, die zweite Zahl die Gesamtfläche des Partikelschliffes an.**

Aus praktischer Sicht ist die alleinige Betrachtung des frei vorliegenden Wertstoffs nicht sinnvoll, da kein Sortierprozess nur auf freie Partikel anspricht. Vielmehr ist die Festlegung sinnvoll, alle Partikel ab einem gewissen Wertstoffgehalt, beispielsweise größer  $90 \%$ , als aufgeschlossen anzusehen [32, 52]. In Gleichung (7) umfasst der Zähler dann die Wertstoffmasse in Partikeln eines Gehalts von  $\geq 90 \%$  (Nummer 19 und 20), wodurch sich ein Aufschlussgrad  $A_{G,90}$  von  $10,7 \%$  ergibt.

Eine weitere Definition zur Beschreibung des mechanischen Aufschlusses wurde durch BÉRUBÉ [53, 54] aufgestellt. Sein Aufschlusskoeffizient bezieht die vorliegende Wertstoffmasse auf die Masse aller Wertstoff enthaltenden Partikel (Gleichung (8)). Dies entspricht dem mittleren Wertstoffgehalt der werthaltigen Partikel.

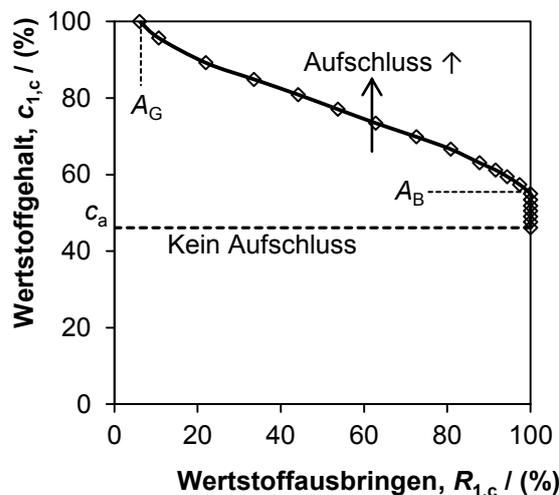
$$A_B = \frac{m_{\text{frei}} + m_{\text{verwachsen}}}{m_{\text{ges}}} \cdot 100 \text{ in\%} \quad (8)$$

Im Beispiel aus Abbildung 2 ergibt sich ein Aufschlusskoeffizient von  $55 \%$  (siehe auch Abbildung 3). Zu berücksichtigen ist, dass dieser Aufschlusskennwert abhängig vom Wertmineralgehalt im Erz  $c_{1,a}$  ist und nur Werte größer  $c_{1,a}$  annehmen kann.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Schwankt der Gehalt im Aufgabegut der Zerkleinerung, sind die Aufschlusskennwerte nach der Definition von BÉRUBÉ nicht mehr uneingeschränkt vergleichbar.

Neben einer auf Parametern basierenden Bewertung des mechanischen Aufschlusses, welche lediglich einen Punkt der Verwachsungsverteilung betrachten, sollte die gesamte Verteilung für eine Bewertung herangezogen werden [43]. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung des HALBICH-Diagramms [3], welches den kumulativen Wertstoffgehalt über dem kumulativen Wertstoffausbringen darstellt (Abbildung 3). Hierbei werden die Partikel mit abnehmendem Wertstoffgehalt betrachtet. Diese Darstellung hat den Vorteil, dass die theoretische Grenze eines jeden Sortierprozesses abgebildet wird und somit ein Bezug auf Sortierprozesse genommen werden kann, indem man beide in einem Diagramm gemeinsam aufträgt [55]. Zum Vergleich des Aufschlusserefolgs verschiedener Zerkleinerungsuntersuchungen an einem Material werden die resultierenden Verteilungen in ein gemeinsames Diagramm eingetragen. Zu beachten ist die Abhängigkeit des Kurvenverlaufs vom Wertmineralgehalt im Aufgabegut, wodurch die Vergleichbarkeit verschiedener Versuche bei stark schwankendem Gehalt nicht mehr gegeben ist.



$$\rho_1 = 4\text{g/cm}^3, \quad \rho_2 = 2,6\text{g/cm}^3$$

$$A_G = \frac{49}{804} \cdot 100\% = 6,1\%$$

$$A_B = \frac{804 \cdot 4\text{g/cm}^3}{804 \cdot 4\text{g/cm}^3 + 1013 \cdot 2,6\text{g/cm}^3} \cdot 100\%$$

$$A_B = 55,0\%$$

**Abbildung 3: HALBICH-Diagramm mit den Aufschlussgraden nach GAUDIN und BÉRUBÉ für das Beispielerz aus Abbildung 2**

Neben den genannten üblichen Parametern existieren noch weitere Möglichkeiten, den Aufschlusszustand des Wertstoffes auszudrücken. DELL [56] schlägt beispielsweise eine Aufschlussgraddefinition vor, welche den Zusammenhang von Ausbringen und Gehalt (Abbildung 3) linearisiert und die Steigung der Geraden als Maß für den Aufschluss verwendet. Durch HOLLAND-BATT [57] wurde der mechanische Aufschluss auf Grundlage von Sortierversuchen in inkrementellen Schritten berechnet. Bei

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

WIEGEL [58] und WIGHTMAN [59] wird der Aufschluss über den Kennwert nach BÉRUBÉ [53] beschrieben und mit Partikelgrößenverteilungen kombiniert. Allen Vorgehensweisen ist gemeinsam, dass sie auf verschiedene Art versuchen, die Verwachsungsverteilung zu berücksichtigen.

### 2.1.3 Verwachsungskurven

Verwachsungskurven stellen den Zusammenhang zwischen den vorliegenden Verwachsungsverhältnissen und aufbereitungstechnischen Parametern dar. Solche Darstellungen lassen sich durch ein Zerlegen des Versuchsguts in Merkmalklassen [10, 16, 40, 60] und anschließender chemischer Analyse oder durch direkte Messung der Verwachsungsverhältnisse [20, 55] erzeugen. Werden Materialien in Merkmalklassen zerlegt, ist das Vorgehen so gestaltet, dass kinetischen Effekte keinen Einfluss auf den Verlauf der ermittelten Kurven haben. Im Fall einer direkten Messung nutzt man die Modellvorstellung eines ideal arbeitenden Trennapparates [16, 20, 60], welcher die Partikel mit abnehmendem Wert des Trennmerkmals (Partikeldichte, Partikel-suszeptibilität oder auch Partikelgehalt) in ein fiktives Produkt austrägt. Ein solches Vorgehen entspricht einer idealen Klaubung nach dem interessierenden Merkmal. Die Verwachsungskurve ergibt sich, indem man die Partikel mit abnehmendem Wertstoffgehalt ordnet und kumulative Kenngrößen (Gehalt, Masseausbringen, Wertstoffausbringen) bildet.

$$c_{P,i} \geq c_{P,i+1} \quad (9)$$

Demnach gilt auch:

$$\frac{\sum_{i=1}^n m_{w,i}}{\sum_{i=1}^n m_{P,i}} \geq \frac{\sum_{i=1}^{n+1} m_{w,i}}{\sum_{i=1}^{n+1} m_{P,i}} \quad (10)$$

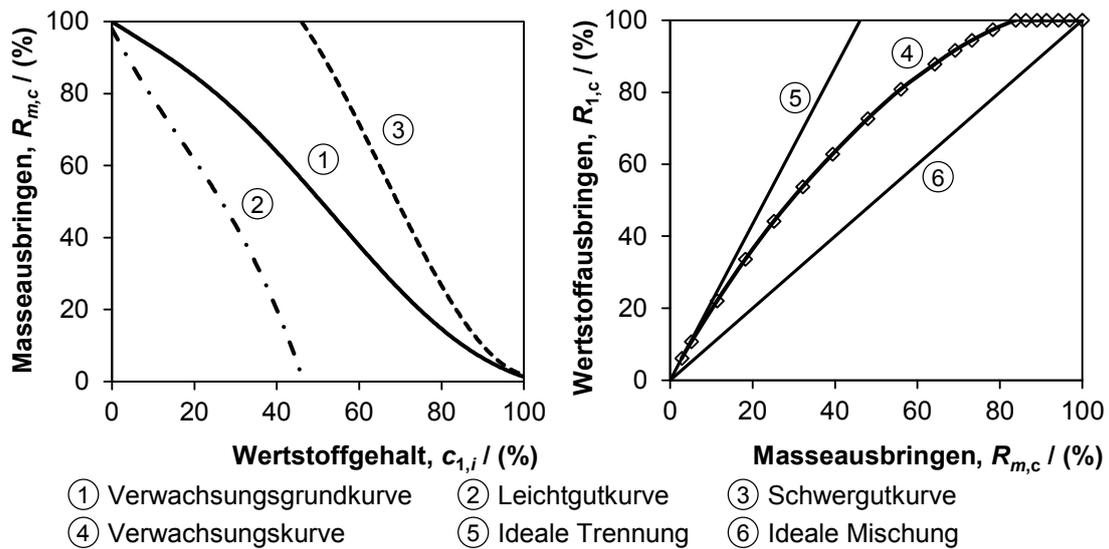
Die Wertstoffmasse im Partikel kann maximal den Wert der Partikelmasse annehmen.

$$m_{w,P} \leq m_P \quad (11)$$

Verwachsungskurven wurden zuerst durch HENRY und REINHARDT zur Beschreibung der Aufbereikbaarheit von Steinkohlen entwickelt [10]. Sie lassen sich jedoch auf beliebige Erzsysteeme übertragen. Das HR-Diagramm basiert auf der Zerlegung des Rohgutes in Dichteklassen, woraus drei Kurven – die Verwachsungsgrundkurve, die

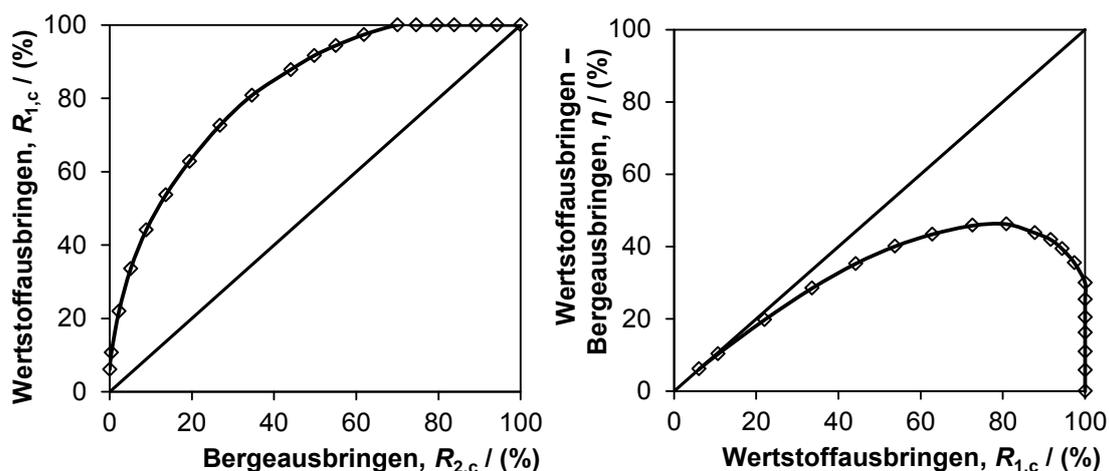
## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Schwimmgutkurve und die Sinkgutkurve – in der Auftragung des Masseausbringens über dem Gehalt gewonnen werden können. Eine Weiterentwicklung des HR-Diagramms stellt die Mittelwertkurve nach MAYER [3, 60] dar. Die Mittelwertkurve ergibt sich ursprünglich aus der Auftragung des Masseausbringens über dem Produktgehalt [10, 60], ist jedoch in einem Teil der Literatur auch als Auftragung des Masseausbringens über dem Wertstoffausbringen (MAYER-Diagramm) [3] zu finden.



**Abbildung 4: HENRY-REINHARDT-Diagramm (links) und MAYER-Diagramm in abgewandelter Form (rechts) für eine Dichtentrennung des Beispielerzes aus Abbildung 2**

Für die Verwachsungskurven als Darstellung im HR-Diagramm als auch im MAYER-Diagramm gilt, dass die Form der Kurven vom Gehalt des Materials abhängig ist. Unterliegt der Gehalt des Materials Schwankungen, so sind die in diesen Diagrammen dargestellten Verwachsungskurven nicht uneingeschränkt vergleichbar.



**Abbildung 5: Vom Aufgabengehalt unabhängige Darstellungen von Verwachsungskurven: FUERSTENAU-2-Diagramm (links) und Trennungsgradkurve (rechts) für eine Dichtentrennung des Beispielerzes aus Abbildung 2**

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Verwachsungskurven ohne Abhängigkeit zum Gehalt des Materials stellen beispielsweise die Auftragungen vom Wertstoffausbringen über dem Bergeausbringen (FUERSTENAU-2-Diagramm) [3, 16] oder auch die Auftragung der Differenz von Wertstoffausbringen und Bergeausbringen (Trennungsgrad) über dem Wertstoffausbringen [15, 20] dar (Abbildung 5). Diese Darstellungen wurden ursprünglich nicht zur Veranschaulichung von Verwachsungsverhältnissen, sondern vielmehr zur Darstellung von Sortiererergebnissen entwickelt und werden in Abschnitt 2.2.3 näher erläutert.

Verwachsungskurven kann man auf zwei Wegen erzeugen. Die erste Möglichkeit ist das Zerlegen des Rohgutes in Merkmalklassen. Dies kann beispielsweise nach der Dichte mithilfe von Schwerflüssigkeiten oder auch nach der magnetischen Suszeptibilität im isodynamischen Feld erfolgen. Um einerseits die Abhängigkeit der Verwachsungsverteilung von der Partikelgröße zu berücksichtigen und andererseits Partikelgrößeneinflüsse bei der Zerlegung in Merkmalklassen zu vermindern, empfiehlt sich ein vorgeschaltetes Klassieren der Proben [32, 40]. Wichtig ist bei diesem Vorgehen, dass sich die Dichte und die Suszeptibilität eines Partikels aus den Dichten bzw. Suszeptibilitäten der Phasen gewichtet mit ihrem Anteil ergeben. Folglich kann nur für binäre Systeme und Systeme, die sich auf eine binäre Zusammensetzung zurückführen lassen, eine eindeutige Aussage abgeleitet werden [10]. Weiterhin sind solche Analysen sehr zeitaufwendig und nur für die Partikeleigenschaften Dichte und Suszeptibilität durchführbar.

Eine zweite Möglichkeit, die Verwachsungskurven eines Rohgutes zu ermitteln, besteht in der mikroskopischen Analyse. Diese kann entweder an Streupräparaten durch händisches Einteilen in Zusammensetzungsklassen oder an Schliffebenen von Körnerpräparaten durch automatische Analysensysteme erfolgen [10, 32]. Ein händisches Auslesen von Partikeln aus einem Streupräparat ist sehr zeitaufwendig und erfordert einen erfahrenen Laboranten. Daher findet dieses Vorgehen vordergründig nur noch in Bereichen Anwendung, in denen das zu untersuchende Gut aufgrund von Stückgrößen und anderen Problemen einer automatischen Messung nicht zugänglich ist (beispielsweise im Recycling). Das Messen von Verwachsungsverteilungen anhand von Schliffen von Körnerpräparaten [52] oder auch durch tomographische Messung des gesamten Präparats [61] ist zumindest im erstgenannten Fall Stand der Technik und wird im Abschnitt 2.1.5 nähergehend erläutert.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

### 2.1.4 Aufschlussmodellierung

Der Vorhersage des Aufschlussgrades bzw. der Verwachsungsverteilung wurde seit jeher viel Aufmerksamkeit gewidmet. Das erste Modell zur Vorausberechnung des Aufschlussgrades wurde bereits 1939 durch GAUDIN [5] aufgestellt. Es basiert auf quaderförmigen Erzkörpern mit würfelförmigen Einschlüssen. Bei der Zerkleinerung dieses Erzkörpers wurde von ebenen Bruchflächen parallel zu den Flächen der Einschlüsse ausgegangen. Ein Bruch entlang der Phasengrenzen wurde ausgeschlossen, da dieser Bruchverlauf als praktisch nicht von Relevanz angesehen wurde [5]. Das Modell weist zwar einen sehr einfachen Charakter auf, bildet jedoch in seinen Grundannahmen die Basis vieler nachfolgender Modelle zur Aufschlussmodellierung. Hierzu zählt, dass über einen sehr langen Zeitraum lediglich vom Aufschluss durch Zerkleinerung ausgegangen wurde. Bei WIEGEL [42] wird später zwar zwischen Aufschluss durch Zerkleinerung und durch Zerlegung unterschieden, sein Modell zur Vorausberechnung des Aufschlussgrades auf Basis der Mineralkorngröße und des Wertmineralgehalts berücksichtigt trotzdem nur den Aufschluss durch Zerkleinerung. Der Abgleich seiner mittels Modellierung ermittelten theoretischen Aufschlussgrade mit DAVIS-Tube-Tests und anschließender Dichtefraktionierung an 12 verschiedenen zerkleinerten Magnetitserzen ergab eine gute Übereinstimmung, wodurch dem Aufschluss durch Zerlegung eine untergeordnete Rolle zugewiesen wird [42]. Die Grundannahmen für einen zufälligen, ungerichteten Bruchverlauf wurden von verschiedenen Forschergruppen in drei prinzipiell ähnlichen Modellen zur Vorhersage der Verwachsungsverteilung umgesetzt.

Das erste Modell (Random Fracture Model, RFM) wurde von KING [62] aufgestellt. Es nutzt Sehnenlängenanalysen an Dünnschliffen von Gesteinsbrocken für die Simulation des Aufchlusses durch Zerkleinerung. Grundannahme ist, dass Wertmineral und Bergemineral die gleiche Sprödigkeit aufweisen, wodurch Brüche zufällig und ungerichtet verlaufen. Vorteile dieses Modells zur Vorhersage des Aufschlussgrades in Abhängigkeit der Partikelgröße sind die Unabhängigkeit von empirischen Anpassungskonstanten und die geringe Anzahl von Annahmen zur Einschränkung der Komplexität. KING erreichte eine gute Übereinstimmung mit Versuchsdaten, solange die Partikel recht klein sind. Probleme treten vor allem bei groben Partikeln auf, wenn die Partikelgröße das Zweifache der Mineralkorngröße überschreitet [62]. Entscheidende Weiterentwicklungen der Aufschlussmodellierung basierend auf dem

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

RFM wurden durch SCHNEIDER und KING [14, 41, 63] gemacht. Neben der Erweiterung des Modells von zwei- auf dreiphasige Systeme wurden gerichtete Bruchphänomene berücksichtigt und Populationsbilanzen über das ANDREWS-MIKA-Diagramm [44] eingeführt. Dieses Diagramm stellt die Häufigkeitsverteilung möglicher Produktpartikel in Partikelgröße und Zusammensetzung dar, welche aus der Zerkleinerung eines Ursprungspartikels resultieren kann.

Die Arbeitsgruppe um MELOY stellte das IAC-Modell (Intergranular Area Conservation) auf, welches auf den von ihnen postulierten Theoremen basiert [1, 7]. Mithilfe dieses Modells wurden anfangs nur monodisperse, zweiphasige, kugelförmige Partikel mit ebenen Grenzflächen simuliert, um die Grundannahmen des Modells zu überprüfen [7]. In weitergehenden Studien wurden am gleichen einfachen Modellsystem Häufigkeitsverteilungen für die Partikelzusammensetzung berechnet. Diese Häufigkeitsverteilungen nehmen charakteristische u-förmige Verläufe an [1] (starker Anstieg im Bereich geringer und hoher Wertstoffgehalte der Partikel, siehe Abbildung 73 im Anhang A.3). Diese Verteilungen sind symmetrisch zu einem charakteristischen Punkt, solange von den Grundannahmen des IAC-Modells ausgegangen wird. Weist man den miteinander verwachsenen Phasen Härteunterschiede zu, die einen Anteil von Selektivität in der Zerkleinerung verursachen, dann werden die Verteilungen mit steigendem Härteunterschied unsymmetrisch [64]. Dies wurde durch VAN EGMOND [64] mithilfe von Modellerzen mit oktaeder-, platten- und stäbchenförmigen Einschlüssen nachgewiesen.

Neben der Erweiterung um Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung von Härteunterschieden erfolgte die Einführung von Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Partikelform durch PRETI [65]. Hierdurch wurden zwei wesentliche Erkenntnisse gewonnen: Die Form und Orientierung der Einschlüsse spielt bei nicht kugeligen Partikeln eine große Rolle. Bei der Zerkleinerung bis in den Bereich der Mineral Korngröße bedeutet es nicht zwangsläufig, dass nur einfach verwachsene Partikel (Partikel besteht aus zwei Primärkörnern unterschiedlicher Phasen) auftreten, was bis dahin aber Annahme vieler Modelle war. FERRARA [66] zeigte bei der Berechnung des Aufschlussgrades in Abhängigkeit eines Größenparameters (berechnet aus der Partikelgröße und der Größe der Einschlüsse im Material vor der Zerkleinerung) für verschiedene analytische Erzsysteeme (einfache Geometrien der Einschlüsse in Form von Stäbchen, Schichten, Quadern und Kugeln), dass ab einer Partikelgröße im

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Bereich von kleiner einem Zehntel der Größe der Einschlüsse die Verwachsungskurven von der Textur unabhängig sind.

Eine wichtige Information, die aus der Simulation der Zerkleinerung von Modellersystemen gewonnen werden soll, ist die Streubreite für die Zusammensetzung der resultierenden Partikel. Für ein Modellsystem mit einer eingeschlossenen kubischen Phase wurde gezeigt, dass bis zu einem Verhältnis von 100:1 (Partikel zu Einschluss) die Zusammensetzung der Partikel der des Erzkörpers gleicht [67]. MELOY erweiterte seine Simulationen auch auf dreiphasig aufgebaute Erzsysteeme [68]. Hierbei wurden die gleichen Zusammenhänge gefunden, wie sie bereits von zweiphasigen Systemen bekannt waren, jedoch sind die Daten aufgrund der zusätzlichen Dimension deutlich komplexer. Die Häufigkeitsverteilungen der Partikelzusammensetzung entsprechen in diesem Fall einer dreidimensionalen u-förmigen Funktion [68].

Ein drittes wichtiges Modell zur Beschreibung des Aufschlusses durch Zerkleinerung ist BARBERYS RUIF-Modell (Random Uniform Isotropic Fragmentation) [9, 69]. In diesem Modell wird ein zufälliger, in allen Phasen gleichförmiger und isotroper Bruchverlauf angenommen. Das RUIF-Modell ist nicht nur ein Modell zur Modellierung der aus der Zerkleinerung resultierenden Verwachsungsverteilung, vielmehr bildet es einen wichtigen Grundbaustein des Transformationsmodells nach BARBERY [9, 70] (siehe Abschnitt 2.1.6).

Allen oben genannten Modellen ist die Grundannahme des zufälligen Bruchverlaufs unter Ausschluss von Brüchen entlang der Phasengrenzen gemein. Hierdurch sind Aufschluss- und Bruchverhalten voneinander entkoppelt. Durch CHOI [47, 71, 72] wurde ein gekoppeltes Modell zur Simulation von Aufschluss und Zerkleinerung entwickelt [71]. Für dieses Modell müssen Anpassungsparameter aus Zerkleinerungsuntersuchungen bei unterschiedlichen Beanspruchungszeiten (Kinetik) mit anschließender Aufschlussanalyse [72] gewonnen werden.

In weiteren Arbeiten wurde versucht, die Modelle zur Aufschlussmodellierung über kleine Anpassungen realitätsnaher zu gestalten. YINGLING [73] entwickelte beispielsweise einen eindimensionalen Ansatz zur Aufschlussmodellierung, der jedoch geeignet ist, Mehrkomponentensysteme zu modellieren. Durch STAMBOLIADIS [74] wurde bei einem binären Modellerz ein gehaltabhängiges Bruchverhalten ab Unterschreiten einer kritischen Aufschlussgröße eingeführt. Die kritische Aufschlussgröße stellt hierbei den Punkt dar, ab dem die Partikel von der Ausgangszusammensetzung des

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Erzkörpers abweichen. Eine sehr bedeutende Weiterentwicklung im Bereich der Aufschlussmodellierung stellt die Arbeit von GAY [75] dar, bei dem die Aufschlussmodellierung über dreidimensionale Matrizen erfolgt. Diese Matrizen enthalten die Häufigkeitsverteilung eines Partikels definierter Größe (Größenklasse) und Zusammensetzung (Zusammensetzungs-klasse) die sich aus seiner Zerkleinerung ergeben. Diese Häufigkeitsverteilungen entsprechen Vektoren. Durch Betrachtung von Partikelgrößen- und Zusammensetzungsverteilungen in definierten Klassen spannt sich eine dreidimensionale Matrix auf. Die Eingangsdaten für die Matrix werden aus einer Wahrscheinlichkeitsmethode mit Ansatz maximaler Entropie generiert. Dieses Modell ist nicht nur geeignet Aufschlussergebnisse für mehrphasige Partikel vorherzusagen, sondern es bildet zudem auch die Grundlage für ein weiteres Modell zur stereologischen Transformation von zweidimensionalen Verwachsungsverteilungen (siehe Abschnitt 2.1.6).

Binäre, das heißt nur aus zwei Mineralen aufgebaute Erzsyste-me, welche die Basis vieler Modelle darstellen, kommen in der Natur nahezu nicht vor. Es ist erforderlich, mehrphasig aufgebaute Partikel zu simulieren, da beispielsweise die Mineral-Assoziationen entscheidend für die späteren Sortierprozesse sind [75]. Alle im Partikel vorhandenen Phasen nehmen Einfluss auf das Sortiermerkmal, welches vom Volumenanteil der Phasen (Dichtesortierung, Magnetscheidung) oder vom Anteil an der Partikeloberfläche (Flotation) abhängig ist. Durch HILDEN [76] wurde erstmalig ein Modell zur Aufschlussmodellierung von mehrphasig aufgebauten, dreidimensionalen Erzsyste-men komplexer Verwachsungsstrukturen vorgestellt. Dieses Modell kann mit bis zu 12 Phasen arbeiten. Es sind einfache Verwachsungen, aber auch Einschlüsse und komplizierte Strukturen durch Aufwachsen der Minerale in verschiedenen Generationen und Mineralgrößenverteilungen darstellbar. Beschränkungen weist dieses Modell im bisherigen Entwicklungsstand durch das Verwenden kubischer Phasen und des zufällig ungerichteten Bruchs in Form kubischer Produktpartikel auf. Dies ist der erforderlichen Rechenleistung für die Simulation mehrphasiger, dreidimensionaler Texturen geschuldet.

### 2.1.5 Messung der Verwachsungsverhältnisse

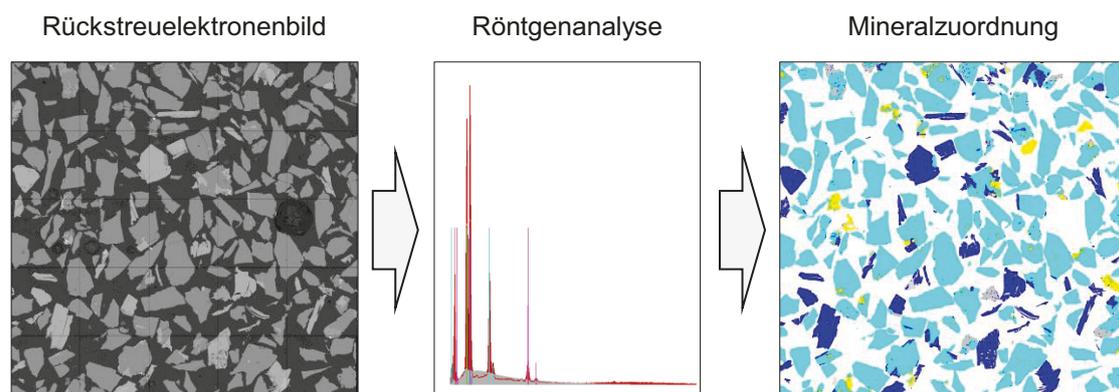
Die mineralogisch-petrographische Analyse basierte lange Zeit ausschließlich auf der lichtmikroskopischen Untersuchung von Gesteinsschliffen, Schliffen von Körnerpräparaten oder auch Streupräparaten [52]. Da das manuelle Analysieren eines

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Schliffes durch einen Laboranten zeitaufwendig und im gewissen Maße subjektiv ist, wurde mit der gesteigerten Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit von Computern an automatischen Systemen zur petrographischen Analyse gearbeitet [52]. Die ersten einfacheren Geräte basierten auf reinen Graustufenbildern des Schliffes [28, 53]. Mit ihnen war es möglich, in deutlich kürzerer Zeit Informationen zum Aufschlussgrad, den Verwachsungsverhältnissen sowie geometrischen Abmessungen von Partikeln und Mineralkörnern zu gewinnen. Die nächste Entwicklungsstufe bestand in der Kopplung bildgebender Messsysteme mit Systemen zur Analyse der chemischen Zusammensetzung einzelner Phasen im Präparat.

### Automatische mineralogisch-petrographische Analyse

Bereits Anfang der 1980er Jahre wurden die ersten Systeme zur automatischen, petrographischen Analyse auf Basis von gekoppelten rasterelektronenmikroskopischen Bildern (Englisch: scanning electron microscopy, SEM) und energiedispersen Röntgenanalysen (Englisch: energy-dispersive X-ray analysis, EDX) entwickelt [52]. Diese Systeme bieten den Vorteil, dass neben den im Schliff erkennbaren Partikel- und Phasenabmessungen (Größe, Form) und der Zusammensetzung der Partikel aus verschiedenen Phasen (Verwachsungen, Phasenanteile) auch eine genaue Analyse der chemischen Zusammensetzung über die energiedispersive Röntgenanalyse möglich ist [26, 27, 52, 77, 78]. Auf diesem Weg lassen sich den erkannten Phasen einzelne Minerale zuweisen, wodurch komplexe Informationen zur Probe gewonnen werden.



**Abbildung 6: Beispiel einer automatischen mineralogischen Analyse mit Graustufenbild (links), EDX-Spektrum (Mitte) und nach Mineralen unterschiedlich eingefärbten Ergebnisbild (rechts)**

Im Rahmen vieler Studien wurden die Leistungsfähigkeit dieser Messanordnung gezeigt und Empfehlungen für die praktische Anwendung gegeben [32, 77-79]. Beispielsweise sollte beim Vorliegen breiter Partikelgrößenverteilungen mit groben

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Partikeln zuerst das Material klassiert, dann die Aufschlussanalyse durchführt und anschließend das Gesamtergebnis rechnerisch aus den Teilergebnissen ermittelt werden [32, 78, 80]. Dies gilt generell, wenn Aussagen über Partikelgrößenabhängigkeiten zu Prozesseigenschaften getroffen werden sollen [52]. Weiterhin ist bei der Bestimmung des Aufschlusses bzw. der Verwachsungsverteilung die Flächenmessungen der Sehnenmessungen vorzuziehen, da der stereologische Fehler so geringer ausfällt [70, 78].

Erste Vergleiche der Ergebnisse aus Aufschlussmodellierungen mit den Ergebnissen der automatischen petrografischen Analyse durch SUTHERLAND [52] wiesen Abweichungen in den erzeugten Verwachsungsverteilungen auf. Hierbei muss jedoch erwähnt werden, dass zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen die Aufschlussmodellierung mit Annahmen arbeitete, die aus heutiger Sicht nicht mehr vollständig gebilligt werden können (siehe Abschnitt 2.1.4). Weiterhin waren die damals verfügbaren Modelle zur stereologischen Transformation noch nicht ausgereift, sodass die Messergebnisse nicht korrigiert wurden [52].

Ein kommerziell verfügbares System zur automatischen mineralogisch-petrografischen Analyse ist der Mineral Liberation Analyzer (MLA) [26, 27], welcher im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kam. Die Funktionsweise und das Messprinzip werden im Abschnitt 3.3.3 näher erläutert.

Entwicklungen im Bereich der 2D-Analyse befassen sich neben der Verbesserung existierender Systeme auch mit der Integration weiterer Messmethoden. Ziele sind die Verringerung der benötigten Messzeit und damit der Kosten sowie eine verbesserte Unterscheidung von Phasen, die in herkömmlichen Systemen aufgrund der gleichen mittleren Atommasse nicht unterschieden werden können (Beispiel: Pyrit und Markasit, beide  $\text{FeS}_2$ ). Eine solche Entwicklung ist die Kopplung von Lichtmikroskopie und SEM-EDX, welche auf Softwarebasis die Bilder beider Verfahren miteinander verrechnet [81].

Die entscheidende Schwäche von zweidimensional, das heißt an Schlifflinien, gewonnenen Daten zur Mineralogie der Proben besteht in der Übertragung auf die räumliche Grundgesamtheit der Probe. Diese Übertragung ist unter dem Begriff Stereologie bekannt und wird im Abschnitt 2.1.6 genauer betrachtet. Neben diesen stereologischen Fehlern können weitere Fehler auftreten, die bei der zweidimensionalen Aufschlussanalyse berücksichtigt werden müssen. Hierunter fallen vor allem Fehler,

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

die beim Erstellen von Partikelpräparaten auftreten, wie beispielsweise Sedimentations- und Entmischungsphänomene [75]. Sedimentationseffekte werden besonders bei Partikeln größer 300 µm als kritisch bewertet [32]. Weichen die Ergebnisse der Bildanalyse mehr als 20 % von denen der chemischen Analyse ab, so sollte ein neues Präparat erstellt werden, da von Präparationsfehlern beziehungsweise einem nicht repräsentativen Schliff ausgegangen werden kann [32]. Zu den potentiellen Fehlern des Präparats kommen Fehlerquellen der Messung hinzu. Hierunter fallen eine falsche Mineralerkennung über die Röntgenanalyse (Eindringtiefe des Strahls und Anregungszone) sowie auch eine zu geringe Anzahl gemessener Partikel, was statistische Unsicherheiten mit sich bringt [75]. Sofern bei Partikelpräparaten eine genügend große Anzahl gemessener Partikel repräsentativ einer größeren Masse entnommen wurde, sind solche Präparate aus Sicht der Übertragbarkeit auf Prozesse vorzuziehen [40]. Weiterhin sind Aufschlussanalysen und Untersuchungen zur Bestimmung der Mineraleigenschaften generell an definierten Merkmalklassen (Größen-, Dichte, Suszeptibilität usw.) durchzuführen [40].

### Computertomographie

Das direkte Messen der räumlichen Form- und Größenparameter sowie der Zusammensetzung der einzelnen Partikel aus verschiedenen miteinander verwachsenen Phasen wurde durch die Einführung der Computertomographie (CT) aus der Medizintechnik in die Aufbereitungstechnik möglich [82]. Die ersten Studien zur Anwendung von CT in der Aufschlussanalyse wurde von LIN 1992 [83] anhand von Kohle und 1995 [61] anhand von Dolomit-Sphalerit-Partikeln einer Größe kleiner 600 µm durchgeführt. Der damals eingesetzte Computertomograph war noch nicht auf den Einsatz zur Aufschlussanalyse optimiert, sodass die verfügbare Auflösung (Voxelgröße 1,3 x 5,0 x 3,3 µm<sup>3</sup>) und die Auswertung (Berechnung des 3D-Abbildes, Partikelsegmentierung, Berechnung der Zusammensetzungs- und Oberflächendaten) über viel Zusatzsoftware als verbesserungswürdig herausgestellt wurde [61]. Es gelang jedoch bereits in dieser ersten Studie, brauchbare dreidimensionale Abbilder der Partikel im Präparat zu erzeugen, wodurch die Aufzeichnung der Verwachsungsverteilung sowie von Partikel- und Korneigenschaften (Struktur, Form, Größe, Zusammensetzung, Oberfläche) möglich war. In Rahmen weiterer Studien wurde die Anwendbarkeit der Tomographie auf andere Fragenstellungen wie die Messung der

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

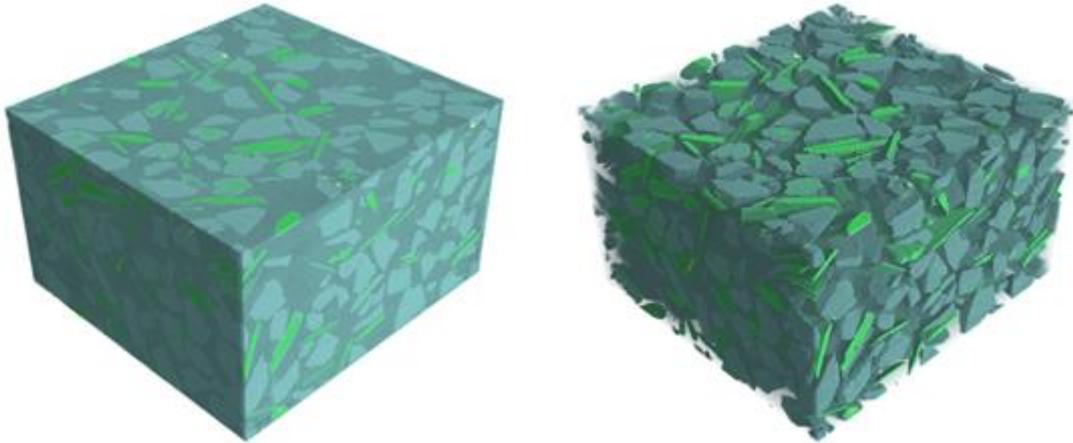
zugänglichen Wertstoffoberfläche für Laugungsprozesse, Filterkuchenstruktur, Partikelformanalyse, Feinkohlenwäsche gezeigt [84].

Weitere interessante Ergebnisse sind bei MILLER [55] zu finden. Hier werden Grenzkurven für Sortierprozesse basierend auf mittels CT gemessenen Verwachsungskurven und reale Sortierergebnisse verglichen. Auf diesem Wege ist es gelungen unzureichende Produktqualitäten auf die vorliegenden Verwachsungsverteilungen bzw. schlecht arbeitenden Sortierprozessen zuzuweisen. Weiterhin wurden zweidimensional und dreidimensional gemessene Verwachsungsverteilungen verglichen. Hierbei wurden die Schliffebenen virtuell durch das Volumenabbild aus der CT-Messung gelegt. Der Vergleich ergab das aus theoretischen Betrachtungen bekannte Überrepräsentieren freier bzw. nur gering verwachsener Phasen [28]. Zudem bestätigten die Verwachsungskurven Trends, die in früheren Untersuchungen [85], basierend auf Partikelsimulationen (PARGEN-Software) vorhergesagt wurden: Je feiner verteilt eine Wertphase im Partikel vorliegt, desto näher liegen die Verwachsungskurven, basierend auf Schliffen, an den wirklich vorliegenden Verhältnissen [55, 85].

Untersuchungen der Phasengrenzflächen von würfelförmig zugesägten sulfidischen Erzstücken vor und den Produktpartikeln nach der Zerkleinerung durch einaxiale Druckbeanspruchung ermöglichten den Nachweis von Brüchen entlang der Phasengrenzen [86]. Für geringe Beanspruchungsgeschwindigkeiten nehmen laut dieser Studie Phasengrenzbrüche einen signifikanten Anteil an den Gesamtbrüchen ein. Neben dem Klären verschiedener Bruchphänomene anhand von Vergleichen zwischen Ausgangsmaterial und Produktpartikeln können darüber hinaus auch Untersuchungen zu Bruchverläufen und Risswachstum durchgeführt werden [87]. Dies erlaubt einen tiefer greifenden Zugang zu Zerkleinerungs- und Aufschlussphänomenen (siehe Abschnitt 2.1.1).

Neue Entwicklungen im Bereich der Computertomographie haben die Auflösung (Voxelgröße im Submikrometerbereich Bereich) sowie die Kontraststärke zur Unterscheidung verschiedener Phasen gesteigert [88]. Die Weiterentwicklungen im Bereich der Software zur Messdatenverarbeitung befassten sich besonders mit der Berechnung von Einzelpartikeln aus dem Gemengemodell und der Berechnung der Modelle mehrphasig aufgebauter Partikel [89, 90]. Diese Informationen sind besonders dann bedeutsam, wenn Aufbereitungsprozesse, basierend auf Verwachsungsverteilungen, modelliert werden.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen



**Abbildung 7: Computertomographisches Bild eines Gemisches aus Quarz, Topas und Glimmer (Abmessung 3,5 x 3,5 x 2,5 mm<sup>3</sup>). Blick auf 3 begrenzende Seitenflächen (links) und Darstellung abzüglich der Trägermatrix des Präparats (rechts)**

Die wesentliche Schwäche der Technik – eine Auswertung auf Grundlage reiner Graustufenbilder – konnte bisher noch nicht gelöst werden. Hierdurch ist eine Unterscheidung von Mineralen, die im röntgentomographischen Bild in der gleichen Graustufe erscheinen, nicht möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Computertomographie für Aufgabenstellungen, bei denen es nicht um eine zusätzliche mineralogische Identifizierung der Phasen geht, eine große Verwendung finden wird. Grund hierfür sind vor allem zwei Vorteile. Die CT liefert ein dreidimensionales Abbild der Probe (siehe Abbildung 7), wodurch die Ergebnisse keine stereologischen Fehler aufweisen. Zudem ist die Präparation der Proben weniger aufwendig, Präparationsfehler wie Segregation spielen keine Rolle und eine Isotropie der Probe muss nicht erreicht werden.

### 2.1.6 Stereologie

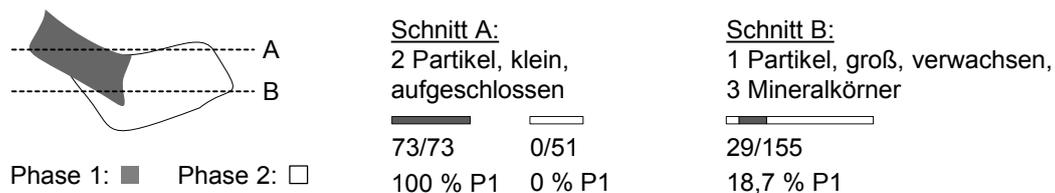
Unter Stereologie versteht man die Übertragung von an Schliffen gewonnenen Erkenntnissen auf die räumliche Struktur. Ein wesentlicher Grundsatz der Stereologie besteht darin, dass die Messung der Zusammensetzung einer Probe, basierend auf der niederdimensionalen Messung von Punktzahlen [91], Sehnenlängen [92] und Flächenanteilen [93] der volumenbezogenen Zusammensetzung entspricht. Weiterhin kann die Grenzfläche zwischen zwei Phasen fehlerfrei aus der Anzahl von Kontaktpunkten (im Falle einer Sehnenmessung) oder der Kontaktlänge (im Falle einer Flächenmessung) ermittelt werden [9]. Grundvoraussetzung für die oben genannten Zusammenhänge ist ein repräsentativer Schliff, bei dem eine völlig zufällige

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Anordnung der Partikel gewährleistet ist (Isotropie der Probe, Ausschluss von Präparationsfehlern).

Bei der Übertragung der an Schliften gewonnenen Ergebnisse auf die räumliche Struktur muss man sich eines Informationsverlustes infolge der niederdimensionalen Messung bewusst sein. Reduziert man die Betrachtung um eine Dimension, erscheinen Körper als Flächen, Kontaktflächen und Oberflächen als Linien und Kanten als Punkte. Punktförmige Strukturen verschwinden sogar gänzlich [94].

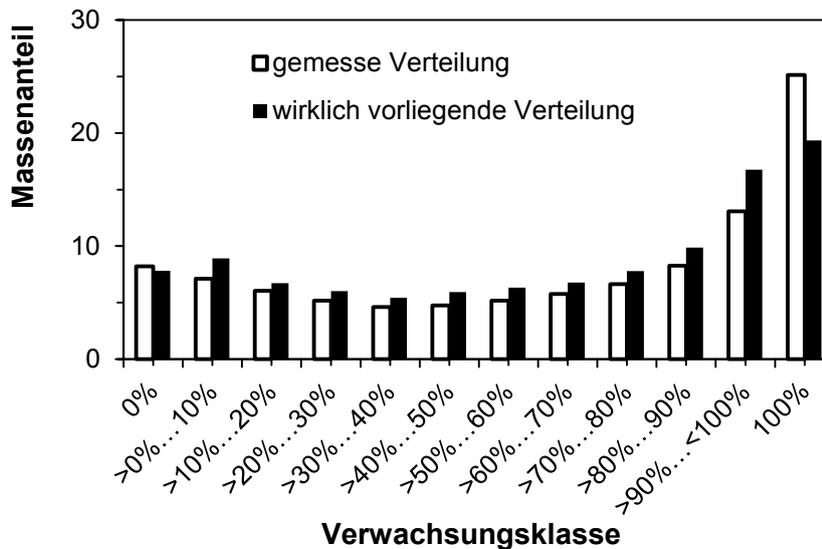
Partikel-Nr.: 14 aus Beispielpartikelsystem, Zusammensetzung: 73/156 (entspricht 46,8 % P1)



**Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung des stereologischen Fehlers bei der Betrachtung eines Partikels aus dem Modellerz von Abbildung 2**

Anhand des in der Abbildung 8 dargestellten Partikels können stereologische Effekte gut verdeutlicht werden. Wenn man sich das Abbild des Partikels als im Schliff sichtbare Fläche vorstellt und eine Auswertung der Zusammensetzungs- und Größenverhältnisse auf Basis von zwei dargestellten Sehnen (A und B) durchführt, fallen Unterschiede der Sehnenlängen zum Schliffbild ins Auge. Bei der Auswertung entlang der Linie A erhält man zwei jeweils frei vorliegende Partikel unterschiedlicher Phasen, die zudem deutlich kleiner sind als das wirklich vorliegende Partikel. Die Auswertung entlang der Linie B ergibt ein verwachsenes Partikel mit einer fehlerbehafteten Zusammensetzung. Dieser Partikel entspricht in der Anzahl verwachsener Phasen (1 x Phase 1, 2 x Phase 2) und in der Gesamtzusammensetzung (Phase 1 zu Phase 1 + Phase 2) nicht dem Ausgangspartikel. Dasselbe Ergebnis würde man erhalten, wenn man sich den Partikel senkrecht zur Abbildungsebene gleichartig ausgedehnt weiterdenkt und an Stelle der Sehnen Schliffebenen entlang der Linien betrachtet. Man kann folglich feststellen, dass sowohl die Partikelgröße als auch seine Zusammensetzung (Abbildung 9) fehlerbehaftet sind. Eine Einzelpartikelbetrachtung im Schliff gemessener Partikel ist aus diesem Grund nicht ohne genaue Kenntnis des Einflusses stereologischer Effekte gerechtfertigt.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen



**Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung für eine gemessene und eine wirklich vorliegenden Verwachsungsverteilung. Die frei vorliegenden Phasen werden zu Ungunsten der Klassen verwachsener Partikel überrepräsentiert.**

### Betrachtung des Einflusses stereologischer Effekte

Untersuchungen von PETRUK [31] hinsichtlich der Unterschiede zwischen an Schliffen gemessenen Partikelgrößenverteilungen und solchen aus Siebanalysen zeigten, dass enge Verteilungen stark fehlerbehaftet sind und korrigiert werden müssen. Breite Verteilungen weisen hingegen kaum Abweichungen auf und bedürfen keiner Korrektur (gilt für mehr als 5 Tyler Größen, d.h. Faktor 5,6 zwischen kleinster und größter Klasse). Zur Korrektur schlägt PETRUK einfache Faktoren vor, die vorab für das entsprechende Material ermittelt werden müssen [31]. In der gleichen Studie wurden auch Verwachsungsverteilungen betrachtet. Den Grundannahmen der Stereologie entsprechend wurde keine Beeinflussung der gemessenen Gehalte festgestellt. Beim Messen des Aufschlusses verwachsener Partikel erschienen etwa 10 % als aufgeschlossen. Dieser Anteil muss mittels einer geeigneten Transformation korrigiert werden.

Durch MILLER [30] wurde mithilfe der PARGEN-Software der Fehler in der Verwachsungsverteilung zwischen Linien- und Flächenmessungen zur Volumenverteilung auf Basis simulierter Partikelsysteme ermittelt. Hierbei wurden ein monodisperses Gut mit gleicher Zusammensetzung aller Partikel und ein System mit einer Verteilung des Gehalts über die Partikel mit einem natürlichen Erz verglichen. Dieses Erz wurde eingebettet und in definierten Höhenabstufungen angeschliffen, um der dreidimensionalen Grundgesamtheit rechnerisch nahe zu kommen. Ergebnis der

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Untersuchungen ist, dass eine geringe Abhängigkeit der Fehler von der Partikelform besteht. Der Einfluss der Form auf den Fehler wächst in Richtung plättchenförmiger Partikel. Außerdem wurde festgestellt: Je feiner verteilt die Körner im Partikel vorliegen beziehungsweise je mehr Phasen sich im Partikel befinden, desto kleiner sind die Abweichungen der niederdimensionalen Verteilung zu den wirklich vorliegenden Verwachsungskurven (siehe auch Abschnitt 2.1.4 und [67]). Hieraus resultiert, dass einfach aufgebaute, wenig verwachsene Erze den größten Fehler aufweisen sollten

### Stereologische Transformation

Stereologische Effekte wurden bereits von GAUDIN [5] beschrieben. Die Einführung seines „Locking Factor“ kann als erster Ansatz einer stereologischen Transformationsmethode angesehen werden. Dieser Faktor dient zur Korrektur des berechneten Aufschlussgrades und wurde auf Grundlage einfach verwachsener (die Phasengrenzfläche stellt eine Ebene dar), binärer Kugeln ermittelt. Weitergehende Entwicklungen beschäftigten sich anfangs mit dem Aufstellen von Korrekturen für spezielle Erze [42] beziehungsweise mit der mathematischen Herleitung von allgemeinen Korrekturfaktoren an vielfältigen Geometrien einfach verwachsener binärer Systeme [28]. Eine Weiterentwicklung der Modelles von GAUDIN stellt die Arbeit von HSIH [11] dar. Er erweiterte das bestehende Modell um einen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Bruchs entlang der Korngrenzen. Der Anteil von Brüchen entlang der Korngrenzen ist, wie in den allgemeinen Bemerkungen zum mechanischen Aufschluss bereits beschrieben, vom Härteunterschied zwischen den Phasen abhängig. Daher führte HSIH eine Abhängigkeit seines Korrekturfaktors vom Härteunterschied ein.

Neben einer Korrektur des stereologisch fehlerbehafteten Aufschlussgrades wurden auch mathematische Modelle zur Korrektur von zweidimensional gemessenen Partikelgrößenverteilungen entwickelt. Einen ersten Ansatz lieferte die Arbeit von BARBERY [95], welcher die Berechnung der Partikelgrößenverteilung aus Schliffbildern von Körnerpräparaten anhand der Auswertung von Sehnenlängen geometrisch regelmäßiger Partikel (Zylinder, Quader, Ellipsoide) betrachtet. Einen weniger theoretischen Ansatz stellt die Arbeit von PETRUK [31] dar. Im Rahmen seiner Untersuchungen ermittelte er empirische Korrekturfaktoren auf Grundlage des Vergleiches von Partikelgrößenverteilungen aus Siebanalysen und aus Schliffbildern von Körnerpräparaten.

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

### Modelle zur stereologischen Transformation

Nachfolgend werden die wichtigsten Methoden zur stereologischen Transformation vorgestellt, um die Leistungsfähigkeit und Grenzen darzustellen. Hierbei soll nur ein Überblick gegeben werden, ohne auf Einzelheiten der Methoden einzugehen. Prinzipiell kann man vier verschiedene Möglichkeiten unterscheiden. Diese sind eine Verwendung der Daten ohne Transformation, ein Ausschluss der offensichtlich zu klein dargestellten und damit nicht zentral angeschliffenen Partikel, die Transformation über ein Modell auf Grundlage von Nullraummatrizen sowie die Transformation über Modelle auf Grundlage von stochastischer Geometrie [96]. Davon abweichend existieren auch Modelle, die auf Grundlage einfacher Korrekturfaktoren versuchen, die räumliche Verwachsungsverteilung abzubilden [97].

### Ohne Transformation

Die Verwendung nicht transformierter Schlibfbilder basiert auf der Annahme, dass das Schlibfbild eine ausreichend gute Abbildung der wirklich vorherrschenden Größen- und Verwachsungsverhältnisse darstellt. Durch LÄTTI und ADAIR [98] wurde an einem einfach aufgebauten Erz gezeigt, dass diese Annahme unter bestimmten Voraussetzungen durchaus gerechtfertigt sein kann. Auch bei LIN [96] ist zu finden, dass beispielsweise bei Bergen und Verwachsungsverteilungen ohne freie Partikel die nicht transformierten Ergebnisse nahe an den wirklich vorliegenden Verhältnissen liegen.

### Ausschluss offensichtlich zu kleiner Partikel

Misst man die Verwachsungsverhältnisse an klassierten Proben, wie es allgemein empfohlen wird (siehe Abschnitt 2.1.5), so müssen sich die Größen der Partikel in einem bekannten Bereich bewegen. Alle Partikel die aufgrund der Lage in der Schlibfebene sehr klein erscheinen, können bei der Unterschreitung eines selbst festgelegten Grenzwertes für die minimale mittlere Sehnenlänge oder die minimale Partikelfläche aus der Betrachtung ausgeschlossen werden [96]. Auf diese Weise gelangen nur die großen Partikel in die Auswertung, wodurch ein Teil des stereologisch verursachten Fehlers korrigiert werden kann. Dieses Vorgehen kann niemals eine vollständige Korrektur des Fehlers darstellen, unabhängig davon, ob auch kleine Partikel zu einem gewissen Anteil berücksichtigt werden (Unschärfe der Klassierung). Ursache hierfür ist, dass stereologische Fehler aufgrund der Lage der Phasen relativ

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

zur Schliffebene unberücksichtigt bleiben. Eine Voraussetzung der Anwendbarkeit dieses Vorgehens ist die genügend große Anzahl verbleibender Partikelschliffe zur statistischen Absicherung der Ergebnisse. Hierdurch kann eine Messung mehrerer Präparate erforderlich werden.

### Nullraum-Methode

Im Buch von BARBERY [9], welches sich ausgiebig dem Problem der Stereologie und der Transformation von stereologisch beeinflussten Messergebnissen widmet, werden vier unterschiedliche Ansätze genannt, die das Problem der Transformationsgleichung über Nullraummatrizen lösen. Eine fünfte Methode der Transformation über Nullraummatrizen wurde nach dem Erscheinen des Buches von BARBERY durch KING und SCHNEIDER [63] veröffentlicht. Grundlage der Nullraum-Methoden ist eine Transformationsmatrix, welche sich aus diskreten Gehaltklassen (Spalten) mit den für die Korrektur erforderlichen Einträgen aufspannt. Hierfür muss eine Integralgleichung gelöst werden, die den Zusammenhang zwischen niederdimensional gemessener und real vorliegender Häufigkeitsverteilung der Partikelzusammensetzung beschreibt [9, 99].

Die HILL-Approximation [100, 101] stellt eine einfache Korrektur dar, die hilft den ungünstigsten Fall als anderes Extrem zur nicht korrigierten Verteilung zu finden. Die wirklich vorliegenden Verwachsungsverhältnisse ordnen sich zwischen beiden Extremfällen ein. Die Transformation basiert auf kugelförmigen monodispersen einfach verwachsenen binären Partikeln. Es hat sich gezeigt, dass dieses Modell nur übertragbar auf Partikelsysteme mit geringem Aspektverhältnis ist [101]. Sind die Erze einfach aufgebaut, dann liegt die real vorliegende Verwachsungsverteilung in der Nähe der korrigierten Verteilung, handelt es sich um komplex aufgebaute Erze, so liegt die Verwachsungsverteilung näher an der gemessenen Verteilung.

Die Methode nach LIN [99] versucht, den stereologischen Fehler in der gemessenen Verwachsungsverteilung mithilfe angepasster simulierter Verteilungen zu korrigieren. Als Methode kommt die Reduzierung der Fehlerquadrate für Anpassungsparameter zwischen Simulation und Schliffmessungen zerkleinerter Erzsyste-me zum Einsatz. Die hierfür erforderlichen Schliffe werden in verschiedenen Ebenen der Probe angefertigt, wodurch eine Rekonstruktion der 3D-Grundgesamtheit möglich ist. Aus dieser Methode gewonnene Transformationsmatrizen müssen für jedes Partikel-/Erzsystem neu aufgestellt werden, wofür monodisperse Partikelsysteme verschie-

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

denen Wertstoffgehalts erforderlich sind. Das ist sehr aufwendig, weshalb die PARGEN-Software zur Simulation solcher Partikelsysteme entwickelt wurde [85]. MILLER gibt an, dass die auf Basis der Auswertung von Flächen gewonnenen Verteilungen simulierter Partikelsysteme den Volumengehalt besser wiedergeben, als jene auf Basis von Sehnennmessungen. Dies sollte laut den Grundgesetzen der Stereologie bei ausreichender Anzahl von Messungen nicht auftreten [91-93]. In der Parameterstudie zum Einfluss von Wertstoffgehalt, Partikelform, Phasenanzahl am Partikel und Korngrößen der Phasen auf die Verwachsungsverteilung simulierter Partikel wurde ein deutlicher Einfluss der Partikelform auf die Form der Transformationsmatrix beobachtet [85]. Plattige Partikel haben demnach den größten Einfluss, wobei nadelige Partikel im Rahmen der Studie nicht untersucht wurden. Das Lösen des Transformationsproblems unter Berücksichtigung der oben genannten Parameter und Aufstellen einer allgemeinen Transformationsmatrix erreichte eine gute Übereinstimmung mit den zwei untersuchten realen Erzproben. Bei gut aufgeschlossenen Erzen mit geringen Wertstoffgehalten liegen nicht korrigierte Verwachsungsverteilungen nahe an den wirklichen Verhältnissen [85]. Als Grenzen der Anwendbarkeit werden Erzsysteeme mit Gehalten von  $< 5\%$  bzw.  $> 95\%$  genannt.

### Methoden auf Basis von stochastischer Geometrie

Basis der Transformation ist, wie bei den Nullraum-Methoden, eine Transformationsmatrix, wobei die Spalteneinträge über Methoden der stochastischen Geometrie gewonnen werden. Die Methode nach BARBERY [9] bedient sich mehrfach der Simulation künstlicher Stoff- und Partikelsysteme (Nutzung der Software BOOKING und PARGEN [69]). In einem ersten Schritt wird ein Erz modelliert, bei dem die verschiedenen Mineralkörner (Poisson-Polygone) an zufälligen Punkten in zufälligen Strukturen (Boolean Procedure) zu einer Textur heranwachsen. In einem zweiten Schritt werden die erzeugten Modellerze virtuell zerkleinert. Das wesentliche Grundkonzept dieser Zerkleinerung ist das RUIF-Modell, welches in Abschnitt 2.1.4 erläutert wurde [69]. Hierunter verbirgt sich, dass der Bruch zufällig und ungerichtet verläuft, wobei Phasengrenzen und verschiedene Phasen an sich keinen Einfluss auf den Bruchverlauf haben (Isotropie). Alle entstehenden Partikel weisen zudem eine konvexe Form auf. Aus den im Abschnitt zum mechanischen Aufschluss beschriebenen Zusammenhängen von Stoffeigenschaften und der aus der Zerkleinerung resultierenden Verwachsungsverteilung ist ersichtlich, dass das RUIF-Modell die wesent-

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

lichen Einschränkungen gegenüber realen Verhältnissen darstellt. BARBERY selbst schreibt, dass der Bruch in mehrphasigen Partikeln nicht zufällig verläuft [9]. Die Einschränkungen im Bruchmodell dienen vor allem der mathematischen Stabilität. BARBERY verstarb vor der Fertigstellung seines Buches plötzlich, sodass dieses durch Mitarbeiter aus seinen Manuskripten fertiggestellt werden musste. Sein Modell zur stereologischen Transformation konnte von ihm selbst nicht mehr verfeinert werden. Das Modell wurde später durch LEIGH [102] aufgegriffen und verbessert. Die Grundannahmen des RUIF und der konvexen Partikel wurden beibehalten. In einer Studie zum Dimensionseinfluss konnte eine gute Übereinstimmung zwischen linien-, flächen- und volumenbezogenen Aufschlussgraden beziehungsweise Verwachsungsverteilungen nachgewiesen werden [70].

Eine weitere Methode auf Basis stochastischer Geometrie stellt das Zuteilungsverfahren (Allocation Method) nach GAY [103, 104] dar. Für diese Methode bestehen zwei Möglichkeiten, die Eingangsdaten der Matrix zu erzeugen. Eine ist das Erzeugen der Daten basierend auf Strukturmodellen von BARBERY. Die andere Möglichkeit liegt in der Generierung durch die Vorhersage über Wahrscheinlichkeitsmodelle, wobei davon ausgegangen wird, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung die maximale Entropie (nicht im physikalischen Sinne) annimmt.

Weitere einfache Methoden zur Korrektur von Aufschlussergebnissen beispielsweise auf Grundlage von Korrekturfaktoren sind bei BARBERY [9] zu finden. Diese werden hier nicht weiter erwähnt, da sie zur Transformation von stereologisch beeinflussten Daten offenbar kaum Anwendung gefunden haben und in Untersuchungen durch Dritte nicht kritisch auf ihre Anwendbarkeit geprüft wurden.

### Test der Transformationsmethoden

Verschiedene Forschergruppen haben die im Laufe der Zeit entwickelten Methoden zur stereologischen Transformation auf ihre Eignung getestet. Dieser Test kann über drei verschiedenen Methoden umgesetzt werden. Die erste Möglichkeit besteht in der Simulation von verwachsenen Partikelsystemen, deren Verwachsungsverteilung einerseits aus der dreidimensionalen Grundgesamtheit bekannt ist und andererseits mithilfe von virtuellen Schliffen ermittelt wird [96, 105, 106]. Neben dem Test auf Grundlage simulierter Partikelsysteme besteht die Möglichkeit, einfach aufgebaute natürliche Erze in Größen- und Dichteklassen zu trennen und diese Klassen anschließend einer Analyse zu unterziehen [107]. Eine letzte Möglichkeit ist der

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

Einsatz von Standardmaterialien, die zur Korrektur des stereologischen Fehlers bzw. zum Test von Transformationsmethoden entwickelt wurden [108, 109]. Dieses Standardmaterial besteht aus Partikeln eines 2-Phasen-Systems mit ebenen Grenzflächen, welche durch Zerkleinerung erzeugt wurden. Über Klassierung und Fraktionierung nach der Dichte können definierte Verwachsungsklassen erzeugt werden. Der komplexe Zusammenhang aus Dichte und Partikelgröße beim Erstellen von Verwachsungsklassen beschränkt diese Vorgehensweise auf 2-Phasen-Systeme.

LIN [105] überprüfte anhand von Computersimulationen monodisperser, zweiphasiger, einfach verwachsener Kugeln die Transformationsmethode nach BARBERY [9]. Es konnten einerseits Schwächen der Methode aufgedeckt und andererseits die interessante Beobachtung gemacht werden, dass auch die nicht korrigierten Schliff-ergebnisse die wirklich vorliegenden Verwachsungsverhältnisse widerspiegeln. In einer weiteren Studie testete LIN [96] mit demselben Partikelsystem in verschiedenen Verwachsungsverteilungen die damals gängigen Transformationsmethoden (HILL-Approximation, Transformation nach BARBERY und PARGEN-Transformation). Neben den Transformationsmethoden wurden zudem auch die zwei einfachen Fälle – keine Transformation und Ausschluss aller offensichtlich zu kleinen Partikel – untersucht. Als überraschendes Ergebnis wurde festgestellt, dass keine Methode generell besser funktioniert als die anderen und dass zudem in manchen Fällen die nicht transformierten Ergebnisse die wahren Verhältnisse am besten wiedergeben. [96]

Ein weiterer Test der Nullraummethode basierend auf simulierten Partikelsystemen erfolgte durch CHIARUTTINI [106]. Sein Vorgehen war etwas komplexer. Zuerst erfolgte die Erstellung einer virtuellen Erzprobe, die anschließend virtuell zerkleinert wurde. Danach wurden mehrere Schliffe über das Modell von SCHENA [110] berechnet, eine angepasste Transformationsmatrix aufgestellt, die Schliffe mit der Nullraum-Methode transformiert und mit der virtuellen Grundgesamtheit verglichen. Aufgrund der direkten Berechnung der Transformationsmatrix aus den Simulationsergebnissen konnte eine sehr gute Übereinstimmung von transformierten Ergebnissen und der vorliegenden Grundgesamtheit erreicht werden.

Die erste Evaluierung verschiedener Transformationsmethoden mithilfe eines realen Erzes wurde 1998 durch FANDRICH [107] vorgenommen. Das Erz lag in definiert zusammengesetzten Größen- und Verwachsungsklassen vor, wodurch die Verwachsungskurve in vereinfachter Form bekannt war. Das Zuteilungsverfahren nach

## 2.1 Mechanisches Aufschließen

GAY [75, 104] und die Nullraummethode nach KING und SCHNEIDER [29] wurden angewendet, um die zweidimensional gemessenen Verwachsungsverteilungen zu korrigieren. Aus verschiedenen Gründen wird der Stand der Transformationsmodelle als nicht zufriedenstellend beurteilt. Ausschlaggebend ist hierfür, dass im Falle von Präparationsfehlern, d.h. bei nicht repräsentativen Schliffen, keine Transformationsmethode sinnvoll arbeiten kann. Zudem sind die Methoden nur für binäre Erzsysteeme mit einfachen Verwachsungen entwickelt worden, wodurch sie nicht auf komplexere Erze übertragen werden können. Als letztes ist das umständliche Ermitteln eines Kernels für neue Erzsysteeme zu nennen, die diese Methode wenig praktikabel erscheinen lassen.

Tests, basierend auf synthetisch hergestellten, binären und einfach verwachsenen Partikeln [108], führten zu ähnlichen Ergebnissen, wie die auf Grundlage von realen Erzpartikeln [109]. Das Standardmaterial wurde eng klassiert und in Dichteklassen eingeteilt, sodass die vorliegende Verwachsungsverteilung bekannt ist. LIN testete die gleichen Methoden wie in einer vorangegangenen Studie [96] (HILL-Approximation, Transformation nach BARBERY und PARGEN-Transformation) und kam zu den gleichen Ergebnissen, wie beim Test auf Grundlage von Simulationen. Im Ergebnis rät auch LIN von einer stereologischen Transformation ab, wenn Präparationsfehler nicht ausgeschlossen werden können [109]. Alle Methoden haben ihre Vor- und Nachteile und liefern nicht in jedem Fall gute Übereinstimmungen. Es bleibt hervorzuheben, dass der einfach Ausschluss offensichtlich zu kleiner Partikel (klassiertes Material) als Alternative zur stereologischen Transformation sehr gute Ergebnisse liefert [109].

Zwei weitere wichtige Erkenntnisse konnten durch PETRUK [32] formuliert werden: Vergleich man die an klassiertem und nicht klassiertem Material gemessenen Verwachsungsverteilungen, so erhält man zwischen beiden signifikante Unterschiede. Der Aufschlussgrad in nicht klassiertem Material wird größer ermittelt, als wenn man klassierte Proben misst und den Aufschluss gewichtet über die Massenanteile berechnet. Daher sollten Aufschlussgrade und Verwachsungsverteilungen stets an klassiertem Material ermittelt werden, wie es bereits an anderer Stelle schon formuliert wurde [40]. Weiterhin stellte PETRUK [32] fest, dass mit der Veränderung des Aufschlusskriteriums auf praktisch relevante Größenordnungen (bspw. > 70 %) die Fehler vernachlässigbar klein werden.

## 2.2 Sortieren

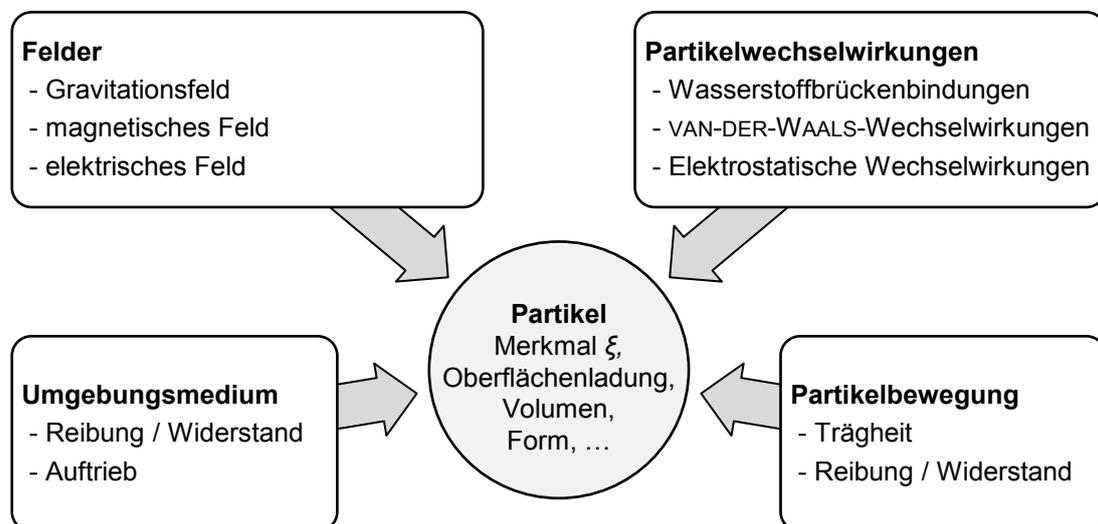
Auch kontroverse Ergebnisse zur Leistungsfähigkeit und Erfordernis stereologischer Transformationen sind in der Literatur zu finden. So wird von SPENCER und SUTHERLAND [111] bei ihrem Test von Nullraum-Transformationen mit verschiedenen Anpassungsparametern an einem Blei-Zink-Erz die These aufgestellt, dass der stereologische Fehler für einfach aufgebaute Erzsysteeme am größten sein sollte. Dem widerspricht die von LÄTTI [98] veröffentlichte Arbeit, die am Beispiel eines einfach aufgebauten Titanerzes zeigt, dass der stereologische Fehler scheinbar vernachlässigbar gering ist. Erzeugt wurden die Ergebnisse in dieser Studie durch das Vermessen von Schliffen eines Präparates in verschiedenen, definiert voneinander entfernten Höhenpositionen und der anschließenden dreidimensionalen Rekonstruktion der räumlichen Grundgesamtheit [98]. Ähnliche Zusammenhänge konnte auch MILLER [85] bei seinen Aufschlussmodellierungen feststellen. Bei gut aufgeschlossenen Erzen mit geringen Wertstoffgehalten liegen die nicht korrigierten Verwachsungsverteilungen nahe an den wirklich vorliegenden Verhältnissen. Durch LÄTTI [98] wird Kritik an den verfügbaren Transformationsmodellen geübt, da die zu Grunde gelegten Erzpartikel weit von realen Erzpartikeln entfernt sind (Methode nach BARBERY) oder die erforderliche Arbeit zum Erstellen angepasster Nullraummatrizen aufwendig und die Anwendung daher unpraktisch ist. Auf Grundlage seiner Untersuchungen rät LÄTTI von der Verwendung stereologischer Transformationen ab, wenn die Übertragung auf das vorliegende Erzsystem ungeklärt ist. Allen Modellen zur Transformation von stereologisch beeinflussten Verwachsungsverteilungen ist die Beschränkung auf Systeme mit nur wenigen separat voneinander zu betrachtenden Phasen eigen [41]. Bereits ab vier verschiedenen Phasen oder Mineralen sind die meisten Modell nicht mehr anwendbar.

## 2.2 Sortieren

Unter Sortieren versteht man das Trennen eines Partikelkollektivs nach physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise Dichte, magnetische Suszeptibilität, Oberflächenladung oder elektrische Leitfähigkeit. Nicht zu den Sortierprozessen gehört das Trennen nach der Partikelgröße, welches als Klassieren bezeichnet wird. Die zur Trennung herangezogene Eigenschaft des Partikels wird als Trennmerkmal  $\xi$  bezeichnet. Diese Eigenschaft kann mithilfe geeigneter Felder, Chemikalien oder Trägerfluiden genutzt werden, um eine der Eigenschaft entsprechende Kraft auf den Partikel wirken zu lassen. Die sich ausbildende Kräftebilanz am Partikel ist von

## 2.2 Sortieren

verschiedenen Einflussbedingungen abhängig (siehe Abbildung 10). Wechselwirkungen mit den Förderorganen oder Fremdpartikeln führen zu Haftkräften, die bei der Trennung mithilfe von Feldern der sich ausbildenden Feldkraft im Allgemeinen entgegenwirken. Im Gegensatz zur Trennung in Feldern ist im Fall der Flotation ein Haften am „Fremdpartikel Blase“ gewünscht. Das umgebende Medium nimmt über den dynamischen und den statischen Auftrieb Einfluss auf die Kräftebilanz. Ebenso geht die Bewegung des Partikels in Form von Trägheit und Reibungs- beziehungsweise Widerstandskräften zum Umgebungsmedium in die Bilanz mit ein. Ein Teil der Kräfte in dieser Bilanz stellt eine Funktion der Partikelgröße dar. Hierzu zählen beispielsweise Feldkräfte, Auftriebs- und Widerstandskräfte. Als Folge der Abhängigkeit von der Partikelgröße stellen Trennungen oft eine Überlagerung von Sortier- und Klassiervorgängen dar.



**Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Einflussfaktoren bei der Trennung eines Partikels nach dem Merkmal  $\xi$ . Die Richtungen der Kräfte, Felder und strömenden Medien hängen vom Aufbau des Trennapparates ab.**

Neben den Effekten aus der Kräftebilanz kann ein Partikelgrößeneinfluss aufgrund der Konstruktionsweise des Trennapparates auftreten. Wenn sich der Partikelschwerpunkt konstruktionsbedingt unterschiedlich weit vom Austragsorgan oder bei inhomogenen Feldern in einem schwächeren Bereich des Feldes befindet, wirken auf die Partikel eines gleich großen Merkmals  $\xi$  unterschiedliche Feldkräfte. Auch dies führt zwangsläufig zu einer Beeinflussung der Trennung durch die Partikelgröße.

Eine Ausnahme innerhalb der Sortierprozesse bildet die Klaubung, welche durch den Einzelabgleich der Partikeleigenschaft als Trennmerkmal charakterisiert ist [2]. Das Austragen ist in diesem Fall nicht von einer sich ausbildenden Kräftebilanz ab-

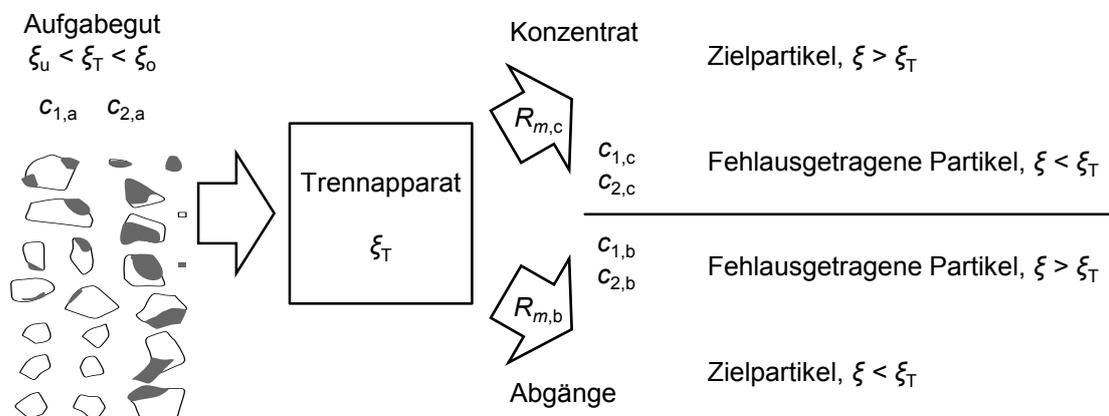
## 2.2 Sortieren

hängig. Die Partikelgröße hat, solange sie nicht als Merkmal der Klaubung gewählt wird, in diesem Fall keinen Einfluss auf die Trennung nach dem Merkmal  $\xi$ .

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Grundvorgänge beim Sortierprozess eingegangen, ehe die Beschreibung von Sortierergebnissen über Produktkenngrößen, Anreicherungskurven und Anpassungsformeln näher erläutert wird.

### 2.2.1 Grundvorgänge beim Sortierprozess

Ein Sortierprozess trennt ein Stoff- beziehungsweise Partikelgemisch nach einem Trennmerkmal  $\xi$  in zwei oder mehr unterschiedliche Produkte (siehe Abbildung 11). Ein ideal arbeitender Trennapparat [15, 18, 20] leitet alle Partikel mit  $\xi \geq \xi_T$  in das eine und Partikel mit  $\xi < \xi_T$  in das andere Produkt. Der Wert  $\xi_T$  stellt hierbei die Trenngrenze dar. Die Trennung wird aufgrund der unscharfen Arbeitsweise realer Sortiermaschinen und -apparate sowie aufgrund statistischer Phänomene nicht ideal entlang der Trenngrenze verlaufen. Vielmehr gibt es einen Bereich um die Trenngrenze herum, bei dem die Partikel mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in dem einen oder in dem anderen Produkt ausgetragen werden. Beide Produkte enthalten folglich fehlausgetragene Partikel, die die Produktqualität vermindern.



**Abbildung 11: Grundprinzip eines Sortierprozesses bei der Trennung in zwei Produkte**

Entscheidend für eine erfolgreiche Trennung ist ein genügend großer Unterschied im Merkmal der zu trennenden Komponenten. Zu unterscheiden sind volumenbezogene und oberflächenbezogene Trennmerkmale. Bei volumenbezogenen Merkmalen ist die Größe des Merkmals eines aus mehreren Phasen zusammengesetzten Partikels (Kompositpartikel) vom Volumenanteil der miteinander verwachsenen Phasen abhängig. Hierunter fallen beispielsweise die Dichte oder auch die magnetische Suszeptibilität. Oberflächenbezogene Merkmale sind demnach mit dem Oberflächen-

## 2.2 Sortieren

anteil der Phasen verknüpft. Beispiele sind hydrophobe Wechselwirkungen bei der Flotation oder aber auch die Farbe bei einer optischen Sortierung.

Realisiert wird die Trennung durch eine Kraft, die auf die Bewegungsbahn der Partikel im Sortierapparat Einfluss nimmt. Diese Kraft steht, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, weiteren Kräften gegenüber. Welche Kräfte in die Bilanz eingehen, hängt von der Bauweise der Sortiermaschine / des Sortierapparates ab. Typisch sind Modifikationen, die ein Nutzen von Zentrifugalkraftfeldern zur Erhöhung der Gewichtskraftkomponente oder die den Einsatz von Wasser als Trägerfluid ermöglichen, wodurch Einfluss auf die Partikelwechselwirkungen (Haftkräfte) genommen werden kann. Manche Kräfte sind eine Funktion der Partikelgröße (Gewichtskraft, Auftriebskraft) und andere gewinnen mit abnehmender Partikelgröße zunehmend an Bedeutung (Haftkräfte). Dies hat zur Folge, dass Sortierprozesse in ihrer Wirksamkeit durch die Partikelgröße eine obere und eine untere Grenze aufgeprägt bekommen. Je nach Prozess- und Maschinengestaltung liegt die untere Grenze in verschiedenen Bereichen. Allgemein kann gesagt werden, dass die Grenze bei volumenbezogenen Trennmerkmalen im zweistelligen Mikrometerbereich liegt [112]. Dies ist darin begründet, dass Haftkräfte mit der zweiten Potenz der Partikelgröße, volumenbezogene Trennkräfte hingegen mit der dritten Potenz der Partikelgröße zunehmen. Bei besonderen Anwendungsfällen kann die Grenze bis hinab in den unteren zweistelligen Mikrometerbereich verschoben werden. Erreicht wird dieser Bereich jedoch nur bei Wertstoffen die besonders stark ausgeprägte Sortiermerkmale aufweisen und bei denen der Unterschied zum Merkmal der anderen Komponenten im System besonders hoch ist. Beispiele hierfür sind das Abtrennen eisenreicher Verunreinigungen aus Kaolin im magnetischen Feld mithilfe von Hochgradient-Matrixscheidern oder das Anreichern von Goldpartikeln in sogenannten Sortierzentrifugen.

### 2.2.2 Kennzeichnung des Sortierergebnisses

Das Kennzeichnen des Sortierergebnisses erfolgt üblicherweise über die Größen Masse und Konzentrationen der Produkte in Bezug zum Aufgabematerial. Aus diesen Größen lassen sich nach DRZYMALA [113] die für das Bewerten eines Sortierprozesses essentiellen Bilanzgleichungen aufstellen.

$$100\% \cdot c_{1,a} = \frac{m_c}{m_a} \cdot c_{1,c} + \frac{m_b}{m_a} \cdot c_{1,b} = R_{m,c} \cdot c_{1,c} + R_{m,b} \cdot c_{1,b} \quad (12)$$

## 2.2 Sortieren

$$c_{1,a} + c_{2,a} = 100\% \quad (13)$$

$$c_{1,b} + c_{2,b} = 100\% \quad (14)$$

$$c_{1,c} + c_{2,c} = 100\% \quad (15)$$

$$R_{m,b} + R_{m,c} = 100\% \quad (16)$$

In den 5 Bilanzgleichungen sind 8 Variablen enthalten, wobei ein vollständiges Beschreiben des Systems bereits durch die Kenntnis von 3 Variablen möglich ist [113]. Es lassen sich zahlreiche Parameter aufstellen, die auf Grundlage dieser Größen und Gleichungen berechnet werden. Einen Überblick über solche Parameter geben die Arbeiten von STEINER [16] und SCHULZ [15, 18] sowie TOLKE [17]. Eine aktualisierte Zusammenstellung von Kennzahlen zur Beschreibung von Sortierergebnissen findet sich bei DRZYMALA [3] beziehungsweise bei MOHANTY [114], hier mit dem Fokus auf Flotation.

Kennzahlen zur Beurteilung der Effizienz eines Verfahrens, können nach SCHULZ [18] in drei Gruppen unterteilt werden:

1. Kennzahlen, die nicht wirklich die Effizienz beschreiben, da sie keinen Vergleich zur idealen Prozessen ziehen,
2. Elementare Kennwerte, die einen Vergleich aus Sortierergebnissen und idealen Grenzfällen darstellen und
3. Relative Kennwerte, die auf einem Vergleich zwischen Sortierergebnissen und Testverfahren basieren.

HELFRICHT [22] unterscheidet zwischen Trennschnittkennzahlen und Trennungskennzahlen. Trennschnittkennzahlen sind solche, die einen speziellen Trennschnitt bewerten. Vertreter dieser Gruppe sind beispielsweise

- der auch unter dem Namen HANCOOK-Index [10, 16, 20, 115] bekannte Trennungsgrad  $\eta$

$$\eta = \frac{c_r (c_{1,a} - c_{1,b}) (c_{1,c} - c_{1,a})}{c_{1,a} (c_r - c_{1,a}) (c_{1,c} - c_{1,b})} \cdot 100 = R_{1,c} - R_{2,c} \quad \text{in \%} \quad (17)$$

und

- das Anreicherungsverhältnis  $c_{1,c} / c_{1,a}$ .

Trennungskennzahlen stellen eine Bewertung der gesamten Trennung nach einem Merkmal dar und werden ins Verhältnis zu einem idealen Grenzfall gesetzt [19]. Beispiele dieser Gruppe sind:

## 2.2 Sortieren

- Sortierkennzahl nach HELFRICHT [21, 22], Gleichung (18)
- Kennzahl des Waschvermögens von Feinkohlen nach GOVINDARAJAN [116], siehe Anhang A.4
- Flotationsindex nach MOHANTY [114], siehe Anhang A.4

Je nach gewünschter Aussage des Parameters muss dieser gewisse Voraussetzungen erfüllen. Hierzu können beispielsweise die Verbindung mit wirtschaftlichen Parametern [6], ein physikalisch erklärbarer Zusammenhang [18] oder ein definierter Bezug zu einem theoretischen Grenzfall gehören [16-18]. Verschiedene Autoren haben die in der Literatur verfügbaren Kennzahlen auf das Erfüllen der an solche Kennzahlen zu stellenden Forderungen geprüft [15, 17, 18]. Im Ergebnis scheint lediglich der Trennungsgrad  $\eta$  eine Übereinstimmung mit den meisten Forderungen aufzuweisen. Eine detaillierte Zusammenstellung der Forderungen an Sortierkennzahlen findet sich in Anhang A.5.

Eine separate Betrachtung aller im Gut enthaltener Minerale ist besonders bei komplex zusammengesetzten Erzen aufwendig und nicht zielführend. Vielmehr sollte sich die Betrachtung auf Mineralgruppen gleicher Eigenschaften (Magnetismus, Dichte, ...) konzentrieren [19]. Dabei ist es nicht einmal erforderlich, dass die gruppierten Minerale eine Verwandtschaft zueinander aufweisen [40]. Zu beachten ist, dass das Merkmal eines aus mehreren Phasen zusammengesetzten Partikels aufgrund von Einschlüssen dominiert sein kann (Beispiel Magnetscheidung: feine Magnetiteinschlüsse in Bergepartikeln führen zu einer großen Partikelsuszeptibilität und damit zu wertstofffreien Partikeln mit  $\xi > \xi_T$ ). Schwierigkeiten entstehen, wenn der Wertstoff auf unterschiedliche Minerale verteilt vorliegt. Hierbei kann es auch vorkommen, dass die wertstoffhaltigen Minerale unterschiedliche Trennmerkmale aufweisen. Die Kennzeichnung des Trennerfolgs muss dann im Bezug auf das Trennverfahren zwischen ausbringbaren und nicht ausbringbaren Wertstoff unterscheiden.

Müssen Sortiererergebnisse aus Versuchen mit schwankendem Aufgabegehalt verglichen werden, so ist es im Allgemeinen ratsam, auf Diagramme oder Kennzahlen zurückzugreifen, welche prinzipiell unabhängig vom Aufgabegehalt sind [115, 117]. Die Wirkung eines Übergangs auf Diagramme ohne Abhängigkeit vom Aufgabegehalt zeigte DRZYMALA [117], indem er Daten anderer Autoren erneut auswertete.

## 2.2 Sortieren

### 2.2.3 Anreicherungskurven und abgeleitete Kennzahlen

Ihren Ursprung haben Anreicherungskurven zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Bereich der Kohleaufbereitung, wo der Zusammenhang aus Kohle- und Aschegehalt sowie ausgebrachter Masse dargestellt werden musste. In den folgenden Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Kurven entwickelt, welche die Anreicherung eines Wertstoffes darstellen. Prinzipiell kann jede Größe, die den Anreicherungsprozess beschreibt, in einem Diagramm einer andern Größe gegenübergestellt werden. Viele Anreicherungskurven können ebenso als Verwachsungskurven zur Beschreibung des Aufschlussresultates eingesetzt werden, wie in Abschnitt 2.1.3 bereits erwähnt. Bei DRZYMALA [3, 113, 118, 119] findet sich eine umfangreiche Zusammenstellung der entwickelten Diagramme sowie der Erläuterung zur Berechnung und den Grenzen der Darstellung. Insgesamt sind 42 verschiedene Anreicherungskurven bekannt, wobei diese auf unterschiedliche Weise in Kategorien eingeteilt werden können [113, 118, 119]. Auf eine vollständige Zusammenstellung der verschiedenen Anreicherungskurven muss aufgrund der großen Zahl verschiedener Ansätze an dieser Stelle verzichtet werden. Vielmehr soll hier der Verweis auf das Buch J. DRZYMALA: Mineral Processing [16] und das Aufführen der für diese Arbeit wichtigen Diagramme (Tabelle 1) genügen.

**Tabelle 1: Übersicht verschiedener Anreicherungskurven mit und ohne direkter Abhängigkeit vom Aufgabegehalt**

Bezeichnung	Abszisse	Ordinate
Darstellungen mit direkter Abhängigkeit vom Aufgabegehalt		
MAYER-Kurve [60]	$R_{m,c}$	$R_{1,c}$
HALBICH-Diagramm	$R_{1,c}$	$c_{1,c}$
Auftragung nach GOVINDARAJAN [116]		
Darstellungen ohne direkte Abhängigkeit vom Aufgabegehalt		
FUERSTENAU-1-Diagramm	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$
FUERSTENAU-2-Diagramm	$R_{1,c}$	$R_{2,c}$
Trennungsgradkurve	$R_{1,c}$	$\eta = R_{1,c} - R_{2,c}$
Auftragung nach MOHANTY [114]		
Erforderliche Gleichungen: $c_{1,c} \rightarrow (1)$ ; $R_{1,c} \rightarrow (4)$ ; $R_{2,c} \rightarrow (6)$ ; $R_{2,b} \rightarrow (22)$ ; $\eta \rightarrow (17)$		

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal von Anreicherungskurven besteht darin, ob eine direkte Abhängigkeit zum Aufgabegehalt besteht, sodass dessen Schwankung Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Kurven nimmt. Typische und häufig ange-

## 2.2 Sortieren

wendete Anreicherungskurven mit einer Abhängigkeit vom Aufgabengehalt stellen das MAYER- (Abbildung 4, rechts) und das HALBICH-Diagramm (Abbildung 3) dar. Diagramme, in denen sich die Anreicherung ohne Abhängigkeit vom Aufgabengehalt darstellen lässt, sind solche, die die Ausbringenswerte oder aus ihnen errechnete Parameter verschiedener Komponenten gegeneinander auftragen. Solche Darstellungen werden im Folgenden Diagramme gleicher Basis genannt. Die wichtigsten sind:

- die Auftragung vom Wertstoffausbringen  $R_{1,c}$  gegen das Ausbringen der Berge in den Abgängen  $R_{2,b}$  [3, 118] (FUERSTENAU-1-Diagramm)
- die auf STEINER [16] zurückgehende Auftragung vom Wertstoffausbringen  $R_{1,c}$  über dem Bergeausbringen  $R_{2,c}$ , welche in der englischsprachigen Literatur als das FUERSTENAU-2-Diagramm [3, 118] bekannt ist und
- die Auftragung des Trennungsgrades, das heißt, der Differenz aus Wertstoffausbringen und dem Bergeausbringen, gegen das Wertstoffausbringen [20].

Um auch mit der Kombination von Masseausbringen und Wertstoffausbringen eine Darstellung auf gleicher Basis zur Verfügung zu stellen, wurde durch DRZYMALA [120] eine Rechenvorschrift entwickelt. Mit deren Hilfe kann man die Darstellung beider Größen in Diagramme überführen, welche unabhängig von Schwankungen im Aufgabengehalt sind. Diese Diagramme können entweder in die bekannte Rechteckform oder aber auch in eine Kreisform normalisiert werden. Darüber hinaus existieren noch weitere Diagramme gleicher Basis, welche im Rahmen dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird mit dem FUERSTENAU-2- und dem Trennungsgraddiagramm gearbeitet.

Zur Beschreibung des Trennerfolgs und zum Vergleich verschiedener Sortierversuche führte HELFRICHT [21, 22] eine Sortierkennzahl ein. Diese Sortierkennzahl beschreibt das Verhältnis des Sortierergebnisses zu einem idealen Trennprozess über den Vergleich von Flächen, welche durch unterschiedliche Kurven im MAYER-Diagramm (siehe Abbildung 12, links) aufgespannt werden.

$$B = \frac{A_s}{A_{s,id}} \cdot 100 = \frac{\int_0^{100} s(R_{m,c}) dR_{m,c} - \int_0^{100} r(R_{m,c}) dR_{m,c}}{\int_0^{100} t(R_{m,c}) dR_{m,c} - \int_0^{100} r(R_{m,c}) dR_{m,c}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (18)$$

## 2.2 Sortieren

Der wichtigste Unterschied dieser Sortierkennzahl zu herkömmlichen Kennzahlen liegt in der Bewertung des gesamten Trennprozesses nach einem Merkmal im Gegensatz zur reinen Bewertung eines speziellen Trennschnitts [22]. Sie stellt daher eine Trennungskennzahl dar. Eine Schwäche der Sortierkennzahl ist ihre Berechnung basierend auf der Auftragung vom Wertstoffausbringen über dem Masseausbringen. Änderungen im Aufgabengehalt des zu sortierenden Materials verursachen eine Verschiebung des optimalen Masseausbringens und dadurch eine Änderung der Sortierkennzahl. HELFRICHT [22] zeigte, dass Schwankungen in der Sortierkennzahl üblicherweise einen Betrag von 2,5 % nicht übersteigen.

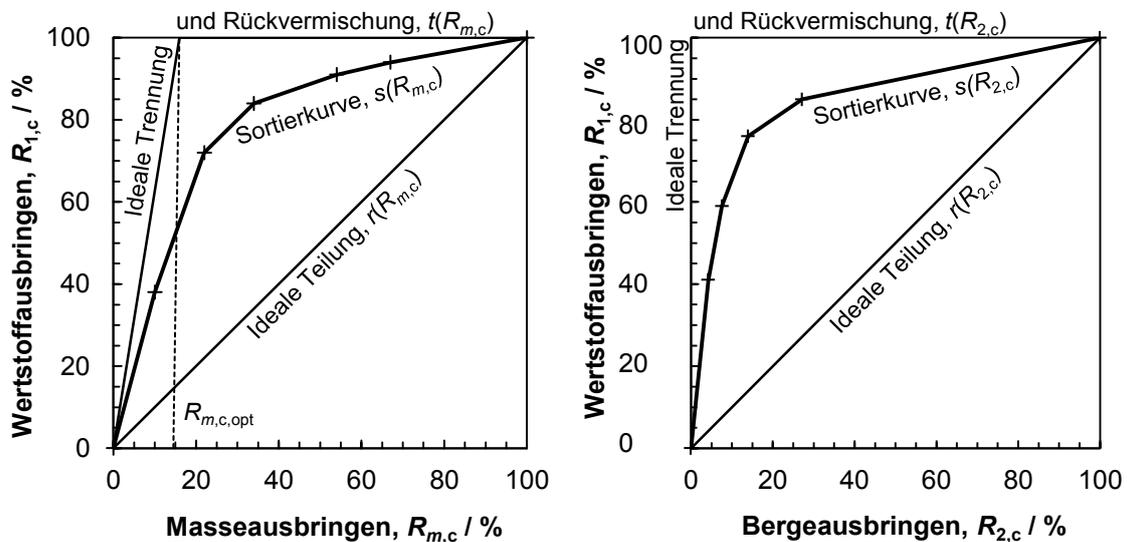


Abbildung 12: Anreicherungskurven und theoretische Grenzen der Anreicherung des Wertstoffes im MAYER-Diagramm (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts)

Die Abhängigkeit der Sortierkennzahl vom Aufgabengehalt konnte TOLKE [19] durch einen Übergang in die von STEINER [16] vorgeschlagene Auftragung vom Wertstoff über dem Bergeausbringen (siehe Abbildung 12, rechts) beseitigen.

$$B = \frac{A_S}{A_{S,id}} \cdot 100 = \frac{\int_0^{100} s(R_{2,c}) dR_{2,c} - \int_0^{100} r(R_{2,c}) dR_{2,c}}{\int_0^{100} t(R_{2,c}) dR_{2,c} - \int_0^{100} r(R_{2,c}) dR_{2,c}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (19)$$

Durch den Übergang auf eine Darstellung im FUERSTENAU-2-Diagramm verschieben sich die Kurven der idealen Trennung und der Rückvermischung auf die Achsen, wodurch eine ideale Sortiererfolgsfläche mit fester Größe entsteht. Hierdurch vereinfacht sich die Gleichung (19) zu:

## 2.2 Sortieren

$$B = \frac{A_S}{A_{S,id}} \cdot 100 = \frac{\int_0^{100} s(R_{2,c}) dR_{2,c} - 5000}{5000} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (20)$$

Diese Definition der Sortierkennzahl macht sie uneingeschränkt vergleichbar und ermöglicht selbst als absoluter Zahlenwert eine Bewertung des Trennerfolgs [19]. Aus der Sortierkennzahl kann jedoch keine Aussage über die Qualität des Trennproduktes gewonnen werden. Dies geht nur dann, wenn der funktionale Zusammenhang der Sortierkurve bekannt ist [22]. Zwischen der Sortierkennzahl und dem Trennungsgrad konnte ein Zusammenhang nachgewiesen werden. Demnach entspricht die Sortierkennzahl dem Doppelten des arithmetischen Integralmittelwertes vom Trennungsgrad zwischen 0 und 100 % (Beweis in Anhang A.7).

$$B = 2\eta_{AM} \quad (21)$$

Ein ähnliches, jedoch deutlich jüngeres Modell zur Sortierkennzahl nach HELFRICHT und TOLKE stellt die von GOVINDARAJAN [116] entwickelte Kennzahl zur Beurteilung des Waschvermögens von Feinkohlen dar (siehe auch Anhang A.4). Diese Kennzahl wird ebenso auf Grundlage von Flächenauswertungen gewonnen, wobei das der Flächenauswertung zu Grunde liegende Diagramm eine Abwandlung des MAYER-Diagramms (siehe Abbildung 75 im Anhang A.4) darstellt. Im Diagramm werden das Kohleausbringen (entspricht dem Wertstoffausbringen) beziehungsweise das Ascheausbringen (entspricht dem Bergeausbringen) über dem Masseausbringen dargestellt. Der Waschindex stellt das Produkt zweier Flächen dar, wobei eine die Effizienz des Kohleausbringens und die andere die Differenz aus Kohleausbringen und Ascheausbringen beschreibt.

Eine Weiterentwicklung dieses Modells erfolgte durch MOHANTY [114], welcher eine ähnliche Kennzahl in der Auftragung von 100 - Kohleausbringen (entspricht  $R_{1,b}$ ) gegen 100 - Ascheabweisen (entspricht  $R_{2,c}$ ) berechnet (siehe auch Anhang A.4). Hierbei versteht man unter Ascheausbringen die Größe  $R_{2,c}$  und unter Ascheabweisen das Ausbringen der Asche in die Abgänge, das heißt  $R_{2,b}$ . Mit dieser Auftragung erfolgt die Berechnung der Kennzahl auf Grundlage eines Diagramms ohne Abhängigkeit vom Aufgabegehalt. Diese Darstellung wurde gewählt, um zur numerischen Flächenberechnung in den degressiven Trend der Kurve e-Funktionen mit negativen Exponenten legen zu können. Der durch MOHANTY vorgeschlagene Flotationsindex entspricht der Sortierkennzahl nach Gleichung (19). Abweichend von

## 2.2 Sortieren

den bis hierher erläuterten Modellen auf Basis von Flächenauswertungen zerlegt MOHANTY die Fläche zur Berechnung des Flotationsindex am Punkt der stärksten Kurvenkrümmung in zwei Teilflächen (siehe Abbildung 76 im Anhang A.4). Hierdurch können zwei verschiedene Kennwerte berechnet werden.

Allen Modellen zur Ermittlung von Kennzahlen auf Basis von Flächenvergleichen in Anreicherungsdiagrammen ist gemeinsam, dass durch unterschiedliche Kurvenverläufe gleiche Flächeninhalte erzeugt werden können [22, 114]. Sofern der funktionale Verlauf der Verwachsungs- beziehungsweise der Sortierkurve nicht bekannt ist, führt eine solche Flächengleichheit zur Vieldeutigkeit der Kennzahlen. Geht man davon aus, dass bei vergleichenden Untersuchungen an einem bestimmten Verfahren die entsprechenden Kurven definierten Gesetzmäßigkeiten folgen, so ist nicht mit einer Vieldeutigkeit zu rechnen [22]. Weiterhin ist zu bemerken, dass unterschiedliche Kurvenverläufe zwar zu gleichen Flächeninhalten führen können, jedoch ist dies in Hinblick auf Kennzahlen, die einen definierten Punkt beschreiben, kein Nachteil. Kennwerte, die einen einzigen Punkt der Verteilung betrachten, lassen deren Verlauf gänzlich außer Acht. Integrale Kennwerte bieten darüber hinaus den Vorteil, verschiedene Materialien direkt miteinander vergleichen zu können [114]. Würde man dies über den Verlauf von Anreicherungskurven machen, welche für unterschiedliche Materialien in ihrer Form völlig unterschiedliche Verläufe annehmen können, so führt dies bei sich kreuzenden Kurven zu Problemen der Beurteilung der Lage von Punkten auf diesen Kurven. Darüber hinaus kann man mithilfe integraler Kennwerte eine Entscheidung zur optimalen Partikelgröße treffen [114].

Wie zu Beginn des Kapitels bereits beschrieben, lassen sich durch Kombination der Werte für die Massen und Konzentrationen der einzelnen Produkte beliebig viele neue Kennzahlen berechnen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass eine Kombination dieser Größen und eine Darstellung gegenüber einer anderen Kombination als Anreicherungskurve teilweise zu starken Abhängigkeiten zwischen diesen Kenngrößen führt [121]. Besonders beim Versuch, eine statistische Auswertung beispielsweise über den Korrelationskoeffizienten durchzuführen, müssen diese Abhängigkeiten beachtet werden. Starke Abhängigkeiten zwischen den gegeneinander aufgetragenen Größen bestehen im HALBICH- und MAYER-Diagramm [121]. Geringe Abhängigkeiten wurden für die FUERSTENAU-Diagramme nachgewiesen [121]. Der beste Weg,

## 2.2 Sortieren

Abhängigkeiten zu vermeiden besteht darin, bei der Beurteilung auf die ursprünglichen, nicht miteinander verrechneten Größen zurückzugreifen.

Die Ergebnisse einer Aufbereitung stellen vereinfacht ein Zusammenspiel aus mechanischem Aufschluss und anschließender Trennung nach einem definierten Merkmal dar. Daher ist es erforderlich, dass die Sortierergebnisse immer auch in Bezug zu den vorliegenden Verwachsungsverhältnissen gebracht werden müssen. Die Grenze eines jeden Trennprozesses wird über den Aufschlusszustand des Materials vorgegeben [55]. Daneben sind aber auch nicht aufschließbare Einschlüsse und nicht ausbringbare wertstoffhaltige Begleitminerale in die Bewertung mit einzubeziehen [40].

### 2.2.4 Anpassungsfunktionen zur Darstellung von Anreicherungskurven

Die in Anreicherungsdiagrammen dargestellten Sortierergebnisse erzeugen bei industrieller Optimierung eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Punktwolke um den Bereich des Arbeitspunktes [115, 122]. Zur Darstellung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen den gegeneinander aufgetragenen Größen werden üblicherweise Approximationsfunktionen eingesetzt, an denen die Optimierung ausgerichtet wird. Die der Literatur entnommenen Formeln zur Anpassung von Funktionen an Sortierergebnisse (siehe Tabelle 2) wurden für verschiedene Darstellungsweisen der Aufbereitungsparameter entwickelt. Durch DRZYMALA et al. [122] wurde eine Zusammenstellung und Erweiterung der publizierten Anpassungsgleichungen vorgenommen. Diese Zusammenstellung umfasst verschiedene symmetrische, nicht symmetrische, ein- und mehrparametrische Ansätze sowie Ansätze mit festen und freien Start und Endpunkten der Anpassungsgleichungen. Tabelle 2 enthält eine Übersicht der in der Literatur beschriebenen Anpassungsgleichungen für Anreicherungskurven. Mithilfe der Gleichungen (12) bis (16) und dem Zusammenhang

$$R_{2,c} = 100\% - R_{2,b} \quad (22)$$

wurden die Ansätze auf die Darstellung von Wertstoffausbringen über Bergeausbringen transformiert. Gleichung (23) wird in der Literatur als ein sehr gut geeigneter Ansatz zur Charakterisierung von Laborflotationsversuchen genannt [115]. Auf ihrer Grundlage wurde eine Anpassungsfunktion für Ergebnisse aus technischen Flotationsuntersuchungen entwickelt, welche in der obigen Auflistung nicht berücksichtigt wurde.

## 2.2 Sortieren

**Tabelle 2: Zusammenstellung verschiedener Gleichungen zur Anpassung an Sortiererergebnisse im FUERSTENAU-2-Diagramm. Formeln bei denen in der Spalte zur Quelle ein \* angegeben ist, stellen selbst gewählte Anpassungsgleichungen dar.**

Gleichung	Quelle	Nr.
$R_{1,c} = a \frac{R_{2,c}}{(a - 100 + R_{2,c})}$	[122]	(23)
$R_{1,c} = \frac{(R_{2,c})^a}{100^{(a-1)}}$	[122]	(24)
$R_{1,c} = \frac{(100^a - (100 - R_{2,c})^a)}{100^{(a-1)}}$	[117, 122]	(25)
$R_{1,c} = R_{2,c} / (1 - a(100 - R_{2,c}) - b(100 - R_{2,c})^2)$	[122]	(26)
$R_{1,c} = \frac{(100^a - (100 - R_{2,c})^a)^b}{100^{(a \cdot b - 1)}}$	[122]	(27)
$R_{1,c} = \frac{(a(100 - R_{2,c}) + b + 100)R_{2,c}}{(a(100 - R_{2,c}) + b + R_{2,c})}$	[122]	(28)
$R_{1,c} = 100 \cdot \exp(-a \cdot (100 - R_{2,c})^b)$	[114]	(29)
$R_{1,c} = 100(1 - \exp(-a(R_{2,c})^b))$	*	(30)
$R_{1,c} = 100 + (1 - \exp(-a(R_{2,c})^b))$	*	(31)
$R_{1,c} = a \cdot \exp(-R_{2,c}/b) + 100$	*	(32)
$R_{1,c} = 100 - (1 + 100a)(100 - R_{2,c}) + a(100 - R_{2,c})^2$	[122]	(33)
$R_{1,c} = 100 + a(100 - R_{2,c}) + b(100 - R_{2,c})^2 + c(100 - R_{2,c})^3$	[122]	(34)
$R_{1,c} = a + b(100 - R_{2,c}) + c(100 - R_{2,c})^2 + d(100 - R_{2,c})^3$	[122] mit a = 0 [116]	(35)
$R_{1,c} = 100 - (100 - R_{2,c}) \cdot (a - 100)/a$ , obere Hälfte $R_{1,c} = -R_{2,c} \cdot a/(a - 100)$ , untere Hälfte	[122]	(36)
$R_{1,c} = 100 - (100 - R_{2,c}) \cdot (a - 100)/a$ , obere Hälfte $R_{1,c} = -R_{2,c} \cdot b/(b - 100)$ , untere Hälfte	[122]	(37)

## 2.2 Sortieren

Weil sich Gleichung (23) auch für das Anpassen von Ergebnissen anderer Sortiertechniken bewährt hat, wurde dieser Ansatz vom FUERSTENAU-Diagramm auf andere gebräuchliche Anreicherungsdiagramme übertragen [123]. Eine Reihe der aufgeführten Approximationsfunktionen lässt sich aus verschiedenen flotationskinetischen Modellen herleiten [124], wonach diese Funktionen auf physikalische Zusammenhänge zurückgeführt werden können.

Nach HELFRICHT [22] ist für das Ermitteln der Sortierkennzahl nach Gleichung (18) das Berechnen von mindestens 5 Teilflächen unter äquidistanten Abständen erforderlich. Hierbei resultieren Fehler im Bereich von 1 – 5 %. Eine Senkung des Fehlers in den Bereich von < 1 % erfordert das Berechnen von 10 Teilflächen. Grundlage der Flächenberechnung war das Erzeugen einer approximierten Sortierkurve auf Basis eines Flächenausgleichs. Über den Einsatz von Approximationsfunktionen kann der funktionale Zusammenhang der Anreicherungskurve angenähert werden. Ein Berechnen einer definierten Anzahl von Teilflächen ist daher nicht mehr erforderlich. Abweichungen entstehen folglich nicht mehr aufgrund der Anzahl berechneter Teilflächen sondern hängen von der Genauigkeit der Anpassung der Approximationsfunktion ab.

### 2.2.5 Trennfunktionen

Trennfunktionen, auch TROMP-Kurven genannt, beschreiben den Anteil des im Aufgabegut enthaltenen Materials einer definierten Eigenschaft  $\xi$  (Trennmerkmal), welches in ein bestimmtes Produkt ausgetragen wurde. Das Trennmerkmal kann hierbei entweder die Partikelgröße (Klassierprozesse) oder eine physikalische Eigenschaft (Sortierprozesse) sein. Um Trennfunktionen berechnen zu können, muss die Verteilung des Trennmerkmals über die Produkte (X und Y) beziehungsweise über ein Produkt und das Aufgabematerial (A) bekannt sein [10].

$$T_X(\xi) = R_{m,X} \frac{q_X(\xi)}{q_A(\xi)} = \frac{R_{m,X} \cdot q_X(\xi)}{R_{m,X} \cdot q_X(\xi) + (1 - R_{m,X}) \cdot q_Y(\xi)} \quad (38)$$

In der Praxis werden Trennfunktionen üblicherweise durch Trennfunktionswerte diskreter Klassen ( $\xi_{i-1} \dots \xi_i$ ) ermittelt (Abbildung 13).

$$T_X(\xi_{i-1} \dots \xi_i) = T_{X,i} = R_{m,X} \frac{\mu_{X,i}}{\mu_{A,i}} = \frac{R_{m,X} \cdot \mu_{X,i}}{R_{m,X} \cdot \mu_{X,i} + (1 - R_{m,X}) \cdot \mu_{Y,i}} \quad (39)$$

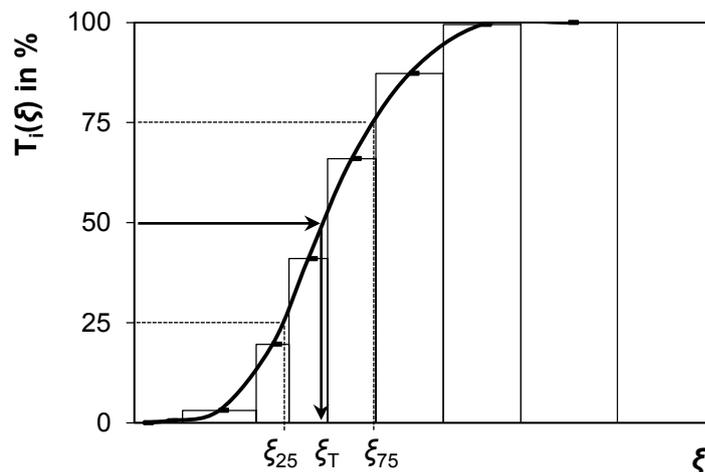
Hierbei stellt  $\mu_i$  den Masseanteil in Klasse  $i$  dar.

## 2.2 Sortieren

$$\mu_i = \frac{m_i}{m_{\text{ges}}} \quad (40)$$

Die Trennfunktion ergibt sich dann über den Flächenausgleich zwischen den einzelnen diskreten Klassenwerten. Zum vereinfachten Vergleich verschiedener Trennfunktionen werden der Merkmalwert  $\xi_T$  (Trennschnitt) bei einem Trennfunktionswert von  $T(\xi) = 50\%$  (tatsächlicher Trennschnitt) und die Trennschärfe über die Steigung der Funktion zwischen  $T(\xi) = 25\%$  und  $T(\xi) = 75\%$  herangezogen [10]. Es existieren sowohl Trennschnitte als auch Trennschärfekennwerte nach verschiedenen Definitionen. Eine übliche Definition für die Trennschärfe ist der Trennschärfegrad  $\kappa$  [125].

$$\kappa = \frac{\xi_{25}}{\xi_{75}} \quad (41)$$



**Abbildung 13: Beispiel einer Trennfunktion mit Trennschnitt  $\xi_T$  sowie den Merkmalswerten für das untere und das obere Quartil, gebildet aus diskreten Klassenwerten**

Im Fall von Klassierprozessen ist das Ermitteln der Verteilungen beispielsweise durch Siebanalysen leicht möglich. Bei Sortierprozessen erfordert die Ermittlung der Merkmalverteilung einen deutlich größeren Aufwand, da das Material schrittweise nacheinander zerlegt werden muss. Zudem sind die Trennschritte in ihrer Durchführung langwieriger. Bisher können Partikelgemische nur nach wenigen physikalischen Eigenschaften in Merkmalklassen zerlegt werden. Hierunter fallen das Zerlegen nach der Dichte über eine Schwimm-Sink-Trennung mithilfe von Schwerflüssigkeiten definierter Dichte und das Zerlegen in Klassen unterschiedlicher Suszeptibilität mit einem Isodynamik-Scheider.

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

Mithilfe der automatischen petrographisch-mineralogischen Analyse von Körnerpräparaten besteht die Möglichkeit, Trennfunktionen rein rechnerisch, das heißt ohne aufwendiges Zerlegen in Merkmalklassen, zu erzeugen. Es genügen in diesem Falle die Massebilanz des Trennprozesses und die Analyse von Körnerpräparaten beider Produkte beziehungsweise eines Produktes und des Aufgabematerials. Eine wesentliche Voraussetzung stellt hierbei die Kenntnis der Größe des Merkmalwertes jedes einzelnen Partikels dar. Dieses setzt sich aus den Merkmalen der Phasen des Partikels gewichtet mit ihren Anteilen zusammen. Folglich müssen die Merkmale der Phasen bekannt sein. Im Fall der Dichte kann man auf umfangreiche Datenbanken zurückgreifen, in denen praktisch für jede bekannte Substanz eine Reindichte aufgeführt ist. Die magnetische Suszeptibilität ist weniger umfassend untersucht und nur im geringen Umfang tabelliert verfügbar.

Stehen alle nötigen Informationen zur Berechnung von Trennfunktionen auf Grundlage von petrographisch-mineralogischen Analysen bereit, ist zusätzlich der in Abschnitt 2.1.6 erläuterte stereologische Effekt zu berücksichtigen. Dieser sorgt dafür, dass freie Phasen überrepräsentiert werden, wodurch die Trennfunktionen in Richtung der Extremwerte (Fehlausträge) zu große Werte annehmen.

Trennfunktionen sind hervorragend geeignet, den Trennprozess in Hinblick auf die Trennschärfe zu bewerten oder einen Vergleich verschiedener Trennungen nach dem gleichen Merkmal zu führen. Den Einfluss vorliegender Verwachsungsverteilungen auf das mögliche Trennergebnis kann man bei Trennfunktionen nicht berücksichtigen. Aus diesem Grund sind sie für eine vergleichende Beurteilung von Aufschluss- und Trennerfolg ungeeignet.

## **2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg**

In den vorangegangenen Abschnitten wurde erläutert, wie Ergebnisse der Aufschlusszerkleinerung und von Sortierprozessen beschrieben werden können. Für beide Teilprozesse der Aufbereitung existieren aussagekräftige Diagramme und Kennzahlen, welche jedoch keine direkte Vergleichbarkeit untereinander aufweisen. Das Verbinden der Betrachtung von Aufschluss und Sortierung geht bereits auf WIEGEL [42] zurück. Er stellt die Forderung auf, den Aufschluss verstehen und beschreiben zu können, um den Sortierprozess zu verbessern. STEINER [40] konkretisierte später weiter, dass eine Unterscheidung zwischen Fehlausträgen aufgrund von Verwachsung und aufgrund anderer Einflussgrößen erforderlich ist.

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

Ansätze zum Vergleich von Sortiererergebnissen und den vorliegenden Verwachsungsverhältnissen sind zwar schon lange bekannt [15, 19, 21, 57], wurden jedoch nicht weiter verfolgt, da die erforderliche Messtechnik zu diesem Zeitpunkt nicht verfügbar war. Erst mit dem Aufkommen automatischer mineralogischer Analyse-systeme (siehe Abschnitt 2.1.5) wurde versucht, Sortiererergebnisse ins Verhältnis zu vorliegenden Verwachsungsverteilungen zu bringen. FINCH [20] schlug vor, den maximalen Trennungsgrad, gewonnen aus Aufschlussanalysen, und den erreichten Trennungsgrad des Prozesses miteinander zu verrechnen. Hierdurch kann man sowohl den Einfluss des mechanischen Aufschlusses als auch den Einfluss des Sortierprozesses auf den Anreicherungs-erfolg sichtbar machen. PASCOE [79] nutzte zwei-dimensionale Aufschlussanalysen, um auf deren Basis Grenzkurven für die Dichtesortierung aus virtuell gebildeten Dichte- und Partikelgrößenklassen zu bilden. Diese Grenzkurven wurden zur Vorhersage von Ergebnissen der Dichtesortierung genutzt, ohne einen direkten Vergleich zwischen Aufschluss- und Sortiererergebnis zu führen. Vielmehr wurde das Modell so angepasst, dass vorhergesagte Kurven und Sortierer-ergebnisse übereinstimmen. Eine Vereinigung von mittels CT gewonnener HALBICH-Diagramme mit Sortiererergebnissen wurde von MILLER [55] vorgenommen. Die Sortiererergebnisse sind hierbei in Form von Punkten als Ergebnis jeweils eines Versuches mit definierten Versuchsparametern in das Diagramm eingetragen. Ein Vergleich mit der Verwachsungskurve erfolgt rein auf verbal beschreibende Art. Solange nur der Aufschluss für das Sortiererergebnis entscheidend ist, liegt der Punkt für den Sortierprozess nahe der Grenzkurve, definiert durch den mechanischen Aufschluss. Andernfalls nehmen weitere Faktoren Einfluss auf den Sortierprozess und sorgen für ein schlechteres Ergebnis, als es durch die Grenzkurve vorgegeben ist. Hierdurch nimmt der Abstand zwischen der Verwachsungskurve und dem Punkt des Sortier-versuches zu.

Die folgenden Abschnitte greifen ein aus der Literatur bekanntes Modell [19, 21, 22] zur Beschreibung des Sortiererfolges auf und erweitern es durch das Ergänzen einer Verwachsungskurve. Hierdurch wird ein direkter Vergleich der vorliegenden Verwachsungsverhältnisse, welche ein Maß für den Erfolg der Aufschlusszerkleinerung darstellen, und der Sortierkurve möglich. Über die Erweiterung des Modells erfolgt die Einführung eines neuartigen Aufschlusskennwertes, welcher auf gleicher mathematischer Basis zum Sortierkennwert gewonnen wird.

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

### 2.3.1 Aufschluss- und Trennerfolgswahlen

Aus den in den vorherigen Abschnitten getroffenen Aussagen ist ersichtlich, dass eine Auftragung von Aufschluss- und Sortierergebnissen in einem gemeinsamen Diagramm zum direkten Vergleich beider Prozessschritte erforderlich ist. In einem solchen Diagramm müssen sich beide Prozesse adäquat darstellen lassen und in einem logischen Zusammenhang stehen. Des Weiteren muss die Darstellung im Diagramm unabhängig von Änderungen in Eingangsgrößen wie dem Aufgabegehalt sein, sodass der Vergleich verschiedenartiger Versuchsreihen gewährleistet ist. Diese Forderungen erfüllen lediglich die Verwachsungs- beziehungsweise Anreicherungskurven gleicher Basis (siehe Abschnitte 2.1.3 und 2.2.3).

Im Rahmen dieser Arbeit werden Aufschluss- und Sortierparameter auf Grundlage des FUERSTENAU-2-Diagramms errechnet. Hierbei wird das Wertstoffausbringen (Ausbringen des Wertstoffes in das Konzentrat,  $R_{1,c}$ ) über dem Bergeausbringen (Ausbringen der nicht werthaltigen Bestandteile in das Konzentrat,  $R_{2,c}$ ) darstellt. Abbildung 14 zeigt beispielhaft die Auftragung einer Verwachsungskurve  $u(R_{2,c})$  und einer Sortierkurve  $s(R_{2,c})$  sowie den Grenzfällen einer idealen Teilung  $r(R_{2,c})$  und einer idealen Trennung mit anschließender Rückvermischung  $t(R_{2,c})$  in einem FUERSTENAU-2-Diagramm.

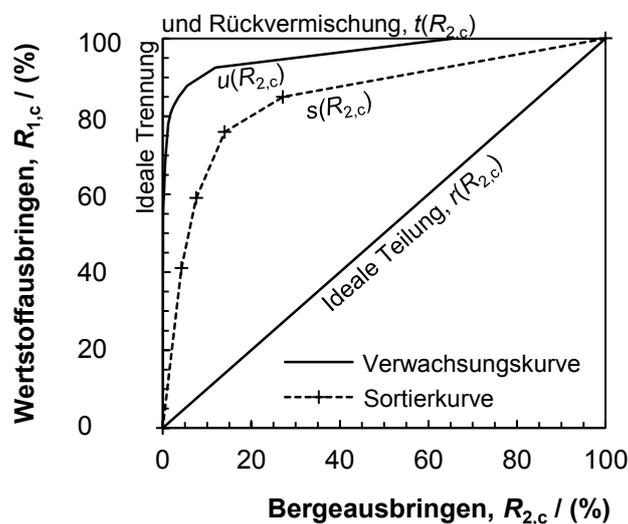


Abbildung 14: Auftragung vom Wertstoffausbringen über dem Bergeausbringen mit Verwachsungs-  $u(R_{2,c})$  und Sortierkurve  $s(R_{2,c})$

Die Verwachsungskurve des Wertstoffes ordnet sich zwischen den idealen Grenzkurven ein. Der Verlauf der Verwachsungskurve stellt die theoretische Grenze für jeden den Wertstoff anreichernden Prozess dar. Daraus folgt, dass jeder den Wertstoff anreichernden Prozess zwischen der unteren Grenze, definiert durch die

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

ideale Teilung, und der oberen Grenze, definiert durch die Verwachsungskurve, verläuft.

Zur vergleichenden Bewertung der in Abbildung 14 dargestellten Kurven eignet sich das Modell der Sortierkennzahl basierend auf den Arbeiten von HELFRICHT [21] und TOLKE [19]. Da dieses Modell auf Flächenberechnungen zwischen Kurven im Diagramm basiert, stellt es eine ideale Grundlage zur Erweiterung um Verwachsungsverteilungen dar. Ausgehend von der ursprünglichen Definition der Sortierkennzahl nach Gleichung (19), lässt sich eine Aufschlusskennzahl definieren, welche das Verhältnis einer Aufschlussersfolgsfläche zur idealen Aufschlussersfolgsfläche darstellt.

$$B_A = \frac{A_A}{A_{A,id}} \cdot 100 = \frac{\int_0^{100} u(R_{2,c}) dR_{2,c} - 5000}{5000} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (42)$$

Die Aufschlussersfolgsfläche stellt hierbei die Fläche zwischen der Verwachsungskurve und der Kurve für die ideale Teilung dar. Die ideale Aufschlussersfolgsfläche wird vom oberen Dreieck ( $100 \cdot 100/2$ ) durch die Kurven der idealen Teilung und der idealen Trennung mit Rückvermischung gebildet. In gleicher Weise lässt sich eine neue Trennerfolgsszahl definieren, die das Verhältnis der Trennerfolgssfläche zur maximal möglichen Fläche, definiert durch den Aufschluss (Aufschlussersfolgsfläche), beschreibt. Analog zu Gleichung (20) stellt die Trennerfolgssfläche den Bereich zwischen der idealen Teilung und der Sortierkurve dar.

$$B_T = \frac{A_T}{A_A} \cdot 100 = \frac{\int_0^{100} s(R_{2,c}) dR_{2,c} - 5000}{\int_0^{100} u(R_{2,c}) dR_{2,c} - 5000} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (43)$$

Wie leicht ersichtlich ist, entsprechen die beiden neu definierten Kennzahlen einer Aufspaltung der bisherigen Sortierkennzahl nach Gleichung (19) in einen aufschlussbeeinflussten Anteil (Gleichung (42)) und einen trennprozessbeeinflussten Anteil (Gleichung (43)). Hierdurch erfüllt die Kennzahl  $B$  die Forderung von FINCH [20], wonach sich die Gesamteffizienz eines Prozesses aus dem Produkt von Zerkleinerungseffizienz und Trenneffizienz zusammensetzt.

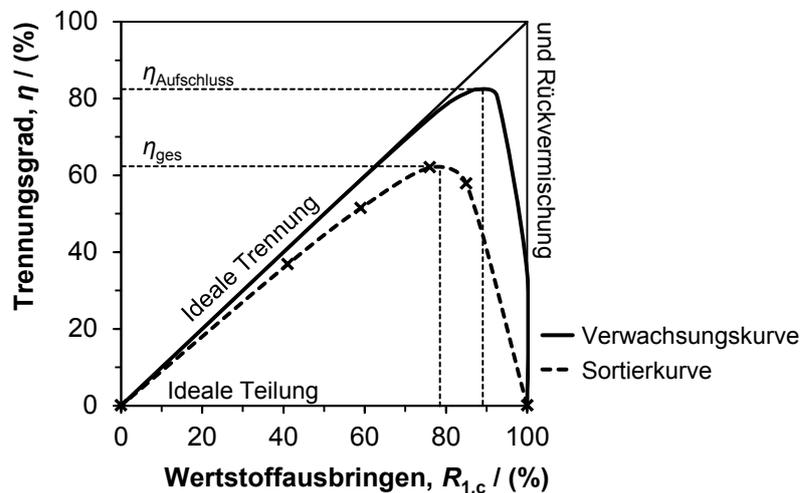
### 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

$$B = \frac{A_T}{A_{S,id}} = \frac{A_A}{A_{A,id}} \cdot \frac{A_T}{A_A} = B_A \cdot B_T / 100 \quad \text{in \%} \quad \text{mit} \quad A_{S,id} = A_{A,id} \quad (44)$$

Die Effizienz  $E$  eines Trennschnittes wird bei FINCH [20] über die Differenz aus Wertstoffausbringen und Bergeausbringen (Trennungsgrad) beschrieben.

$$E = E_{\text{Zerkleinerung}} \cdot E_{\text{Trennung}} = \eta_{\text{Aufschluss}} \cdot \eta_{\text{Trennung}} = \eta_{\text{ges}} \quad (45)$$

Die Abbildung 15 zeigt beispielhaft ein Trennungsgraddiagramm, in dem die Verwachsungskurve und eine Sortierkurve dargestellt sind. Das Maximum der Verwachsungskurve liegt an dem Punkt, bei dem die Partikel den mittleren Aufgabengehalt entsprechen, das heißt, wenn alle angereicherten Partikel ( $c_{1,P} > c_{1,a}$ ) in das Konzentrat und alle verarmten Partikel ( $c_{1,P} < c_{1,a}$ ) in die Abgänge gelangen würden (siehe Anhang A.6).



**Abbildung 15: Auftragung des Trennungsgrades über dem Wertstoffausbringen mit einer Verwachsungs- und einer Sortierkurve (gleiche Zahlenwerte wie Abbildung 14)**

Wie man erkennen kann, liegen die Maxima beider Kurven nicht bei gleichem Wertstoffausbringen. Dies hängt mit dem Trennkriterium des Sortierprozesses zusammen. Reicht der mittlere Aufgabengehalt, damit der Wert des Trennmerkmals stark genug ausgeprägt ist, um ein Partikel in das Konzentrat auszutragen, so liegt das Maximum des Gesamttrennungsgrades rechts vom Trennungsgrad nach der Verwachsungsverteilung. Im anderen und deutlich häufigen Fall liegt das Maximum links.

Es bestehen folglich zwei Möglichkeiten, Aufschluss- und Anreicherungsresultate miteinander ins Verhältnis zu setzen. Die erste Möglichkeit liegt in der Verwendung von Kennzahlen, die das Material als Gesamtheit betrachten (Erfolgskennzahlen basierend auf Flächenberechnungen) [23-25]. Die zweite Möglichkeit ist die

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

Verwendung des Trennungsgrades sowohl als Kennzahl zur Beschreibung der vorliegenden Aufschlussverhältnisse als auch als Kennzahl zur Bewertung der Trennung und des Einflusses vom Sortierprozess auf den Trennerfolg [15, 20].

### 2.3.2 Abgrenzung der Bewertung auf Grundlage von Trennungskennzahlen zur Bewertung nach Trennschnittkennzahlen

Der neu eingeführte Aufschlussparameter ist aufgrund seiner Definition verschieden von den herkömmlich verwendeten Kennzahlen. Aufschlussgrade nach GAUDIN [5] und BÉRUBÉ [53] beschreiben die Lage eines definierten Punktes der Verwachsungsverteilung (siehe Abschnitt 2.1.2), wohingegen die Aufschlussersfolgszahl einen integralen Kennwert aus der Verwachsungsverteilung darstellt. Anhand der in Tabelle 3 aufgeführten vier verschiedenen Partikelsysteme unterschiedlicher Verwachsungsverteilung soll dieser Unterschied verdeutlicht werden.

**Tabelle 3: Darstellung der Aufschlussparameter vier verschiedener Zerkleinerungsprodukte des gleichen Ausgangsmaterials (grau: Wertmineral, weiß: Berge)**

Nr.	Zerkleinerungsprodukte	$A_G$	$A_B$	$B_A$
1		0.33	0.60	0.81
2		0.33	0.60	0.9
3		0.33	0.33	0.43
4		0.33	0.33	0.79

0 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	100 %

Jedes Beispielsystem besteht aus 10 Partikeln, in denen entweder zwei Phasen (grau: Wertmineral, weiß: Berge) in unterschiedlichen Anteilen miteinander verwachsen sind oder die aus einer frei vorliegenden Phase bestehen. Der Wertstoffgehalt jedes Beispielsystems beträgt 30 %. Zur Vereinfachung haben alle Partikel die gleiche Größe. Ebenso besitzen beide miteinander verwachsenen Phasen die gleiche Dichte. So reduziert sich das Beispiel auf den Vergleich der Flächen. Die Zusammensetzung der Partikel im Beispielsystem ist so gewählt, das alle vier Partikelkollektive den gleichen Aufschlussgrad  $A_G$  nach Gleichung (7) aufweisen. Weiterhin gleichen sich jeweils zwei der Systeme im resultierenden Aufschlusskoeffizient  $A_B$

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

nach Gleichung (8). Die Verwachsungsverteilung aller Systeme des Beispiels ist unterschiedlich (siehe Abbildung 70 im Anhang), sodass sich die Werte der Aufschlussersfolgzahl  $B_A$  nach Gleichung (42) voneinander unterscheiden. Es zeigt sich, dass nur die Kennzahl  $B_A$  den offensichtlichen Unterschied in den Aufschlussverhältnissen des Beispiels darstellen kann.

Es ist ebenso möglich, Beispiele von Partikelkollektiven zu konstruieren, bei denen sich die Aufschlussparameter  $A_G$  und  $A_B$  unterscheiden, der Parameter  $B_A$  jedoch immer den gleichen Wert annimmt. Dies ändert nichts an der Tatsache, dass der Parameter  $B_A$  einen integralen Wert zur Beschreibung des Aufschlusszustandes liefert, wohingegen die Aufschlussparameter anderer Definition lediglich einen Punkt der Verwachsungsverteilung darstellen (vergleiche Abbildung 3).

Ebenso verhält es sich, wenn man als Aufschlussparameter den maximalen Trennungsgrad nach der Verwachsungsverteilung heranzieht. Dieser birgt besonders bei Erzen geringen Gehalts Schwierigkeiten. Der maximale Trennungsgrad liegt an dem Punkt, ab dem Partikel mit mittlerem Aufgabengehalt in das Konzentrat ausgelesen werden. Stellt man sich beispielsweise ein Kupfererz mit 2 % Chalkopyrit vor, so wird man den Arbeitspunkt keines Falls auf den Punkt des maximalen Trennungsgrades legen. Abgesehen davon existiert kein Trennprozess, der ein Partikelgemisch herab bis zu solch niedrigen Partikelgehalten scharf trennen kann. Je besser aufgeschlossen das Material jedoch vorliegt, desto weniger Partikel mittlerer Verwachsungsklassen liegen vor und desto näher rücken reale und theoretisch maximale Trennungsgrade zusammen.

Durch TOLKE [19] wurde eine Trennungsschärfe definiert, bei der die Sortierkennzahl  $B$  ins Verhältnis zu den real vorliegenden Aufschlussverhältnissen gesetzt wird. Dies führt zu dem Quotienten aus Anreicherungs- und Aufschlussersfolg, was der Trennerfolgzahl  $B_T$  entspricht. Demnach ist die Erfolgskennzahl auch als Trennungsschärfekennwert für den mechanischen Aufschluss und für Sortierprozesse zu verstehen, wobei die gesamte Verwachsungskurve beziehungsweise Sortierkurve in die Betrachtung einbezogen wird. Das mechanische Aufschließen kann wie ein Trennprozess verstanden werden, bei dem miteinander verwachsene Minerale durch Einbringen von Energie, das heißt über Brüche, voneinander getrennt werden. Im Unterschied zu Trennprozessen liegen beim Aufschließen keine zwei Produkte, sondern ein Gemisch unterschiedlich zusammengesetzter Partikel vor. Je größer die

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

Aufschlussersfolgszahl ist, desto schärfer ist die Trennung der miteinander verwachsenen Minerale durch Brüche, das heißt der Aufschluss des Materials.

Eine erste erfolgreiche Anwendung der neu definierten Aufschlussersfolgszahl erfolgte durch REICHERT [126]. Der Parameter  $B_A$  wurde zur Optimierung des Arbeitsfeldes einer Vertikalrollenmühle bei der Mahlung zweier schwedischer Eisenerze eingesetzt. Die Aufschlussgrade herkömmlicher Definition waren für den Einsatz der Mühlenoptimierung nicht geeignet. Ebenso erfolgte eine erste erfolgreiche Anwendung der Kombination aus Aufschluss- und Anreicherungsresultaten nach dem vorgeschlagenen Schema. Für ein Zinnwalder Greisenerz wurden Aufschluss- und Anreicherungskurven sowohl in einem MAYER- [127] als auch in einem FUERSTENAU-2-Diagramm [128] vorgestellt, die neu definierten Parameter berechnet und eine Bewertung der Prozesskombination auf dieser Grundlage geführt.

Geht man von der Betrachtung des mechanischen Aufschlusses auf die Betrachtung von Anreicherungsprozessen über, ist ein spezifischer Trennschnitt stärker von Interesse, als die sich ausbildende Verteilung der Merkmale. Die Verteilung kann bei Trennprozessen zur Beschreibung der Trennschärfe über Trennfunktionen (siehe Abschnitt 2.2.5) herangezogen werden. Die Trennfunktion lässt jedoch keine Aussage über Produktkennwerte zu. Ebenso verhält es sich mit Kennzahlen, die die gesamte Trennung des Materials nach einem Merkmal betrachten (siehe Abschnitt 2.2.2). Hierfür eignet sich eine Trennschnittkennzahl wie der Trennungsgrad besser. Zu beachten ist, dass basierend auf der Auftragung der Verwachsungsverteilung im Trennungsgraddiagramm nicht zwingend auf den ausbringbaren Anteil des Wertstoffes geschlossen werden kann, da das Optimum der Anreicherung üblicherweise nach links, das heißt zu geringeren Werten des Wertstoffausbringens, verschoben ist (siehe Abbildung 15).

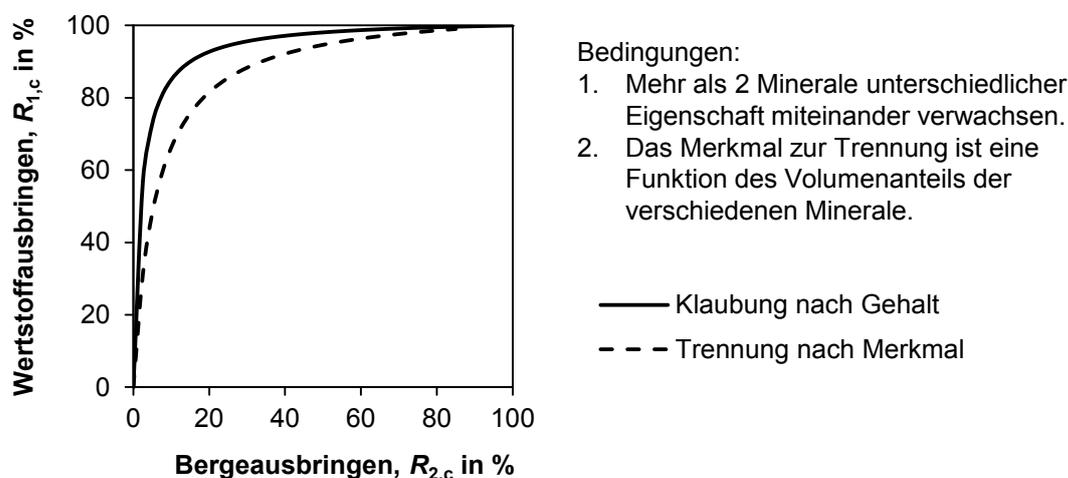
### 2.3.3 Einfluss des Trennmerkmals

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Definition beider Erfolgskennzahlen erläutert, wobei nicht näher auf das Erzeugen der Verwachsungskurve eingegangen wurde. Bisher wurde unter Verwachsungskurve der kumulative Verlauf von Kennwerten (errechnet aus Masseanteilen und Konzentrationen), gebildet mit abnehmendem Wertstoffgehalt der Partikel, verstanden. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, kann eine Verwachsungskurve auch aus anderen Größen gebildet werden. Diese Größen können das Trennmerkmal (Dichte [20], Suszeptibilität, ...) oder mit dem Trennmerkmal

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

verknüpfte Größen darstellen. Im Fall des Partikelgehalts, der Partikeldichte und des Anteils freigelegter Oberfläche ist dies bereits in die Software der automatischen mineralogischen Analysesysteme implementiert. Wichtig ist die Unterscheidung zwischen Merkmalen, die dem Volumen- oder Masseanteil der Komponenten zugeordnet und solchen, die dem Oberflächenanteil zuzuordnen sind. Im Folgenden beschränkt sich die Betrachtung auf Trennprozesse, deren Trennmerkmal dem Volumen- beziehungsweise Masseanteil zuzuordnen ist.

Im Sinne eines Trennprozesses liefert die Klaubung nach dem Wertstoffgehalt des Partikels das bestmögliche Ergebnis. Alle Sortierprozesse, deren Trennmerkmal sich aus den Merkmalen der miteinander verwachsenen Phasen errechnet, können bestenfalls eine Sortierkurve ergeben, die unterhalb oder auf der Klaubungskurve nach dem Wertstoffgehalt verläuft (Abbildung 16) [25]. Das heißt, bei gleichem Wertstoffausbringen weisen die Anreicherungskurven nach anderen Merkmalen einen Wert des Bergeausbringens auf, der größer oder gleich dem der Klaubung nach dem Wertstoffgehalt ist. Sie stellt folglich den Grenzprozess aller Sortierprozesse dar. Der Beweis hierfür folgt im Abschnitt 2.3.4.



**Abbildung 16: Beispielkurven für eine Klaubung nach dem Wertstoffgehalt und eine Trennung nach anderen Merkmalen**

Über die Berechnung verschiedener Verwachsungsverteilungen eröffnet sich die Möglichkeit, die Betrachtungen hinsichtlich der Eignung des Trennprozesses aber auch gegenüber des Aufschlusses des Sortiermerkmals zu erweitern. Je größer die Differenz zwischen den Verwachsungsverteilungen unterschiedlichen Merkmals zur Klaubungskurve, desto weniger geeignet ist das gewählte Merkmal zum Anreichern des Wertstoffes. Gleiches gilt für das erfolgreiche Freilegen aller Phasen ähnlich großen Trennmerkmalwertes. Es muss nicht zwingend erforderlich sein, den Wert-

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

stoff so weit wie möglich aufzuschließen. Vielmehr ist es aus Sicht des Trennprozesses sinnvoll, Phasen mit ähnlichem Merkmalwert von jenen aufzuschließen, die sich hinsichtlich des Merkmals deutlich unterscheiden. Dadurch wird der Anteil von Partikeln mit mittlerem Merkmalwert, das heißt im Bereich der Trenngrenze, verringert. Die Differenz zwischen der Klaubungskurve und der Kurve für die Trennung nach dem Merkmal lässt sich durch das Berechnen der Erfolgskennzahlen ermitteln.

Je mehr Phasen beziehungsweise Minerale im Partikelsystem vorhanden sind, desto umfangreicher wird die Betrachtung des Prozesses. Eine Reduzierung auf ein binäres System aus Wertstoff und Bergen, beispielsweise nach Ausprägung des für die Trennung auszunutzenden Merkmals, hilft, die Komplexität der Auswertung deutlich zu vermindern. Ein solches Vorgehen führt jedoch zu anderen Schwierigkeiten, die bei der Beurteilung berücksichtigt werden müssen [19]. Beispielsweise können Partikeln existieren, welche vollständig aus als Wertstoff definierten Phasen bestehen, durch ihre Zusammensetzung aus unterschiedlichen Phasen aber unterschiedlich stark ausgeprägte Merkmale aufweisen. Darüber hinaus kann es, bei großen Unterschieden im Trennmerkmal der gemeinsam zum Wertstoff gruppierten Phasen, Partikel geben, die nicht vollständig aus wertstoffhaltigen Komponenten aufgebaut sind, trotzdem einen größeren Merkmalwert als andere reine Wertstoffphasen aufweisen. Zur Vermeidung solcher schwer zu interpretierender Zusammenhänge muss sich das Gruppieren auf Komponenten ähnlicher Eigenschaften beschränken.

### 2.3.4 Lage der Grenzkurven

Die Grenzkurve nach dem Wertstoffgehalt (Klaubungskurve) ergibt sich, indem man Partikel mit abnehmendem Wertstoffgehalt in das Konzentrat austrägt und die kumulativen Kennwerte Wertstoffausbringen und Bergeausbringe berechnet. Der Anstieg der Verwachsungskurve kann über Gleichung (46) beschrieben werden.

$$\tan \alpha = \frac{\Delta R_{1,c}}{\Delta R_{2,c}} = \frac{\Delta R_{1,c}}{\Delta R_{1,c} \cdot \frac{c_{1,a}}{c_{1,c}} \cdot \frac{100 - c_{1,c}}{100 - c_{1,a}}} \quad (46)$$

Hierbei entspricht das Austragen eines Partikels einer definierten Änderung im Wertstoff- sowie Bergeausbringen. Nach einer Umformung erhält man den Zusammenhang der Steigung mit den Konzentrationen im Aufgabegut und im Konzentrat.

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

$$\tan \alpha = \frac{100 - c_{1,a}}{c_{1,a}} \cdot \frac{c_{1,c}}{100 - c_{1,c}} \quad (47)$$

Die Steigung hängt vom Aufgabegehalt und vom Wertstoffgehalt des Konzentrates ab. Während des Trennprozesses kann sich allein der Konzentratgehalt ändern, indem Partikel mit unterschiedlichem Gehalt ausgetragen werden. Der Konzentratgehalt läuft dabei von 100 % für reinen Wertstoff im Konzentrat bis  $c_{1,c} = c_{1,a}$  beim Ausbringen der gesamten Masse im Konzentrat (siehe Abbildung 17).

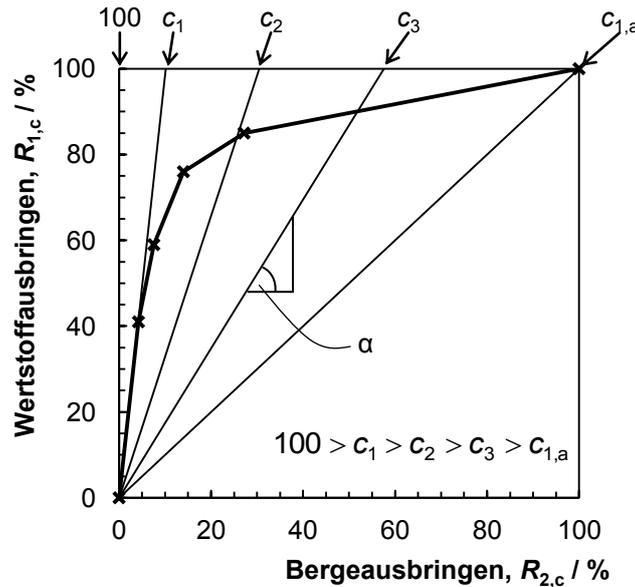


Abbildung 17: FURSTENAU-2-Diagramm mit einer Beispielkurve und Linien gleichbleibenden Konzentratgehalts (Isogehaltlinien)

Aus Gleichung (9) und (47) ergibt sich eine monoton fallende zweite Ableitung und damit ein konvex gekrümmter Verlauf der Verwachsungskurve.

$$\lim_{c_{1,c} \rightarrow c_{1,a}} \left( \frac{100 - c_{1,a}}{c_{1,a}} \cdot \frac{c_{1,c}}{100 - c_{1,c}} \right) = 0 \quad (48)$$

Die Verwachsungskurve stellt unabhängig vom gewählten Trennmerkmal die theoretische Grenze für alle anreichernden Prozesse dar. Diese Kurve kann nicht in Richtung besserer Trennungen überschritten werden. Hierfür muss bei gleichem Masseausbringen (Gleichung (2)) und konstantem Aufgabegehalt  $c_{1,a}$

$$R_{1,c,\text{Trennmerkmal}} \geq R_{1,c,\text{Gehalt}} \quad (49)$$

und

$$R_{2,c,\text{Trennmerkmal}} \leq R_{2,c,\text{Gehalt}} \quad (50)$$

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

gelten. Nach den Gleichungen für das Wertstoffausbringen (4) und das Bergeausbringen (6) ist diese Forderung erfüllt, wenn der Konzentratgehalt beim Austragen nach dem Trennmerkmal den nach dem Partikelgehalt übersteigt.

$$C_{1,c,Trennmerkmal} > C_{1,c,Gehalt} \quad (51)$$

Bei gleichem Masseausbringen beider Trennungen kann Gleichung (51) in Gleichung (52) umgeschrieben werden.

$$\sum_{i=1}^n m_{1,c,Trennmerkmal} \geq \sum_{i=1}^n m_{1,c,Gehalt} \quad (52)$$

Aus Gleichung (9) geht hervor, dass es bei gleichem Masseausbringen keinen Zustand geben kann, in dem mehr Wertstoffmasse ausgetragen worden ist als bei der Trennung nach dem Wertstoffgehalt der Partikel. Folglich kann Gleichung (52) nicht erfüllt werden, und es gilt:

$$\sum_{i=1}^n m_{1,c,Trennmerkmal} \leq \sum_{i=1}^n m_{1,c,Gehalt} \quad (53)$$

wonach kein anreichernder Prozess die Verwachsungskurve überschreiten kann.

### 2.3.5 Prozesskennzahl

Mithilfe der über Gleichung (42) und (43) definierten Aufschluss- und Trennerfolgswahl ist die separate, jedoch vergleichbare Beurteilung beider Teilprozesse gelungen. Sollen Aussagen über den Gesamtprozess aus Aufschluss und Anreicherung getroffen werden, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Der Anreicherungsprozess kann entweder über die ursprüngliche Definition der Sortierkennzahl nach Gleichung (20) bestimmt werden, oder man berechnet eine weitere Kennzahl, in die man beide Teilprozesse einfließen lässt [24, 25, 127]. Die einfachste Definition einer solchen zusätzlichen Kennzahl ist die Differenz aus Aufschluss- und Trennerfolgswahl:

$$Z_B = B_A - B_T \quad (54)$$

$B_A$  und  $B_T$  verlaufen von 0 % im schlechtesten Fall bis 100 % beim Erreichen des idealen Grenzprozesses. Die Differenz beider Kennzahlen kann somit theoretisch zwischen -100 % bis 100 % verlaufen. Der Extremwert im positiven Bereich entspricht einem idealen Aufschluss mit nachfolgender nicht selektiver Trennung (Teilung). Das entsprechend andere Extrem entspricht einem nicht vorhandenen Aufschluss mit anschließender idealer Trennung. Es ist leicht ersichtlich, dass der

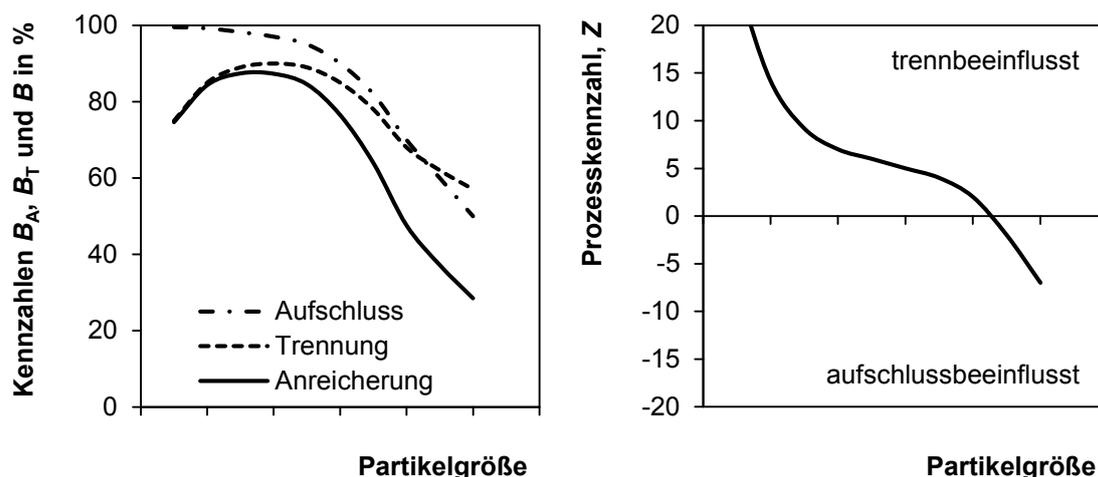
## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

letztgenannte Extremfall praktisch keine Relevanz hat, ein vollkommener Aufschluss mit anschließender nicht selektiver Trennung hingegen einen realen Prozess beschreibt. Dies gilt vor allem, wenn das Material sehr weit zerkleinert wird, sodass der Aufschluss seinem Grenzwert zustrebt, die Trennung aber aufgrund der geringen Partikelgröße immer schlechter möglich ist.

Neben der Berechnung einer Prozesskennzahl aus integralen Kennzahlen ist ebenso das Betrachten der Differenz der Trennschnittkennzahlen möglich. Hierbei werden in Gleichung (54) die Kennwerte  $B_A$  und  $B_T$  durch  $\eta_{\text{Aufschluss}}$  und  $\eta_{\text{Trennung}}$  ersetzt.

$$Z_\eta = \eta_A - \eta_T \quad (55)$$

Das Bilden eines Parameters nach Gleichung (54) hat seine Berechtigung, da eine Unterscheidung zwischen aufschlussbeeinflussten und trennprozessbeeinflussten Ergebnissen möglich wird (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18: Prinzipieller Verlauf der Erfolgskennzahlen und der Prozesskennzahl über der Partikelgröße**

Aufschlussbeeinflusste Ergebnisse stellen solche dar, bei denen der Parameter  $Z$  einen negativen Wert annimmt. Dies bedeutet, dass das Material schlechter aufzuschließen als zu trennen ist. Eintreten können solche Fälle bei stark ausgeprägten Sortiermerkmalen wie beispielsweise einem besonders schweren Mineral in einer Matrix aus leichten Mineralen oder aber einem stark paramagnetischen Mineral in einer Matrix aus diamagnetischen Mineralen. Typischerweise tritt diesem Fall im Bereich grober Partikel auf, wodurch ihm in der Praxis durch eine Voranreicherung, das heißt Abrennen wertstofffreier Partikel und anschließendem weiteren Aufmahlen, begegnet wird. Trennbeeinflusste Ergebnisse stellen solche mit einem positiven Wert

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

Z dar. Hierbei liegt gut aufgeschlossenes Material vor, welches schlecht getrennt wurde. Dies repräsentiert typische Verhältnisse beim Vorliegen geringer Unterschiede im Trennmerkmal und stellt die schwieriger zu lösende Aufgabe bei der Aufbereitung dar.

### 2.3.6 Lage des Arbeitspunktes

Die Lage des Arbeitspunktes ist für die Optimierung eines technischen Prozesses von entscheidender Bedeutung. Seine Festlegung kann an verschiedene Bedingungen geknüpft sein. Hierunter fallen das ökonomische oder aber das technische Optimum [20]. Das erstgenannte wird hierbei jedoch immer dominierend sein und stellt das eigentliche Ziel der Optimierung dar [6]. Daher ist es auch verständlich, dass technische Optimierungen immer auch unter dem ökonomischen Gesichtspunkt betrachtet werden müssen. Kennzahlen, die eine Effizienz des Verfahrens beschreiben sollen, müssen aus diesem Grund eine Verbindung aus ökonomischer und technischer Effizienz darstellen [15, 129]. Unter dem ökonomischen Optimum kann man alle Bestrebungen zusammenfassen, die den Gewinn des Anlagenbetreibers maximieren. Dies kann beispielsweise durch Steigerung des Anlagendurchsatzes beziehungsweise des Ausbringens bei gleichbleibender Produktqualität oder durch Senkung der Anlagenkosten geschehen. Im Rahmen dieser Arbeit ist das technische Optimum, also das Steigern von Ausbringen und Gehalt von Interesse, wobei der Fokus nicht auf der Steigerung an sich, sondern vielmehr auf der Beschreibung des Prozessergebnisses liegt.

Das Maximum des Trennungsgrades, also der Punkt, an dem der Prozess aus Sicht der Anreicherung optimal ist, liegt genau zu Beginn der Rückvermischung. Das heißt, es befindet sich im Bereich der Partikel, die in ihrer Zusammensetzung dem Aufgabegehalt entsprechen. Solange man Partikel mit einem größeren Gehalt als dem Aufgabegehalt austrägt, wird angereichert. Dies drückt sich in einem steigenden Wert der Differenz aus Wertstoffausbringen und Bergeausbringen aus. Beginnt das Austragen von Partikeln mit einem geringeren Gehalt als dem der Aufgabe, so beginnt die Rückvermischung von wertstoffarmen Material in das Konzentrat. Die Effizienz des Prozesses nimmt ab.

Verwendet man die Parameter  $B_A$  und  $B_T$  beziehungsweise  $\eta_A$  und  $\eta_T$  zur partikelgrößenabhängigen Beurteilung des Prozesses, so muss man in erster Linie versuchen, im Bereich möglichst großer Trennerfolgswerte zu arbeiten (siehe Abbildung

## 2.3 Kombination von Aufschluss- und Trennerfolg

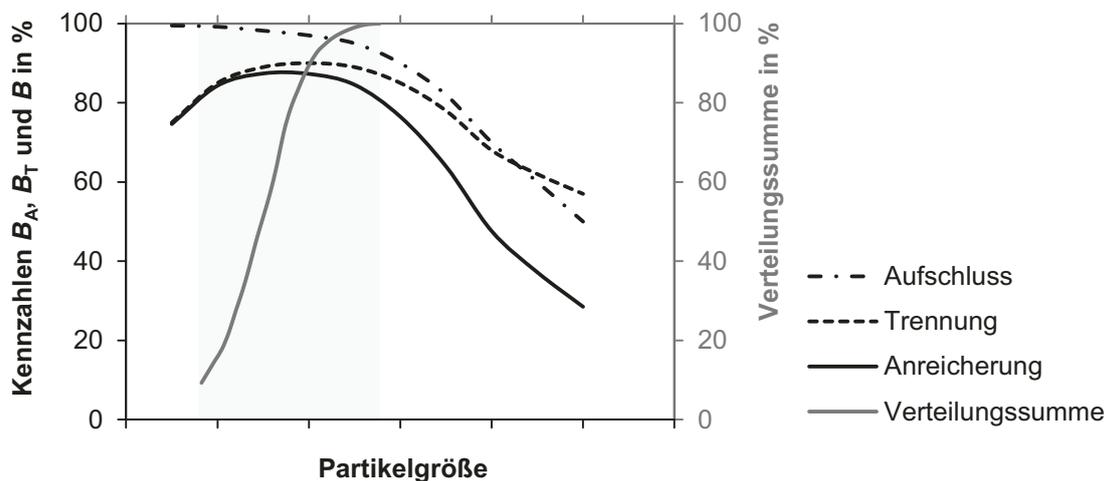
19). Dies liefert aus technischer Sicht die besten Konzentrate. Optimiert werden kann folglich das Produkt aus dem Masseanteil  $\mu$  einer Größenklasse  $i$  und der entsprechenden Anreicherungskennzahl ( $B$  oder  $\eta$ ) über das Anpassen der Aufgabekörnung.

$$B_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot B_i \quad (56)$$

Beziehungsweise

$$\eta_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \eta_i \quad (57)$$

Hierbei ist es allerdings auch möglich, hinsichtlich des erforderlichen Aufschlusses zu optimieren. Führt ein Verbessern des mechanischen Aufschlusses zu keiner Steigerung des Trennerfolges, so kann die hierfür erforderliche Energie eingespart werden.



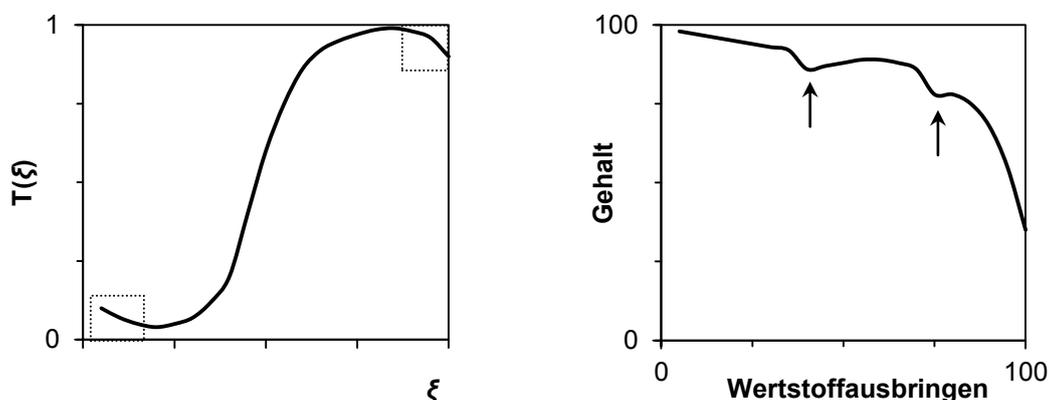
**Abbildung 19. Lage der Verteilungssumme gegenüber den Kurven der Erfolgskennzahlen (Gleichungen (56) und (57))**

Wesentlich für die Entscheidung ist die Lage der aus der Zerkleinerung resultierenden Partikelgrößenverteilung. Sie sollte aus Sicht eines Sortierprozesses möglichst steil verlaufen. Dann ist auch die Spannweite der Erfolgskennzahlen durch die unterschiedlichen Partikelgrößen im Material klein. Über ein solches Vorgehen wäre eine Einbeziehung der Erfolgskennzahlen in technische Optimierungen beziehungsweise in Fließschemasimulationen möglich, wie es für andere Effizienzkenwerte zur Bewertung von Trennschritten bereits vor langer Zeit erfolgreich durchgeführt wird [130].

### 2.3.7 Einfluss stereologischer Effekte

Stereologische Effekte gehen nur einseitig in die Beurteilung des Anreicherungs-erfolges ein, da sie lediglich bei der Ermittlung der Verwachsungsverteilung über Schlibfbildbetrachtungen der Körnerpräparate auftreten. Werden Daten vom Mineral-Modalbestand der Schlibfbildanalysen verwendet, so spielt der stereologische Effekt keine Rolle (siehe Abschnitt 2.1.6). Elementgehalte der Gesamtprobe, welche wesentlich die Sortiererergebnisse repräsentieren, weisen keine Beeinflussung auf. Der stereologische Effekt äußert sich in einem Überrepräsentieren freier beziehungsweise nur geringfügig verwachsener Partikel. Dies hat zur Folge, dass Verwachsungskurven im Bereich des freien Wertstoffs beziehungsweise der freien wertstofflosen Bestandteile stärker fehlerbehaftet sind, als im Bereich mäßig verwachsener Partikel [9, 10, 28, 32, 80, 111].

Sichtbar wird dieser Einfluss beispielsweise bei der Berechnung von Trennfunktionen basierend auf der Aufschlussanalyse der Trennprodukte. Es treten freie Wertstoffpartikel in den Abgängen auf, die in ihrer Menge deutlich überrepräsentiert sind. Gleiches gilt für freie Bergepartikel im Konzentrat. Ergebnis ist eine Trennfunktion, deren Enden von den erwarteten Verläufen abweichen, indem sie fehlausgetragene Partikel ( $T(\xi) > 0$ ) für geringe Werte von  $\xi$  sowie Verluste von Zielpartikeln ( $T(\xi) < 1$ ) mit großen Werten von  $\xi$  ausweisen (siehe markierte Bereiche in Abbildung 20 links).



**Abbildung 20: Einfluss des stereologischen Fehlers auf die Trennfunktion (links) und das HALBICH-Diagramm (rechts)**

Auch in den häufig verwendeten HALBICH-Diagrammen kann der stereologische Fehler beobachtet werden. Stellt man den Zusammenhang von Wertstoffgehalt und Wertstoffausbringen mit abnehmendem Merkmalwert dar, so treten bei Vielkomponentensystemen im Bereich der frei vorliegenden Phasen bei mittlerem Merkmalwert besonders starke Verringerungen des Gehaltes auf (siehe Pfeile in Abbildung 20

## 2.4 Magnetscheidung

rechts). Zum Teil wird dieser Verlauf durch den wirklich aufgeschlossenen Anteil dieser Phasen verursacht. Darüber hinaus lässt sich der Verlauf jedoch auch in Partikelgrößenbereichen beobachten, in dem noch keine Phasen frei vorliegen sollten.

Im Fall von FUERSTENAU-Diagrammen äußert sich der stereologische Fehler derart, dass die Klaubungskurven gegenüber der wirklich vorliegenden Verwachsungsverteilung zu spät die Kurve der idealen Trennung verlassen und zu früh auf die Kurve der Rückvermischung übergehen (vergleiche Beispiel zu Abbildung 9 im Anhang A.3, Abbildung 74). Der Bereich mäßig verwachsener Partikel ist verarmt, da ein Teil dieser Partikel falsch angeschliffen und anderen Verwachsungsklassen zugeordnet wurde. Prinzipiell ist insgesamt eine etwas zu groß berechnete Aufschlussersfolgzahl zu erwarten. Die Quantifizierung des Fehlers ist nur möglich über den Einsatz geeigneter stereologischer Transformationsmodelle (siehe Abschnitt 2.1.6) oder durch den Vergleich der zweidimensional gemessenen Verwachsungsverteilungen mit Verwachsungsverteilungen basierend auf tomographischen Messungen (siehe Abschnitt 2.1.5).

### 2.4 Magnetscheidung

Die Magnetscheidung ist ein Sortierverfahren, bei dem Partikel vordergründig nach ihrer Magnetisierbarkeit in ein magnetisches und ein nicht magnetisches Gut getrennt werden. Entscheidend für eine Trennung ist eine auf die Partikel wirkende magnetische Kraft, die in ihrer Größe von den weiteren auf die Partikel wirkenden Feldkräften verschieden ist. Diese magnetische Kraft kann vereinfacht durch Gleichung (58) beschrieben werden [2].

$$F_m = V_P \mu_0 \chi_P H \cdot \text{grad}H \quad (58)$$

Aus ihr geht hervor, dass die auf den Partikel wirkende Magnetkraft von Stoff- und Partikeleigenschaften wie der Partikelsuszeptibilität  $\chi_P$  und dem Partikelvolumen  $V_P$ , aber auch von Feldeigenschaften wie der Feldstärke  $H$  und deren Gradient  $\text{grad}H$  abhängt. In den folgenden Abschnitten wird auf die für die Ausbildung der magnetischen Kraft entscheidenden Faktoren eingegangen und deren Ursprung sowie deren Beeinflussung näher erläutert.

## 2.4 Magnetscheidung

### 2.4.1 Grundlagen des Magnetismus

Der Magnetismus von Stoffen ist eine physikalische Eigenschaft, welche auf Grundlage von Effekten auf atomarer Ebene hervorgerufen wird. Darüber hinaus sind bei Feststoffen und Körpern verschiedene andere Einflussfaktoren wie beispielsweise der strukturelle Aufbau, das Vorhandensein anderer magnetischer Phasen oder auch die Einwirkung von mechanischen Spannungen zu berücksichtigen [33].

Seinen Ursprung hat der Magnetismus im magnetischen Moment der Atome, welches sich aus den Bahn- und Spinnmomenten der Elektronen und dem Kernmoment zusammensetzt [38]. Kernmomente können für die meisten Betrachtungen vernachlässigt werden, da diese etwa um 3 Größenordnungen kleiner als die anderen sind. Im Festkörper spielen die Struktur und Bindungsverhältnisse für den Magnetismus eine Rolle, wobei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen magnetischen Eigenschaften und beispielsweise der Kristallsymmetrie besteht. Dies liegt darin begründet, dass die Kristallsymmetrie keine Aussagen über den Aufbau der Basis des Kristallgitters liefert [38].

Stoffe erfahren im magnetischen Feld eine Magnetisierung  $\mathbf{M}$ , die über die relative Permeabilitätszahl  $\mu_r$  beziehungsweise über die Suszeptibilität  $\chi$  mit der magnetischen Feldstärke  $\mathbf{H}$  gekoppelt ist.

$$\mathbf{M} = (\mu_r - 1)\mathbf{H} = \chi \cdot \mathbf{H} \quad (59)$$

Den Magnetismus kann man in 3 Hauptarten unterscheiden. Dies sind Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Diamagnetismus zeichnet sich durch eine temperaturunabhängige relative Permeabilitätszahl  $< 1$  aus ( $\chi < 0$ ) [2, 33, 34, 38, 131, 132]. Die Magnetisierung dieser Stoffe ist dem magnetischen Feld entgegengesetzt gerichtet. Das heißt, das magnetische Feld wird im Inneren dieser Stoffe abgeschwächt beziehungsweise diese Stoffe werden aus dem inhomogenen magnetischen Feld herausgedrängt [38]. Paramagnetismus zeichnet sich durch eine temperaturabhängige Permeabilitätszahl  $\mu_r < 1$  aus ( $\mu_r = \mu_r(T)$ ,  $\chi > 0$ ) [2, 33, 34, 38, 131, 132]. Diese Stoffe verstärken das magnetische Feld in ihren Inneren beziehungsweise werden in ein inhomogenes magnetisches Feld hineingezogen [38]. Die dritte Art ist Ferromagnetismus, bei dem die relative Permeabilitätszahl eine Funktion der Temperatur und des magnetischen Feldes ist ( $\mu_r = \mu_r(H, T)$ ,  $\chi \gg 0$ ) [2, 33, 34, 38, 131, 132]. Ferromagnetismus tritt bei Stoffen auf, die Bereiche einheitlicher spontaner Magnetisierung besitzen [38]. Erhitzt man ferromagnetische Stoffe über

## 2.4 Magnetscheidung

die sogenannte CURIE-Temperatur hinaus, werden die Bereiche einheitlicher spontaner Magnetisierung zerstört [38]. Der Stoff wird paramagnetisch. Darüber hinaus gibt es zwei weitere, spezielle Arten des Magnetismus: Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus. Sie treten auf, wenn Teilgitter mit entgegengesetzter Magnetisierung existieren. Kompensieren sie sich vollständig, so zeigt der Festkörper diamagnetischen Charakter (Antiferromagnetismus). Ist die Kompensation unvollständig, zeigt der Festkörper ferromagnetischen Charakter (Ferrimagnetismus). Wird eine charakteristische Temperatur (NÉEL-Temperatur) überschritten, so werden die Bereiche zerstört, wodurch der Festkörper paramagnetischen Charakter annimmt [38].

Für ideal aufgebaute Strukturen kann man die Suszeptibilität von Festkörpern rechnerisch aus den magnetischen Eigenschaften der Elementarbausteine berechnen. Reale, in der Natur vorkommende Strukturen wie Minerale, weisen Gitterfehler und Verunreinigungen auf, wodurch eine rechnerische Bestimmung der Suszeptibilität im seltensten Fall zielführend ist. Zudem ist die magnetische Suszeptibilität von anisotropen Körpern ein Tensor. Oft ist die Anisotropie jedoch so gering, dass auf eine tensorielle Darstellung verzichtet werden kann [38]. Polykristalline Stoffe (meist technische Verbindungen) können durch den Mittelwert der Suszeptibilität beschrieben werden [38].

### 2.4.2 Magnetismus bei Festkörpern und Mineralen

Die Größe der paramagnetischen Suszeptibilität der wichtigsten gesteinsbildenden Minerale ist von deren chemischer Zusammensetzung und dabei vor allem vom Gehalt an Elementen mit einem großen magnetischen Moment abhängig. Hierunter fällt neben Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{3+}$ ) beispielsweise auch Mangan ( $\text{Mn}^{2+}$ ) [34]. Zu den wichtigen gesteinsbildenden Mineralen gehören Amphibol, Biotit, Granat, Klino- und Orthopyroxene sowie Olivin.

Minerale, die aus Ionen ohne permanente magnetische Momente aufgebaut sind, zeigen diamagnetischen Charakter. Solche mit permanentem magnetischen Moment sind entweder paramagnetischen Charakters, sofern keine Austauschenergie zwischen den Elementen auftritt, oder ferro-, ferri- beziehungsweise antiferromagnetischen Charakters, wenn eine Austauschenergie existiert [34]. Permanente magnetische Momente sind an das Vorhandensein ungepaarter Elektronen gebunden [34]. In der Vergangenheit wurde versucht, die Änderung der magnetischen Suszeptibilität über einfache lineare Zusammenhänge auf die Änderung des Anteils an Eisen und

## 2.4 Magnetscheidung

Mangan [37] zurückzuführen. Dies gelang für einige Mineralgruppen mit Einschränkungen, wurde jedoch durch spätere Arbeiten widerlegt [133]. Als Grund wird hierfür angegeben, dass sich die elektrischen Felder benachbarter Atome beeinflussen.

Die Berechnung der magnetischen Suszeptibilität von Mineralen basierend auf deren atomaren Aufbau erreicht laut BLEIL [34] für paramagnetische Minerale eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit gemessenen Werten. Wichtig ist jedoch, dass der Einfluss des Aufbaus beziehungsweise der Struktur oft nicht mit abgebildet werden kann [134]. Hierfür können beispielhaft Pyrit und Markasit (jeweils  $\text{FeS}_2$ ) aufgeführt werden, die sich lediglich in der Kristallstruktur unterscheiden, aber eine unterschiedliche Suszeptibilität aufweisen (vergleiche Tabelle 28). Ebenso treten sehr große Änderungen der Suszeptibilität durch geringe Änderungen im Eisenanteil bei Pyrrothin ( $\text{FeS}$  bis  $\text{FeS}_2$ ) auf. Darüber hinaus können ferromagnetische Elemente paramagnetische Minerale und paramagnetische Elemente diamagnetische Minerale aufbauen, daher wird eine direkte Messung empfohlen [134].

Nach SCHUBERT [2] und DERKATSCH [39] können Minerale in der Aufbereitungstechnik über ihre Magnetisierbarkeit in vier Gruppen eingeteilt werden.

**Nicht magnetische Minerale:** Unter nicht magnetische Minerale fallen alle diamagnetischen Minerale und solche mit einer Massensuszeptibilität von kleiner als  $100 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Typische Vertreter für diamagnetische Minerale sind Quarz, Feldspäte, Haloidsalze und Sulfate wie Baryt und Anhydrit. Als Vertreter für Minerale mit sehr schwach ausgeprägtem Paramagnetismus können Dolomit, Pyrit und Markasit genannt werden.

**Schwach magnetische Minerale:** Die Gruppe der schwach magnetischen Minerale erstreckt sich über einen Bereich der Massensuszeptibilität von  $100 \cdot 10^{-9}$  bis  $7500 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Zu dieser Gruppe gehören beispielsweise viele Glimmer, Pyroxene aber auch Oxide wie Ilmenit und Hämatit.

**Mittelmagnetische Minerale:** Mittelmagnetische Minerale bewegen sich in einem Bereich der Massensuszeptibilität von  $7500 \cdot 10^{-9}$  bis  $35000 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Ein typischer Vertreter dieser Gruppe ist Pyrrothin.

**Stark magnetische Minerale:** Alle Minerale, die eine Massensuszeptibilität größer als  $35000 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  aufweisen werden als stark magnetische Minerale eingestuft. Der ferromagnetische Magnetit steht beispielhaft für diese Gruppe.

## 2.4 Magnetscheidung

Obwohl die magnetische Suszeptibilität eine physikalische Eigenschaft der Minerale darstellt, ist sie nur für einen Teil der Minerale untersucht und selten in herkömmlichen Datenbanken beziehungsweise Lehrwerken zu finden. Zumeist beschränken sich die Zusammenstellungen in der Literatur auf typische gesteinsbildende Minerale, Minerale mit ausgeprägtem Paramagnetismus oder Ferromagnetismus oder auf Gesteine allgemein. Darstellungen dieser Art finden sich beispielsweise in der Fachliteratur zur Geophysik. Unter Gesichtspunkten der Aufbereitung sind meist die für die Gewinnung von metallischen Rohstoffen interessanten Minerale und Gesteine aufgeführt (siehe beispielsweise DERKATSCH [39] oder SCHUBERT [2]). Umfangreiche Datensammlungen, die ohne Fokus auf einen speziellen Fachbereich die physikalischen Eigenschaften und insbesondere die magnetische Suszeptibilität auflisten, sind nur wenige verfügbar. Hierzu zählen beispielsweise die Werke von BLEIL [34], HUNT [33] und CARMICHEL [35]. Es ist zu beachten, dass die zusammengefassten Daten aus einer Vielzahl von verschiedenen Quellen stammen und dadurch zum Teil große Bereiche für die Suszeptibilität angegeben werden. Informationen zur Messmethode und zur Zusammensetzung beziehungsweise Herkunft der Proben müssen aus den Originalquellen entnommen werden. Die Tabelle 28 im Anhang enthält eine umfangreiche Zusammenstellung der Suszeptibilität vieler Minerale und kann als Unterstützung zur Bewertung des Anreicherungsvermögens von Mineralgemischen im magnetischen Feld herangezogen werden.

Will man Betrachtungen zum Anreicherungsvermögen eines Wertstoffes in einem Mineralgemisch auf Grundlage der magnetischen Suszeptibilität durchführen, so ist die stark lagerstättenspezifische Zusammensetzung (Chemismus und Einschlüsse) der Minerale zu beachten [94]. Daher ist es empfehlenswert, die Suszeptibilitäten der reinen Komponenten des Erzes für jeden Erzkörper neu zu ermitteln. Sowohl eine direkte Messung reiner Minerale des Erzkörpers als auch die Berechnung auf Grundlage von Messungen der Suszeptibilität und der Zusammensetzung von Kompositpartikeln des Erzkörpers kommen dafür in Frage (siehe hierzu Abschnitt 2.4.4).

Neben den stoffseitigen Parametern wie Chemismus und Gitteraufbau gehen die geometrische Abmessungen des Partikels in Form des Volumens und die Körpersuszeptibilität  $\chi_P$  ein. Die Körpersuszeptibilität eines Partikels ist über einen Entmagnetisierungsfaktor  $E$  mit der Stoffsuszeptibilität  $\chi_S$  gekoppelt [2].

## 2.4 Magnetscheidung

$$\chi_P = \frac{\chi_S}{1 + E \cdot \chi_S} \quad (60)$$

Entmagnetisierungsfaktoren liegen bei Rotationsellipsoiden im Bereich von 1 (flache Scheibe) über 0,333 (Kugel) bis zu  $< 0,1$  (nadelige Partikel). Im Falle von Mineralen kann man mit typischen Entmagnetisierungsfaktoren von 0,15 bis 0,25 arbeiten [2]. Betrachtet man die relative Abweichung der Körpersuszeptibilität von der Stoffsuszeptibilität nach Formel (61), wie es durch MADAI [112] getan wurde, erkennt man, dass der relative Fehler erst ab einer Stoffsuszeptibilität von  $0,004 \text{ m}^3/\text{kg}$  einen Wert von 0,1 % überschreitet (siehe auch im Abbildung 77 Anhang).

$$\Delta = 100 \frac{\chi_S - \chi_P}{\chi_P} \quad (61)$$

Der typische Größenbereich für die Suszeptibilität paramagnetischer Minerale liegt deutlich unterhalb dieses Wertes (siehe Tabelle 28 im Anhang), sodass eine Unterscheidung von Stoff- und Körpersuszeptibilität nicht erforderlich ist [135]. Eine Partikelgrößenabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität ist zu beobachten, wenn die Partikelgröße bis in den Bereich der magnetischen Domänen verringert wird: Superparamagnetismus – Single Domain – Multidomain (in Richtung steigender Partikelgröße) [33]. Für die Aufbereitung magnetischer Minerale spielt dieser Effekt aufgrund der geringen Größe magnetischer Domänen ( $0,01 \dots 1 \mu\text{m}$ -Bereich) keine Rolle. Bei manchen Substanzen wurde eine Abhängigkeit der Suszeptibilität von einer aufgeprägten Kraft (Spannungszustand im Inneren) gefunden. Die Spannungen müssen einaxial vorliegen. Durch diesen Effekt wurden Änderungen der Suszeptibilität um  $\pm 40 \%$  nachgewiesen [33].

### 2.4.3 Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität von Festkörpern ist, wie in den beiden vorherigen Abschnitten schon beschrieben, ein Tensor und von der Struktur des Festkörpers abhängig. Tritt eine Anisotropie, das heißt eine Richtungsabhängigkeit, der magnetischen Suszeptibilität auf, so stellt der Suszeptibilitätstensor ein Rotationsellipsoid dar, welcher in mindestens einer Raumachse einen von den anderen Raumachsen verschieden großen Wert annimmt. Besonders im Bereich der Schichtsilikate (beispielsweise Muskovit, Biotit und Chlorit) wurden starke Anisotropien gemessen

## 2.4 Magnetscheidung

[136-138], aber auch für Minerale wie Quarz und Quarzit [139] wurden eine Anisotropie nachgewiesen.

Untersuchungen an Schichtsilikaten zeigten, dass sich der Anisotropietensor nach dem Gitteraufbau richtet. Die Größe der Suszeptibilität aber auch der Anisotropie hängen hierbei vom Gehalt an Eisen und Mangan ab [138]. Typische Werte für den Grad der Anisotropie bewegen sich im Bereich kleiner 1,5, wobei die Suszeptibilität senkrecht ( $\perp$ ) zur Spaltebene kleiner ist als in Richtung der Spaltebene ( $\parallel$ ) [138]. Größere Werte für den Grad der Anisotropie wurden für Zinnwaldit ermittelt. Hierbei betrug  $\chi_{\parallel} = 2\chi_{\perp}$  zur {001}-Richtung [140]. Zudem wurden in dieser Untersuchung ferromagnetische Anteile über die Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität und eine magnetische Zonierung aufgrund einer unregelmäßigen Verteilung der Kationen auf Oktaederpositionen nachgewiesen.

Nutzen lässt sich die Anisotropie der Suszeptibilität beispielsweise bei geologischen Untersuchungen (Sedimente, Gesteinsumlagerungen). Im Bereich der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen ist sie interessant, da der Merkmalwert bei der Magnetscheidung nicht in jede Richtung den gleichen Wert annimmt. Dies kann beispielsweise bei bevorzugten Bruchrichtungen und dadurch verursachten plättchen- oder stäbchenförmigen Partikeln von Bedeutung sein (siehe Abschnitt 2.1.1). Hierbei ergibt sich je nach Ausrichtung des Partikels ein anderes Kräftegleichgewicht.

### 2.4.4 Magnetische Suszeptibilität von Kompositpartikeln

Die Volumensuszeptibilität eines aus  $n$  Komponenten zusammengesetzten Partikels beziehungsweise Gemisches entspricht der Summe der Volumensuszeptibilitäten jeder Komponente multipliziert mit dessen Volumenanteil [141].

$$\bar{\chi}_v = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V_{\text{ges}}} \cdot \chi_{v,i} \quad (62)$$

In gleicher Weise kann das Mischungsgesetz für die Massensuszeptibilität aufgestellt werden.

$$\bar{\chi}_m = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m_{\text{ges}}} \cdot \chi_{m,i} \quad (63)$$

Die Massensuszeptibilität eines Stoffes entspricht der Volumensuszeptibilität bezogen auf dessen Dichte.

## 2.4 Magnetscheidung

$$\chi_m = \frac{\chi_v}{\rho} \quad (64)$$

Zerlegt man ein Stoffsystem mit  $i$  Komponenten in  $j$  Klassen unterschiedlicher Suszeptibilität, so kann man das Mischungsgesetz für jede Klasse aufstellen und das Stoffsystem in Form eines Gleichungssystems beschreiben.

$$\begin{bmatrix} w_{1,1} & \cdots & w_{1,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{j,1} & \cdots & w_{j,i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \chi_{m,1} \\ \vdots \\ \chi_{m,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\chi}_{m,1} \\ \vdots \\ \bar{\chi}_{m,j} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Hierbei entspricht  $w_{ij}$  dem Masseanteil der Komponente  $i$  in Klasse  $j$ .

$$w_{j,i} = \frac{m_{j,i}}{m_{j,\text{ges}}} \quad (66)$$

Sind die Masseanteile der Komponenten in allen Klassen sowie die Mischungssuszeptibilität der Klassen bekannt, lässt sich die Suszeptibilität der reinen Komponenten rechnerisch ermitteln. Hierdurch können zwei wesentliche Nachteile des herkömmlichen Vorgehens überwunden werden:

1. Für eine messtechnische Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität müssen bis dato reine Partikel der zu messenden Komponente vorliegen. Dies erforderte entweder das Vorliegen einer reinen Probe aus einer Lithothek oder das aufwendige Auslesen einer Probe unter dem Mikroskop. Aufgrund des in den Abschnitten 2.4.1 und 2.4.2 geschilderten Zusammenhangs zwischen chemischer Zusammensetzung und Suszeptibilität müsste eine Probe aus einer Lithothek in ihrer chemischen Zusammensetzung der des Minerals im Erz entsprechen.

2. Bei fein verwachsenen Erzen liegt die Aufschlusspartikelgröße in einem Bereich, der das händische Auslesen unmöglich macht.

Das Lösen der Gleichung (65) kann demnach die Genauigkeit der Ermittlung steigern und einen exakten Wert beziehungsweise Bereich für die Suszeptibilität aller im Gestein vorhandenen Minerale liefern. Darüber hinaus wird über ein solches Vorgehen die Bestimmung der Mineralsuszeptibilitäten von feinkörnig verwachsenen Erzen, aus denen keine Reinproben gewinnbar sind, erst möglich.

### 2.4.5 Messung magnetischer Eigenschaften

Zur Messung der magnetischen Suszeptibilität wurden direkte und indirekte Methoden entwickelt, auf die nachfolgend kurz eingegangen wird. Direkte Methoden

## 2.4 Magnetscheidung

beruhen entweder auf der Messung der Änderung von Magnetfeldern, die durch die Anwesenheit einer Substanz hervorgerufen wird, oder auf der Messung der Wirkung, die das magnetische Feld auf die Substanz ausübt. Indirekte Methoden trennen Stoffgemische beziehungsweise tragen Stoffe in Klassen definierter Magnetisierbarkeit aus, sodass diesen Stoffen aufgrund ihrer Klassenzugehörigkeit magnetische Eigenschaften zugeordnet werden können.

### Direkte Messmethoden

Bei den direkten Messmethoden ist eine Unterscheidung in solche, die eine Kraftwirkung des magnetischen Feldes auf die Probe ermitteln und solche, die die Änderung des magnetischen Feldes durch Einbringen oder Bewegen der Probe messen, angebracht. Zur ersten Gruppe gehören Suszeptibilitätswaagen [142, 143]. Vertreter der anderen Gruppe stellen induktive Messmethoden dar, zu denen beispielsweise Vibrationsmagnetometer [134, 144, 145], SQIT-Magnetometer [146], Magnetresonanz [146], aber auch on-line Messmethoden [147-149] gehören. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Messung der magnetischen Eigenschaften mittels Rasterkraftmikroskopie [150] über die Wechselwirkung auf magnetische Messspitzen. Nachfolgend wird kurz auf ausgewählte Verfahren eingegangen.

### Suszeptibilitätswaagen

Kraftmessende Systeme stellen die Suszeptibilitätswaagen nach dem GOUY- und FARADAY-Prinzip dar (Abbildung 21). Diese Waagen zeichnen die scheinbare Masseänderung der Probe auf, welche durch deren magnetische Eigenschaften hervorgerufen wird. Eine scheinbare Masseänderung resultiert aus der auf die Probe wirkende magnetische Kraft, welche im Gleichgewicht mit der Gewichtskraft steht. Paramagnetische und Ferromagnetische Substanzen werden in das magnetische Feld hineingezogen und erscheinen schwerer, diamagnetische Substanzen werden aus dem magnetischen Feld heraus gedrängt und erscheinen leichter.

Der grundlegende Unterschied zwischen beiden Messsystemen besteht in der konstruktiven Gestaltung der Polschuhe und dem sich dadurch ausbildenden Magnetfeldes. FARADAY-Waagen besitzen einen sich in Schwerkraftrichtung verengenden Luftspalt, woraus ein inhomogenes Magnetfeld resultiert. Die Proben befinden sich während der Messung vollständig innerhalb des Magnetfeldes. Bei Magnetwaagen nach dem GOUY-Prinzip sind die Magnetpole parallel. Das resultierende

## 2.4 Magnetscheidung

Magnetfeld ist homogen. Der für eine Bewegung der Probe erforderliche Feldgradient wird dadurch erzeugt, dass sich diese nur zum Teil innerhalb des Feldes befindet [142].

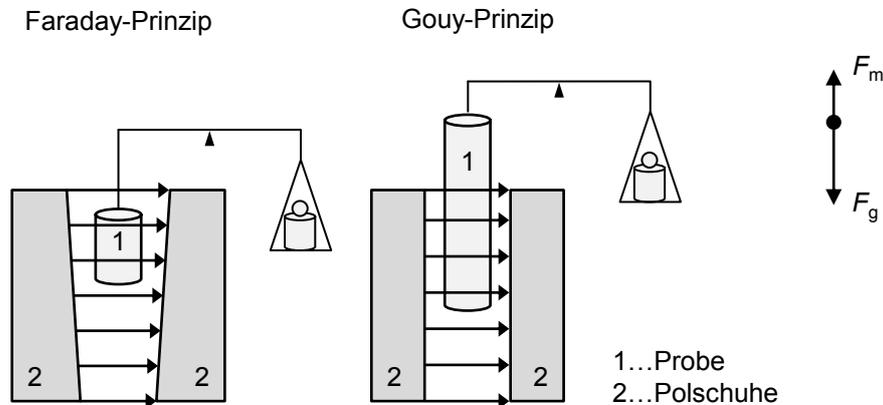


Abbildung 21: Aufbau von Magnetwaagen nach dem FARADAY- und GOUY-Prinzip.

Eine prinzipielle konstruktive Änderung an den Magnetwaagen, der Übergang von der Messung der scheinbaren Masseänderung der Probe auf die Messung der Auslenkung des Magnetsystems [142], ermöglicht das Messen der Suszeptibilität von Lösungen und Suspensionen in Durchflusszellen [143]. Hierdurch sind beispielsweise Ionen in Lösungen nachweisbar oder aber auch die Kinetik chemischer Reaktionen beziehungsweise anderer zeitlich veränderlicher Prozesse messbar.

### Vibrationsmagnetometer

Ein Messgerät, das das Aufzeichnen der gesamten Magnetisierungskurven ermöglicht, ist das Vibrationsmagnetometer (Englisch: vibrating sample magnetometer). [134, 144, 145] Bei diesem Messsystem wird eine sehr kleine Probe innerhalb einer Spule, das heißt innerhalb eines umgebenden Magnetfeldes, in hochfrequente Schwingungen versetzt. Das externe magnetische Feld magnetisiert die Probe, welche wiederum aufgrund ihrer Magnetisierung eine Spannung in die Spule induziert. Durch die aufgeprägte Schwingung der Probe entsteht ein zeitlich veränderlicher Fluss innerhalb der Spule, welcher als Messsignal ausgewertet werden kann.

Aus der Magnetisierungskurve können der paramagnetische und der ferromagnetische Anteil der Suszeptibilität der Probe gewonnen werden, indem man den linearen paramagnetischen Anteil (siehe Abschnitt 2.4.1) von der Magnetisierungskurve abzieht. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Probe zu temperieren, wodurch auch der Temperatureinfluss auf die magnetischen Eigenschaften zugänglich wird. Weiterhin ist auch ein Ausrichten der Probe nach der kristallographischen Richtung

## 2.4 Magnetscheidung

möglich, was das richtungsabhängige Messen der magnetischen Eigenschaften erlaubt. Zu beachten ist bei einer Messung, dass die gemessene Suszeptibilität abhängig von der Messfrequenz ist, weil die Einwirkdauer des magnetischen Feldes einen Einfluss auf den Zustand der magnetischen Domänen hat [33].

### On-line Messung

Ein online-Messsystem zur Erfassung der magnetischen Suszeptibilität von Mineralgemischen wurde am Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC, University of Queensland, Australia) entwickelt [147-149]. Bei diesem System rieseln Partikel durch eine Messspule. Die Berechnung der Messwerte beruht auf der Messung der Volumensuszeptibilität geteilt durch die Anzahl der sich in der Messzelle befindlichen Partikel [148]. Die Partikelanzahl sowie die Partikelabmessungen werden nicht gemessen, sondern über Annahmen berechnet (mittlere Abmessungen, Fließgeschwindigkeit usw.) [148]. Dies stellt wahrscheinlich die größte Schwäche des Messsystems dar. Anhand eines Modellsystems wurden die Fehler der Messmethode rechnerisch zu etwa 1 % ermittelt. Mithilfe eines Titanerzes wurde ein Vergleich zwischen der Messmethode und etablierten Methoden zur Suszeptibilitätsmessung durchgeführt und die Anwendbarkeit für die Praxis gezeigt [149]. Kommerziell sind Messsysteme in drei Baugrößen verfügbar. Angeboten wird ein Messgerät für Labormessungen, ein Gerät für technische Anwendungen mit Durchsätzen bis zu 6 kg/h und ein Gerät zur Messung der Suszeptibilität von Bohrkernen. Der Messbereich wird mit einer unteren Grenze von  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$  angegeben, was gerade noch die Gruppe der schwachmagnetischen Minerale (siehe Abschnitt 2.4.2) abdeckt.

### Messung über Rasterkraftmikroskopie

Eine weitere Möglichkeit, die magnetische Suszeptibilität an sehr kleinen Proben zu ermitteln, besteht in der Rasterkraftmikroskopie. Hierfür wird ein Probepartikel an einen Cantilever (Biegebalken) geklebt und in ein definiertes Magnetfeld eingebracht. Die Kraftwirkung auf das Partikel wird gemessen und mit einer Referenzsubstanz verglichen. Dieses Verfahren funktioniert bis in einem Bereich von  $10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$  (cgs) bei einer Genauigkeit von  $\pm 10 \%$  [150]. Hauptursache für die Schwankung der Messwerte ist die ungenaue Bestimmung der Probenmasse im Nanogrammbereich. Für diamagnetische Probekörper ist es zwar gelungen, abstoßende Kräfte aufzu-

## 2.4 Magnetscheidung

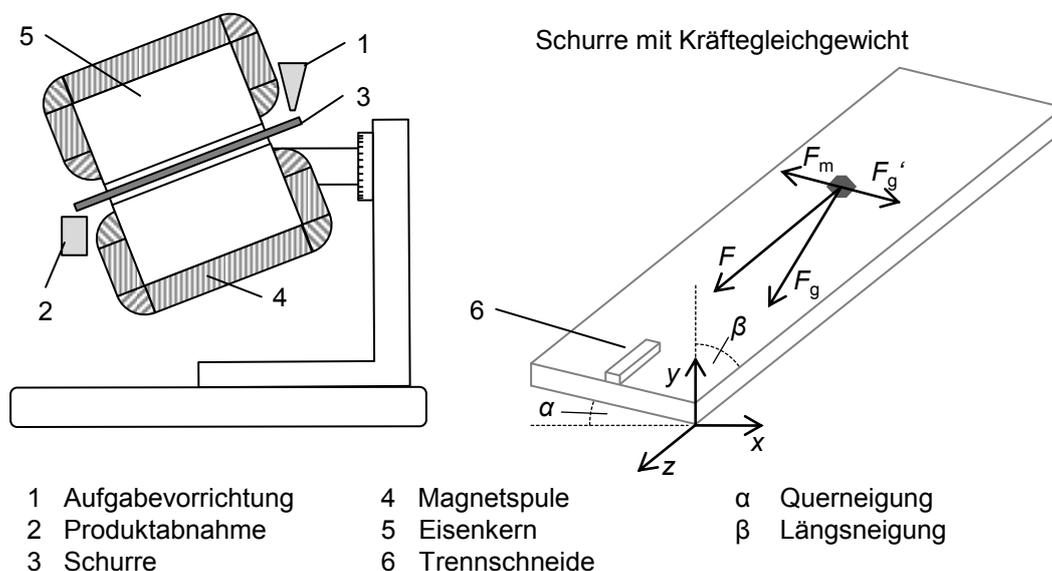
zeichnen, jedoch weichen die berechneten Suszeptibilitäten stark von den aus der Literatur bekannten Werten ab.

### Indirekte Messmethoden

Ein indirektes Verfahren, die magnetische Suszeptibilität von Mineralen zu ermitteln, ist das Trennen des Mineralgemisches in einem isodynamischen magnetischen Feld. Ein isodynamisches Magnetfeld zeichnet sich durch ein konstantes Produkt von Feldstärke  $H$  und dem Gradienten der Feldstärke  $\text{grad}H$  aus.

$$H \cdot \text{grad}H = \text{konstant} \quad (67)$$

Hierdurch können Partikelgemische rein auf Grundlage ihrer magnetischen Suszeptibilität getrennt werden. Die bekannteste Bauweise eines solchen Magnetscheiders ist der FRANTZ-Isodynamik-Scheider [141, 151, 152]. Im Wesentlichen besteht er aus einer längs und quer geneigten Schurre, welche durch ein Magnetfeld führt. Das Magnetfeld wird durch ein Spulensystem mit offenem Eisenkern erzeugt (Abbildung 22). Die geometrische Abmessung des Eisenkerns am Rande des Luftspaltes führt zur Ausbildung eines isodynamischen Feldes.



**Abbildung 22: Prinzipskizze eines FRANTZ-Isodynamik-Scheiders (links) und das Kräftegleichgewicht am Partikel auf der Schurre (rechts)**

Schurre und Spulensystem sind gemeinsam sowohl in Förderrichtung (längs) als auch quer dazu geneigt. Das sich hierdurch ausbildende Kräftegleichgewicht aus magnetischer Kraft und Gewichtskraft bestimmt die Bewegungsbahn der Partikel auf der Schurre.

## 2.4 Magnetscheidung

$$m \cdot g \cdot \sin\alpha = m \mu_0 \frac{\chi_P}{\rho} H \cdot \text{grad}H \quad (68)$$

Partikel, deren Suszeptibilität groß genug ist, dass die Gewichtskraft durch die sich ausbildende magnetische Kraft kompensiert wird, werden oberhalb der Trennschneide in das stärker magnetisierbare Produkt ausgetragen. Alle anderen Partikel gelangen unterhalb der Trennschneide in das weniger stark magnetisierbare Produkt. Das Variieren der Trennstromstärke bei gegebenen Neigungswinkeln ermöglicht ein Zerlegen der Probe in Klassen unterschiedlicher Suszeptibilität. Über die Wahl der Neigungswinkel kann das Gerät an das zu zerlegende Material angepasst werden.

Nach Umstellen der Gleichung (68) und unter Einbeziehung von Gleichung (67) ergibt sich [141]:

$$\chi = \frac{K \cdot \sin\alpha}{I^n} \quad (69)$$

Die Konstante  $K$  ist geräteabhängig, wird jedoch allgemein mit etwa 20 angegeben (cgs-Einheitensystem) [94] und sollte durch eine Kalibration bestimmt werden, sofern das Gerät zum Ermitteln der Suszeptibilität von Mineralen eingesetzt wird. Das Vorgehen bei der Kalibration eines FRANTZ-Isodynamik-Scheiders ist ausführlich bei MCANDREW [141] beschrieben. Diese umfasst zwei wesentliche Schritte. Der erste ist das Feststellen des Nullpunktes beim Betrieb ohne eingeschaltete Spulen. Dabei wird die Querneigung so variiert, dass gleiche Massen in beide Produkte gelangen. Der zweite umfasst das Aufzeichnen des Zusammenhanges aus Seitenneigung und Trennstromstärke durch das Verwenden von Kalibriersubstanzen bekannter Suszeptibilität [141, 153]. Der Parameter  $n$  ergibt sich normalerweise zu 2, weicht jedoch bei Stromstärken oberhalb von 0,9 A von diesem Wert ab. Bei einer fehlenden Nullpunktfestlegung und Korrektur verschiebt sich der Parameter  $n$ . Sind die Winkel zu groß, folgt  $n > 2$ , sind sie zu klein folgt  $n < 2$ . Mit den üblichen Werten für  $n$  und  $K$  sowie dem Faktors  $4\pi$  zur Umrechnung in das SI-Einheitensystem erhält man aus Gleichung (69) die Formel zur Berechnung der Suszeptibilität, basierend auf den Trennparametern des Isodynamik-Scheiders.

$$\chi = \frac{20 \cdot \sin\alpha}{I^2} \cdot 4\pi \quad \text{in } 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (70)$$

Üblicherweise wird der FRANTZ-Isodynamik-Scheider für Partikelgrößen im Bereich zwischen 50 und 500  $\mu\text{m}$  eingesetzt, wobei das Material eng klassiert und gut aufge-

## 2.4 Magnetscheidung

geschlossen vorliegen sollte. Typische Einstellungen sind Winkel von 8...10 Grad Seitenneigung und 20...30 Grad Vorwärtsneigung [94].

Eine großangelegte Studie zur Ermittlung und Tabellierung der magnetischen Suszeptibilität verschiedener Minerale wurde durch ROSENBLUM [152] durchgeführt. Das Probenmaterial bestand aus feinzerkleinerten Mineralen (Partikelgröße zwischen 100 und 150  $\mu\text{m}$ ) mit geringem Anteil ( $< 5\%$ ) verwachsener Partikel. Insgesamt wurden 378 verschiedene Minerale untersucht. Die Suszeptibilität ist in diesem Bericht in Form von Stromstärkeklassen des FRANTZ-Isodynamik-Scheiders angegeben. Über die Gleichung (69) können die Stromstärken unter Einbeziehung der seitlichen Neigung des Scheiders in Massensuszeptibilitäten umgerechnet werden. Nachteilig ist, dass aufgrund der gewählten Schrittweite von 0,1 A relativ breite Bereiche der Suszeptibilität angegeben sind. Dies macht sich besonders bei kleinen Stromstärken bemerkbar (siehe Abbildung 84 im Anhang). Zudem sind der Auftrennung von Mineralen mithilfe des Frantz-Isodynamik-Scheiders in Richtung geringer Suszeptibilität Grenzen gesetzt. Da die seitliche Neigung nicht beliebig verringert werden und die Stromstärke nicht beliebig erhöht werden kann, besteht bei sehr schwach paramagnetischen oder auch diamagnetischen Mineralen nur die Möglichkeit einer Angabe der Stromstärke  $> 1,7\text{ A}$ , was bei einer seitlichen Neigung von  $15^\circ$  einer Suszeptibilität von  $< 22,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  entspricht. Nutzt man den Isodynamik-Scheider lediglich als Hilfsmittel zur Mineralidentifizierung, mag eine Angabe mit  $> 1,7\text{ A}$  hinreichend sein, zur Berechnung der Massensuszeptibilität von Kompositpartikeln ist eine solche Angabe jedoch nicht zu gebrauchen.

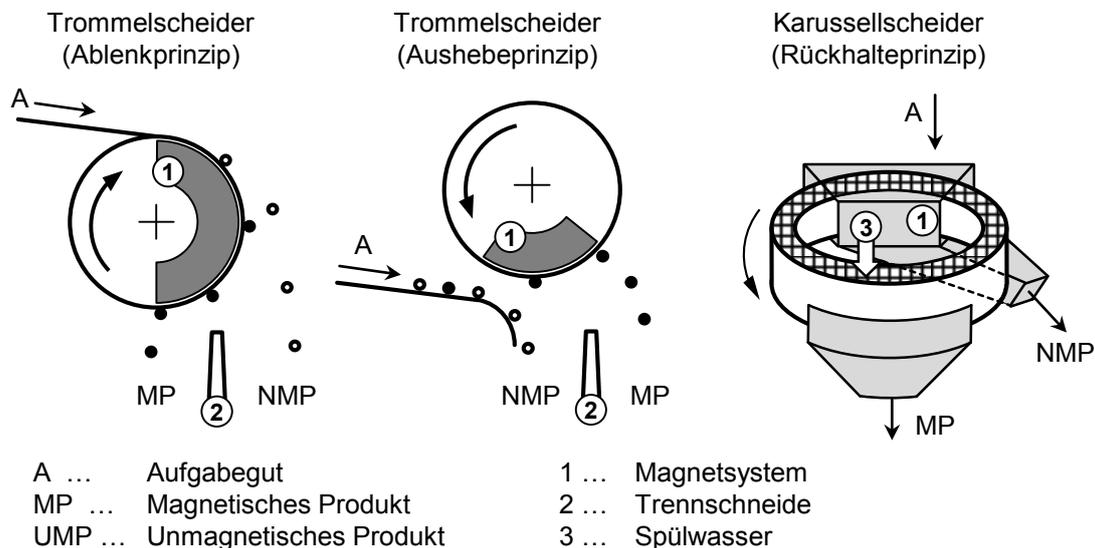
### 2.4.6 Trennung in Magnetscheidern

Trennungen nach der Magnetisierbarkeit von Partikeln werden in Magnetscheidern umgesetzt [2]. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Bauweise (siehe Abbildung 23). Die wichtigsten Einteilungsmöglichkeiten sind die Stärke des Magnetfeldes (Schwach- oder Starkfeldscheider) sowie das Trägermedium (Luft oder Wasser) [6]. Zusätzlich können die Art der Aufgabe (obere oder untere) oder das Wirkprinzip (Ausheben, Ablenken und Zurückhalten) als weiteres Unterscheidungsmerkmal herangezogen werden [2]. Das eigentliche Trennmerkmal in Magnetscheidern ist die Magnetisierung der Partikel [135]. Je nach Konstruktionsweise des Magnetscheiders spielen jedoch weitere Faktoren wie Partikelgröße, -form und -dichte eine Rolle für die Trennung des Stoffgemisches, da diese auf die mit der Trennkraft

## 2.4 Magnetscheidung

im Gleichgewicht stehenden Kräfte (Gewichtskraft, Reibungskräfte, Auftriebskraft) wirken [112].

Zur Anreicherung von stark paramagnetischen beziehungsweise ferromagnetischen Mineralen werden üblicherweise Schwachfeldscheider eingesetzt, die meist als Trommelscheider mit Permanentmagnetsystemen ausgeführt sind. In Abhängigkeit von der zu verarbeitenden Partikelgrößen erfolgt ein Übergang von trocken auf nass arbeitende Systeme spätestens unterhalb von 40  $\mu\text{m}$ . Die Anreicherung von mittel- und schwachmagnetischen Mineralen erfordert den Einsatz von Starkfeldscheidern. Diese erreichen zum einen durch Elektromagnetsysteme große Feldstärken und weisen zum anderen aufgrund der Gestaltung der Magnetpole große Feldgradienten auf. Typische Vertreter sind Induktionswalzenscheider und Matrixscheider.



**Abbildung 23: Schematische Darstellung von Magnetscheider unterschiedlichen Funktionsprinzips**

Nicht nur das Anreichern eines Wertstoffes kann Ziel der Magnetscheidung sein, ebenso ist das Abreichern von Störstoffen zur Steigerung der Produktqualität ein typisches Einsatzgebiet. Beispielhaft sei hier das Abtrennen eisenhaltiger Bestandteile aus Kaolin genannt, welche einen negativen Einfluss auf den Weißgrad des Produktes haben [154]. Für diesen Zweck sind derzeit die stärksten Hochgradientmatrixscheider mit Flussdichten oberhalb von 7 Tesla im Einsatz, die Verunreinigungen bis hinab zu einer Größe von 1  $\mu\text{m}$  abtrennen können [154]. Durch mathematische Modellierungen wurde für Hochgradient-Matrixscheider Suszeptibilitätsverhältnisse von 20:1 zwischen den zu trennenden Mineralen ermittelt, welche für effektive Trennungen mindestens eingehalten werden müssen [154]. Reicht die Suszeptibilitäts-

## 2.4 Magnetscheidung

differenz zum Trennen nicht aus beziehungsweise möchte man mit schwächeren Magnetfeldern auskommen, so kann man sich mit Mitteln wie dem magnetisierenden Rösten helfen. Hierbei wird der schwach magnetische Hämatit unter reduzierender Atmosphäre geröstet, wobei eine Umwandlung zum stark magnetischen Magnetit abläuft [94, 134].

Eine analytische Herleitung des Arbeitsbereiches verschiedener Starkfeldscheider in Abhängigkeit von Suszeptibilität und Partikelgröße wurde von MADAI [112] vorgenommen. Zur Vereinfachung der Zusammenhänge wurden kugelförmige Partikel angenommen und Partikelwechselwirkungen nicht berücksichtigt. Nach dieser Rechnung resultieren optimale Trennpartikelgrößen zwischen 10 und 100  $\mu\text{m}$ , welche aus praktischer Sicht etwas zu sehr in Richtung des feinkörnigen Materials ausgedehnt sind. Bei der Betrachtung nass arbeitender Scheider wurde mit einer fiktiven Dichtedifferenz zum Wasser von  $2,5 \text{ g/cm}^3$  gerechnet.

Die Entscheidung zur Trennung von Mineralgemischen im magnetischen Feld basiert einerseits auf der Kenntnis der magnetischen Eigenschaften der Minerale (siehe vorherige Abschnitte) und andererseits auf praktischen Tests im Labor [155]. Letztere können durch Nachbildungen großtechnischer Magnetscheider in Labormaßstab [2, 39], oder über Analysengeräte wie den FRANTZ-Isodynamik-Scheider, spezielle Handmagnete [135] für grobe Körnungen beziehungsweise trocken arbeitende Freifallscheider [156] für sehr feinkörniges Material und der DAVIS-Tube für die Beurteilung der Trennung in nass arbeitenden Magnetscheidern [157] umgesetzt werden.

Die Modellierung stellt bei Magnetscheidprozessen ein ähnlich wichtiges Werkzeug zur Planung, Auslegung und Optimierung dar. Wichtig ist neben allen prozessspezifischen Kräften auch das Verständnis der Zusammensetzung des Aufgabematerials und der damit gekoppelten Verteilung des Trennmerkmals. Dies stellt die wesentliche Verknüpfung von vorgeschalteter Aufschlusszerkleinerung und nachfolgendem Sortierschritt dar. Aufgrund der oftmals fehlenden Information zur Verwachsungsverteilung werden beispielsweise vereinfachte Ansätze unter Einbeziehung von Partikelgröße, Aufgabegehalt und Wertstoffausbringen herangezogen [158]. Eine andere Herangehensweise ist das Finden von Anpassungsfunktionen für Versuchsergebnisse, die zur Modellierung der jeweils untersuchten Kombination aus Aufgabematerial und Sortierapparat eingesetzt werden können [151].

### **3 Materialien und Methoden**

Das nachfolgende Kapitel stellt die Mittel des Lösungsweges dar. Hierbei erfolgt eine Untergliederung in vier Hauptabschnitte. Der erste Teil widmet sich den der Untersuchung zugrunde liegenden Materialien. Im zweiten Teil werden die durchgeführten Zerkleinerungs- und Sortiersversuche beschrieben. Der dritte Teil erläutert die Messungen der physikalischen und mineralogischen Eigenschaften der Proben. Im vierten Teil dieses Kapitels wird die Vorgehensweise zur Berechnung der Grenzkurven der Modelle beschrieben, sodass alle für das Verständnis der Ergebnisse erforderlichen Beschreibungen abgeschlossen sind.

#### **3.1 Untersuchte Stoffsysteme**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Erze sowie synthetische Mischungen reiner Chemikalien und Naturstoffe untersucht. Letztere dienten dazu, das Vorgehen bei der Ermittlung der magnetischen Eigenschaften zu verfeinern und die Grundannahmen des Mischungsgesetzes (Gleichungen (62) und (63)) zu validieren. Die Erze stellen das eigentliche Material der Untersuchungen dar. An ihnen wurden Aufschluss- und Sortieruntersuchungen vorgenommen und die im Kapitel 2.3 erläuterte Modellvorstellung entwickelt. Nachfolgend wird, beginnend bei den synthetischen Mischungen, näher auf die eingesetzten Materialien eingegangen.

##### **3.1.1 Synthetische Mischungen**

Synthetische Mischungen reiner Substanzen stellen aus zweierlei Sicht ideale Proben zur Validierung der Suszeptibilitätsmessung dar. Sie sind einerseits nicht verwachsen, das heißt, jede Komponente der Mischung liegt frei in einzelnen Partikeln vor. Hierdurch lassen sich die Massenanteile in den Mischungen und damit die Mischungseigenschaften problemlos variieren. Andererseits ist die Charakterisierung der Mischungskomponenten vorab leicht möglich, was das Vorausberechnen der zu erwartenden Mischungseigenschaften erlaubt.

Als Komponenten für synthetische Mischungen wurden Quarz, Kalkstein, Kochsalz und Kupfersulfat eingesetzt. Diese Substanzen wurden auf Grundlage ihrer in der Literatur angegebenen magnetischen Suszeptibilität ausgewählt (siehe Tabelle 4). Basis für die Mischungen sollten eine diamagnetische Substanz (Quarz), eine schwach paramagnetische Substanz (Kalkstein) und eine stärker paramagnetische

### 3.1 Untersuchte Stoffsysteme

Substanz (Kupfersulfat) sein, die sich aufgrund ihres Magnetismus genügend stark voneinander unterscheiden.

Der eingesetzte Quarz wurde dem Probenlager des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik entnommen. Da die Zerkleinerungsmethode für die Probe des Lagers nicht dokumentiert vorlag, wurde der Quarz mit Salzsäure behandelt, um mögliche Eisenverunreinigungen durch die Zerkleinerungswerkzeuge zu entfernen [159]. Der Kalkstein Saxolith<sup>®</sup> wurde über die Firma Geomin bezogen. Seine Reinheit ist laut Hersteller besonders hoch. Die chemische Zusammensetzung des Quarzes und des Kalksteinsteins wurden mittels spektroskopischer Analysen bestimmt, um die Anwesenheit möglicher Verunreinigungen zu prüfen. Das eingesetzte Kochsalz ist als handelsübliches Produkt in hoher Reinheit (> 99 % NaCl) verfügbar. Ihm sind lediglich geringe Mengen feinkörnigen Kalksteins als Fließhilfsmittel zugesetzt. Das Kupfersulfat wurde aus dem Laborbedarf über die Firma Carl Roth in einer Reinheit von 99 % bezogen. Die Eigenschaften der Substanzen sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

**Tabelle 4: Magnetische Suszeptibilitäten der Komponenten der synthetischen Mischungen**

Substanz	Formel	Literaturwert $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$
Kalkstein (Dolomit)	$\text{CaCO}_3/\text{Mg}_2\text{CO}_3$	5...80
Kochsalz (Halit)	NaCl	-6,3...-7,3
Kupfer(II)-sulfat-Pentahydrat	$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$	73,5
Quarz	$\text{SiO}_2$	-6

Das Erstellen von Partikelgrößenklassen der Reinsubstanzen erfolgte durch händische Zerkleinerung in Keramikmörsern und anschließende Klassierung auf einer Analysensiebmaschine. Die Masseanteile für das Erstellen künstlicher Mischungen wurden durch Einwiegen auf einer Feinwaage eingestellt. Das anschließende Mischen zum Erzeugen homogener Proben erfolgte in einer Schwingmühle Typ Cryo-Mill<sup>®</sup> ohne Mahlkörper. Teilproben zur Messung der magnetischen Suszeptibilität wurden mithilfe von Mikroprobenteilern erzeugt.

#### 3.1.2 Greisen

Das Greisenerz, welches im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, stammt aus der Lagerstätte Zinnwald (Erzgebirge). Es ist als Quarz-Topas-Glimmer-Greisen einzuordnen [160]. Der Greisen ist über eine Umwandlung von Granit durch das Eindringen gasreicher Schmelzen entstanden [161]. Die Zusammensetzung der dieser

### 3.1 Untersuchte Stoffsysteme

Arbeit zu Grunde liegenden Großprobe ergibt etwa folgende Anteile: 67 % Quarz, 20 % Zinnwaldit, 8 % Topas, 3 % Muskovit und 2 % andere Minerale [162].

Im Rahmen dieser Untersuchungen stellt der lithiumhaltige Glimmer Zinnwaldit das Wertmineral dar. Zinnwaldit ordnet sich auf den Mischungsreihen Annite-Protolithionit-Zinnwaldit-Trilithionit und Siderophyllit-Zinnwaldit-Polyolithionit ein [163-165]. Die chemische Zusammensetzung kann mit der Summenformel  $\text{KLiFe}^{2+}\text{Al}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{F};\text{OH})_2$  angegeben werden [166]. Wie in Untersuchungen an den Glimmern des Erzgebirges gezeigt wurde, schwanken deren chemische Zusammensetzungen so dass diese fließend ineinander übergehen [163, 164]. Wertelement im Zinnwaldit ist Lithium. Ausgehend von der theoretischen chemischen Zusammensetzung ergibt sich ein Lithiumgehalt von 1,59 %. Auch der Lithiumgehalt unterliegt den oben beschriebenen Schwankungen. Durch TISCHENDORF [167] wurden die Glimmer des Erzgebirges und weiterer deutscher und tschechischer Lagerstätten auf ihre Lithiumgehalte untersucht und Schwankungsbreiten angegeben. Er leitete aus seinen Untersuchungen empirische Zusammenhänge ab, wodurch das Berechnen des Lithiumgehalts basierend auf der Mikrosondenuntersuchung anderer Elemente möglich wird.

Anhand von Schliffen an ausgewählten Handstücken der Großprobe wurden petrographische Analysen des Gneises angefertigt [168]. Einaxiale Drucktests ergaben eine Festigkeit von etwa 116 MPa. Demnach ist der Gneis unter die Gesteine mit hoher Festigkeit (größer 100 MPa) einzuordnen. Zudem macht es der hohe Quarzanteil zu einem stark schleißenden Gestein. Es sind Verschleißwerte im Bereich von etwa 60 bis 80 g/t zu erwarten. Aus den Schliffen wurden die Mineralkorngrößen der Hauptkomponenten Quarz und Glimmer ermittelt. Der Quarz liegt bei etwa  $(1,7 \pm 0,3)$  mm, der Glimmer ist etwas feinkörniger bei etwa  $(1,2 \pm 0,3)$  mm. Ein nennenswerter mechanischer Aufschluss des Glimmers sollte daher bereits im Bereich von 1 mm Partikelgröße erreicht sein.

Das im Zinnwaldit enthaltene Eisen macht es zu einem schwach magnetischen Mineral [165, 169]. Eine Trennung über Magnetscheidung aus dem aufgeschlossenen Erz ist daher eine mögliche Anreicherungsverfahren [127, 128, 169, 170].

#### 3.1.3 Nephelin-Syenit

Nephelin-Syenit bezeichnet ein quarzfreies magmatisches Gestein, welches hauptsächlich aus Feldspäten und dem Feldspatoid Nephelin aufgebaut ist [171]. Aufgrund der großen Anteile an diesen Mineralen wird Nephelin-Syenit häufig als

### 3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche

Rohstoff für die Glasindustrie eingesetzt. Hierfür müssen die dunklen eisenhaltigen Begleitminerale entfernt werden. Dies wird zumeist über Magnetscheidung realisiert.

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Nephelin-Syenit stammt aus der Lagerstätte Norra Kärr (Schweden). Der Nephelin-Syenit dieser Lagerstätte beinhaltet die an Zirkon und Seltenerdenelementen (rare earth elements, REE) reichen Minerale Catapleit und Eudialyt [172, 173]. Im Rahmen dieser Arbeit stellt das REE-haltige Mineral Eudialyt den Wertstoff dar. Eudialyt gehört zu den Ringsilikaten und kann durch die Summenformel  $\text{Na}_4(\text{Ca},\text{REE})_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{ZrSi}_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{Cl})_2$  beschrieben werden [173]. Diese Zusammensetzung steht allgemein für Eudialyt, wobei das Mineral genauer betrachtet eine Gruppe bildet, in der die verschiedenen Typen ineinander übergehen. Durch detaillierte Untersuchungen der Lagerstätte konnten drei Hauptgruppen des Eudialyts abgegrenzt werden, die sich in verschiedenen Arten des Nephelin-Syenits (Lakarpit und Grennait, lokale Bezeichnungen) finden. Hierunter fallen ein eisenreicher, REE-armer Eudialyt (im Lakarpit), ein Mn-Fe-Eudialyt, der reich an schweren REE ist (im pegmatitischen Grennait), sowie ein manganhaltiger Eudialyt, welcher reich an leichten REE ist (im migmatitischen Grennait) [172].

Im Eudialyt können bis zu 10 % Seltenerdenelemente eingebaut sein [174]. Diese und das Eisen sowie das Mangan machen es zu einem paramagnetischen Mineral [34]. Neben Eudialyt sind weitere Minerale mit nennenswertem Paramagnetismus im Gestein enthalten. Hierunter fallen die Pyroxene Aegirin und Augit. Der Paramagnetismus des Eudialyts ermöglicht eine Anreicherung über Magnetscheidung, wobei je nach Feinheit und geforderter Produktqualität eine nachgeschaltete Flotation erforderlich sein kann [174-176].

Die Minerale im Nephelin-Syenit ähneln sich in ihren mechanischen Eigenschaften. Die Mohshärte liegt etwa im Bereich von 6 [171]. Aufgrund der Abwesenheit von Quarz und der geringen Härte kann dieses Gestein leicht und mit geringen Verschleißwerten zerkleinert werden [177]. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der wichtigsten Minerale im untersuchten Nephelin-Syenit finden sich in den Tabellen 26 und 28 im Anhang.

### **3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche**

Die Aufbereitungsversuche beschränkten sich auf die Teilschritte Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung, wobei der Fokus im Rahmen dieser Arbeit auf der Zerkleinerung und der Sortierung lag. Die Klassierung des Materials stellte hier nur

## 3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche

einen Schritt zur Bereitstellung von Probenmaterial in einem engen Partikelgrößenbereich dar, welcher zur Untersuchung des Einflusses der Partikelgröße auf die vorliegenden Aufschlussverhältnisse und dem damit verbundenen Einfluss auf den nachfolgenden Sortierschritt erforderlich war.

### 3.2.1 Zerkleinerung und Klassierung

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Erze wurden auf unterschiedliche Weise gebrochen und gemahlen. Das Greisenerz wurde als Rohaufwerk einer Gesamtmasse von größer 1000 kg nach Freiberg gebracht und in den Schritten Backenbrecher – Steilkegelbrecher durch die UVR-FIA GmbH auf -35 mm gebrochen. Von diesem Material wurden rund 150 kg in einer dritten Zerkleinerungsstufe mithilfe eines Flachkegelbrechers auf -4 mm zerkleinert. Dieses Material diente anschließend als Aufgabegut für verschiedene Zerkleinerungsmaschinen, in denen es auf die Zielfeinheit von -1 mm gemahlen wurde. Als Maschinen der vierten Zerkleinerungsstufe wurden eine Hammermühle, eine Schlagnasenmühle, eine Siebkugelmühle, eine Rohrschwingmühle und eine Walzenmühle eingesetzt. Tabelle 5 stellt die verwendeten Maschinen, die dominierenden Beanspruchungsarten sowie Maschinenparameter und die Abkürzung der jeweiligen Maschinen dar. Mit Ausnahme der Schwingmühlenversuche konnte das Fertiggut bei allen Maschinen den Mahlraum verlassen, sodass der Versuch beendet war, wenn das gesamte Aufgabegut in den Produktbehälter gelangt war. Das Produkt der Schwingmühlenversuche wurde nach einer definierten Beanspruchungszeit von 60 Sekunden der Mühle entnommen [178]. Das zerkleinerte Greisenerz wurde anschließend geteilt, beprobt und in die in Tabelle 6 angegebenen Größenklassen fraktioniert. Die Proben wurden dem Gut mithilfe von Riffel- und Rotationsteilern entnommen (siehe Abschnitt 3.3.1).

**Tabelle 5: Parameter der eingesetzten Zerkleinerungsmaschinen**

Maschine	Beanspruchungsart	Austragmaschenweite bzw. Spaltweite	Abkürzung
Flachkegelbrecher	Druck, Schlag	5 mm	KB
Hammermühle	Prall	3,15 mm	HM
Schlagnasenmühle	Prall	3,15 mm	SN
Siebkugelmühle	Druck, Schlag	0,9 mm und 1,4 mm	KM
Rohrschwingmühle	Druck, Schlag	-	SM
Walzenmühle	Druck	1 mm	WM

Die Zerkleinerung des Nephelin-Syenits wurde vollständig von der UVR-FIA GmbH durchgeführt. Das Brechen der rund 50 kg umfassenden Probe erfolgte in den

### 3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche

Schritten: Laborbackenbrecher – Siebkugelmühle auf eine Partikelgröße von -3,15 mm. Anschließend wurden 5 Teilproben in einer Siebkugelmühle mit unterschiedlichen Austragsmaschenweiten (2 mm – Reihe NK1, 1 mm – Reihe NK2, 0,5 mm – Reihe NK3, 0,25 mm – Reihe NK4 und 0,125 mm – Reihe NK5) auf die der Maschenweite entsprechende Zielfeinheit gemahlen. Diese Proben wurden durch Analysensiebung in Partikelgrößenklassen fraktioniert (siehe Tabelle 6) und für Sortiersversuche bereitgestellt. Von jeder Partikelgrößenklasse der Zerkleinerungsprodukte wurden repräsentative Proben für mineralogische Untersuchungen entnommen [179]. Die in Tabelle 6 in Klammern angegebenen Zahlen beim Nephelin-Syenit entsprechen den Nummern der Größenklassen, welche im weiteren Verlauf der Arbeit teilweise zur Kennzeichnung verwendet werden.

**Tabelle 6: Untersuchte Größenklassen der Erze**

Material	Größenklassen in mm
Greisenerz	0...0,1/0,1...0,2/0,2...0,315/0,315...0,5/0,5...0,8...1,0/1,0...2,0/2,0...3,15
Nephelin-Syenit	0...0,063 (7) / 0,063...0,125 (6) / 0,125...0,25 (5) / 0,25...0,5 (4) / 0,5...1,0 (3) / 1,0...2,0 (2) / 2,0...4,0 (1)

#### 3.2.2 Magnetscheidung

Die Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen zerkleinerter Erze wurde an einem Band-Ring-Scheider und einem Isodynamik-Scheider Bauart FRANTZ durchgeführt. Hierbei wurden sowohl Trennungen bei einem festgelegten Trennschnitt als auch Versuchsreihen unter Variation der Maschinenparameter (vornehmlich Trennstromstärke) durchgeführt. Nachfolgend werden die einzelnen Versuchsreihen in Abhängigkeit des Maschinentyps beschrieben.

##### Band-Ring-Scheider

Der Band-Ring-Scheider (Abbildung 24) ist ein trocken arbeitender Magnetscheider nach dem Aushebeprinzip. Er besteht im Wesentlichen aus einem Band (1), auf dem die zu trennenden Partikel durch den Spalt eines Magnetsystems transportiert werden. Dieser Spalt wird auf einer Seite durch die Enden eines u-förmigen Flachpols (2) und auf der anderen Seite durch einen rotierenden Ring (3) gebildet. Die Flachpole entsprechen in ihrer Breite der Arbeitsbreite des Förderbandes; der Ring ist in seinem Durchmesser so groß, dass er das Band seitlich deutlich überragt. Auf beiden Enden des u-förmigen Kerns sind Spulen (4) angebracht, welche das magnetische Feld erzeugen.

### 3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche

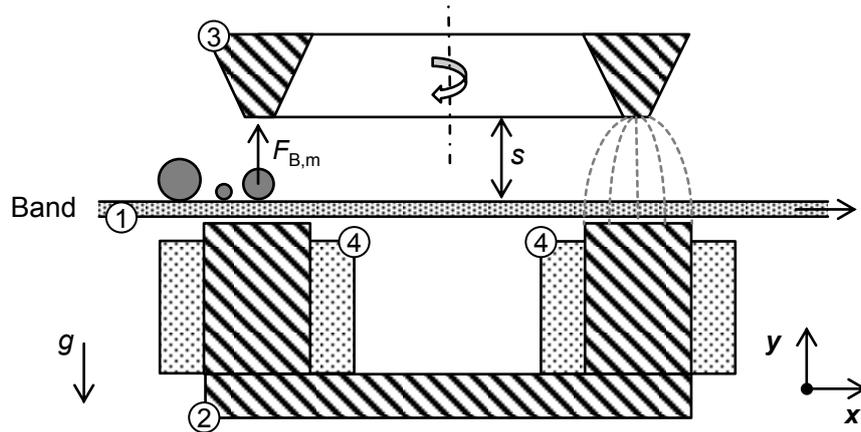


Abbildung 24: Prinzipskizze eines Band-Ring-Scheiders im Längsschnitt

Der Ring ist keilförmig ausgebildet und läuft in Richtung der Flachpole zu einer scharfen Schneide zu. Hierdurch bildet sich ein stark inhomogenes Feld mit dem Feldgradienten in Richtung des rotierenden Rings aus. Magnetisierte Partikel werden durch die in Richtung des Feldgradienten wirkende magnetische Kraft ausgehoben, sofern diese die Gewichtskraft des Partikels sowie weitere entgegengesetzt gerichtete Kräfte übersteigt. Die Partikel bleiben so lange am Ring haften, wie sie sich im Wirkungsbereich des Magnetfeldes befinden. Verlassen diese durch die Rotation des Ringes den Bereich über dem Band, das heißt über den Flachpolen, nimmt die Magnetfeldstärke ab und sie fallen in die Konzentratbehälter (links- wie rechtsseitig). Partikel, deren Magnetisierung nicht ausreicht um sie auszuheben, verbleiben auf dem Band, bis sie an dessen Ende in den Behälter für die Abgänge ausgeworfen werden.

Das Aushebeprinzip hat zur Folge, dass die Schwerpunkte verschieden großer Partikel unterschiedlich weit vom Magnetpol entfernt sind und demnach bei gleicher Magnetisierbarkeit einer unterschiedlichen magnetischen Kraft ausgesetzt sind. Demnach trennt dieser Magnetscheider nicht rein nach der Magnetisierbarkeit der Partikel sondern auch nach der Partikelgröße. Generell gilt, dass in Sortierapparaten meist ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Klassiereffekt überlagert ist [2, 3, 39, 135].

Am Band-Ring-Scheider wurden zwei Arten von Versuchsreihen – Trennschnittversuche und Trennungsversuche – durchgeführt (siehe Tabelle 7). Das Ziel der Trennschnittversuche war, unter maximalen Feldstärken (entspricht 1 Ampere Trennstromstärke, Abbildung 85 im Anhang) das größtmögliche Ausbringen an Wertstoff zu erreichen. Bei den Trennungsversuchen wurden bei steigenden Feldstärken Konzentrate erstellt, wobei die jeweiligen Abgänge das Aufgabegut der nächsten Stufe dar-

### 3.2 Durchführung der Aufbereitungsversuche

stellten. Die Versuche wurden so lange wiederholt, bis zuletzt auch die Trennung bei maximaler Feldstärke stattgefunden hat. Die Konzentrate wurden dabei fraktionsweise aufgefangen und analysiert. Das Schema der Versuche kann der Abbildung 86 im Anhang entnommen werden.

**Tabelle 7: Übersicht der Trennversuche am Band-Ring-Scheider**

	Trennschnittversuche	Trennungsversuche
Greisenerz	KB (# 1 und #2); KM 0,9 mm (#1 und #2); KM 1,4 mm; SM (Intensität 5 und 9); SN; HM; WM (alle Versuche bei 2 mm Spaltweite und 1 A Trennstromstärke)	SN (Partikelgrößenklassen, Spalt- weite 2 mm, variierende Strom- stärken)
Nephelin-Syenit	NK1-3210 (Partikelgröße 0,5...1,0 mm, Spalt- weite 2 mm, Stromstärke 1 A)	NK1-3 (0,5...1,0 mm) (Spaltweite 2 mm, variierende Stromstärken)
	NK1-3208 (Partikelgröße 0,5...1,0 mm, Spalt- weite 2 mm, Stromstärke 0,8 A)	NK1-4 (0,25...0,5 mm) (Spaltweite 2 mm, variierende Stromstärken)
	NK1-5210 (Partikelgröße 0,125...0,25 mm, Spaltweite 2 mm, Stromstärke 1 A)	NK1-5 (0,125...0,25 mm) (Spaltweite 2 mm, variierende Stromstärken)

#### Isodynamik-Scheider

Der eingesetzte Isodynamik-Scheider ist ein aus den 1960er Jahren stammender Nachbau des FRANTZ-Isodynamik-Scheiders (siehe Abschnitt 2.4.5), welcher durch einen digital regelbaren Transformator als Stromversorgung modernisiert wurde. Der Transformator ermöglicht das Einstellen von Trennstromstärken zwischen 0,1 und 1,5 A bei einer Schrittweite von 0,01 A. Die Probenezuführung auf die Schurre des Scheiders erfolgte über eine Fritsch-Zuteilrinne Typ Laborette 10, welche große Probenmengen bei einer stabilen Probenezufuhr von wenigen Gramm je Minute gewährleistet.

Die Partikelgrößenklassen wurden unter festen Schrittweiten von 0,05 A beziehungsweise 0,1 A bei abnehmender Stromstärke beginnend bei 1,5 A (Greisenerz [180]) und bei zunehmender Stromstärke beginnend bei 0,05 A (Nephelin-Syenit) in Suszeptibilitätsklassen getrennt. Hierbei wurde die abgetrennte Fraktion ausgewogen und in Probengefäße verpackt, das verbliebene Material wurde nach Veränderung der Stromstärke um eine Schrittweite erneut aufgegeben und bei der neuen

### 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

Trennstromstärke fraktioniert (siehe auch Abbildung 86 und Abbildung 87). Dieses Vorgehen wurde im Fall des Greisenerzes so oft wiederholt, bis die Aufgabemasse des folgenden Trennschrittes 10 g unterschritten hatte. Vom Nephelin-Syenit stand weniger Material zur Verfügung, sodass die minimale Probenmasse der Klassen auf 3 g festgelegt wurde. Sofern chemische Analysen vorgesehen waren, wurden über Probenteilung jeder Klasse 6 Proben von etwa 100 mg entnommen. Für die Suszeptibilitätsmessungen wurden 3 Proben von etwa 400 mg aus der Probenmasse herausgeteilt.

**Tabelle 8: Zusammenstellung der Parameter der Trennungsversuche am Isodynamik-Scheider**

Trennungsversuche		Größenklasse (mm)	Parameter
Greisenerz	Produkt der Schlagnasenmühle [180]	0...0,1	$\alpha = 15^\circ, \beta = 33^\circ$
		0,1...0,2	$\alpha = 15^\circ, \beta = 30^\circ$
		0,2...0,315	$\alpha = 15^\circ, \beta = 25^\circ$
		0,315...0,5	$\alpha = 15^\circ, \beta = 25^\circ$
		0,5...0,8	$\alpha = 15^\circ, \beta = 20^\circ$
Nephelin-Syenit	Reihe NK1 (SM, $w = 2,0$ mm)		
	NK1-5	0,125...0,25	$\alpha = 15^\circ, \beta = 25^\circ$
	NK1-4	0,25...0,5	$\alpha = 15^\circ, \beta = 25^\circ$
	NK1-3	0,5...1,0	$\alpha = 15^\circ, \beta = 25^\circ$
Trennschnittversuche			
Nephelin-Syenit	Reihen NK2-		
	3210B und 3210C	0,5...1,0	$\alpha = 10^\circ, \beta = 20^\circ$
	3208B und 3208C	0,5...1,0	$\alpha = 10^\circ, \beta = 20^\circ$
	5210B und 5210C	0,125...0,25	$\alpha = 10^\circ, \beta = 20^\circ$

### 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

Zur Beschreibung des Aufbereitungserfolgs mussten an den Proben die chemische und mineralogische Zusammensetzung, die physikalischen Eigenschaften, die das Trennmerkmal darstellen und deren Verteilung innerhalb der Probe ermittelt werden. Die chemische Zusammensetzung der Proben (reduziert auf den Anteil wichtiger Hauptelemente) wurden mithilfe spektroskopischer Analysen anhand von Totalaufschlüssen ermittelt. Die Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung erfolgte an Schliffen von Körnerpräparaten. Die magnetische Suszeptibilität wurde an repräsentativen Teilproben ohne weitere Probenvorbehandlung bestimmt. Allen Messmethoden ging eine geeignete Probenvorbehandlung und Probenteilung voraus, um den Anforderungen an eine gute Analytik gerecht zu werden.

### 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

#### 3.3.1 Probenteilung, Probenvorbereitung und Mindestprobenmenge

Das Gewinnen repräsentativer Teilproben aus der Grundgesamtheit des Probenmaterials erfolgte über Probenteilung. Je nach Probenmengen wurden geeignete Verfahren eingesetzt, welche von Teilungskreuzen (Probenmasse größer 10 kg) über Riffelteiler verschiedener Größe (Probenmasse von 10 kg bis herab in den zweistelligen g-Bereich) bis zu Mikroprobenteilern (mg-Bereich) reichten. Die Endprobengrößen richteten sich nach den Anforderungen der einzusetzenden Analysemethoden. Für die mineralogischen Aufgliederungen basierend auf Körnerpräparaten waren mindestens 5 g Material erforderlich. Aus diesem Grund wurden aus den Proben je nach verfügbarer Gesamtmasse zwischen 5 und 20 g herausgeteilt und an das Institut für Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg beziehungsweise an das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie übergeben.

Im Fall der spektroskopischen Elementanalyse wurde das Probenmaterial vor dem Herausteilen der Analysenproben auf Analysenfeinheit ( $< 63 \mu\text{m}$ ) gemahlen. Hierfür wurde das zu mahlende Material (rund 10 g) durch Teilung gewonnen. Die Feinmahlung erfolgte in einer mit einem Achat-Mahlsystem ausgestatteten Schwingmühle, um das Eintragen von Verunreinigungen durch Verschleiß des Mahlsystems zu vermeiden. Nach der Mahlung wurden 6 Analysenproben von jeweils rund 100 mg mithilfe eines Mikroprobenteilers (Quantachrome MicroRiffler<sup>®</sup>) erstellt. Drei dieser Teilproben wurden nasschemisch aufgeschlossen, die anderen drei dienten als Rückstellproben.

Die Teilproben für die Messung der magnetischen Suszeptibilität wurden aus unverändertem Probenmaterial über Mikroprobenteiler gewonnen. Die Probenmasse belief sich im Regelfall zwischen 350 und 400 mg, wodurch die Analysenproben selbst bei den größten gemessenen Partikelsystemen noch aus einigen hundert Partikeln zusammengesetzt waren. Die Suszeptibilitätsmessungen wurden jeweils an 3 repräsentativen Teilproben in Dreifachmessung durchgeführt.

#### 3.3.2 Chemische Analysen

Chemische Analysen der Erze und Aufbereitungsprodukte wurden durch nasschemische Aufschlüsse mit anschließender spektroskopischer Elementgehaltbestimmung mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) und optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Aufschlusssäurengemisch aus Flusssäure (HF) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) für die Analyse am AAS [181] sowie zusätzlich Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) bei der Analyse

### 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

mithilfe der ICP-OES, was eine Kombination der von ALTHAUS [181] und BILLINGS [182] für Silikate empfohlen Gemische darstellt. Schwefelsäure wurde bei den Aufschlüssen zur Messung am AAS vermieden, da diese laut LÜCKE [183] zu Interferenzen führen kann. Prinzipiell sind auch andere Gemische aus Flusssäure und mindestens einer anderen Aufschlusssäure geeignet [184-187]. Flusssäure ist zum Brechen der silikatischen Matrix unumgänglich und bietet darüber hinaus den Vorteil, dass Silizium als leicht flüchtiges Siliziumtetrafluorid ( $\text{SiF}_4$ ) quantitativ aus der Lösung entfernt wird und somit keine Störungen während der Messung am Spektrometer verursachen kann.

Die neben Flusssäure eingesetzten Aufschlusssäuren müssen schwer flüchtig sein, damit die im Überschuss eingesetzte Flusssäure abgeraucht werden kann. Eine geringe Flüchtigkeit müssen auch die aus den Elementen gebildeten Salze aufweisen, um während des Abrauchens Verluste der zu messenden Elemente zu vermeiden. Des Weiteren müssen die mit der Säure gebildeten Salze eine gute Löslichkeit in Wasser aufzeigen (siehe Tabelle 29 im Anhang), um die Bildung von Niederschlägen zu unterbinden [188]. Ergänzend zu den schon erwähnten Eigenschaften sollten die mit dem Säureanion gebildeten Salze nicht über eine hohe Temperaturstabilität verfügen. Dies ist nötig, damit die Salze während der kurzen Verweilzeit in der Flamme vollständig zerfallen [181]. Nur so kann der tatsächliche Elementgehalt gemessen werden.

Zur Steigerung der Messgenauigkeit wurden die Matrixelemente beim Ansetzen der Standardlösungen berücksichtigt [186, 189]. Hierfür wurden die Hauptelemente in den Verhältnissen des Roherzes zusammengemischt und als Kalibrierstandard verwendet [183]. Da der Brenner des eingesetzten Atomabsorptionsspektrometers einen selbstansaugenden Zerstäuber hat, war das Hinzufügen der Matrixelemente auch aus Sicht der zu erwartenden Tröpfchengröße erforderlich. Matrixfreie Lösungen haben eine geringere Viskosität und damit eine andere Tröpfchengröße im AAS [181, 183].

Eine detaillierte Darstellung der Vorgehensweise beim Durchführen der Totalaufschlüsse, eine Fehlerbetrachtung zur chemischen Analyse sowie Informationen zu den eingesetzten Spektrometern finden sich im Anhang D.1 und D.2.

## 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

### 3.3.3 Mineralogische Analysen

Die mineralogischen Analysen wurden vom Institut für Mineralogie und vom Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie mit einem Mineral Liberation Analyzer der Firma FEI durchgeführt. Das Messprinzip kann in zwei wesentliche Teile zerlegt werden: das Erzeugen eines Rückstreuelektronenbildes (englisch: back-scattered electrons, BSE) und die energiedispersive Röntgenanalyse (englisch: energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX) [26, 27]. Vom polierten Schliff des Körnerpräparats wird ein rasterelektronenmikroskopisches Bild unter Auswertung der Rückstreuelektronen aufgenommen. Das entstandene Graustufenbild dient zur Erkennung der Partikel und Phasen in der Schliiffebene. Mithilfe zweier Softwarefunktionen wird das Graustufenbild deagglomeriert und segmentiert. Im Deagglomerationsschritt werden alle sich im Präparat berührenden Partikel, die somit im Schliff als verwachsen erscheinen, rechnerisch voneinander getrennt. Im Segmentierschritt erfolgt eine Zuweisung von Phasen aufgrund von Unterschieden in den Graustufen. Der Graustufenwert einer Phase ist charakteristisch für dessen mittlere Atommasse. Hierdurch wird bei einfach aufgebauten Gesteinen und Erzen eine Unterscheidung der verschiedenen Minerale möglich.

Einige Minerale weisen gleiche bzw. sehr ähnliche mittlere Atommassen auf, wodurch sie im Graustufenbild nicht voneinander unterschieden werden können. Hierzu wird im zweiten Teil der Messung eine energiedispersive Röntgenanalyse am Präparat durchgeführt, welche in einer Vielzahl verschiedener Modi betrieben werden kann. Im einfachsten Fall, wenn Phasengrenzen im BSE-Bild erkannt werden können, reicht ein EDX-Messpunkt je Phase, um verschiedene Phasen mit gleichem Grauwert unterscheiden zu können. Werden die Phasengrenzen im BSE-Bild nicht erkannt, weil Minerale gleicher Graustufen direkt miteinander verwachsen sind, muss beispielsweise eine Art Kartierung durch ein engmaschiges Netz aus EDX-Messpunkten generiert werden. Die über EDX ermittelte chemische Zusammensetzung wird mit einer zugewiesenen Datenbank verglichen, in der sich die Informationen zu den im Präparat vermuteten Mineralen befinden. Bei Übereinstimmung der gemessenen Zusammensetzung mit der Zusammensetzung eines Minerals der Datenbank wird der Phase dieses Mineral zugeordnet. Gibt es keine Übereinstimmung, wird die Phase als unbekannt ausgewiesen.

### 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

Für diese Untersuchungen kamen zwei Messmodi zum Einsatz:

- XBSE (Extended BSE liberation analysis): Bei dieser Standardmethode wird in jeder über das Graustufenbild erkannten Phase eine EDX-Messung durchgeführt und dem gesamten Bereich gleicher Graustufe das laut EDX detektierte Mineral zugewiesen.
- GXMAP (Grain based X-ray mapping): Diese Methode entspricht einer Kombination aus XBSE für Phasen, die problemlos segmentiert wurden konnten, und einer gerasterten EDX der Partikel, für die eine Segmentierung nicht erfolgreich war.

Grundlage einer Messung am MLA ist ein Partikelpräparat der Probe. Die Partikel im Präparat müssen homogen und isotrop verteilt sein, sodass systematische Fehler aufgrund von Sedimentation und Ausrichtung der Partikel ausgeschlossen werden können (siehe Abschnitt 2.1.5). Alle Aufschlussanalysen basieren auf einer Gesamtzahl von größer als 500 Partikeln je Schliffbild. Von einer statistischen Repräsentativität der Präparate [75] wird aus diesem Grunde ausgegangen. Darüber hinaus wurden zum Ausschließen von Präparationsfehlern vergleichende chemische Analysen des Materials angefertigt. Hierfür muss die Forderung der Abweichung beider Messmethoden von kleiner 20 % [32] erfüllt sein, was für alle durchgeführten Analysen erreicht wurde. Weitere Informationen zur automatischen mineralogischen Analyse finden sich in Anhang D.4.

#### 3.3.4 Suszeptibilitätsmessungen

Das Messen der magnetischen Suszeptibilität der Proben erfolgte mit einer Suszeptibilitätswaage MSB MKII auto der Firma Sherwood. Das Gerät entspricht von seiner Konstruktionsweise einer GOUY-Waage (siehe Abschnitt 2.4.5). Der prinzipielle Aufbau dieses Messgerätes ist in Abbildung 25 dargestellt.

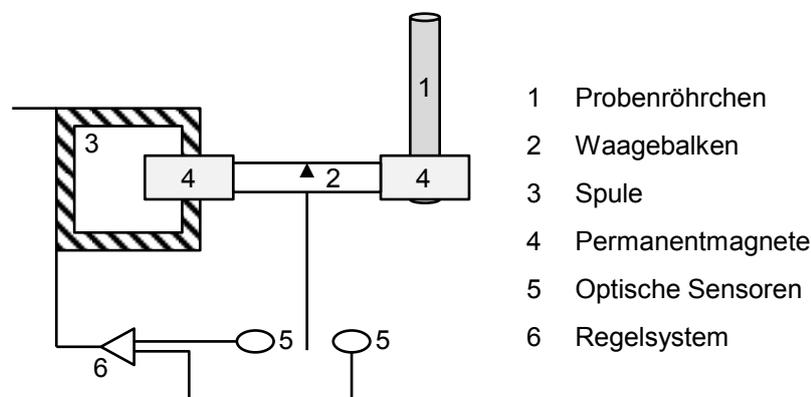


Abbildung 25: Prinzipskizze zum Messsystem der Suszeptibilitätswaage

### 3.3 Probenvorbereitung und Messmethoden

Die Probe, typischerweise zwischen 100 und 500 mg, wird in das Probenröhrchen (1) eingefüllt und zwischen zwei Permanentmagneten (4), die auf einem Waagebalken (2) angebracht sind, im Messgerät platziert. In Abhängigkeit von den magnetischen Eigenschaften der Probe wird diese von den Magneten angezogen (paramagnetische und ferromagnetische Stoffe) oder abgestoßen, wodurch der Waagebalken aus seiner Ruhelage bewegt wird. Optische Sensoren (5) registrieren die Auslenkung und stellen über ein Regelsystem (6) den Strom der Spule (3) so lange ein, bis das von der Spule erzeugte Magnetfeld den Waagebalken wieder in seine Ruhelage gebracht hat. Der hierfür benötigte Strom ist ein Maß für die magnetische Suszeptibilität der Probe [142].

$$\chi_m = \frac{h}{m} \left[ \frac{C}{10^9} (R - R_0) + \chi'_v \cdot A \right] \quad (71)$$

Hierbei entsprechen  $m$  der Probenmasse,  $h$  der Füllhöhe,  $C$  einer Gerätekonstanten,  $R$  dem Messsignal der Probe,  $R_0$  dem Messsignal des leeren Probenröhrchens,  $\chi'_v$  der Volumensuszeptibilität von Luft und  $A$  der Querschnittsfläche des Probenröhrchens. In Gleichung (71) findet die Suszeptibilität der Luft über den Term  $\chi'_v \cdot A$  Berücksichtigung. Bei der Messung von Feststoffschüttungen müsste daher auch die im Porenvolumen eingeschlossene Luft vom Messwert der Probe abgezogen werden. Luft hat zwar eine nicht zu vernachlässigende Massensuszeptibilität von rund  $0,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$  ( $\chi_v = 0,36 \cdot 10^{-6}$  [2]), sie kann jedoch aufgrund ihrer im Vergleich zu mineralischen Feststoffen um den Faktor 2000 geringeren Dichte von  $1,29 \text{ kg/m}^3$  bei Messungen im Bereich oberhalb von  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  vernachlässigt werden. Der über Gleichung (71) berechnete Wert der Massensuszeptibilität gilt für das cgs-Einheitensystem und muss zur Umrechnung in SI-Einheiten mit dem Faktor  $4\pi$  multipliziert werden. Beide Einheitensysteme und die Umrechnung zwischen ihnen sind im Anhang B.1 dargestellt.

Der Messung wurden jeweils drei gleichartige, repräsentative Teilproben unterzogen, welche mittels Mikroprobenteilern aus der Ausgangsprobe gewonnen wurden. Die Analysenprobenmasse belief sich dabei auf 300 bis 400 mg, wodurch Füllhöhen ( $h$ ) in den schmalen ( $d_i = 3,24 \text{ mm}$ ) und breiten ( $d_i = 4,2 \text{ mm}$ ) Messröhrchen von größer 20 mm erreicht wurden. Hierdurch konnten die optimalen Probengrößen ( $m_P > 100 \text{ mg}$  und  $h > 10 \text{ mm}$ ) zum Erreichen der maximalen Messgenauigkeit von  $\pm 2 \%$  des Literaturwertes [142] sichergestellt werden. Von jeder Teilprobe wurden drei

### 3.4 Berechnung von Grenzkurven und Stoffdaten

Messwerte aufgezeichnet, wobei bei jeder Messung die komplette Prozedur [159] vom Befüllen des Probenröhrchens über das Messen der Probenmasse und der Füllhöhe bis hin zum Ablesen des Messwertes durchlaufen wurde. Die drei Mittelwerte der Suszeptibilität der Teilproben wurden dann zu einem Suszeptibilitätswert der Probe verrechnet.

### **3.4 Berechnung von Grenzkurven und Stoffdaten**

Die folgenden zwei Abschnitte stellen überblicksartig die Vorgehensweise bei der Berechnung der Mineralsuszeptibilitäten und der Daten beziehungsweise Kurven zum Aufschluss, zur Trennung und zur Anreicherung dar.

#### **3.4.1 Berechnung der Mineralsuszeptibilität**

In Abschnitt 2.4.4 wurde erläutert, wie sich die Suszeptibilität von Mineralen rechnerisch aus Mineral- beziehungsweise Partikelgemischen ermitteln lässt. Das Berechnen nach dem Mischungsgesetz erfordert die Kombination von Informationen aus der Aufschluss- und Verwachsungsanalyse mit Suszeptibilitätsmessungen der Partikelgemische. Je nach Anzahl der unbekanntenen Minerale sind entsprechend viele linear unabhängige Zeilen des Gleichungssystems nach (65) erforderlich. Bei komplexen Erzsystemen kann diese Anzahl schnell 20 und mehr betragen. Eine Vereinfachung kann bei solch komplexen Zusammensetzungen das Gruppieren von Mineralen gleichen oder ähnlichen Merkmals darstellen [40].

Das Erstellen der verschiedenen Teilproben unterschiedlicher Zusammensetzung (Zeilen des Gleichungssystems) wurde über die Zerlegung der Proben in Suszeptibilitätsklassen mithilfe des Isodynamik-Scheiders umgesetzt [159, 180]. Auf diesem Weg konnten je zu trennendem System zwischen 5 und 8 Teilproben gewonnen werden. Problematisch an diesem Vorgehen ist, dass es aufgrund des Zerlegens nach dem zu untersuchenden Merkmal zu linearen Abhängigkeiten kommen kann.

Das Lösen des Gleichungssystems wurde mithilfe von Microsoft Excel umgesetzt. In Abhängigkeit vom Verhältnis aus verfügbaren analysierten Merkmalklassen  $j$  und der erforderlichen Zahl von Merkmalklassen aufgrund der Zahl zu berechnender Suszeptibilitätswerte  $i$  kann auch der Fall von  $j \geq i$  eintreten. Es sind folglich mehr Gleichungen als Unbekannte verfügbar, wodurch die Lösung zu einem kombinatorischen Problem wird. Die Anzahl  $n$  möglicher Kombinationen des Gleichungssystems und dadurch auch möglicher Lösungen ergibt sich nach Gleichung (72).

### 3.4 Berechnung von Grenzkurven und Stoffdaten

$$n = \binom{j}{i} \quad (72)$$

#### 3.4.2 Berechnung der Aufschluss-, Trennungs- und Anreicherungsdaten

Das Ausgabeformat der MLA-Daten sind Microsoft Access-Datenbanken. Diese Datenbanken können mit der Software MLA-view eingelesen und verarbeitet werden. Diese Software stellt ein leistungsfähiges Werkzeug zur Auswertung der Messdaten dar. Über die vordefinierten Funktionen kann das Gros der üblichen Kennzahlen zur Beurteilung des gemessenen Gutes tabellarisch oder als Grafik dargestellt werden. Nachteilig ist, dass ein fortgeschrittener Anwender keine Möglichkeit hat, weitere Funktionen oder auch Stoffdaten zu ergänzen. Hierfür müssen die Daten in andere Software eingelesen und über selbst programmierte Funktionen ausgewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Daten der MLA mithilfe der Software DIAdem (National Instruments) verarbeitet. Die Berechnung von Parametern wurde über VBA-Skripte realisiert. Die wesentlichen Berechnungs- und Verarbeitungsschritte der Aufschlussanalysen können folgendermaßen zusammengefasst werden:

1. Einlesen der Datenbanken,
2. Einlesen der Suszeptibilitätswerte,
3. Auswahl der Minerale, die zu einem Wertstoff zusammengefasst werden sollen,
3. Berechnung der Partikeleigenschaften (Wertstoffgehalt, Partikelsuszeptibilität, Partikeldichte, ...)
4. Sortierung der Partikelsysteme nach den Merkmalen Wertstoffgehalt, Partikeldichte und Partikelsuszeptibilität
5. Berechnung der üblichen Aufbereitungsparameter (Masseausbringen, Wertstoffausbringen, Bergeausbringen, ...)
6. Berechnung der Aufschlusskennwerte (Aufschlussgrad, Aufschlusskoeffizient, Aufschlusserfolgszahl)

#### Kombination mehrerer Probendatenbanken

Sofern mehrere Analysenproben einer Probe mithilfe der MLA untersucht wurden, mussten die Datenbanken für eine Berechnung über die obige Vorschrift miteinander kombiniert werden. Unter der Annahme, dass keine systematischen Fehler während der Probenvorbereitung der Analysenproben auftraten, wurden die gemessenen Partikel beider Analysenprobe mit ihren Parametern über ein VBA-Skript in einer ge-

### 3.4 Berechnung von Grenzkurven und Stoffdaten

meinsamen Datenbank miteinander vereint. Diese neue Datenbasis wurde anschließend über das Skript zur Berechnung der Aufschlussergebnisse verarbeitet.

#### Trennfunktionen

Trennfunktionen wurden ebenfalls über VBA-Skripte in DIAdem errechnet. Hierfür wurden die MLA-Messdaten des Konzentrats und der Abgänge eines Sortierversuches in einem ersten Schritt über das oben beschriebene Skript zur Errechnung von Aufschlussdaten verarbeitet. Darauf folgend wurden über ein weiteres Skript aus den Partikeldaten Suszeptibilitätsklassen definierter Klassenbreite errechnet. Die Daten der Suszeptibilitätsklassen wurden anschließend mithilfe der Massenbilanzen des Trennversuches kombiniert, wodurch das Berechnen von Trennfunktionen nach dem Merkmal Suszeptibilität möglich ist.

#### Approximationsfunktionen

Das Anpassen der Approximationsfunktionen aus Tabelle 2 erfolgte mithilfe der Software Origin-8. Die Funktionen wurden hierfür als benutzerdefinierte nichtlineare Anpassungsfunktionen in Origin-8 implementiert. Über die Standardroutine für nichtlineare Anpassungen wurden die Funktionen dann auf die Ergebnisse der Sortierversuche angewendet. Anhand der statistischen Auswertung der Anpassung und der Anpassungsparameter wurden die einzelnen Funktionen in ihrer Güte und im Verlauf miteinander verglichen.

#### Berücksichtigung der Analysenfehler

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Kurven und Kennwerte beruhen auf Versuchsdaten, die sowohl aus einer Einfach- als auch aus einer Mehrfachbestimmung von Messwerten errechnet wurden. Beispiele für mehrfachbestimmte Messwerte sind die chemischen Analysen (Abschnitt 3.3.2) oder auch die magnetischen Suszeptibilitäten (Abschnitt 3.3.4). Mineralogische Analysen (Abschnitt 3.3.3) wurden jeweils an einem Präparat je Probe durchgeführt. Quantitative Angaben über Analysenfehler sind folglich für die Daten der mineralogischen Analyse nicht möglich. Ein großer Teil der Diagramme stellt Kurven aus chemischen und aus mineralogischen Analysen nebeneinander dar, bei denen nur für einen Teil der Fehler mit angegeben werden kann. Um eine gute Lesbarkeit der Diagramme zu gewährleisten, wurde daher auf die Angabe der Fehler verzichtet. Auf die generellen Aussagen des jeweiligen Diagramms hat dieses Vorgehen keinen Einfluss.

## **4 Ergebnisse und Diskussion**

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt und diskutiert. Das Kapitel baut auf den theoretischen Grundlagen auf, wird aber in einer anderen Reihenfolge abgehandelt. Die Ergebnisse der Ermittlung von magnetischen Eigenschaften der Minerale und des Versuchsgutes werden vor den Ergebnissen zu Aufschluss- und Trennerfolg sowie deren Kombination diskutiert, da die magnetischen Eigenschaften und deren Verteilung grundlegend für die darauf folgenden Abschnitte sind.

### **4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale**

Die Beschreibung der Sortiererergebnisse, basierend auf dem eigentlichen Trennmerkmal der Magnetscheidung, erfordert die Kenntnis der Mineralsuszeptibilität. Diese stellt neben der mineralogischen Zusammensetzung des Partikels die zweite entscheidende Unbekannte in den Gleichungen (62) und (63) zur Berechnung der Partikelsuszeptibilität dar. Mithilfe der Partikelsuszeptibilität können Anreicherungskurven nach dem Trennmerkmal und Trennfunktionen aus den Analysen der Produkte errechnet werden, welche im Rahmen dieser Arbeit zur Beschreibung des Aufbereitungserfolgs zum Einsatz kamen. Die nachfolgenden Abschnitte stellen die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Ermittlung der Mineralsuszeptibilitäten dar. Im ersten Teil wird das Vorgehen der Zerlegung in Magnetisierbarkeitsklassen mit anschließender Suszeptibilitätsmessung bewertet. Auf Basis dieser Ergebnisse folgt anschließend das Aufstellen von Suszeptibilitätsverteilungen. Darauf folgend wird auf die Suszeptibilität reiner Substanzen eingegangen, ehe die Ergebnisse der beiden untersuchten Erzsysteeme als Funktion der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung dargestellt werden. Im letzten Abschnitt dieses Unterkapitels wird auf die Berechnung der Mineralsuszeptibilitäten, basierend auf mineralogischen Analysen an Merkmalklassen und deren Mischungssuszeptibilität, eingegangen.

#### **4.1.1 Eigenschaftsermittlung mithilfe des Isodynamik-Scheiders und der Suszeptibilitätswaage**

Das prinzipielle Vorgehen beim Ermitteln der magnetischen Eigenschaften beinhaltet das direkte Messen der Suszeptibilität verschiedener Proben aus der Magnetscheidung und das Messen unterschiedlicher Magnetisierbarkeitsklassen des Isodynamik-Scheiders. Wie im Abschnitt 2.4.5 zum Messen magnetischer Eigenschaften

#### 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

erläutert, wird ein Isodynamik-Scheider, nach vorheriger Kalibration, auch direkt zum Ermitteln der Suszeptibilität eingesetzt. Allgemein wird die Formel (70) zur Berechnung der Suszeptibilität, basierend auf Stromstärke und Neigungswinkel des Isodynamik-Scheiders, angegeben. Da es sich beim Gerät des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik um einen Eigenbau handelt, ist die Verwendung der Formel (70) kritisch und das Errechnen der Suszeptibilität, basierend auf den Parametern des Isodynamik-Scheiders, generell zu hinterfragen.

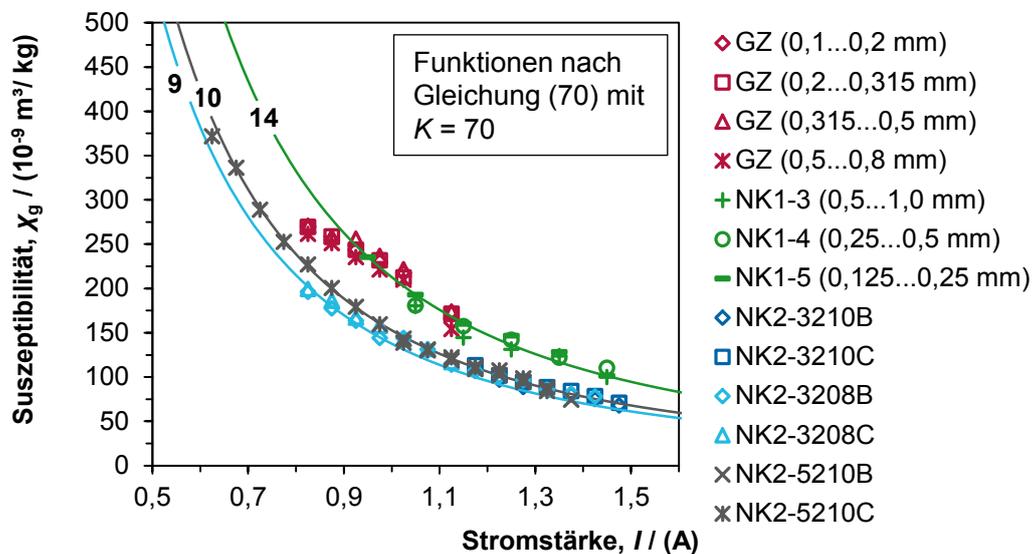
Abbildung 26 stellt die Ergebnisse der im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Trennungen am Isodynamik-Scheider dar. Hierbei sind die mithilfe der Magnetwaage gemessenen Suszeptibilitäten der Trennstromstärke des Isodynamik-Scheiders gegenübergestellt. Die dargestellten funktionalen Verläufe wurden über eine Anpassung der Gleichung (69) an die Versuchsdaten ermittelt. Die Ergebnisse der Anpassungen finden sich in der Tabelle 65 im Anhang.

Obwohl die Versuche nominell unter gleichen Bedingungen durchgeführt wurden, sind Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsreihen festzustellen. Die seitliche Neigung  $\alpha$  des Isodynamik-Scheiders war für die Trennversuche auf  $15^\circ$  beziehungsweise  $10^\circ$  eingestellt. Vor Beginn der Trennungen des Greisenerzes [180] und nach der Umsetzung des Gerätes in ein anderes Labor wurde eine Nulljustierung [141] am Gerät durchgeführt. Zwischen der Untersuchung der Reihen NK1-3 bis NK1-5 und den danach folgenden Versuchsreihen wurde die seitliche Neigung auf  $10^\circ$  verändert. Eine Abweichung der Winkel muss aus dem Aus- und Einbau der Schurre zu Reinigungszwecken resultieren, nach dem jeweils keine erneute Nulljustierung folgte.

In Abbildung 26 ist ein abweichender Verlauf der Suszeptibilität der Greisenerzproben von den Anpassungsfunktionen zu erkennen. Die Ursache dieser Abweichung ist in der Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität von Glimmern [141] (siehe Abschnitt 2.4.3) und im unterschiedlichen Trenn- sowie Messprinzip zu suchen. Glimmerplättchen werden immer flach auf der Schurre des Isodynamik-Scheiders hinabgleiten. Die wirksame Suszeptibilität zur Trennung sind demnach die in der Spaltenebene (entlang der Basis) liegenden Anteile des Suszeptibilitätstensors. Misst man die Suszeptibilität der auf diese Art getrennten Probe mithilfe einer Suszeptibilitätswaage, so liegt die Probe im Messröhrchen in einer Zufallsschüttung vor. Die gemessene Suszeptibilität entspricht folglich der Schüttung und nicht dem Anteil entlang der

## 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

Basis des Glimmers. Aus der Literatur zur Anisotropie der Suszeptibilität von Glimmer ist bekannt, dass  $\chi_{\perp} > \chi_{\parallel}$  gilt [140]. Demnach entspricht der geringere Anstieg der gemessenen Suszeptibilität gegenüber der Anpassungsgleichung der Erwartung.



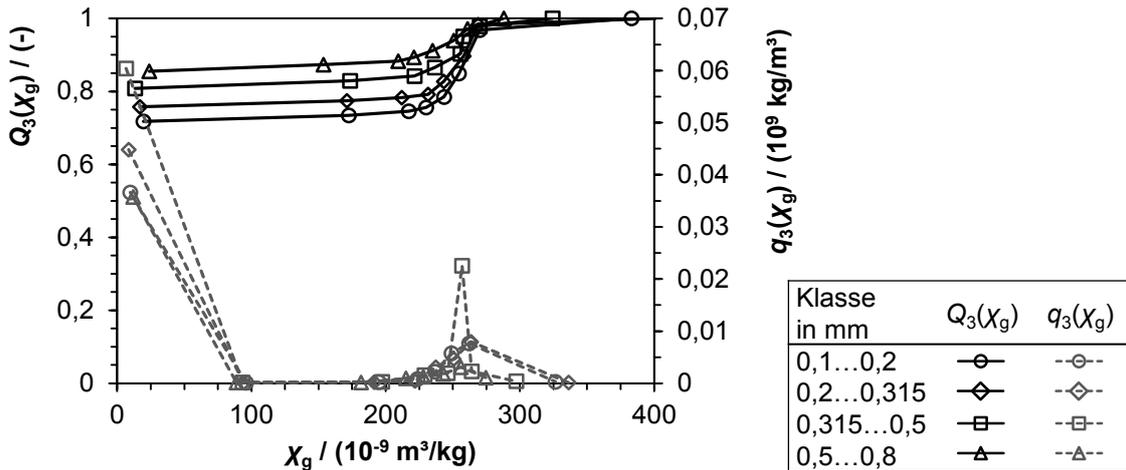
**Abbildung 26: Zusammenhang von Stromstärke und Suszeptibilität am Isodynamik-Scheider für die beiden untersuchten Erzsysteeme (Greisenerz und Nephelin-Syenit)**

Aus den oben getroffenen Aussagen ist ersichtlich, dass eine direkte Messung der Suszeptibilität gegenüber einer Berechnung anhand der Parameter des Isodynamik-Scheiders vorzuziehen ist. Dies ist genauer, da ein definierter Wert für die Probe und nicht ein Bereich angegeben werden kann (vergleiche Abbildung 84 im Anhang). Die Messung einer isotropen Probe mithilfe einer Suszeptibilitätswaage liefert den mittleren Wert und ist nicht durch Anisotropie beeinflusst. Darüber hinaus wirken sich Winkeländerungen auf die errechneten Suszeptibilitäten aus, wodurch eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Versuchsreihen nur mit großer labortechnischer Sorgfalt gewährleistet werden kann.

### 4.1.2 Suszeptibilitätsverteilungen

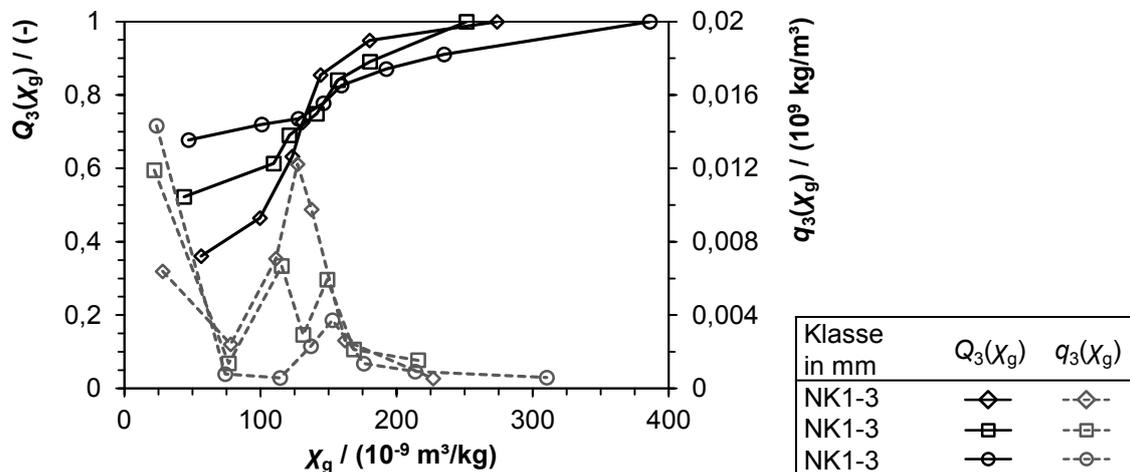
Eine Zerlegung eines Materials nach seiner Magnetisierbarkeit ermöglicht das Aufstellen von Suszeptibilitätsverteilungen (Abbildung 27 und 28). Aus der Summenverteilung können die Masseanteile verschieden stark magnetisierbarer Fraktionen sowie Anhaltspunkte über den Aufschluss der unterschiedlichen Komponenten gewonnen werden. Hat man Suszeptibilitätsverteilungen verschiedener Größenklassen vorliegen, so ist der Einfluss vom Aufschlusszustand anhand der Kurven gut nachvollziehbar.

#### 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale



**Abbildung 27: Suszeptibilitätsverteilungssumme und -dichte für verschiedene Größenklassen des Greisenerzes**

Hierbei ist zu beachten, dass die Kurven etwas anderen Zusammenhängen als Partikelgrößenverteilungen folgen. Mit fortschreitender Zerkleinerung beziehungsweise mit zunehmendem Aufschluss verschieben sich die Kurven nicht insgesamt in eine Richtung, sondern verlaufen im Bereich der Mineralsuszeptibilitäten (Modalwerte) steiler, in den Bereichen zwischen den Modalwerten jedoch flacher, was besonders in der Dichteverteilung sichtbar wird. Die Dichteverteilungen müssen bei besserem Aufschluss demnach schärfer abgegrenzte Maxima aufweisen. Dies ist den Abbildungen 27 und 28 zu entnehmen.



**Abbildung 28: Suszeptibilitätsverteilungssumme und -dichte für verschiedene Größenklassen des Nephelin-Syenits**

Abweichungen von den getroffenen Aussagen treten auf, wenn deutliche Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung der verschiedenen Proben (Größenklassen) vorliegen. Sobald die Mineralanteile in den betrachteten Proben voneinander abweichen, müssen Verschiebungen der Verteilungssummenfunktionen be-

## 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

rücksichtigt werden. Solche Verschiebungen betreffen ausschließlich die Masseanteile der Fraktionen, jedoch nicht die Lage der Modalwerte (siehe Abbildung 27).

Die Verteilungsfunktionen können zum Festlegen von Trennschnitten der Magnetscheidung herangezogen werden. Mit ihrer Hilfe ist das zu erwartende Masseausbringen abschätzbar. Ein Trennschnitt muss zwischen den Modalwerten der Verteilungen angeordnet werden. Je deutlicher die Modalwerte dabei voneinander abgegrenzt werden können, desto besser müsste die Trennung theoretisch umgesetzt werden können. Eine Beurteilung der generellen Trennbarkeit ist unter Einbeziehung von weiteren Kriterien möglich. Ein solches Kriterium ist beispielsweise das für HGMS angegebene erforderliche Suszeptibilitätsverhältnis von 1:20 zwischen den zu trennenden Komponenten [154]. Eine Aussage über die Qualität des erzeugten Produktes ist auf diese Weise jedoch nicht möglich. Dies erfordert die mineralogische Analyse der Magnetisierbarkeitsklassen und das Aufstellen von Ausbringens- und Gehaltkurven über dem Trennmerkmal.

### 4.1.3 Messung der Suszeptibilität reiner Stoffe

Zur Beschreibung von Aufschluss- und Anreicherungsresultaten nach dem Trennmerkmal (hier Suszeptibilität) von Erzen ist die Kenntnis des zu betrachtenden Merkmals jeder Phase erforderlich. Sofern reine Phasen verfügbar sind, kann das Merkmal an ihnen direkt gemessen werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Reinmineralprobe aus dem Erz der Lagerstätte gewonnen werden muss [40]. Der Grund liegt in den Schwankungen der chemischen Zusammensetzung und des Anteils von Einschlüssen, welche einen Einfluss auf die Ausprägung der zu untersuchenden Merkmale haben. Abweichend von dieser Forderung wurden Reinmineralproben aus dem Lager des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik hinsichtlich ihrer Suszeptibilität untersucht, da das Gewinnen solcher Proben aus dem vorliegenden Erz nicht mit vertretbarem Aufwand möglich war. Diese Messungen dienten der Genauigkeitsbeurteilung der Suszeptibilitätsbestimmung mithilfe der Suszeptibilitätswaage über den Abgleich mit vorhandenen Literaturwerten und darüber hinaus auch zum Test der Gehaltsbestimmung über Suszeptibilitätsmessungen.

Tabelle 9 enthält die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen und stellt sie den aus der Literatur bekannten Werten gegenüber (vergleiche hierzu auch die Tabellen 13, 14 und 28 im Anhang).

## 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

**Tabelle 9: Gegenüberstellung von gemessenen Suszeptibilitäten und Literaturwerten verschiedener reiner Minerale**

Substanz/Mineral	Größenbereich mm	Messung $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	Literaturwert $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$
Kalkstein (Dolomit)	0,16...0,5	$8,87 \pm 0,31$	5...80
Kochsalz (Halit)	0,16...0,5	$-6,22 \pm 0,16$	-6,3...-7,3
Kupfer(II)-Sulfat-Pentahydrat	0,16...0,5	$71,4 \pm 1,4$	73,5
Muskovit	0,2...1,0	$117,2 \pm 9,5$	13...250
Quarz	0,16...0,5	$-4,56 \pm 0,16$	-6
Topas	0,2...0,8	$-4,18 \pm 0,07$	-5,3

Wie der Tabelle entnommen werden kann, stimmen die gemessenen Werte gut mit den Literaturangaben überein. Besonders bei den in hoher Reinheit bezogenen Substanzen (Kochsalz und Kupfersulfat) sind gute Übereinstimmungen zum Literaturwert erreicht worden. Kleinere Abweichungen im Bereich der Naturstoffe Quarz und Topas können auf Verunreinigungen zurückgeführt werden. Die Genauigkeit der Ermittlung ist aufgrund dieser Vergleichsmessungen für die zu erfüllende Aufgabenstellung als vollkommen ausreichend einzuschätzen.

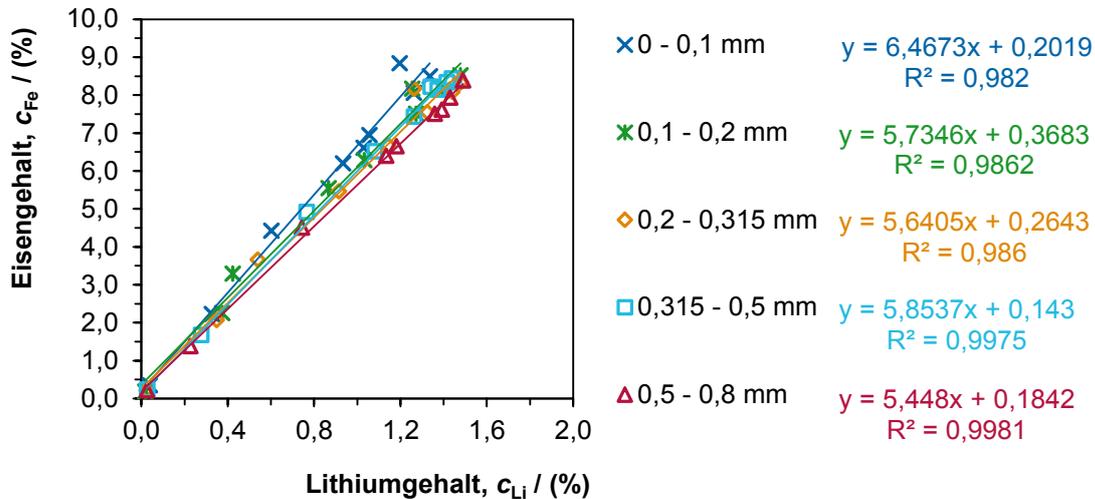
### 4.1.4 Suszeptibilität und Zusammensetzung

#### Greisenerz

Der Zusammenhang von chemischer Analyse und magnetischer Suszeptibilität war in der Vergangenheit Gegenstand einiger Untersuchungen [34, 35, 37, 133, 153]. Wie in Abschnitt 2.4.2 dargestellt, hängt die Suszeptibilität wesentlich vom Gehalt der Elemente Eisen (Fe) und Mangan (Mn) ab. Im Greisenerz und in dessen Wertmineral Zinnwaldit kann dies durch die Abwesenheit von Mn auf den Gehalt an Fe reduziert werden. Abbildung 29 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Eisengehalt und dem Gehalt an Lithium (Li), welches den Wertstoff darstellt und zur Bilanzierung auf das Wertmineral Zinnwaldit Verwendung findet. Aus der Abbildung ergibt sich mit guter Genauigkeit ein linearer Zusammenhang beider Elementgehalte. Hierdurch ist ein Übergang auf eine Darstellung der Suszeptibilität gegen den Lithium- bzw. Zinnwalditgehalt gerechtfertigt. Zu beachten ist, dass im Greisenerz ein Eisenmineral (Limonit) großer Suszeptibilität (vergleiche Tabelle 28 im Anhang) in geringem Gehalt vertreten ist. Limonit hat folglich sowohl einen Einfluss auf den Eisengehalt als auch auf die Suszeptibilität der Probe, ohne jedoch den Wertstoff Lithium zu beinhalten. Sichtbar ist dieser Einfluss in der Abweichung der Messpunkte vom linearen Zusammenhang im Bereich großer Eisengehalte in Abbildung 29 und besonders in der

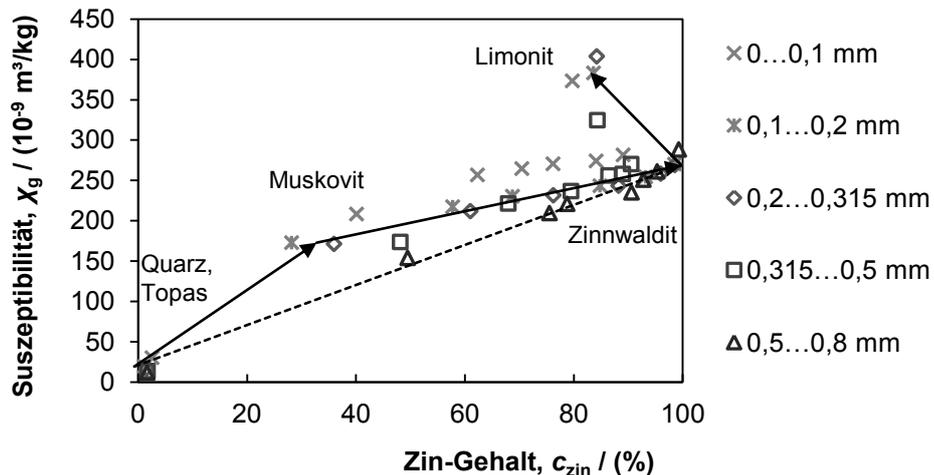
#### 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

Darstellung der Suszeptibilität in Abhängigkeit vom Zinnwalditgehalt (Abbildung 30). Ähnliches gilt ebenso für den im Greisenerz enthaltenen Glimmer Muskovit.



**Abbildung 29: Zusammenhang von Lithiumgehalt und Eisengehalt unterschiedlicher Magnetisierbarkeitsklassen der Größenklassen des Greisenerzes**

Abbildung 30 stellt die gemessenen Suszeptibilitätswerte dem auf Basis des Lithiumgehalts errechneten Zinnwalditgehalt gegenüber. Prinzipiell kann man eine Vergrößerung der magnetischen Suszeptibilität mit zunehmendem Zinnwalditgehalt erkennen. Hierbei sind jedoch verschiedene Effekte zu berücksichtigen. Zwei dieser Effekte sind auf die oben bereits erwähnten Minerale Limonit und Muskovit zurück zu führen.



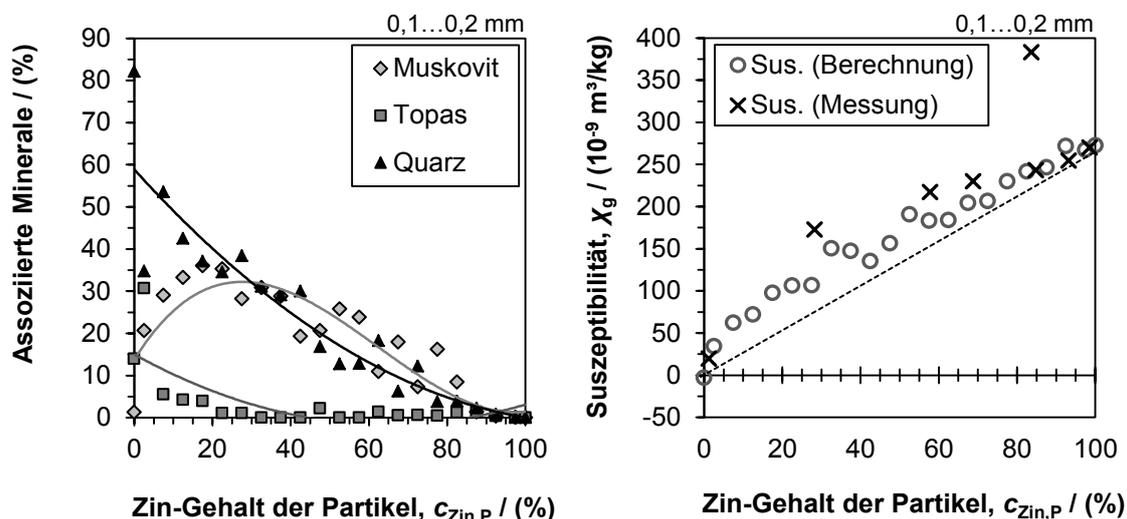
**Abbildung 30: Zusammenhang aus Zinnwalditgehalt und Suszeptibilität für die Produkte der Trennung des Greisenerzes mithilfe des Isodynamik-Scheiders. Die Pfeile symbolisieren die Richtung zunehmender Magnetisierbarkeit und stellen gleichzeitig die Reihenfolge der Proben in den Trennungsversuchen dar.**

Limonit reichert sich aufgrund seiner großen magnetischen Suszeptibilität in der stark magnetischen Fraktion der Trennversuche am Isodynamik-Scheider an (siehe

#### 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

Abbildung 30). Der lineare Zusammenhang von Suszeptibilität und Eisengehalt (beziehungsweise Lithiumgehalt) verliert für diese Klasse seine Gültigkeit.

Der Grund liegt in dem Vorhandensein von mindestens zwei Mineralen, welche einen deutlichen Einfluss auf die Suszeptibilität des Mineralgemisches dieser Fraktion nehmen, jedoch in chemischer Zusammensetzung und Struktur voneinander verschieden sind. Der Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Suszeptibilität gilt nur für Proben monomineralischen Aufbaus [37, 133, 153]. An dieser Stelle sei noch einmal auf das Mischungsgesetz zur Suszeptibilitätsberechnung von Mehrkomponentensystemen (siehe Gleichungen (62) und (63)) und auf den Einfluss der Struktur auf die Suszeptibilität von Mineralen (vergleiche Abschnitt 2.4.2 und 2.4.3) verwiesen, aus denen der nichtlineare Zusammenhang bei Mehrkomponenten hervorgeht.



**Abbildung 31: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwalditpartikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,1 – 0,2 mm**

Muskovit besitzt eine geringere magnetische Suszeptibilität als Zinnwaldit und ist demnach eher in Fraktionen mittlerer Suszeptibilität zu erwarten. Hier kann es entweder frei oder in Verwachsung mit anderen Mineralen vorliegen. Wie Abbildung 31 links zu entnehmen ist, liegt Muskovit besonders in den mittleren Gehaltsklassen der Zinnwaldit-haltigen Partikel vor (vergleiche hierfür auch die Abbildungen 80 bis 83 im Anhang). Anders als bei einer binären Mischung weicht der Verlauf der Suszeptibilität über dem Gehalt an Wertstoff von einer Geraden ab (Abbildung 30 und 31 rechts). Dies ist auf den Einfluss des Muskovits zurückzuführen. In der Gegenüberstellung gemessener Suszeptibilitäten und auf Basis der Gehaltsklassenzusammensetzung errechneter Suszeptibilitäten zeigen beide Verläufe einen ähnlichen Zusammenhang.

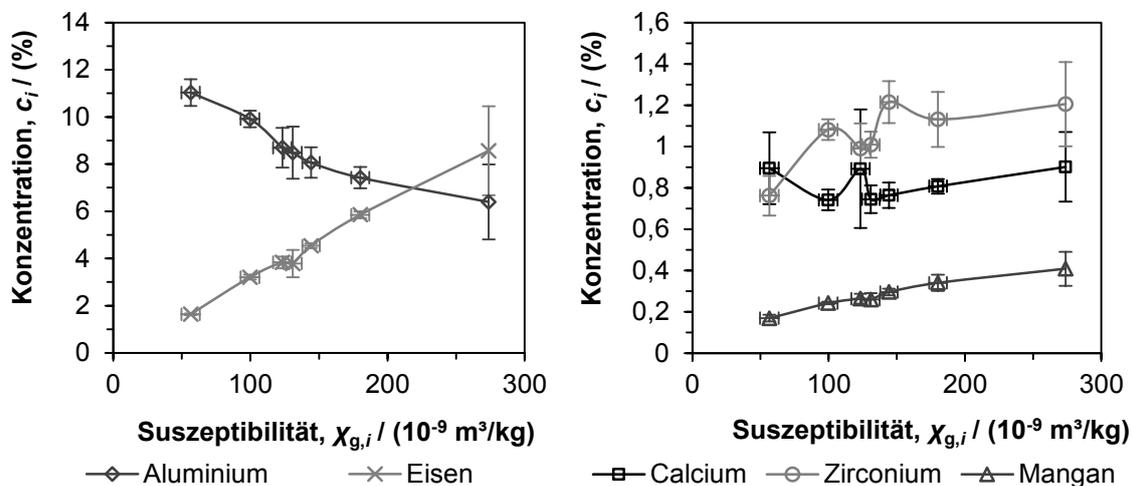
## 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

Die Komplexität solcher Verläufe lässt sich bereits bei Systemen mit wenigen Hauptkomponenten verdeutlichen.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden durch CHELGANI [190] statistische Modellierungen durchgeführt, die den Zusammenhang aus magnetischer Suszeptibilität und der Konzentration an K, Li, Fe und Al beschreiben. Mithilfe solcher Ansätze kann bei bekannter Zusammensetzung auf die Suszeptibilität und bei bekannter Suszeptibilität auf die Zusammensetzung der Probe geschlossen werden.

### Nephelin-Syenit

Der Nephelin-Syenit ist aus einer Vielzahl von verschiedenen Mineralen mit nennenswerten Anteilen an der Gesamtzusammensetzung aufgebaut, wobei darüber hinaus mehrere Minerale mit ausgeprägtem Paramagnetismus im Erz enthalten sind (vergleiche Tabelle 28 im Anhang). Eine Darstellung der Zusammensetzung als Funktion der magnetischen Suszeptibilität ist demnach deutlich komplizierter als beim Greisenerz. Besonders bei ungenügenden Aufschlussverhältnissen ist eine Verteilung über der Suszeptibilität stark durch das Mischungsgesetz (Gleichungen (62) und (63)) und die spezifische Zusammensetzung, das heißt durch die Suszeptibilität von Kompositpartikeln und dessen Vieldeutigkeit, geprägt.



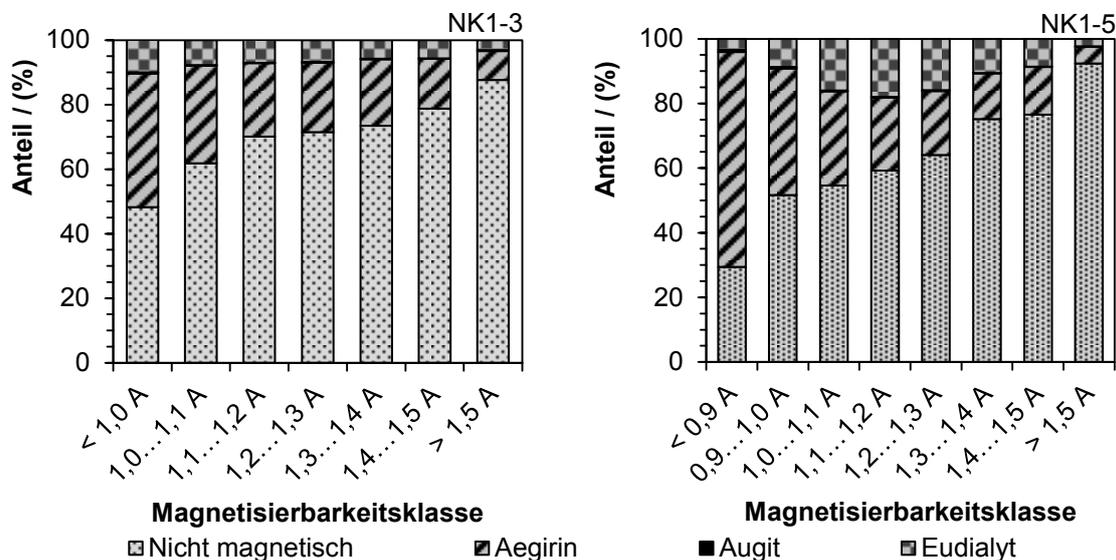
**Abbildung 32: Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität und chemischer Zusammensetzung des Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klasse 3)**

In den Abbildungen 32 und 33 wird der Zusammenhang aus Suszeptibilität beziehungsweise Magnetisierbarkeit und des Gehalts an Aluminium, Eisen, Calcium, Zirconium und Mangan für die Isodynamik-Scheiderfraktionen der Größenklassen 0,5...1,0 mm (NK1-3) und 0,125...0,25 mm (NK1-5) beispielhaft dargestellt. Die Abbildung 32 zeigt den Verlauf der chemischen Zusammensetzung der Magnetisier-

## 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

barkeitsklassen, gemessen mittels ICP-OES, in Abhängigkeit von ihrer Suszeptibilität. Es ergibt sich der aus der Literatur bekannte Zusammenhang von Eisen- und Mangangehalt und magnetischer Suszeptibilität [34, 35, 37, 133, 153].

Eine Korrelation der Gehalte mit der Suszeptibilität ist strenggenommen nur für reine, monomineralische Proben zulässig [153], da bei der Vielzahl von paramagnetischen Mineralen unterschiedlicher Struktureinflüsse [34, 38] die magnetische Suszeptibilität von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Weiterhin ist bei Seltenerdenelementen-haltigen Mineralen auch deren magnetisches Moment zu berücksichtigen [34]. Hauptträger des Eisens ist das Pyroxen Aegirin, welches zusammen mit dem zweiten Pyroxen Augit zu den Mineralen höchster Suszeptibilität im Erz gehört (vergleiche Tabelle 28 im Anhang). Neben Mangan und Eisen zeigt auch der Zirkoniumgehalt eine Abhängigkeit von der magnetischen Suszeptibilität. Dies spricht für die Anreicherung des Seltenerdenelementen-haltigen Minerals Eudialyt. Die Abnahme von Aluminium mit zunehmender Magnetisierbarkeit deutet auf die Abreicherung der nicht magnetischen Feldspate hin. Ausgetragener Feldspat in Klassen mittlerer und hoher Magnetisierbarkeit kann auf nicht aufgeschlossene Verwachsungen zurückgeführt werden.



**Abbildung 33: Gegenüberstellung der Zusammensetzung von Magnetisierbarkeitsklassen des zerkleinerten Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klassen 3 und 5)**

Von den Magnetisierbarkeitsklassen der Proben NK1-3 und NK1-5 wurden automatische mineralogische Analysen mittels MLA durchgeführt. Die aus diesen Analysen gewonnenen mineralischen Zusammensetzungen bestätigen die anhand der chemischen Analysen der Reihe NK1-3 gewonnenen Trends (vergleiche Abbildung 33). Eudialyt und Aegirin reichern sich in den Klassen hoher Magnetisierbarkeit an.

## 4.1 Magnetische Eigenschaften der Minerale

Dies ist zwingend an eine Abreicherung der als nicht magnetisch klassifizierten Minerale gebunden. Anreicherungsfaktoren und Ausbringenswerte dieser Versuchsreihen finden sich in den Abbildungen 114 und 115 im Anhang. Gut zu erkennen ist der Einfluss der geringeren Partikelgröße und der damit verbundene verbesserte mechanische Aufschluss, welcher zu einem geringeren Anteil nicht magnetischer Bestandteile in Klassen hoher Magnetisierbarkeit führt. Darüber hinaus zeichnet sich eine Anreicherung des Eudialyts in Klassen mittlerer Magnetisierbarkeit ab. Hieraus kann jedoch noch nicht auf die magnetische Suszeptibilität des Eudialyts geschlossen werden, da die mittlere Suszeptibilität der Klasse nichts mit der Mineralsuszeptibilität gemein haben muss (siehe Mischungsgesetz).

Um eine Abschätzung der Mineralsuszeptibilität auf Grundlage einfacher Suszeptibilitätsmessungen treffen zu können, müssten Proben einer weniger vielfältigen Zusammensetzung oder den Mineralen eindeutig zuordenbare Trends vorliegen. Generell kann aus den Ergebnissen zur Suszeptibilität und Zusammensetzung ausgewählter Proben des Nephelin-Syenits abgeleitet werden, dass Eudialyt zu den Mineralen mit nennenswerten Paramagnetismus gehört, wobei die Suszeptibilität etwas unterhalb der der Pyroxene Aegirin und Augit vermutet wird.

### 4.1.5 Rechnerische Ermittlung der Suszeptibilität

Nach dem unter 3.4.1 beschriebenen Verfahren wurde versucht, anhand verschiedener Merkmalklassen des Nephelin-Syenits auf die Mineralsuszeptibilität zu schließen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind überblicksweise in den Tabellen 21 und 22 (im Anhang B.3) dargestellt. Wie den Werten zu entnehmen ist, schwanken die berechneten Mineralsuszeptibilitäten je nach Kombination der verschiedenen Merkmalklassen. Hierfür sind mehrere Gründe zu nennen.

- Ein ungenügender Aufschluss der Komponenten und daher eine weniger stark unterschiedliche Zusammensetzung der Merkmalklassen,
- zu viele Komponenten im System, wodurch ein unbestimmtes Gleichungssystem vorliegt und
- ein zu geringer Unterschied in der Suszeptibilität der Magnetisierbarkeitsklassen.

Die erzeugten Merkmalklassen ähneln sich sowohl in ihrer Zusammensetzung als auch in ihrer Suszeptibilität (vergleiche Tabellen 15 und 27 im Anhang). In Verbindung mit den Mess- und Analysefehlern der Untersuchungen ist eine Berechnung

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

der Mineralsuszeptibilität nach Gleichung (65) selbst bei einer Gruppierung zur Vereinfachung des Systems nicht mit der erforderlichen Genauigkeit möglich. Besonders großen Schwankungen sind dabei die Mineralgruppen geringen Masseanteils unterworfen, deren Ergebnisse teilweise unsinnige Größenordnungen annehmen. Trotzdem ergeben sich für einige Hauptgruppen plausible Ergebnisse, welche die prinzipielle Anwendbarkeit des Vorgehens zeigen. Für eine Nutzung der errechneten Suszeptibilitäten im Sinne dieser Arbeit reicht dies jedoch nicht aus.

Etwas bessere Ergebnisse lassen sich anhand der gleichen Datenbasis mithilfe statistischer Modellierungen gewinnen. Hierzu werden die Merkmalklassen virtuell zufällig beprobt. Anhand der aus jeder Merkmalklasse gewonnenen Probe wird die Suszeptibilitätsberechnung durchgeführt (insgesamt 500 Berechnungen) [191]. Beispielhaft sind Ergebnisse solcher statistischen Modellierungen in Tabelle 23 dargestellt [191].

Eine generelle Verbesserung des Vorgehens würde sich aus der Zerlegung des Gemisches nach unterschiedlichen Merkmalen (Suszeptibilität, Dichte, Größe) ergeben. Hierdurch entstehen Merkmalklassen, die in ihrer Zusammensetzung und im zu untersuchenden Merkmal größere Unterschiede aufweisen. Die Gefahr von linearen Abhängigkeiten zwischen den Zeilen des Gleichungssystems kann auf diese Weise erheblich verringert werden. Darüber hinaus muss auf einen genügend großen mechanischen Aufschluss Wert gelegt werden.

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

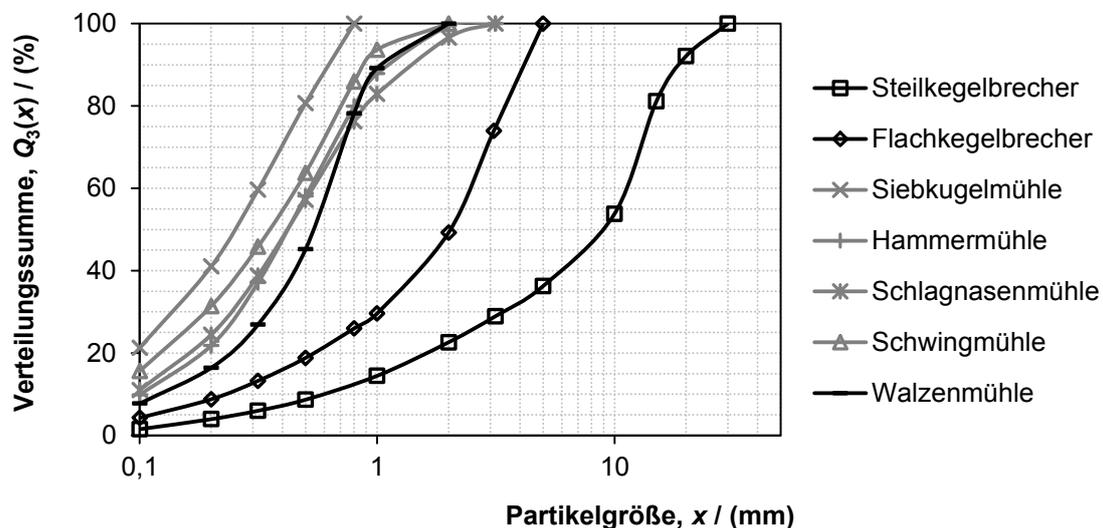
Die Beschreibung des Aufschlusszustandes stellt einen essentiellen Schritt für die Bewertung der Grenzen des nachgeschalteten Sortierschrittes dar. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Aufschlussanalysen dargestellt und diskutiert. Ausgehend von Partikelgrößenverteilungen und der Verteilung der Minerale beziehungsweise des Wertstoffes über die Partikelgröße wird auf selektive Effekte während der Zerkleinerung eingegangen. Darauf folgend wird der Aufschlusszustand über Kennwerte und Verteilungen beschrieben. Dabei wird die neu eingeführte Aufschlussersfolgzahl mit herkömmlichen Parametern verglichen, ehe nachfolgend der Einfluss des Merkmals zum Aufstellen von Verwachsungskurven diskutiert wird. Abgeschlossen werden die Überlegungen zum mechanischen Aufschluss mit vergleichenden Betrachtungen von stereologisch transformierten und nicht transformierten Verwachsungsverteilungen verschiedener Proben.

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

### 4.2.1 Partikelgrößenverteilungen und Gehalte

#### Greisenerz

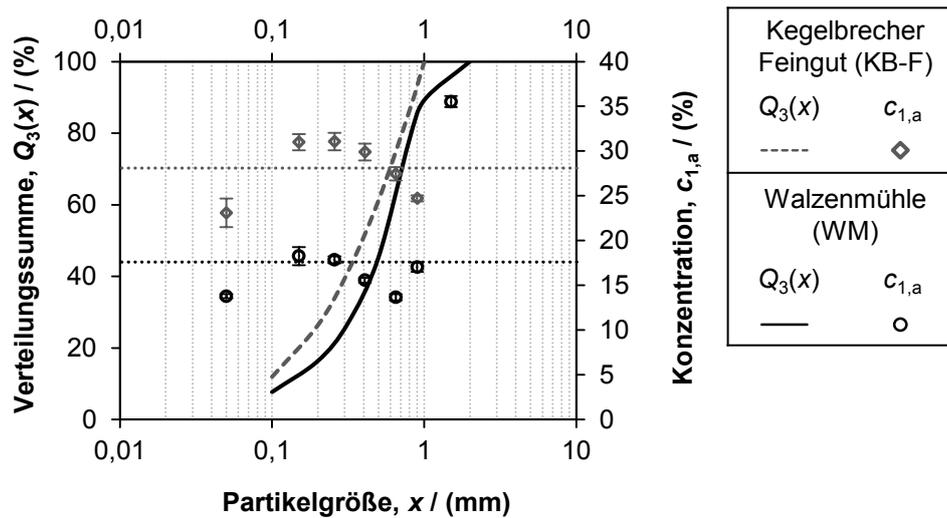
Die Zerkleinerung des Greisenerzes auf Zielfeinheit in unterschiedlichen Maschinen erzeugte Endprodukte mit voneinander leicht unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen (siehe Abbildung 34 und 88 im Anhang). Je nach wirkendem Zerkleinerungsmechanismus entsteht mehr oder weniger Feingut ( $-0,1$  mm) und es ergibt sich eine steilere Verteilung. Da sich feinkörnige Partikelgemische über trockene Magnetscheidung schwer sortieren lassen, sollte der Anteil  $-0,1$  mm möglichst gering gehalten werden. Zudem können auf Flächenscheidern mit größeren Körnungen größere Durchsätze realisiert werden, was aus ökonomischen Gesichtspunkten von Bedeutung ist.



**Abbildung 34: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilungen von der zweiten bis zur vierten Zerkleinerungsstufe**

Die steilste Partikelgrößenverteilung mit einem geringen Feinkornanteil erhält man durch den Einsatz einer Walzenmühle als letzte Zerkleinerungsstufe. Berücksichtigt man das stark schleißende Verhalten des Greisenerzes (vergleiche Abschnitt 3.1.2), so sind Zerkleinerungsmaschinen mit Prallbeanspruchung nicht zu empfehlen. Unter diesem Gesichtspunkt fallen die Schlagnasen- und Hammermühle, welche einen vergleichbar geringen Feingutanteil erzeugen, aus der Betrachtung heraus.

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen



**Abbildung 35: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilungssumme und des nasschemisch ermittelten Zinnwalditgehalts über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einem Kegelbrecher und anschließender Nachmahlung des +1 mm in einer Walzenmühle**

Neben einer einfachen Beurteilung der am besten geeigneten Zerkleinerungsmaschine anhand von Partikelgrößenverteilungen ist ebenso die Verteilung des Wertstoffes auf die Größenklassen für den anschließenden Sortierprozess von Bedeutung. Trägt man die Wertstoffgehalte der Größenklassen über der Partikelgröße auf (siehe Abbildung 35), so kann man eine Anreicherung des Zinnwaldits in kleineren Größenklassen beobachten. Dies ist ein Indiz für verschiedene selektive Bruchphänomene, welche in Abschnitt 2.1.1 beschrieben wurden. Dieses Phänomen ist eine dem Greisenerz innewohnende Eigenschaft. Es lässt sich bei der Zerkleinerung des Erzes in allen untersuchten Maschinen nachweisen (vergleiche hierzu Abbildung 89 bis 93 im Anhang). Die Ursache dieses Verhaltens liegt in den großen Unterschieden der mechanischen Eigenschaften der Minerale des Erzes begründet (siehe Tabelle 26 im Anhang). Eine Aufgliederung in die nach KING [14] wirkenden Bruchphänomene ist nur mithilfe geeigneter dreidimensionaler Messmethoden möglich und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden.

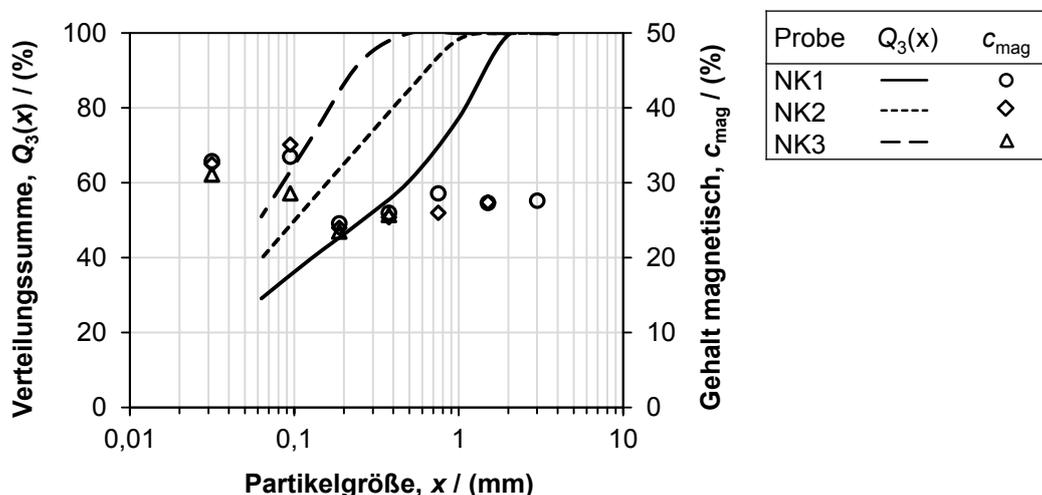
Neben der Anreicherung des Wertminerals Zinnwaldit im Partikelgrößenbereich von 0,1 mm bis 0,5 mm lässt sich beim Produkt der Walzenmühle eine weitere Besonderheit erkennen. Es tritt eine zweite Anreicherung des Wertminerals im Größenbereich oberhalb von 0,8 mm auf. Während des Zerkleinerungsversuches wurde die Mühle mit einem geringen Durchsatz betrieben, woraus eine Einzelpartikel- und keine Gutbettbeanspruchung resultiert. Die Zerkleinerung in der Walzenmühle basiert auf einem eindimensionalen Abgleich der Partikelgröße mit der Spaltweite.

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

Hierdurch ist die kleinste Abmessung entscheidend für das Passieren des Spaltes. Im Falle der plättchenförmigen Glimmer ist dies die Plättchendicke. Das der Zerkleinerung nachgeschaltete Siebklassieren mit Quadratmaschen trennt im Normalfall nach den beiden größten Abmessungen, wodurch die Plättchen, welche den 1 mm breiten Spalt der Walzenmühle passieren konnten, auf dem 1 mm Siebboden zurückbleiben. Plättchen in diesem Größenbereich entsprechen der ursprünglichen Mineralkorngröße im Ausgangsgestein [168] und können als ungebrochen angesehen werden. Auch dies deutet auf selektive Bruchphänomene während der Zerkleinerung hin. Darüber hinaus kann vermutet werden, dass Glimmer unterschiedlicher Mineralkorngröße – ein eher feinkörniger und ein eher grobkörniger Typ – im Greisen enthalten sind.

### Nephelin-Syenit

Die Zerkleinerung des Nephelin-Syenits auf verschiedene Produktfeinheiten hat ebenso wie beim Greisenerz, jedoch weniger stark ausgeprägt, eine Anreicherung verschiedener Komponenten in Abhängigkeit von der Partikelgröße zur Folge. Wie aus Abbildung 36 entnommen werden kann, reichern sich die magnetischen Bestandteile geringfügig in den feinen Partikelgrößenklassen an.



**Abbildung 36: Partikelgrößenverteilung und Gehalt an magnetischen Bestandteilen über der Partikelgröße für verschiedene Zerkleinerungsprodukte des Nephelin-Syenits**

Mit zunehmender Zerkleinerung gelangen zunehmend mehr nicht magnetische Bestandteile in diese Größenklassen, wodurch dieser Effekt etwas abgeschwächt wird. Generell kann gesagt werden, dass die Größenklassen der Zerkleinerungsprodukte aus den verschiedenen Versuchsreihen sehr ähnlich sind, wodurch keine weiteren, vergleichenden Betrachtungen dahingehend gemacht werden.

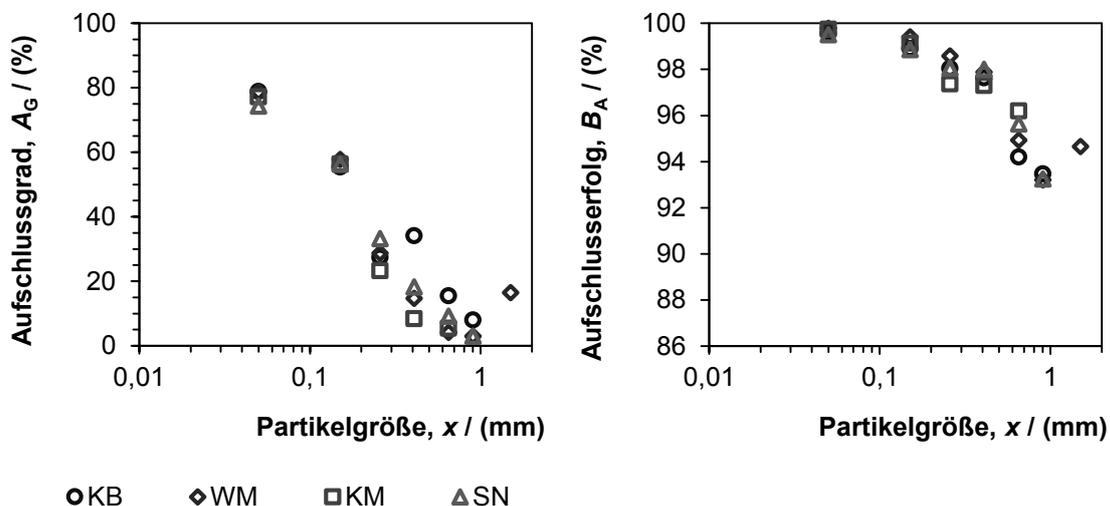
## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

### 4.2.2 Aufschlusskennwerte und Verwachsungsverhältnisse

Zur Beurteilung des Aufschlusses können entweder Kennwerte oder Kurven verschiedener Partikelgrößen miteinander verglichen werden. Nachfolgend werden die in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Aufschlussgrade herkömmlicher Definition der neu definierten Kennzahl zur Beschreibung des Aufschlusserefolgs gegenübergestellt.

#### Greisenerz

In Abbildung 37 sind die Verläufe des Aufschlussgrades nach der Definition von GAUDIN (links) und der Aufschlusserefolgszahl (rechts) über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in verschiedenen Maschinen dargestellt. Prinzipiell zeigt sich für alle Zerkleinerungsmaschinen der gleiche Trend. Theoretisch müssten die Aufschlusskennzahlen mit Verringerung der Partikelgröße zunehmen. Dies gilt genau genommen für die kumulative Darstellung des Gesamtmaterials. Abbildung 37 zeigt hingegen die Kennwerte der einzelnen Partikelgrößenklassen, wodurch eine Abweichung vom theoretisch zu erwartenden Verlauf möglich wird. Unterschiede in den Verläufen der Kurven verschiedener Zerkleinerungsmaschinen treten besonders im Bereich gröberer Partikelgrößenklassen auf. Für sehr feine Partikelgrößenklassen ergeben sich nahezu identische Kennwerte.



**Abbildung 37: Aufschlussgrad und Aufschlusserefolgszahl in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes mithilfe verschiedener Zerkleinerungsmaschinen**

Auffällig ist der etwas bessere Aufschlussgrad des Produktes vom Kegelmischer kleiner 1,0 mm. Da es sich hierbei um Fraktionen der 3. Zerkleinerungsstufe handelt, kann es sich um weniger stark gebundene Bestandteile handeln, welche leichter zu zerkleinern und aufzuschließen sind. Diese These wird durch den Verlauf der Auf-

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

schlussersfolgsszahl gestützt, welche den integralen Wert der Verwachsungskurve repräsentiert. Ist der Aufschlussgrad einer Probe größer, die Aufschlussersfolgsszahl jedoch kleiner als bei einer vergleichbaren Probe gleicher Partikelgröße, so muss die Verwachsungskurve eine geringere Krümmung aufweisen (vergleiche Abschnitte 2.3.1 und 2.3.4). Folglich liegt zwar ein größerer Teil des Wertstoffes frei vor, es existiert im Gegenzug aber ein geringerer Anteil wenig verwachsener Partikel.

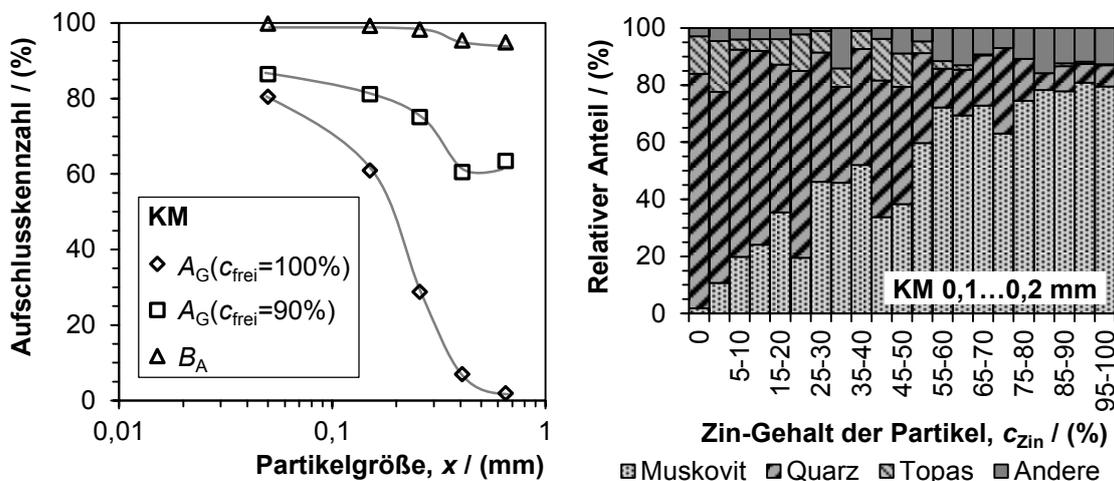
Genau wie bei der Verteilung des Wertstoffes über der Partikelgröße fällt auch hier die grobe Größenklasse des Walzenmühlenproduktes durch abweichende Kennwerte auf. Auch in diesem Fall gilt die Begründung über die unterschiedlichen geometrischen Abmessungen des Glimmers, welche beim Passieren des Mühlenspaltes und von Siebmaschen entscheidend sind. Frei vorliegende Glimmerplättchen reichern sich folglich in der größten Partikelgrößenklasse an, woraus ein höherer Aufschlusskennwert resultiert. Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind Brüche entlang der Phasengrenzen und Grenzbereichsbrüche für diesen Effekt verantwortlich, da freie Minerale im Bereich der Primär-Mineralkorngröße zu nennenswerten Anteilen im Zerkleinerungsprodukt vorliegen (siehe Abschnitt 2.1.1).

Vergleichend ist zum Aufschlussgrad und der Aufschlussersfolgsszahl festzustellen, dass beide Kennzahlen zwar prinzipiell einen steigenden Trend zeigen, die Absolutwerte jedoch deutlich unterschiedliche Größen annehmen. Betrachtet man den Aufschlussgrad, so liegt der Wertstoff bis herab zu 0,315 mm nur schlecht aufgeschlossen vor. Betrachtet man hingegen die Aufschlussersfolgsszahl, so ergeben sich für alle Produkte und alle Größenklassen Werte über 90 %. Die mechanische Trennung des Erzes in wertstoff- und bergehaltige Partikel durch Zerkleinerung ist demnach recht erfolgreich verlaufen. Der Übergang auf eine Aufschlussdefinition freier Partikel bei 90 % Partikelgehalt ist beim Greisenerz zu empfehlen (vergleiche Abschnitt 2.1.2) [32, 52].

Die Abbildung 38 links stellt einen Vergleich des Aufschlussgrades bei einer Definition frei vorliegender Partikel ab einen Wertstoffgehalt von 90 % ( $A_G(c_{\text{frei}} = 90 \%)$ ) und 100 % ( $A_G(c_{\text{frei}} = 100 \%)$ ) sowie der Aufschlussersfolgsszahl dar. Durch den Übergang auf eine andere Aufschlussdefinition ergibt sich ein deutlich anderer Verlauf des Aufschlussgrades. Dieser nimmt in den groben Partikelgrößenklassen erheblich höhere Werte an und liegt herab bis zum Feinkornbereich deutlich über dem Wert für  $c_{\text{frei}} = 100 \%$ . Die Begründung für die Unterschiede liegt im Aufschlussverhalten der

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

verschiedenen Mineralverwachsungen. Muskovit und Zinnwaldit weisen eine stärkere Bindung zueinander als zu anderen Mineralen auf, da der Muskovit in einer zweiten Mineralisationsphase auf den Zinnwaldit aufgewachsen ist [192]. Folglich lassen sich die Verwachsungen zu den anderen im Erz vorhandenen Mineralen besser brechen, wodurch die Glimmer von ihnen besser aufgeschlossen werden können. Als Resultat bleiben sehr gut aufgeschlossene Zinnwalditpartikel zurück, welche im Wesentlichen nur noch geringfügige Verwachsungen zu Muskovit aufweisen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 38 rechts für das Kugelmühlenprodukt im Größenbereich 0,1...0,2 mm dargestellt. Der in diesem Diagramm angegebene relative Anteil stellt den Anteil der Minerale an den mit Zinnwaldit verwachsenen Mineralen der jeweiligen Klasse dar. Der relative Anteil des Muskovits an den mit Zinnwaldit verwachsenen Mineralen beträgt bei Partikeln großen Zinnwalditgehalts etwa 70 %. Dies gilt herab bis zu Partikeln, welche nur noch zu 50 % aus Zinnwaldit bestehen. Vergleicht man diesen Zusammenhang über die Partikelgröße, so bekräftigen sich die getroffenen Aussagen zum Aufschlussverhalten der unterschiedlichen Minerale (siehe hierzu auch Abbildung 39 und Abbildung 95 im Anhang).

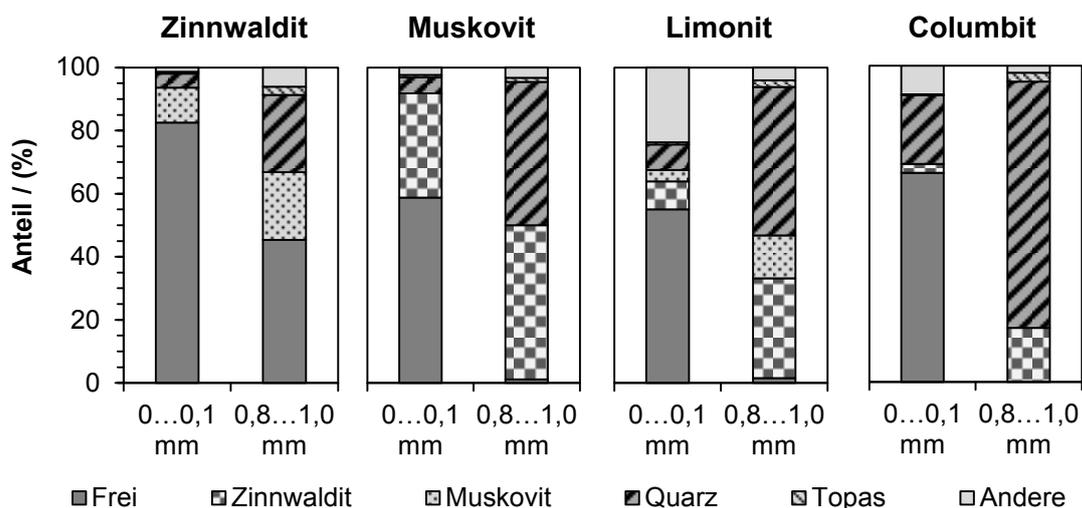


**Abbildung 38: Verlauf von Aufschlusskennwerten des Kugelmühlenversuches (links) und Anteile ausgewählter Minerale in den Verwachsungsklassen der Größenklasse 0,1...0,2 mm**

Die Verwachsungsverhältnisse der vier Minerale mit nennenswertem Paramagnetismus sind in Abbildung 39 für die feinste und die größte Größenklasse des Produktes der Schlagsamenmühle dargestellt. Im Diagramm repräsentieren die Balken den Anteil eines Minerals, der entweder frei oder in Verwachsung mit den angegebenen Mineralen auftritt. Es wird dabei nicht unterschieden, ob die Verwachsung binär, das heißt nur mit einem anderen Mineral, oder höherer Ordnung ist. Zwei wichtige Aussagen können anhand des Diagramms getroffen werden. Zinnwaldit liegt

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

schon in der Fraktion von 0,8...1,0 mm zu einem nennenswerten Anteil frei vor, wo hingegen Muskovit nahezu nur in Verwachsung auftritt. Sowohl Muskovit als auch Zinnwaldit sind zu einem großen Anteil mit dem jeweils anderen Mineral verwachsen. Verringert man die Partikelgröße, verbessert sich der Aufschluss beider Minerale nennenswert. Die Anteile der Verwachsung zu anderen Mineralen verschieben sich dabei zum Teil sehr deutlich. Beide Minerale wiesen in der groben Fraktion noch einen großen Anteil ihrer Verwachsung mit Quarz auf, welcher sich durch die Zerkleinerung sehr stark verringert. Der Anteil der Verwachsung zum jeweils anderen Glimmermineral reduziert sich hingegen nur geringfügig, was auf die weiter oben beschriebenen stärkeren Bindungen der beiden Glimmer zueinander zurückzuführen ist. Die Bindung der Glimmer an Quarz kann andererseits deutlich besser aufgebrochen werden, wodurch ein gewisser selektiver Charakter des Aufschlusses an diesem Beispiel bewiesen wurde.



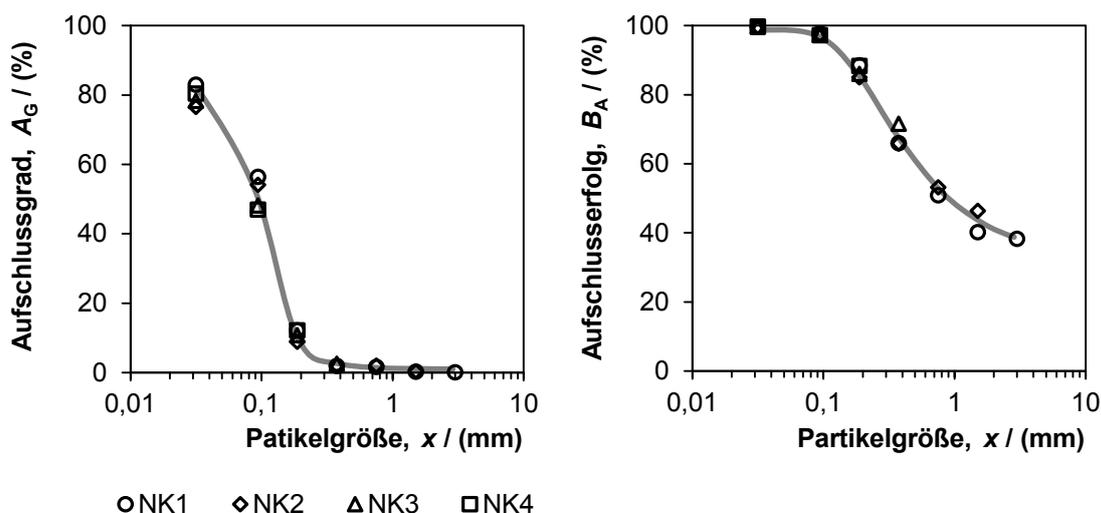
**Abbildung 39: Verwachsungsverhältnisse in Abhängigkeit der Partikelgröße für das zerkleinerte Greisenerz am Beispiel von Zinnwaldit, Muskovit, Limonit und Columbit**

In Abbildung 39 sind zusätzlich die Verwachsungsverhältnisse von Limonit und Columbit dargestellt. Beide Minerale liegen in der groben Fraktion nur in Verwachsungen mit anderen Mineralen vor und weisen in der feinsten Fraktion lediglich einen Aufschluss von 50 bis 70 % auf. Die Verwachsungen bestehen im Fall von Limonit mit einer Vielzahl von Mineralen, im Fall von Columbit hauptsächlich mit Quarz und anderen. Beide Minerale sind stark paramagnetisch (siehe Tabelle 28 im Anhang), weshalb sie bei ungenügendem Aufschluss für fehlausgetragene Bergepartikel im Konzentrat verantwortlich sind (vergleiche Abschnitt 2.4.4).

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

### Nephelin-Syenit

Beim Nephelin-Syenit handelt es sich um ein feinkörniges, stark verwachsenes Erz. Einen weitgehenden Aufschluss der Wertphasen erreicht man somit erst bei kleineren Partikelgrößen, als vergleichsweise beim Greisenerz. Dies spiegelt sich deutlich in den Aufschlusskennwerten als Funktion der Partikelgröße wieder. In Abbildung 40 sind der Aufschlussgrad (links) und die Aufschlusserfolgzahl (rechts) der magnetischen Bestandteile (Aegirin, Augit und Eudialyt) aller Versuchsreihen über der mittleren Partikelgröße der entsprechenden Größenklasse aufgetragen.



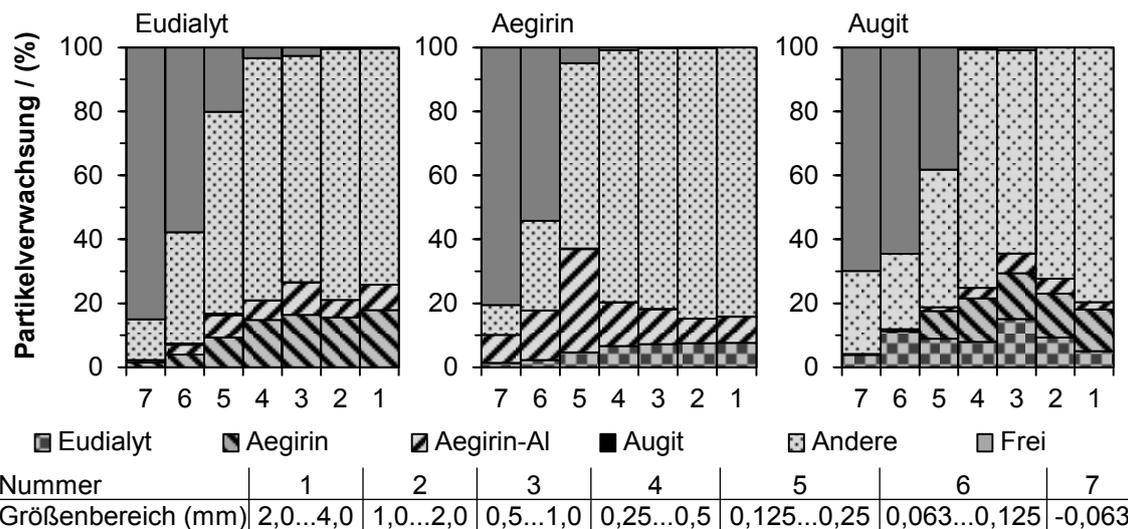
**Abbildung 40: Aufschlussgrad und Aufschlusserfolgzahl der magnetischen Bestandteile in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Nephelin-Syenits auf unterschiedliche Produktfeinheiten**

Zwischen den Verläufen der Kennzahlen besteht, ähnlich wie bei der Zusammensetzung, versuchsübergreifend nahezu kein Unterschied. Der Aufschlussgrad nimmt erst ab Partikelgrößen unterhalb von 0,25 mm deutlich zu, ist oberhalb dieser Größe nahezu Null. Der Verlauf der Aufschlusserfolgzahl unterscheidet sich etwas. Bereits bei höheren Partikelgrößen werden mittlere Aufschlusserfolgswerte erreicht, was mit der Zunahme wertstoffreicher Partikel im Zusammenhang steht. Eine deutliche Zunahme der Aufschlusserfolgswerte ist zwischen 1,0 und 0,125 mm zu verzeichnen. Unterhalb von 0,125 mm kann kaum noch eine Verbesserung der Aufschlusserfolgswerte der magnetischen Bestandteile erreicht werden. Wird der Aufschlusserfolg im Hinblick auf die Magnetscheidung betrachtet, kann bei Erreichen dieser Grenze die Zerkleinerung beendet werden.

Die Verwachsungsverhältnisse von Eudialyt, Aegirin und Augit in Abhängigkeit von der Partikelgröße stellt Abbildung 41 dar. Die Zahlen, über denen die Zusammensetzungen der das entsprechende Mineral enthaltenden Partikel aufgetragen sind,

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

repräsentieren die jeweilige Partikelgrößenklasse nach Tabelle 6. Wie bereits aus Abbildung 40 zu entnehmen, liegt erst ab Klasse 6, das heißt unterhalb von  $0,125\ \mu\text{m}$ , ein großer Teil der entsprechenden Mineralmasse frei vor. Die Abbildung 41 liefert darüber hinaus Informationen über das Aufschlussverhalten der drei betrachteten Minerale. Eudialyt zeigt zu den betrachteten Phasen kein selektives Aufschlussverhalten. Die Anteile der mit Eudialyt verwachsenen Phasen nehmen gleichmäßig zu Gunsten freien Eudialyts ab.



**Abbildung 41: Verwachsungsverhältnisse von Eudialyt, Aegirin und Augit in Abhängigkeit von der Partikelgrößenklasse für das Material aus Versuchsreihe NK1**

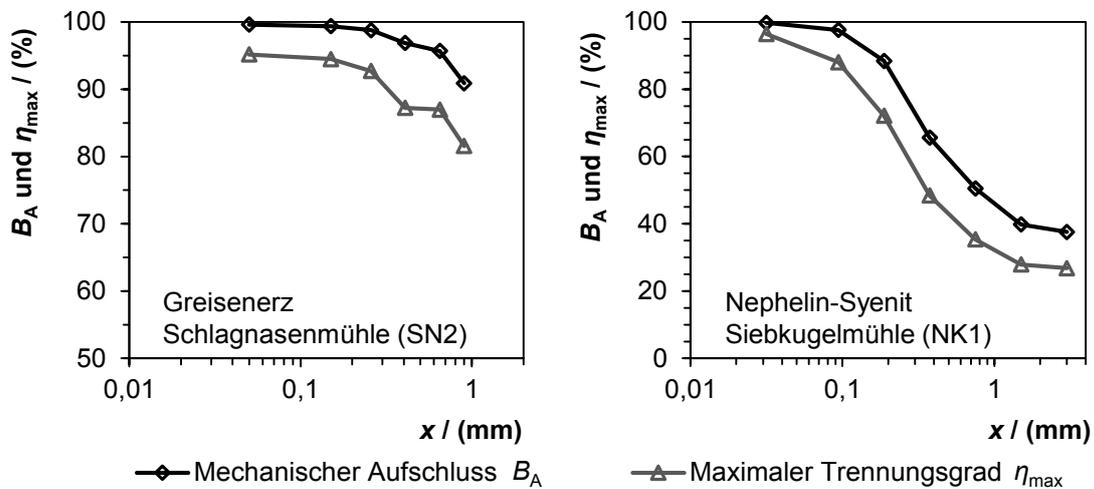
Ein anderes Bild ergibt sich für Aegirin und Augit. Die Bindungen von Aegirin an Eudialyt und den als Andere ausgewiesenen Phasen werden schon bei größeren Partikelgrößen aufgebrochen als vergleichsweise zur aluminiumreichen Aegirinphase. Diese ist stärker und feiner mit Aegirin verwachsen. Ein ähnliches Bild ergibt sich für Augit. Dieser weist eine geringere Bindung mit Aegirin und Aegirin-Al sowie den als Andere ausgewiesenen Phasen auf. Zu Eudialyt bestehen hingegen relativ konstante Verwachsungsverhältnisse bis hinab in den zweistelligen Mikrometerbereich. Augit liegt daher schon unterhalb von  $0,125\ \mu\text{m}$  nicht mehr in Verwachsung mit Aegirin vor.

### Zusammenhang Aufschlussersfolgzahl und maximaler Trennungsgrad

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, besteht ein Zusammenhang zwischen der Aufschlussersfolgzahl und dem arithmetischen Integralmittelwert des Trennungsgrades (Gleichung (21)). Es liegt nahe, dass ebenso ein Zusammenhang zwischen der Aufschlussersfolgzahl und dem maximalen Trennungsgrad nach der Verwachsungsver-

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

teilung besteht. Zur Darstellung des Zusammenhanges sind in Abbildung 42 die Aufschlussersfolgzahl und der maximale Trennungsgrad beispielhaft anhand einer Versuchsreihe jedes Erzsystems aufgetragen.



**Abbildung 42: Vergleich der Aufschlussersfolgzahl  $B_A$  und des theoretisch maximalen Trennungsgrades  $\eta_{\max}$  für beide untersuchte Erzsysteme**

Der synchrone Verlauf beider Parameter ist dabei offensichtlich. Eine mathematische Herleitung des Zusammenhangs kann an dieser Stelle nicht geliefert werden, da der Wert des Integrals zwischen den Grenzen 0 und 100 % nicht an die Lage des Maximums der Verwachsungskurve gebunden ist. Vielmehr muss eine verbale Begründung genügen, dass beiden Kennwerten die gleiche Verwachsungskurve in unterschiedlichen Darstellungsweisen zu Grunde liegt. Geht man davon aus, dass sich das Aufschlussverhalten des Materials bei Verringerung der Partikelgröße nicht ändert, man die Verwachsungsverteilung also über den gleichen Typ einer mathematischen Funktion beschreiben kann, so ändert sich auch nichts am Verhältnis des Aufschlussersfolgs zum maximalen Trennungsgrad. Aufschlussresultate können somit sowohl über den integralen Kennwert der Verwachsungsverteilung als auch über den Kennwert für den optimalen Trennschnitt bewertet werden.

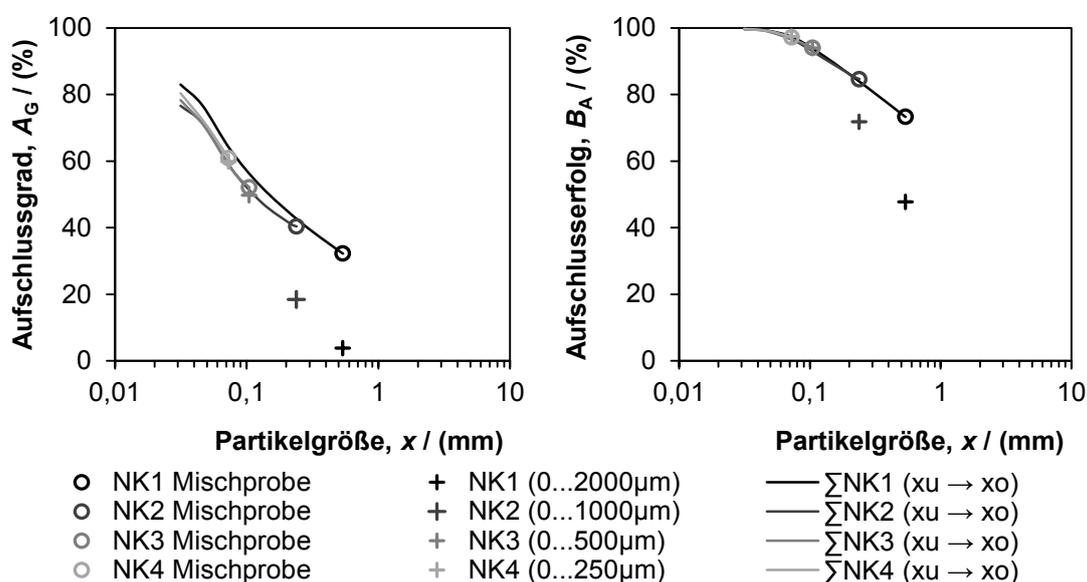
### Hinweise zur Ermittlung von Aufschluss- und Verwachsungsdaten

Damit aus Partikelpräparaten verwertbare Ergebnisse erhalten werden, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Hierzu zählt neben den in Abschnitt 2.1.5 erwähnten Anforderungen auch die Analyse von klassiertem Material an Stelle der Verwendung einer Gesamtprobe [80]. Das klassierte Material muss separat analysiert werden; die Kennwerte des Ausgangsmaterials ergeben sich aus der Verrechnung der Einzelergebnisse mit der Massenbilanz. Befolgt man diesen Grundsatz

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

nicht, können bei Material mit breiten Partikelgrößenverteilungen keine repräsentativen Ergebnisse gewonnen werden. Dieser Zusammenhang wurde beispielsweise von PETRUK [80] für die Ermittlung von Partikelgrößenverteilungen nachgewiesen. Auch für die Aufschlusskennwerte kann ein solches Verhalten gezeigt werden.

Abbildung 43 zeigt die oben beschriebenen Abweichungen anhand des Aufschlussgrades und der Aufschlussersfolgzahl über der Partikelgröße. In den Diagrammen repräsentieren die Kreuze die anhand einer Probe des Ausgangsmaterials gemessenen Kennwerte, die Kreise (Mischprobe) die durch Klassierung und Analyse der Größenklassen über die Massenbilanz errechneten Kennwerte und die Kurven den kumulativen Verlauf der Kennwerte beginnend bei der kleinsten Größenklasse.



**Abbildung 43: Effekt klassierten und nicht klassierten Probematerials auf das Ergebnis der Aufschlussanalyse am Beispiel des Nephelin-Syenits**

Wie den Diagrammen leicht zu entnehmen ist, besteht ein Unterschied zwischen den Kennwerten des klassierten und des nicht klassierten Materials. Sowohl der Aufschlussgrad als auch der Aufschlusskoeffizient zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Vorgehensweise zu ihrer Ermittlung. Je breiter der betrachtete Größenbereich ist, desto größer sind die Unterschiede in den Kennwerten. Dies bedeutet im Umkehrschluss, je feiner die Gesamtprobe wird, desto größer ist die Übereinstimmung zwischen Kennwerten beider Vorgehensweisen. Betrachtet man den kumulativen Verlauf der Aufschlusskennwerte über der Partikelgröße, kann eine sehr gute Übereinstimmung mit den anhand der Analyse von Partikelgrößenklassen errechneten Kennwerten festgestellt werden. Auch dies deutet auf die verbesserte Genauigkeit eines solchen Vorgehens hin. Es ist zu beachten, dass man auch durch

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

Verringerung der Anzahl betrachteter Größenklassen zu einer besseren Übereinstimmung zwischen unterschiedlichen Vorgehensweisen der Ermittlung der Kennwerte gelangen kann, wobei das nicht mit einer verbesserten Genauigkeit gekoppelt ist.

Liegt bereits gut aufgeschlossenes Material vor und handelt es sich um einfache grob verwachsene Systeme, so scheint der Einfluss des Vorgehens zur Ermittlung der Aufschlusskennwerte weniger stark ausgeprägt zu sein. Das lassen die Ergebnisse der Untersuchungen am Greisenerz vermuten (siehe Abbildung 102 im Anhang). Hier muss jedoch einschränkend bemerkt werden, dass die zur Verfügung stehende Datenbasis nicht den gleichen Umfang aufweist wie die des Nephelinsyenits. Vor allem wurden keine Proben auf unterschiedliche Produktfeinheiten gemahlen, um den Effekt an Material verschiedener Größenordnungen beobachten zu können. Aus diesem Grund liegt nur eine Vergleichsgröße für dieses Erz vor.

### 4.2.3 Verwachsungskurven in Abhängigkeit vom Trennmerkmal

Wie bereits im Abschnitt 2.1.2 zum HALBICH-Diagramm beziehungsweise in Abschnitt 2.1.3 zu anderen Darstellungen der Verwachsungsverteilung erläutert, folgen diese, aufgestellt mit abnehmendem Wertstoffgehalt der Partikel (Klaubungskurve), definierten Verläufen. Wechselt man von der Darstellung mit abnehmendem Wertstoffgehalt auf Darstellungen mit abnehmendem Wert des Trennmerkmals, so sind Besonderheiten der Kurven zu beachten.

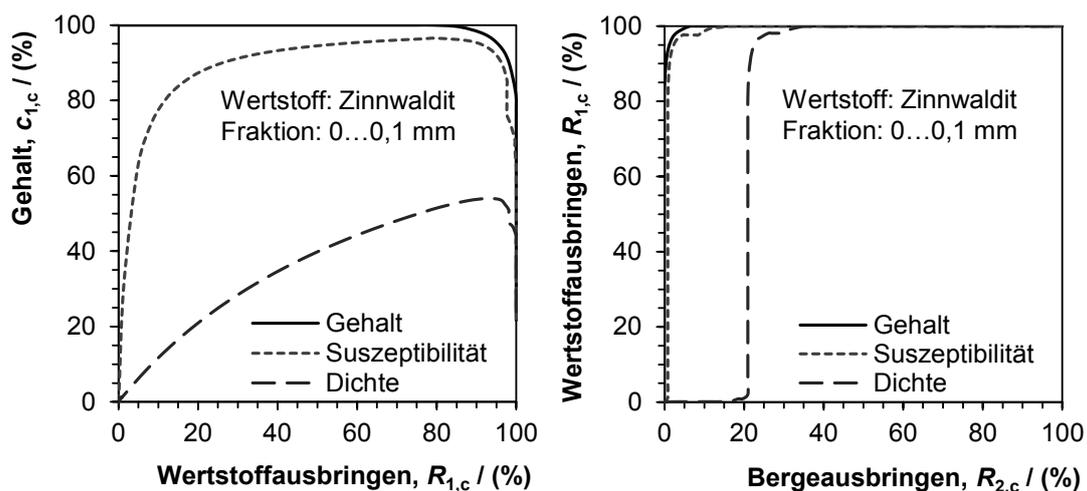


Abbildung 44: Darstellung der Grenzkurven nach unterschiedlichen Merkmalen im HALBICH-Diagramm (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Partikelgrößenklasse 0...0,1 mm des Greisenerzes. Den Wertstoff stellt das Mineral Zinnwaldit dar.

Zum Veranschaulichen dieser Besonderheiten sind in der Abbildung 44 ein HALBICH- (links) und ein FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Größenklasse

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

0...0,1 mm des Greisenerzes nach unterschiedlichen Merkmalen aufgestellt. Wie leicht zu erkennen ist, unterscheiden sich die Kurven nach unterschiedlichem Merkmal voneinander. Wechselt man vom Merkmal Gehalt auf das Merkmal Suszeptibilität oder Dichte, so beginnt das Aufstellen der Kurven beim Partikel mit größter Magnetisierbarkeit beziehungsweise mit größter Dichte und verläuft mit abnehmendem Wert des Partikelmerkmals. Abweichungen zwischen der Klaubungskurve und den Kurven nach anderen Merkmalen können daher auf verschiedene Effekte zurückgeführt werden.

1. Ein nicht als Wertstoff definierter Bestandteil des Erzes, welcher nur einen geringen Anteil des Materials ausmacht, weist einen größeren Wert des Trennmerkmals als der Wertstoff selbst auf (Beispiel Limonit im Greisenerz, vergleiche Tabelle 24 im Anhang). Es werden erst die Bestandteile mit dem größten Merkmalwert ausgetragen, wodurch völlig wertstofffreies Material ( $c_{1,p} = 0$ ) in das Konzentrat gelangt ( $c_{1,c} = 0$ ,  $R_{1,c} = 0$ ,  $R_{2,c} > 0$ ). Sobald das Austragen des Wertstoffes beginnt, steigt der Gehalt im Konzentrat an ( $c_{1,c} > 0$ ,  $R_{1,c} > 0$ ). Die Lage des Maximums vom Konzentratgehalt (HALBICH-Diagramm, Abbildung 44 links) kann bei Systemen mit mehr als zwei Komponenten unterschiedlichen Merkmalwertes nicht mehr vorausgesagt werden. Es ist vom Unterschied im Merkmalwert, vom Gehalt der Bergephase größeren Merkmalwertes und der Verwachsung der wertstofffreien Phase größeren Merkmalwertes mit den anderen Bergephasen abhängig (siehe beispielsweise Suszeptibilität von Kompositpartikeln nach Gleichung (62) und (63)). Nach Durchlaufen des Maximums geht die Kurve im HALBICH-Diagramm in den bekannten fallenden Verlauf über.

2. Tritt ein Bergemineral mittleren Merkmalwertes auf (Beispielsweise Muskovit im Greisenerz), so gibt es einen weiteren Bereich mit Abweichungen von der Klaubungskurve. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass der Austrag dieser frei vorliegenden Bergephase beginnt. Der Konzentratgehalt wird folglich verringert, wobei auch kein Wertstoff ausgetragen wird (siehe Kurvenverlauf bei  $R_{1,c} > 95\%$ ).

3. Wird für die Berechnung der Verwachsungskurve ein ungeeignetes Trennmerkmal herangezogen, beziehungsweise liegt eine Bergephase mit größerem Merkmalwert im nennenswerten Anteil der Gesamtmasse vor, so liegt die auf dieser Basis ermittelte Kurve weit von der Klaubungskurve entfernt. Eine vergleichsweise flache Kurve im HALBICH-Diagramm und eine teilweise auf der Abszisse verlaufende Kurve

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

im FUERSTENAU-2-Diagramm sind die Folge (vergleiche Kurven nach Merkmal Dichte in Abbildung 44).

Aus den oben dargelegten Punkten können verschiedene Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die Kurve nach dem Wertstoffgehalt der Partikel stellt unabhängig vom anzuwendenden Trennverfahren die absolute theoretische Grenze für anreichernde Prozesse dar und kann nicht überschritten werden (vergleiche auch Abschnitt 2.3.4). Erfüllt ein zerkleinertes Material nach dieser Kurve nicht die zu erreichenden Produktanforderungen, ist ein Aufmahlen zu geringeren Partikelgrößen erforderlich.

2. Darüber hinaus muss beim Erfüllen der Produktanforderung nach der Klaubungskurve auch geprüft werden, ob bei der Trennung nach dem auszunutzenden Merkmal die Anforderungen an das Produkt erfüllt werden. Andernfalls ist selbst mit dem bestmöglich arbeitenden Sortierapparat das Erzeugen des geforderten Produktes nicht möglich.

3. Der Abstand zwischen der Klaubungskurve und der Verwachsungskurve nach dem Trennmerkmal kann zur Beurteilung der Eignung des Merkmals zur Anreicherung der Zielkomponente genutzt werden. Zu diesem Zweck kann die Trennerfolgsszahl  $B_T$  für verschiedene Merkmale berechnet und verglichen werden.

Sofern der Wertstoff nicht über ein Trennmerkmal direkt in ein Konzentrat angereichert werden kann, erfordert dies das Planen mehrerer Sortier- oder Trennstufen. Das Zerlegen eines Produktes in verschiedene Teilströme wird rechnerisch über Prozessmodelle realisiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht weiter auf Prozessmodellierung eingegangen, sodass an dieser Stelle auf die Literatur zu diesem Thema, beispielsweise KING [193] verwiesen werden muss.

### Gruppierung von Komponenten nach dem Trennmerkmal

Wie in den Beispielen zum Verlauf der Kurven erläutert, treten je nach gewählten Merkmal und dessen Verteilung über die im Material vertretenen Phasen Abweichungen zur Klaubungskurve und zu theoretischen Verläufen (ideale Trennung und ideale Teilung) auf. Besonders Abweichungen aufgrund von als Berge definierter Minerale mit größerem Merkmalwert als der anzureichernde Wertstoff, verursachen Probleme in der Auswertung über die vorgeschlagene Methode der Erfolgskennzahlen.

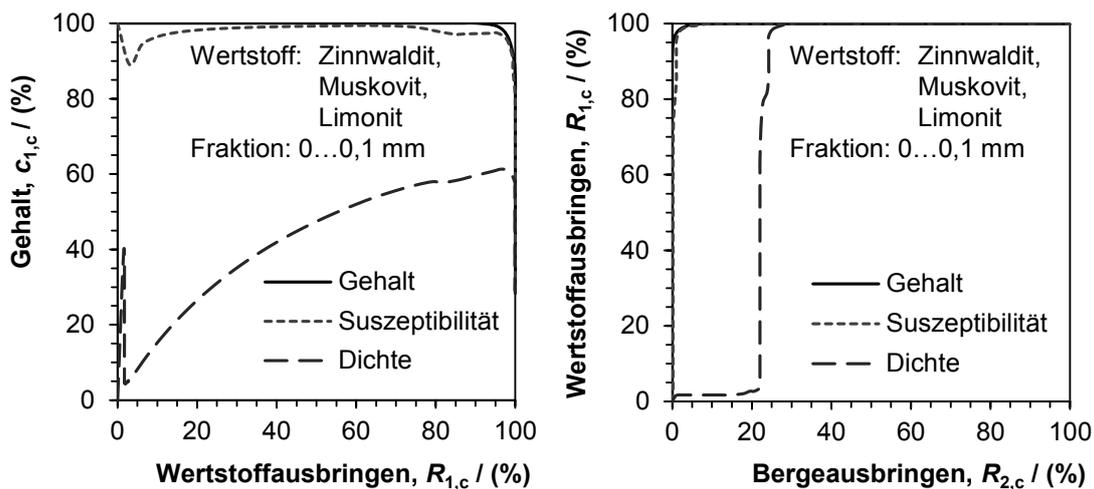
## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

Verläuft die Verwachsungskurve nach dem Merkmal für einen Teil auf der Abszisse, so liegt sie unterhalb der Kurve für die ideale Teilung, und es entsteht ein Fehler in der Berechnung der Erfolgsflächen (vergleiche Abbildung 44 rechts und Abbildung 45 rechts). Um diesen Fehler zu vermeiden, ist eine Gruppierung aller Komponenten, die ein deutlich ausgeprägtes Trennmerkmal aufweisen, ratsam (siehe Abbildung 45). Beispielsweise kann man bei Magnetscheidungen alle Minerale mit großer Suszeptibilität zu einer Gruppe magnetischer Minerale, oder bei Dichtesortierung alle Minerale großer Dichte zu einer Gruppe Schwerminerale zusammenfassen. Hierdurch verschwindet das Problem, dass die Verwachsungskurve abschnittsweise unterhalb der Kurve für die ideale Teilung verläuft.

Am Beispiel des Limonits im Greisenerz soll dies noch einmal genauer erklärt werden. Limonit weist eine deutlich größere Suszeptibilität als der Wertstoff Zinnwaldit auf (vergleiche Tabelle 28 im Anhang). Daher werden Limonit-haltige Partikel bei einer Trennung mit abnehmender Suszeptibilität zu großen Teilen vor den Zinnwaldit-haltigen Partikeln in das Konzentrat ausgetragen. Erst wenn Zinnwaldit in das Konzentrat ausgetragen wird, steigen Gehalt und Ausbringen im HALBICH-Diagramm (Abbildung 44 links). Wird Limonit im Sinne der Magnetscheidung mit Zinnwaldit und Muskovit zu einer Gruppe zusammengefasst, so wird beim Austragen der Limonit-haltigen Partikel bereits Wertstoff ausgetragen (siehe Abbildung 45 links). Die Kurve erzeugt mit abnehmender Suszeptibilität beginnt folglich bei einem Gehalt von 100 % (freier Limonit) und durchläuft ein lokales Minimum aufgrund von mit Limonit verwachsenen Bergemineralen, ehe sie durch das Austragen Zinnwaldit-haltiger Partikel erneut zu steigen beginnt. Für die Darstellung der Verwachsungskurve nach der Suszeptibilität der Partikel im FUERSTENAU-2-Diagramm bedeutet dies, dass diese nicht mehr unterhalb der Grenzkurve der idealen Teilung verläuft (Abbildung 45 rechts).

Das vorgeschlagene Vorgehen ist einfach zu begründen: Der Trennprozess unterscheidet nicht nach Wertstoff oder Berge, sondern beispielsweise im Falle der Magnetscheidung vereinfacht dargestellt in Suszeptibilität größer oder kleiner als die Trennsuszeptibilität. Liegen neben dem Wertmineral noch weitere Minerale mit ausgeprägten, zur Trennung herangezogenen Merkmalwerten vor, müssen diese als eine gemeinsame Gruppe betrachtet werden. Andernfalls führt die Interpretation der ermittelten Kurven zu falschen Schlussfolgerungen.

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen



**Abbildung 45:** Darstellung der Grenzkurven nach unterschiedlichen Merkmalen im HALBICH-Diagramm (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Partikelgrößenklasse 0...0,1 mm des Greisenerzes. Den Wertstoff stellen alle Minerale nennenswerten Magnetismus dar.

Eine Gruppierung nach dem Trennmerkmal verursacht jedoch andere Effekte, die an dieser Stelle diskutiert werden müssen.

1. Je nach Verteilung des Trennmerkmals über die im Erz vorhandenen und gemeinsam als Wertstoff zu gruppierenden Minerale können Partikel auftreten, die aus verschiedenen Phasen aufgebaut sind, 100 % Wertstoff entsprechen, aber trotzdem eine geringere Suszeptibilität als nicht 100 % wertstoffhaltige Partikel aufweisen. Dies kann vor allem dann im größeren Maße vorkommen, wenn ein Mineral stark ausgeprägten Trennmerkmals mit Bergemineralen verwachsen ist (siehe hierfür Formel (62) und (63)).

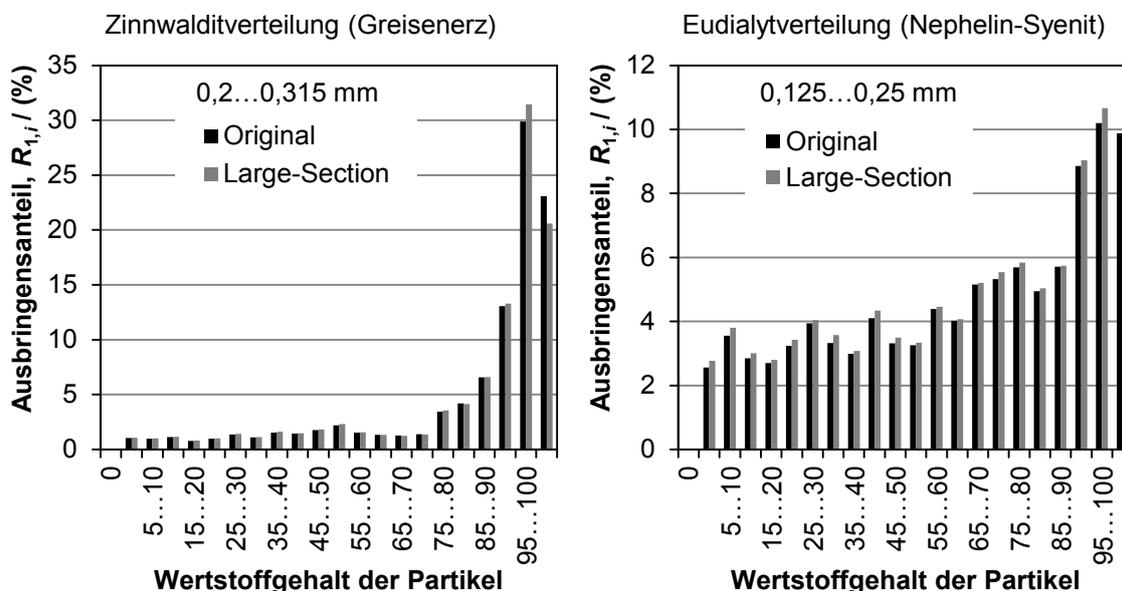
2. Die auf der Basis gruppierter Minerale errechneten Erfolgskennzahlen müssen nicht zwingend größere Werte annehmen als die für die Berechnung nach dem reinen Wertmineral. Im Bereich geringer Partikelgrößen, das heißt bei gut aufgeschlossenem Material, übersteigen die für Mineralgruppen nach dem Trennmerkmal berechneten Kennzahlen jene für das reine Wertmineral. Kommt man in Größenbereiche mit zunehmendem Anteil von mehrphasig aufgebauten, das heißt verwachsenen Partikeln, so kehrt sich der Effekt um. Nun übersteigen die Kennzahlen des Wertminerals jene für Mineralgruppen. Dies gilt besonders dann, wenn die zu einer Klasse gruppierten Minerale nicht miteinander sondern vor allem mit den Bergemineralen verwachsen sind.

### 4.2.4 Stereologische Transformation

Um den Einfluss stereologischer Effekte abschätzen zu können, wurde an ausgewählten Proben eine Transformation nach der Methode der Eliminierung offensicht-

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

lich zu kleiner Partikel durchgeführt (siehe hierzu 2.1.6). In Anlehnung an die Siebklassierung zum Erstellen der Partikelgrößenklassen wurde als Partikelgrößenkennwert der MLA die Länge eines umhüllenden Rechtecks (length (MBR)) gewählt. Die Trennkorngröße ist bei Siebung mit Drahtgewebe kleiner als die Maschenweite, sodass als Kriterium für einen falsch angeschliffenen Partikel eine Partikelgröße von kleiner 90 % der Maschenweite des unteren Siebschnitts angesetzt wurde. Im Feingut existiert kein unterer Siebschnitt, daher konnte für die feinste Fraktion auf diese Weise keine Transformation durchgeführt werden. Die entsprechenden Grenzpartikelgrößen, bei derer Unterschreiten ein Partikel nicht mehr in der Probe berücksichtigt wird, sind in der Tabelle 62 (Anhang H) dargestellt. Beispiele für Partikelgrößenverteilungen transformierter und nicht transformierter Proben finden sich in Abbildung 119 (Anhang H).



**Abbildung 46: Darstellung der nicht transformierten und der transformierten Verteilung des Wertminerals für das Greisenerz (links) und das Nephelin-Syenit-Erz (rechts)**

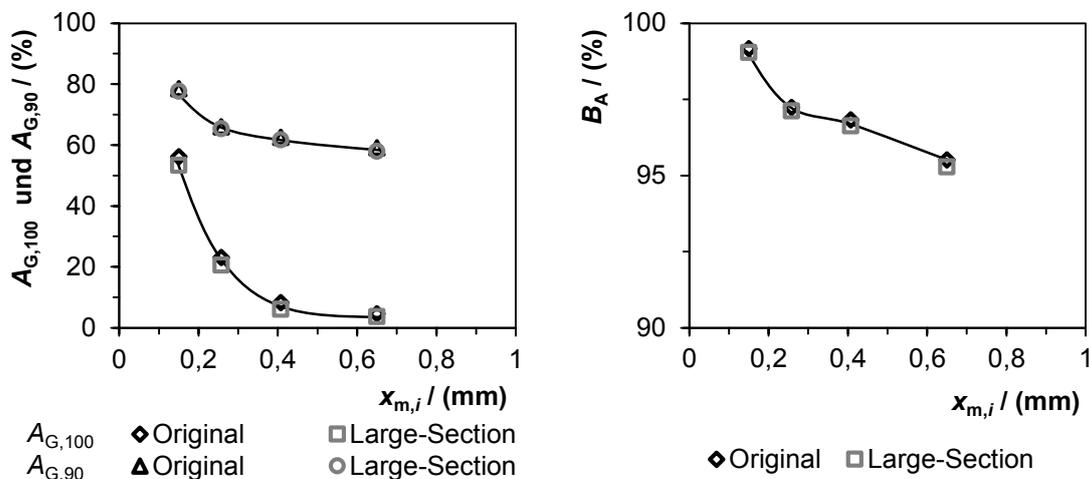
Transformationen (Large-Section) wurden an den Partikelgrößenklassen jeweils einer Versuchsreihe jedes Erzsystems durchgeführt. Im Falle des Greisenerzes wurde die Versuchsreihe der Mahlung auf kleiner 0,9 mm in der Siebkugelmühle, im Falle des Nephelin-Syenits die Versuchsreihe zur Mahlung auf kleiner 2,0 mm ausgewählt. Exemplarisch sind die Mineralverteilungen einer Größenklasse über den Verwachsungsklassen (5 %-Stufen) jedes Erzsystems in der Abbildung 46 nebeneinander abgebildet. Der Wertstoffe des grobkörnigen Greisenerzes liegt in der dargestellten Fraktion recht gut aufgeschlossen vor, sodass der Hauptteil des Zinnwaldits auf Klassen mit großem Wertstoffgehalt am Partikel verteilt ist. Der Eudialyt

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

im feinkörnigen Nephelin-Syenit ist in der dargestellten Größenklasse noch recht stark verwachsen, wodurch dieser in ähnlichen Anteilen über alle Verwachsungsklassen verteilt vorliegt.

Eine Reduzierung der Proben um offensichtlich zu klein gemessene, weil nicht zentrisch angeschliffene Partikel, führt zu einer deutlichen Verminderung des Anteils frei vorliegenden Wertstoffs. Beim einfach aufgebauten und gut aufgeschlossenen Greisenerz verläuft diese Verschiebung im Wesentlichen zu Gunsten der Klassen hohen Wertstoffgehalts (vergleiche Abbildung 46 links). Beim schlechter aufgeschlossenen und feinkörnig verwachsenen Nephelin-Syenit verschieben sich die Anteile über die gesamte Breite der Verwachsungsverteilung (Abbildung 46 rechts). Aufgrund dieses Unterschiedes in der Auswirkung der Transformation auf die Verwachsungsverteilung sind Unterschiede in den Aufschlusskennwerten zu erwarten.

Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass der Übersichtlichkeit halber lediglich die Verwachsungsverteilungen des entsprechenden Wertminerals dargestellt sind. Der stereologische Effekt betrifft alle Phasen der Erzsysteeme, sodass dieselben Effekte bei jedem Mineral beobachtet werden können.

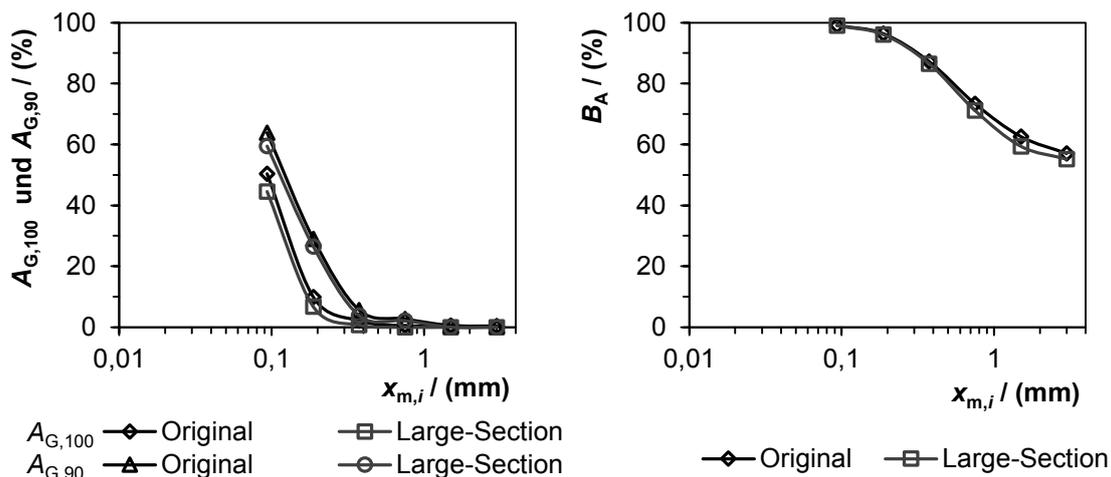


**Abbildung 47: Stereologischer Einfluss auf die Aufschlusskennwerte für Zinnwaldit im Greisenerz (Produkt der Kugelmühle)**

Auf Basis der transformierten Aufschlussdaten wurden Aufschlusskennwerte berechnet und den Kennwerten der nicht transformierten Ausgangsdatenbasis gegenübergestellt. Für das Greisenerz sind diese Kennwertgegenüberstellungen in Abbildung 47, für das Nephelin-Syenit-Erz in Abbildung 48 dargestellt. Vergleicht man die Verläufe der Kennzahlen des Greisenerzes, ist besonders beim Aufschlussgrad bei der Definition freier Partikel mit 100 % Partikelgehalt ein Unterschied zwischen transformierten und nicht transformierten Daten auszumachen. Aufgrund

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

der vorliegenden Verwachsungsverteilung, wonach der Wertstoff im Wesentlichen auf Partikel eines Gehalts von  $\geq 90\%$  verteilt ist, ist nahezu keine Änderung des Aufschlussgrades für  $c_{\text{frei}} = 90\%$  zu erkennen. Ähnlich robust zeigt sich die Aufschlusserfolgsszahl, deren Unterschiede zwischen Originaldaten und denen aus der Transformation sehr gering ausfallen. Der Grund liegt im geringen Einfluss auf die Verwachsungsverteilungen, da sich die Verschiebungen auf den Bereich gering verwachsener Partikel beschränken (vergleiche hierzu auch Abbildung 120 im Anhang).



**Abbildung 48: Stereologischer Einfluss auf die Aufschlusskennwerte für Eudialyt im Nephelin-Syenit (Reihe NK1)**

Im Fall des Nephelin-Syenits macht sich der stereologische Fehler etwas deutlicher in den Kennwerten bemerkbar (Abbildung 48). Da sich die Verschiebung der Ausbringensanteile des Wertstoffes durch die Transformation auf alle Verwachsungsklassen auswirkt, zeigen sowohl die Aufschlussgrade unterschiedlicher Definition als auch die Aufschlusserfolgsszahl einen Unterschied zwischen den transformierten und den nicht transformierten Datensätzen (siehe hierzu auch beispielhaft die Verwachsungskurven in Abbildung 121 im Anhang).

Deutlicher wird dies in der Darstellung der relativen Abweichung, das heißt der Differenz beider Kennwerte bezogen auf den Kennwert der nicht transformierten Datenbasis (Abbildung 49). Hier tritt klar hervor, dass beim Greisenerz im Wesentlichen der Aufschlussgrad stereologisch beeinflusst ist, wo hingegen alle Kennwerte des Nephelin-Syenits merkliche Abweichungen aufzeigen. Auch in diesem Fall stellt sich die Aufschlusserfolgsszahl als relativ robust heraus. Zum Vergleich können die in den Tabellen 63 und 64 (Anhang H) zusammengefassten Kennwerte der Original- und der transformierten Daten sowie deren relative Abweichung herangezogen werden.

## 4.2 Aufschluss und Verwachsungsverteilungen

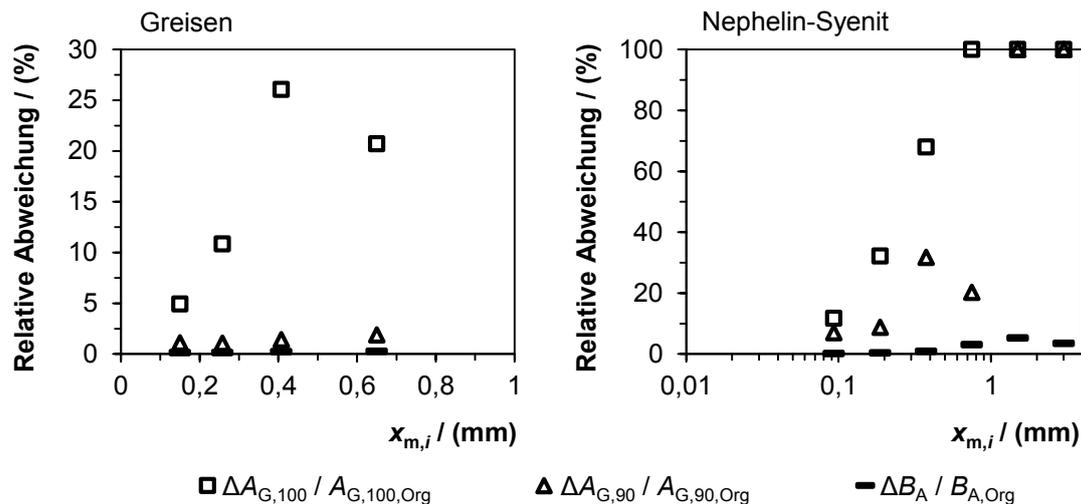


Abbildung 49: Vergleich der relativen Kennwertabweichung für den Zinnwalder Greisen (Kugelmöhlenprodukt) und den Nephelin-Syenit (Reihe NK1)

Allgemein ist festzustellen, dass mit Verringerung der Partikelgröße, das heißt mit Verbesserung des Aufschlusszustandes, die relativen Abweichungen kleiner werden. Demnach verringert sich der stereologische Fehler. Relative Abweichungen sind abhängig zum Bezugswert. Die großen Werte der Abweichungen der Aufschlussgrade beim Nephelin-Syenit sind daher zum Teil den sehr geringen Aufschlusswerten im Material und dem Verschwinden von Partikeln hohen Wertstoffgehalts geschuldet (vergleiche Abbildung 48).

Bei einer Transformation durch Eliminierung aller offensichtlich zu klein gemessenen Partikel ist zu berücksichtigen, dass hierdurch nur die wirklich stark beeinflussenden Partikel entfernt werden. In einer Verteilung weisen hingegen alle Partikel einen mehr oder weniger stark ausgeprägten stereologischen Fehler auf, wonach angenommen alle Partikel mit einer geeigneten Methode transformiert werden müssen [9]. Darüber hinaus kann diese Methode nur an klassierten Proben eingesetzt werden, weil nur diese eine Definition einer unteren Partikelgröße zulassen. In der Literatur wird beschrieben, dass die Methode der Eliminierung zu kleiner Partikel sehr gute Ergebnisse im Vergleich zu anderen Transformationsmethoden liefert [96, 109]. Hieraus wird geschlossen, dass die so gewonnenen Erkenntnisse zur Abschätzung des stereologischen Einflusses auf die Verwachsungskurven und -kennwerte völlig ausreichend sind.

Basierend auf den Erkenntnissen aus der stereologischen Transformation der Aufschlussanalysen einer Versuchsreihe jedes Erzsysteams wurde entschieden, die Betrachtungen an den Originaldaten ohne Transformation durchzuführen.

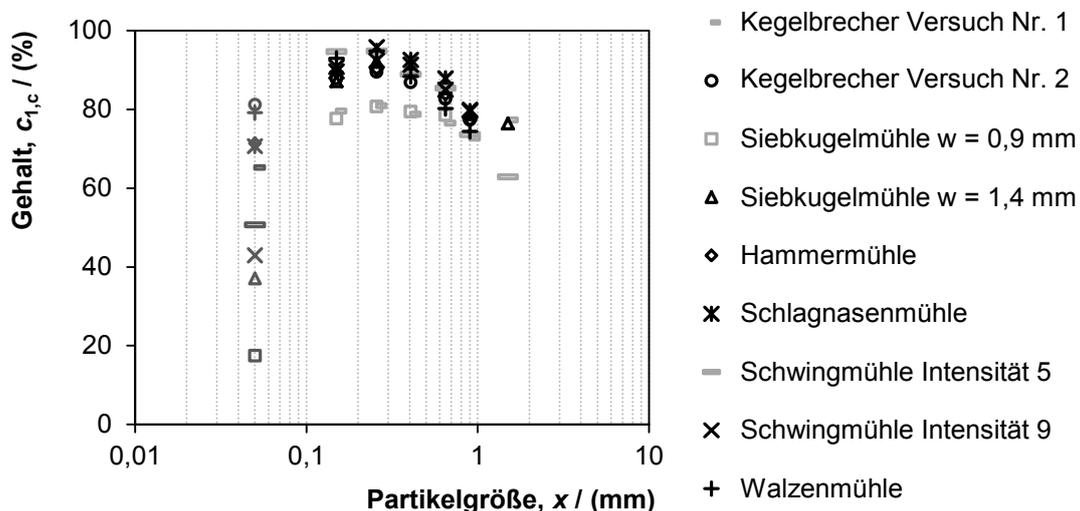
## 4.3 Sortierergebnisse

### 4.3 Sortierergebnisse

Das folgende Unterkapitel stellt die Ergebnisse der Sortierversuche beider Erzsyste-  
me dar. Hierbei wird zuerst auf die Beurteilung von Sortierergebnissen nach her-  
kömmlichen Kennwerten wie Gehalt und Ausbringen sowie dem Trennungsgrad ein-  
gegangen. Darauf folgend werden die Ergebnisse in Anreicherungsdiagrammen dar-  
gestellt und über Anpassungsfunktionen beschrieben. Weiterhin folgt eine Beschrei-  
bung der Ergebnisse einzelner Versuchsreihen über Trennfunktionen, welche auf  
Basis von Aufschlussanalysen der Trennprodukte unter Einbeziehung ermittelter  
Mineralsuszeptibilitäten errechnet wurden. Das Unterkapitel schließt mit der  
Darstellung und Diskussion der neu definierten Trennerfolgzahl und weiterer  
Trennungskennzahlen.

#### 4.3.1 Sortierkennwerte

Die Ergebnisse der Anreicherung werden in diesem Abschnitt in üblicher Form  
dargestellt. Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, werden die Kennwerte Gehalt und Aus-  
bringen zur Bewertung des Sortierergebnisses herangezogen. Diese Größen können  
entweder gegen die Partikelgröße oder gegeneinander dargestellt werden. Eine  
weitere übliche Kennzahl stellt der Trennungsgrad dar, welcher im Folgenden auch  
mit betrachtet wird.



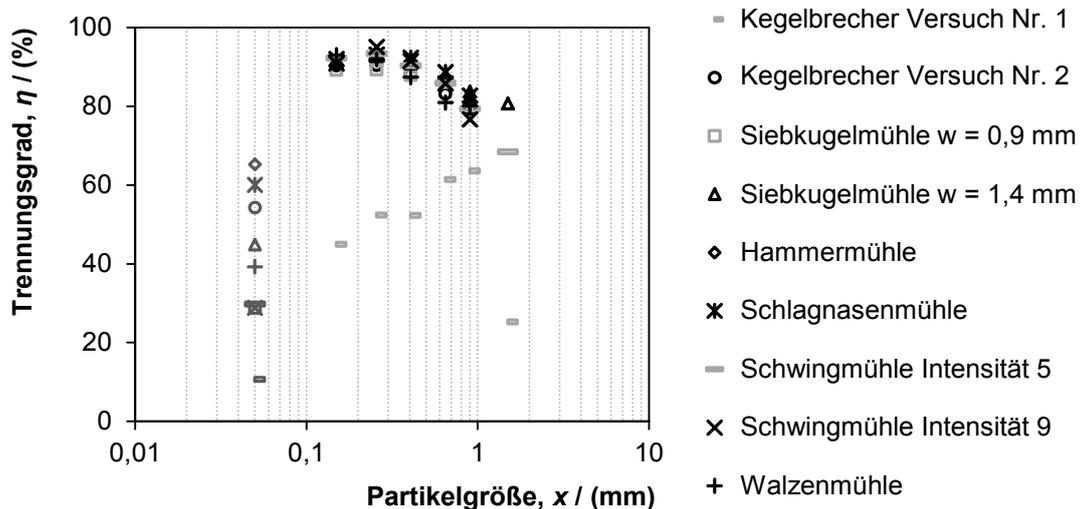
**Abbildung 50: Wertstoffgehalt im Konzentrat in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte**

Der Verlauf des Wertstoffgehalts im Konzentrat nimmt für alle durchgeführten Ver-  
suche einen charakteristischen Verlauf gegen die Partikelgröße an (siehe Abbildung  
50). Mit abnehmender Partikelgröße nimmt der Konzentratgehalt zu, da immer  
besser aufgeschlossenes Gut vorliegt. Im Bereich von 0,1 bis 0,5 mm Partikelgröße

### 4.3 Sortierergebnisse

erreicht der Gehalt sein Maximum, eher er zu sehr feinen Körnungen  $-0,1$  mm (dunkelgrau) stark abnimmt. Diese Abnahme ist durch ein verändertes Verhältnis von Wechselwirkungskräften zur Schwerkraft verursacht, welches ein Aneinanderhaften von Wertstoff- und Bergepartikeln zur Folge hat und eine selektive Trennung verhindert. Darüber hinaus ist zu beachten, dass alle Sortierversuche bei gleichen Maschinenparametern des Band-Ring-Scheiders (Spaltweite, Stromstärke) durchgeführt wurden. Eine Anpassung der Spaltweite an die zu verarbeitende Partikelgröße erfolgte nicht. Durch solch eine Anpassung kann der Gehalt im Konzentrat beispielsweise der Partikelgrößenklasse  $0,1 \dots 0,2$  mm noch gesteigert werden.

Trägt man den Trennungsgrad über der Partikelgröße auf (siehe Abbildung 51), so kann man bereits einen ersten Unterschied zwischen verschiedenen Versuchsreihen erkennen. Im Trennungsgrad findet nicht der erreichte Konzentratgehalt Berücksichtigung, sondern ebenso die Massenbilanz und dadurch das Ausbringen im Konzentrat und den Bergen. Mit Ausnahme der Reihe KB #1 nehmen alle Versuchsreihen einen ähnlichen Verlauf wie bei der Darstellung des Gehaltes gegen die Partikelgröße an. Die Versuchsreihe KB #1 erreichte zwar ähnlich gute Konzentratgehalte wie alle anderen Versuchsreihen (vergleiche Abbildung 50), das Ausbringen des Wertstoffes ist jedoch deutlich geringer (siehe auch Tabelle 42 bis 53). Hierdurch errechnen sich geringere Trennungsgrade als für die anderen Versuchsreihen.

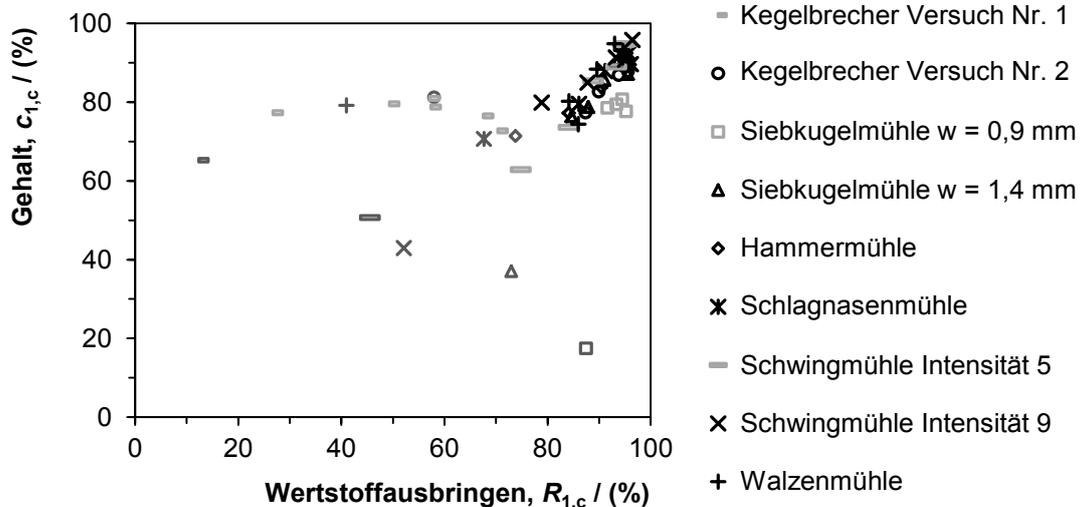


**Abbildung 51: Trennungsgrad in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte**

Betrachtet man die Daten in einer Auftragung des Wertstoffgehalts gegen das Wertstoffausbringen (Abbildung 52), so liegen viele Versuchspunkte im Bereich hoher Gehalte und gleichzeitig hoher Ausbringenswerte. Neben den Punkten der

### 4.3 Sortierergergebnisse

Reihe KB #1 und den Punkten der schlecht zu sortierenden Feinfraktionen fallen in dieser Darstellung auch mehrere niedrige Werte der Reihe SM i5 ins Auge.

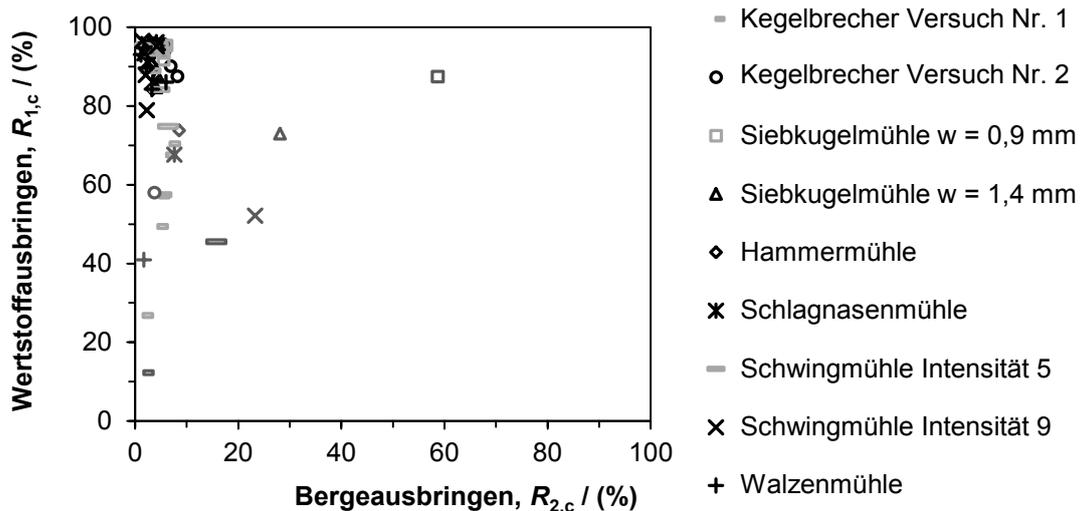


**Abbildung 52: Wertstoffgehalt im Konzentrat in Abhängigkeit des Wertstoffausbringens für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte**

Eine Begründung für die schlechteren Ergebnisse der Reihe SM i5 zu liefern fällt schwer. Es ist damit zu rechnen, dass in einer Schwingmühle bei geringer Schwingintensität ein schlechterer Aufschluss erreicht werden kann, als beispielsweise in einer Walzenmühle. Den Beweis hierfür zu liefern, gelingt einerseits nur mithilfe einer Aufschlussanalyse und andererseits mit der Einbindung einer sich ergebenden Grenzkurve in das Diagramm, wie es beispielsweise von MILLER [55] für diese Art der Darstellung gemacht wurde.

Eine Einschränkung, die in der Verwendung des HALBICH-Diagramms liegt, ist die Abhängigkeit des Diagramms und eventueller Kurvenverläufe zum Aufgabegehalt der Proben (vergleiche Abschnitt 2.2.3 und Abbildung 3). Solange Versuchsdaten des gleichen Materials miteinander verglichen werden, fällt diese Abhängigkeit nicht ins Gewicht. Hat man es hingegen mit Schwankungen im Aufgabegehalt oder unterschiedlichen Proben zu tun, so ist die Verwendung von Anreicherdiagrammen gleicher Basis empfehlenswert. Im Fall der Sortierung der Größenklassen des Greisen-erzes liegen unterschiedliche Aufgabehalte aufgrund der Anreicherung des Wertstoffs in Abhängigkeit von der Partikelgröße vor (vergleiche die Abbildungen 35 und 89 bis 93).

### 4.3 Sortierergebnisse



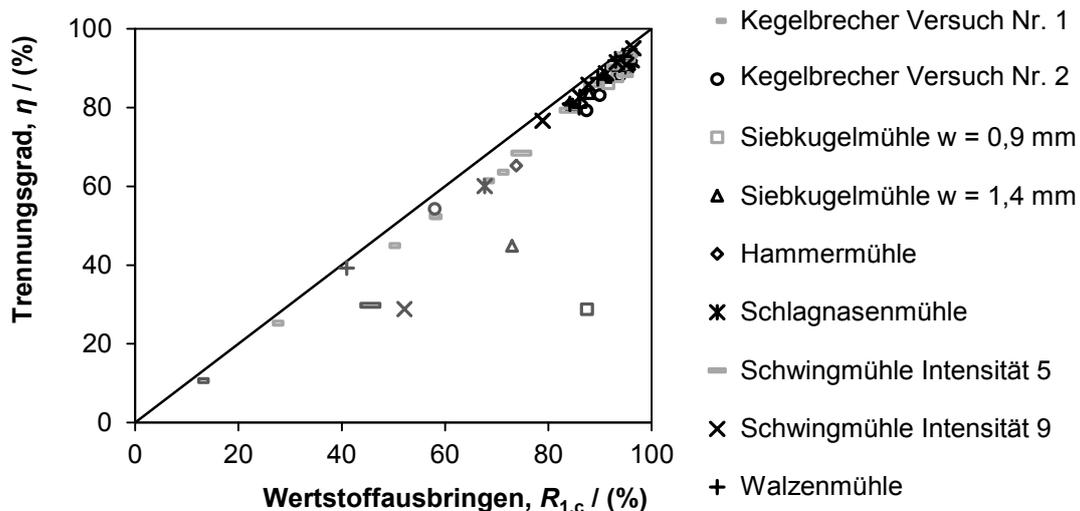
**Abbildung 53: Wertstoffausbringen in Abhängigkeit vom Bergausbringen für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte**

Durch die Darstellung der Sortierergebnisse im FURSTENAU-2-Diagramm verschwinden die Abhängigkeiten vom Aufgabengehalt, und eine Verschiebung der Ergebnispunkte zueinander kann beobachtet werden (Abbildung 53). Die schwarz eingefärbten Versuchspunkte rutschen enger zusammen und bilden nun eine kaum noch aufzulösende Punktwolke. Ebenso verschieben sich die Punkte der Sortierversuche des Kugelmühlenproduktes in diese Punktwolke hinein. Der Grund liegt in den geringeren Aufgabengehalten, die durch weniger stark ausgeprägte selektive Zerkleinerungs- und Aufschlusseffekte verursacht sind (vergleiche Abbildung 90 im Anhang). Die Anreicherung des Zinnwaldits kann über die Magnetscheidung am Band-Ring-Scheider sehr gut umgesetzt werden. Die Unterschiede der Versuchsreihen sind daher auf die vorliegenden Verwachsungsverhältnisse (siehe Abschnitt 4.2.2) und den Einfluss der Partikelgröße durch den nicht angepassten Spalt des Magnetscheiders zurückzuführen. Den Einfluss der Partikelgröße kann man durch den Einsatz klassierter Proben untersuchen. Zur Charakterisierung der Aufschlusseffekte sind hingegen Aufschlussanalysen des Aufgabematerials und ein Vergleich mit den Sortierergebnissen erforderlich. Die Verwachsungskurven oder ein Kennwert müssten als theoretische Grenzfälle in die Beurteilung mit einbezogen werden.

Ein Kennwert, der als Grenzwert, basierend auf der Verwachsungsverteilung, für Vergleiche zu Sortierergebnissen herangezogen werden kann, ist der maximale Trennungsgrad (siehe Abschnitt 2.3.1) [20]. Dieser maximale Trennungsgrad liegt an dem Punkt, ab dem beim Austragen mit abnehmendem Merkmalwert die in das

### 4.3 Sortierergebnisse

Produkt gelangenden Partikel in ihrer Zusammensetzung dem Aufgabehalt entsprechen. Hierfür müssen die Verwachsungskurven bei der Auftragung des Trennungsgrades über dem Wertstoffausbringen (Abbildung 54) ergänzt und ihr Maximum bestimmt werden. Durch den Vergleich des maximal möglichen Trennungsgrades, basierend auf der Verwachsungsverteilung, mit dem erreichten Trennungsgrad im Sortierversuch ist eine Bewertung des Trennschnittes in Bezug auf die vorliegenden Aufschlussverhältnisse möglich. Eine Diskussion dieses Vorgehens folgt im Abschnitt 4.4.2.



**Abbildung 54: Trennungsgrad in Abhängigkeit vom Wertstoffausbringen für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte**

#### 4.3.2 Anreicherungskurven

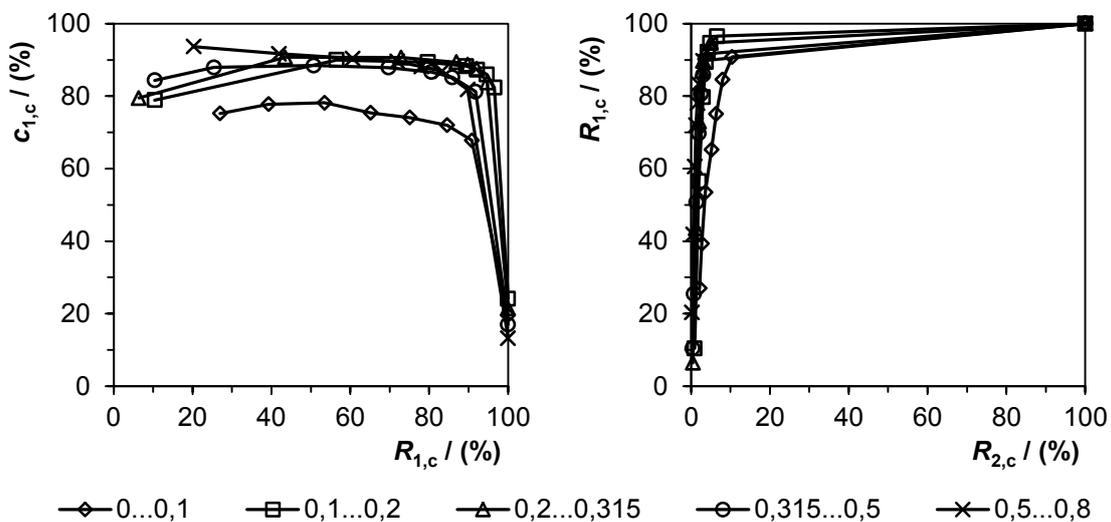
Im folgenden Abschnitt werden die Anreicherungskurven der Trennversuche in verschiedenen Diagrammen dargestellt. Hierbei kann im Rahmen dieser Arbeit nicht auf alle Darstellungsweisen eingegangen werden. Vielmehr wird sich auf die wichtigsten Formen beschränkt. Dazu gehören das HALBICH- und das FUERSTENAU-2-Diagramm sowie die Darstellung des Trennungsgrades über dem Wertstoffausbringen.

#### Greisenerz

Die Abbildung 55 zeigt die Anreicherungskurven verschiedener Partikelgrößenklassen des Greisenerzes im HALBICH- (links) und FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Zerlegung des Materials in Merkmalklassen mithilfe des Isodynamik-Scheiders. Betrachtet man die Verläufe der Kurven, so ähneln sich die der Partikelgrößenklassen recht stark. Die wichtigste Feststellung ist die, dass sich der zu erwartende

### 4.3 Sortierergebnisse

Trend einer besseren Anreicherungskurve bei verbessertem Aufschluss, das heißt bei geringerer Partikelgröße, einstellt. Lediglich die schlecht zu sortierende Feinstfraktion erreicht bei der Anreicherung erkennbar schlechtere Werte. Deutlich schlechter fallen die Werte dieser Feinstfraktion aus, wenn man die Anreicherungskurven des Band-Ring-Scheiders vergleicht (siehe Abbildung 104 im Anhang). Dies liegt einerseits an der nicht an die obere Partikelgröße angepassten Spaltweite des Band-Ring-Scheiders in Kombination mit Arbeitsweise (Aushebeprinzip), wodurch feine Partikel geringeren magnetischen Feldstärken ausgesetzt sind. Andererseits gewährleistet die vibrierende Schurre des Isodynamik-Scheiders eine bessere Vereinzelung der Partikel als sie im vergleichsweise am Band-Ring-Scheider erreicht wird.



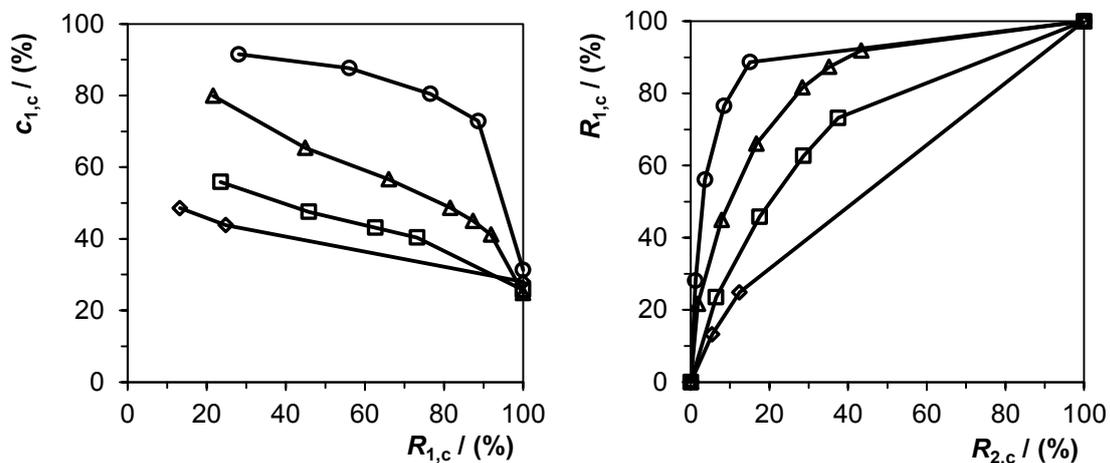
**Abbildung 55: HALBICH- (links) und FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Greisenerzes auf dem Isodynamik-Scheider**

Die gut zu sortierenden Größenklassen oberhalb von 0,1 mm erreichen sehr große Wertstoffgehalte bei hohem Wertstoffausbringen. Folglich verlaufen die Anreicherungskurven im FUERSTENAU-2-Diagramm zu großen Wertstoffausbringen bei geringem Bergeausbringen. Diese Kurven liegen nahe am theoretischen Optimum der idealen Trennung und Rückvermischung, wonach Verbesserungen nur noch geringfügig möglich erscheinen. Das gleiche Bild ergibt sich bei der Betrachtung des Trennungsgrades über dem Wertstoffausbringen (Abbildung 105 im Anhang). Die Kurven laufen sehr nahe am theoretischen Optimum, was bereits aus den Verläufen im FUERSTENAU-2-Diagramm ersichtlich wurde. Der sehr gute mechanische Aufschluss (siehe Abschnitt 4.2) und die günstige Verteilung des Sortiermerkmals (siehe Abschnitt 4.1), führen zu dieser besonders guten Trennbarkeit des Wertstoffs von den Begleitmineralen.

### 4.3 Sortierergebnisse

#### Nephelin-Syenit

Ein etwas anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Anreicherungskurven des Nephelin-Syenits (Abbildung 56 sowie Abbildung 112 und 113 im Anhang). Diese Kurven liegen deutlich weiter vom Optimum entfernt als vergleichsweise die des Greisenerzes. Aus den Verläufen der Anreicherungskurven für die Trennung mithilfe des Band-Ring-Scheiders ist ersichtlich, dass hohe Gehalte in Verbindung mit großen Ausbringenswerten erst bei der Fraktion NK2-6, das heißt bei Partikelgrößen unterhalb von 0,125 mm, zu erreichen sind. Vergleicht man dazu den Verlauf im FUERSTENAU-2-Diagramm (Abbildung 56 rechts), so kann man im Sinne einer Voranreicherung beispielsweise auch bei Partikelgrößen unterhalb von 0,25 mm trennen. Hierdurch lassen sich nennenswerte Anteile der Berge, bei vertretbaren Verlusten von Wertstoff, abtrennen.



NK2 —◇— 0,5...1,0 mm —□— 0,25...0,5 mm —△— 0,125...0,25 mm —○— 0,063...0,125 mm

**Abbildung 56: HALBICH- (links) und FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Nephelin-Syenits auf dem Band-Ring-Scheider**

Die großen Werte des Wertstoffausbringens bei vergleichsweise geringem Bergeausbringen sind durch das Aufschlussverhalten des Materials bedingt. Bevor nennenswerte Anteile des Wertstoffes aufgeschlossen vorliegen, wurden große Anteile freier Bergepartikel erzeugt (vergleiche Abschnitt 4.2.2), welche sich bei Voranreicherungen von den verwachsenen Wertstoffpartikeln trennen lassen. Ein direktes Gewinnen des Wertstoffes – in diesem Fall der magnetisierbaren Minerale – über trockene Magnetscheidung lässt sich unter den vorliegenden Verwachsungsverhältnissen nur schlecht realisieren. Soll Magnetscheidung zum Einsatz kommen, so muss man auf Techniken wie nass arbeitende Hochgradient-Scheider übergehen, die feinere Körnungen verarbeiten können.

### 4.3 Sortierergebnisse

Die Anreicherungskurven der Trennversuche lassen eine Bewertung der Trennbarkeit des Materials unter den vorliegenden Verhältnissen zu. Eine Beurteilung der Ergebnisse kann dabei auch unter Berücksichtigung der Aufschlussverhältnisse des Aufgabematerials erfolgen. Hierbei ist die Beurteilung auf eine beschreibende Art des Vergleiches beschränkt, ohne dass direkt vergleichbare Parameter beider Teilprozesse herangezogen werden können. Dies ist allein über die Berechnung solcher Kennwerte durch die Auftragung der Ergebnisse beider Teilprozesse in gemeinsamen Diagrammen möglich, wie es später in Abschnitt 4.4 gezeigt wird.

#### 4.3.3 Anpassungsfunktionen

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Anreicherungskurven stellen die Grundlage zur Berechnung der Erfolgskennzahlen dar. Die Genauigkeit der Erfolgsflächenberechnung hängt von zwei Faktoren ab. Zum einen ist dies die Bestimmung der Versuchsergebnisse über Massenbilanzen und chemische Analysen, zum anderen sind es die Zahl der Versuchspunkte und die Beschreibung des Kurvenverlaufes zwischen den Punkten über Anpassungsfunktionen beziehungsweise über Linearisierungen zwischen den Versuchspunkten. Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, führt das Berechnen der Erfolgsflächen über das Verwenden von Trapezflächen zu Abweichungen, daher wurden die in diesem Abschnitt vorgestellten Approximationsfunktionen an die Versuchsdaten der Trennungsversuche am Band-Ring-Scheider und am Isodynamik-Scheider angepasst. Die abschnittsweise definierten Funktionen nach Gleichungen (36) und (37) wurden bei der Anpassung nicht berücksichtigt, da diese lineare Funktionen darstellen, welche einer Berechnung der Erfolgsflächen mithilfe von Trapezflächen gleichkommen.

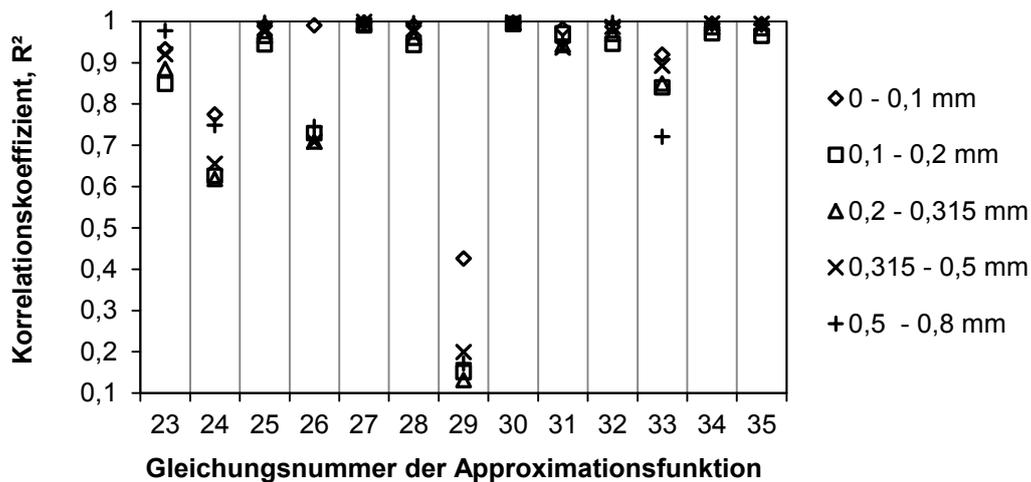
#### Greisenerz

Abbildung 57 stellt die Korrelationskoeffizienten für die Anpassung der Funktionen aus Tabelle 2 an die Versuchsergebnisse der Trennung des Greisenerzes am Isodynamik-Scheider dar. Die Korrelationskoeffizienten für die Anpassung an die Ergebnisse der Trennung des Greisenerzes auf dem Band-Ring-Scheider finden sich in Abbildung 125 im Anhang. Die Güte der Anpassung variiert zwischen den verschiedenen Funktionen sehr stark. Innerhalb der Anpassung einer Funktion an verschiedene Größenklassen variiert die Güte hingegen nur gering. Aufgrund der Korrelationskoeffizienten kommen mehrere Funktionen zur Verwendung als Sortierkurve in

### 4.3 Sortierergebnisse

Frage. Gefordert werden muss, dass für gleiches Material der gleiche Typ von Anpassungsfunktion als Sortierkurve angewendet wird. Zur Auswahl eines Typs muss ein genauerer Blick auf die Anpassungsfunktionen geworfen werden.

Die Anpassung der Versuchsdaten auf Grundlage der Funktionen nach den Gleichungen (24), (26), (29) und (33) scheidet aufgrund ungenügender Übereinstimmung aus. Anpassungen auf Grundlage von Polynomen höherer Ordnung (Gleichungen (33) bis (35)) erreichen gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsdaten. Trotzdem scheiden auch diese zur Darstellung der Anreicherungskurven des Greisenerzes aus. Der Grund liegt im Überschwingen der Funktionen zu Werten von  $R_{1,c}$  größer 100 % beim Vorliegen sehr steiler Kurvenverläufe. Die steilen Kurvenverläufe resultieren aus dem guten mechanischen Aufschluss des Materials verbunden mit dessen guter Sortierbarkeit des Greisenerzes mittels Magnetscheidung. Eine weitere Funktion, die aufgrund der steilen Kurvenverläufe überschwingt und keine Berücksichtigung finden kann, ist Gleichung (28).



**Abbildung 57: Darstellung des Korrelationskoeffizienten für die Anpassung der Funktionen aus Tabelle 2 an die Versuchsdaten der Trennung des Greisenerzes auf dem Isodynamik-Scheider**

Zur Verwendung als Anreicherungskurven bleiben die Funktionen nach den Gleichungen (23), (25), (27), (30), (31) und (32). Die Gleichung (23) zeigt einen geringeren Korrelationskoeffizient als alle anderen in Frage kommenden Funktionen, sodass diese nicht weiter berücksichtigt wird. Der Verlauf der verbliebenen 5 Funktionen ist den ermittelten Punkten der Trennungsversuche des Greisenerzes am Isodynamik-Scheider und den Verwachsungskurven in Abhängigkeit von der Partikelgrößenklasse gegenübergestellt worden. Beispielhaft sind die Diagramme für die feinkörnigste und die grobkörnigste Partikelgrößenklasse in Abbildung 126 (im Anhang) nebeneinander dargestellt. Aus dieser Abbildung wird ein weiteres Problem

### 4.3 Sortierergebnisse

der Anpassungsfunktionen deutlich. Die Gleichungen (25), (27), (30) und (32) zeigen zwar die beste Korrelation zu den Versuchsdaten, jedoch nehmen diese Anpassungsfunktionen aus Sicht der Aufschlussanalysen unsinnige Verläufe an. Die Kurven schneiden die Verwachsungskurven und verlaufen abschnittsweise oberhalb dieser, obwohl sie aus theoretischer Sicht die Verwachsungskurven bestenfalls berühren oder identisch zu diesen verlaufen können. Eine Berechnung der Trennererfolgsfläche auf Grundlage solcher Anpassungen führt im ungünstigsten Fall zu Flächen, welche größer als die Aufschlussenerfolgsflächen sind. Dies ist aufgrund der Aussagen zur Lage der Grenzkurven in Abschnitt 2.3.4 theoretisch nicht möglich und stellt daher ein unsinniges Ergebnis dar. Aus diesem Grund sind Anpassungsfunktionen, welche die Verwachsungskurve übersteigen, für einen gemeinsamen Vergleich von Aufschluss- und Anreicherungsenergebnissen nicht anwendbar.

Betrachtet man die Anpassung nach der Gleichung (31), so verläuft diese in jedem Fall unterhalb der Verwachsungskurve. Sie muss jedoch aufgrund der Forderung  $R_{c,1} (R_{c,2} = 0) \geq 0$  (siehe Abschnitt 4.2.3) in Frage gestellt werden. Generell gilt für diese Approximationsfunktion, dass aufgrund der Güte der Anpassung eine verbesserte Genauigkeit gegenüber der Berechnung auf Basis von einer Zerlegung in trapezförmige Teilflächen nicht zu erwarten ist.

Hieraus lassen sich wesentliche Schlussfolgerungen ableiten:

1. Bei der vergleichenden Darstellung von Aufschluss- und Trennererfolg über die Berechnung von Erfolgsflächen kann auf die näherungsweise Berechnung der Flächen über die Zerlegung in Trapeze zurückgegriffen werden, sofern 5 oder mehr Versuchspunkte vorliegen [22] und diese auch den Bereich der stärksten Krümmung mit abdecken.

2. Der steile Verlauf von Anreicherungskurven bei besonders gut aufgeschlossenen und zu trennendem Material verursacht Probleme bei der Approximation über die in der Literatur zu findenden Anpassungsfunktionen. Eine abschnittsweise Anpassung von nichtlinearen Funktionen scheint, auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse, erforderlich.

3. Werden Approximationsfunktionen zur Darstellung von Anreicherungskurven verwendet, sollten diese mit den Grenzkurven aus der Aufschlussanalyse verglichen werden, um theoretisch unsinnige Verläufe aufzuzeigen und gegebenenfalls Funktionstypen auszuschließen.

## 4.3 Sortierergebnisse

### Nephelin-Syenit

Auch im Fall des Nephelin-Syenits sind die Funktionen (23) bis (35) auf ihre Eignung hinsichtlich der Anpassung als Sortierkurve geprüft wurden. Die Korrelationskoeffizienten der Kurvenanpassung an die Daten der Versuchsreihen am Isodynamik-Scheider finden sich in der Abbildung 127, die für die Anpassung der Daten der Versuchsreihen am Band-Ring-Scheider in Abbildung 128 (beide im Anhang I). Aufgrund der weniger steil verlaufenden Verwachsungsverteilungen eignen sich verschiedene Funktionen zur Anpassung an die Versuchsergebnisse. Die größten Korrelationskoeffizienten, über alle Versuchsreihen hinweg, zeigte die Funktion nach Gleichung (27), weshalb diese zur Approximation von Anreicherungskurven des Nephelin-Syenits eingesetzt wurde.

#### **4.3.4 Trennfunktionen**

Mithilfe der automatischen mineralogischen Analyse und dem nachträglichen Ergänzen der Mineralsuszeptibilitäten ist es möglich, die Partikelsuszeptibilität eines jeden in der Aufschlussanalyse gemessenen Partikels zu errechnen. Über die Beprobung der Magnetscheidungsprodukte können unter Einbeziehung der Massenbilanz Trennfunktionen direkt berechnet werden. Dies ist nachfolgend für Versuchsreihen der Trennung des Greisenerzes und an Versuchen zur labortechnischen Ermittlung der Trennfunktionen des Nephelin-Syenits dargestellt.

### Greisenerz

Anhand der Versuchsreihen zur Zerkleinerung in der Siebkugelmühle bei 0,9 mm Austragsmaschenweite, des Feinguts (-1,0 mm) vom Kegelmüller und des Produktes aus der Nachzerkleinerung des +1,0 mm-Produktes vom Kegelmüller in der Walzenmühle sind Trennfunktionen der Magnetscheidung auf dem Band-Ring-Scheider errechnet wurden. Abbildung 58 stellt beispielhaft die Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes der Walzenmühle dar.

Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt, wurden alle Magnetscheidungen unter gleichen Parametern (Stromstärke und Spaltweite) durchgeführt. Da der eingesetzte Band-Ring-Scheider nach dem Aushebeprinzip arbeitet, ist eine Abhängigkeit der Trennfunktionen von der Partikelgröße zu erwarten (siehe Abbildung 24). Demnach sollten größere Partikel, aufgrund ihres näher zum Austragspol liegenden Schwerpunktes und der damit größeren Dichte des magnetischen Feldes, bereits bei geringeren

### 4.3 Sortierergergebnisse

Suszeptibilitäten in das magnetische Produkt gelangen. Die Trennfunktionen aller untersuchten Proben werden diesem Zusammenhang gerecht (siehe dazu auch im Abbildung 58 und 106 im Anhang).

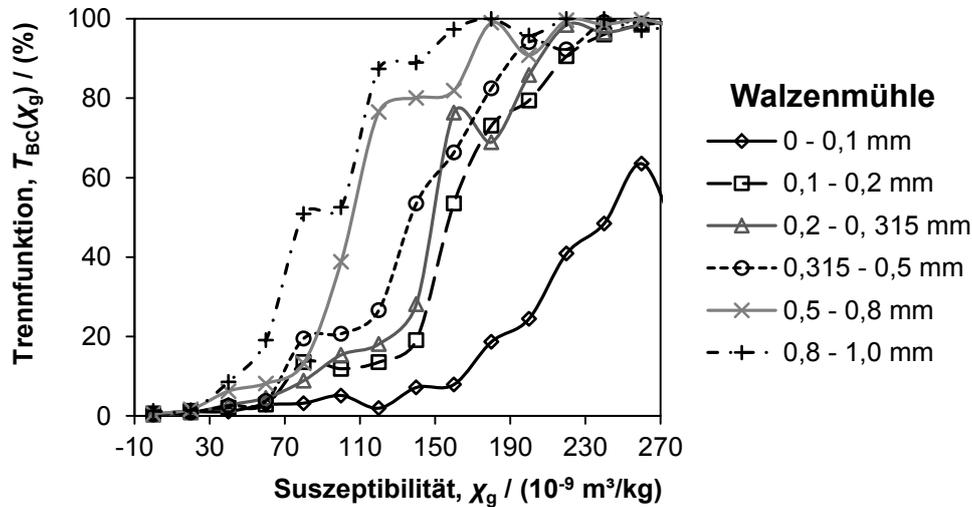


Abbildung 58: Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes der Walzenmühle

Eine Zusammenstellung der Trennsuszeptibilitäten und der Trennschärfekennwerte in Abhängigkeit von der Partikelgröße stellt Abbildung 59 dar (siehe hierzu auch Tabelle 54 bis 56 im Anhang). Ihr kann neben dem beschriebenen Verlauf der Trennsuszeptibilität auch der Verlauf der Trennschärfe entnommen werden. Prinzipiell gilt für beide Kennwerte ein degressiver Verlauf mit zunehmender Partikelgröße. Dies liegt am verbesserten mechanischen Aufschluss bei Verringerung der Partikelgröße und dem damit verbundenen verringerten Anteil von Partikeln mit Suszeptibilitäten im Bereich der Trennsuszeptibilität.

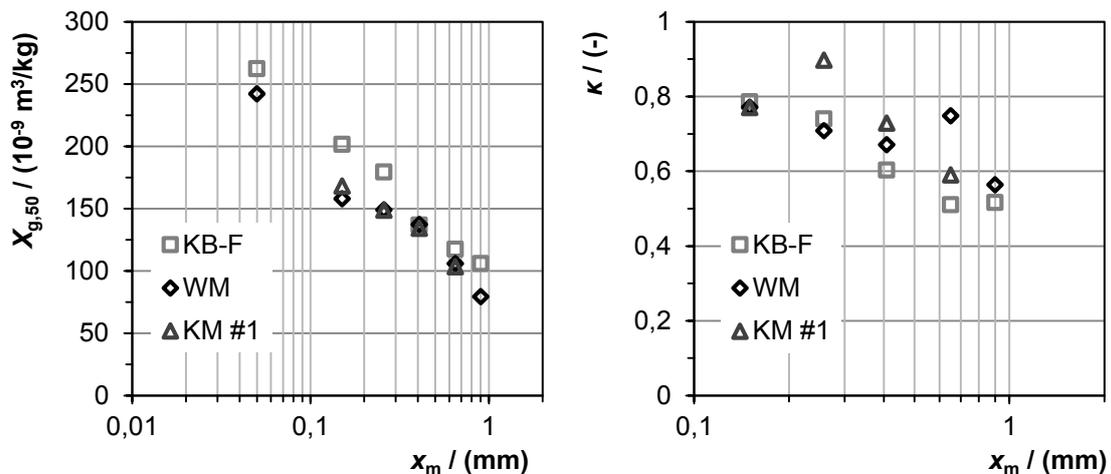


Abbildung 59: Trennsuszeptibilität und Trennschärfe für die Magnetscheidung der Zerkleinerungsprodukte von Kegelbrecher, Walzenmühle und Kugelmühle

### 4.3 Sortierergebnisse

Liegt ein größerer Anteil verwachsener Partikel mit Merkmalwerten im Bereich der Trennsuszeptibilität vor, so erhöhen sich die Anteile der fehlausgetragenen Partikel. Dies führt zu einer Verschiebung des  $\chi_{g,25}$ -Wertes zu geringeren und des  $\chi_{g,75}$ -Wertes zu größeren Suszeptibilitäten. Der Trennschärfekennwert  $\kappa$ , berechnet nach Gleichung (41), nimmt folglich geringere Werte an.

Wie auch bei den Trennfunktionen, sind in den Verläufen der Trennsuszeptibilität und der Trennschärfe teilweise starke Schwankungen erkennbar. Hieraus lässt sich eine entscheidende Schwäche der rechnerischen Ermittlung von Trennfunktionen ableiten. Liegt gut aufgeschlossenes Material vor, so treten nur wenige Partikel im Bereich um die Trenngrenze beziehungsweise im Bereich zwischen den Merkmalwerten der reinen Phasen auf. Statistische Schwankungen der Partikelanzahl in den Merkmalklassen können somit deutliche Änderungen im Trennfunktionswert hervorrufen.

Beispielhaft sind in Abbildung 60 die Histogramme für Konzentrat und Berge einer grob- und einer feinkörnigen Probe dargestellt. Liegt feinkörniges Material vor (Abbildung 60, links), so ist dieses besser aufgeschlossen, aufgrund der großen Gesamtanzahl gemessener Partikel treten auch genügend viele Individuen je Merkmalklasse auf. Eine Besonderheit der Anzahlklassen ergibt sich im Bereich einer Suszeptibilität zwischen  $100 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  und  $120 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ . In dieser Klasse befindet sich Muskovit (Suszeptibilität  $117 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), welcher bei einer errechneten Trennsuszeptibilität von etwa  $170 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  nicht hätte ins Konzentrat gelangen sollen.

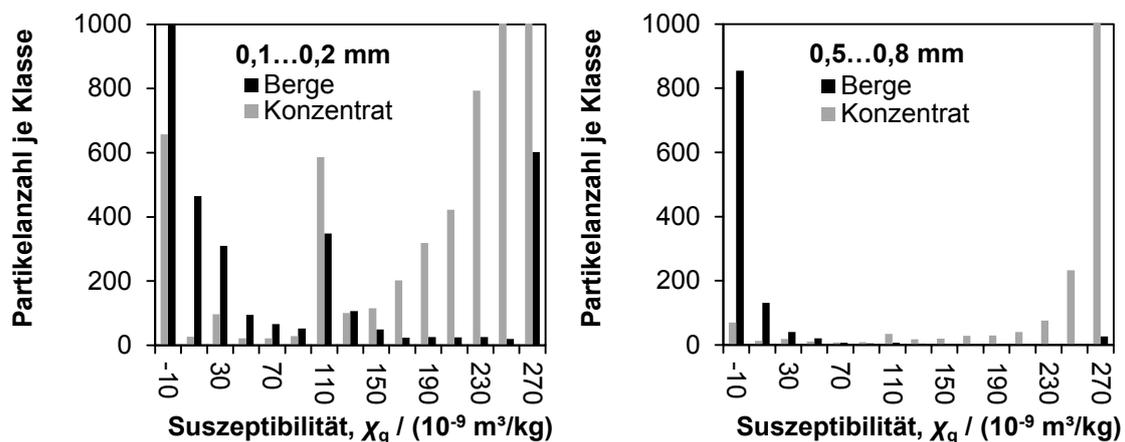


Abbildung 60: Histogramm der Partikelanzahl je Suszeptibilitätsklasse für eine feinkörnige und eine grobkörnige Größenklassen des Kugelmühlenproduktes (0,9 mm Austragsmaschenweite)

Der Grund für diese Häufung von Muskovit im Konzentrat liegt in der Vergesellschaftung mit Zinnwaldit (siehe Abschnitt 4.2.2) und einem zu erwartenden stereologischen Fehler. Dieser stereologische Fehler wurde durch eine Transformation über den Ausschluss offensichtlich zu klein gemessener Phasen (vergleiche Abschnitte

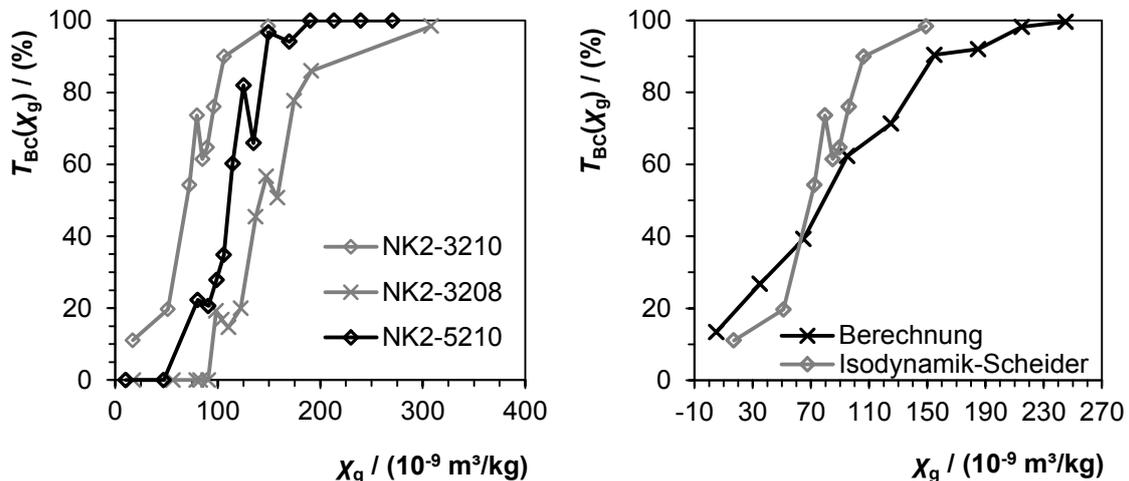
### 4.3 Sortierergebnisse

2.1.6 und 4.2.4) beispielhaft anhand der Trennprodukte aus der Magnetscheidung der Größenklasse 0,2...0,315 mm vom Kugelmühlenprodukt nachgewiesen. Es sind deutliche Verschiebungen des Zusammenhangs vom kumulativen Gehalt über dem Ausbringen für Zinnwaldit im Bergeprodukt und Quarz sowie Muskovit im Konzentrat erhalten worden (vergleiche hierzu Abbildungen 122 bis 124 im Anhang).

Ein anderes Bild ergibt sich für das grobkörnigere Material (Abbildung 60, rechts). Auch hier liegt gut aufgeschlossenes Material vor. Da die Gesamtanzahl gemessener Partikel um ein Vielfaches geringer ist, als bei der feinkörnigeren Probe, treten weniger Partikel mittlerer Eigenschaft auf. Die Berechnung unterliegt somit starken statistisch verursachten Schwankungen. Abhilfe kann das Zusammenfassen benachbarter Merkmalklassen schaffen, wobei die Anzahl der Klassen eine Grenze von etwa 10 Klassen zur Darstellung von Trennfunktionen nicht unterschreiten sollte.

#### Nephelin-Syenit

Vom Nephelin-Syenit liegt keine vergleichbar große Datenbasis vor, wie beim Greisenerz. Dennoch sind diese Ergebnisse von besonderem Wert, da aufgrund der labortechnischen Zerlegung der Trennprodukte in Merkmalklassen ein Vergleich zwischen berechneter und im Labor ermittelter Trennfunktion möglich wird. Abbildung 61 zeigt die labortechnisch und die rechnerisch ermittelten Trennfunktionen.



**Abbildung 61: Trennfunktionen der Versuche mit Nephelin-Syenit. Links: Über die Zerlegung der Produkte in Merkmalklassen ermittelte Trennfunktionen; Rechts: Vergleich einer labortechnisch ermittelten mit einer aus Aufschlussanalysen berechneten Trennfunktion für die Reihe NK2-3210**

Die Veränderungen der Trennfunktion mit Änderung der Bedingungen des Trennversuches entsprechen den Erwartungen. Mit einer Verringerung der Stromstärke am Magnetscheider wird ein schwächeres Magnetfeld erzeugt. Hierdurch wird die zum

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

Ausheben des Partikels erforderliche magnetische Kraft nach Gleichung (58) erst bei größeren Partikelsuszeptibilitäten erreicht. Die Trennfunktion für das Material NK2-3208 (0,5...1,0 mm, 2 mm Spaltweite, 0,8 A Trennstromstärke) muss sich folglich im Vergleich zu Reihe NK2-3210 (0,5...1,0 mm, 2 mm Spaltweite, 1,0 A Trennstromstärke) in Richtung größerer Suszeptibilitäten verschieben. Eine Verringerung der Aufgabepartikelgröße von der Fraktion NK2-3 (0,5...1,0 mm) auf die Fraktion NK2-5 (0,125...0,25 mm) unter Beibehaltung der anderen Parameter muss ebenfalls eine Verschiebung der Trennfunktion in Richtung größerer Suszeptibilitäten zur Folge haben. Der Grund liegt im weiter oben bereits dargelegten größeren Abstand des Partikelschwerpunktes zum Keilpol des Band-Ring-Scheiders.

Vergleicht man die labortechnisch und die rechnerisch ermittelte Trennfunktion für die Reihe NK2-3210, so liegen beide etwa im gleichen Bereich. Die Trennsuszeptibilitäten  $\chi_{g,50}$  unterscheiden sich nur geringfügig. Deutliche Unterschiede sind hingegen bei der Trennschärfe zu verzeichnen. Der Grund kann an dieser Stelle nicht exakt angegeben werden. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist der Effekt geringerer Trennschärfe bei errechneten Trennfunktionen auf die nicht exakt zu ermittelnden Mineralsuszeptibilitäten vieler Bestandteile des Erzes zurückzuführen (siehe Abschnitt 4.1.5). Die berechnete Trennfunktion kann sich hauptsächlich in Richtung größerer Suszeptibilitäten verschieben, da die Minerale mit deutlichem Paramagnetismus den entscheidenden Einfluss auf den Verlauf nehmen. Auf der Seite geringer Suszeptibilitäten ist aufgrund der natürlich vorkommenden Werte der diamagnetischen Suszeptibilität kaum eine Verschiebung möglich.

Zusammenfassend kann, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen zur Berechnung von Trennfunktionen aus Ergebnissen der Aufschlussanalyse, gesagt werden, dass ein solches Vorgehen zu empfehlen ist, sofern die Mineralsuszeptibilitäten der Hauptbestandteile des Erzes bekannt sind. Muss die Suszeptibilität der Minerale auf Grundlage von in der Literatur verfügbaren Werten abgeschätzt werden, so ist das Vorgehen aufgrund der großen Schwankungsbreite der Literaturwerte nicht zu empfehlen.

#### **4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg**

Die nachfolgenden Abschnitte befassen sich mit der Kombination von Aufschluss- und Anreicherungsresultaten in einer gemeinsamen Auftragsaufgabe. Die hierzu verwendeten Kennwerte (siehe Abschnitte 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1 und 2.3.5) sind auf Basis

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

der gleichen Methoden gewonnen wurden, wodurch eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit gegeben ist. Hierbei wird noch einmal auf die Unterscheidung zwischen Trennungs- und Trennschnittkennzahlen Wert gelegt. Die Ausführungen beginnen mit Betrachtungen zur Bewertung der gesamten Trennung nach einem Merkmal (Aufschluss-, Trenn- und Anreicherungserfolgswerten), ehe auf die Möglichkeiten zur Bewertung basierend auf Trennschnittkennzahlen eingegangen wird. Darauf folgend wird die Prozesskennzahl dargestellt und diskutiert. Allgemeine Betrachtungen zur Kombination der Kennzahlen mit den Partikelgrößenverteilungen stellen den Abschluss des Unterkapitels dar.

##### 4.4.1 Aufschluss- und Trennerfolgswerte

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Abhängigkeit verschiedener Parameter von der Partikelgröße gezeigt. Mit abnehmender Partikelgröße verbessert sich der mechanische Aufschluss, bis theoretisch der gesamte Wertstoff frei vorliegt. Die Anreicherung verbessert sich prinzipiell auch mit einem verbesserten Aufschluss, wobei ebenso die Partikelgröße eingeht. Grobe Partikel lassen sich bei vielen Verfahren leichter trennen. Zudem besteht eine untere Grenze der Partikelgröße, ab der das Trennverfahren nicht mehr angewendet werden kann, die durch das anzuwendende Verfahren selbst definiert wird. Der Verlauf der Erfolgswerte  $B_A$ ,  $B_T$  und  $B$  in Abhängigkeit von der Partikelgröße beinhaltet demnach drei wichtige Informationen:

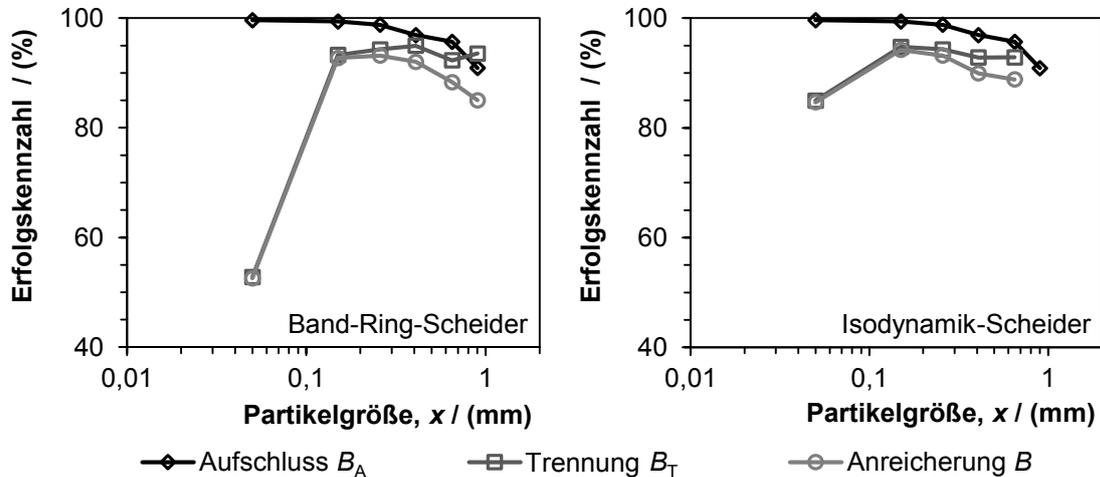
1. Wie weit muss aufgemahlen werden, um möglichst gute Anreicherungsergebnisse zu erzielen,
2. Wann kann die Mahlung abgebrochen werden, weil eine weitere Verringerung der Partikelgröße keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse mehr hat und
3. Was ist die prozessbedingte untere Grenze der Partikelgröße, ab der der Trennprozess ungenügende Ergebnisse liefert?

##### Greisenerz

In Abbildung 62 sind die Verläufe der Aufschlusswert, der Trennerfolgswert und des Anreicherungserfolges für die Trennung des Greisenerzes (Produktes der Schlagnasenmühle) mithilfe des Band-Ring-Scheiders (links) und des Isodynamik-Scheiders (rechts) dargestellt. Es lassen sich die oben geschilderten Fragen anhand der Diagramme beantworten. Betrachtet man zuerst den Verlauf der Aufschluss-

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

erfolgszahl, so erkennt man, dass diese schon unterhalb von 1 mm Partikelgröße sehr hohe Werte annimmt und sich bis zur Klasse 0,2...0,315 mm stark an 100 % annähert. Nach Unterschreiten von 0,315 mm ist durch weitere Zerkleinerung kaum noch eine Verbesserung zu erreichen.



**Abbildung 62: Verlauf der Erfolgskennzahlen über der Partikelgröße für die Trennung des Greisenerzes auf einem Band-Ring-Scheider und einem Isodynamik-Scheider**

Geht man dazu über, auch die Trennerfolgszahl mit zu betrachten, kann der Einfluss des Sortierschrittes einbezogen werden. Beide eingesetzten Sortiermaschinen liefern sehr gute und konstante Ergebnisse ( $> 90\%$ ) über einen breiten Partikelgrößenbereich. Selbst bei groben Partikeln, welche noch Verwachsungen aufweisen, kann über die Magnetscheidung eine sehr gute Trennung erreicht werden. Auffällig ist die Änderung der Trennerfolgszahl in Richtung des Feinguts. Das Feingut beinhaltet alle Partikel kleiner 0,1 mm. Die sehr feinkörnigen Partikel dieser Größenklasse haften aufgrund von VAN-DER-WAALS- und elektrostatischen Kräften aneinander und an den größeren Partikeln der Klasse. Ein selektives Austragen der paramagnetischen Minerale in das Konzentrat ist somit nicht mehr möglich. An Stelle der Partikelsuszeptibilität, errechnet aus den Suszeptibilitäten der den Partikel bildenden Phasen, tritt die Agglomeratsuszeptibilität, basierend auf den Suszeptibilitäten der das Agglomerat bildenden Partikel. Hierdurch entstehen Verluste von Wertstoff in den Abgängen durch Agglomerate einer geringeren Suszeptibilität als der Trennsuszeptibilität und Fehlausträge von Bergepartikeln ins Konzentrat durch Agglomerate mit einer größeren Suszeptibilität als der Trennsuszeptibilität.

Nach TOLKE [19] kann die Trennerfolgszahl auch als eine Art Trennungsschärfe des Sortierapparates angesehen werden. Im Bereich der Partikelgrößen oberhalb von 0,1 mm liegen demnach sehr gute Trennungsschärfen ( $> 0,9$ ) vor. Verglichen mit

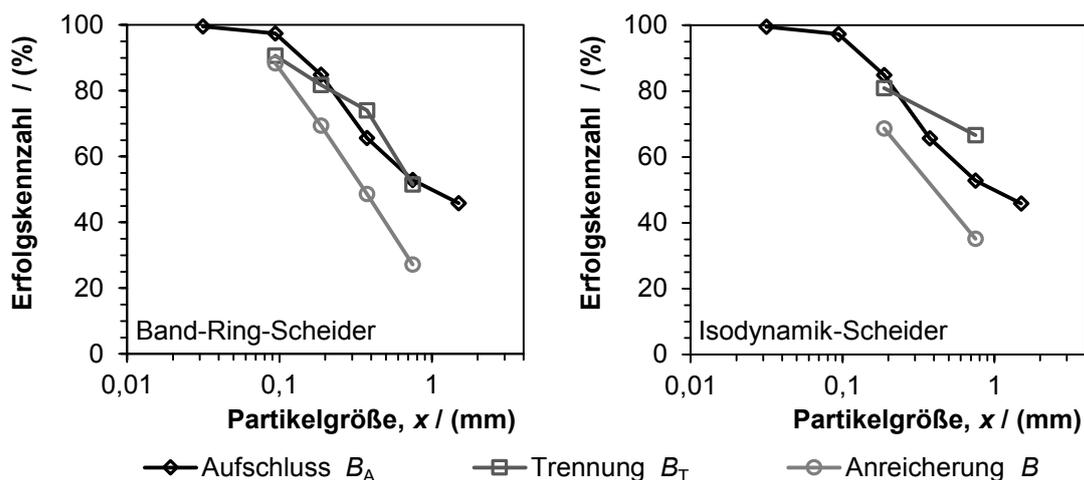
#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

Trennschärfen bei Klassierprozessen [125] deutet dies auf besonders scharfe Trennungen hin. Für die schlecht zu trennende Feinstfraktion  $< 0,1$  mm nimmt die Trennschärfe deutlich ab, wobei im Isodynamik-Scheider trotzdem ein recht hoher Wert erreicht wird. Zum einen liegt dies an dem partikelgrößenunabhängigen Trennprinzip und zum anderen an der verbesserten Vereinzelung der Partikel Trennbereich des Isodynamik-Scheiders.

Der Anreicherungserfolg als Produkt der Aufschlussersolgszahl und der Trennerfolgszahl, kann maximal so groß werden, wie der kleinste Faktor. Dazu entsprechend ist dessen Verlauf stark von den Extremen der beiden Kennzahlen abhängig. Die größten Werte erreicht der Anreicherungserfolg zwischen 0,1 und 0,315 mm, wobei er in Richtung grober Körnungen nur langsam abnimmt. Feingut sollte aus den oben genannten Gründen vermieden werden. Im Sinne einer optimalen Anreicherung des Gesamtmaterials wären ein geringer Feingutanteil und ein möglichst guter mechanischer Aufschluss bei groben Körnungen erstrebenswert.

#### Nephelin-Syenit

Die Erfolgskennzahlen für den Nephelin-Syenit zeigen einen etwas anderen Verlauf. Der Aufschlussenerfolg erreicht erst bei sehr feinen Körnungen große Werte. Ähnlich verhält es sich mit der Trennerfolgszahl. Diese ist zwar anfangs größer als die Aufschlussersolgszahl, steigt dann aber mit Verringerung der Partikelgröße langsamer an.



**Abbildung 63: Verlauf der Erfolgskennzahlen zur Anreicherung der magnetischen Komponenten des Nephelin-Syenits über der Partikelgröße**

Der Anreicherungserfolg verbessert sich in Richtung kleiner Partikelgrößen sehr stark, wobei auch hier gilt, dass beim Erreichen der feinsten Partikelgrößenklasse

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

(-0,063 mm) eine selektive Trennung magnetischer und nicht magnetischer Bestandteile nicht mehr möglich ist. Die Ergebnisse der Trennung dieser Klasse sind nicht im Diagramm enthalten, da im Versuch nahezu das gesamte Material in die magnetischen Fraktionen gelangt ist (siehe Massenbilanz Abbildung 118 im Anhang).

Aufgrund des steilen Verlaufes der Anreicherungsanzahl ist das Arbeitsfenster für die Magnetscheidung im Partikelgrößenbereich sehr eng. Eine sinnvolle Trennung ist nur zwischen 0,063 und 0,25 mm möglich. Mit Einschränkungen kann der Bereich eventuell auch bis 0,5 mm erweitert werden, wobei dann mit nennenswerten Wertstoffverlusten und Produkten geringen Gehalts aufgrund ungenügenden Aufschlusses zu rechnen ist. Trocken arbeitende Magnetscheidung eignet sich bei den vorliegenden Verhältnissen bezüglich Verwachsung und der Verteilung des Trennmerkmals über die im Erz vertretenen Minerale lediglich zur Voranreicherung (siehe Abschnitt 4.3.2). Das Gewinnen von Konzentraten hohen Wertstoffgehalts muss über selektivere und im Bereich der Aufschlusspartikelgröße geeignetere Sortierverfahren (beispielsweise nass arbeitende Hochgradient-Matrixscheidung [175, 176] oder Flotation [174]) realisiert werden.

##### 4.4.2 Maximaler und erreichter Trennungsgrad

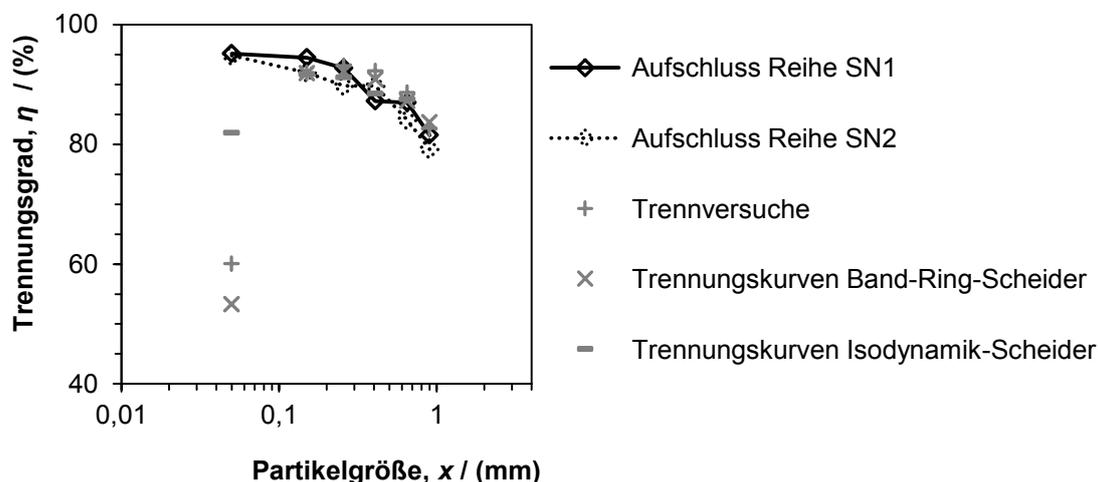
Wie in den theoretischen Grundlagen beschrieben wurde, ist zwischen Kennzahlen, die einen definierten Trennschnitt und jenen die die gesamte Trennung nach einem Merkmal betrachten, zu unterscheiden. Analog verhält es sich mit Aufschlusskennwerten, die zum Repräsentieren einer theoretischen Grenze des Trennprozesses herangezogen werden sollen. Die theoretische Grenze für Trennungen stellt die Verwachsungskurve dar. Die entsprechenden Kennzahlen mit integralem Charakter sind Aufschlussenerfolg  $B_A$  und Trennerfolg  $B_T$ . Im Falle von definierten Trennschnitten kann man ebenso zwei passende Parameter miteinander kombinieren. Diese Parameter sind der Trennungsgrad  $\eta$  zur Charakterisierung des Trennergebnisses (Anreicherung) und der maximale Trennungsgrad  $\eta_{max}$  basierend auf der Verwachsungskurve (siehe Abschnitt 2.3.1).

##### Greisenerz

Eine Gegenüberstellung des laut Verwachsungsverteilung maximal erreichbaren Trennungsgrades und den in den Trennversuchen erreichten Trennungsgraden stellen Abbildung 64 sowie 108 und 109 (im Anhang) für das Greisenerz dar. Hierbei

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

werden dieselben Trends deutlich, die bereits aus anderen Darstellungen gewonnen werden konnten. Aufgrund des sehr guten mechanischen Aufschlusses und der guten Sortierbarkeit des Wertstoffes relativ zu den Bergemineralen liegen der maximale und der erreichte Trennungsgrad dicht beieinander. Das heißt, der Trennschnitt aus den Sortierversuchen liegt nahe am optimalen Trennschnitt im Sinne einer Anreicherung des Wertstoffes. Übertragen auf die Anreicherungskurven aus den Trennungsversuchen am Band-Ring-Scheider und am Isodynamik-Scheider, sollte der Trennschnitt im Bereich des gefundenen Maximums gewählt werden. Die Wahl des Trennschnittes richtet sich dabei nach den Produkthanforderungen. Es kann beispielsweise auch ein Trennschnitt mit größerem Bergeausbringen gewählt werden, sofern die geforderten Spezifikationen hinsichtlich des Gehalts erfüllt werden. Hierdurch lässt sich ein größeres Wertstoffausbringen erreichen.



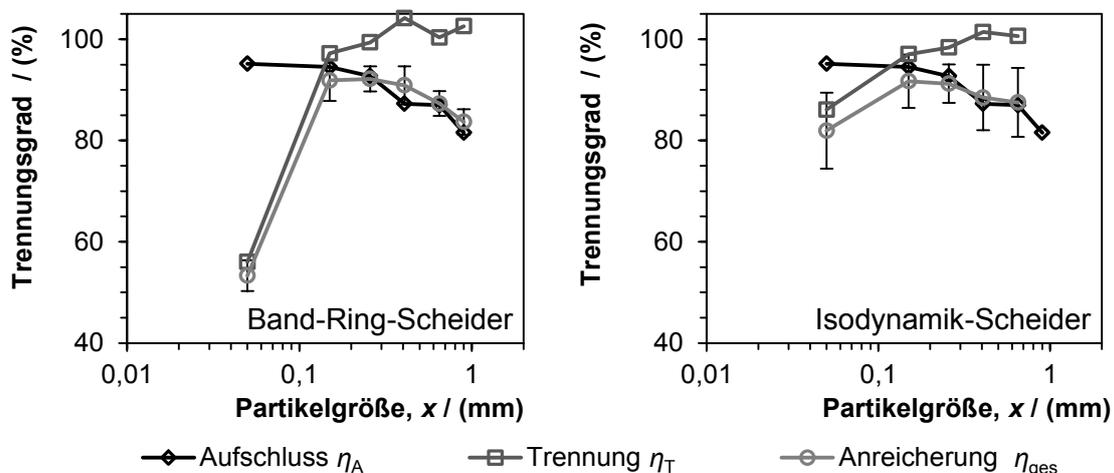
**Abbildung 64: Gegenüberstellung der laut Verwachsungsverteilung maximal möglichen Trennungsgrade für die Reihen SN1 und SN2 und der im Versuch erreichten Trennungsgrade**

Dass der erreichte Trennungsgrad den Grenzwert aus der Verwachsungsverteilung übersteigt, ist auf mögliche Analysenfehler und die zwei voneinander unterschiedlichen Messmethoden zurückzuführen (siehe Anhang D). Das Hauptproblem der Kombination von Messwerten des MLA und des AAS beziehungsweise des ICP-OES liegt in der Bilanzierung über das Element Lithium. Bei der spektrometrischen Messung kann Lithium direkt bestimmt werden. Zur Bilanzierung auf Zinnwaldit wird über eine theoretische Summenformel umgerechnet. Der Gehalt an Lithium schwankt im Zinnwaldit [163], sodass auf diese Weise ein Fehler entsteht. Die Messung mittels MLA liefert Röntgenspektren der untersuchten Messpunkte. Über die Röntgenspektren wird auf Basis einer Mineraldatenbank auf das am Messpunkt befindliche Mineral geschlossen. Lithium liefert aufgrund seiner geringen Atommasse

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

kein Röntgensignal und kann nicht direkt bestimmt werden. Eine Berechnung des Lithiumgehalts erfolgt über Bilanzgleichungen [167].

Die oben geschilderte Problematik der unterschiedlichen Analysemethoden äußert sich bei der Berechnung der Trennschnittkennzahlen für Aufschluss, Trennung und Anreicherung. In Abbildung 65 sind die Kennwerte jeweils für die Trennung am Band-Ring-Scheider und am Isodynamik-Scheider dargestellt. Die Aufschlusskurve bilden die maximalen Trenngrade nach den Verwachsungsverteilungen; die Anreicherungskurve bilden die maximalen Trenngrade basierend auf den Anreicherungskurven der Partikelgrößenklassen. Die Werte der Trennkurve sind auf Grundlage von Gleichung (45) aus den Werten des Aufschlusses und der Anreicherung errechnet worden. Abweichungen in Form von Fehlerbalken können lediglich für die Anreicherungskurven angegeben werden, da diese auf mehrfach gemessenen chemischen Analysen beruhen (siehe Abschnitte 3.2.2, 3.3.2 und 3.4.2). Die maximalen Trennungsgrade für den Aufschluss resultieren aus den Verwachsungskurven der Partikelgrößenklassen, hinter denen sich jeweils eine MLA verbirgt (siehe Abschnitte 3.2.1, 3.3.3 und 3.4.2).



**Abbildung 65: Vergleich der Trennungsgrade für den mechanischen Aufschluss, die Sortierung und Anreicherung mithilfe des Band-Ring-Scheiders und des Isodynamik-Scheiders für das Greisenerz**

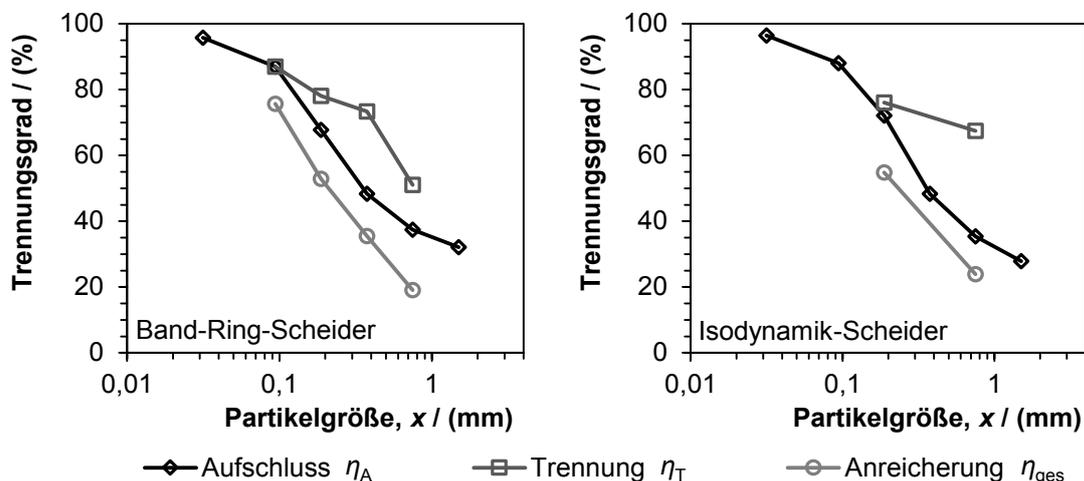
Wie der Abbildung entnommen werden kann, treten Werte der Trennkurve auf, die das Maximum von 100 % übersteigen. Werte oberhalb von 100 % stellen ein unsinniges Ergebnis dar. Sie sind rein auf die geringen Unterschiede zwischen Aufschluss und Anreicherung und die Analysenfehler (Elementanalytik, Stereologischer Fehler) zurückzuführen. Es lässt sich, wie auch schon bei der Betrachtung der Trennungskennzahlen, feststellen, dass die Trennung über Magnetscheidung nur bei sehr

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

geringen Partikelgrößen einen nennenswerten Einfluss auf die Anreicherungsresultate nimmt. Im Bereich größerer Körnungen entscheiden die vorliegenden Verwachsungsverhältnisse.

##### Nephelin-Syenit

Abbildung 66 zeigt die Ergebnisse der Anreicherung des Nephelin-Syenits, dargestellt in Form von Trennschnittkennzahlen. Hier sind ähnlich wie beim Greisenerz dieselben Zusammenhänge wie in der Darstellung als Trennungskennzahlen zu beobachten. Ein kleiner Unterschied resultiert aus der verschobenen Lage der Aufschlusskurve, dargestellt über den maximalen Trenngrad nach den Verwachsungsverteilungen der Partikelgrößenklassen (vergleiche Abbildungen 63 und 66). Der Verlauf weist ein noch vorhandenes Potential zur Verbesserung des Aufschlusszustandes selbst bei geringen Partikelgrößen aus, was sich ebenso in der Kurve der Anreicherung widerspiegelt. Die Kurve der Trennung ändert sich im Vergleich der Abbildungen 63 und 66 nahezu nicht. Ein Übergang von Trennungskennzahlen auf Trennschnittkennzahlen wirkt sich somit scheinbar überwiegend auf die Kurve des Aufschlusses aus, wohingegen die Kurven der Trennung unabhängig von Trennungs- oder Trennschnittbetrachtungen ähnliche Werte annehmen (vergleiche Abbildungen 63 und 66).



**Abbildung 66: Vergleich der Trennungsgrade für den mechanischen Aufschluss, die Sortierung und Anreicherung mithilfe des Band-Ring-Scheiders und des Isodynamik-Scheiders für den Nephelin-Syenit**

Der Vorteil der Trennschnittdarstellung liegt in der Möglichkeit, nicht nur das Maximum der Trennungsversuche (Anreicherungskurven), sondern auch die Ergebnisse verschiedener Sortierversuche mit einzubeziehen. Sofern das gleiche Aufgabematerial, das heißt Material gleicher Aufschluss- und Verwachsungsverhältnisse,

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

eingesetzt wurde, sind die Ergebnisse gleicher Partikelgröße uneingeschränkt miteinander vergleichbar. Hierdurch können Sortierergebnisse nicht nur auf rein verbale Art in Bezug zu den begrenzenden Verwachsungsverhältnissen gebracht werden, wie es bei MILLER [55] gemacht wurde, sondern über belastbare Zahlenwerte bewertet werden.

##### 4.4.3 Prozesskennzahl

Neben den vorgestellten Kennzahlen zur vergleichenden Beschreibung von Aufschluss- und Sortierergebnissen bei Trennungen und Trennschnitten wurden in Abschnitt 2.3.5 eine Prozesskennzahl vorgestellt, die auf Basis der neu eingeführten Kennzahlen gewonnen werden kann. Nachfolgend werden die aus den integralen Erfolgskennzahlen errechnete Prozesskennzahl ( $Z_B$ , Gleichung (54)) und die aus den Trenngraden errechnete Prozesskennzahl ( $Z_\eta$ , Gleichung (55)) für beide untersuchten Erzsysteeme miteinander verglichen.

##### Greisenerz

Betrachtet man den Verlauf der Prozesskennzahl über der Partikelgröße für das Greisenerz (Abbildung 67), so liegt diese über einen großen Bereich in der Nähe von null. Es herrschen somit ausgewogene Verhältnisse vor, was bedeutet, dass kein Teilprozessschritt übermäßig Einfluss auf den Anreicherungserfolg hat. Dies heißt jedoch nicht, dass der Prozess insgesamt gut funktioniert, da die Differenz zweier ungenügender Kennzahlen ebenso einen Wert in der Nähe von null erzeugen kann.

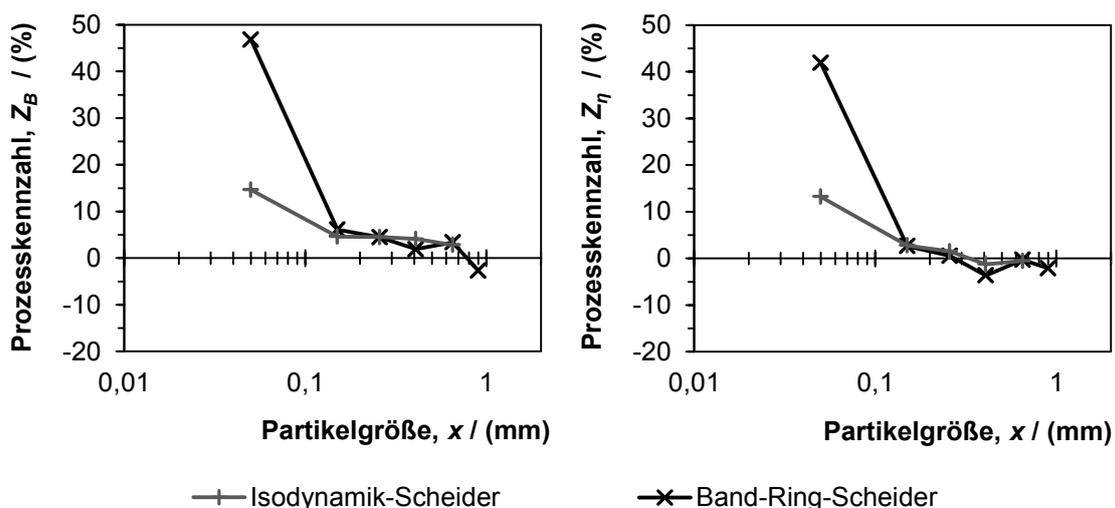


Abbildung 67: Verlauf der Prozesskennzahlen  $Z_B$  und  $Z_\eta$  gegen die Partikelgröße für die Trennung des Greisenerzes mithilfe des Isodynamik- und des Band-Ring-Scheiders

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

Im Bereich sehr feiner Partikelgrößen entwickelt sich die Prozesskennzahl stark in Richtung großer Werte, das heißt in den trennbeeinflussten Teil des Diagramms (vergleiche Abschnitt 2.3.5), was aufgrund der schlechten Sortierbarkeit feiner Partikel mithilfe der trocken arbeitenden Magnetscheidung verursacht ist. Im trennbeeinflussten Teil des Diagramms sollten sich Optimierungen auf den Sortierprozess fokussieren. Für die größte untersuchte Fraktion nimmt die Prozesskennzahl negative Werte an. Hier ist der Aufschlussenerfolg geringer als der Trennerfolg. Besonders in diesem Bereich kann durch weiteres Aufmahlen beziehungsweise einen verbesserten Aufschluss eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden.

Betrachtet man vergleichend die Kennzahlen  $Z_B$  und  $Z_\eta$ , ist der bereits in anderen Darstellungen beschriebene Zusammenhang beider Kennzahlen ersichtlich. Der Verlauf der Prozesskennzahl, basierend auf Trennschnittkennwerten, ist lediglich etwas in Richtung des aufschlussbeeinflussten Bereich des Diagramms verschoben, was auf den Unterschied zwischen  $B_A$  und  $\eta_A$  zurückzuführen ist. Beide Kennzahlen liefern die gleiche Gesamtaussage, dass im Bereich oberhalb von 0,1 mm beide Teilprozesse etwa den gleichen Einfluss auf das Anreicherungsresultat des Greisenerzes nehmen und unterhalb von 0,1 mm der Sortierprozess entscheidend für die Anreicherung wird. Basierend auf den dargestellten Ergebnissen ist festzuhalten, dass die Verwendung von Trennungskennzahlen beziehungsweise von Trennschnittkennzahlen gleichermaßen geeignet ist, eine Beurteilung von Aufschluss, Trennung und Anreicherung vorzunehmen.

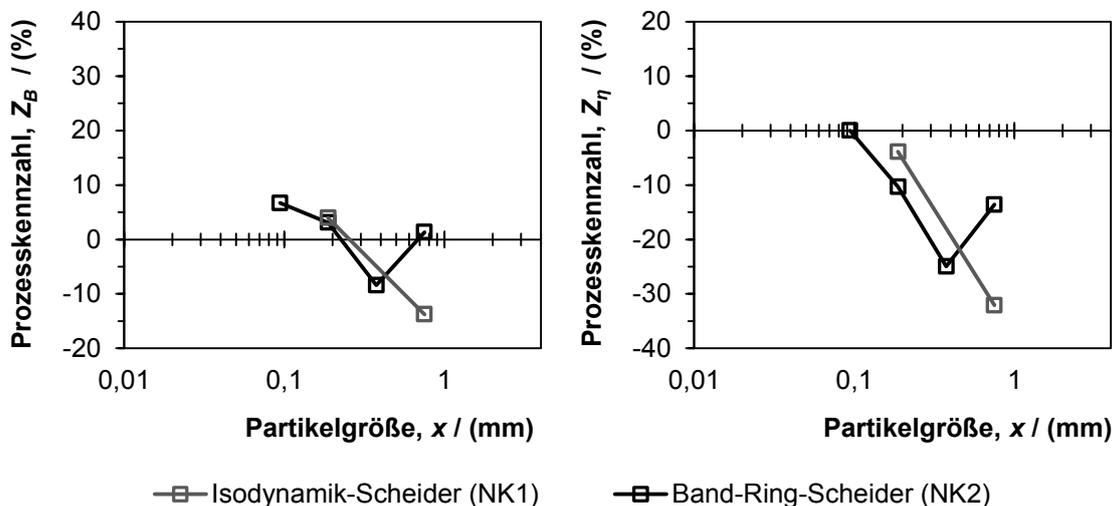
#### Nephelin-Syenit

Der Verlauf der Prozesskennzahl  $Z_B$  über der Partikelgröße für den Nephelin-Syenit (Abbildung 68, links) zeigt ähnliche Tendenzen wie der Verlauf beim Greisenerz. In diesem Fall resultieren die Werte um null jedoch aus der Differenz zweier ungenügender Erfolgskennzahlen. Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben wurde, haben sowohl die Aufschlussenerfolgskennzahl, als auch die Trennerfolgskennzahl erst unterhalb von 0,25 mm eine zufriedenstellende Größenordnung erreicht.

Interessant sind die Werte im Partikelgrößenbereich oberhalb von 0,25 mm. Die Prozesskennzahl der Größenklasse 0,5...1,0 mm zeigt für die Versuchsreihe am Band-Ring-Scheider einen Wert sehr nahe bei null, wohingegen die Versuchsreihe am Isodynamik-Scheider aufschlussbeeinflusste Ergebnisse ergibt. In Abschnitt 4.2.1 zur Zusammensetzung der Zerkleinerungsprodukte wurde gezeigt, dass kein

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

nennenswerter Unterschied zwischen den Partikelgrößenklassen bei Mahlung auf verschiedene Zielfeinheiten besteht. Hierin kann der Grund folglich nicht liegen. Interessant ist dabei auch, dass die Prozesskennzahl der Größenklassen 0,25...0,5 mm am Band-Ring-Scheider aufschlussbeeinflusste Ergebnisse zeigt.



**Abbildung 68: Verlauf der Prozesskennzahlen  $Z_B$  und  $Z_\eta$  gegen die Partikelgröße für die Trennung des Nephelin-Syenits mithilfe des Isodynamik- und des Band-Ring-Scheiders**

Zu berücksichtigen ist, dass die Aufschlussersfolgswahl  $B_A$  (Gleichung (42)), anders als beispielsweise der Aufschlussgrad  $A_G$  (Gleichung (7)), beim Vorliegen freigelegter Bergpartikel zunimmt, da die Verwachsung der wertstoffhaltigen Partikel dadurch abnimmt, das heißt deren Gehalt steigt (siehe hierzu auch Abbildungen 3 und 5 zum Beispielpartikelsystem und Abschnitt 2.3.2). Dies muss jedoch noch nicht zur Folge haben, dass der mittlere Merkmalwert des Partikels für das Austragen in das Konzentrat am Band-Ring-Scheider ausreichend ist. Die Trennbarkeit bewertet nach dem Aufschlussparameter  $B_A$  weist folglich materialeitig verbesserte Bedingungen aus, die jedoch vom eingesetzten Sortierapparat nicht genutzt werden können. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass der berechnete Wert der Aufschlussersfolgswahl auf einer Approximationsfunktion beruht, welche an wenigen Versuchspunkten im Randbereich des Diagramms angepasst wurde (siehe Probe NK2-3 in Abbildung 129). Hierin ist ein wesentlicher Fehler bei der Berechnung des Kennwertes zu vermuten.

Lässt man den Wert der Größenklasse 0,5...1,0 mm vom Band-Ring-Scheider außen vor, so kann man für beide Versuchsreihen einen steigenden Trend vom aufschlussbeeinflussten in den trennbeeinflussten Bereich des Diagramms beobachten. Dieser Verlauf entspricht den Erwartungen, da es sich um ein fein verwachsenes Erz handelt. Vergleicht man die Werte der Kennzahl  $Z_\eta$  mit denen von  $Z_B$ , so ist auch hier

#### 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

eine deutliche Verschiebung der Kurven in den aufschlussbeeinflussten Teil des Diagramms feststellbar. Die Verschiebung resultiert aus den geringeren Werten für  $\eta_A$  relativ zu  $B_A$  (siehe Abschnitt 4.2.2).

##### 4.4.4 Vergleich von Trennschnitt und Trennungskennzahlen

Aus den oben getroffenen Aussagen geht hervor, dass ein Vergleich auf Grundlage der Trennschnittkennzahlen zur Beschreibung des Istzustandes ausreicht. Es genügt das Messen der vorliegenden Verwachsungsverteilung und der erreichten Anreicherung. Auf dieser Grundlage lässt sich nach Gleichung (44) auch der Einfluss des Trennprozesses rechnerisch ermitteln [20]. Das aufwendige Zerlegen eines Materials in Merkmalklassen kann so eingespart werden. Es gelingt so jedoch nicht, das Optimum des Sortierapparates oder Sortierprozesses zu finden, welches sich nicht notwendig im Bereich des Bestwertes, basierend auf den Verwachsungsverteilungen, befinden muss. Damit sich das Optimum eines Sortierprozesses im Bereich des Bestwertes aus der Verwachsungsverteilung befindet, müsste die Trenngrenze bei Merkmalwerten von Partikeln mit Aufgabezusammensetzung liegen. Dass dies nicht immer gegeben sein kann, ist vor allem bei Erzen geringen Wertmineralgehalts einleuchtend.

Um das Optimum des Sortierprozesses zu finden, müssen mehrere Sortierversuche bei unterschiedlichen Parametern durchgeführt und aus ihnen eine Sortierkurve über Anpassungsfunktionen gewonnen werden. Eine Optimierung hinsichtlich der Partikelgröße erfordert darüber hinaus, die Kennwerte an fraktioniertem Material zu ermitteln. Ein Vergleich von integralen Kennwerten ist vor allem dann sinnvoll, wenn die gesamte Verteilung eines Merkmals von Interesse ist. Bei vergleichenden Untersuchungen zum Aufschluss eines Materials bei unterschiedlichen Mühlenarten oder Mühlenparametern ist dies beispielsweise gegeben, da das Produkt einer Zerkleinerung immer eine Verteilung von Merkmalen über die Produktpartikel darstellt. Dies liegt im überwiegend zufälligen Charakter des Bruchverlaufs durch das Material begründet (siehe Abschnitt 2.1.1). Sortierprozesse sind im Vergleich zu Zerkleinerungsprozessen sehr selektiv. Eine Trennung läuft weniger zufällig sondern gerichtet nach einer eingestellten Trennbedingung ab (siehe Abschnitt 2.2.1). Hierdurch sind Trennschnittkennzahlen für eine Bewertung des Prozesses zu empfehlen.

## 4.4 Vergleichende Betrachtung von Aufschluss- und Trennerfolg

### 4.4.5 Kombination der Kennzahlen mit der Partikelgrößenverteilung

Eine Kombination der vorgestellten Kennzahlen mit der Partikelgröße wurde in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt. Da Materialien in Aufbereitungsprozessen meist in Größenverteilungen und weniger in eng klassierten Fraktionen auftreten, ist eine Verbindung der Kennzahlen mit diesen Verteilungen anzustreben. Die einfachste Art eine solche Verbindung zu gestalten, liegt in der Kombination der Kennzahlen mit den Masseanteilen der untersuchten Größenklassen nach Gleichung (56) beziehungsweise (57).

Die rechnerische Optimierung des Prozesses kann dann in üblicher Weise durch das Anpassen der Aufgabegrößenverteilung des Trennschrittes erfolgen. Hierfür muss gewährleistet sein, dass jeder Teilprozess (Aufschlusszerkleinerung, Sortierung) bereits optimiert wurde. Ein solches Vorgehen ist nur dann gültig, wenn für die partikelgrößenabhängige Ermittlung der Anreicherungskurven beziehungsweise Sortierkennwerte keine unterschiedlichen Sortierparameter (beispielsweise Stromstärken, Spaltweiten, usw.) zum Einsatz kamen. Das Optimum der Anreicherung ist dann gefunden, wenn durch Anpassen der Partikelgrößenverteilung der Gesamtkennwert ( $B_{\text{ges}}$  beziehungsweise  $\eta_{\text{ges}}$ ) maximal wird (siehe Abschnitt 2.3.6). Ein solches technisches Maximum liegt jedoch nicht zwingend am ökonomischen Maximum welches maßgebend von Produktgehalt, Anlagendurchsatz und Energieaufwand bestimmt wird. Eine Optimierung muss folglich auf ökonomischer Basis mit gleichzeitiger Betrachtung der technischen Parameter wie  $B_A$  und  $B_T$  erfolgen.

Weil im Rahmen dieser Arbeit keine Versuchsreihen im Hinblick auf die Optimierung der Aufgabepartikelgröße durchgeführt wurden, kann an dieser Stelle kein Beispiel basierend auf Versuchsdaten aufgeführt werden. Die Tendenzen können aus den bisher diskutierten Zusammenhängen entnommen werden. Im Fall des Greisenerzes ist eine Zerkleinerung in den Bereich kleiner 1 mm erforderlich, wobei ein möglichst geringer Feinanteil angestrebt werden muss. Im Fall des Nephelin-Syenits ist die untersuchte trockene Magnetscheidung höchstens zur Voranreicherung geeignet. Besser ist jedoch, mindestens auf kleiner 0,25 mm aufzumahlen und die Anreicherung über geeignetere Verfahren wie nasse Hochgradient-Magnetscheidung oder Flotation zu gestalten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Aufschluss- und Sortiererergebnisse miteinander kombiniert, um die Anreicherung des Wertstoffs unter Berücksichtigung beider Teilprozesse bewerten zu können. Als Sortierprozess wurde beispielhaft die Magnetscheidung ausgewählt, wobei eine Vielzahl der getroffenen Aussagen für Trennprozesse generell und die Arbeit als Gesamtheit für Trennungen nach volumenspezifischen Trennmerkmalen übertragbar sind.

Der Stand des Wissens wurde durch diese Arbeit in mehreren Punkten ergänzt:

- Ein Modell zur Beschreibung der Sortierbarkeit wurde ausgewählt und mithilfe moderner Aufschlussanalysen um Verwachsungskurven erweitert. Hierdurch konnte vom vereinfachenden Vergleich einer Sortierkurve mit dem theoretischen Grenzfall des alleinigen Austragens von Wertstoff auf eine genaue Unterscheidung zwischen den Anteilen des Aufschlusses und der Sortierung am Anreicherungsresultat übergegangen werden. Darüber hinaus konnte ein neuartiger Aufschlussparameter definiert werden, der bereits vor Abschluss dieser Arbeit auf eine praxisrelevante Maschinenoptimierung [126] übertragen wurde.
- Das erweiterte Modell zur Bewertung der Anreicherung unter Berücksichtigung des Einflusses von Aufschluss und Trennung auf Grundlage integraler Kennwerte wurde einer Möglichkeit zur Beschreibung dieses Zusammenhangs auf Basis von Trennschnittkennwerten gegenüber gestellt.
- Bei der Bestimmung von Mineralsuszeptibilitäten wurde ein neuartiger Ansatz vorgeschlagen. Mit dessen Hilfe wird eine Berechnung der Suszeptibilität von Mineralen eines Erzes möglich, ohne die Minerale einzeln und frei vorliegen zu haben. Das Vorgehen basiert auf einer Zerlegung eines zerkleinerten Erzes in Fraktionen unterschiedlicher Merkmale, einer Messung der Mischungssuszeptibilität dieser Fraktionen und einer Kombination mit der automatischen mineralogischen Analyse. Auf rechnerischen Weg können aus dieser Datenbasis die Mineralsuszeptibilitäten nach einem Mischungsgesetz durch Lösen eines Gleichungssystems ermittelt werden.
- Darüber hinaus wurde der Einfluss unterschiedlicher Partikelmerkmale auf den Verlauf aufgestellter Verwachsungskurven dargestellt und diskutiert. Die Grenze eines jeden anreichernden Prozesses stellt demnach die Verwachsungskurve

nach abnehmenden Partikelgehalt (Klaubungskurve) dar. Die wirkliche Grenzkurve für den zur Anwendung kommenden Sortierprozess bildet jedoch die Kurve nach dem abnehmenden Sortiermerkmal, welche immer unterhalb oder im bestmöglichen Fall auf der Klaubungskurve verläuft.

- Über die Kombination der automatischen mineralogischen Analyse mit Suszeptibilitätsmessungen wurde ein rechnerischer Weg zum Aufstellen von Trennfunktionen aufgezeigt, der die aufwendige Zerlegung der Trennprodukte in Merkmal-klassen überflüssig macht.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- An den Aufschlussanalysen ausgewählter Versuchsreihen jedes Erzsystems wurde eine stereologische Transformation nach der Methode der Eliminierung offensichtlich zu kleiner Phasen durchgeführt. Mithilfe dieser Transformation ist es gelungen, stereologische Effekte der Aufschlussparameter bei den untersuchten Erzen nachzuweisen. Wie zu erwarten, resultiert ein Teil der als frei ausgewiesenen Phasen aus dem ungünstigen Schriffverlauf durch die Partikel. Hierdurch entstehen kleine, monomineralische Partikel. Eine Vernachlässigung dieser ungünstig angeschliffenen Partikel reduziert bei beiden Erzen besonders den Anteil frei vorliegender Phasen zu Gunsten der Anteile verwachsener Partikel.
- Nach unterschiedlichen Partikelmerkmalen gebildete Verwachsungskurven, wiesen zum Teil erhebliche Unterschiede auf. In der Praxis muss die Verwachsungskurve nach dem eigentlichen Trennmerkmal berücksichtigt werden, da andernfalls zu gute Ergebnisse hinsichtlich Gehalt und Ausbringen zu erwarten sind.
- Eine Auftragung von Aufschluss- und Anreicherungskurven in einem gemeinsamen Diagramm ermöglicht die Unterscheidung zwischen beiden Einflussfaktoren auf das Anreicherungsresultat. Die gewählten Darstellungen vom Wertstoffausbringen über dem Bergeausbringen beziehungsweise des Trennungsgrades über dem Wertstoffausbringen können gleichermaßen zur Beurteilung der Ergebnisse eingesetzt werden. Das Arbeiten mit integralen Erfolgskennzahlen ermöglicht dabei die Bewertung der gesamten Trennung nach einem Merkmal. Das Verwenden der Trennungsgraddarstellung ermöglicht hingegen die Bewertung von Trennschnitten, das heißt einzelnen Trennversuchen.

- Trennfunktionen, welche auf Basis der Aufschlussanalyse beider Trennprodukte errechnet wurden, stimmen mit den aus den Versuchsparametern erwarteten Ergebnissen und Trends überein. Schwankungen im Verlauf der Trennfunktion sind auf eine ungenügende Statistik, das heißt auf eine zu geringe Partikelanzahl im Merkmalsbereich um den Trennschnitt, zurückzuführen. Eine stereologische Beeinflussung aufgrund ungünstig angeschliffener und dadurch als fehlausgetragen ausgewiesener Partikel wirkt sich besonders auf den Bereich freier Phasen aus.
- Aufschlussgrade unterschiedlicher Definitionen sollten immer auch im Zusammenhang mit der Verwachsungsverteilung betrachtet werden. Ein Vorteil liegt in der Verwendung der integralen Aufschlussersolgszahl, da in ihr die gesamte Verwachsungsverteilung Berücksichtigung findet. Es kann ebenso versucht werden, den maximalen Trenngrad, bezogen auf das einzusetzende Sortiermerkmal, als Aufschlussparameter heranzuziehen.

Die Komplexität von Aufschluss- und Sortiererergebnissen lässt sich durch die im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Methoden vereinfacht bewerten. Die getroffenen Aussagen gelten streng genommen nur für volumenbezogene Partikelmerkmale. Ein Übertragen der Ansätze auf oberflächenbezogene Größen und deren kritische Prüfung muss die Anwendbarkeit auch für solche Partikelmerkmale liefern.

Ein ausgiebiger Test der vorgeschlagenen Methode zur Ermittlung der Mineralsuszeptibilitäten feinverwachsener Erze war im Umfang der geleisteten Untersuchungen nicht möglich. Diese Methode muss über ein angepasstes Versuchsprogramm, unter Berücksichtigung der Zerlegung des Systems nach unterschiedlichen Merkmalen in möglichst viele Klassen, auf seine Leistungsfähigkeit getestet werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] MELOY, T.P., PRETI, U., AND FERRARA, G.: *Liberation - Volume and mass lockedness profiles derived - Theoretical and practical conclusions*. International Journal of Mineral Processing, 1987. **20**(1-2): S. 17-34.
- [2] SCHUBERT, H.: *Aufbereitung fester Stoffe Band II: Sortierprozesse*. 4. Auflage. 1996, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [3] DRZYMALA, J.: *Mineral Processing, Foundations of theory and practice of mineralurgy*. 2007: Oficyna Wydawnicza PWr.
- [4] KELLY, E.G. AND SPOTTISWOOD, D.J.: *Introduction to Mineral Processing*. 1982, New York: John Wiley & Sons. 491.
- [5] GAUDIN, A.M.: *Principles of Mineral Dressing*. 1939, New York: McGraw-Hill.
- [6] WILLS, B.A.: *Mineral Processing Technology*. Band 7. 2006: Butterworth-Heinemann.
- [7] MELOY, T.P.: *Liberation theory - Eight, modern, usable theorems*. International Journal of Mineral Processing, 1984. **13**(4): S. 313–324.
- [8] VEASEY, T.J. AND WILLS, B.A.: *Review of methods of improving mineral liberation*. Minerals Engineering, 1991. **4**(7-11): S. 747-752.
- [9] BARBERY, G.: *Mineral Liberation Measurement, Simulation and Practical Use in Mineral Processing*. 1991, Québec, Canada.
- [10] SCHUBERT, H.: *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band 1*. 4. Auflage. Band 1. 1989.
- [11] HSIH, C.S.: *An extension of Gaudin's liberation model for quantitatively representing the effect of detachment in liberation*. International Journal of Mineral Processing, 1994. **42**(1-2): S. 15–35.
- [12] SCHRANZ, H. AND BERGHÖFER, W.: *Selektive Zerkleinerung*. Bergb.-Wiss., 1958. **5**(II 6): S. 8.
- [13] WILLS, B.A. AND ATKINSON, K.: *Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies*. Minerals Engineering, 1993. **6**(7): S. 697-706.
- [14] KING, R.P. AND SCHNEIDER, C.L.: *Mineral liberation and the batch comminution equation*. Minerals Engineering, 1998. **11**(12): S. 1143-1160.
- [15] SCHULZ, N.F.: *Separation Efficiency*. Soc Mining Eng AIME Trans, 1970. **247**(1): S. 81-87.
- [16] STEINER, H.J.: *Zur Kennzeichnung des Trennerfolges in der Aufbereitung*. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 1964. **109**(12): S. 373-378.
- [17] TOLKE, A.: *Beitrag zur Klassierung im Korona-Kammer-Scheider und zur Trennerfolgsermittlung*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, 1975: S. 94.
- [18] SCHULZ, N.F.: *Separation Efficiency*, in *Annual Meeting of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*. 1969: Washington, D.C. S. 25.
- [19] TOLKE, A.: *Anreichercurven im w-m-Diagramm und Ausbringenszahlenkurven für Verfahren ohne ideale Merkmalsklassen*. Bergakademie, 1970. **22**(12): S. 732-737.
- [20] FINCH, J.A. AND GOMEZ, C.O.: *Separability curves from image analysis data*. Minerals Engineering, 1989. **2**(4): S. 565–568.
- [21] HELFRICHT, R.: *Ein Beitrag zur Dichtesortierung feiner Körnungen in Flächenrinnen*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, 1965.

- [22] HELFRICHT, R.: *Die Kennzeichnung des Trennerfolgs mit Hilfe von Anreicherkurven und einer aus ihnen abgeleiteten Kennzahl*. Bergakademie, 1966. **18**(5): S. 289-296.
- [23] LEIßNER, T., et al.: *Method for evaluation of upgrading by liberation and separation*, in *XXVII International Mineral Processing Congress*. 2014, Gecamin: Santiago (Chile). S. 8.
- [24] LEIßNER, T., et al.: *Evaluation of mineral processing by assessment of liberation and upgrading*. Minerals Engineering, 2013. **53**: S. 171-173.
- [25] LEIßNER, T., MÜTZE, T., AND PEUKER, U.A.: *Nutzung der direkten Messung des Aufschlussgrades in Sortierkennfeldern*. Chemie Ingenieur Technik, 2014. **86**(6): S. 1-8.
- [26] FANDRICH, R., et al.: *Modern SEM-based mineral liberation analysis*. International Journal of Mineral Processing, 2007. **84**(1-4): S. 310-320.
- [27] GU, Y.: *Automated Scanning Electron Microscope Based Mineral Liberation Analysis: An Introduction to JKMRM/FEI Mineral Liberation Analyser*. Journal of Minerals & Minerals Characterization & Engineering, 2003. **2**(1): S. 33-41.
- [28] JONES, M.P. AND SHAW, J.L.: *Automatic measurement and stereological assessment of mineral data for use in mineral technology*. in *Proceedings of the tenth International Mineral Processing Congress*. 1974. London: Institution of Mining and Metallurgy. S. 737-756.
- [29] KING, R.P. AND SCHNEIDER, C.L.: *Stereological correction of linear grade distributions for mineral liberation*. Powder Technology, 1998. **98**(1): S. 21-37.
- [30] MILLER, J.D. AND LIN, C.L.: *Comparison of linear and areal grade distributions as estimates of the volumetric grade distribution in liberation analysis*. in *Particulate and Multiphase Processes*. 1987. Hemisphere Publication. S. 421-432.
- [31] PETRUK, W.: *Correlation between grain sizes in polished section with sieving data and investigation of mineral liberation measurements from polished sections*. Trans Inst Min Metall Sect C, 1978. **87**: S. c272-c277.
- [32] PETRUK, W.: *Applied Mineralogy in the Mining Industry*. 2000, Ottawa, Ontario, Canada: Elsevier.
- [33] HUNT, C.P., MOSKOWITZ, B.M., AND BANERJEE, S.K.: *Magnetic properties of rocks and minerals*, in *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. 1995, AGU: Washington, DC. S. 189-204.
- [34] BLEIL, U. AND PETERSEN, N.: *Magnetic properties of natural minerals*, in *Landolt-Börnstein - Group V Geophysics*, G. Angenheister, Editor. 1982. S. 308-365.
- [35] CARMICHAEL, R.S.: *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*. 1990: CRC Press, Inc.
- [36] ROSENBLUM, S. AND BROWNFIELD, I.K.: *Magnetic susceptibility of minerals*. 1999, U.S. Dept. of the Interior, U.S. GEOLOGICAL SURVEY: Washington. S. 10.
- [37] VERNON, R.H.: *Magnetic susceptibility as a measure of total iron plus manganese in some ferromagnesian silicate minerals*. The American Mineralogist, 1961. **46**: S. 1141-1153.
- [38] HÄNSEL, H. AND NEUMANN, W.: *Physik - Moleküle und Festkörper*. 1996, Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.
- [39] DERKATSCH, V.G.: *Die magnetische Aufbereitung schwachmagnetischer Erze*. 1960, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [40] STEINER, H.J.: *Mineralogische Aufgabenstellungen in der Mineralaufbereitung*. Archiv für Lagerstättenforschung der geologischen Bundesanstalt, 1989. **10**: S. 221-225.

- [41] KING, R.P.: *Linear stochastic models for mineral liberation*. Powder Technology, 1994. **81**(3): S. 217-234.
- [42] WIEGEL, R.L.: *Liberation in magnetite iron formations*. Trans Soc Min Eng AIME, 1975. **258**(3): S. 247-256.
- [43] STEINER, H.J.: *Liberation kinetics in grinding operations*. in *XI. International Mineral Processing Congress*. 1975. Cagliari, Italy. S. 33-58.
- [44] ANDREWS, J.R.G. AND MIKA, T.S.: *Comminution of a heterogeneous material*, in *XI. International Mineral Processing Congress*. 1975: Cagliari, Italy. S. 59-88.
- [45] FANDRICH, R.G., et al.: *Mineral liberation by particle bed breakage*. Minerals Engineering, 1997. **10**(2): S. 175-187.
- [46] HERBST, J.A., et al.: *Development of a multicomponent-multisize liberation model*. Minerals Engineering, 1988. **1**(2): S. 97-111.
- [47] CHOI, W.Z., ADEL, G.T., AND YOON, R.H.: *Liberation modeling using automated image analysis*. International Journal of Mineral Processing, 1988. **22**(1-4): S. 59-73.
- [48] KING, R.P.: *Comminution and liberation of minerals*. Minerals Engineering, 1994. **7**(2-3): S. 129-140.
- [49] WANG, E., SHI, F., AND MANLAPIG, E.: *Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels*. Minerals Engineering, 2012. **27-28**(0): S. 28-36.
- [50] ANDRES, U., et al.: *Liberation of valuable inclusions in ores and slags by electrical pulses*. Powder Technology, 2001. **114**(1-3): S. 40-50.
- [51] ANDRES, U., JIRESTIG, J., AND TIMOSHKIN, I.: *Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses*. Powder Technology, 1999. **104**(1): S. 37-49.
- [52] SUTHERLAND, D.N. AND GOTTLIEB, P.: *Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing*. Minerals Engineering, 1991. **4**(7-11): S. 753-762.
- [53] BÉRUBÉ, M.A. AND MARCHAND, J.C.: *Etudes de liberation des minerais à l'Université Laval (Quebec)*. Principes et mesures à l'aide d'un analyseur d'images, 1983. **76**(850): S. 54-64.
- [54] BÉRUBÉ, M.A. AND MARCHAND, J.C.: *Evolution in the mineral liberation characteristics of an iron ore undergoing grinding*. International Journal of Mineral Processing, 1984. **13**: S. 223-237.
- [55] MILLER, J.D., et al.: *Liberation-limited grade/recovery curves from X-ray micro CT analysis of feed material for the evaluation of separation efficiency*. International Journal of Mineral Processing, 2009. **93**(1): S. 48-53.
- [56] DELL, C.C.: *An expression for the degree of liberation of an ore*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1969. **78**: S. C89.
- [57] HOLLAND-BATT, A.B.: *Liberation analysis*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1983. **92**: S. 129-137.
- [58] WIEGEL, R.L.: *The rationale behind the development of one model describing the size reduction/liberation of ores*. in *2006 SME Annual Conference - Advances in Comminution*. 2006. S. 225-241.
- [59] WIGHTMAN, E.M. AND EVANS, C.L.: *Representing and interpreting the liberation spectrum in a processing context*. Minerals Engineering, 2014. **61**: S. 121-125.
- [60] MAYER, F.W.: *Die Mittelwertkurve, eine neue Verwachsungskurve*. Glückauf, 1950. **26**: S. 498-509.

- [61] LIN, C.L. AND MILLER, J.D.: *Cone beam X-ray microtomography for three-dimensional liberation analysis in the 21st century*. International Journal of Mineral Processing, 1996. **47**(1-2): S. 61-73.
- [62] KING, R.P.: *A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding*. International Journal of Mineral Processing, 1979. **6**(3): S. 207-220.
- [63] SCHNEIDER, C.L., et al.: *Improved transformation technique for the prediction of liberation by a random fracture model*. Powder Technology, 1991. **67**(1): S. 103-111.
- [64] VAN EGMOND, J.W. AND MELOY, T.P.: *Lockedness profile for non-homogeneous liberation of symmetrical particles*. Powder Technology, 1989. **58**(1): S. 11-15.
- [65] PRETI, U., FERRARA, G., AND MELOY, T.P.: *Influence of particle shape on liberation*. International Journal of Mineral Processing, 1989. **25**(1-2): S. 17-28.
- [66] FERRARA, G., PRETI, U., AND MELOY, T.P.: *Inclusion shape, mineral texture and liberation*. International Journal of Mineral Processing, 1989. **27**(3-4): S. 295-308.
- [67] MELOY, T.P., et al.: *Locked particle standard deviation for two-phase systems*. Powder Technology, 1989. **59**(2): S. 109-115.
- [68] MELOY, T.P. AND PRETI, U.: *Locked particles - three phase volume frequency distribution*. Powder Technology, 1992. **71**(3): S. 289-295.
- [69] BARBERY, G. AND LEROUX, D.: *Prediction of particle composition distribution after fragmentation of heterogeneous materials*. International Journal of Mineral Processing, 1988. **22**(1-4): S. 9-24.
- [70] BARBERY, G.: *Liberation 1, 2, 3: Theoretical analysis of the effect of space dimension on mineral liberation by size reduction*. Minerals Engineering, 1992. **5**(2): S. 123-141.
- [71] CHOI, W.Z., ADEL, G.T., AND YOON, R.H.: *Size reduction/liberation model of grinding including multiple classes of composite particles*. Minerals and Metallurgical Processing, 1987. **4**(2): S. 102-108.
- [72] CHOI, W.Z., ADEL, G.T., AND YOON, R.H.: *Estimation of model parameters for liberation and size reduction*. Minerals and Metallurgical Processing, 1988. **5**(1): S. 33-39.
- [73] YINGLING, J.C.: *Liberation model for multi-component ores*. Minerals and Metallurgical Processing, 1991. **8**(2): S. 65-72.
- [74] STAMBOLIADIS, E.T.: *The evolution of a mineral liberation model by the repetition of a simple random breakage pattern*. Minerals Engineering, 2008. **21**(3): S. 213-223.
- [75] GAY, S.L.: *A liberation model for comminution based on probability theory*. Minerals Engineering, 2004. **17**(4): S. 525-534.
- [76] HILDEN, M.: *Simulating the effect of mineral association using a multi-mineral rock texture and liberation model*, in *XXVII International Mineral Processing Congress IMPC 2014*. 2014: Santiago (Chile).
- [77] PETRUK, W.: *Automatic Image Analysis for Mineral Beneficiation*. Journal of Metals, 1988. **40**(4): S. 29-31.
- [78] LASTRA, R.: *Seven practical application cases of liberation analysis*. International Journal of Mineral Processing, 2007. **84**(1-4): S. 337-347.
- [79] PASCOE, R.D., POWER, M.R., AND SIMPSON, B.: *QEMSCAN analysis as a tool for improved understanding of gravity separator performance*. Minerals Engineering, 2007. **20**(5): S. 487-495.

- [80] PETRUK, W., PINARD, R.G., AND FINCH, J.: *Relationship between observed mineral liberations in screened fractions and in composite samples*. Minerals and Metallurgical Processing, 1986. **3**(1): S. 60-62.
- [81] HARTNER, R., WALTERS, S.G., AND BERRY, R.: *Optical and SEM-based microscopy integration for optimisation of geometallurgical modelling and ore deposit characterisation*. in *GeoMet 2011 - 1st AusIMM International Geometallurgy Conference 2011*. 2011. S. 157-162.
- [82] MILLER, J.D., LIN, C.L., AND CORTES, A.B.: *A Review of X-Ray Computed Tomography and Its Applications in Mineral Processing*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1990. **7**(1): S. 1-18.
- [83] LIN, C.L., MILLER, J.D., AND CORTES, A.: *Applications of X-Ray Computed Tomography in Particulate Systems*. KONA Powder and Particle Journal, 1992. **10**(0): S. 88-95.
- [84] MILLER, J.D. AND LIN, C.L.: *Three-dimensional analysis of particulates in mineral processing systems by cone beam X-ray microtomography*. Minerals and Metallurgical Processing, 2004. **21**(3): S. 113-124.
- [85] MILLER, J.D. AND LIN, C.L.: *Treatment of polished section data for detailed liberation analysis*. International Journal of Mineral Processing, 1988. **22**(1-4): S. 41-58.
- [86] GARCIA, D., LIN, C.L., AND MILLER, J.D.: *Quantitative analysis of grain boundary fracture in the breakage of single multiphase particles using X-ray microtomography procedures*. Minerals Engineering, 2009. **22**(3): S. 236-243.
- [87] CHARIKINYA, E. AND BRADSHAW, S.: *Use of X-ray computed tomography to investigate microwave induced cracks in sphalerite ore particles*, in *XXVII International Mineral Processing Congress IMPC 2014*. 2014: Santiago (Chile).
- [88] LAU, S.H., MILLER, J.D., AND LIN, C.-L.: *3d mineralogy, texture and damage analysis of multiphase mineral particles with a high contrast, submicron resolution x-ray tomography system*. XXVI International Mineral Processing Congress IMPC 2012 - Conference Proceedings, 2012. 2726-2736.
- [89] VIDELA, A., LIN, C.L., AND MILLER, J.D.: *Watershed functions applied to a 3D image segmentation problem for the analysis of packed particle beds*. Particle and Particle Systems Characterization, 2006. **23**(3-4): S. 237-245.
- [90] VIDELA, A.R., LIN, C.L., AND MILLER, J.D.: *3D characterization of individual multiphase particles in packed particle beds by X-ray microtomography (XMT)*. International Journal of Mineral Processing, 2007. **84**(1-4): S. 321-326.
- [91] THOMSON, E.: *Quantitative Microscopic Analysis*. The Journal of Geology, 1930. **38**(3): S. 29.
- [92] ROSIWAL, A.: *Über geometrische Gesteinsanalysen*. Jahrbuch der K. K. Geologischen Reichsanstalt, 1898: S. 143.
- [93] DELESSE, M.A.: *Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1847. **25**: S. 544-548.
- [94] JONES, M.P.: *Methoden der Mineralogie*. 1997, Stuttgart: Enke.
- [95] BARBERY, G.: *Determination of particle size distribution from measurements on sections*. Powder Technology, 1974. **9**(5-6): S. 231-240.
- [96] LIN, D., GOMEZ, C.O., AND FINCH, J.A.: *Comparison of stereological correction procedures for liberation measurements*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1995. **104**: S. C155-C161.

- [97] GATEAU, G. AND BROUSSAUD, A.: *New Approaches to the Interpretation of One and Two Dimensional Measurements of Mineral Liberation*. Acta Stereologica, 1986. **5**(2): S. 6.
- [98] LÄTTI, D. AND ADAIR, B.J.I.: *An assessment of stereological adjustment procedures*. Minerals Engineering, 2001. **14**(12): S. 1579-1587.
- [99] LIN, C.L., MILLER, J.D., AND HERBST, J.A.: *Solutions to the transformation equation for volumetric grade distribution from linear and/or areal grade distributions*. Powder Technology, 1987. **50**(1): S. 55-63.
- [100] HILL, G.S.: *Applications of two-dimensional image analysis to mineral liberation studies*, McGill University, Dissertation, 1990.
- [101] HILL, G.S., ROWLANDS, N., AND FINCH, J.: *Data correction in two-dimensional liberation studies*, in *Process Mineralogy VII*, A. Vassiliou, Hausen, D., and Carbon, D., Editors. 1987. S. 617-632.
- [102] LEIGH, G.M., LYMAN, G.J., AND GOTTLIEB, P.: *Stereological estimates of liberation from mineral section measurements: A rederivation of Barbary's formulae with extensions*. Powder Technology, 1996. **87**(2): S. 141-152.
- [103] GAY, S.L.: *Simple texture-based liberation modelling of ores*. Minerals Engineering, 2004. **17**(11-12): S. 1209-1216.
- [104] GAY, S.L. AND KEITH, J.M.: *Geometric probability based stereological corrections*. ANZIAM J., 2004. **45**(E): S. 14.
- [105] LIN, D., GOMEZ, C.O., AND FINCH, J.A.: *Test of barbary's liberation correction procedure*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1994. **103**: S. C91-C96.
- [106] CHIARUTTINI, C., PIGA, L., AND SCHENA, G.: *An assessment of the efficiency of a stereological correction for recovering the volumetric grade of particles from measures on polished sections*. International Journal of Mineral Processing, 1999. **57**(4): S. 303-322.
- [107] FANDRICH, R.G., SCHNEIDER, C.L., AND GAY, S.L.: *Two stereological correction methods: Allocation method and kernel transformation method*. Minerals Engineering, 1998. **11**(8): S. 707-715.
- [108] LIN, D. AND FINCH, J.A.: *Standard material for stereological correction*. Canadian Metallurgical Quarterly, 2000. **39**(2): S. 121-128.
- [109] LIN, D., LASTRA, R., AND FINCH, J.A.: *Comparison of stereological correction procedures for liberation measurements by use of a standard material*. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1999. **108**(SEPT/DEC): S. C127-C136.
- [110] SCHENA, G.D. AND ZANIN, M.: *Numerical prediction of the liberation spectrum of a two-phase texture*. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1999. **108**(JAN/APR): S. C21-C26.
- [111] SPENCER, S. AND SUTHERLAND, D.: *Stereological Correction of Mineral Liberation Grade Distributions Estimated by Single Sectioning of Particles*. Image Analysis & Stereology, 2000. **19**(3): S. 175-182.
- [112] MADAI, E.: *Limitations of Magnetic Separation in Relation to Particle Size and Susceptibility*. Aufbereitungs-Technik/Mineral Processing, 1998. **39**(8): S. 394-XIV.
- [113] DRZYMALA, J.: *Atlas of upgrading curves used in separation and in mineral science and technology: Part III*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2008. **42**: S. 75-84.

- [114] MOHANTY, M.K., HONAKER, R.Q., AND GOVINDARAJAN, B.: *Development of a characteristic flotation cleaning index for fine coal*. International Journal of Mineral Processing, 1999. **55**(3): S. 231-243.
- [115] DRZYMALA, J., LUSZCZKIEWICZ, A., AND FOSZCZ, D.: *Application of upgrading curves for evaluation of past, present, and future performance of a separation plant*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2010. **31**(3): S. 165-175.
- [116] GOVINDARAJAN, B. AND RAO, T.C.: *Indexing the washability characteristics of coal*. International Journal of Mineral Processing, 1994. **42**(3-4): S. 285-293.
- [117] DRZYMALA, J.: *Evaluation and comparison of separation performance for varying feed composition and scattered separation results*. International Journal of Mineral Processing, 2005. **75**(3-4): S. 189–196.
- [118] DRZYMALA, J.: *Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2006. **40**: S. 19-29.
- [119] DRZYMALA, J.: *Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology (Part II)*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2007. **41**: S. 27-35.
- [120] DRZYMALA, J., TYSON, D., AND WHEELLOCK, T.D.: *Presentation of particle beneficiation test results on an equal basis when yield and recovery are involved*. Minerals and Metallurgical Processing, 2007. **24**(3): S. 145–151.
- [121] DUCHNOWSKA, M. AND DRZYMALA, J.: *Self-similarity of upgrading parameters used for evaluation of separation results*. International Journal of Mineral Processing, 2012. **106-109**: S. 50-57.
- [122] DRZYMALA, J. AND AHMED, H.: *Mathematical equations for approximation of separation results using the Fuerstenau upgrading curves*. International Journal of Mineral Processing, 2005. **76**(1-2): S. 55–65.
- [123] DUCHNOWSKA, M. AND DRZYMALA, J.: *Transformation of equation  $y=a(100-x)/(a-x)$  for approximation of separation results plotted as Fuerstenau's upgrading curve for application in other upgrading curves*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2011. **47**: S. 123-130.
- [124] BAKALARZ, A. AND DRZYMALA, J.: *Interrelation of the Fuerstenau upgrading curve parameter with kinetics of separation*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2013. **49**(1): S. 8.
- [125] STIEß, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 2009: Springer.
- [126] REICHERT, M., et al.: *Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill*. Minerals Engineering, 2015. **73**: S. 109-115.
- [127] LEIßNER, T. AND PEUKER, U.A.: *Using mineral liberation analysis to evaluate minerals processing products after comminution and magnetic separation*, in *International Forum of Young Reserchers*. 2012: Sankt Petersburg. S. 9-11.
- [128] LEIßNER, T. AND PEUKER, U.A.: *Bewertung der Magnetscheidung Lithium-haltiger Glimmer am Beispiel von Zinnwaldit*. Chemie Ingenieur Technik, 2012. **84**(8): S. 1382-1382.
- [129] JOWETT, A.: *Formulae for the technical efficiency of mineral separations*. International Journal of Mineral Processing, 1975. **2**(4): S. 287-301.
- [130] HOLLAND-BATT, A.B.: *Analysis of mineral separation system by means of recovery functions*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1985. **94**: S. C17-29.

- [131] THOMPSON, R. AND OLDFIELD, F.: *Environmental Magnetism*. 1986, London: Allen & Unwin.
- [132] TURNBULL, M.M., SUGIMOTO, T., AND THOMPSON, L.K.: *Molecule-Based Magnetic Materials*. ACS Symposium Series. Band 644. 1996.
- [133] FRAAS, F.: *Linear correlation of magnetic susceptibility with the chemical composition of minerals*. 1964, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines: Washington. S. 13.
- [134] DAHLIN, D.C. AND RULE, A.R.: *Magnetic Susceptibility of Minerals in High Magnetic Fields*. 1993, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines: Washington.
- [135] BÖHM, A.: *Theoretische Aspekte der Magnetscheidung für die Praxis*. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2009. **154**(4): S. 145-151.
- [136] MARTÍN HERNÁNDEZ, F.: *Determination of fundamental magnetic anisotropy parameters in rock-forming minerals and their contributions to the magnetic fabric of rocks*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2002.
- [137] MARTÍN-HERNÁNDEZ, F., et al.: *Magnetic anisotropy different scales, different parameters, different stories?* Tectonophysics, 2009. **466**(1-2): S. 1-2.
- [138] MARTÍN-HERNÁNDEZ, F. AND HIRT, A.M.: *The anisotropy of magnetic susceptibility in biotite, muscovite and chlorite single crystals*. Tectonophysics, 2003. **367**(1-2): S. 13-28.
- [139] HROUDA, F. AND KAPIČKA, A.: *The effect of quartz on the magnetic anisotropy of quartzite*. Studia Geophysica et Geodaetica, 1986. **30**(1): S. 39-45.
- [140] LITOVCHENKO, A.S., BRODOVOI, A.V., AND MELNIKOV, A.A.: *Study of the Temperature Dependences of Magnetic Susceptibilities and <sup>7</sup>Li NMR Spectra of Ferriferous Micas*. physica status solidi (a), 1982. **73**(1): S. K79-K82.
- [141] MCANDREW, J.: *Calibration of a Frantz Isodynamic Separator and its application to mineral separation*. Proc. Australas. Inst. Min. Metall., 1957(181): S. 59-73.
- [142] WOOLCOCK, J. AND ZAFAR, A.: *Microscale Techniques For Determination of Magnetic Susceptibility*. Journal of Chemical Education, 1992. **69**(6): S. A176-A178.
- [143] TYSON, J.F., LARUE, R.M., AND BODANSKI, S.: *Detection by magnetic susceptibility for flow analysis procedures*. Analytica Chimica Acta, 1991. **261**: S. 29-38.
- [144] FONER, S.: *Vibrating sample magnetometer*. Review of Scientific Instruments, 1956. **27**(7): S. 548.
- [145] FONER, S.: *Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer*. Review of Scientific Instruments, 1959. **30**(7): S. 548-557.
- [146] MARCON, P. AND OSPANINA, K.: *Overview of Methods for Magnetic Susceptibility Measurement*, in *PIERS - Progress In Electromagnetics Research Symposium*. 2012: Kuala Lumpur, Malaysia. S. 420-424.
- [147] CAVANOUGH, G. AND HOLTHAM, P.N.: *On-line measurement of magnetic susceptibility for titanium minerals processing*. AusIMM Proceedings, 2001. **306**(1): S. 29-34.
- [148] CAVANOUGH, G. AND HOLTHAM, P.N.: *Rapid Characterization of Magnetic Separator Feed Stocks in Titanium Minerals Processing*. Physical Separation in Science and Engineering, 2004. **13**(3-4): S. 141-152.
- [149] CAVANOUGH, G.L., HOLTHAM, P.N., AND POWELL, T.M.: *Magnetic susceptibility measurement applied to the minerals industry*. Minerals Engineering, 2006. **19**(15): S. 1588-1595.
- [150] FINOT, E., et al.: *Measuring magnetic susceptibilities of nanogram quantities of materials using microcantilevers*. Ultramicroscopy, 2001. **86**(1-2): S. 175-180.

- [151] NESSET, J.E. AND FINCH, J.A.: *Determination of magnetic parameters for field-dependent susceptibility minerals by Frantz isodynamic separator*. Trans. Instn Min. Metall., 1980(89): S. C161-C166.
- [152] ROSENBLUM, S.: *Magnetic susceptibilities of minerals in the Frantz Isodynamic Magnetic Separator*. The American Mineralogist, 1958. **43**: S. 170-173.
- [153] MURTY, M.S.: *Magnetic susceptibilities of orthopyroxenes in the Frantz Isodynamic separator*. Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A, 1963. **57**(6): S. 337-342.
- [154] DOBBY, G., NESSET, J., AND FINCH, J.A.: *Mineral recovery by high gradient magnetic separation*. Canadian Metallurgical Quarterly, 1979. **18**(3): S. 293-301.
- [155] JORDENS, A., et al.: *Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation*. Minerals Engineering, 2014. **62**(0): S. 9-18.
- [156] FRAAS, F.: *Magnetic separation of minerals of low susceptibility and small particle size*. 1969, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines: Washington. S. 18.
- [157] MURARIU, V. AND SVOBODA, J.: *The applicability of Davis tube tests to ore separation by drum magnetic separators*. Physical Separation in Science and Engineering, 2003. **12**(1): S. 1-11.
- [158] ERSAYIN, S.: *Low intensity magnetic separator modelling: A pseudo liberation approach*. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2004. **113**(3): S. 167-174.
- [159] HEINISCH, S.: *Berechnung der Mineralsuszeptibilität anhand der Suszeptibilität von Mineralgemischen*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Masterarbeit, 2014.
- [160] BAUMANN, L., KUSCHKA, E., AND SEIFERT, T.: *Lagerstätten des Erzgebirges*. 2000, Stuttgart: Enke im Thieme Verlag.
- [161] WEBSTER, J., et al.: *Geochemical evolution of halogen-enriched granite magmas and mineralizing fluids of the Zinnwald tin-tungsten mining district, Erzgebirge, Germany*. Mineralium Deposita, 2004. **39**(4): S. 452-472.
- [162] LEIßNER, T., et al.: *Mineral processing of lithium-bearing mica*, in XXVI International Mineral Processing Congress IMPC 2012 - Conference Proceedings. 2012, Indian Institute of Metals: New Delhi. S. 2811-2820.
- [163] RIEDER, M., et al.: *Chemical composition and physical properties of lithium-iron micas from the Krušné hory Mts. (Erzgebirge)*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1970. **27**(2): S. 131-158.
- [164] RIEDER, M., et al.: *Refinement of the crystal structure of zinnwaldite 2M1*. European Journal of Mineralogy, 1996. **8**(6): S. 1241-1248.
- [165] PLATONOV, A.N., KHOMENKO, V.M., AND SHURIGA, T.N.: *Optical absorption spectra and Fe distribution in the structures of Li-Fe micas*. Geochemistry International, 2009. **47**(2): S. 174-185.
- [166] ANTHONY, J.W., et al.: *Handbook of Mineralogy*. 2011, Chantilly, VA 20151-1110, USA.
- [167] TISCHENDORF, G.: *On Li-Bearing Micas: Estimating Li from Electron Microprobe Analyses and an Improved Diagram for Graphical Representation*. Mineralogical Magazine, 1997. **61**(409): S. 809-834.
- [168] POPOV, O. AND SCHREIBER, S.: *Untersuchungsergebnisse von Greisen aus Altenberg*. 2011, Institut für Aufbereitungsmaschinen: Interner Bericht. S. 32.
- [169] BOTULA, J., RUCKÝ, P., AND ŘEPKA, V.: *Extraction of zinnwaldite from mining and processing wastes*. Mining and Geological Series, 2005(2): S. 9-16.

- [170] SANDMANN, D. AND GUTZMER, J.: *Mineral liberation analysis of lithium-bearing micas from the Eastern Erzgebirge, Saxony, Germany*, in *11th Biennial Meeting SGA 2011. Let's talk ore deposits.*, D. Society of Geology Applied to Mineral, Editor. 2011: Anfogagasta, Chile. S. 967-969.
- [171] GUILLET, G.R.: *Nepheline Syenite*, in *Industrial Minerals and Rocks*. 1994. S. 711-730.
- [172] SJÖQVIST, A., et al.: *Three Compositional Varieties of Rare-Earth Element Ore: Eudialyte-Group Minerals from the Norra Kärr Alkaline Complex, Southern Sweden*. *Minerals*, 2013. **3**(1): S. 94-120.
- [173] BLUEMEL, B., et al.: *Biogeochemical expression of rare earth element and zirconium mineralization at Norra Kärr, Southern Sweden*. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013. **133**: S. 15-24.
- [174] RUDOLPH, M. AND PEUKER, U.A.: *Mapping Hydrophobicity combining AFM and Raman Spectroscopy*. *Minerals Engineering*, 2014(article in press).
- [175] FERRON, C.J. AND RAWLING, K.R.: *Recovery of Eudialyte from a Greenland ore by magnetic separation*, in *SME Annual Meeting*. 1993, Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Reno, Nevada. S. 1-10.
- [176] FERRON, C.J., BULATOVIC, S.M., AND SALTER, R.S.: *Beneficiation of Rare Earth Oxide Minerals*. *Materials Science Forum*, 1991. **70-72**: S. 251-270.
- [177] POPOV, O.: *Beitrag zur mathematisch-petrographischen Gefügecharakterisierung für die Beurteilung der Festgesteine hinsichtlich ihrer Aufbereitung und ihrer Produkteigenschaften*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2007.
- [178] KUCHINKE, C.: *Untersuchung zur Aufschlusszerkleinerung des Zinnwaldit-Erzes und Anreicherung der Li-haltigen Glimmer*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Diplomarbeit, 2012.
- [179] KAMPTNER, A. AND GRANDISSA, K.: *Bericht Nr. 0506-13-01, Zerkleinerung und Siebfraktionierung von Erzproben*. 2013, UVR-FIA Verfahrensentwicklung-Umweltschutztechnik-Recycling GmbH: Freiberg. S. 9.
- [180] ZILLER, M.: *Untersuchung der Glimmer aus der Lagerstätte Zinnwald auf ihre Suszeptibilität und Elementgehalte unter aufbereitungstechnischen Gesichtspunkten*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Masterarbeit, 2013.
- [181] ALTHAUS, E.: *Die Atom-Absorptions-Spektralphotometrie - ein neues Hilfsmittel zur Mineralanalyse*. *Neues Jahrbuch der Mineralogie*, 1966(9): S. 259-280.
- [182] BILLINGS, G.K. AND ADAMS, J.A.S.: *The analysis of geological materials by atomic absorption spectrometry*. *Atomic Absorption Newsletter*, 1964(23): S. 1-7.
- [183] LUECKE, W.: *Physikalische und chemische Interferenzen bei der AAS-Alkalibestimmung in Gesteinen und Mineralen*. *Chemie der Erde*, 1979(38): S. 1-39.
- [184] WELZ, B.: *Atomabsorptionsspektrometrie*. 3. Auflage. 1983, Weinheim: Verlag Chemie.
- [185] HEINRICH, H. AND HERRMANN, A.G.: *Praktikum der analytischen Geochemie*. 1990, Berlin Heidelberg: Springer.
- [186] LUECKE, W.: *Matrixeinflüsse auf die AAS-Spurenelementbestimmung in geochemisch unterschiedlichen Gesteinstypen*. *Chemical Geology*, 1977. **20**: S. 265-278.
- [187] BOCK, R.: *Handbuch der analytisch-chemischen Aufschlussmethoden*. 2001, Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH.

- [188] GERDES, E.: *Qualitative anorganische Analyse: ein Begleiter für Theorie und Praxis*. 2. Auflage. 2001, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- [189] LUECKE, W.: *Voraussetzungen für richtige atomspektrometrische Analyseergebnisse in der Geochemie*. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1987. **329**(5): S. 571-577.
- [190] CHEHREH CHELGANI, S., et al.: *Study of the relationship between zinnwaldite chemical composition and magnetic susceptibility*. Minerals Engineering, 2015. **72**: S. 27-30.
- [191] MATOS CAMACHO, S.: *Persönliche Mitteilung zum Vorgehen der Berechnung von Mineralsuszeptibilität bei unbestimmten Gleichungssystemen über statistische Ansätze*. 2014.
- [192] SANDMANN, D. AND GUTZMER, J.: *Use of Mineral Liberation Analysis (MLA) in the Characterization of Lithium-Bearing Micas*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2013. **01**(06): S. 285-292.
- [193] KING, R.P.: *Modeling and Simulation. Of Mineral Processing Systems*. 2. ed. Auflage, Hrsg. C.L. Schneider. 2012, Englewood Colo.: Society for Mining Metallurgy, and Exploration. IX, 480 S. .:
- [194] RÖSSIGER: *Magnetische Eigenschaften von Mineralen, Erzen und Gesteinen*, in *Landolt-Börnstein*. 1962. S. 331 -348.
- [195] DEARING, J.: *Environmental magnetic susceptibility: Using the Barington MS2 system*. 1999.
- [196] GZOGYAN, T.N. AND GZOGYAN, S.R.: *Effect of silicate mineral properties on upgrading of ferruginous quartzites*. Journal of Mining Science, 2010. **46**(6): S. 695-699.
- [197] WORM, H.U., CLARK, D., AND DEKKERS, M.J.: *Magnetic susceptibility of pyrrhotite: grain size, field and frequency dependence*. Geophysical Journal International, 1993. **114**(1): S. 127-137.
- [198] OKRUSCH, M. AND MATTHES, S.: *Mineralogie*. 2010, Berlin, Heidelberg: Springer.
- [199] LAUTENSCHLÄGER, K.-H., SCHRÖTER, W., AND WANNINGER, A.: *Taschenbuch der Chemie*. 20., überarb. und erw. Auflage. 2005, Frankfurt am Main: Deutsch.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untergliederung des mechanischen Aufschlusses in drei wesentliche Brucharten .....	- 6 -
Abbildung 2: Zerkleinertes binäres Erzsyst. Die erste Zahl gibt die Fläche der Phase A, die zweite Zahl die Gesamtfläche des Partikelschliffes an.....	- 10 -
Abbildung 3: HALBICH-Diagramm mit den Aufschlussgraden nach GAUDIN und BÉRUBÉ für das Beispielerz aus Abbildung 2 .....	- 11 -
Abbildung 4: HENRY-REINHARDT-Diagramm (links) und MAYER-Diagramm in abgewandelter Form (rechts) für eine Dichtentrennung des Beispielerzes aus Abbildung 2 .....	- 13 -
Abbildung 5: Vom Aufgabengehalt unabhängige Darstellungen von Verwachsungskurven: FUERSTENAU-2-Diagramm (links) und Trennungsgradkurve (rechts) für eine Dichtentrennung des Beispielerzes aus Abbildung 2 .....	- 13 -
Abbildung 6: Beispiel einer automatischen mineralogischen Analyse mit Graustufenbild (links), EDX-Spektrum (Mitte) und nach Mineralen unterschiedlich eingefärbtes Ergebnisbild (rechts).....	- 19 -
Abbildung 7: Computertomographisches Bild eines Gemisches aus Quarz, Topas und Glimmer (Abmessung 3,5 x 3,5 x 2,5 mm <sup>3</sup> ). Blick auf 3 begrenzende Seitenflächen (links) und Darstellung abzüglich der Trägermatrix des Präparats (rechts).....	- 23 -
Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung des stereologischen Fehlers bei der Betrachtung eines Partikels aus dem Modellerz von Abbildung 2 .....	- 24 -
Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung für eine gemessene und eine wirklich vorliegende Verwachsungsverteilung. Die frei vorliegenden Phasen werden zu Ungunsten der Klassen verwachsener Partikel überrepräsentiert. ....	- 25 -
Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Einflussfaktoren bei der Trennung eines Partikels nach dem Merkmal $\xi$ . Die Richtungen der Kräfte, Felder und strömenden Medien hängen vom Aufbau des Trennapparates ab.....	- 34 -
Abbildung 11: Grundprinzip eines Sortierprozesses bei der Trennung in zwei Produkte .....	- 35 -
Abbildung 12: Anreicherungskurven und theoretische Grenzen der Anreicherung des Wertstoffes im MAYER-Diagramm (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts).....	- 41 -

Abbildung 13: Beispiel einer Trennfunktion mit Trennschnitt $\xi_T$ sowie den Merkmalswerten für das untere und das obere Quartil, gebildet aus diskreten Klassenwerten.....	- 47 -
Abbildung 14: Auftragung vom Wertstoffausbringen über dem Bergeausbringen mit Verwachungs- $u(R_{2,c})$ und Sortierkurve $s(R_{2,c})$ .....	- 50 -
Abbildung 15: Auftragung des Trennungsgrades über dem Wertstoffausbringen mit einer Verwachungs- und einer Sortierkurve (gleiche Zahlenwerte wie Abbildung 14) .....	- 52 -
Abbildung 16: Beispielkurven für eine Klaubung nach dem Wertstoffgehalt und eine Trennung nach anderen Merkmalen.....	- 56 -
Abbildung 17: FUERSTENAU-2-Diagramm mit einer Beispielkurve und Linien gleichbleibenden Konzentratgehalts (Isogehaltenlinien) .....	- 58 -
Abbildung 18: Prinzipieller Verlauf der Erfolgskennzahlen und der Prozesskennzahl über der Partikelgröße .....	- 60 -
Abbildung 19. Lage der Verteilungssumme gegenüber den Kurven der Erfolgskennzahlen (Gleichungen (56) und (57)).....	- 62 -
Abbildung 20: Einfluss des stereologischen Fehlers auf die Trennfunktion (links) und das HALBICH-Diagramm (rechts).....	- 63 -
Abbildung 21: Aufbau von Magnetwaagen nach dem FARADAY- und GOUY-Prinzip. ....	- 73 -
Abbildung 22: Prinzipskizze eines FRANTZ-Isodynamik-Scheiders (links) und das Kräftegleichgewicht am Partikel auf der Schurre (rechts).....	- 75 -
Abbildung 23: Schematische Darstellung von Magnetscheider unterschiedlichen Funktionsprinzips .....	- 78 -
Abbildung 24: Prinzipskizze eines Band-Ring-Scheiders im Längsschnitt .....	- 86 -
Abbildung 25: Prinzipskizze zum Messsystem der Suszeptibilitätswaage.....	- 92 -
Abbildung 26: Zusammenhang von Stromstärke und Suszeptibilität am Isodynamik-Scheider für die beiden untersuchten Erzsyste (Greisenerz und Nephelin-Syenit).....	- 99 -
Abbildung 27: Suszeptibilitätsverteilungssumme und -dichte für verschiedene Größenklassen des Greisenerzes .....	- 100 -
Abbildung 28: Suszeptibilitätsverteilungssumme und -dichte für verschiedene Größenklassen des Nephelin-Syenits .....	- 100 -

Abbildung 29: Zusammenhang von Lithiumgehalt und Eisengehalt unterschiedlicher Magnetisierbarkeitsklassen der Größenklassen des Greisenerzes .....	- 103 -
Abbildung 30: Zusammenhang aus Zinnwalditgehalt und Suszeptibilität für die Produkte der Trennung des Greisenerzes mithilfe des Isodynamik-Scheiders. Die Pfeile symbolisieren die Richtung zunehmender Magnetisierbarkeit und stellen gleichzeitig die Reihenfolge der Proben in den Trennungsversuchen dar. ....	- 103 -
Abbildung 31: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwalditpartikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,1 – 0,2 mm .....	- 104 -
Abbildung 32: Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität und chemischer Zusammensetzung des Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klasse 3)-	105 -
Abbildung 33: Gegenüberstellung der Zusammensetzung von Magnetisierbarkeitsklassen des zerkleinerten Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klassen 3 und 5) .....	- 106 -
Abbildung 34: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilungen von der zweiten bis zur vierten Zerkleinerungsstufe.....	- 109 -
Abbildung 35: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilungssumme und des nasschemisch ermittelten Zinnwalditgehalts über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einem Kegelbrecher und anschließender Nachmahlung des +1 mm in einer Walzenmühle .....	- 110 -
Abbildung 36: Partikelgrößenverteilung und Gehalt an magnetischen Bestandteilen über der Partikelgröße für verschiedene Zerkleinerungsprodukte des Nephelin-Syenits .....	- 111 -
Abbildung 37: Aufschlussgrad und Aufschlussersfolgzahl in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes mithilfe verschiedener Zerkleinerungsmaschinen.....	- 112 -
Abbildung 38: Verlauf von Aufschlusskennwerten des Kugelmühlenversuches (links) und Anteile ausgewählter Minerale in den Verwachsungsklassen der Größenklasse 0,1...0,2 mm .....	- 114 -

Abbildung 39: Verwachsungsverhältnisse in Abhängigkeit der Partikelgröße für das zerkleinerte Greisenerz am Beispiel von Zinnwaldit, Muskovit, Limonit und Columbit .....	- 115 -
Abbildung 40: Aufschlussgrad und Aufschlusserfolgzahl der magnetischen Bestandteile in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Nephelin-Syenits auf unterschiedliche Produktfeinheiten.....	- 116 -
Abbildung 41: Verwachsungsverhältnisse von Eudialyt, Aegirin und Augit in Abhängigkeit von der Partikelgrößenklasse für das Material aus Versuchsreihe NK1 .....	- 117 -
Abbildung 42: Vergleich der Aufschlusserfolgzahl $B_A$ und des theoretisch maximalen Trennungsgrades $\eta_{\max}$ für beide untersuchte Erzsysteeme .....	- 118 -
Abbildung 43: Effekt klassierten und nicht klassierten Probematerials auf das Ergebnis der Aufschlussanalyse am Beispiel des Nephelin-Syenits .....	- 119 -
Abbildung 44: Darstellung der Grenzkurven nach unterschiedlichen Merkmalen im HALBICH-Diagramm (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Partikelgrößenklasse 0...0,1 mm des Greisenerzes. Den Wertstoff stellt das Mineral Zinnwaldit dar.....	- 120 -
Abbildung 45: Darstellung der Grenzkurven nach unterschiedlichen Merkmalen im HALBICH-Diagramm (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Partikelgrößenklasse 0...0,1 mm des Greisenerzes. Den Wertstoff stellen alle Minerale nennenswerten Magnetismus dar. ....	- 124 -
Abbildung 46: Darstellung der nicht transformierten und der transformierten Verteilung des Wertminerals für das Greisenerz (links) und das Nephelin-Syenit-Erz (rechts).....	- 125 -
Abbildung 47: Stereologischer Einfluss auf die Aufschlusskennwerte für Zinnwaldit im Greisenerz (Produkt der Kugelmühle) .....	- 126 -
Abbildung 48: Stereologischer Einfluss auf die Aufschlusskennwerte für Eudialyt im Nephelin-Syenit (Reihe NK1).....	- 127 -
Abbildung 49: Vergleich der relativen Kennwertabweichung für den Zinnwalder Greisen (Kugelmühlenprodukt) und den Nephelin-Syenit (Reihe NK1).....	- 128 -
Abbildung 50: Wertstoffgehalt im Konzentrat in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte.....	- 129 -

Abbildung 51: Trennungsgrad in Abhängigkeit von der Partikelgröße für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte-	130 -
Abbildung 52: Wertstoffgehalt im Konzentrat in Abhängigkeit des Wertstoffausbringens für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte.....	- 131 -
Abbildung 53: Wertstoffausbringen in Abhängigkeit vom Bergeausbringen für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte .....	- 132 -
Abbildung 54: Trennungsgrad in Abhängigkeit vom Wertstoffausbringen für die Magnetscheidung der Größenklassen verschiedener Zerkleinerungsprodukte-	133 -
Abbildung 55: HALBICH- (links) und FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Greisenerzes auf dem Isodynamik-Scheider .....	- 134 -
Abbildung 56: HALBICH- (links) und FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts) für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Nephelin-Syenits auf dem Band-Ring-Scheider.....	- 135 -
Abbildung 57: Darstellung des Korrelationskoeffizienten für die Anpassung der Funktionen aus Tabelle 2 an die Versuchsdaten der Trennung des Greisenerzes auf dem Isodynamik-Scheider.....	- 137 -
Abbildung 58: Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes der Walzenmühle .....	- 140 -
Abbildung 59: Trennsuszeptibilität und Trennschärfe für die Magnetscheidung der Zerkleinerungsprodukte von Kegelmühle, Walzenmühle und Kugelmühle .....	- 140 -
Abbildung 60: Histogramm der Partikelanzahl je Suszeptibilitätsklasse für eine feinkörnige und eine grobkörnige Größenklassen des Kugelmühlenproduktes (0,9 mm Austragsmaschenweite).....	- 141 -
Abbildung 61: Trennfunktionen der Versuche mit Nephelin-Syenit. Links: Über die Zerlegung der Produkte in Merkmalklassen ermittelte Trennfunktionen; Rechts: Vergleich einer labortechnisch ermittelten mit einer aus Aufschlussanalysen berechneten Trennfunktion für die Reihe NK2-3210.....	- 142 -

Abbildung 62: Verlauf der Erfolgskennzahlen über der Partikelgröße für die Trennung des Greisenerzes auf einem Band-Ring-Scheider und einem Isodynamik-Scheider .....	- 145 -
Abbildung 63: Verlauf der Erfolgskennzahlen zur Anreicherung der magnetischen Komponenten des Nephelin-Syenits über der Partikelgröße .....	- 146 -
Abbildung 64: Gegenüberstellung der laut Verwachsungsverteilung maximal möglichen Trennungsgrade für die Reihen SN1 und SN2 und der im Versuch erreichten Trennungsgrade .....	- 148 -
Abbildung 65: Vergleich der Trennungsgrade für den mechanischen Aufschluss, die Sortierung und Anreicherung mithilfe des Band-Ring-Scheiders und des Isodynamik-Scheiders für das Greisenerz.....	- 149 -
Abbildung 66: Vergleich der Trennungsgrade für den mechanischen Aufschluss, die Sortierung und Anreicherung mithilfe des Band-Ring-Scheiders und des Isodynamik-Scheiders für den Nephelin-Syenit.....	- 150 -
Abbildung 67: Verlauf der Prozesskennzahlen $Z_B$ und $Z_\eta$ gegen die Partikelgröße für die Trennung des Greisenerzes mithilfe des Isodynamik- und des Band-Ring-Scheiders .....	- 151 -
Abbildung 68: Verlauf der Prozesskennzahlen $Z_B$ und $Z_\eta$ gegen die Partikelgröße für die Trennung des Nephelin-Syenits mithilfe des Isodynamik- und des Band-Ring-Scheiders .....	- 153 -
Abbildung 69: HALBICH- und FUERSTENAU-2-Diagramm des Beispielpartikel-systems .....	- 188 -
Abbildung 70: Vergleich der Verwachsungskurven für die vier Partikelsysteme des Beispiels aus Tabelle 3 als Darstellungen im HALBICH- (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts).....	- 188 -
Abbildung 71: Beispielhafte Darstellung eines ANDREWS-MIKA-Diagramms mit Bereich für Vorfahren und Nachfahren eines Ausgangspartikels A.....	- 189 -
Abbildung 72: Beispiel eines ANDREWS-MIKA-Diagramms für den Einsatz in Simulationen (übernommen aus [14]) .....	- 189 -
Abbildung 73: Beispiel für u-förmige Verwachsungsverteilungsdichten. Links: Verwachsungsverteilungsdichte als Funktion des Volumenanteils; Rechts: Verwachsungsverteilungsdichte für ein zweiphasiges System mit unterschiedlichen Dichtedifferenzen.....	- 190 -

Abbildung 74: Einfluss des stereologischen Fehlers auf die Grenzkurve im Fuerstenau-2-Diagramm. Die Werte gehören zum Beispiel aus Abbildung 9. -	191 -
Abbildung 75: Darstellung der Flächen zur Berechnung des Waschindex nach dem Modell von GOVINDARAJAN [116].....	191 -
Abbildung 76: Darstellung der Flächen zur Berechnung des Flotationsindex nach MOHANTY [114].....	192 -
Abbildung 77: Zusammenhang des relativen Fehlers zwischen Stoff- und Körpersuszeptibilität für zwei verschiedene Entmagnetisierungsfaktoren. ....	195 -
Abbildung 78: Gemessene magnetische Suszeptibilität von Topas und Muskovit in Abhängigkeit der Partikelgröße .....	196 -
Abbildung 79: Bestimmung der Suszeptibilität für Zinnwaldit, basierend auf linearen Anpassungsfunktionen .....	196 -
Abbildung 80: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwaldit- partikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0 – 0,1 mm .....	197 -
Abbildung 81: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwaldit- partikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,2 – 0,315 mm .....	197 -
Abbildung 82: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwaldit- partikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,315 – 0,5 mm .....	198 -
Abbildung 83: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwaldit- partikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,5 – 0,8 mm .....	198 -
Abbildung 84: Zusammenhang von rechnerisch ermittelter Suszeptibilität, Trennstromstärke und seitlicher Neigung der Schurre am Isodynamik- Scheider (links) sowie Einfluss der Schrittweite auf die Breite der Suszeptibilitätsklassen (rechts), Grundlage der Berechnung Formel (70).....	215 -

Abbildung 85: Zusammenhang von eingestellter Trennstromstärke und resultierender magnetischer Flussdichte am Band-Ring-Scheider bei einer Spaltweite von 2 mm .....	- 216 -
Abbildung 86: Fließbild der Trennungsversuche bei steigender Magnetisierung	- 216 -
Abbildung 87: Fließbild der Trennungsversuche bei abnehmender Magnetisierung .....	- 216 -
Abbildung 88: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen aus der 4. Zerkleinerungsstufe .....	- 217 -
Abbildung 89: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einem Flachkegelbrecher bei 5 mm Spaltweite .....	- 221 -
Abbildung 90: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Siebkugelmühle bei 0,9 mm Austragsmaschenweite .....	- 221 -
Abbildung 91: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Siebkugelmühle bei 0,9 und 1,4 mm Austragsmaschenweite ..	- 222 -
Abbildung 92: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Hammer- und einer Schlagnasenmühle bei jeweils 3,15 mm Austragsmaschenweite .....	- 222 -
Abbildung 93: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Schwingmühle bei unterschiedlicher Intensität und gleicher Mahldauer (60 s) .....	- 222 -
Abbildung 94: Zinnwalditgehalt und Aufschlusskoeffizient in Abhängigkeit der Partikelgröße und der Zerkleinerung in unterschiedlichen Maschinen .....	- 223 -
Abbildung 95: Darstellung des relativen Anteils verschiedener Minerale an den Verwachsungsklassen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Greisenerzes nach der Zerkleinerung in der Kugelmühle .....	- 223 -
Abbildung 96: Zusammenstellung der HALBICH-Diagramme für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen .....	- 224 -

Abbildung 97: Zusammenstellung der FUERSTENAU-2-Diagramme für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen	- 225 -
Abbildung 98: Zusammenstellung der Trennungsgraddiagramme für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen	- 226 -
Abbildung 99: Zusammenstellung der Formfaktoren für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen.....	- 227 -
Abbildung 100: Gegenüberstellung der HALBICH-Diagramme unterschiedlicher Partikelgrößenklassen der Messreihen SN-1 und SN-2 .....	- 228 -
Abbildung 101: Gegenüberstellung der Formfaktoren für Zinnwalditphasen in Abhängigkeit vom Wertstoffgehalt des Partikels und der Partikelgrößenklasse für die Messreihen SN-1 und SN-2.....	- 229 -
Abbildung 102: Einfluss klassierten und nicht klassierten Probematerials auf das Ergebnis der Aufschlussanalyse am Beispiel des Greisenerzes .....	- 230 -
Abbildung 103: Zusammenhang von Suszeptibilität und ausgetragenen Masseanteil für die Produkte der Trennung des Greisenerzes am Isodynamik-Scheider .....	- 233 -
Abbildung 104: HALBICH- und FUERSTENAU-2-Diagramm für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Greisenerzes auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 234 -
Abbildung 105: Trennungsgraddiagramme für die Trennung des Greisenerzes mithilfe des Isodynamik-Scheiders (links) und des Band-Ring-Scheiders (rechts) .....	- 234 -
Abbildung 106: Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes vom Kegelmüller .....	- 234 -
Abbildung 107: Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes der Kugelmühle .....	- 235 -
Abbildung 108: Gegenüberstellung der laut Verwachsungsverteilung maximal möglichen und der im Versuch erreichten Trennungsgrade für die Magnetscheidung des Greisenerzes aus den Walzenmühlen- und Kegelmüllerversuchen.....	- 236 -
Abbildung 109: Gegenüberstellung der laut Verwachsungsverteilung maximal möglichen und der im Versuch erreichten Trennungsgrade für die Magnetscheidung des Greisenerzes aus den Kugelmüllerversuchen .....	- 236 -
Abbildung 110: Verwachsungskurven des Nephelin-Syenits (Reihe NK1) .....	- 239 -

Abbildung 111: Verwachsungskurven des Nephelin-Syenits (Reihe NK2) .....	- 240 -
Abbildung 112: HALBICH- und FUERSTENAU-2-Diagramm für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Nephelin-Syenits auf dem Isodynamik-Scheider. -	240 -
Abbildung 113: Trennungsgraddiagramme für die Trennung des Nephelyn- Syenits mithilfe des Isodynamikscheiders (links) und des Band-Ring- Scheiders (rechts) .....	- 241 -
Abbildung 114: Anreicherungsfaktoren in Abhängigkeit von der Magnetisier- barkeitsklasse des Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klassen 3 und 5).....	- 241 -
Abbildung 115: Ausbringenswerte in Abhängigkeit von der Magnetisierbar- keitsklasse des Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klassen 3 und 5).....	- 241 -
Abbildung 116: Mineralgehalt der Suszeptibilitätsklassen in Abhängigkeit von ihrer Suszeptibilität (links) und HALBICH-Diagramm für Eudialyt und Aegirin (rechts) für die Reihe NK1-3.....	- 242 -
Abbildung 117: Mineralgehalt der Suszeptibilitätsklassen in Abhängigkeit ihrer Suszeptibilität (links) und HALBICH-Diagramm für Eudialyt und Aegirin (rechts) für die Reihe NK1-5.....	- 242 -
Abbildung 118: Gegenüberstellung der je Stromstärke ausgetragenen Massenanteile für die Trennungsversuche des Nephelin-Syenits am Band- Ring-Scheider (Trennung beginnend bei geringster Stromstärke) .....	- 242 -
Abbildung 119: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen für transformierte und nicht transformierte Aufschlussresultate. Links: Greisenerz, Partikel- größenklasse 0,2...0,315 mm; Rechts: Nephelin-Syenit, Größenklasse 0,125...0,25 mm .....	- 244 -
Abbildung 120: Vergleich transformierter und nicht transformierter Verwachs- ungskurven für Zinnwaldit im Greisenerzes (Produkt der Kugelmühle, Fraktion 0,2...0,315 mm) .....	- 244 -
Abbildung 121: Vergleich transformierter und nicht transformierter Verwachs- ungskurven für Eudialyt im Nephelin-Syenit (Reihe NK1, Fraktion 0,125...0,25 mm) .....	- 244 -
Abbildung 122: Vergleich stereologisch transformierter und nicht transformierter Aufschlussdaten im HALBICH-Diagramm für Quarz in den Bergen und im Konzentrat der Magnetscheidung des Kugelmühlenproduktes (Größenklasse 0,2...0,315 mm) .....	- 245 -

Abbildung 123: Vergleich stereologisch transformierter und nicht transformierter Aufschlussdaten im HALBICH-Diagramm für Zinnwaldit in den Bergen und im Konzentrat der Magnetscheidung des Kugelmühlenproduktes (Größenklasse 0,2...0,315 mm) .....	- 245 -
Abbildung 124: Vergleich stereologisch transformierter und nicht transformierter Aufschlussdaten im HALBICH-Diagramm für Muskovit in den Bergen und im Konzentrat der Magnetscheidung des Kugelmühlenproduktes (Größenklasse 0,2...0,315 mm) .....	- 245 -
Abbildung 125: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Greisenerzes auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 246 -
Abbildung 126: Darstellung der Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Greisenerzes am Isodynamik-Scheider (Größenklassen 0...0,1 mm und 0,5...0,8 mm).....	- 247 -
Abbildung 127: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Nephelin-Syenits auf dem Isodynamik-Scheider .....	- 248 -
Abbildung 128: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Nephelin-Syenits auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 248 -
Abbildung 129: Anpassung der Gleichung (27) an die Versuchsergebnisse der Trennung des Nephelin-Syenits (Isodynamik-Scheider: NK1-3 und NK1-5; Band-Ring-Scheider: NK2-3, NK2-4, NK2-5 und NK2-6) .....	- 249 -

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Anreicherungskurven mit und ohne direkter Abhängigkeit vom Aufgabegehalt.....	- 39 -
Tabelle 2: Zusammenstellung verschiedener Gleichungen zur Anpassung an Sortierergebnisse im FUERSTENAU-2-Diagramm. Formeln bei denen in der Spalte zur Quelle ein * angegeben ist, stellen selbst gewählte Anpassungsgleichungen dar. ....	- 45 -
Tabelle 3: Darstellung der Aufschlussparameter vier verschiedener Zerkleinerungsprodukte des gleichen Ausgangsmaterials (grau: Wertmineral, weiß: Berge).....	- 53 -
Tabelle 4: Magnetische Suszeptibilitäten der Komponenten der synthetischen Mischungen .....	- 81 -
Tabelle 5: Parameter der eingesetzten Zerkleinerungsmaschinen.....	- 84 -
Tabelle 6: Untersuchte Größenklassen der Erze .....	- 85 -
Tabelle 7: Übersicht der Trennversuche am Band-Ring-Scheider.....	- 87 -
Tabelle 8: Zusammenstellung der Parameter der Trennungsversuche am Isodynamik-Scheider .....	- 88 -
Tabelle 9: Gegenüberstellung von gemessenen Suszeptibilitäten und Literaturwerten verschiedener reiner Minerale .....	- 102 -
Tabelle 10: Eigenschaften und Kennwerte des Beispielpartikelsystems .....	- 187 -
Tabelle 11: Zusammensetzung und Kennwerte des Beispielpartikelsystems ....	- 187 -
Tabelle 12: Umrechnung zwischen SI- und cgs-Einheiten wichtiger magnetischer Größen.....	- 195 -
Tabelle 13: Gemessene magnetische Suszeptibilität in $10^{-9}$ m <sup>3</sup> /kg von Muskovit und Topas in Abhängigkeit der Partikelgröße .....	- 196 -
Tabelle 14: Gemessene Suszeptibilität in $10^{-9}$ m <sup>3</sup> /kg von Quarz, Kochsalz und Kalkstein in Abhängigkeit von der Partikelgröße nach [159].....	- 198 -
Tabelle 15: Suszeptibilitätswerte der Fraktionen aus der Trennung am Isodynamik-Scheider für die Größenklassen 0...0,1 mm; 0,1...0,2 mm und 0,2...0,315 mm des Greisenerzes .....	- 199 -
Tabelle 16: Suszeptibilitätswerte der Fraktionen aus der Trennung am Isodynamik-Scheider für die Größenklassen 0,315...0,5 mm und 0,5...0,8 mm des Greisenerzes .....	- 199 -

Tabelle 17: Suszeptibilitätswerte der Fraktionen aus der Trennung am Isodynamik-Scheider für die Größenklassen 0,5...1,0 mm (NK1-3); 0,25...0,5 mm (NK1-4) und 0,125...0,25 mm (NK1-5) des Nephelin-Syenit....	- 199 -
Tabelle 18: Suszeptibilitätswerte der Magnetisierbarkeitsklassen für die Produkte aus der Trennung des Nephelin-Syenit am Band-Ring-Scheider (Reihe NK2-3210) .....	- 200 -
Tabelle 19: Suszeptibilitätswerte der Magnetisierbarkeitsklassen für die Produkte aus der Trennung des Nephelin-Syenit am Band-Ring-Scheider (Reihe NK2-3208) .....	- 200 -
Tabelle 20: Suszeptibilitätswerte der Magnetisierbarkeitsklassen für die Produkte aus der Trennung des Nephelin-Syenit am Band-Ring-Scheider (Reihe NK2-5210) .....	- 201 -
Tabelle 21: Beispiel für die Suszeptibilitätsberechnung basierend auf 7 Kombinationen der vorliegenden Suszeptibilitätsklassen von Probe NK1-5 bei einer Zuweisung der Minerale in 5 verschiedene Gruppen (Werte in $10^{-9}$ m <sup>3</sup> /kg) .....	- 201 -
Tabelle 22: Beispiel für die Suszeptibilitätsberechnung basierend auf 5 Kombinationen der vorliegenden Suszeptibilitätsklassen von Probe NK1-5 bei einer Zuweisung der Minerale in 6 verschiedene Gruppen (Werte in $10^{-9}$ m <sup>3</sup> /kg) .....	- 202 -
Tabelle 23: Ergebnisse der Suszeptibilitätsberechnung auf Grundlage statistischer Modellierungen (Auswahl, Angaben in $10^{-9}$ m <sup>3</sup> /kg) [191] .....	- 202 -
Tabelle 24: Den Aufschlussanalysen zugewiesene Dichte und Suszeptibilität verschiedener wichtiger Minerale im Nephelin-Syenit .....	- 203 -
Tabelle 25: Den Aufschlussanalysen zugewiesene Dichte und Suszeptibilität verschiedener wichtiger Minerale im Greisenerz .....	- 203 -
Tabelle 26: Eigenschaften ausgewählter Minerale .....	- 204 -
Tabelle 27: Vereinfachte mineralogische Zusammensetzung der Suszeptibilitätsklassen vom Nephelin-Syenit (Probe NK1-5) .....	- 204 -
Tabelle 28: Dichte und magnetische Suszeptibilität ausgewählter Minerale .....	- 205 -
Tabelle 29: Löslichkeit verschiedener Salze in Wasser (Angabe in g/l bei 0 bzw. 20 °C) [199] .....	- 209 -

Tabelle 30: Daten der Partikelgrößenverteilung des Produktes vom Steilkegelbrecher.....	- 217 -
Tabelle 31: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes vom Kegelbrecher (Versuch 1) .....	- 218 -
Tabelle 32: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes vom Kegelbrecher (Versuch 2) .....	- 218 -
Tabelle 33: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes vom Kegelbrecher (Feingut, Versuch 3).....	- 218 -
Tabelle 34: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Walzenmühle .....	- 219 -
Tabelle 35: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Kugelmühle (0,9 mm Austragsmaschenweite, Versuch 1) .....	- 219 -
Tabelle 36: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Kugelmühle (0,9 mm Austragsmaschenweite, Versuch 2) .....	- 219 -
Tabelle 37: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Kugelmühle (1,4 mm Austragsmaschenweite) .....	- 219 -
Tabelle 38: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Hammermühle .....	- 220 -
Tabelle 39: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Schlagnasenmühle .....	- 220 -
Tabelle 40: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Schwingmühle (Intensität 5).....	- 220 -
Tabelle 41: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Schwingmühle (Intensität 9).....	- 221 -
Tabelle 42: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kegelbrecherproduktes (Zerkleinerungsversuch 1) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 230 -
Tabelle 43: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kegelbrecherproduktes (Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 230 -

Tabelle 44: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kegelbrecherfeinguts (Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 231 -
Tabelle 45: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Walzenmühlenproduktes auf dem Band-Ring-Scheider..	- 231 -
Tabelle 46: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (Zerkleinerungsversuch 1) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 231 -
Tabelle 47: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (,9 mm Austragsmaschenweite, Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider (Messung 1) .....	- 231 -
Tabelle 48: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (0,9 mm Austragsmaschenweite, Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider (Messung 1) .....	- 232 -
Tabelle 49: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (1,4 mm Austragsmaschenweite) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 232 -
Tabelle 50: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Hammermühlenproduktes auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 232 -
Tabelle 51: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Schlagnasenmühlenproduktes auf dem Band-Ring-Scheider ....	- 232 -
Tabelle 52: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Schwingmühlenproduktes (Intensität 5) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 233 -
Tabelle 53: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Schwingmühlenproduktes (Intensität 9) auf dem Band-Ring-Scheider .....	- 233 -
Tabelle 54: Kennwerte der Trennfunktionen zum Material der Walzenmühle ....	- 235 -
Tabelle 55: Kennwerte der Trennfunktionen zum Material des Kegelbrechers ..	- 235 -
Tabelle 56: Kennwerte der Trennfunktionen zum Material der Kugelmühle .....	- 235 -
Tabelle 57: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials vom Kegelbrecher .....	- 237 -

Tabelle 58: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Walzenmühle .....	- 237 -
Tabelle 59: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Kugelmühle .....	- 238 -
Tabelle 60: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Schlagnasenmühle (Probe 1).....	- 238 -
Tabelle 61: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Schlagnasenmühle (Probe 2).....	- 239 -
Tabelle 62: Grenzpartikelgrößen in Abhängigkeit der unteren Maschenweite einer Größenklasse .....	- 243 -
Tabelle 63: Kennwerte der originalen und der transformierten Probandaten sowie deren relative Abweichungen für das Kugelmühlenprodukt des Greisenerzes .....	- 243 -
Tabelle 64: Kennwerte der originalen und der transformierten Probandaten sowie deren relative Abweichungen für den Nephelin-Syenit (Reihe NK1) ....	- 243 -
Tabelle 65: Parameter der Anpassung von gemessenen Suszeptibilitäten und der eingestellten Trennstromstärke am Isodynamik-Scheider über Gleichung (69).....	- 246 -
Tabelle 66: Zusammenstellung der Anpassungsfunktionen mit Beispielabbildung, basierend auf frei gewählten Parametern.....	- 250 -

## Anlagen

A	Anlagen zu den theoretischen Grundlagen .....	- 187 -
A.1	Beispielrechnung Modellerz .....	- 187 -
A.2	Beispielrechnung Aufschlussgrade .....	- 188 -
A.3	Zusätzliche Diagramme und Abbildungen theoretischer Zusammenhänge .....	- 189 -
A.4	Alternative Modelle auf Basis von Flächenberechnungen.....	- 191 -
A.5	Anforderungen an Sortierkennzahlen.....	- 193 -
A.6	Maximum des Trennungsgrades.....	- 193 -
A.7	Zusammenhang Sortierkennzahl und arithmetischer Integralmittelwert des Trennungsgrades .....	- 194 -
B	Magnetismus.....	- 195 -
B.1	Einheitensysteme .....	- 195 -
B.2	Magnetismus von Körpern .....	- 195 -
B.3	Magnetische Eigenschaften des Versuchsgutes.....	- 196 -
C	Eigenschaften der untersuchten Erze .....	- 204 -
D	Messmethoden und Messgeräte .....	- 208 -
D.1	Nasschemische Aufschlüsse.....	- 208 -
D.2	Spektroskopie .....	- 210 -
D.3	Fehlerbetrachtung zur spektroskopischen Elementanalytik .....	- 211 -
D.4	Automatische mineralogische Analyse (MLA).....	- 214 -
D.5	Suszeptibilitätsmessungen.....	- 215 -
E	Ergänzungen zur Versuchsdurchführung.....	- 216 -
F	Ergebnisse zur Aufbereitung des Greisenerzes .....	- 217 -
F.1	Zerkleinerung und Aufschluss .....	- 217 -
F.2	Sortierung.....	- 230 -
F.3	Ausgewählte Zahlenwerte der MLA .....	- 237 -
G	Ergebnisse zur Aufbereitung des Nephelin-Syenits .....	- 239 -
G.1	Zerkleinerung und Aufschluss .....	- 239 -
G.2	Sortierung.....	- 240 -
H	Stereologische Transformation .....	- 243 -
I	Anpassung von Versuchsdaten.....	- 246 -

## Anlagen

### A Anlagen zu den theoretischen Grundlagen

#### A.1 Beispielrechnung Modellerz

**Tabelle 10: Eigenschaften und Kennwerte des Beispielpartikelsystems**

$\rho_1 / (\text{g/cm}^3)$	$\rho_2 / (\text{g/cm}^3)$	$A_G / (\%)$	$A_B / (\%)$	$B_A / (\%)$
4	2,6	6,3	56,8	59,9

**Tabelle 11: Zusammensetzung und Kennwerte des Beispielpartikelsystems**

Nr.	Phase 1 $\mu\text{m}^2$	Phase 2 $\mu\text{m}^2$	Gesamt $\mu\text{m}^2$	$c_{1,i}$ Vol%	$c_{1,i}$ Ma%	$c_{1,c}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,c}$ %
20	49	0	49	100,0	100,0	100,0	6,1	0,0
19	37	6	43	86,0	90,5	95,7	10,7	0,4
18	91	27	118	77,1	83,8	89,2	22,0	2,3
17	93	41	134	69,4	77,7	84,9	33,6	5,1
16	85	55	140	60,7	70,4	80,9	44,2	8,9
15	77	69	146	52,7	63,2	77,0	53,7	13,7
14	73	83	156	46,8	57,5	73,4	62,8	19,4
13	79	107	186	42,5	53,2	69,8	72,6	26,8
12	66	113	179	36,9	47,3	66,6	80,8	34,6
11	56	136	192	29,2	38,8	63,0	87,8	44,1
10	31	83	114	27,2	36,5	61,2	91,7	49,8
9	22	76	98	22,4	30,8	59,5	94,4	55,0
8	24	99	123	19,5	27,2	57,4	97,4	61,9
7	21	118	139	15,1	21,5	55,0	100,0	70,1
6	0	66	66	0,0	0,0	53,4	100,0	74,6
5	0	72	72	0,0	0,0	51,8	100,0	79,6
4	0	61	61	0,0	0,0	50,5	100,0	83,8
3	0	77	77	0,0	0,0	49,0	100,0	89,1
2	0	74	74	0,0	0,0	47,6	100,0	94,3
1	0	83	83	0,0	0,0	46,1	100,0	100,0
$\Sigma$	804	1446	2250	35,7				

# Anlagen

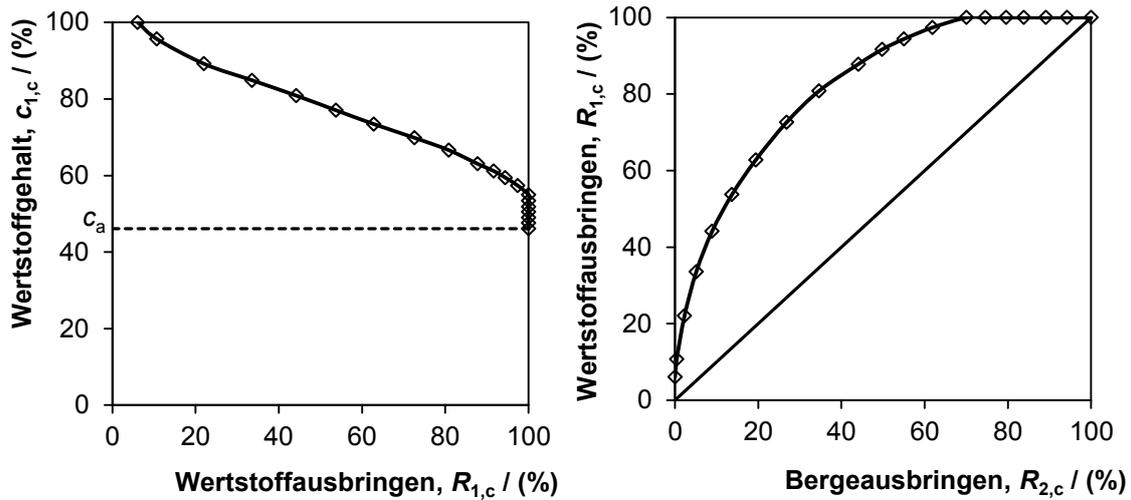


Abbildung 69: HALBICH- und FUERSTENAU-2-Diagramm des Beispielpartikelsystems

## A.2 Beispielrechnung Aufschlussgrade

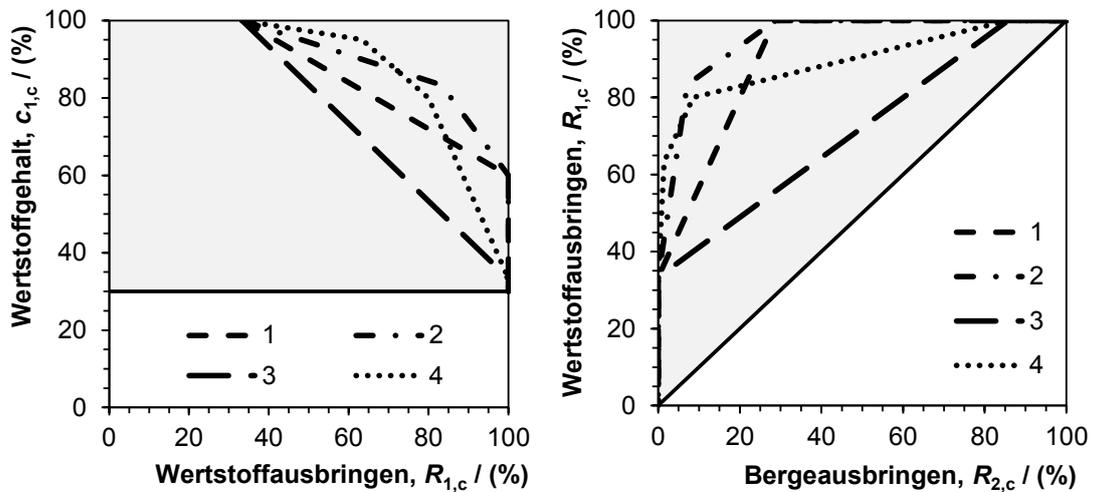
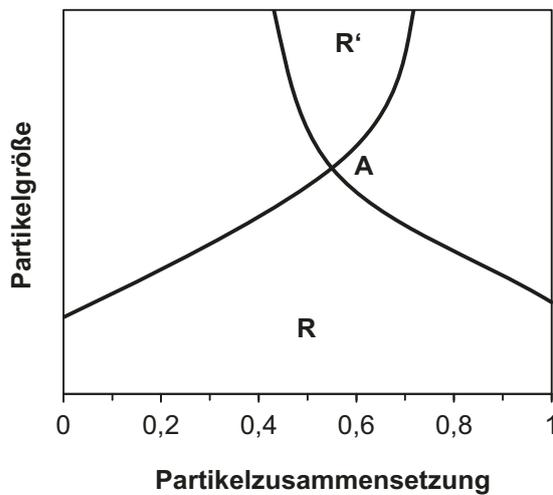


Abbildung 70: Vergleich der Verwachsungskurven für die vier Partikelsysteme des Beispiels aus Tabelle 3 als Darstellungen im HALBICH- (links) und im FUERSTENAU-2-Diagramm (rechts)

**A.3 Zusätzliche Diagramme und Abbildungen theoretischer Zusammenhänge**

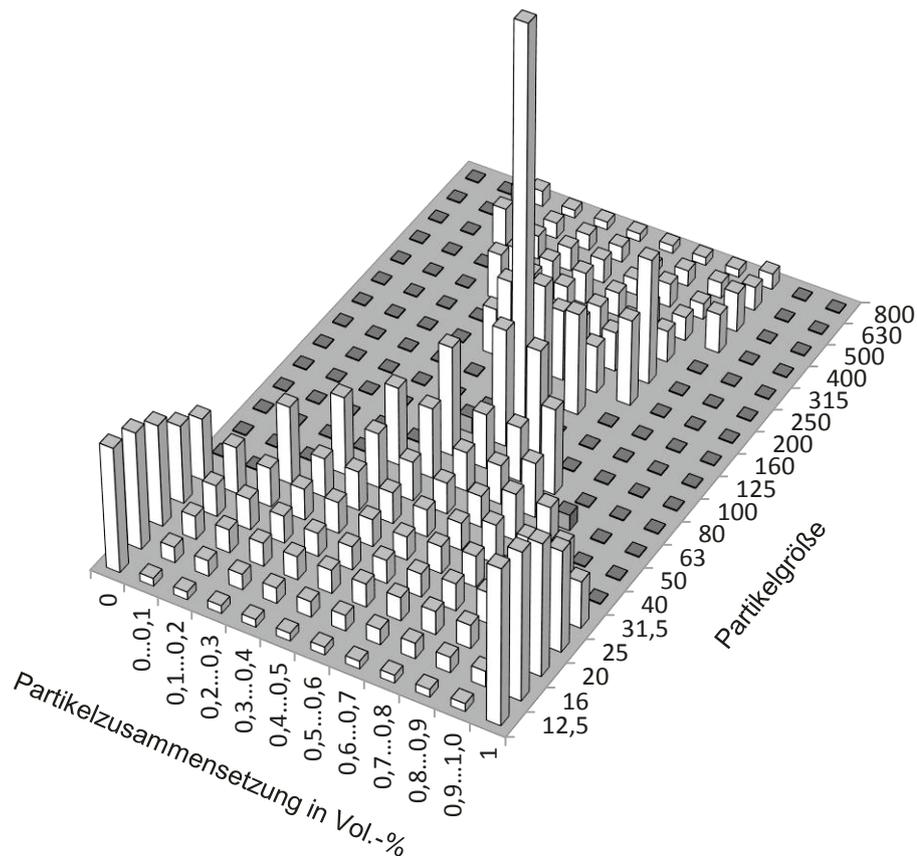


A ... Ausgangspartikel  
 R ... Produktbereich  
 R' ... Aufgabebereich

Das ANDREWS-MIKA-Diagramm stellt für einen Partikel der Größe und Zusammensetzung **A**, den Bereich möglicher Produktpartikel **R** (Nachfahren) aus der Zerkleinerung von **A** dar.

Durch Umkehrung des Zusammenhanges ist ebenso die Darstellung des Bereichs von Aufgabepartikeln **R'** (Vorfahren) möglich, aus deren Zerkleinerung ein Partikel der Größe und Zusammensetzung von **A** entstehen kann.

**Abbildung 71: Beispielhafte Darstellung eines ANDREWS-MIKA-Diagramms mit Bereich für Vorfahren und Nachfahren eines Ausgangspartikels A**

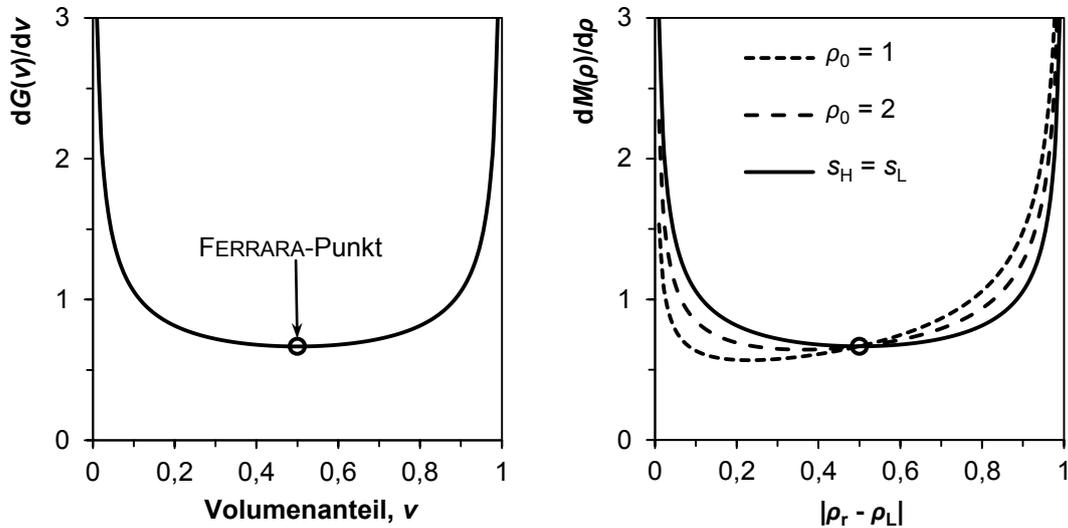


**Abbildung 72: Beispiel eines ANDREWS-MIKA-Diagramms für den Einsatz in Simulationen (übernommen aus [14])**

## Anlagen

Beispiele für u-förmige Verwachsungsverteilungsdichten sowie Auflistung der wichtigen Gleichung zur Berechnung der Kurvenverläufe.

Annahmen: Binäres System aus kugelförmigen Einschlüsse in einer Matrix



**Abbildung 73: Beispiel für u-förmige Verwachsungsverteilungsdichten. Links: Verwachsungsverteilungsdichte als Funktion des Volumenanteils; Rechts: Verwachsungsverteilungsdichte für ein zweiphasiges System mit unterschiedlichen Dichtedifferenzen**

Berechnung der Volumenverteilung

$$\frac{dG(v)}{dv} = \pm \frac{1}{3\sqrt{v-v^2}} \sin([\arccos(2v-1) + 2k\pi]/3) \quad (73)$$

mit  $k=0, 1$  oder  $2$

Relative Dichte,  $\rho_r$

$$\rho_r = \frac{s}{(s_H - s_L)} \quad (74)$$

$s$  Feststoffdichte

$s_H$  Feststoffdichte der spezifisch schweren Phase

$s_L$  Feststoffdichte der spezifisch leichten Phase

$$\rho_L = \frac{s_L}{(s_H - s_L)} \quad \text{und} \quad \rho_H = \frac{s_H}{(s_H - s_L)} \quad (75)$$

Relative mittlere Dichte der verwachsenen Partikel,  $\rho_0$

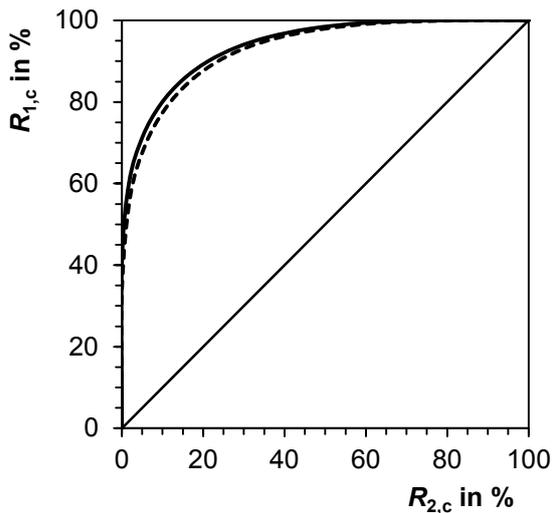
$$\rho_0 = \rho_r + \frac{1}{2} - v \quad (76)$$

Berechnung der Massenverteilung

$$\frac{dM(\rho)}{d\rho} = \pm \frac{2\rho}{3\rho_0\sqrt{1-4(\rho-\rho_0)^2}} \sin[\arccos[2(\rho-\rho_0)]/3 + 2k\pi/3] \quad (77)$$

mit  $k=0, 1$  oder  $2$

## Anlagen



Klasse	gemessen		wirklich vorliegend	
	$R_{1,c}$	$R_{2,c}$	$R_{1,c}$	$R_{2,c}$
0%	100,0	100,0	100	100,0
>0%...10%	100,0	78,1	100	83,3
>10%...20%	99,4	60,1	99,4	63,5
>20%...30%	98,0	46,4	97,8	48,8
>30%...40%	95,9	36,0	95,6	37,9
>40%...50%	93,3	28,0	93,0	29,9
>50%...60%	89,9	21,1	89,6	23,0
>60%...70%	85,3	14,8	84,8	16,4
>70%...80%	79,3	9,5	78,3	10,6
>80%...90%	71,4	5,1	69,5	5,8
>90%...<100%	60,1	1,7	56,7	2,0
100%	40,2	0,0	33,6	0,0

Abbildung 74: Einfluss des stereologischen Fehlers auf die Grenzkurve im Fuerstenau-2-Diagramm. Die Werte gehören zum Beispiel aus Abbildung 9.

### A.4 Alternative Modelle auf Basis von Flächenberechnungen

#### 1. Modell des Waschvermögens von Feinkohlen nach GOVINDARAJAN [116]

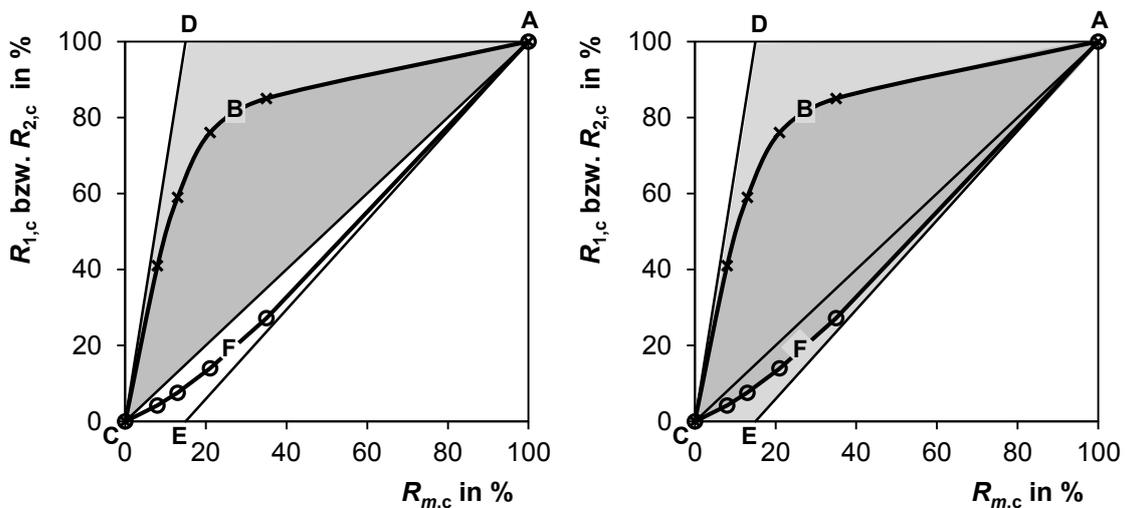


Abbildung 75: Darstellung der Flächen zur Berechnung des Waschindex nach dem Modell von GOVINDARAJAN [116]

#### Waschvermögen IW

$$IW = ERNM \cdot DRNA \cdot 100 \quad (78)$$

ERNM Effizienz des Ausbringens von Nicht-Asche-Material (efficiency of recovery of non-ash material)

$$ERNM = \frac{\text{Fläche zwischen CBA und CA}}{\text{Fläche des Dreiecks CDA}} \quad (79)$$

## Anlagen

DRNA Differenz im Ausbringen von Nicht-Asche und Asche (difference in recoveries of non-ash and ash material)

$$DRNA = \frac{\text{Fläche zwischen CBA und CFA}}{\text{Fläche des Vierecks CDAE}} \quad (80)$$

## 2. Modell des Flotationsindex zur Reinigung von Feinkohlen nach MOHANTY [114]

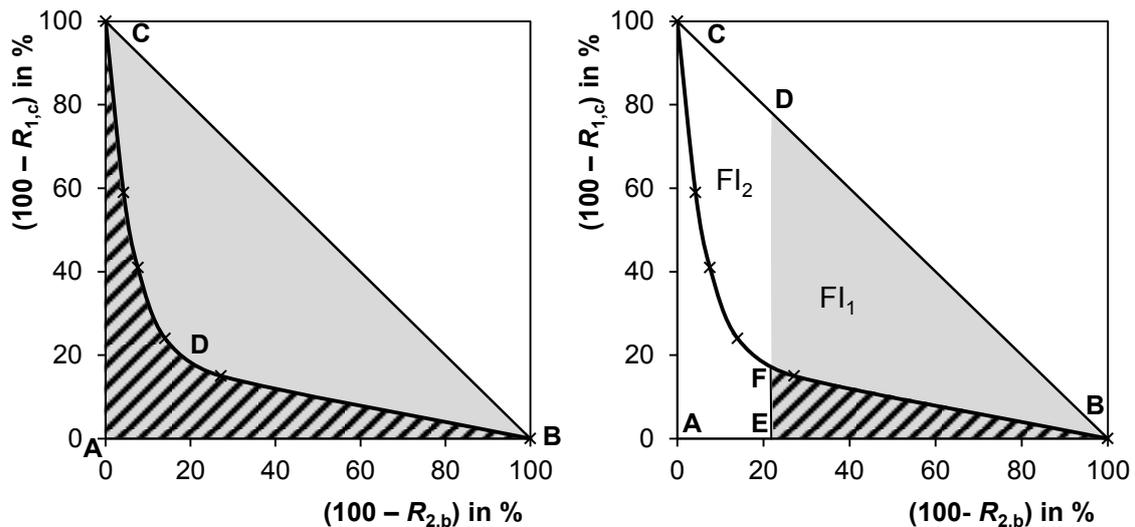


Abbildung 76: Darstellung der Flächen zur Berechnung des Flotationsindexes nach MOHANTY [114]

Flotationsreinigungsindex für eine Kohle gesamt:

$$FI_{\text{ash}} = \frac{(\text{Fläche des Dreiecks ABC}) - (\text{Fläche unter Kurve CDB})}{\text{Fläche des Dreiecks ABC}} \quad (81)$$

Bei Betrachtung eines Trennschnittes Kennwerte der Teilprodukte 1 und 2

$$FI_1 = \frac{(\text{Fläche des Dreiecks BDE}) - (\text{Fläche unter Kurve BF})}{\text{Fläche des Dreiecks ABC}} \quad (82)$$

Und

$$FI_2 = \frac{(\text{Fläche des Trapezes ACDE}) - (\text{Fläche unter Kurve CF})}{\text{Fläche des Dreiecks ABC}} \quad (83)$$

## Anlagen

### A.5 Anforderungen an Sortierkennzahlen

Nachfolgend sind Anforderungen an Sortierkennzahlen aufgeführt. Diese Anforderungen sind den Arbeiten von Schulz [15] und TOLKE [17] entnommen worden.

Eine Sortierkennzahl soll:

- Eine Funktion der Zusammensetzung und der Massebilanz von Aufgabematerial und Trennprodukten darstellen.
- Für jede Art physikalischer Trennprozesse anwendbar sein, bei der ein binäres oder auch ein Mehrkomponentensystem getrennt wird.
- Den Wert 0 ergeben, wenn es sich um ideale Teilungen handelt und den Wert 100 % annehmen, wenn es sich um ideale Trennungen handelt.
- Unabhängig vom eingesetzten Trennverfahren sein.
- Den gleichen Wert ergeben, egal ob man in einem binären System Komponente 1 von Komponente 2 oder Komponente 2 von Komponente 1 trennt.
- Physikalisch sinnvoll sein beziehungsweise physikalisch gedeutet werden können.
- Unabhängig von ökonomischen Betrachtungen sein.
- Sich gleichmäßig über das gesamte Intervall ändern.
- Eine einfache Berechnungsgrundlage besitzen.

### A.6 Maximum des Trennungsgrades

$$\eta = R_{1,c} - R_{2,c} \quad (84)$$

Mit

$$R_{2,c} = R_{m,c} \cdot \frac{100 - c_{1,c}}{100 - c_{1,a}} \quad \text{und} \quad R_{1,c} = R_{m,c} \cdot \frac{c_{1,c}}{c_{1,a}} \quad (85)$$

Folgt

$$\eta = R_{1,c} - R_{1,c} \left( \frac{c_{1,a}}{c_{1,c}} \cdot \frac{100 - c_{1,c}}{100 - c_{1,a}} \right) \quad (86)$$

Maximal für

$$\eta'(R_{1,c}) = 0 \quad (87)$$

$$\eta'(R_{1,c}) = 1 - 1 \cdot \left( \frac{c_{1,a}}{c_{1,c}} \cdot \frac{100 - c_{1,c}}{100 - c_{1,a}} \right) = 0 \quad (88)$$

## Anlagen

$$\frac{c_{1,c}}{c_{1,a}} = \frac{100 - c_{1,c}}{100 - c_{1,a}} \quad (89)$$

Erfüllt für:  $c_{1,a} = c_{1,c}$ , das heißt bei inkrementellem Austragen wenn die ausgetragenen Partikel den mittleren Aufgabehalt aufweisen.

### A.7 Zusammenhang Sortierkennzahl und arithmetischer Integralmittelwert des Trennungsgrades

Sortierkennzahl nach (19) und unter Verwendung von (85)

$$B = \frac{\int_0^{100} R_{2,c} \cdot \left( \frac{c_c}{c_a} \cdot \frac{100 - c_a}{100 - c_c} \right) dR_{2,c} - \int_0^{100} R_{2,c} dR_{2,c}}{\int_0^{100} 2R_{2,c} dR_{2,c} - \int_0^{100} R_{2,c} dR_{2,c}} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (90)$$

$$B = \frac{\int_0^{100} R_{2,c} \cdot \left( \frac{c_c}{c_a} \cdot \frac{100 - c_a}{100 - c_c} - 1 \right) dR_{2,c}}{\left[ R_{2,c}^2 - \frac{1}{2} R_{2,c}^2 \right]_0^{100}} \cdot 100 \quad (91)$$

$$B = \frac{1}{50} \int_0^{100} R_{2,c} \cdot \left( \frac{c_c}{c_a} \cdot \frac{100 - c_a}{100 - c_c} - 1 \right) dR_{2,c} \quad (92)$$

Arithmetischer Integralmittelwert des Trennungsgrades

$$\eta_{AM} = \frac{1}{100} \int_0^{100} (R_{1,c} - R_{2,c}) dR_{2,c} \text{ in \%} \quad (93)$$

Mit (85)

$$\eta_{AM} = \frac{1}{100} \int_0^{100} R_{2,c} \cdot \left( \frac{c_c}{c_a} \cdot \frac{100 - c_a}{100 - c_c} - 1 \right) dR_{2,c} \quad (94)$$

Aus (92) und (94) folgt:  $B = 2\eta_{AM}$

## B Magnetismus

Dieser Teil des Anhanges beinhaltet Daten, Diagramme und Ergänzungen, welche mit den Grundlagen des Magnetismus von Stoffen und Körpern verbunden sind.

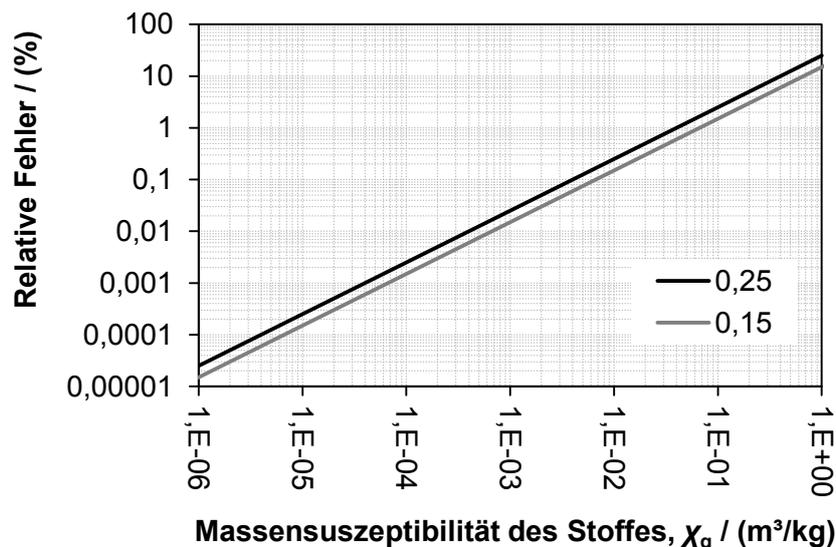
### B.1 Einheitensysteme

Ein großer Teil der Literatur gibt die magnetischen Eigenschaften der Stoffe im cgs-Einheitensystem an. Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle angegebenen Werte in SI-Einheiten dargestellt. Trotzdem werden an dieser Stelle die wichtigsten Formeln angegeben, welche zur Umrechnung der Größen zwischen beiden Einheitensystemen erforderlich sind.

**Tabelle 12: Umrechnung zwischen SI- und cgs-Einheiten wichtiger magnetischer Größen**

Größe	SI-Einheit	cgs-Einheit	Umrechnung
Magnetische Feldstärke $H$	A/m	Oe	$H(\text{SI}) = 4\pi \cdot 10^{-3} H(\text{cgs})$ (95)
Magnetische Flussdichte $B$	T	G	$B(\text{SI}) = 10^4 B(\text{cgs})$ (96)
Volumenssuszeptibilität $\chi$	-	-	$\chi(\text{SI}) = 4\pi \chi(\text{cgs})$ (97)
Massensuszeptibilität $\chi_g$	m <sup>3</sup> /kg	cm <sup>3</sup> /g	$\chi_g(\text{SI}) = 4\pi \cdot 10^{-3} \chi_g(\text{cgs})$ (98)
Molare Suszeptibilität $\chi_m$	m <sup>3</sup> /mol	cm <sup>3</sup> /mol	$\chi_m(\text{SI}) = 4\pi \cdot 10^{-6} \chi_m(\text{cgs})$ (99)

### B.2 Magnetismus von Körpern

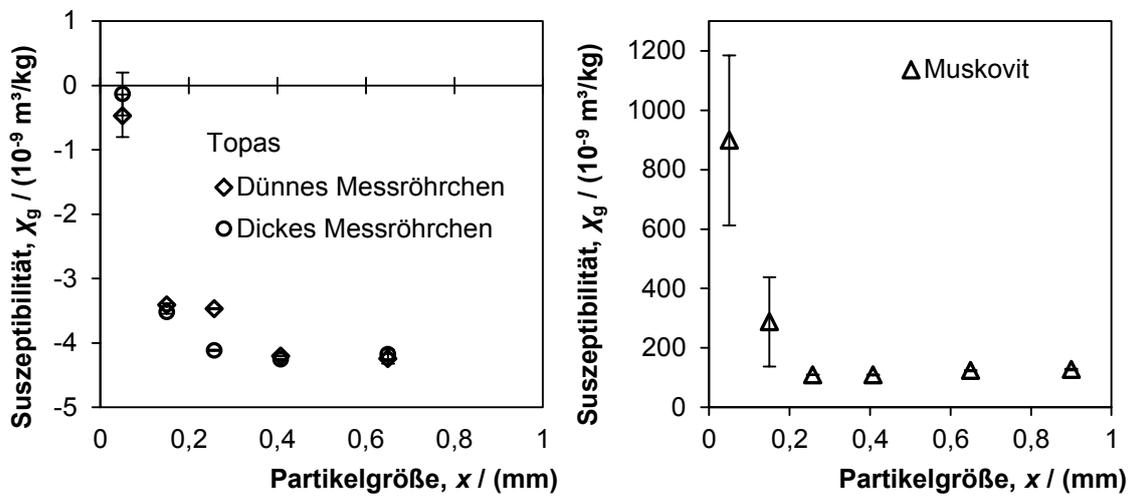


**Abbildung 77: Zusammenhang des relativen Fehlers zwischen Stoff- und Körpersuszeptibilität für zwei verschiedene Entmagnetisierungsfaktoren.**

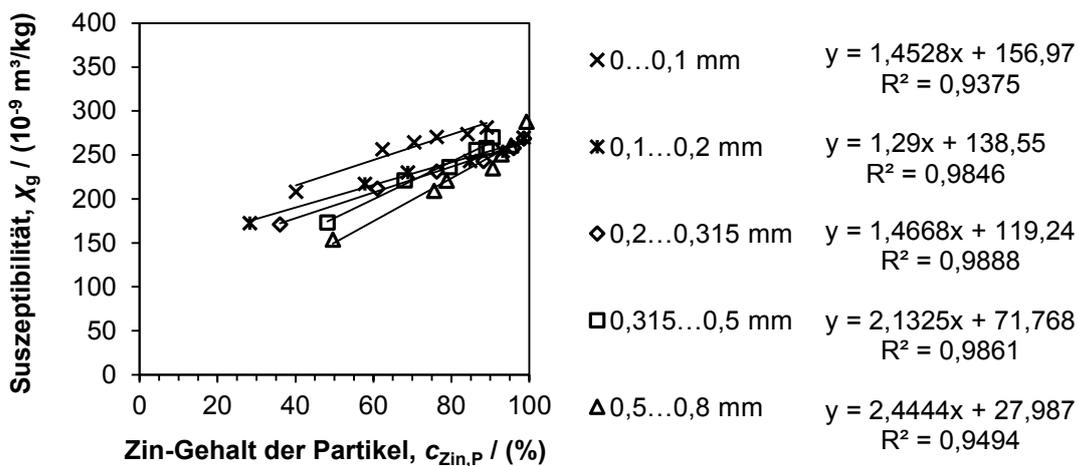
**B.3 Magnetische Eigenschaften des Versuchsgutes**

**Tabelle 13: Gemessene magnetische Suszeptibilität in  $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  von Muskovit und Topas in Abhängigkeit der Partikelgröße**

Größenklasse / (mm)	$x_{m,i}$ / (mm)	Muskovit	Topas
< 0,1	0,05	898,7 ±285,9	-0,13 ±0,33
0,1 - 0,2	0,15	287,8 ±150,3	-3,52 ±0,03
0,2 - 0,315	0,2575	109,3 ±0,9	-4,12 ±0,01
0,315 - 0,5	0,4075	108,8 ±1,9	-4,26 ±0,01
0,5 - 0,8	0,65	123,5 ±1,8	-4,18 ±0,08
> 0,8	0,9	127,1 ±2,5	



**Abbildung 78: Gemessene magnetische Suszeptibilität von Topas und Muskovit in Abhängigkeit der Partikelgröße**



**Abbildung 79: Bestimmung der Suszeptibilität für Zinnwaldit, basierend auf linearen Anpassungsfunktionen**

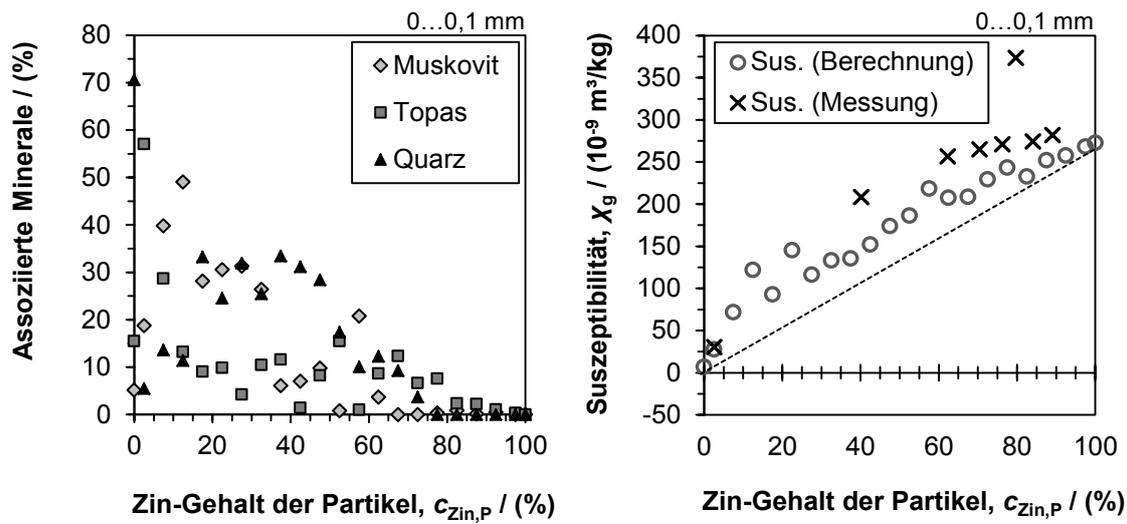


Abbildung 80: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwalditpartikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0 – 0,1 mm

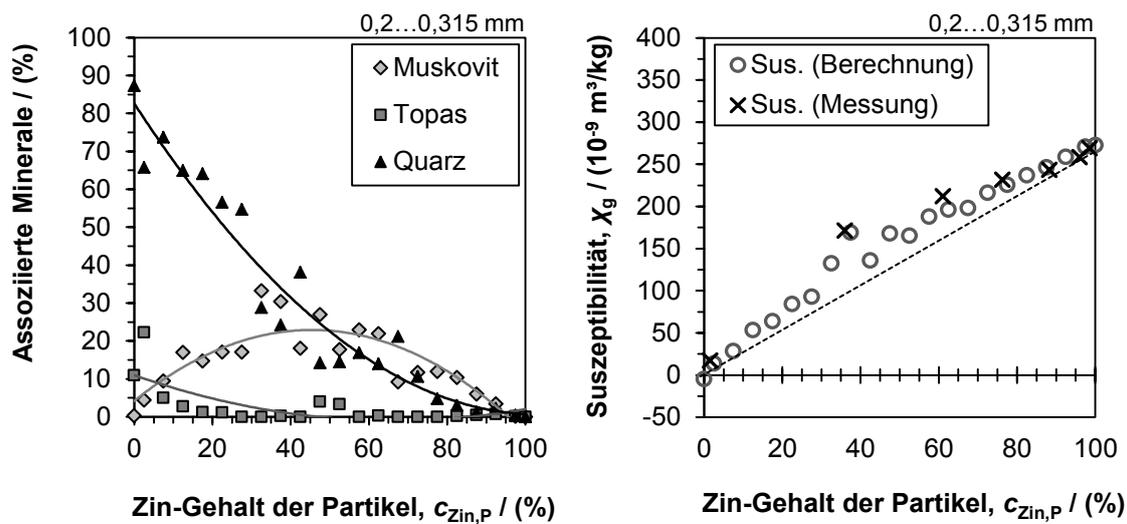


Abbildung 81: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwalditpartikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,2 – 0,315 mm

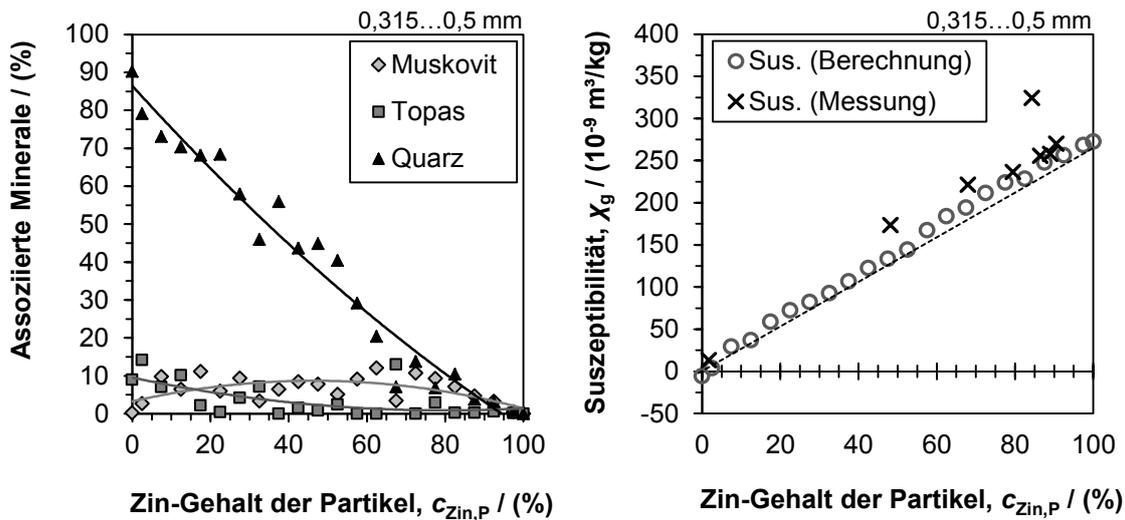


Abbildung 82: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwalditpartikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,315 – 0,5 mm

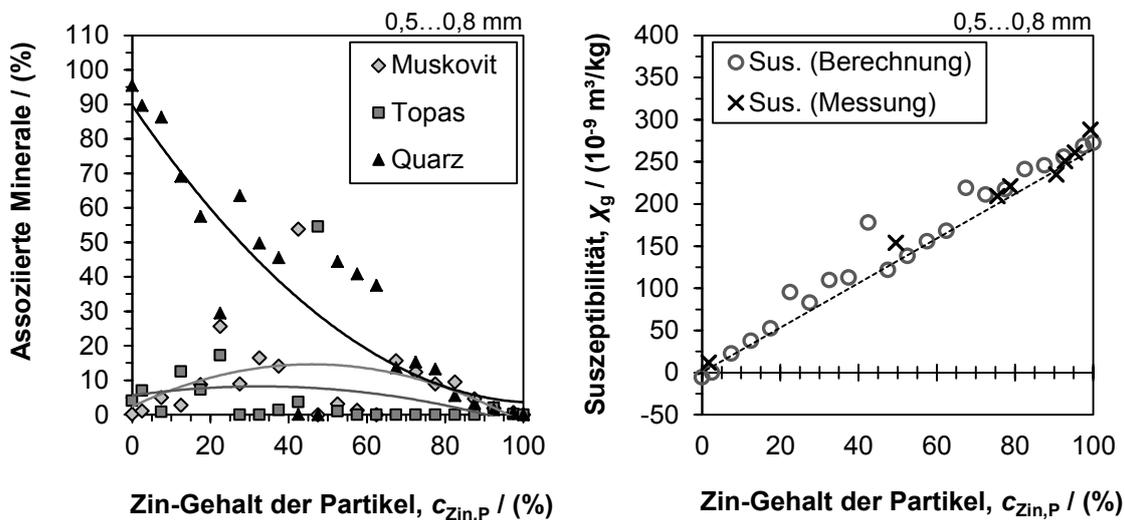


Abbildung 83: Darstellung der Anteile assoziierter Minerale an Zinnwalditpartikeln definierter Gehaltsklassen und Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Suszeptibilität über dem Zinnwalditgehalt der Partikel für die Größenklasse 0,5 – 0,8 mm

Tabelle 14: Gemessene Suszeptibilität in  $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  von Quarz, Kochsalz und Kalkstein in Abhängigkeit von der Partikelgröße nach [159]

Größenklasse in mm	$x_{m,i}$ in mm	Quarz	Kochsalz	Kalkstein
0,1 - 0,16	0,13	$-3,96 \pm 0,73$	$-6,06 \pm 0,04$	$12,47 \pm 5,22$
0,16 - 0,25	0,205	$-4,50 \pm 0,19$	$-6,24 \pm 0,06$	$8,82 \pm 0,11$
0,25 - 0,315	0,2825	$-4,63 \pm 0,05$	$-6,20 \pm 0,04$	$8,91 \pm 0,25$
0,315 - 0,5	0,4075	$-4,61 \pm 0,05$	$-6,20 \pm 0,06$	$9,21 \pm 2,16$

## Anlagen

**Tabelle 15: Suszeptibilitätswerte der Fraktionen aus der Trennung am Isodynamik-Scheider für die Größenklassen 0...0,1 mm; 0,1...0,2 mm und 0,2...0,315 mm des Greisenerzes**

$I$ A	$I_m$ A	0...0,1 mm		0,1...0,2 mm		0,2...0,315 mm	
		$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$
> 1,2	1,5	30,05	0,06	19,60	0,09	16,89	0,18
1,05...1,2	1,125	208,14	0,62	172,60	0,12	171,07	2,20
1,0...1,05	1,025	256,53	1,58	217,24	1,74	211,84	0,96
0,95...1,0	0,975	264,56	0,47	230,14	1,01	231,43	0,84
0,9...0,95	0,925	270,60	1,41	243,38	0,43	243,19	2,28
0,85...0,9	0,875	273,98	1,35	254,40	3,63	258,12	1,13
0,8...0,85	0,825	281,54	2,22	270,00	3,92	268,87	0,04
< 0,8	0,75	373,24	0,63	383,06	0,75	403,76	2,65

**Tabelle 16: Suszeptibilitätswerte der Fraktionen aus der Trennung am Isodynamik-Scheider für die Größenklassen 0,315...0,5 mm und 0,5...0,8 mm des Greisenerzes**

$I$ A	$I_m$ A	0,315...0,5 mm		0,5...0,8 mm	
		$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$
> 1,2	1,5	13,37	0,43	23,91	22,07
1,05...1,2	1,125	173,46	0,43	153,67	1,95
1,0...1,05	1,025	221,38	3,96	209,28	3,03
0,95...1,0	0,975	236,53	5,31	220,96	1,45
0,9...0,95	0,925	255,76	0,89	234,89	1,43
0,85...0,9	0,875	257,89	2,28	250,68	4,40
0,8...0,85	0,825	270,11	1,16	261,02	5,16
< 0,8	0,75	324,27	0,67	288,02	4,28

**Tabelle 17: Suszeptibilitätswerte der Fraktionen aus der Trennung am Isodynamik-Scheider für die Größenklassen 0,5...1,0 mm (NK1-3); 0,25...0,5 mm (NK1-4) und 0,125...0,25 mm (NK1-5) des Nephelin-Syenit**

$I$ A	$I_m$ A	NK1-3		NK1-4		NK1-5	
		$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$
> 1,5	1,6	56,43	5,02	43,87	0,23	47,28	0,00
1,4...1,5	1,45	99,63	1,34	109,77	0,11	100,89	0,84
1,3...1,4	1,35	123,30	3,00	121,38	1,54	127,87	9,15
1,2...1,3	1,25	130,92	1,04	141,38	0,81	146,33	0,50
1,1...1,2	1,15	144,15	0,44	156,90	0,28	159,38	0,62
1,0...1,1	1,05	180,12	1,73	180,40	1,51	192,39	0,84
0,9...1,0	0,95	273,73	14,67	251,36	2,13	234,90	1,07
< 0,9	0,85					385,94	2,50

**Tabelle 18: Suszeptibilitätswerte der Magnetisierbarkeitsklassen für die Produkte aus der Trennung des Nephelin-Syenit am Band-Ring-Scheider (Reihe NK2-3210)**

$I$ A	$I_m$ A	NK2-3210B		NK2-3210C	
		$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$
> 1,5	1,6	30,79	0,87	60,74	5,03
1,45...1,5	1,475	67,69	1,97	70,30	0,28
1,4...1,45	1,425	74,66	0,67	78,01	0,79
1,35...1,4	1,375	79,76	1,52	83,86	1,18
1,3...1,35	1,325	85,74	0,24	88,05	1,98
1,25...1,3	1,275	88,36	1,98	94,02	1,53
1,2...1,25	1,225	96,45	2,54	101,24	0,65
1,15...1,2	1,175	106,81	0,99	112,85	1,37
< 1,15	1,0	124,22	1,05	186,93	33,35

**Tabelle 19: Suszeptibilitätswerte der Magnetisierbarkeitsklassen für die Produkte aus der Trennung des Nephelin-Syenit am Band-Ring-Scheider (Reihe NK2-3208)**

$I$ A	$I_m$ A	NK2-3208B		NK2-3208C	
		$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\Delta\chi_g$
> 1,45	1,5	35,28	1,26		
1,4...1,45	1,425	77,41	1,98		
1,35...1,4	1,375	80,66	1,42		
1,3...1,35	1,325	85,33	2,07		
1,25...1,3	1,275	95,95	0,90		
1,2...1,25	1,225	100,73	2,13	73,55	1,00
1,15...1,2	1,175	106,27	0,38	109,76	1,02
1,1...1,15	1,125	113,59	2,24	116,35	0,85
1,05...1,1	1,075	130,73	3,47	131,00	0,74
1,0...1,05	1,025	143,77	3,01	142,38	2,63
0,95...1,0	0,975	143,76	5,28	157,22	3,43
0,9...0,95	0,925	163,18	0,30	166,81	6,66
0,85...0,9	0,875	176,98	2,37	185,84	3,90
0,8...0,85	0,825	195,79	0,37	199,01	2,43
< 0,80	0,7			424,79	131,24

## Anlagen

**Tabelle 20: Suszeptibilitätswerte der Magnetisierbarkeitsklassen für die Produkte aus der Trennung des Nephelin-Syenit am Band-Ring-Scheider (Reihe NK2-5210)**

I A	I <sub>m</sub> A	NK2-5210B		NK2-5210C	
		$\chi_g$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg	$\Delta\chi_g$	$\chi_g$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg	$\Delta\chi_g$
>1,4	1,5	20,30	1,87		
1,35...1,4	1,375	74,06	2,19		
1,3...1,35	1,325	87,88	0,51	83,55	1,40
1,25...1,3	1,275	93,70	1,98	98,18	0,23
1,2...1,25	1,225	101,68	1,26	106,88	2,59
1,15...1,2	1,175	108,56	0,28	110,82	1,64
1,1...1,15	1,125	118,43	1,94	121,92	2,75
1,05...1,1	1,075	130,65	1,67	129,74	0,73
1,0...1,05	1,025	142,82	0,90	138,45	0,73
0,95...1,0	0,975	157,78	3,68	159,16	0,91
0,9...0,95	0,925	209,13	0,39	178,77	1,22
0,85...0,9	0,875			200,07	2,56
0,8...0,85	0,825			226,61	2,05
0,75...0,8	0,775			252,28	3,80
0,7...0,75	0,725			288,48	3,97
0,65...0,7	0,675			335,94	4,70
0,6...0,65	0,625			371,56	8,36
<0,60	0,55			478,73	3,94
<0,50	0,45			572,50	8,00
<0,40	0,3			4004,13	57,42

**Tabelle 21: Beispiel für die Suszeptibilitätsberechnung basierend auf 7 Kombinationen der vorliegenden Suszeptibilitätsklassen von Probe NK1-5 bei einer Zuweisung der Minerale in 5 verschiedene Gruppen (Werte in 10<sup>-9</sup> m<sup>3</sup>/kg)**

Suszeptibilitätsklassen	Aegirin/ Augit	Aegirin-Al	Eudialyt	Feldspat	Andere
1,5 / 1,4 / 1,1 / 0,9 / <0,9	2510	-271	270	165	-116
1,5 / 1,4 / 1,2 / 0,9 / <0,9	2071	-82	225	126	-81
1,5 / 1,4 / 1,2 / 1,0 / <0,9	818	485	326	-163	180
1,5 / 1,4 / 1,1 / 1,0 / <0,9	426	646	219	-145	165
1,5 / 1,2 / 1,1 / 1,0 / <0,9	819	416	6	227	-180
1,5 / 1,2 / 1,0 / 0,9 / <0,9	818	466	238	-55	80
1,4 / 1,2 / 1,0 / 0,9 / <0,9	878	441	259	-44	55
Mittelwert	1191	300	220	16	15
Standardabweichung	718	313	94	144	131

Mögliche Kombinationen: 54

## Anlagen

**Tabelle 22: Beispiel für die Suszeptibilitätsberechnung basierend auf 5 Kombinationen der vorliegenden Suszeptibilitätsklassen von Probe NK1-5 bei einer Zuweisung der Minerale in 6 verschiedene Gruppen (Werte in  $10^{-9}$  m<sup>3</sup>/kg)**

Suszeptibilitätsklassen	Aegirin/ Augit	Aegirin- Al	Catapleiit/ Britholit/ Mosandrit	Eudialyt	Feldspat	Andere
1	530	589	-135	193	-58	99
2	1519	38	-3032	-62	790	-533
3	906	428	-230	276	-41	89
4	384	651	1597	47	-121	37
5	1739	64	-124	240	78	-32
Mittelwert	1016	354	-385	139	130	-68
Standardabweichung	534	258	1489	127	337	237

Mögliche Kombinationen: 28

**Tabelle 23: Ergebnisse der Suszeptibilitätsberechnung auf Grundlage statistischer Modellierungen (Auswahl, Angaben in  $10^{-9}$  m<sup>3</sup>/kg) [191]**

Mineral	NK1-3	NK1-5
Aegirin	535 ±15	645 ±15
Aegirin-Al	595 ±10	555 ±5
Albit	16 ±4	-15 ±5
Anorthoklas	-30 ±50	70 ±40
Apatit	60 ±40	90 ±20
Augit	800 ±200	500 ±50
Britholit-Ce	7500 ±1000	-100 ±100
Calcit	-10000 ±4000	80 ±80
Calcit-Mn	-1200 ±400	420 ±120
Catapleiit (wenig Ca)	20 ±30	100 ±25
Catapleiite (Na)	-600 ±150	-110 ±15
Catapleiit	8 ±8	-5 ±1
Eudialyt (5408)	240 ±40	145 ±15
Eudialyt (5611, wenig REE)	-700 ±300	440 ±60
Eudialyt (6115)	245 ±20	160 ±10
Eudialyt (7308)	-150 ±200	-200 ±100
Eudialyt	1000 ±400	800 ±100
Fluorit	20 ±80	6000 ±1000
Galenit	130 ±50	-2500 ±600
Gittinsit	1800 ±800	-1300 ±100
Illit	2600 ±400	490 ±20
Kalsilit	-80 ±15	-95 ±15
La (sec-min)	-350 ±250	260 ±60
Glimmer (Umwandlung)	-150 ±150	50 ±50
Mikroklin	35 ±7	52 ±3
Mosandrit	15000 ±2000	4500 ±500
Nephelin	28 ±3	-10 ±7
Prehnit	-70 ±30	-280 ±30
Pyrit	80 ±30	210 ±40
Zeolith	5 ±2,5	48 ±3
Zirkon	1500 ±500	220 ±70

## Anlagen

**Tabelle 24: Den Aufschlussanalysen zugewiesene Dichte und Suszeptibilität verschiedener wichtiger Minerale im Nephelin-Syenit**

Mineral/ Bezeichnung	Formel	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\chi$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg
Aegirin	NaFe <sup>3+</sup> (Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	3,52	650
Aegirin-Al	NaNa <sub>2</sub> (Mg <sub>2</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub> Li)Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	3,11	600
Augit	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3,4	400
Albit	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,62	1
Anorthoklas	(Na,K)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,585	1
Microklin	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,56	1
Calcit	Ca(CO <sub>3</sub> )	2,71	-1
Catapleiit	(Na,Ca) <sub>2</sub> ZrSi <sub>3</sub> O <sub>9</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2,75	10
Eudialyt	Na <sub>4</sub> (Ca,Ce) <sub>2</sub> (Fe <sup>2+</sup> ,Mn,Y)ZrSi <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH,Cl) <sub>2</sub>	2,9	250
Zircon	ZrSiO <sub>4</sub>	4,65	1
Nephelin	Na <sub>0.75</sub> K <sub>0.25</sub> Al(SiO <sub>4</sub> )	2,6	1
Kalsilit	KAlSiO <sub>4</sub>	2,6	1
Zeolit	Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2,25	1
Prehnit	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2,92	1
Illit	K <sub>0.6</sub> (H <sub>3</sub> O) <sub>0.4</sub> Al <sub>1.3</sub> Mg <sub>0.3</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.1</sub> Si <sub>3.5</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> · (H <sub>2</sub> O)	2,75	100
Pyrit	Fe <sup>2+</sup> S <sub>2</sub>	5,01	20
Apatit	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> )(F,Cl,OH)	3,19	10
Britholite-Ce	(Ce,Ca,Th,La,Nd) <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ,PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F)	4,45	50
Mosandrite	Na(Na,Ca) <sub>2</sub> (Ca,Ce,Y) <sub>4</sub> (Ti,Nb,Zr)(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) <sub>2</sub> (O,F) <sub>2</sub> F <sub>3</sub>	3,29	10
Mica-alteration	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>1.9</sub> F <sub>0.1</sub>	2,825	50
Andere			-1...1

**Tabelle 25: Den Aufschlussanalysen zugewiesene Dichte und Suszeptibilität verschiedener wichtiger Minerale im Greisenerz**

Mineral/ Bezeichnung	Formel	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\chi$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg
Albit	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,62	0
Barit	BaSO <sub>4</sub>	4,4	-1
Kassiterit	SnO <sub>2</sub>	7	160
Columbit	(Fe,Mn)(Nb,Ta) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,6	0
Crandallit	(Sr,Ce,La,Ca)Al(As,S)O	3,4	0
Dolomit	MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,85	10
Fluorit	CaF <sub>2</sub>	3,1	-8
Gips	CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	2,308	0
Ilmenit	Fe <sub>2</sub> +TiO <sub>3</sub>	4,72	2000
K-Feldspat	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,57	-5
Kaolinit	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	2,6	25
Limonit	FeOOH	4	900
Monazit	(La,Ce)PO <sub>4</sub>	5,1	150
Muskovit	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	2,8	117
Plagioclas	(Na,Ca)(Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	2,6	0
Quarz	SiO <sub>2</sub>	2,65	-6
Scheelit	CaWO <sub>4</sub>	6	0
Topas	Al <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	3,55	-4
Zinnwaldit	KLiFe <sup>2+</sup> Al(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	3	272

## Anlagen

### C Eigenschaften der untersuchten Erze

**Tabelle 26: Eigenschaften ausgewählter Minerale**

Mineral	Kristallsystem	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Mohshärte	Spaltbarkeit	Bruch
Aegirin	monoklin	3,5	6	gut	uneben
Albit	triklin	2,62	6 – 6,5		
Augit	monoklin	3,2 – 3,55	5 – 6,5		
Eudialyt	trigonal	2,9	5 – 5,5		
Mikroklin	triklin	2,5 – 2,6	6,25		
Muskovit	monoklin	2,77 – 2,88	2 – 3	vollkommen	
Nephelin	hexagonal	2,6	6		
Orthoklas	monoklin	2,5 – 2,6	6 – 6,5		
Quarz	trigonal	2,65	7	schlecht	spröde
Topas	orthorhombisch	3,55	8	vollkommen	uneben
Zinnwaldit	monoklin	2,9 – 3,1	2,5 – 4	vollkommen	

**Tabelle 27: Vereinfachte mineralogische Zusammensetzung der Suszeptibilitätsklassen vom Nephelin-Syenit (Probe NK1-5)**

Bezeichnung	-	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	< 0,9
Stromstärke	A	> 1,5	1,4...1,5	1,3...1,4	1,2...1,3	1,1...1,2	1,0...1,1	0,9...1,0	< 0,9
Aegirin	%	1,02	2,92	3,13	4,3	4,67	5,76	9,62	18,61
Aegirin-Al	%	4,12	11,82	11,09	15,54	17,87	23,35	29,54	47,91
Augit	%	0,22	0,18	0,06	0,27	0,3	0,26	0,46	0,7
Albit	%	22,71	17,28	13,04	14,29	13,52	12,56	12,84	7,6
Anorthoklas	%	2,43	2,47	2,39	2,15	1,93	1,76	1,71	1,03
Microklin	%	20,55	23,29	24,53	22,49	21,35	20,87	20,52	11,28
Calcit	%	0,31	0,11	0,16	0,12	0,04	0,04	0,04	0,01
Catapleilit	%	2,63	2,56	2,53	2,01	1,89	1,72	1,38	0,79
Eudialyt	%	2,28	8,56	10,6	15,86	17,9	16	8,7	3,37
Zircon	%	0,35	0,74	1,32	0,67	0,6	0,49	0,34	0,11
Nephelin	%	8,8	7,12	6,31	5,58	4,67	4,1	3,58	1,6
Kalsilit	%	4,85	4,34	2,66	2,97	2,78	2,11	1,95	1
Zeolit	%	28,24	15,95	19,45	11,24	10,32	9,0	7,38	4,37
Prehnit	%	0,38	0,26	0,07	0,16	0,09	0,07	0,07	0,08
Illit	%	0,22	0,45	0,72	0,46	0,44	0,46	0,5	0,63
Andere	%	0,9	1,96	1,94	1,88	1,63	1,48	1,37	0,9
Gesamt	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

## Anlagen

**Tabelle 28: Dichte und magnetische Suszeptibilität ausgewählter Minerale**

Mineral	Formel <sup>(5)</sup> / Bemerkung	Dichte <sup>(5)</sup> 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Suszeptibilität 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg	Quelle
<b>Haloidsalze</b>				
Fluorit	CaF <sub>2</sub>	3,0...3,5	< 22,5...80 <sup>(2)</sup> -7,9 <sup>(1)</sup>	[36] [34]
Halit	NaCl	2,1...2,2	-6,3...-7,3 <sup>(1)</sup>	[194]
Sylvin	KCl	1,99	-6,3 <sup>(1,4)</sup>	[194]
<b>Karbonate</b>				
Calcit	CaCO <sub>3</sub>	2,7	-45 -12,6 <sup>(1)</sup>	[2] [34]
Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,9...3,0	5...80 10 <sup>(1)</sup>	[2] [194]
Magnesit	MgCO <sub>3</sub>	3	-6...60	[2, 33]
Malachit	Cu <sub>2</sub> [CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> ]	4	100...200	[2]
Rodochrosit	MnCO <sub>3</sub>	3,5...3,6	1300...1400	[2, 35]
Siderit	FeCO <sub>3</sub>	3,7...3,9	400...1900	[2, 194]
<b>Oxide</b>				
<u>Chromite</u>	(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,5...5,1	65...1575	[2]
Chromit	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,8	630...25000 <sup>(1,4)</sup>	[33, 35]
Columbit	(Mn,Fe <sup>2+</sup> )Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	5,3...7,3	260...407 <sup>(1,2)</sup>	[36]
Cuprit	CuO <sub>2</sub>	6,1	-1,8 <sup>(1)</sup>	[35]
Franklinit	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5,1...5,3	83800 <sup>(1,4)</sup>	[35]
Goethit	α-FeOOH	4,5	250...2500	[2]
Hämatit	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2	550...3800	[2, 35]
Hausmannit	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4,84	680 <sup>(1)</sup>	[35]
Ilmenit	FeTiO <sub>3</sub>	4,5...5,0	1300...5000	[2, 34]
Jacobsit	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,95	5080 <sup>(1,4)</sup>	[35]
Kassiterit	SnO <sub>2</sub>	6,8...7,1	-3,3...2100	[2]
Limonit	FeOOH*nH <sub>2</sub> O	4,2	160	[33]
Manganit	γ-MnOOH	4,33	830...930	[33]
Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,2	350...1900	[2]
Manganomelane	Me <sub>2</sub> Mn <sub>8</sub> O <sub>16</sub>		(1,8...12,8)*10 <sup>6</sup>	[2]
Pyrolusit	β-MnO <sub>2</sub>	5,2	700...900	[2]
Rutil	TiO <sub>2</sub>	4,2...4,3	250...1250	[2]
Wüstit	FeO	5,75	-4...25 90,5 <sup>(1)</sup>	[2, 35] [35]
<b>Phosphate</b>				
Apatit	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl)	3,2	-3...10 -3,3 <sup>(1)</sup>	[2] [34]

# Anlagen

Fortsetzung Tabelle 28

Mineral	Formel <sup>(5)</sup> / Bemerkung	Dichte <sup>(5)</sup> 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Suszeptibilität 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg	Quelle
<b>Silikate</b>				
<b>Gerüstsilikate</b>				
<u>Feldspat</u>	Alkali-Feldspat	2,5...2,6	-5	[195]
Albit	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,62	< 22,5 <sup>(2)</sup>	[36] <sup>(3)</sup>
Mikroklin	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,5...2,6	< 22,5	[36]
Orthoklas	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,5...2,6	-6,3 <sup>(1)</sup>	[34]
Quarz	SiO <sub>2</sub>	2,65	-6	[2]
<b>Inselsilikate</b>				
Britholit-(Y)	Ca <sub>2</sub> (Ce,Ca) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ,PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F)	4,4	260...1626 <sup>(2)</sup>	[36]
<u>Olivin</u>	(Fe,Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	4,32	360	[34]
Fayalit	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	4,39	1260 <sup>(1)</sup>	[35]
Forsterit	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3,2	-3,9	[33, 34]
Topas	Al <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	3,5	-5,3 <sup>(1)</sup>	[194]
Zirkon	ZrSiO <sub>4</sub>	4,7	-3...80	[2]
	anisotrop		-2,1...9,2 0,5...0,7	[34] [34, 155]
<b>Ketten- und Doppelkettensilikate</b>				
<b><u>Amphibole</u></b>				
			80...2000	[2]
			163...1000 <sup>(1)</sup>	[34]
	(2,11 % Fe)		1130 <sup>(1)</sup>	[39]
<u>Pyroxene</u>	(3,5 % Fe)		817 <sup>(1)</sup>	[39]
Oprtho- Pyroxene	(Fe,Mg)SiO <sub>3</sub>	3,59	430...500	[34, 35]
			40...900	[2]
Klino-Pyroxene			80...800	[2, 34]
Aegirin	NaFe <sup>3+</sup> (Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	3,5	1068 <sup>(1)</sup>	[39]
	Einschlüsse (Hämatit, Magnetit)		1260...2100	[196]
Augit	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3,2...3,55	80...407 <sup>(2)</sup>	[36] <sup>(3)</sup>
			163...327 <sup>(1)</sup>	[34]
Illit	(K,H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> [(H <sub>2</sub> O,OH) <sub>2</sub> /(Si,Al <sub>4</sub> )O <sub>10</sub> ]	2,8	150 <sup>(1)</sup>	[35]
Prehnit	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	3,4	< 22,5...180	[36]
<b>Schichtsilikate</b>				
Chlorit	(Fe,Mg,Al) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	3,5...3,8	74...94	[138]
Prochlorit			100 <sup>(1)</sup>	[194]
<u>Glimmer</u>	Glimmer allgemein		10...1000	[2]
Biotit	K(Mg,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	2,7 – 3,3	360...485	[138]
			300...500 <sup>(1)</sup>	[194]
Lepidolit	K(Li,Al) <sub>3</sub> [(F,OH) <sub>2</sub> /(Al,Si)Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ]	2,8...2,9	50...580 <sup>(1)</sup>	[34]
Muskovit	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	2,8 – 2,9	66...120	[138]
			13...250	[34]
Phlogopit	KMg <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	2,75...3,0	63...100 <sup>(1)</sup>	[34]
Zinnwaldit	KLiFe <sup>2+</sup> Al(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	2,9...3,1	260...407 <sup>(2)</sup>	[36] <sup>(3)</sup>

## Anlagen

Fortsetzung Tabelle 28

Mineral	Formel <sup>(5)</sup> / Bemerkung	Dichte <sup>(5)</sup> 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Suszeptibilität 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg	Quelle
<b>Tonminerale</b>				
Kaolinit	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	2,6	25 <sup>(1)</sup>	[194]
Montmorillonit	(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> [(OH) <sub>2</sub> /(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ] · Na <sub>0,33</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub>	2,5	130...140	[33, 35]
<b>Sulfate</b>				
Anhydrit	CaSO <sub>4</sub>	2,98	-4,7 <sup>(1, 4)</sup>	[194]
Baryt	BaSO <sub>4</sub>	4,5	-4...10	[2]
Coelestin	SrSO <sub>4</sub>	3,96	-4...-4,5	[33, 34]
<b>Sulfide</b>				
Arsenopyrit	FeAsS	5,9...6,1	6...100	[2]
Bornit	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	4,9...5,1	10...180	[2]
Chalkopyrit	CuFeS <sub>2</sub>	4,1...4,3	1600...4000	[2]
Galenit	PbS	7,4...7,6	-1,2...1,2 <sup>(1)</sup>	[34, 35]
Markasit	FeS <sub>2</sub>	4,8...4,9	10...50	[2]
Pyrit	FeS <sub>2</sub>	5,0	1...13	[2, 34]
Pyrrhotin	Fe <sub>1-x</sub> S, x = 0 ... 0,17	4,6...4,7	40000...60000	[2]
	ferromagnetisch, anisotrop			[197]
Sphalerit	α-ZnS	3,9...4,1	40...6000 190	[2] [35]
<b>Wolframate</b>				
Wolframit	(Fe,Mn)WO <sub>4</sub>	6,7...7,5	400...800	[2]

- (1) Aus cgs-Einheitensystem in SI-Einheitensystem übertragen (siehe Gleichung (98) in Anhang B).
- (2) Über Gleichung (69) in Massensuszeptibilitäten umgerechnet und in SI-Einheiten übertragen ( $K = 20$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ).
- (3) Es wurden ausschließlich die Werte für den optimalen Trennbereich übernommen.
- (4) Originalwert in Quelle als Volumensuszeptibilität angegeben. Über Gleichung (64) in Massensuszeptibilität umgerechnet.
- (5) Daten entnommen aus [94, 166, 198] beziehungsweise aus den angegebenen Quellen und der Internet-Datenbank Mineralienatlas.de

## D Messmethoden und Messgeräte

### D.1 Nasschemische Aufschlüsse

Die Bestimmung des Lithiumgehalts der Proben mittels Messung am Atomabsorptionsspektrometer (AAS) ist an die Überführung des Probenmaterials in eine wässrige Lösung gebunden. Hierfür werden nasschemische Aufschlüsse mit einem Gemisch aus Flußsäure (HF, 40%ig) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>, 65%ig) durchgeführt.

Das Vorgehen gestaltete sich folgendermaßen:

1. Aufmahlen der Proben auf Analysenfeinheit,
2. Herausteilen statistisch homogener Proben von etwa 200 mg (Riffelteiler und Rotationsprobenteiler),
3. Einwiegen der Proben in Teflonbecher (Befeuchten des Becherbodens mit 3 ml deionisiertem Wasser, um das Kriechen der Glimmer an der Gefäßwandung zu unterbinden.),
4. Zugabe der Säuren (je 100 mg Einwaage 5 ml HNO<sub>3</sub> und 1 ml HF),
5. Abrauchen des Gemisches bis zur Trockene (Heizplatte, 95 °C),
6. Wiederholen der Schritte 4 und 5,
7. Becher von der Platte nehmen, Zugabe von 5 ml HNO<sub>3</sub> und für 30 min stehen lassen,
8. Auffüllen des Bechers mit deionisiertem Wasser bis knapp unter den Rand,
9. Erhitzen für 2 h bei 60 °C bis die Lösung klar ist,
10. Rückstandsloses Überspülen der Aufschluslösung in einen Maßkolben,
11. Auffüllen bis zur Eichmarke und
12. Überführen in kleine Maßkolben (50-100 ml) zur Messung am AAS.

Der Aufschluss mit Flußsäure bewirkt ein Aufbrechen der silikatischen Matrix, so dass die im Gitter eingeschlossenen Elemente durch die Säuren oxidiert und in Lösung gebracht werden können. An den Aufschluss ist die Wahl des richtigen Maßvolumens gebunden, damit die Probenlösungen im Bereich einer Zielkonzentration zwischen 0,5 und 2 mg/l liegen.

Für Konzentrat (bzw. Glimmer) 2 l-Maßkolben

Für Aufgabematerial (Glimmer und Berge) 0,5 l-Maßkolben

Für Berge (Quarz, Topas...) 0,1 l-Maßkolben

## Anlagen

Die Bestimmung der Elementgehalte der Proben mittels Messung am ICP ist an die Überführung des Probenmaterials in eine wässrige Lösung gebunden. Hierfür werden nasschemische Aufschlüsse mit einem Gemisch aus Flußsäure (HF, 40%ig), Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>, 65%ig) durchgeführt.

Das Vorgehen gestaltete sich folgendermaßen:

1. Aufmahlen der Proben auf Analysenfeinheit,
2. Herausteilen statistisch homogener Proben von etwa 150 mg (Riffelteiler und Rotationsprobenteiler),
3. Einwiegen der Proben in Teflonbecher (Befeuchten des Becherbodens mit 3 ml deionisiertem Wasser, um das Verspritzen von Partikeln aufgrund elektrostatischer Aufladung zu vermeiden.),
4. Zugabe der Säuren (je 100 mg Einwaage 5 ml HNO<sub>3</sub>, 1 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und 1 ml HF),
5. Abrauchen des Gemisches bis fast zur Trockene (Temp. 95 °C, Zeit 6 h),
6. Wiederholen der Schritte 4 und 5,
7. Zugabe von 5 ml HNO<sub>3</sub> und für 30 min bei 60 °C stehen lassen,
8. Auffüllen des Bechers mit deionisiertem Wasser bis knapp unter den Rand,
9. Erhitzen für rund 2 h bei 60 °C bis die Lösung klar ist,
10. Rückstandsloses Überspülen der Aufschluslösung in einen 0,5L-Maßkolben,
11. Auffüllen bis zur Eichmarke und
12. Überführen in kleine Maßkolben (50 ml) zur Messung am ICP.

Der Aufschluss mit Flußsäure bewirkt ein Aufbrechen der silikatischen Matrix, so dass die im Gitter eingeschlossenen Elemente durch die Säuren oxidiert und in Lösung gebracht werden können.

**Tabelle 29: Löslichkeit verschiedener Salze in Wasser (Angabe in g/l bei 0 bzw. 20 °C) [199]**

Salz	Al	Ca	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	K	Li	Mg	Na
Chloride	450	740	685	920	347	832	542	359
Fluoride	schlecht	0,016	wenig	0,91	485	2,7	0,13	42,2
Karbonate		0,014			1120	13	0,106	217
Nitrate	419	1470		1500	316	522	420	874
Perchlorate		1886			17	löslich	500	2090
Sulfate	gut	2	256	4400	111,1	350	300	170

## Anlagen

### D.2 Spektroskopie

#### Atomabsorptionsspektrometer (AAS)

Typ:	PerkinElmer AAS 2100 mit Aufrüstung auf Typ 4100
Flamme:	Luft-Acetylen
Gem. Elemente (Linie / nm):	Li (670,8), Fe (248,3)
Kalibration:	Standardkalibration mit nichtlinearer Anpassung über 5 Standardlösungen
Messung:	Dreifachmessung über jeweils 5 s

#### Vorgehensweise bei Messung

1. Lampe des zu messenden Elementes einschalten und für 5 Minuten vorheizen
2. Messsignal auf null setzen um Hintergrundsignal zu kompensieren
3. Flamme zünden und mittels Vergleichslösung die charakteristische Konzentration des Elementes prüfen
4. Flammenposition im Messstrahl optimieren, um ein möglichst starkes Signal zu erhalten
5. Messung starten

#### Optisches Emissionsspektrometer (ICP-OES)

Typ:	Thermo Fisher Scientific iCAP 6300 Duo
Gem. Elemente (Linie / nm)	
Greisenerz:	Al (394,4), Fe (259,9), K (766,5), Li (670,8)
Nephelin-Syenit:	Al (369,1), Ca (317,9), Fe (238,2), K (766,5), Mg (279,5), Mn (257,6), Na (589,6), Zr (339,2)
Messrichtung:	axial und radial
Kalibration:	Zweipunktkalibration über Blindwertlösung und Hochstandard mit linearer Anpassung
Zusatzausstattung:	CETAC ASX-260 Autosampler

## Anlagen

### **D.3 Fehlerbetrachtung zur spektroskopischen Elementanalytik**

Die Messung an den Spektrometern wird über das Standardkalibrierverfahren durchgeführt. Hierbei werden die Probenmesswerte anhand einer zuvor aufgenommenen elementspezifischen Kalibrierkurve in Konzentrationen der Probenlösung umgerechnet. Das Maßvolumen der Probenkolben ist für die jeweils zu erwartenden Elementkonzentrationen so gewählt worden, dass der Messwert im Bereich der geringsten Abweichung des Messgerätes lag. Im Beispiel der Lithiummessung am AAS liegt diese Zielkonzentration für die Wellenlänge 670,8 nm zwischen 0,5 und 3 mg/l, somit im linearen Bereich der Absorptionskennlinie. Die nötige Kalibrierkurve wurde anhand von Standards der Konzentrationen 0,5 mg/l, 1 mg/l, 2 mg/l, 3 mg/l, 4 mg/l und 5 mg/l ermittelt, wobei im Regelfall Korrelationskoeffizienten von 99,9 % erreicht wurden.

#### Fehlerabschätzung

Für alle Messwerte, die mithilfe der nasschemischen Aufschlüsse und einer Messung am Spektrometer (AAS und ICP-OES) gewonnen wurden, ist mit einem nicht unerheblichen Fehler aus Kombination von systematischen und zufälligen Fehlern zu rechnen. Über die Messung von 3 Aufschlüssen je Probe werden Mittelwerte der Gehalte gebildet, um den Einfluss zufälliger Fehler auf die aus den Messwerten gewonnenen Trends zu begrenzen.

#### Probenahme und Homogenität

Die Probennahme ist schon beim Gewinnen von Großproben in den Lagerstätten kritisch zu betrachten. Homogenisierte Gesamtproben (Sammelproben) lagen nicht vor. Die untersuchten Probenmengen waren jeweils so groß, dass innerhalb dieser Proben von einer Vergleichbarkeit ausgegangen werden kann. Dies wurde durch eine Zerkleinerung und Homogenisierung des Materials der einzelnen Großproben erreicht. Eine Übertragbarkeit auf die gesamte Lagerstätte ist auf Grundlage der untersuchten Proben nicht gegeben.

Die Zusammensetzung des Greisen kann nicht nur global über die Lagerstätte schwanken, sondern es treten auch Nester von Glimmer auf, durch die lokal eine Schwankung der Zusammensetzung hervorgerufen wird. Eine Schwankung der Zusammensetzung kann neben den Massenanteilen der Minerale im Greisen auch auf die chemische Zusammensetzung des Zinnwaldits zutreffen. In Abhängigkeit von der

## Anlagen

Genese des Minerals ist somit auch ein unterschiedlicher Gehalt an Lithium im Zinnwaldit möglich. Für eine Bilanzierung des Zinnwalditgehalts in den Aufbereitungsprodukten, basierend auf dem Lithiumgehalt des Zinnwaldits, bestehen zwei Möglichkeiten. Zum einen kann man von der theoretischen Zusammensetzung des Zinnwaldits laut Summenformel ausgehen, bei der sich ein Lithiumgehalt von 1,59 Gew.-% ergibt. Zum anderen ist es möglich, anhand einer unter dem Mikroskop ausgelesenen Probe den Lithiumgehalt des Zinnwaldits zu bestimmen und diesen Wert als Basis für die folgenden Bilanzierungen zu wählen.

### Fehlerquellen im Labor

Der Einfluss von Fehlerquellen im chemischen Labor ist ähnlich schwer quantifizierbar, wie jener aus der mechanischen Probenerstellung. Beginnt man bei den Standardlösungen und Laborgeräten als Fixpunkte, auf deren Fehler man keinen Einfluss hat, so kann man diese in ihrer Größe aus Herstellerangaben genau bestimmen. Für die AAS-Standardlösungen zur Kalibrierung des Messsystems wird laut Analysezertifikaten ein Wert von  $\pm 2$  mg/l angegeben. Dies entspricht 0,2 % Fehler bei den verwendeten Konzentrationen von 1000 mg/l. Das Erstellen der Kalibrierstandards wurde mithilfe einer Transferpipette der Firma Brand durchgeführt. Deren Fehler wird mit  $\pm 0,6$  % angegeben. Zum Einwiegen der Proben kam eine Präzisionswaage der Firma Satorius vom Typ AC210S zum Einsatz. Ihre Messgenauigkeit wird mit 0,1 mg angegeben. Bezogen auf die Probengrößen zwischen 100 mg und 200 mg entspricht der Fehler Werten von  $< 0,1$  %.

Aufgrund elektrostatischer Aufladung der feinen Partikel und des Aufschlussgefäßes (Teflonbecher) kann es zum Heraufkriechen des Probematerials zum Becherrand kommen. Der Messwert der Einwaage wird hierdurch nicht beeinflusst, jedoch muss anschließend im Labor gewährleistet sein, dass das gesamte Probematerial von den Säuren aufgeschlossen wird. Befindet sich Probematerial am Becherrand oberhalb des Säurespiegels, so kann es nicht aufgeschlossen werden. Begegnet wird dem Heraufkriechen des Probematerials an der Gefäßwand durch Befeuchten des Gefäßbodens mit 3 ml deionisiertem Wasser vor der Probenzugabe.

Betrachtet man die chemische Aufschlussreaktion, ist nicht von einer Beeinflussung des Messergebnisses auszugehen. Alle Säuren werden im Überschuss zugegeben, die Säurezugabe erfolgt zweimalig und die Reaktionszeit beträgt mehrere Stunden, sodass bei analysenfein aufgemahlenem Material vom vollständigen

## Anlagen

Aufbrechen der silikatischen Matrix und Freisetzen der Elemente in die Lösung ausgegangen werden kann.

Spritzverluste gehören zu den Fehlern, die ein Verwerfen der gesamten Probe erfordern. Ausschlaggebend hierfür ist die drastische Auswirkung auf die Salzkonzentrationen der Probe, die bei 15 ml Aufschlusslösung im einstelligen Prozentbereich zu erwarten ist. Sie treten auf, wenn beispielsweise ein Erhitzen der Lösung auf Siedetemperatur erfolgt, Reaktionswärme die Lösung zum Sieden bringt, oder nicht an die Gefäßwand sondern direkt in die Lösung pipettiert wird. Neben den Spritzverlusten erfordern auch sämtliche unsauberen Arbeitsweisen, die einen Verlust an Probensubstanz zur Folge haben, ein Verwerfen der Probe. Fehler dieser Art bleiben bei einer Betrachtung der Genauigkeit von Messwerten außen vor.

Kritisch auf die Genauigkeit der Messungen wirkt sich weiterhin das Überspülen der Aufschlusslösung in die Maßkolben aus. Hierbei muss auf vollständige Überführung der Lösung sowie der Rückstände in den Maßkolben geachtet werden. Weiterhin ist es wichtig, das vollständige in Lösung gehen der gebildeten Salze zu erreichen. Bleiben Salze ungelöst im Maßkolben, weil das Löslichkeitsgewicht überschritten ist, so entspricht die gemessene Konzentration nicht dem tatsächlichen Elementgehalt der Probe. Das Lithiumsalz mit der geringsten Löslichkeit ist LiF (siehe Tabelle 29). Bei einer angegebenen Löslichkeit von 2,7 g/l bei 20 °C und dem kleinsten verwendeten Maßkolben mit einem Volumen von 0,25 l ergeben sich 675 mg LiF, die in Lösung gehen können. Da maximal 200 mg Probensubstanz eingewogen werden, deren Gehalt an Lithium 2 % in keinen Fall überschreiten kann, ist die lösliche Masse mehr als 150-mal höher als die Masse an LiF die im denkbar ungünstigsten Fall entstehen kann. Folglich kann ein Fehler durch Zurückbleiben ungelöster Li-Salze als nicht signifikant angenommen werden.

### Matrixeffekte

Matrixeffekte bei der Spurenelementanalyse mittels AAS wurden umfangreich von LUECKE [183] untersucht. Hierbei wurde der Fokus auf die typischerweise in Lithiumerzen auftretenden Elemente gelegt. Für Zinnwaldit ist in diesem Zusammenhang eine Lithiumlösung mit und ohne Matrixelemente gemessen worden. Es zeigte sich, dass eine nur geringfügige Beeinflussung der Messergebnisse durch das Vorhandensein von Al und Fe beim Messen mit einer Luft-Acetylenflamme existieren. Ähnlich verhält es sich bei Interferenzen der Emissions- beziehungsweise Absorptionslinien

## Anlagen

zwischen Lithium und den Aufschlussanionen  $\text{ClO}_4^-$  und  $\text{F}^-$ . Mit zunehmender Konzentration von Anionen in der Lösung sinkt die Absorption des Lithiums. Jedoch sind Verringerungen der gemessenen Extinktion um mehr als 1% erst bei einem Verhältnis von 1 Li : 50 Anion in einer Luft-Acetylenflamme messbar gewesen. LUECKE [183] untersuchte weiterhin den Einfluss von zugesetzten Alkali-Elementen auf die Messung des Lithiumgehalts. Er konnte eine geringfügige Extinktionserhöhung mit steigendem Gehalt an Kalium nachweisen. Jedoch treten signifikante Signalbeeinflussungen erst ab einem Verhältnis von 1 Li zu 100 K auf. Um Matrixeinflüsse bei der spektroskopischen Elementgehaltbestimmung zu berücksichtigen, wurden die Kalibrierstandards mit den Hauptelementen in ihren Verhältnissen des Erzes versetzt.

### **D.4 Automatische mineralogische Analyse (MLA)**

Ergänzend zu den unter Abschnitt 3.3.3 getroffenen Aussagen zur mineralogischen Analyse sind nachfolgend Details zum Messsystem und zu den Proben angegeben. Detaillierte Informationen zur MLA finden sich bei FANDRICH [26] und GU [27]. Tiefer greifende Informationen zur MLA an Greisenerzproben sind bei SANDMANN und GUTZMER [170, 192] dargestellt.

#### Messsystem

- Rasterelektronenmikroskop Quanta 600 FEG-MLA600F (FEI Company)
- Energiedispersive Röntgenanalyse mit Bruker Quantax Dual XFlash Detector 5010
- Kohlenstoffbeschichtung der Präparate mit Hilfe einer Vakuum-Beschichtungsanlage Leica (BalTec) MED 020

#### Software

- MLA-Suite Firma JKTech (FEI Company)

#### Proben

- Präparate von 3 cm Durchmesser
- in Abhängigkeit der Partikelgröße 5.000 bis 50.000 Partikel je Präparat
- Partikel eingebettet in Epoxidharz
- Präparate geschliffen, poliert und mit Kohlenstoff bedampft

D.5 Suszeptibilitätsmessungen

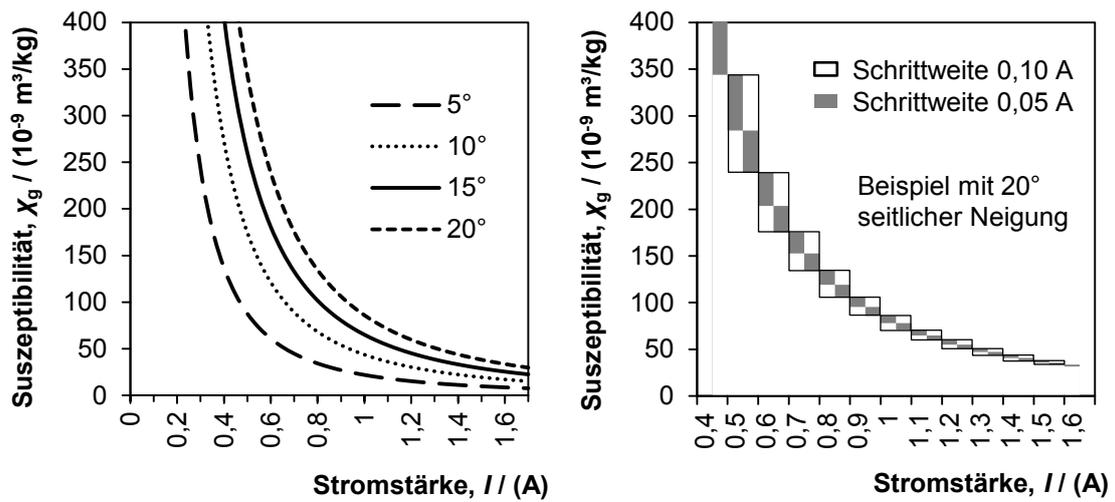
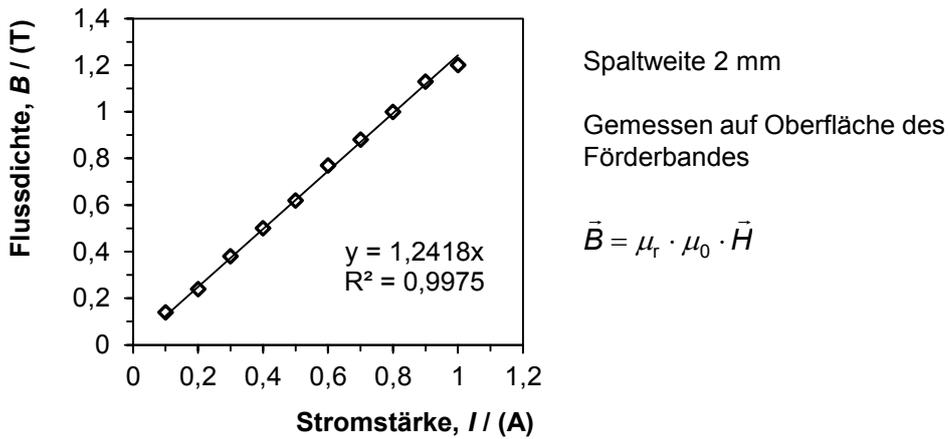
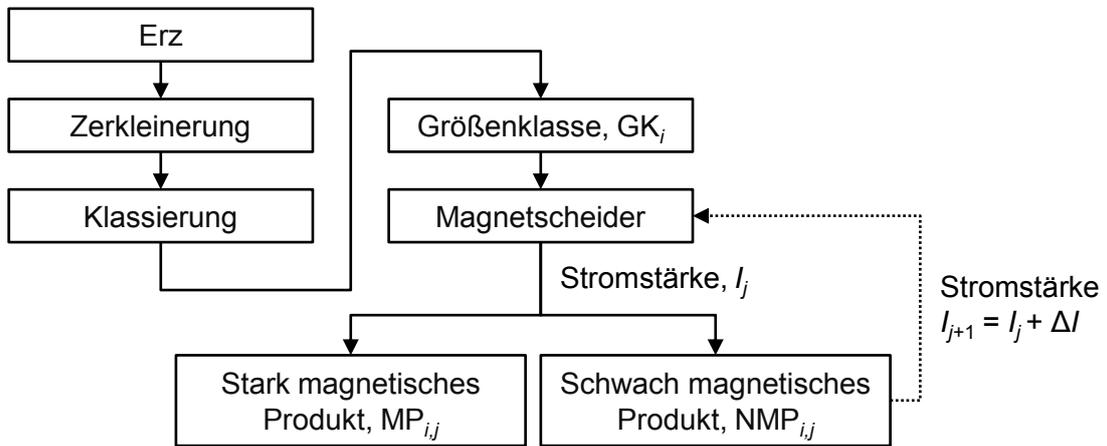


Abbildung 84: Zusammenhang von rechnerisch ermittelter Suszeptibilität, Trennstromstärke und seitlicher Neigung der Schurre am Isodynamik-Scheider (links) sowie Einfluss der Schrittweite auf die Breite der Suszeptibilitätsklassen (rechts), Grundlage der Berechnung Formel (70)

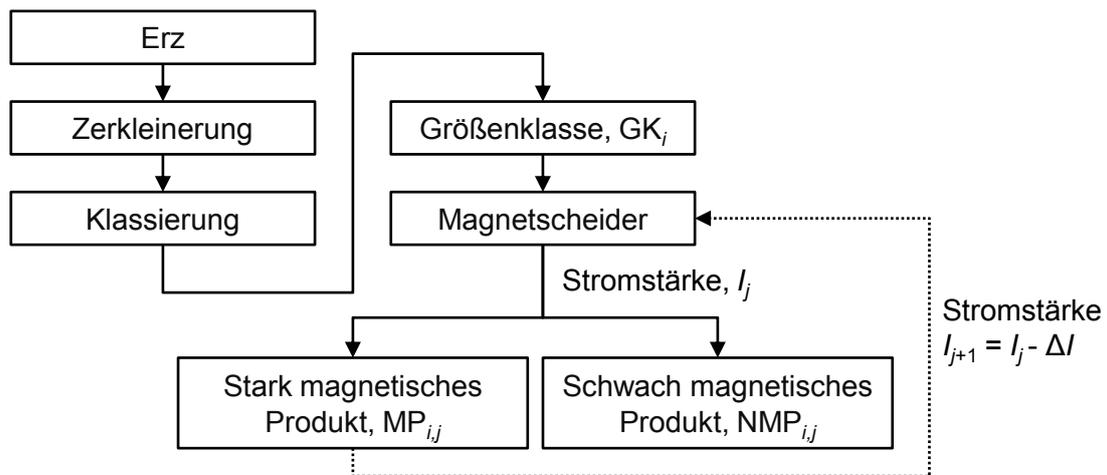
**E Ergänzungen zur Versuchsdurchführung**



**Abbildung 85: Zusammenhang von eingestellter Trennstromstärke und resultierender magnetischer Flussdichte am Band-Ring-Scheider bei einer Spaltweite von 2 mm**



**Abbildung 86: Fließbild der Trennungsversuche bei steigender Magnetisierung**



**Abbildung 87: Fließbild der Trennungsversuche bei abnehmender Magnetisierung**

F Ergebnisse zur Aufbereitung des Greisenerzes

F.1 Zerkleinerung und Aufschluss

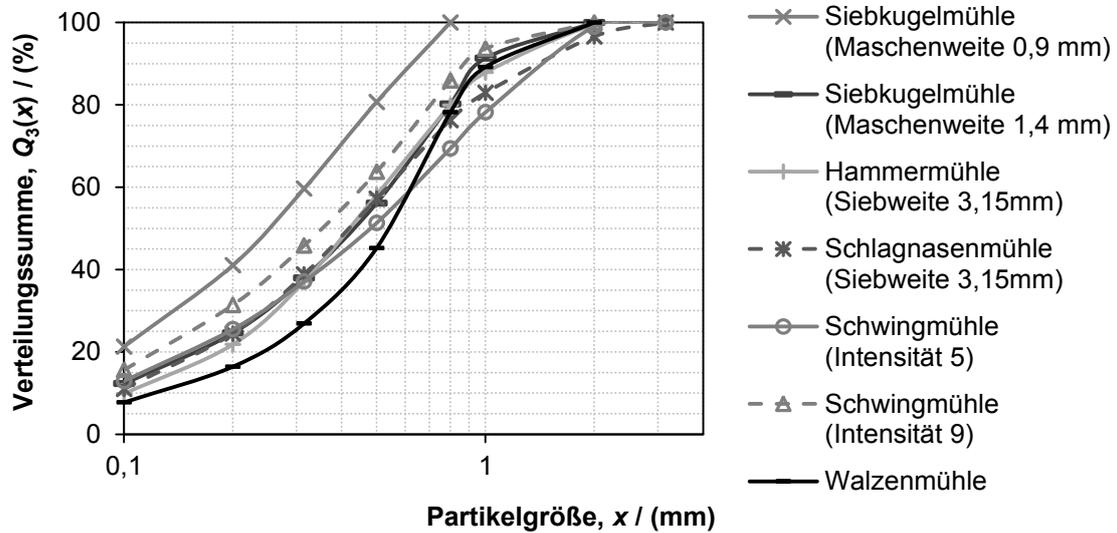


Abbildung 88: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen aus der 4. Zerkleinerungsstufe

Tabelle 30: Daten der Partikelgrößenverteilung des Produktes vom Steilkegelbrecher

$x_o$ mm	$x_m$ mm	$\Delta x$ mm	$m_i$ g	$\Delta Q_3(x)$ %	$Q_3(x)$ %	$q_3(x)$ 1/mm
0,1	0,05	0,1	110,2	1,5	1,5	0,150
0,2	0,15	0,1	178,5	2,4	3,9	0,243
0,315	0,2575	0,115	150,6	2,1	6,0	0,178
0,5	0,4075	0,185	197,6	2,7	8,7	0,145
1	0,75	0,5	425,4	5,8	14,5	0,116
2	1,5	1	598,8	8,2	22,6	0,082
3,15	2,575	1,15	465,1	6,3	29,0	0,055
5	4,075	1,85	537,8	7,3	36,3	0,040
10	7,5	5	1289,4	17,6	53,8	0,035
15	12,5	5	2006,5	27,3	81,2	0,055
20	17,5	10	808,2	11,0	92,2	0,011
30	25	10	576	7,8	100,0	0,008
Summe			7344,1	100,0		

## Anlagen

**Tabelle 31: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes vom Kegelbrecher (Versuch 1)**

KB #1 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	93,5	4,3	4,3	22,6	1,785
0,1-0,2	0,15	0,2	99,2	8,8	4,5	29,2	1,691
0,2-0,315	0,258	0,315	98,4	13,2	4,5	30,5	2,027
0,315-0,5	0,408	0,5	122,7	18,8	5,6	29,2	0,825
0,5-0,8	0,65	0,8	157,1	26,0	7,1	26,4	2,171
0,8-1,0	0,9	1	79,8	29,6	3,6	25,2	1,387
1,0-2,0	1,5	2	431,5	49,2	19,6	21,1	1,467
2,0-3,15	2,575	3,1	543,6	74,0	24,7	15,4	0,769
3,15-5	4,075	5	572,5	100,0	26,0	16,2	1,004
Summe			2198,3		100,0	20,2	

**Tabelle 32: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes vom Kegelbrecher (Versuch 2)**

KB #2 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	78,1	3,4	3,4	22,6	0,557
0,1-0,2	0,15	0,2	94,8	7,5	4,1	29,7	1,173
0,2-0,315	0,258	0,315	102,9	11,9	4,4	30,7	0,758
0,315-0,5	0,408	0,5	131,6	17,6	5,7	28,1	1,040
0,5-0,8	0,65	0,8	180,0	25,4	7,8	26,0	0,834
0,8-1,0	0,9	1	82,1	28,9	3,5	24,0	0,792
1,0-2,0	1,5	2	497,9	50,4	21,5	19,8	0,874
2,0-3,15	2,575	3,1	616,5	77,0	26,6	15,1	0,663
3,15-5	4,075	5	531,5	100,0	23,0	15,6	0,494
Summe			2315,4		100,0	19,7	

**Tabelle 33: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes vom Kegelbrecher (Feingut, Versuch 3)**

KB-F Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	110,9	11,9	11,9	23,1	1,598
0,1-0,2	0,15	0,2	133,8	26,3	14,4	31,0	0,918
0,2-0,315	0,258	0,315	138,8	41,3	14,9	31,1	0,978
0,315-0,5	0,408	0,5	185,0	61,2	19,9	29,9	0,940
0,5-0,8	0,65	0,8	233,9	86,4	25,2	27,4	0,744
0,8-1,0	0,9	1	126,5	100,0	13,6	24,7	0,344
Summe			928,9		100,0	28,1	

## Anlagen

**Tabelle 34: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Walzenmühle**

WM Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	188,7	7,7	7,7	13,8	0,237
0,1-0,2	0,15	0,2	211,5	16,4	8,7	18,3	1,009
0,2-0,315	0,26	0,315	256,2	26,9	10,5	17,8	0,394
0,315-0,5	0,41	0,5	447,1	45,2	18,3	15,6	0,264
0,5-0,8	0,65	0,8	804,8	78,2	33,0	13,7	0,359
0,8-1,0	0,90	1	268,5	89,2	11,0	17,0	0,539
1,0-2,0	2	2	263,5	100,0	10,8	35,5	0,621
Summe			2440,3		100,0	17,6	

**Tabelle 35: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Kugelmühle (0,9 mm Austragsmaschenweite, Versuch 1)**

KM 0,9 #1 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	340,6	21,3	21,3	13,9	0,28
0,1-0,2	0,15	0,2	316,2	41,0	19,7	20,4	0,75
0,2-0,315	0,258	0,315	298,4	59,6	18,6	20,2	0,89
0,315-0,5	0,408	0,5	337,3	80,7	21,1	20,2	0,89
0,5-0,8	0,65	0,8	309,0	100,0	19,3	19,3	0,92
Summe			1601,5		100,0	18,7	

**Tabelle 36: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Kugelmühle (0,9 mm Austragsmaschenweite, Versuch 2)**

KM 0,9 #2- 1 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	415,5	15,9	15,9	19,3	0,392
0,1-0,2	0,15	0,2	468,6	33,9	18,0	25,3	0,788
0,2-0,315	0,258	0,315	477,4	52,2	18,3	25,3	0,884
0,315-0,5	0,408	0,5	569,9	74,0	21,8	21,3	0,345
0,5-0,8	0,65	0,8	678,1	100,0	26,0	17,0	0,579
Summe			2609,5		100,0	21,3	

**Tabelle 37: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Kugelmühle (1,4 mm Austragsmaschenweite)**

KM 1,4 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	224,7	12,3	12,3	18,2	0,480
0,1-0,2	0,15	0,2	225,1	24,6	12,3	24,3	0,669
0,2-0,315	0,258	0,315	245,1	37,9	13,4	23,4	0,719
0,315-0,5	0,408	0,5	333,7	56,1	18,2	20,9	0,662
0,5-0,8	0,65	0,8	441,4	80,2	24,1	17,5	0,355
0,8-1,0	0,9	1	203,1	91,3	11,1	15,4	0,437
1,0-2,0	1,5	2	158,9	100,0	8,7	13,4	0,302
Summe			1832,0		100,0	19,2	
GP			221,9			18,5	1,128

## Anlagen

**Tabelle 38: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Hammermühle**

HM Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	163,8	9,8	9,8	21,5	0,652
0,1-0,2	0,15	0,2	198,9	21,8	12,0	25,9	1,035
0,2-0,315	0,258	0,315	254,2	37,1	15,3	24,0	0,767
0,315-0,5	0,408	0,5	349,8	58,1	21,0	19,8	0,637
0,5-0,8	0,65	0,8	362,8	79,9	21,8	14,6	0,497
0,8-1,0	0,9	1	131,9	87,8	7,9	11,4	0,253
1,0-2,0	1,5	2	192,9	99,4	11,6	9,8	0,266
2,0-3,15	2,575	3,15	9,5	100,0	0,6		
Summe			1663,8		100,0	18,3	
GP			221,9			19,6	0,570

**Tabelle 39: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Schlagnasenmühle**

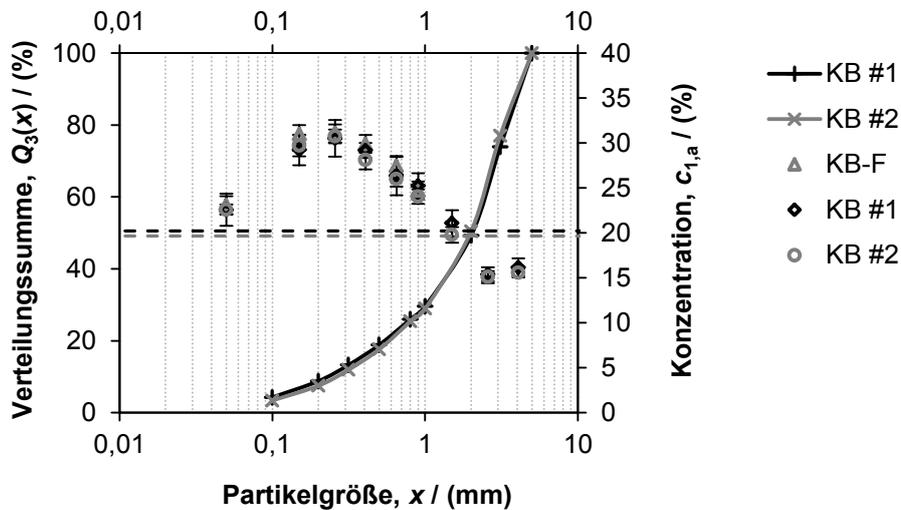
SN Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	442,0	11,0	11,0	21,1	1,250
0,1-0,2	0,15	0,2	538,0	24,4	13,4	27,2	0,548
0,2-0,315	0,258	0,315	576,0	38,8	14,4	24,5	0,590
0,315-0,5	0,408	0,5	737,0	57,2	18,4	21,2	0,531
0,5-0,8	0,65	0,8	765,0	76,3	19,1	15,8	1,016
0,8-1,0	0,9	1	266,0	82,9	6,6	13,0	0,460
1,0-2,0	1,5	2	549,0	96,6	13,7	11,3	0,288
2,0-3,15	2,575	3,15	136,0	100,0	3,4	9,1	2,000
Summe			4009,0		100,0	19,1	
GP			652,8			0,0	

**Tabelle 40: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Schwingmühle (Intensität 5)**

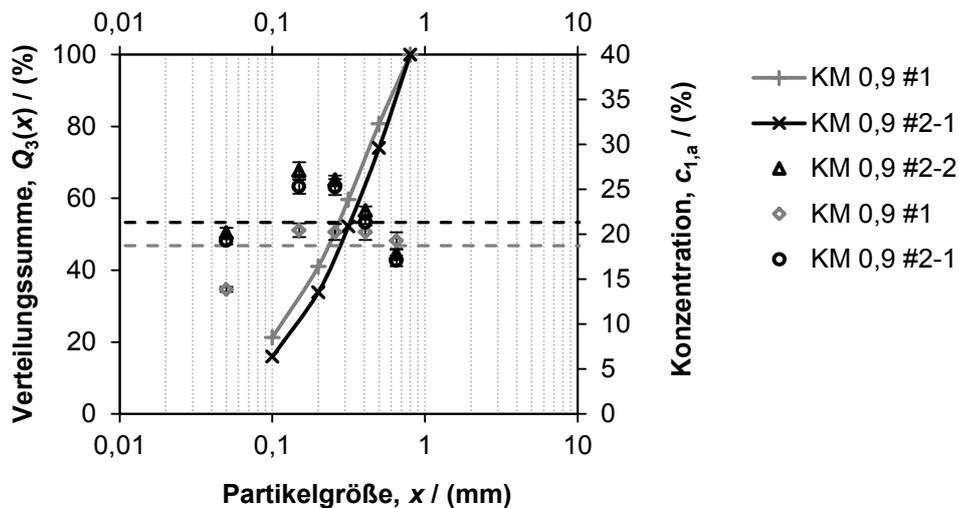
SM-i5 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	200,8	12,9	12,9	25,9	0,682
0,1-0,2	0,15	0,2	195,4	25,5	12,6	30,7	0,417
0,2-0,315	0,258	0,315	180,0	37,1	11,6	26,2	0,632
0,315-0,5	0,408	0,5	221,2	51,3	14,2	20,9	0,426
0,5-0,8	0,65	0,8	281,1	69,4	18,1	16,0	0,319
0,8-1,0	0,9	1	136,6	78,2	8,8	12,9	0,395
1,0-2,0	1,5	2	323,4	99,0	20,8	11,5	0,459
2,0-3,15	2,575	3,15	15,5	100,0	1,0		
Summe			1554,0		100,0	19,6	

**Tabelle 41: Partikelgrößenverteilung und Zinnwalditgehalt des Zerkleinerungsproduktes der Schwingmühle (Intensität 9)**

SM-i9 Fraktion	$x_{m,i}$ mm	$x_o$ mm	$m_A$ g	$Q_3(x)$ %	$R_{m,a}$ %	$c_{1,a}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,a}$ %
0-0,1	0,05	0,1	249,0	15,6	15,6	24,9	0,671
0,1-0,2	0,15	0,2	251,7	31,4	15,8	30,2	0,992
0,2-0,315	0,258	0,315	230,1	45,8	14,4	23,8	0,861
0,315-0,5	0,408	0,5	286,0	63,7	17,9	17,3	0,497
0,5-0,8	0,65	0,8	353,4	85,9	22,2	11,4	0,493
0,8-1,0	0,9	1	124,0	93,7	7,8	9,9	0,282
1,0-2,0	1,5	2	100,9	100,0	6,3	10,6	0,425
Summe			1595,1		100,0	19,1	



**Abbildung 89: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einem Flachkegelbrecher bei 5 mm Spaltweite**



**Abbildung 90: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Siebkugelmühle bei 0,9 mm Austragsmaschenweite**

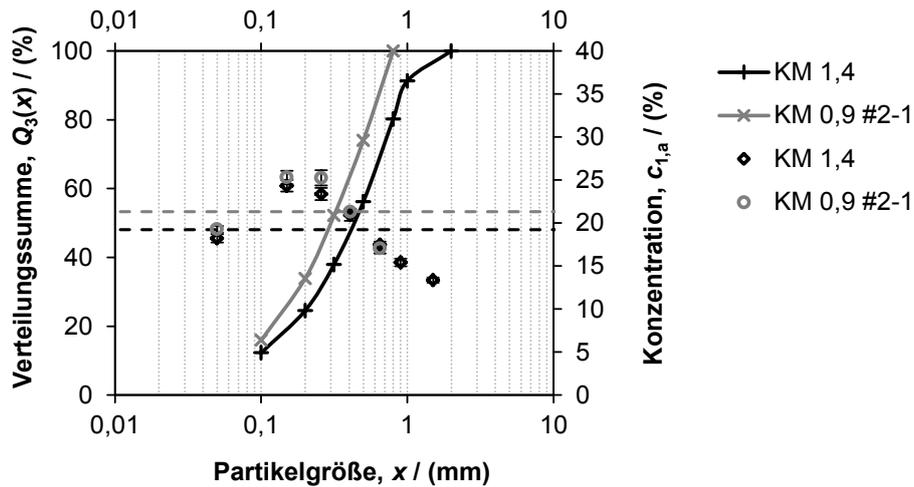


Abbildung 91: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Siebkugelmühle bei 0,9 und 1,4 mm Austragsmaschenweite

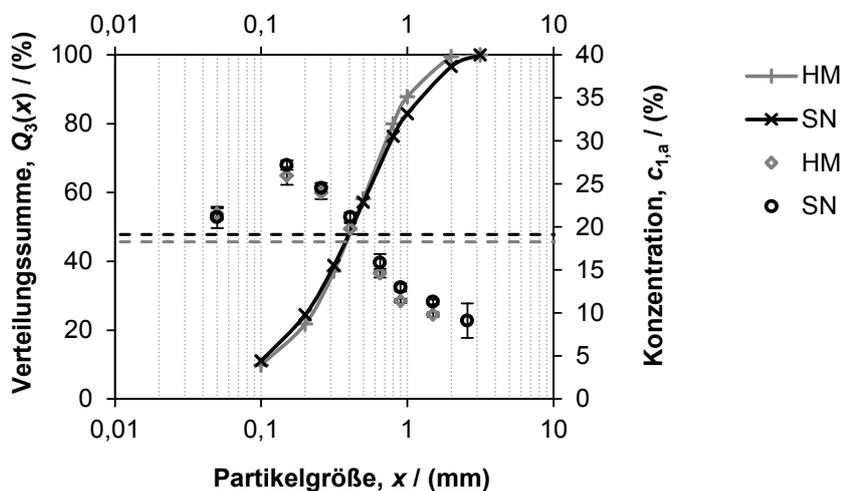


Abbildung 92: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Hammer- und einer Schlagnasenmühle bei jeweils 3,15 mm Austragsmaschenweite

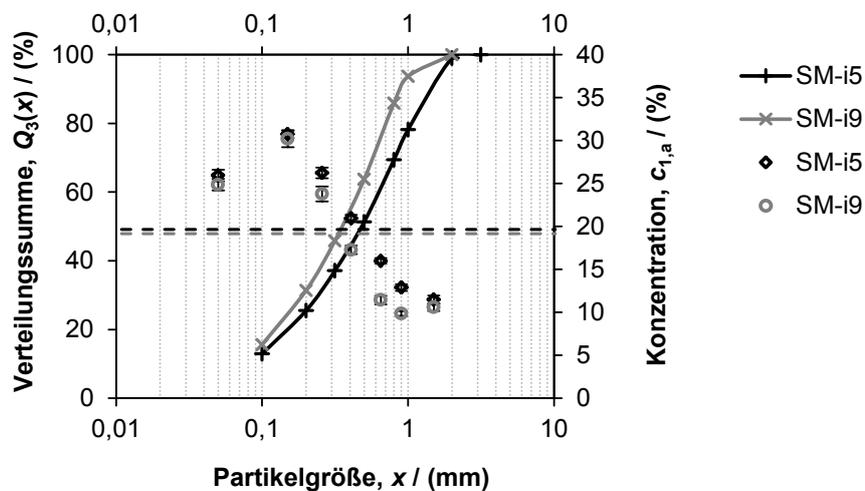


Abbildung 93: Partikelgrößenverteilungssumme und nasschemisch ermittelter Zinnwalditgehalt über der Partikelgröße für die Zerkleinerung des Greisenerzes in einer Schwingmühle bei unterschiedlicher Intensität und gleicher Mahldauer (60 s)

Anlagen

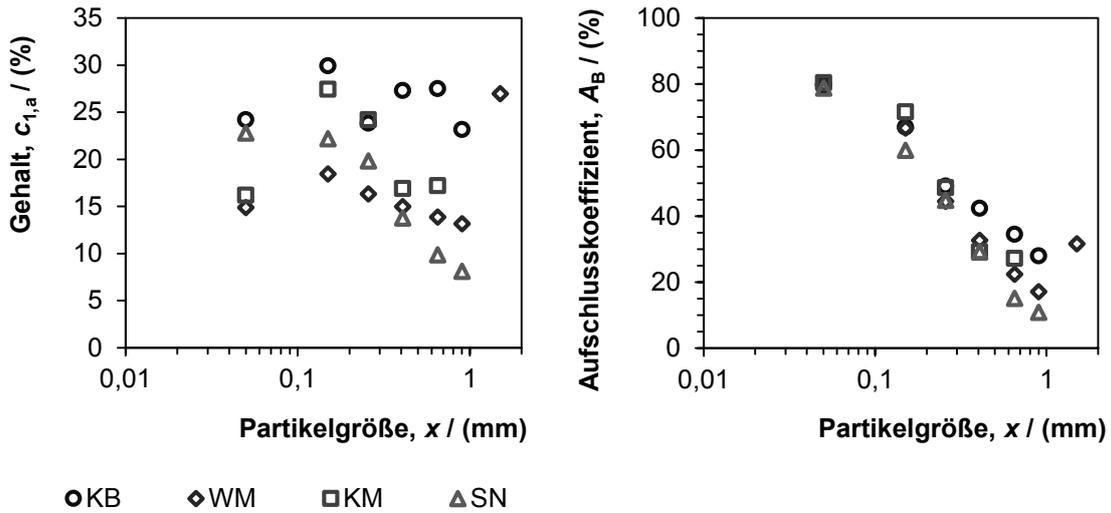


Abbildung 94: Zinnwalditgehalt und Aufschlusskoeffizient in Abhängigkeit der Partikelgröße und der Zerkleinerung in unterschiedlichen Maschinen

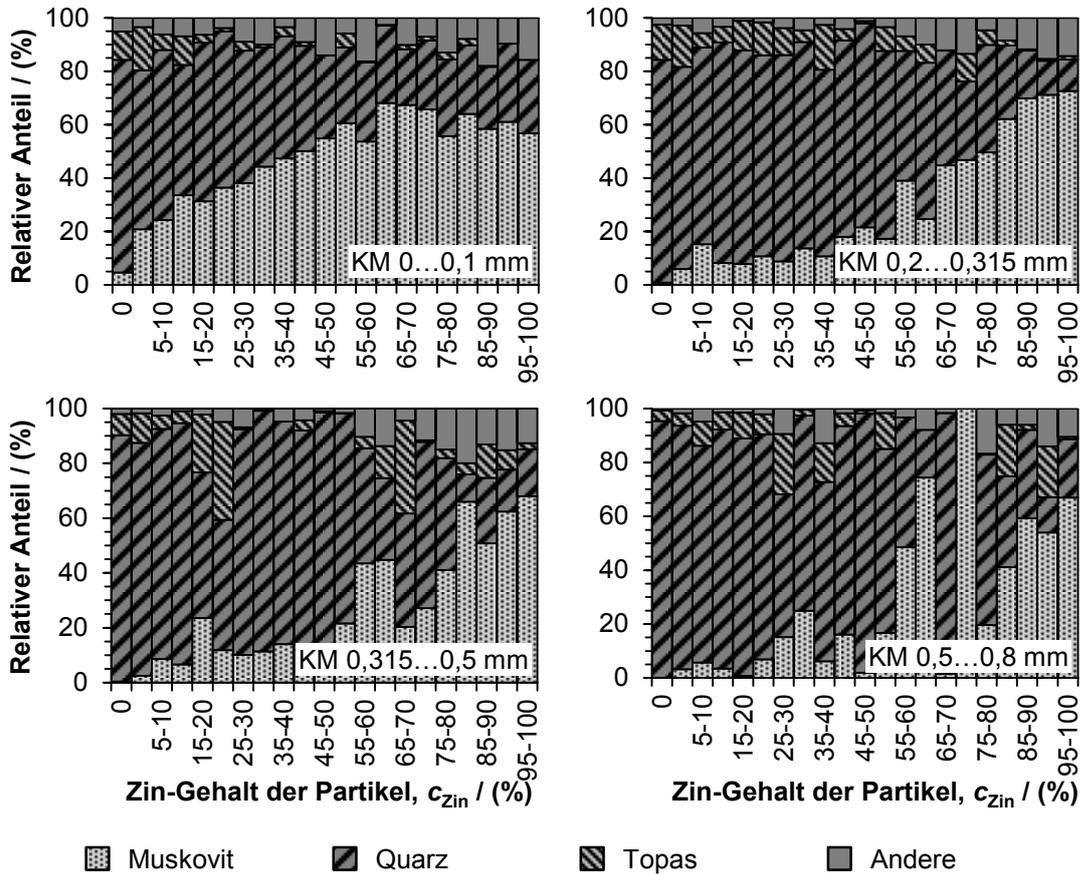


Abbildung 95: Darstellung des relativen Anteils verschiedener Minerale an den Verwachsungsklassen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Greisenerzes nach der Zerkleinerung in der Kugelmühle

# Anlagen

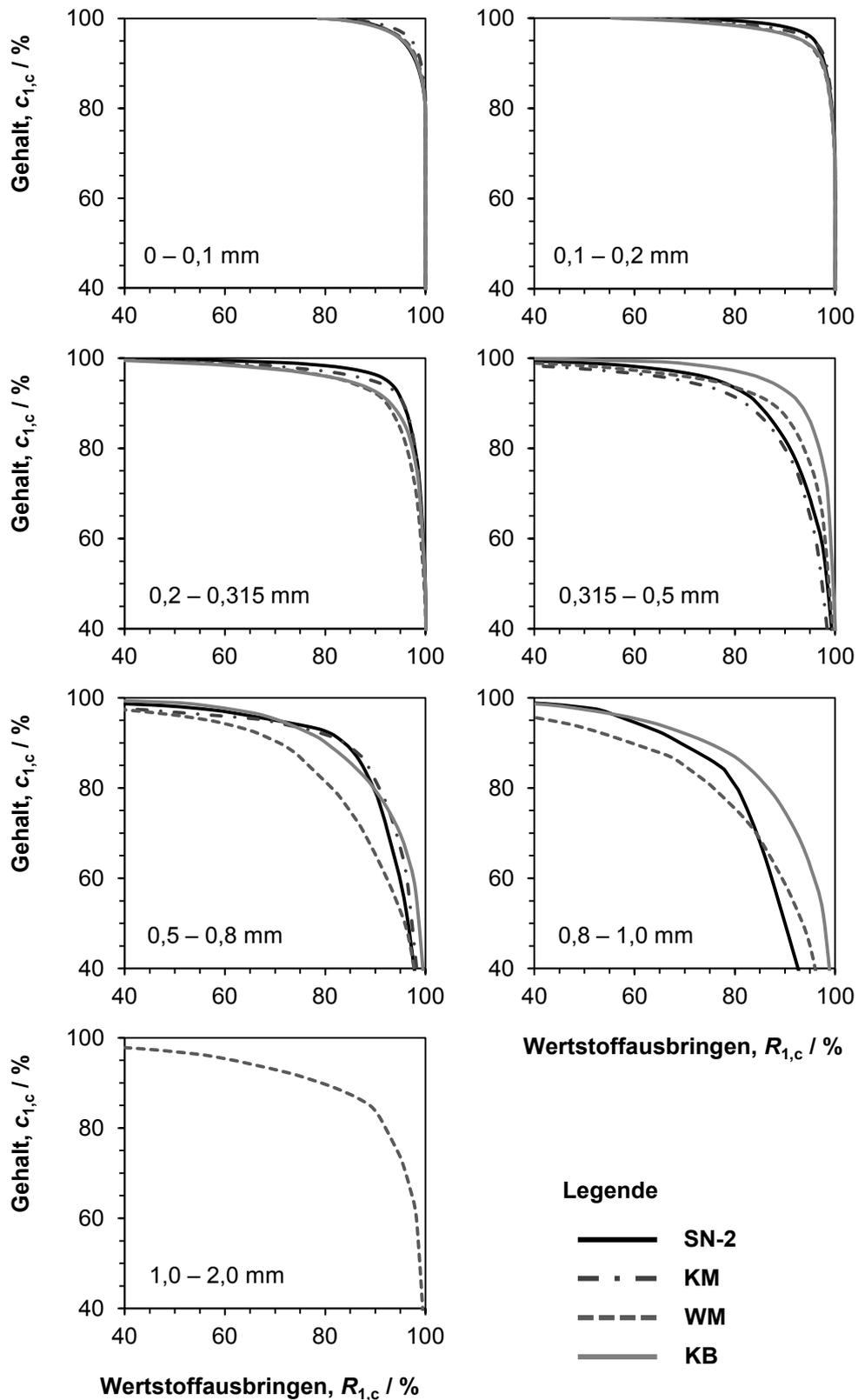


Abbildung 96: Zusammenstellung der HALBICH-Diagramme für die Zerkleinerung des Reisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen

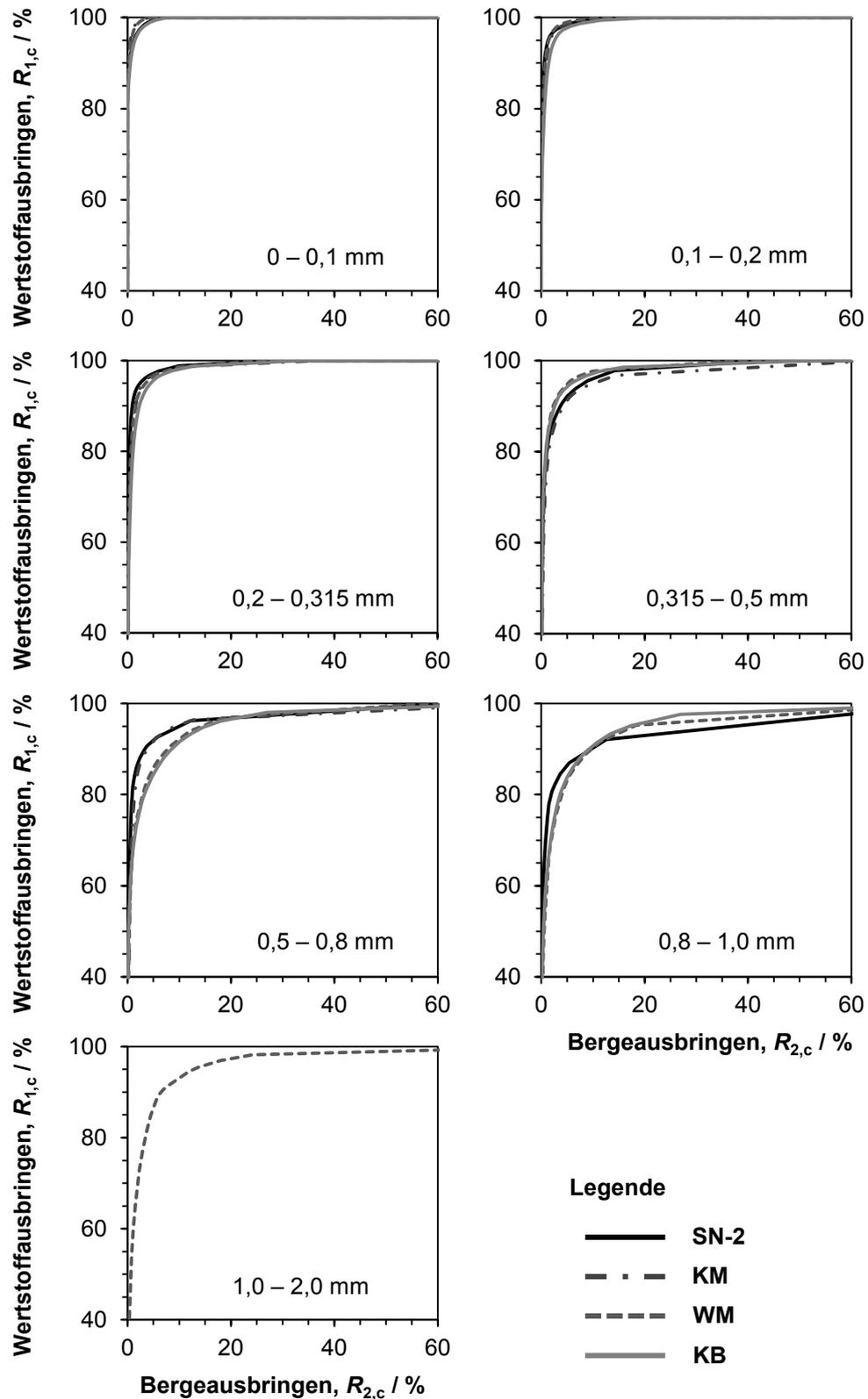
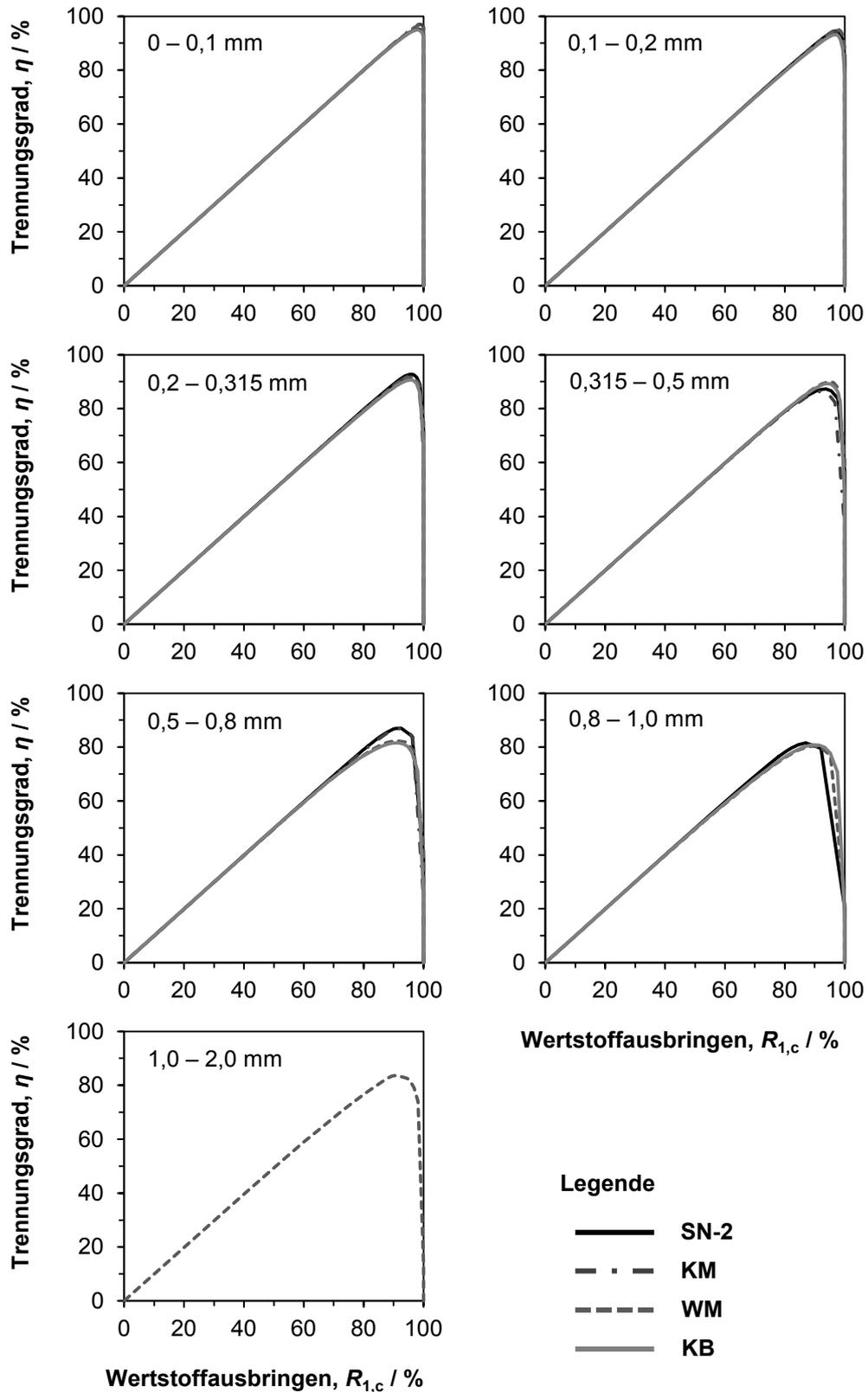


Abbildung 97: Zusammenstellung der FUERSTENAU-2-Diagramme für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen

# Anlagen



**Abbildung 98: Zusammenstellung der Trennungsgraddiagramme für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen**

# Anlagen

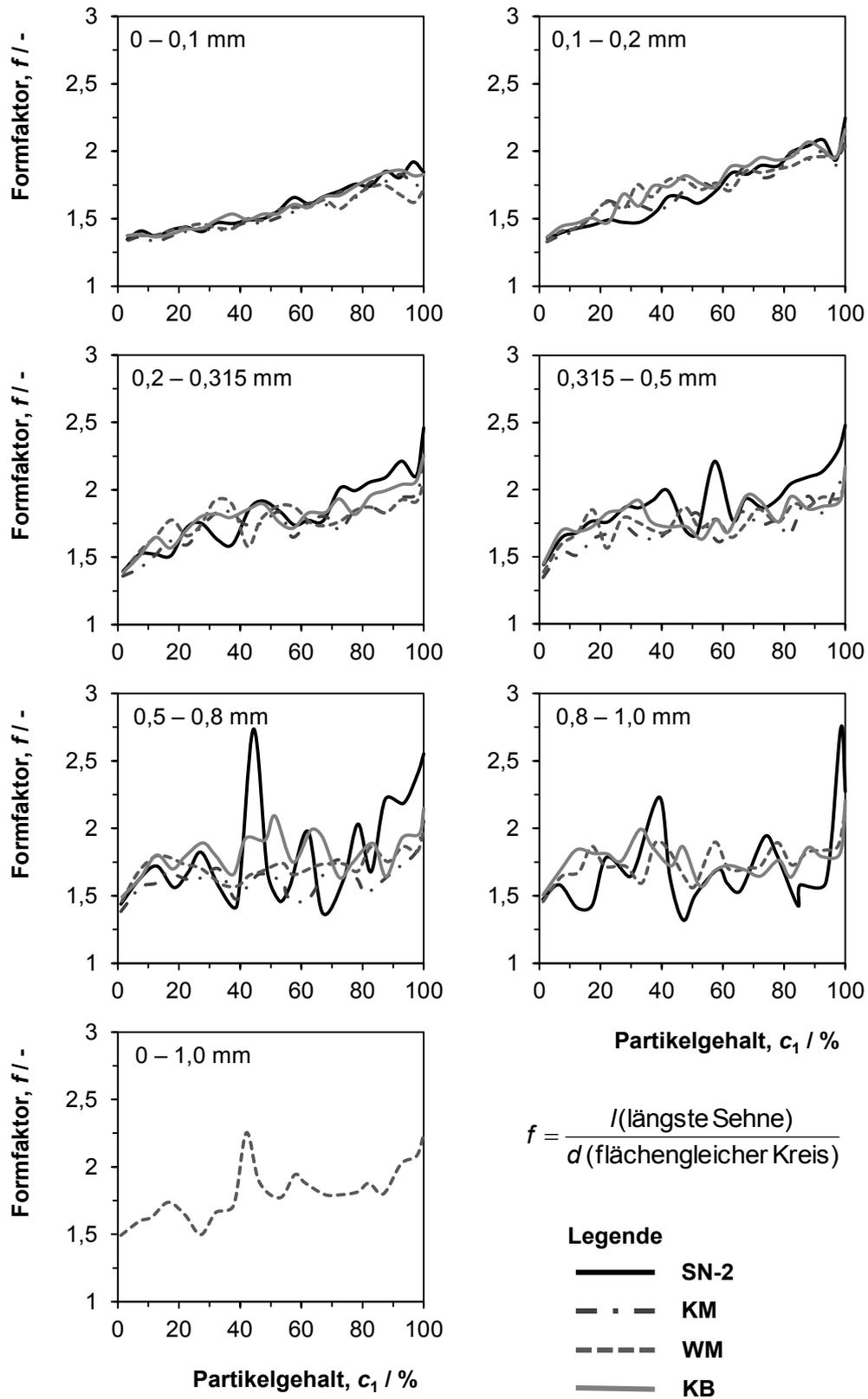


Abbildung 99: Zusammenstellung der Formfaktoren für die Zerkleinerung des Greisenerzes in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen

# Anlagen

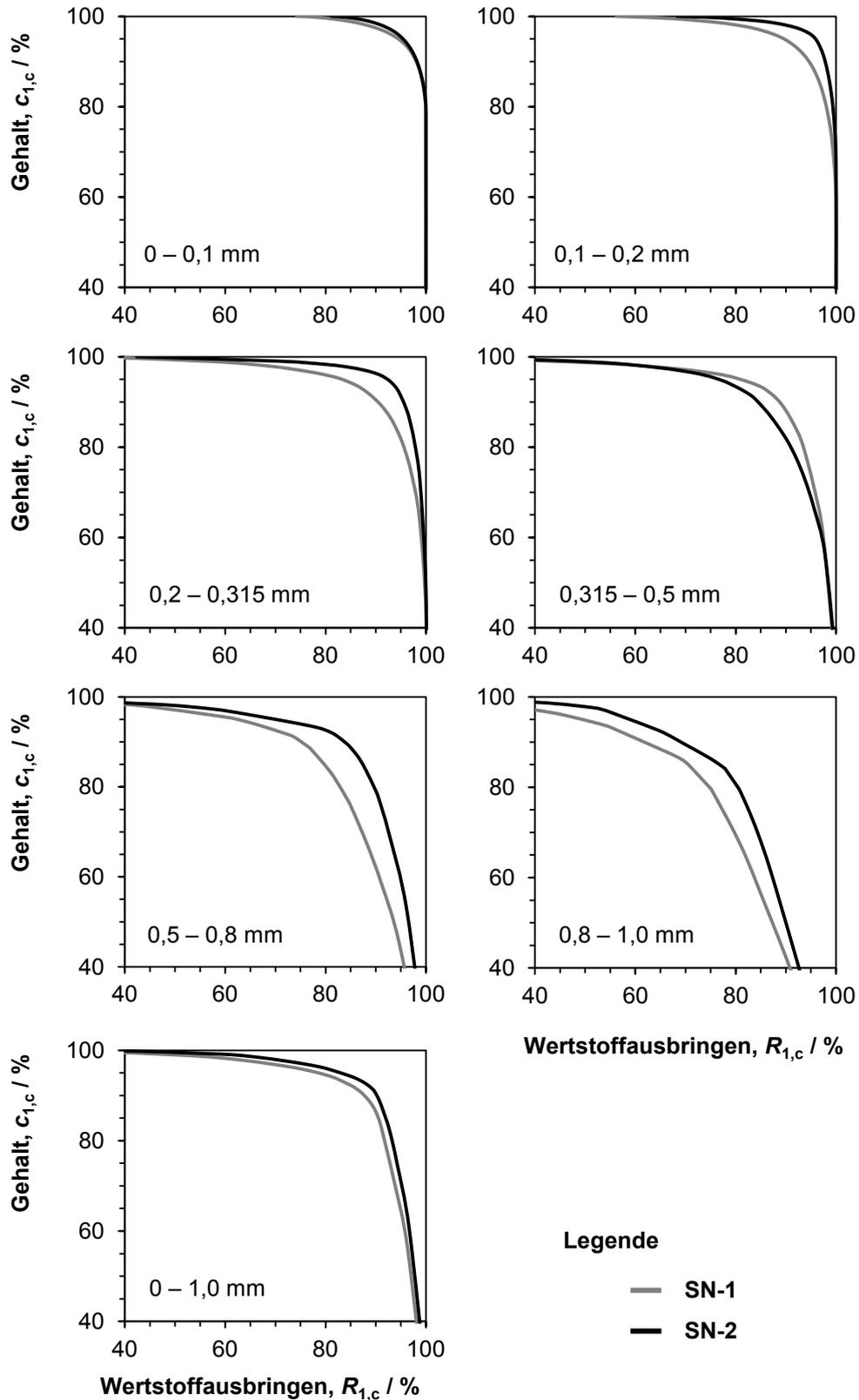


Abbildung 100: Gegenüberstellung der HALBICH-Diagramme unterschiedlicher Partikelgrößenklassen der Messreihen SN-1 und SN-2

# Anlagen

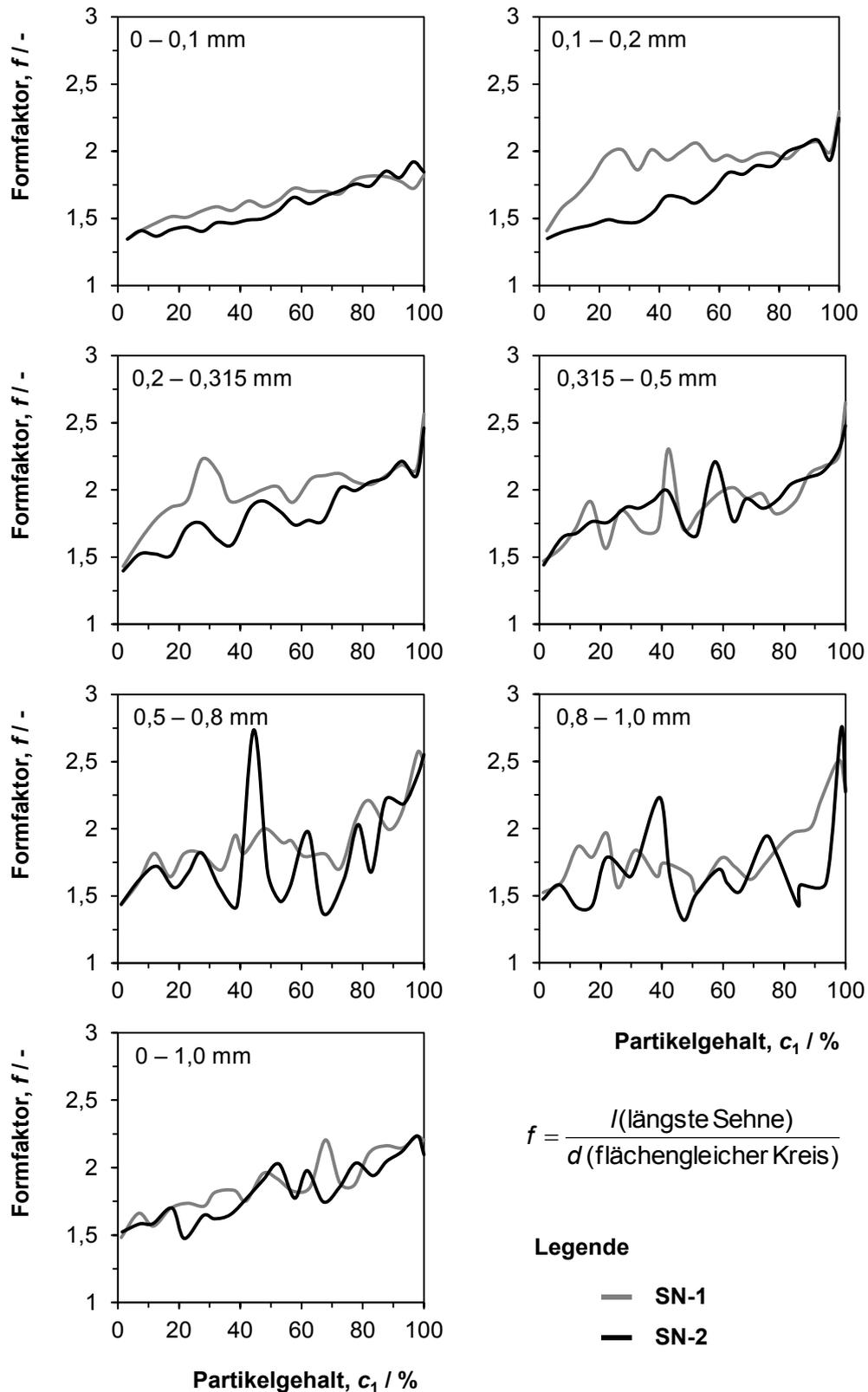


Abbildung 101: Gegenüberstellung der Formfaktoren für Zinnwalditphasen in Abhängigkeit vom Wertstoffgehalt des Partikels und der Partikelgrößenklasse für die Messreihen SN-1 und SN-2

## Anlagen

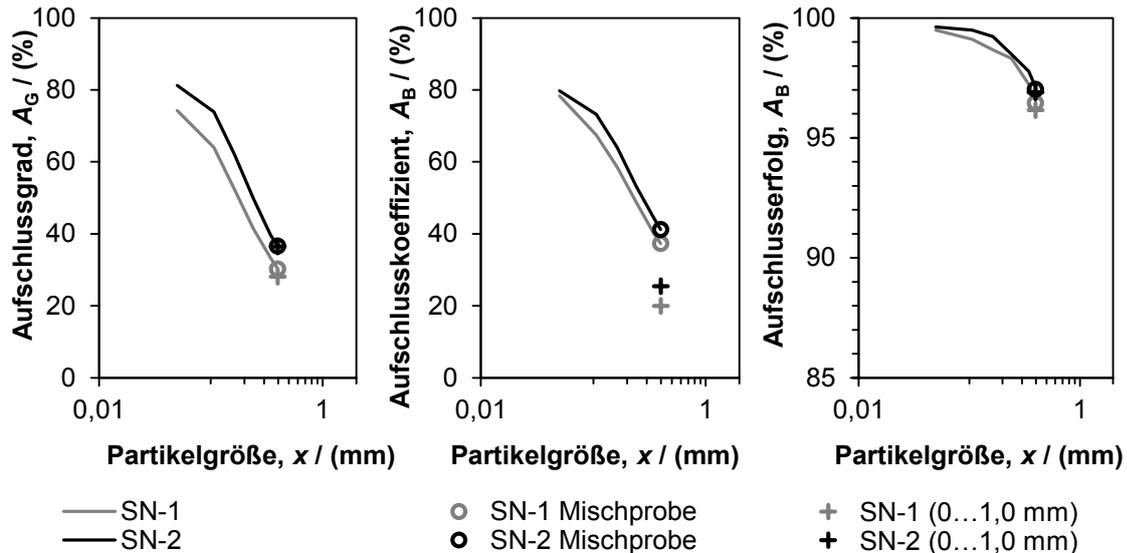


Abbildung 102: Einfluss klassierten und nicht klassierten Probematerials auf das Ergebnis der Aufschlussanalyse am Beispiel des Greisenerzes

## F.2 Sortierung

Tabelle 42: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kegelbrecherproduktes (Zerkleinerungsversuch 1) auf dem Band-Ring-Scheider

KB #1	$x_m$	$m_b$	$m_c$	$R_{m,b}$	$R_{m,c}$	$c_{1,b}$	$\Delta c_{1,b}$	$c_{1,c}$	$\Delta c_{1,c}$	$R_{1,b}$	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$	$R_{2,c}$	$\eta$
Fraktion	mm	g	g	%	%	% <sub>Zin</sub>	%	% <sub>Zin</sub>	%	%	%	%	%	%
0-0,1	0,05	89,9	3,6	96,2	3,8	18,4	0,581	65,2	1,525	87,7	12,3	98,3	1,7	10,7
0,1-0,2	0,15	83,2	16,0	83,9	16,1	15,7	0,411	79,5	1,348	50,6	49,4	95,5	4,5	44,9
0,2-0,315	0,258	80,2	18,2	81,5	18,5	13,8	0,406	80,9	2,055	42,9	57,1	95,2	4,8	52,4
0,315-0,5	0,408	100,4	22,3	81,8	18,2	13,0	0,566	78,8	2,157	42,6	57,4	94,8	5,2	52,3
0,5-0,8	0,65	125,5	31,6	79,9	20,1	9,2	0,194	76,4	2,200	32,4	67,6	93,9	6,1	61,4
0,8-1,0	0,9	63,9	15,9	80,1	19,9	7,6	0,298	72,7	2,010	29,6	70,4	93,2	6,8	63,5
1,0-2,0	1,5	406,6	24,9	94,2	5,8	12,9	0,789	77,3	2,215	73,2	26,8	98,4	1,6	25,2
Summe		949,7	132,5	87,8	12,2									

Tabelle 43: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kegelbrecherproduktes (Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider

KB #2	$x_m$	$m_b$	$m_c$	$R_{m,b}$	$R_{m,c}$	$c_{1,b}$	$\Delta c_{1,b}$	$c_{1,c}$	$\Delta c_{1,c}$	$R_{1,b}$	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$	$R_{2,c}$	$\eta$
Fraktion	mm	g	g	%	%	% <sub>Zin</sub>	%	% <sub>Zin</sub>	%	%	%	%	%	%
0-0,1	0,05	66,0	12,1	84,5	15,5	10,8	0,914	81,2	2,057	42,0	58,0	96,3	3,7	54,3
0,1-0,2	0,15	64,9	29,9	68,5	31,5	1,8	0,286	87,8	2,038	4,4	95,6	94,6	5,4	90,2
0,2-0,315	0,258	70,5	32,4	68,5	31,5	2,1	0,235	89,4	1,459	4,9	95,1	95,3	4,7	90,4
0,315-0,5	0,408	90,6	41,0	68,9	31,1	2,6	0,142	86,8	2,290	6,1	93,9	94,2	5,8	88,1
0,5-0,8	0,65	127,4	52,6	70,8	29,2	3,8	0,153	82,6	2,106	10,0	90,0	93,1	6,9	83,1
0,8-1,0	0,9	59,5	22,6	72,5	27,5	4,2	0,146	77,3	1,710	12,6	87,4	91,7	8,3	79,2
Summe		479,0	190,5	71,5	28,5									

## Anlagen

**Tabelle 44: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kegelbrecherfeinguts (Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider**

KB-F Fraktion	$x_m$ mm	$m_b$ g	$m_c$ g	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$c_{1,b}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,b}$ %	$c_{1,c}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,c}$ %	$R_{1,b}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,b}$ %	$R_{2,c}$ %	$\eta$ %
0-0,1	0,05	94,0	16,9	84,8	15,2	12,8	0,292	83,8	1,821	46,0	54,0	96,8	3,2	50,8
0,1-0,2	0,15	91,7	42,1	68,5	31,5	2,2	0,060	93,9	3,526	4,8	95,2	97,2	2,8	92,4
0,2-0,315	0,258	94,8	44,0	68,3	31,7	2,4	0,094	95,3	2,346	5,1	94,9	97,8	2,2	92,7
0,315-0,5	0,408	128,0	57,0	69,2	30,8	2,9	0,111	92,1	1,736	6,6	93,4	96,5	3,5	89,9
0,5-0,8	0,65	165,2	68,7	70,6	29,4	3,5	0,132	87,0	2,107	8,7	91,3	94,7	5,3	86,0
0,8-1,0	0,9	90,9	35,6	71,9	28,1	3,9	0,068	78,2	1,951	11,3	88,7	91,8	8,2	80,6
Summe		664,7	264,2	71,6	28,4									

**Tabelle 45: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Walzenmühlenproduktes auf dem Band-Ring-Scheider**

WM Fraktion	$x_m$ mm	$m_b$ g	$m_c$ g	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$c_{1,b}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,b}$ %	$c_{1,c}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,c}$ %	$R_{1,b}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,b}$ %	$R_{2,c}$ %	$\eta$ %
0-0,1	0,05	175,5	13,2	93,0	7,0	8,6	0,150	79,2	2,267	59,0	41,0	98,3	1,7	39,3
0,1-0,2	0,15	170,2	41,3	80,5	19,5	1,3	0,108	92,9	2,764	5,3	94,7	98,3	1,7	93,0
0,2-0,315	0,26	210,6	45,6	82,2	17,8	1,5	0,081	94,8	2,857	7,0	93,0	98,9	1,1	91,9
0,315-0,5	0,41	376,0	71,1	84,1	15,9	1,9	0,090	88,4	1,678	10,4	89,6	97,8	2,2	87,4
0,5-0,8	0,65	690,6	114,2	85,8	14,2	2,5	0,074	80,2	4,429	15,8	84,2	96,8	3,2	80,9
0,8-1,0	0,90	216,4	52,1	80,6	19,4	2,9	0,132	74,3	4,664	14,0	86,0	94,0	6,0	80,0
Summe		1839,2	337,6	86,2	13,8									

**Tabelle 46: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (Zerkleinerungsversuch 1) auf dem Band-Ring-Scheider**

KM #1 Fraktion	$x_m$ mm	$m_b$ g	$m_c$ g	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$c_{1,b}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,b}$ %	$c_{1,c}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,c}$ %	$R_{1,b}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,b}$ %	$R_{2,c}$ %	$\eta$ %
0-0,1	0,05	128,5	212,1	37,7	62,3	4,1	0,12	17,5	0,408	12,6	87,4	41,3	58,7	28,8
0,1-0,2	0,15	245,5	70,7	77,6	22,4	1,1	0,04	77,6	1,613	4,7	95,3	93,9	6,1	89,1
0,2-0,315	0,258	232,4	66,0	77,9	22,1	1,3	0,04	80,6	2,294	5,5	94,5	94,7	5,3	89,2
0,315-0,5	0,408	263,3	74,0	78,1	21,9	1,6	0,09	79,4	2,563	6,6	93,4	94,4	5,6	87,8
0,5-0,8	0,65	243,3	65,7	78,7	21,3	1,9	0,05	78,5	1,224	8,3	91,7	94,4	5,6	86,1
Summe		1113,0	488,5	69,5	30,5									

**Tabelle 47: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (,9 mm Austragsmaschenweite, Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider (Messung 1)**

KM #2-1 Fraktion	$x_m$ mm	$m_b$ g	$m_c$ g	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$c_{1,b}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,b}$ %	$c_{1,c}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,c}$ %	$R_{1,b}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,b}$ %	$R_{2,c}$ %	$\eta$ %
0-0,1	0,05	213,3	202,2	51,3	48,7	11,0	0,309	28,8	0,887	28,7	71,3	56,9	43,1	28,2
0,1-0,2	0,15	339,6	129,0	72,5	27,5	2,0	0,116	91,5	2,189	5,5	94,5	96,8	3,2	91,4
0,2-0,315	0,258	352,1	125,3	73,7	26,3	1,6	0,103	93,6	2,967	4,6	95,4	97,7	2,3	93,2
0,315-0,5	0,408	443,4	126,5	77,8	22,2	1,9	0,076	92,8	3,175	6,7	93,3	97,9	2,1	91,2
0,5-0,8	0,65	556,7	121,4	82,1	17,9	2,2	0,095	89,4	2,495	10,3	89,7	97,7	2,3	87,4
Summe		1905,1	704,4	73,0	27,0									

## Anlagen

**Tabelle 48: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (0,9 mm Austragsmaschenweite, Zerkleinerungsversuch 2) auf dem Band-Ring-Scheider (Messung 1)**

KM #2-2	$x_m$	$m_b$	$m_c$	$R_{m,b}$	$R_{m,c}$	$c_{1,b}$	$\Delta c_{1,b}$	$c_{1,c}$	$\Delta c_{1,c}$	$R_{1,b}$	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$	$R_{2,c}$	$\eta$
Fraktion	mm	g	g	%	%	% <sub>Zin</sub>	%	% <sub>Zin</sub>	%	%	%	%	%	%
0-0,1	0,05	213,3	202,2	51,3	48,7	11,5	0,288	30,1	0,849	28,7	71,3	57,2	42,8	28,5
0,1-0,2	0,15	339,6	129,0	72,5	27,5	2,2	0,117	94,5	2,265	5,7	94,3	97,9	2,1	92,2
0,2-0,315	0,258	352,1	125,3	73,7	26,3	1,7	0,058	97,3	2,263	4,6	95,4	99,0	1,0	94,4
0,315-0,5	0,408	443,4	126,5	77,8	22,2	2,0	0,084	96,1	1,968	6,8	93,2	98,9	1,1	92,1
0,5-0,8	0,65	556,7	121,4	82,1	17,9	2,3	0,069	93,0	2,124	10,3	89,7	98,5	1,5	88,1
Summe		1905,1	704,4	73,0	27,0									

**Tabelle 49: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Kugelmühlenproduktes (1,4 mm Austragsmaschenweite) auf dem Band-Ring-Scheider**

KM 1,4	$x_m$	$m_b$	$m_c$	$R_{m,b}$	$R_{m,c}$	$c_{1,b}$	$\Delta c_{1,b}$	$c_{1,c}$	$\Delta c_{1,c}$	$R_{1,b}$	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$	$R_{2,c}$	$\eta$
Fraktion	mm	g	g	%	%	% <sub>Zin</sub>	%	% <sub>Zin</sub>	%	%	%	%	%	%
0-0,1	0,05	143,0	81,7	63,6	36,4	7,9	0,219	37,1	1,607	27,1	72,9	71,9	28,1	44,9
0,1-0,2	0,15	164,6	60,5	73,1	26,9	1,5	0,032	87,1	4,012	4,4	95,6	95,4	4,6	91,0
0,2-0,315	0,258	184,8	60,3	75,4	24,6	1,5	0,049	92,0	2,939	4,7	95,3	97,4	2,6	92,8
0,315-0,5	0,408	260,5	73,2	78,1	21,9	1,7	0,041	90,2	2,474	6,5	93,5	97,3	2,7	90,8
0,5-0,8	0,65	358,0	83,4	81,1	18,9	2,0	0,057	85,7	3,431	9,0	91,0	96,7	3,3	87,7
0,8-1,0	0,9	168,6	34,5	83,0	17,0	2,2	0,078	78,8	1,727	12,1	87,9	95,7	4,3	83,7
1,0-2,0	1,5	135,3	23,6	85,1	14,9	2,4	0,056	76,4	1,600	15,3	84,7	96,0	4,0	80,6
Summe		1414,9	417,1	77,2	22,8									
GP		173,0	48,9	78,0	22,0	3,2	0,102	82,4	1,773	12,1	87,9	95,1	4,9	83,0

**Tabelle 50: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Hammermühlenproduktes auf dem Band-Ring-Scheider**

HM	$x_m$	$m_b$	$m_c$	$R_{m,b}$	$R_{m,c}$	$c_{1,b}$	$\Delta c_{1,b}$	$c_{1,c}$	$\Delta c_{1,c}$	$R_{1,b}$	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$	$R_{2,c}$	$\eta$
Fraktion	mm	g	g	%	%	% <sub>Zin</sub>	%	% <sub>Zin</sub>	%	%	%	%	%	%
0-0,1	0,05	125,9	37,9	76,9	23,1	7,6	0,230	71,4	1,380	26,2	73,8	91,5	8,5	65,2
0,1-0,2	0,15	141,4	57,5	71,1	28,9	1,5	0,047	89,5	2,079	4,1	95,9	95,8	4,2	91,8
0,2-0,315	0,258	188,1	66,1	74,0	26,0	1,4	0,073	90,2	1,961	4,4	95,6	96,6	3,4	92,3
0,315-0,5	0,408	265,8	84,0	76,0	24,0	1,6	0,077	89,4	1,981	5,3	94,7	96,7	3,3	91,4
0,5-0,8	0,65	303,6	59,2	83,7	16,3	1,7	0,056	83,7	3,517	9,5	90,5	96,9	3,1	87,3
0,8-1,0	0,9	114,7	17,2	86,9	13,1	2,2	1,076	77,2	2,371	15,9	84,1	96,6	3,4	80,7
Summe		1139,5	321,9											
GP		173,0	48,9	78,0	22,0	2,4	0,061	81,8	1,528	9,3	90,7	95,0	5,0	85,7

**Tabelle 51: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Schlagnasenmühlenproduktes auf dem Band-Ring-Scheider**

SN	$x_m$	$m_b$	$m_c$	$R_{m,b}$	$R_{m,c}$	$c_{1,b}$	$\Delta c_{1,b}$	$c_{1,c}$	$\Delta c_{1,c}$	$R_{1,b}$	$R_{1,c}$	$R_{2,b}$	$R_{2,c}$	$\eta$
Fraktion	mm	g	g	%	%	% <sub>Zin</sub>	%	% <sub>Zin</sub>	%	%	%	%	%	%
0-0,1	0,05	351,9	90,1	79,6	20,4	8,7	0,381	70,7	1,742	32,3	67,7	92,4	7,6	60,1
0,1-0,2	0,15	381,2	156,8	70,9	29,1	1,5	0,118	89,6	1,850	3,9	96,1	95,8	4,2	92,0
0,2-0,315	0,258	429,5	146,5	74,6	25,4	1,4	0,093	92,3	2,268	4,3	95,7	97,4	2,6	93,1
0,315-0,5	0,408	577,9	159,1	78,4	21,6	1,5	0,101	92,6	1,988	5,7	94,3	98,0	2,0	92,3
0,5-0,8	0,65	634,3	130,7	82,9	17,1	1,8	0,106	87,8	2,241	8,9	91,1	97,5	2,5	88,7
0,8-1,0	0,9	227,4	38,6	85,5	14,5	2,2	0,150	79,5	1,803	13,9	86,1	96,6	3,4	82,7
Summe		2602,2	721,8	82,0	18,0			613,9						
GP		506,1	146,7	77,5	22,5	2,6	0,118	86,1	1,712	9,4	90,6	96,0	4,0	86,6

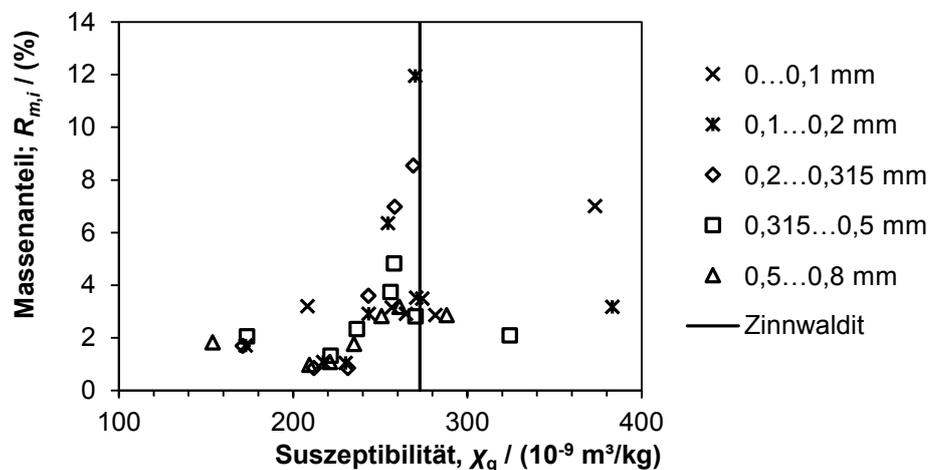
## Anlagen

**Tabelle 52: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Schwingmühlenproduktes (Intensität 5) auf dem Band-Ring-Scheider**

SM-i5 Fraktion	$x_m$ Mm	$m_b$ g	$m_c$ g	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$c_{1,b}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,b}$ %	$c_{1,c}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,c}$ %	$R_{1,b}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,b}$ %	$R_{2,c}$ %	$\eta$ %
0-0,1	0,05	153,5	47,3	76,5	23,5	18,7	0,531	50,7	1,502	54,5	45,5	84,3	15,7	29,8
0,1-0,2	0,15	130,5	64,9	66,8	33,2	2,6	0,080	94,7	4,563	5,2	94,8	97,3	2,7	92,2
0,2-0,315	0,258	130,9	49,1	72,7	27,3	1,8	0,172	94,8	2,947	4,7	95,3	98,0	2,0	93,3
0,315-0,5	0,408	172,6	48,6	78,0	22,0	1,8	0,073	88,9	7,619	6,6	93,4	96,9	3,1	90,3
0,5-0,8	0,65	232,4	48,7	82,7	17,3	2,2	0,046	85,3	2,091	11,1	88,9	97,0	3,0	85,8
0,8-1,0	0,9	115,3	21,3	84,4	15,6	2,6	0,094	73,5	1,865	15,9	84,1	95,2	4,8	79,3
1,0-2,0	1,5	274,9	48,5	85,0	15,0	3,7	0,110	62,9	2,677	25,2	74,8	93,6	6,4	68,4
Summe		1210,2	328,3											

**Tabelle 53: Sortierergebnisse der Magnetscheidung von Partikelgrößenklassen des Schwingmühlenproduktes (Intensität 9) auf dem Band-Ring-Scheider**

SM-i9 Fraktion	$x_m$ Mm	$m_b$ g	$m_c$ g	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$c_{1,b}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,b}$ %	$c_{1,c}$ % <sub>Zin</sub>	$\Delta c_{1,c}$ %	$R_{1,b}$ %	$R_{1,c}$ %	$R_{2,b}$ %	$R_{2,c}$ %	$\eta$ %
0-0,1	0,05	173,0	76,0	69,5	30,5	17,4	0,794	43,0	1,426	47,9	52,1	76,7	23,3	28,8
0,1-0,2	0,15	172,0	79,7	68,3	31,7	2,2	0,098	90,7	3,936	4,9	95,1	95,8	4,2	90,9
0,2-0,315	0,258	172,7	57,4	75,0	25,0	1,2	0,073	95,8	1,837	3,6	96,4	98,6	1,4	95,0
0,315-0,5	0,408	235,6	50,4	82,4	17,6	1,4	0,078	91,3	3,620	6,7	93,3	98,1	1,9	91,4
0,5-0,8	0,65	309,9	43,5	87,7	12,3	1,7	0,083	84,9	2,862	12,2	87,8	97,9	2,1	85,7
0,8-1,0	0,9	111,5	12,5	89,9	10,1	2,4	0,081	79,9	2,247	21,1	78,9	97,7	2,3	76,6
Summe		1174,6	319,6	80,0	20,0									



**Abbildung 103: Zusammenhang von Suszeptibilität und ausgegetragenem Masseanteil für die Produkte der Trennung des Greisenerzes am Isodynamik-Scheider**

Anlagen

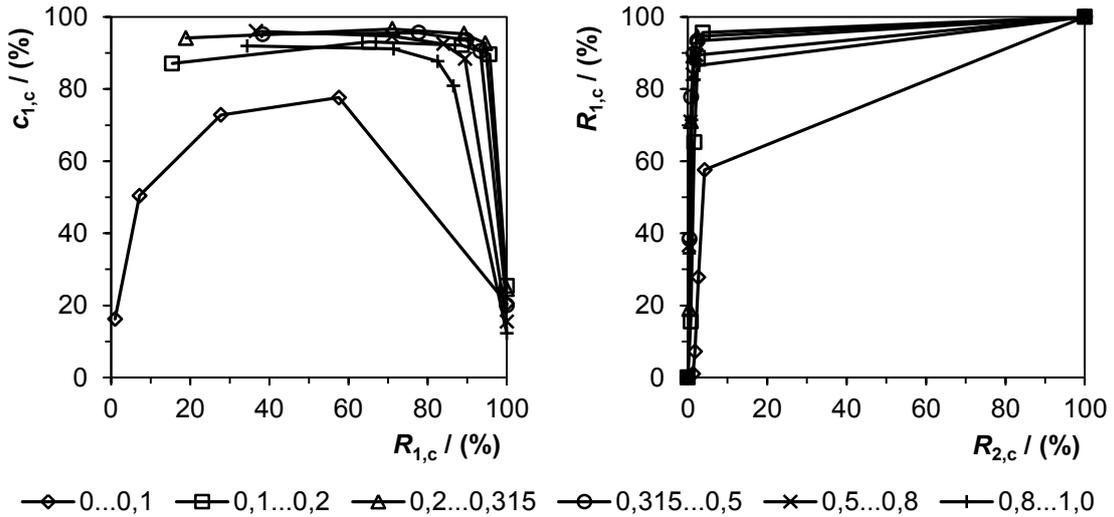


Abbildung 104: HALBICH- und FUERSTENAU-2-Diagramm für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Greisenerzes auf dem Band-Ring-Scheider

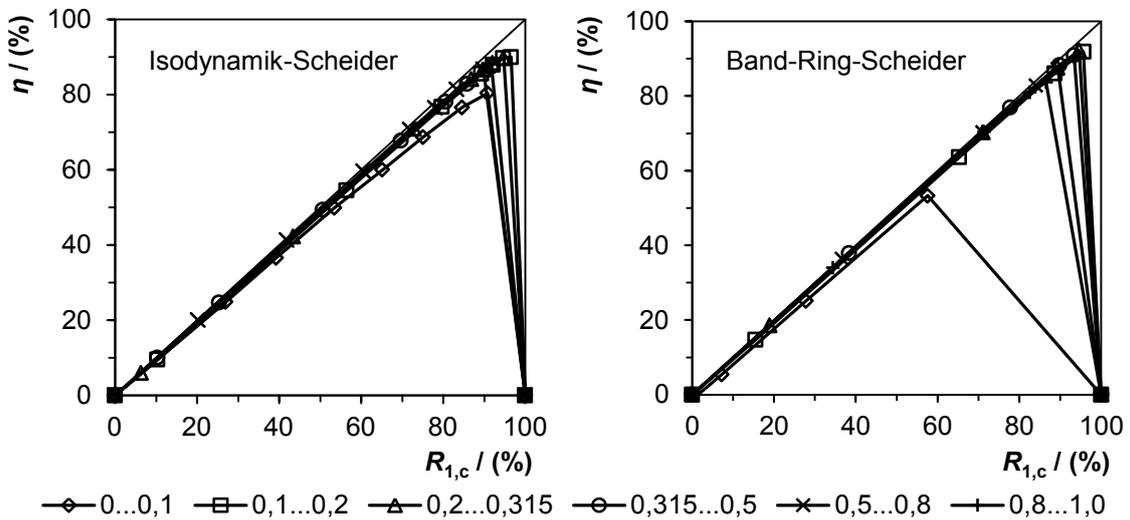


Abbildung 105: Trennungsgraddiagramme für die Trennung des Greisenerzes mithilfe des Isodynamik-Scheiders (links) und des Band-Ring-Scheiders (rechts)

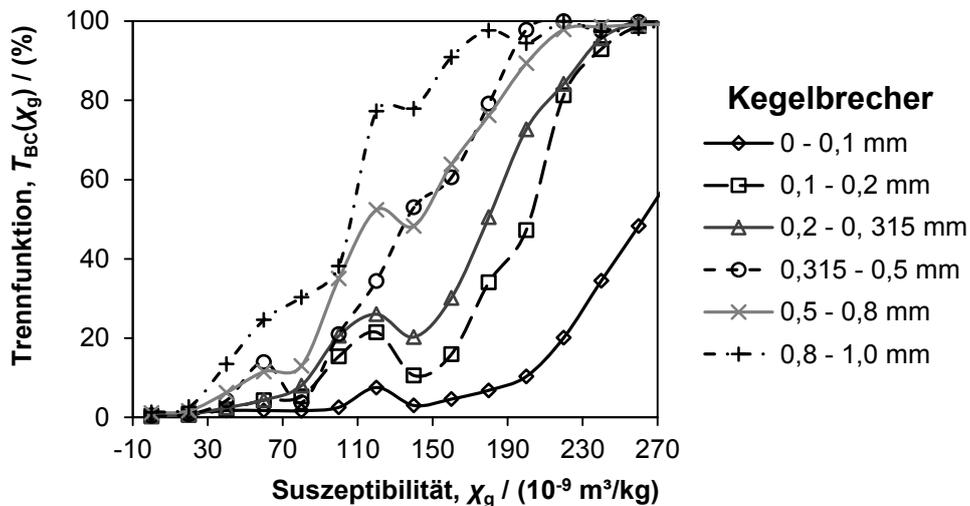


Abbildung 106: Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes vom Kegeltreiber

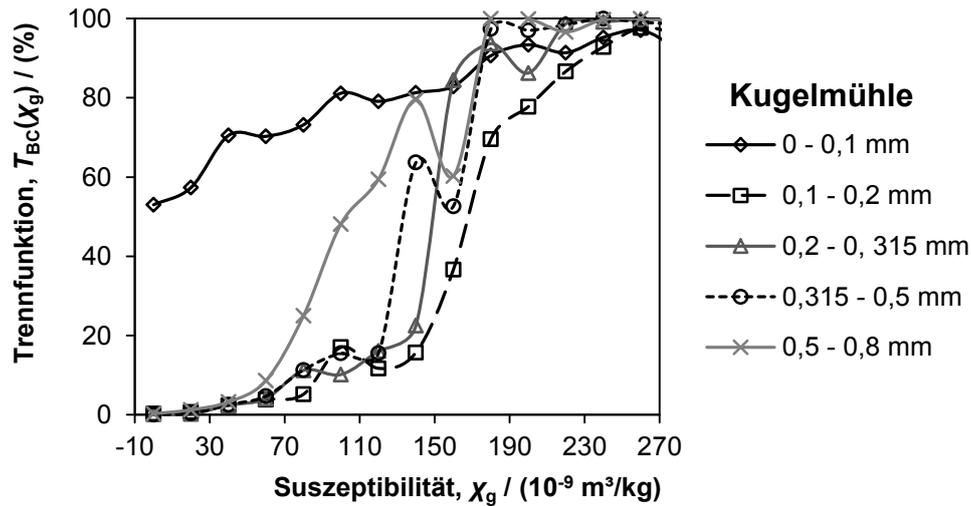


Abbildung 107: Trennfunktionen für verschiedene Partikelgrößenklassen des Produktes der Kugelmühle

Tabelle 54: Kennwerte der Trennfunktionen zum Material der Walzenmühle

Fraktion	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$\chi(T_{25})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\chi(T_{50})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\chi(T_{75})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	K
0 – 0,1 mm	93,0	7,0	200,7	242,1	-	-
0,1 – 0,2 mm	80,5	19,5	143,4	157,9	186,0	0,77
0,2 – 0,315 mm	82,2	17,8	133,8	149,1	188,8	0,71
0,315 – 0,5 mm	84,1	15,9	114,6	137,4	170,7	0,67
0,5 – 0,8 mm	85,8	14,2	89,2	105,9	119,2	0,75
0,8 – 1,0 mm	80,6	19,4	63,7	79,4	112,9	0,56

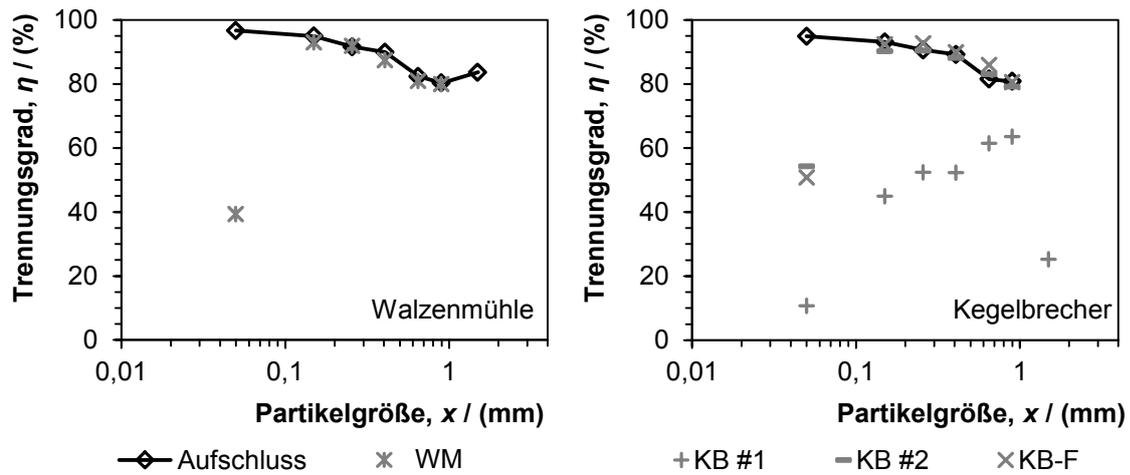
Tabelle 55: Kennwerte der Trennfunktionen zum Material des Kegelbrechers

Fraktion	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$\chi(T_{25})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\chi(T_{50})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\chi(T_{75})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	K
0 – 0,1 mm	84,8	15,2	226,8	262,3	-	-
0,1 – 0,2 mm	68,5	31,5	170,0	201,6	216,3	0,79
0,2 – 0,315 mm	68,3	31,7	149,6	179,5	202,1	0,74
0,315 – 0,5 mm	69,2	30,8	105,9	136,8	175,5	0,60
0,5 – 0,8 mm	70,6	29,4	90,9	117,3	178,1	0,51
0,8 – 1,0 mm	71,9	28,1	61,4	106,0	118,8	0,52

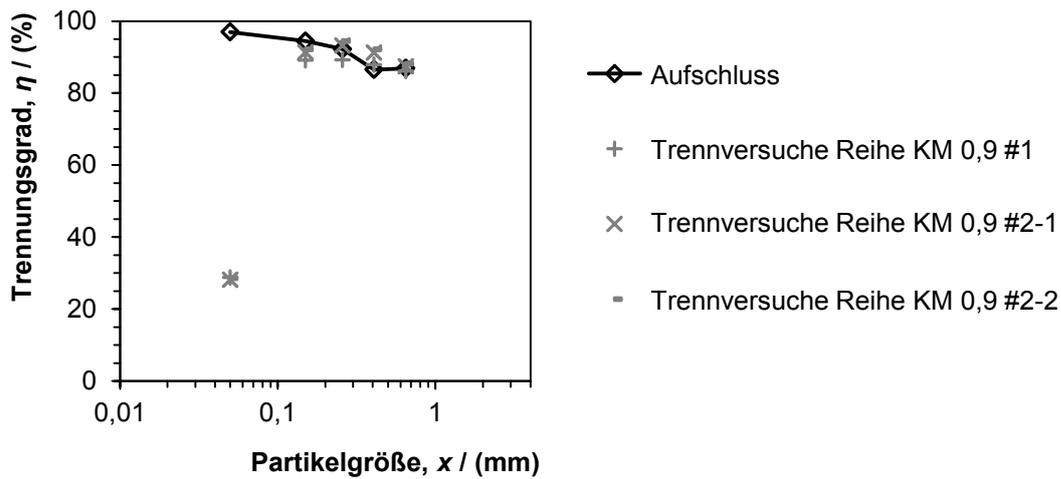
Tabelle 56: Kennwerte der Trennfunktionen zum Material der Kugelmühle

Fraktion	$R_{m,b}$ %	$R_{m,c}$ %	$\chi(T_{25})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\chi(T_{50})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	$\chi(T_{75})$ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$	K
0 – 0,1 mm	37,7	62,3	-	-	84,6	-
0,1 – 0,2 mm	77,6	22,4	148,8	168,1	193,2	0,77
0,2 – 0,315 mm	77,9	22,1	140,8	148,9	156,9	0,90
0,315 – 0,5 mm	78,1	21,9	123,9	134,3	170,0	0,73
0,5 – 0,8 mm	78,7	21,3	80,0	103,3	135,5	0,59

# Anlagen



**Abbildung 108: Gegenüberstellung der laut Verwachsungsverteilung maximal möglichen und der im Versuch erreichten Trennungsgrade für die Magnetscheidung des Greisenerzes aus den Walzenmühlen- und Kegelbrecherversuchen**



**Abbildung 109: Gegenüberstellung der laut Verwachsungsverteilung maximal möglichen und der im Versuch erreichten Trennungsgrade für die Magnetscheidung des Greisenerzes aus den Kugelmühlenversuchen**

## Anlagen

### F.3 Ausgewählte Zahlenwerte der MLA

**Tabelle 57: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials vom Kegelbrecher**

	KB (mm)	0...0.1	0.1...0.2	0.2...0.315	0.315...0.5	0.5...0.8	0.8...1.0
	0	44063	8491	3947	1321	474	479
	0...5	106	423	667	440	252	320
	5...10	221	275	196	76	54	77
	10...15	207	168	102	44	28	32
	15...20	222	93	58	39	12	28
	20...25	180	65	43	20	15	26
	25...30	162	52	47	24	20	16
	30...35	159	57	28	13	10	15
	35...40	148	59	39	17	8	11
	40...45	152	57	29	6	12	12
	45...50	133	61	32	17	12	10
	50...55	139	66	28	17	5	7
	55...60	177	65	35	13	5	8
	60...65	165	79	60	8	8	9
	65...70	184	105	45	16	16	15
	70...75	184	117	63	15	6	17
	75...80	189	143	64	18	11	15
	80...85	187	210	120	36	9	17
	85...90	206	284	164	39	17	27
	90...95	126	422	318	61	27	37
	95...100	70	332	498	189	102	97
	100	14994	5499	1481	828	315	223
	gesamt	62374	17123	8064	3257	1418	1498

**Tabelle 58: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Walzenmühle**

	WM (mm)	0...0.1	0.1...0.2	0.2...0.315	0.315...0.5	0.5...0.8	0.8...1.0	1,0...2,0
	0	55547	11588	4812	2122	725	558	322
	0...5	71	295	496	427	270	403	198
	5...10	131	178	159	82	60	70	39
	10...15	132	91	75	37	30	30	23
	15...20	116	62	47	28	22	22	12
	20...25	117	50	27	24	11	16	12
	25...30	96	53	32	14	10	16	13
	30...35	95	48	21	20	9	11	8
	35...40	86	32	23	12	8	15	9
	40...45	83	46	12	14	15	6	4
	45...50	104	33	20	17	5	7	4
	50...55	79	41	21	12	6	7	8
	55...60	91	49	32	10	7	9	7
	60...65	98	49	30	13	6	7	14
	65...70	90	61	46	23	11	13	7
	70...75	111	76	37	27	9	13	18
	75...80	96	99	43	26	17	24	23
	80...85	106	118	78	33	15	17	21
	85...90	125	172	99	51	26	28	33
	90...95	106	250	178	94	40	39	52
	95...100	32	181	299	179	66	62	112
	100	9006	3661	1106	428	128	126	152
	gesamt	66518	17233	7693	3693	1496	1499	1091

## Anlagen

**Tabelle 59: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Kugelmühle**

KM (mm)	0...0.1	0.1...0.2	0.2...0.315	0.315...0.5	0.5...0.8
0	36006	7466	3314	1175	349
0...5	30	324	653	549	266
5...10	102	191	173	98	25
10...15	72	100	58	37	14
15...20	72	58	39	20	6
20...25	61	49	28	17	11
25...30	40	41	25	21	5
30...35	53	41	19	11	4
35...40	51	46	21	6	2
40...45	45	36	15	14	2
45...50	57	37	15	14	6
50...55	52	40	22	10	2
55...60	45	59	14	7	3
60...65	46	48	28	17	3
65...70	65	54	36	10	4
70...75	71	68	36	11	10
75...80	57	103	64	23	10
80...85	76	131	77	19	10
85...90	66	189	114	39	9
90...95	70	245	219	62	27
95...100	30	211	409	150	49
100	6395	4694	1472	329	110
gesamt	43562	14231	6851	2639	927

**Tabelle 60: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Schlagnasmühle (Probe 1)**

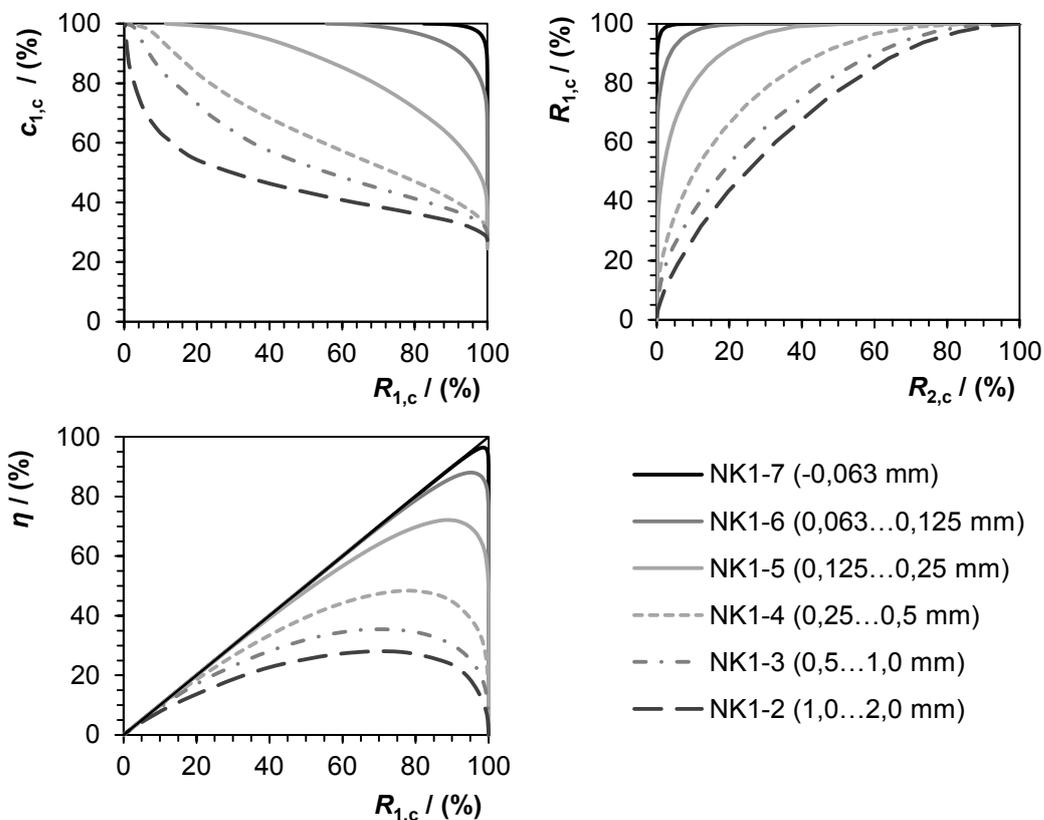
SN-1 (mm)	0...0.1	0.1...0.2	0.2...0.315	0.315...0.5	0.5...0.8	0.8...1.0	0...1,0
0	43468	10243	3729	1560	824	710	8063
0...5	132	512	497	385	311	174	380
5...10	197	287	172	68	56	26	116
10...15	189	180	81	38	24	11	62
15...20	160	101	59	15	18	4	44
20...25	162	95	48	9	9	5	35
25...30	173	78	38	13	7	1	28
30...35	144	69	31	12	7	2	29
35...40	153	62	32	3	4	3	38
40...45	127	64	29	8	3	2	33
45...50	136	72	29	7	1	2	31
50...55	111	84	26	8	4	1	33
55...60	173	67	27	5	6	2	35
60...65	160	70	34	7	2	5	51
65...70	146	91	34	11	3	4	38
70...75	207	103	28	20	10	2	58
75...80	175	135	52	9	10	3	63
80...85	182	163	94	21	6	6	72
85...90	209	240	136	36	21	8	91
90...95	167	367	207	75	13	11	129
95...100	78	293	340	180	68	27	159
100	13125	5348	1637	471	220	147	3107
gesamt	59774	18724	7360	2961	1627	1156	12695

**Tabelle 61: Partikelanzahl aus MLA-Messung je Größen- und Gehaltklasse des Materials der Schlagnasenmühle (Probe 2)**

	SN-2 (mm)	0...0.1	0.1...0.2	0.2...0.315	0.315...0.5	0.5...0.8	0.8...1.0	0...1,0
	0	50704	8833	3616	1834	727	472	9140
	0...5	92	312	433	379	277	163	358
	5...10	191	205	130	93	44	20	140
	10...15	214	133	68	46	18	8	75
	15...20	218	98	39	30	9	5	57
	20...25	192	67	40	22	6	2	46
	25...30	194	64	31	20	7	2	49
	30...35	175	54	19	9	5	2	32
	35...40	184	38	19	12	3	1	26
	40...45	157	33	17	17	1	1	34
	45...50	142	38	24	12	2	2	33
	50...55	135	40	17	7	4	5	40
	55...60	147	45	24	12	5	5	37
	60...65	147	66	26	14	5	2	41
	65...70	171	58	23	8	2	2	32
	70...75	179	73	37	18	5	3	57
	75...80	166	97	48	20	12	4	49
	80...85	147	124	60	22	15	4	60
	85...90	144	142	84	49	19	2	89
	90...95	109	261	168	79	30	4	101
	95...100	42	167	320	179	72	30	147
	gesamt	69634	17275	7538	3741	1574	1006	14519

## G Ergebnisse zur Aufbereitung des Nephelin-Syenits

### G.1 Zerkleinerung und Aufschluss



**Abbildung 110: Verwachsungskurven des Nephelin-Syenits (Reihe NK1)**

# Anlagen

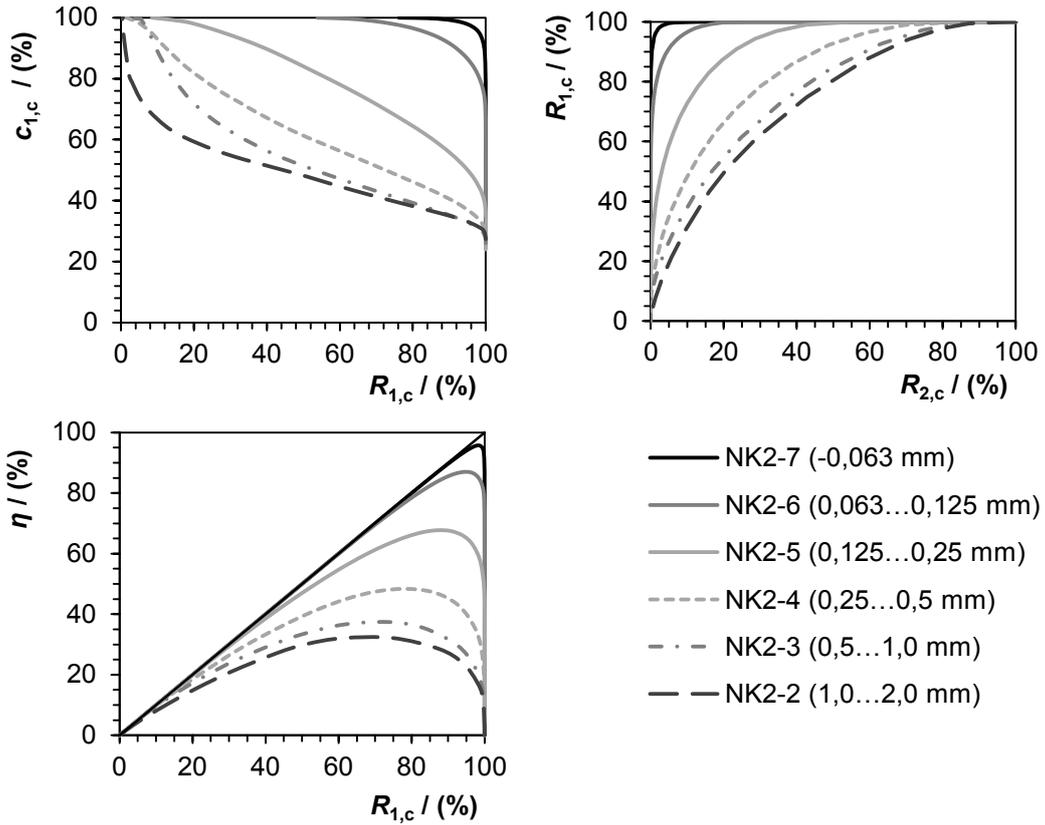


Abbildung 111: Verwachsungskurven des Nephelin-Syenits (Reihe NK2)

## G.2 Sortierung

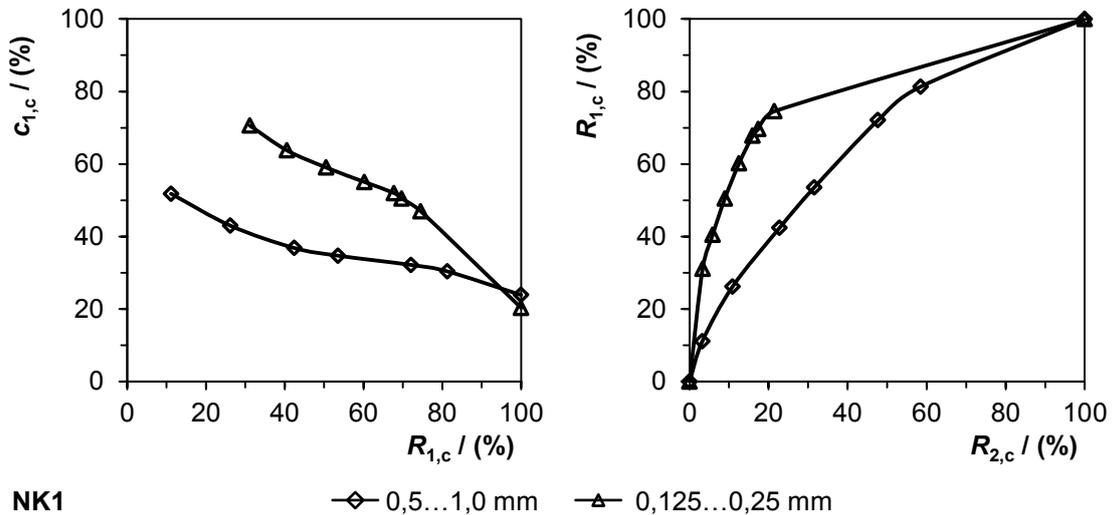


Abbildung 112: HALBICH- und FUERSTENAU-2-Diagramm für die Trennung der Partikelgrößenklassen des Nephelin-Syenits auf dem Isodynamik-Scheider

# Anlagen

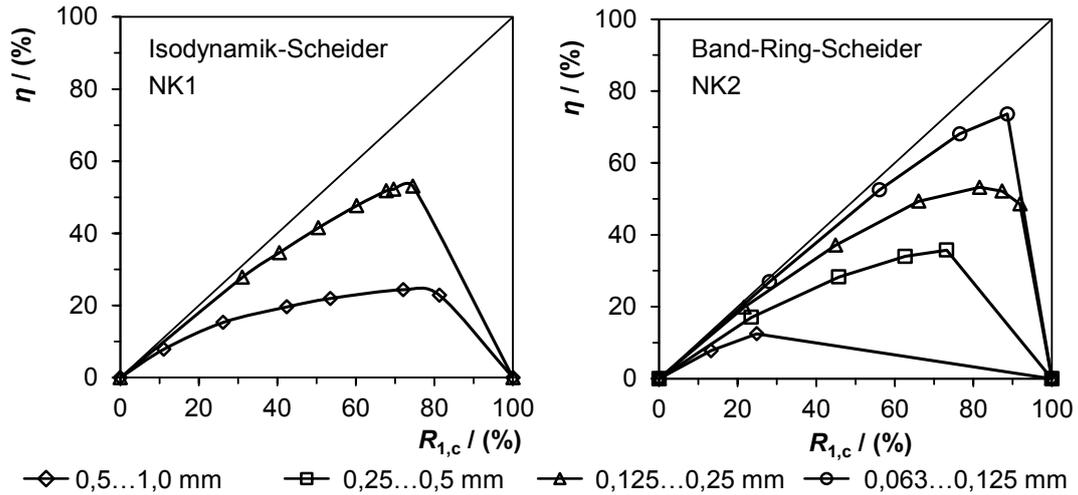


Abbildung 113: Trennungsgraddiagramme für die Trennung des Nephelin-Syenits mithilfe des Isodynamikscheiders (links) und des Band-Ring-Scheiders (rechts)

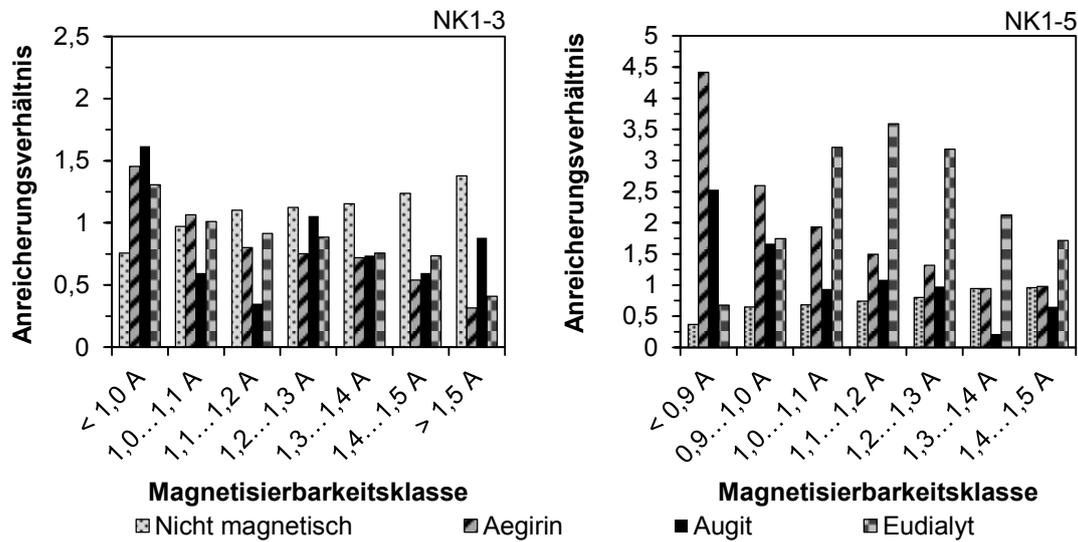


Abbildung 114: Anreicherungs-faktoren in Abhängigkeit von der Magnetisierbarkeitsklasse des Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klassen 3 und 5)

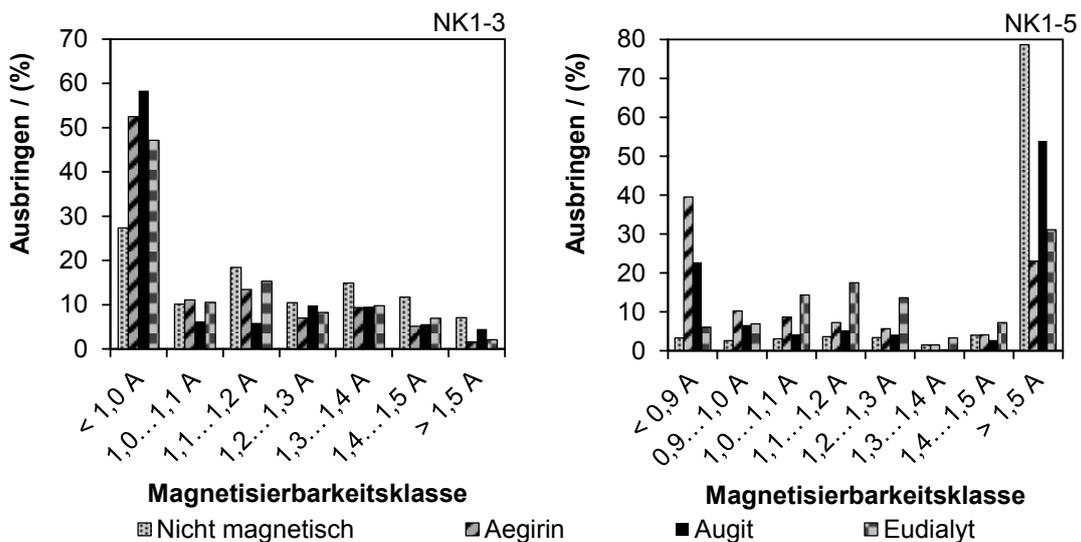


Abbildung 115: Ausbringenswerte in Abhängigkeit von der Magnetisierbarkeitsklasse des Nephelin-Syenits (Reihe NK1, Klassen 3 und 5)

# Anlagen

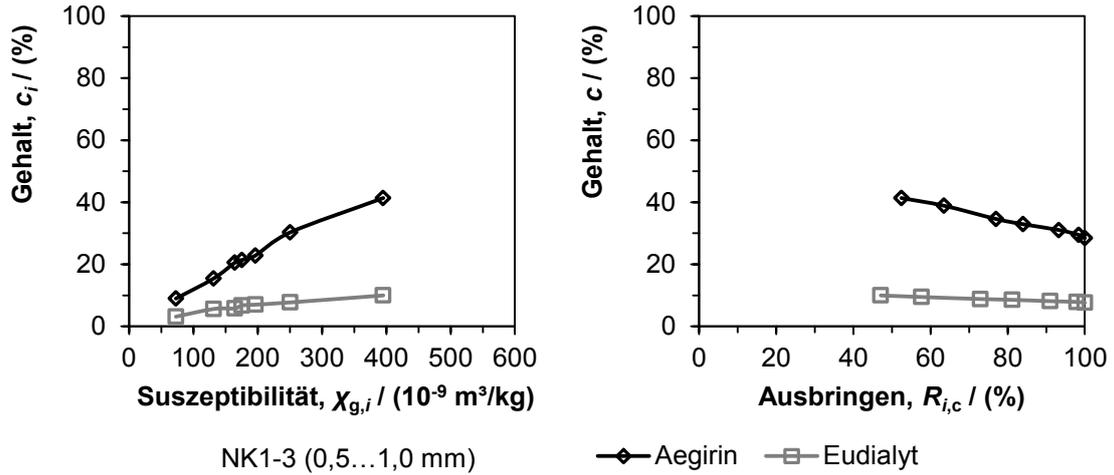


Abbildung 116: Mineralgehalt der Suszeptibilitätsklassen in Abhängigkeit von ihrer Suszeptibilität (links) und HALBICH-Diagramm für Eudialyt und Aegirin (rechts) für die Reihe NK1-3

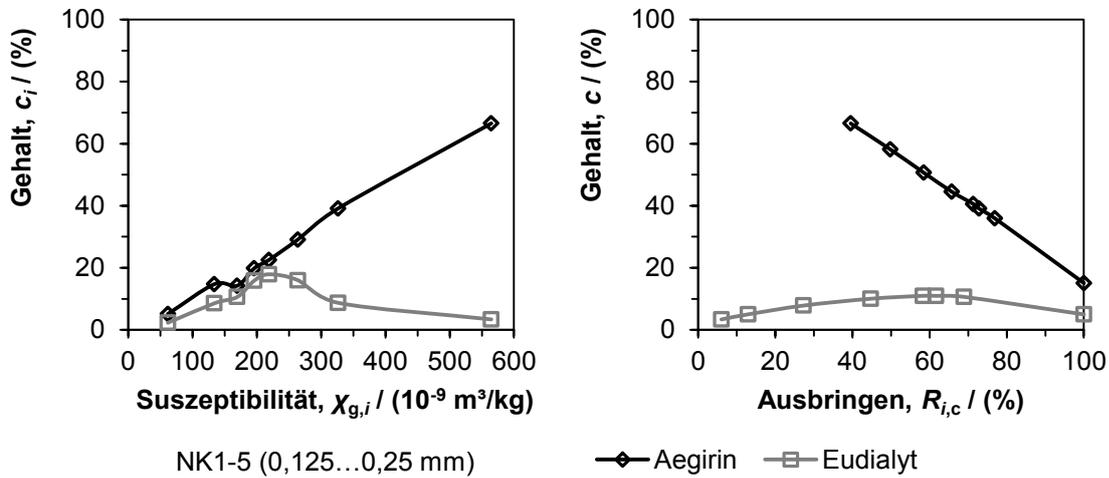


Abbildung 117: Mineralgehalt der Suszeptibilitätsklassen in Abhängigkeit ihrer Suszeptibilität (links) und HALBICH-Diagramm für Eudialyt und Aegirin (rechts) für die Reihe NK1-5

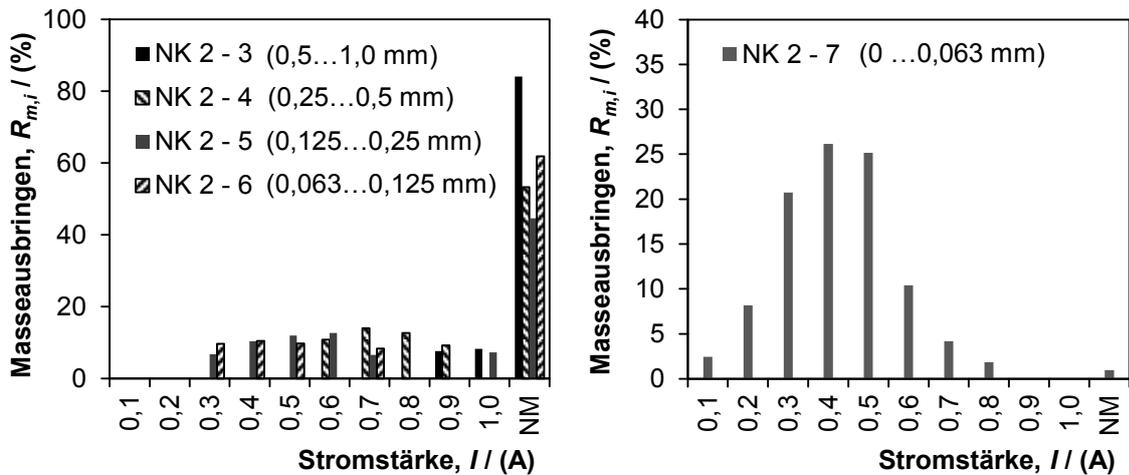


Abbildung 118: Gegenüberstellung der je Stromstärke ausgetragenen Massenanteile für die Trennungversuche des Nephelin-Syenits am Band-Ring-Scheider (Trennung beginnend bei geringster Stromstärke)

## Anlagen

### H Stereologische Transformation

**Tabelle 62: Grenzpartikelgrößen in Abhängigkeit der unteren Maschenweite einer Größenklasse**

w / (mm)	0,1	0,125	0,2	0,25	0,315	0,5	0,8	1,0	2,0
x = 0,9·w / (mm)	0,09	0,1125	0,18	0,225	0,2835	0,45	0,72	0,9	1,8

**Tabelle 63: Kennwerte der originalen und der transformierten Probendaten sowie deren relative Abweichungen für das Kugelmühlenprodukt des Greisenerzes**

x / (mm)	0,1...0,2	0,2...0,315	0,315...0,5	0,5...0,8
$x_{m,i}$ / (mm)	0,15	0,2575	0,4075	0,65
<b>Original</b>				
$c_{1,a}$ / (%)	27,5	24,2	16,9	17,2
$A_{G,100}$ / (%)	56,1	23,1	8,2	4,6
$A_{G,90}$ / (%)	78,6	66,0	62,6	59,1
$A_B$ / (%)	70,7	47,7	28,3	26,2
$B_A$ / (%)	99,2	97,2	96,8	95,5
<b>Large-section</b>				
$c_{1,a}$ / (%)	27,1	24,0	16,5	17,0
$A_{G,100}$ / (%)	53,4	20,6	6,1	3,7
$A_{G,90}$ / (%)	77,7	65,3	61,7	58,0
$A_B$ / (%)	69,4	46,6	27,3	25,2
$B_A$ / (%)	99,0	97,1	96,6	95,3
<b>rel. Differenz</b>				
$\Delta c_{1,a}$ / (%)	1,40	0,94	2,16	1,58
$\Delta A_{G,100}$ / (%)	4,90	10,83	26,03	20,69
$\Delta A_{G,90}$ / (%)	1,09	1,06	1,39	1,88
$\Delta A_B$ / (%)	1,91	2,27	3,56	3,84
$\Delta B_A$ / (%)	0,13	0,12	0,20	0,25

**Tabelle 64: Kennwerte der originalen und der transformierten Probendaten sowie deren relative Abweichungen für den Nephelin-Syenit (Reihe NK1)**

x / (mm)	0,063...0,125	0,125...0,25	0,25...0,5	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...4,0
$x_{m,i}$ / (mm)	0,09315	0,1875	0,375	0,75	1,5	3
<b>Original</b>						
$c_{1,a}$ / (%)	7,7	7,2	7,4	6,9	7,6	6,7
$A_{G,100}$ / (%)	50,4	9,9	2,2	0,5	0,4	0,2
$A_{G,90}$ / (%)	63,9	28,9	5,6	2,7	0,5	0,3
$A_B$ / (%)	43,9	26,5	13,4	8,9	8,2	7,1
$B_A$ / (%)	88,6	92,4	82,8	68,4	59,6	53,6
<b>Large-section</b>						
$c_{1,a}$ / (%)	7,2	7,1	7,4	6,9	7,8	6,6
$A_{G,100}$ / (%)	44,6	6,7	0,7	0,0	0,0	0,0
$A_{G,90}$ / (%)	59,4	26,4	3,8	2,1	0,0	0,0
$A_B$ / (%)	40,9	25,2	13,0	8,6	8,1	7,0
$B_A$ / (%)	88,5	92,2	82,1	66,3	56,5	51,7
<b>rel. Differenz</b>						
$\Delta c_{1,a}$ / (%)	5,84	0,93	0,30	0,67	1,89	0,63
$\Delta A_{G,100}$ / (%)	11,62	32,09	67,91	100	100	100
$\Delta A_{G,90}$ / (%)	6,97	8,71	31,71	20,22	100	100
$\Delta A_B$ / (%)	6,85	4,93	2,94	3,89	1,91	2,28
$\Delta B_A$ / (%)	0,07	0,23	0,77	3,04	5,32	3,54

# Anlagen

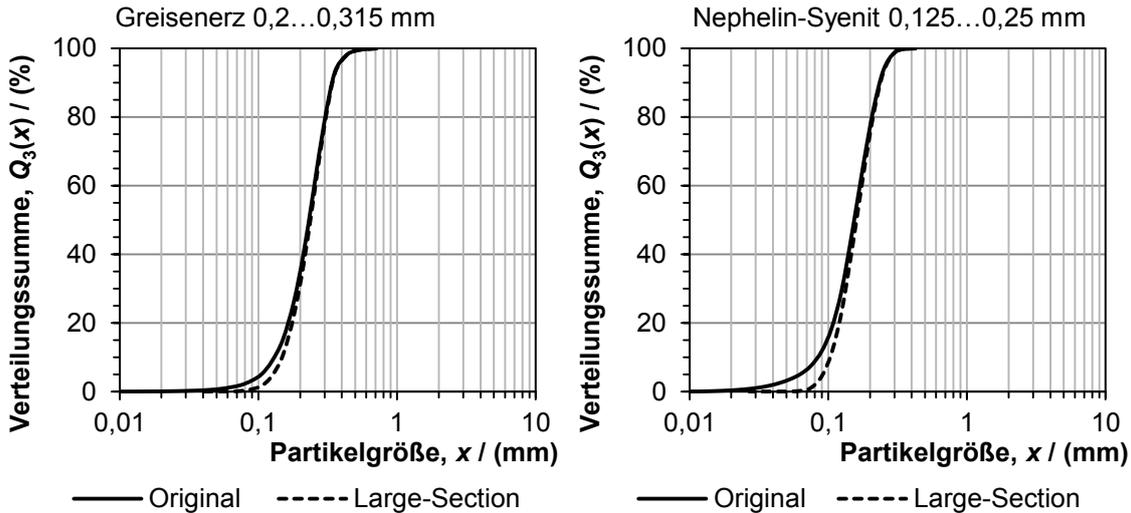


Abbildung 119: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen für transformierte und nicht transformierte Aufschlussresultate. Links: Greisenerz, Partikelgrößenklasse 0,2...0,315 mm; Rechts: Nephelin-Syenit, Größenklasse 0,125...0,25 mm

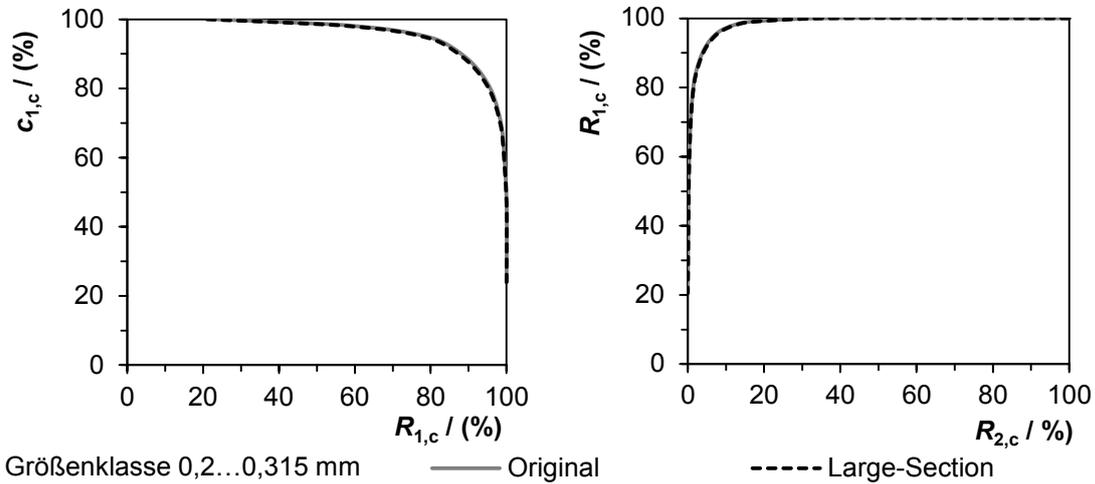


Abbildung 120: Vergleich transformierter und nicht transformierter Verwachsungskurven für Zinnwaldit im Greisenerzes (Produkt der Kugelmühle, Fraktion 0,2...0,315 mm)

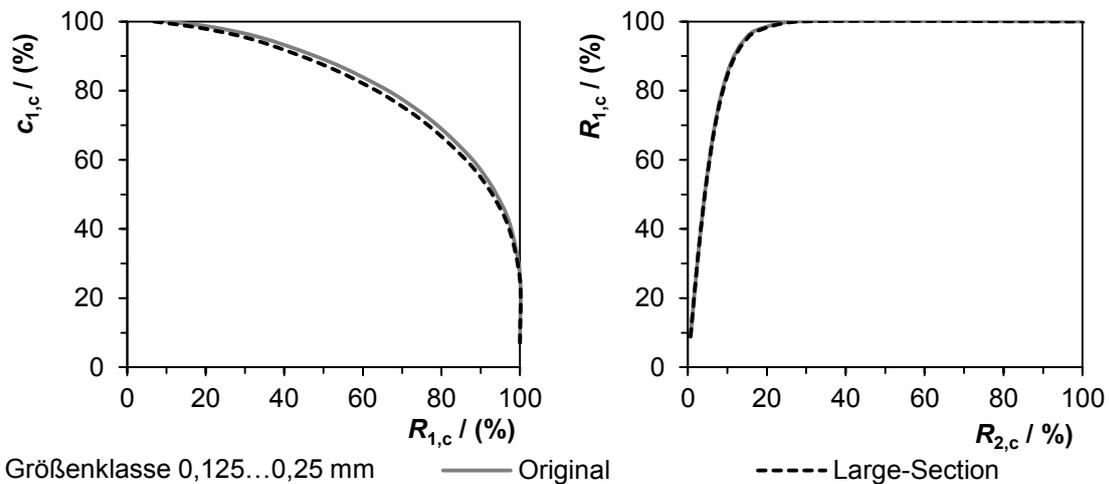
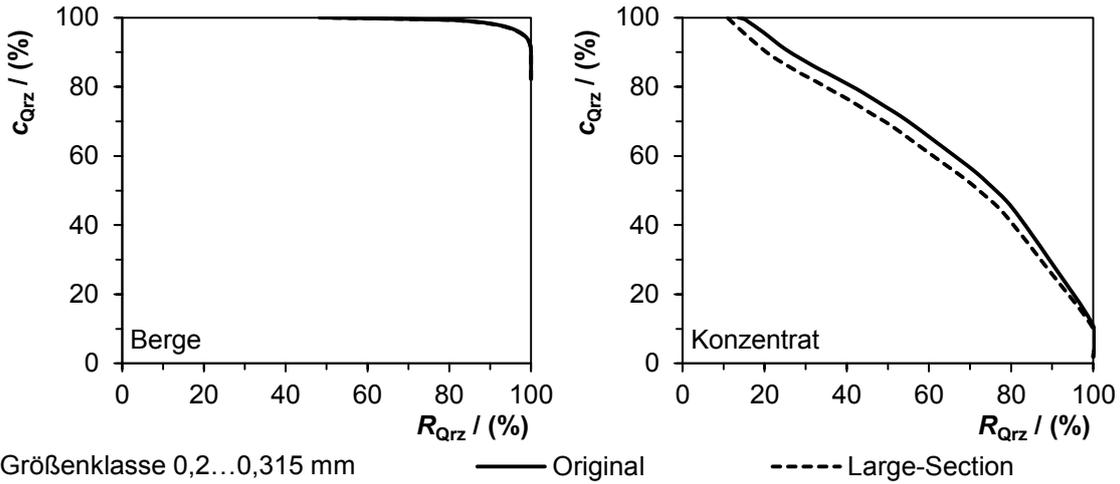
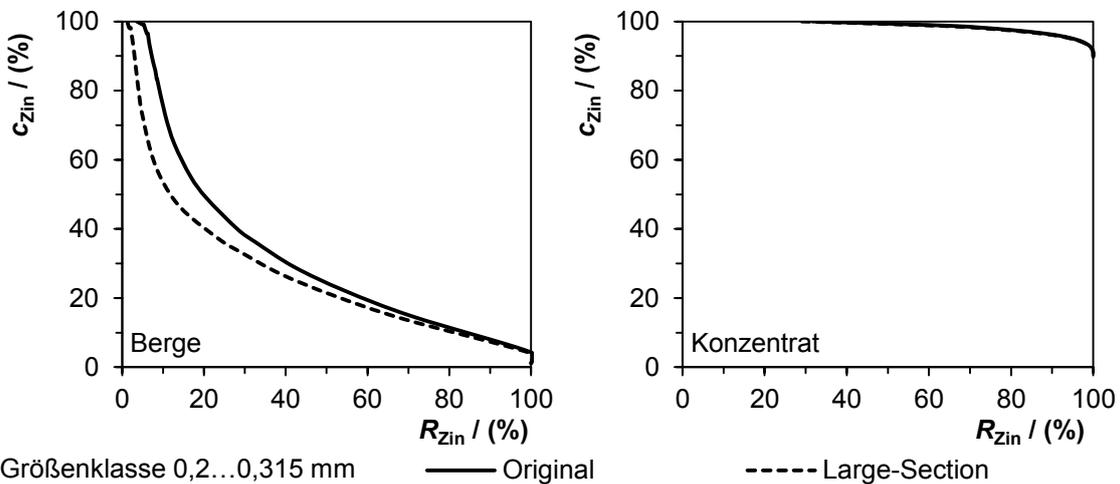


Abbildung 121: Vergleich transformierter und nicht transformierter Verwachsungskurven für Eudialyt im Nephelin-Syenit (Reihe NK1, Fraktion 0,125...0,25 mm)

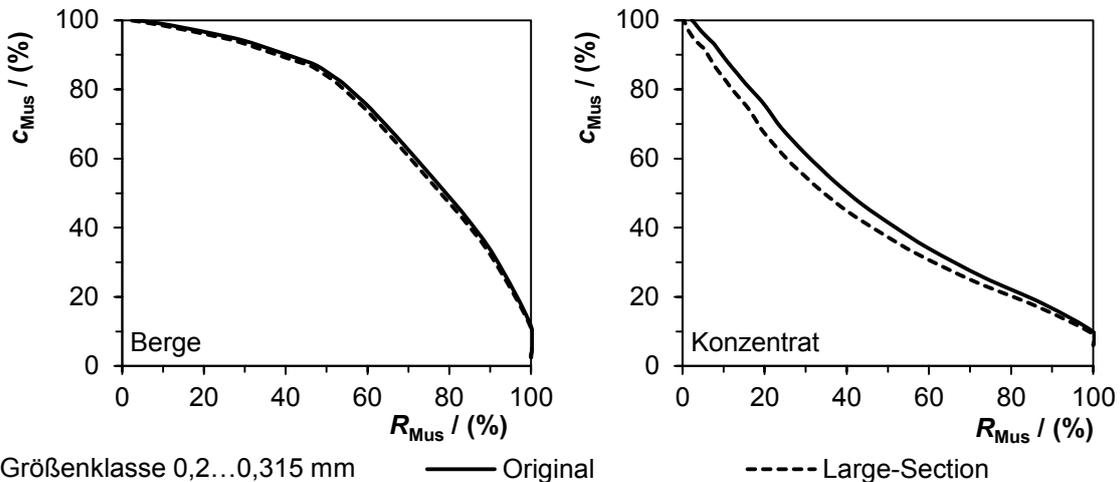
# Anlagen



**Abbildung 122: Vergleich stereologisch transformierter und nicht transformierter Aufschlussdaten im HALBICH-Diagramm für Quarz in den Bergen und im Konzentrat der Magnetscheidung des Kugelmühlenproduktes (Größenklasse 0,2...0,315 mm)**



**Abbildung 123: Vergleich stereologisch transformierter und nicht transformierter Aufschlussdaten im HALBICH-Diagramm für Zinnwaldit in den Bergen und im Konzentrat der Magnetscheidung des Kugelmühlenproduktes (Größenklasse 0,2...0,315 mm)**

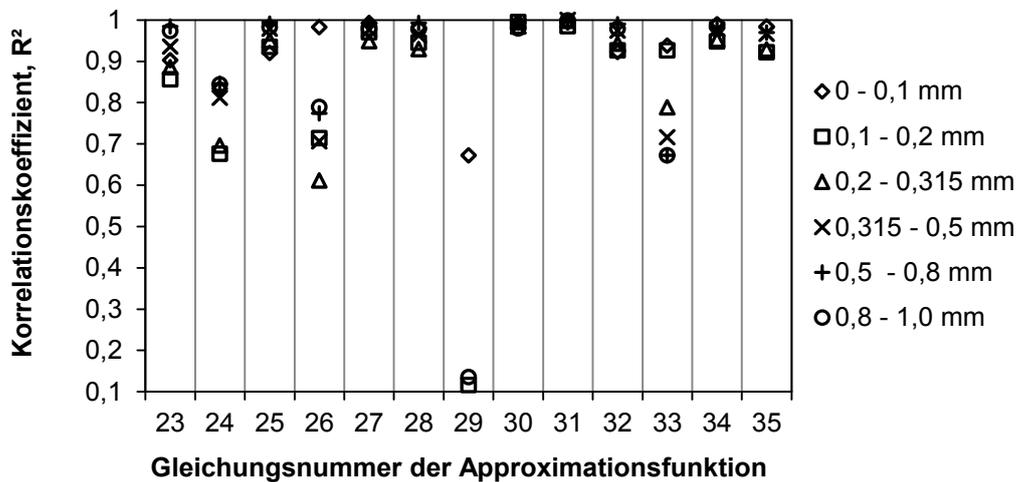


**Abbildung 124: Vergleich stereologisch transformierter und nicht transformierter Aufschlussdaten im HALBICH-Diagramm für Muskovit in den Bergen und im Konzentrat der Magnetscheidung des Kugelmühlenproduktes (Größenklasse 0,2...0,315 mm)**

## I Anpassung von Versuchsdaten

**Tabelle 65: Parameter der Anpassung von gemessenen Suszeptibilitäten und der eingestellten Trennstromstärke am Isodynamik-Scheider über Gleichung (69)**

Versuchsreihe	a	R <sup>2</sup>	α	K
GZ (0,1...0,2 mm)	203,2	0,665	15	62,5
GZ (0,2...0,315 mm)	202,9	0,725	15	62,4
GZ (0,315...0,5 mm)	207,1	0,586	15	63,7
GZ (0,5...0,8 mm)	195,6	0,793	15	60,1
NK1-3 (0,5...1,0 mm)	274,7	0,959	15	84,5
NK1-4 (0,25...0,5 mm)	286,9	0,947	15	88,2
NK1-5 (0,125...0,25 mm)	294,8	0,992	15	90,7
NK2-3210B	147,6	0,982	10	67,6
NK2-3210C	154,8	0,989	10	70,9
NK2-3208B	143,9	0,963	10	66,0
NK2-3208C	143,9	0,958	10	66,0
NK2-5210B	150,8	0,998	10	69,1
NK2-5210C	149,1	0,998	10	68,3



**Abbildung 125: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Greisenerzes auf dem Band-Ring-Scheider**

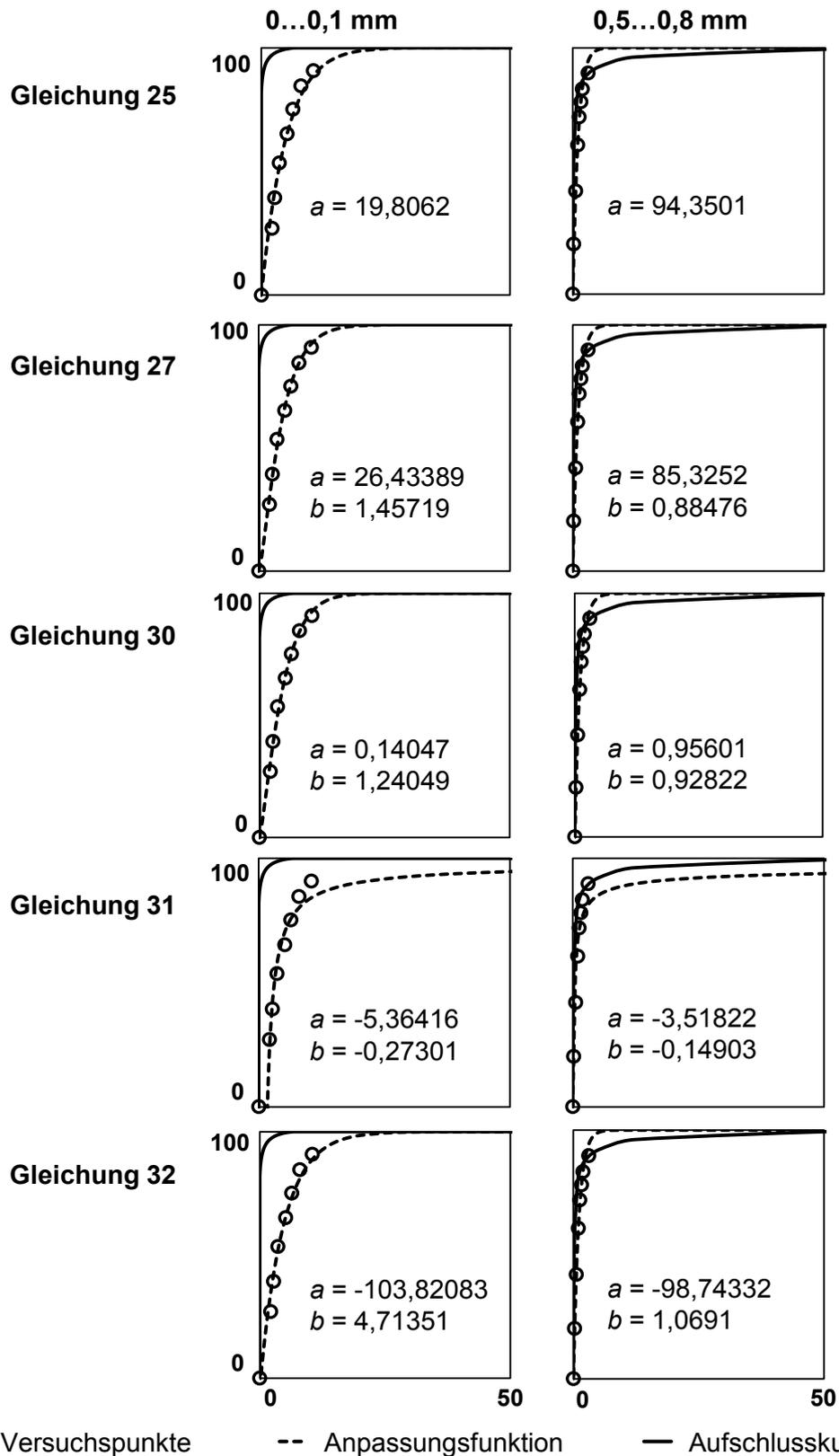


Abbildung 126: Darstellung der Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Greisenerzes am Isodynamik-Scheider (Größenklassen 0...0,1 mm und 0,5...0,8 mm)

Anlagen

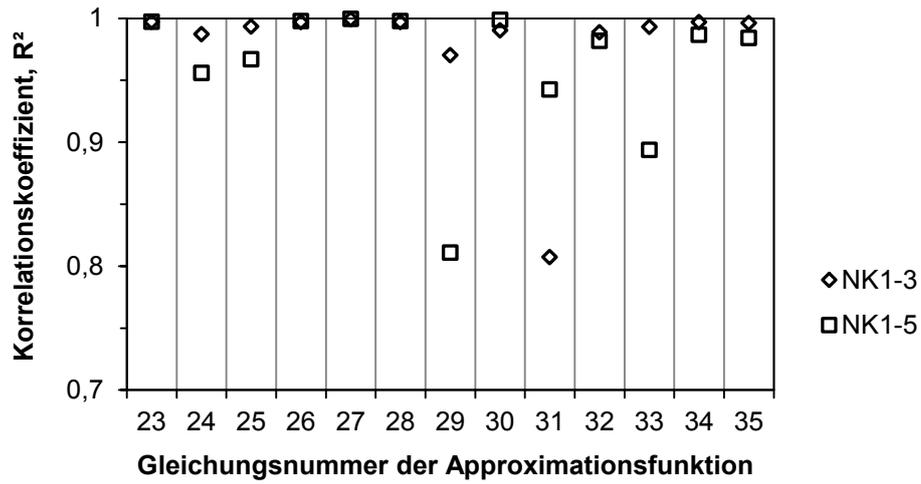


Abbildung 127: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Nephelin-Syenits auf dem Isodynamik-Scheider

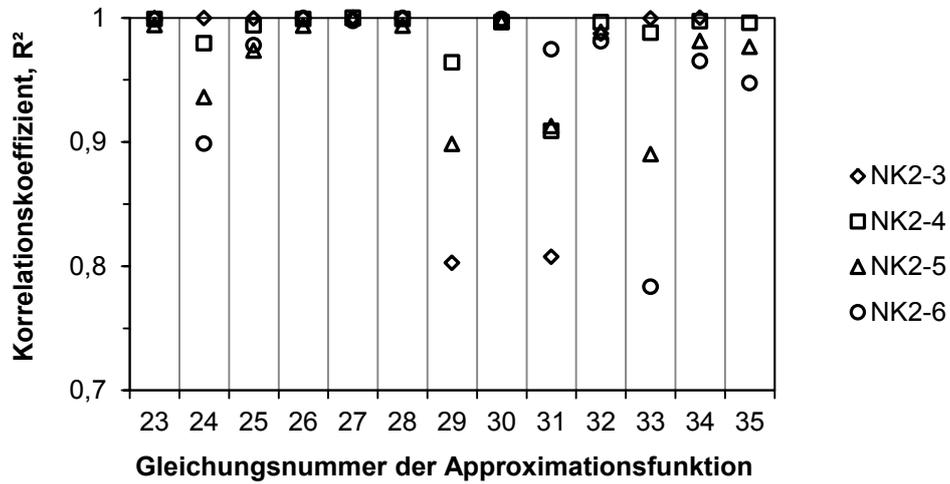


Abbildung 128: Darstellung der Korrelationskoeffizienten für die Anpassung verschiedener Funktionen an die Versuchsdaten der Trennung des Nephelin-Syenits auf dem Band-Ring-Scheider

# Anlagen

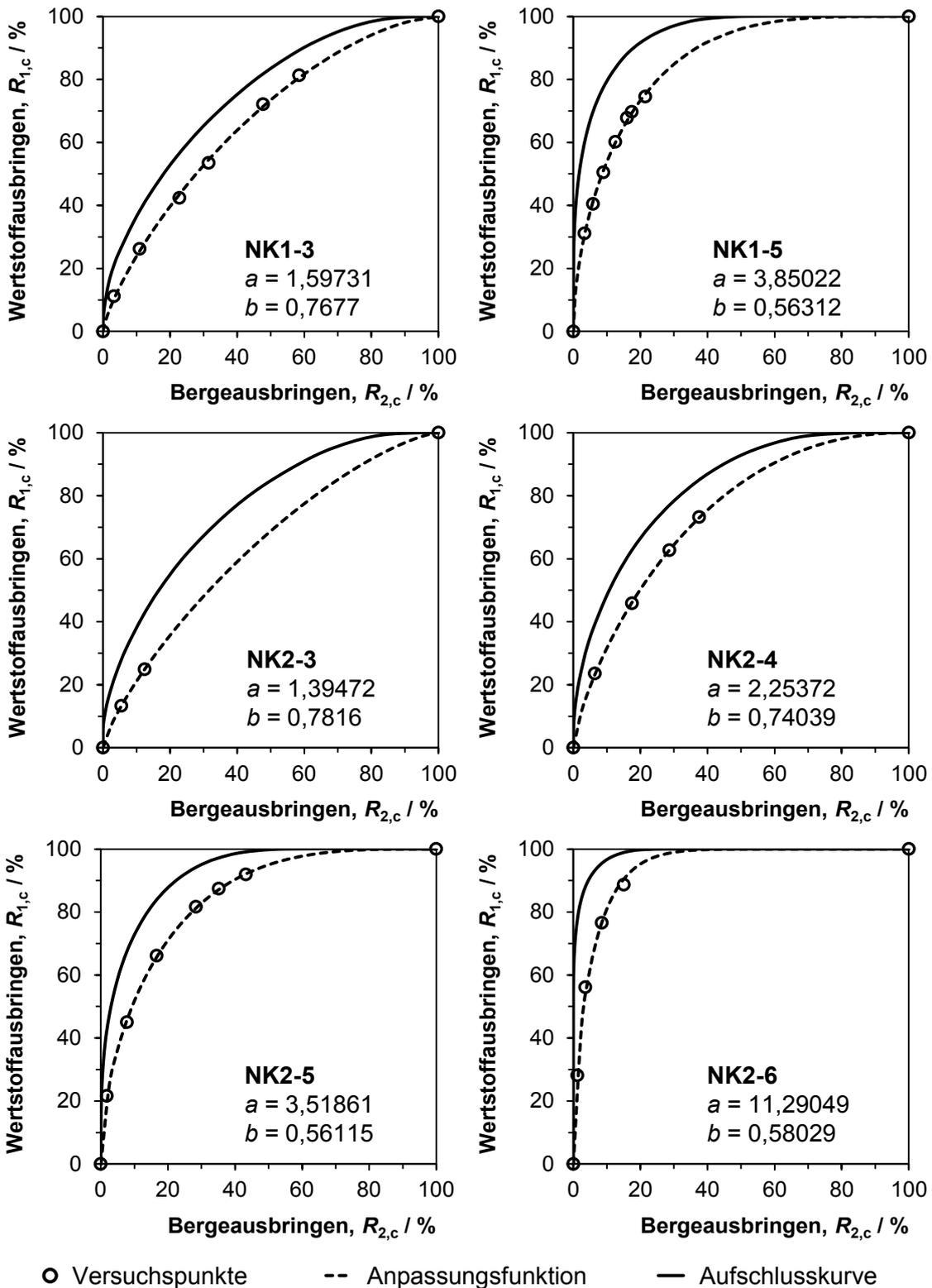
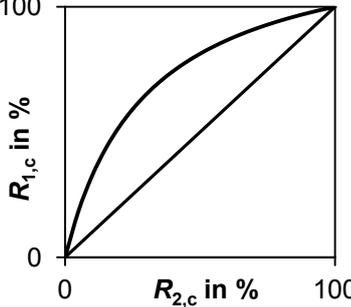
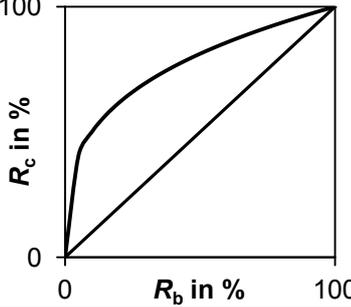
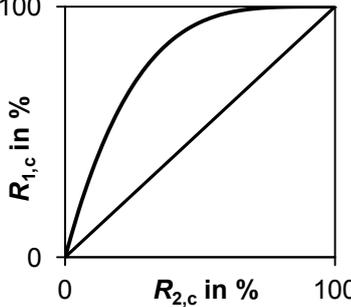
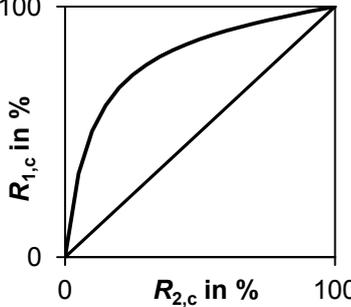
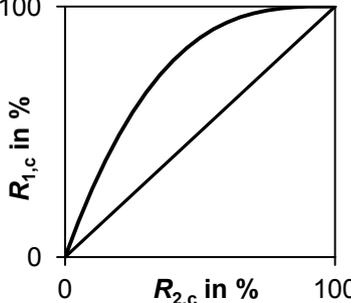


Abbildung 129: Anpassung der Gleichung (27) an die Versuchsergebnisse der Trennung des Nephelin-Syenits (Isodynamik-Scheider: NK1-3 und NK1-5; Band-Ring-Scheider: NK2-3, NK2-4, NK2-5 und NK2-6)

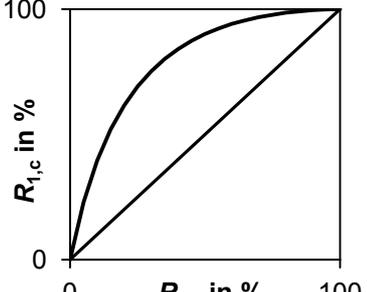
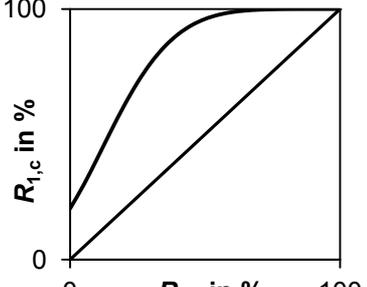
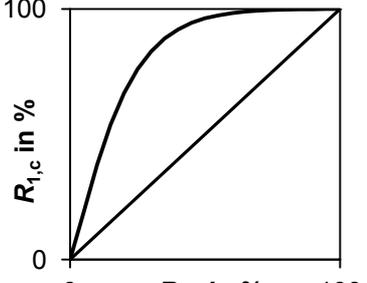
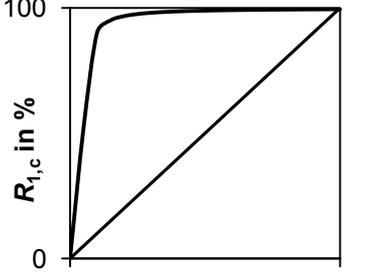
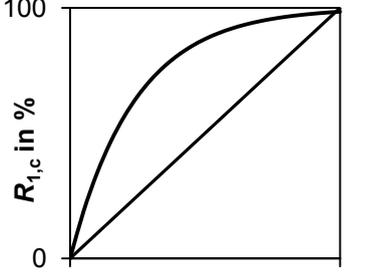
# Anlagen

**Tabelle 66: Zusammenstellung der Anpassungsfunktionen mit Beispielabbildung, basierend auf frei gewählten Parametern**

Funktion und Eigenschaften	Beispiel
<p>Gleichung (23), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = a \frac{R_{2,c}}{(a - 100 + R_{2,c})}$ <p>Parameter: <math>a = 130</math></p>	 <p>The graph shows a coordinate system with both axes ranging from 0 to 100. A diagonal line represents the identity function <math>R_{1,c} = R_{2,c}</math>. A smooth, concave curve starts at the origin (0,0) and ends at (100,100), remaining above the diagonal line.</p>
<p>Gleichung (24), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = \frac{(R_{2,c})^a}{100^{(a-1)}}$ <p>Parameter: <math>a = 0,3</math></p>	 <p>The graph shows a coordinate system with both axes ranging from 0 to 100. A diagonal line represents the identity function <math>R_c = R_b</math>. A smooth, concave curve starts at the origin (0,0) and ends at (100,100), remaining above the diagonal line.</p>
<p>Gleichung (25), Quelle: [117, 122]</p> $R_{1,c} = \frac{(100^a - (100 - R_{2,c})^a)}{100^{(a-1)}}$ <p>Parameter: <math>a = 4</math></p>	 <p>The graph shows a coordinate system with both axes ranging from 0 to 100. A diagonal line represents the identity function <math>R_{1,c} = R_{2,c}</math>. A smooth, concave curve starts at the origin (0,0) and ends at (100,100), remaining above the diagonal line.</p>
<p>Gleichung (26), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = \frac{R_{2,c}}{(1 - a(100 - R_{2,c}) - b(100 - R_{2,c})^2)}$ <p>Parameter: <math>a = 0,008, b = 0,00001</math></p>	 <p>The graph shows a coordinate system with both axes ranging from 0 to 100. A diagonal line represents the identity function <math>R_{1,c} = R_{2,c}</math>. A smooth, concave curve starts at the origin (0,0) and ends at (100,100), remaining above the diagonal line.</p>
<p>Gleichung (27), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = \frac{(100^a - (100 - R_{2,c})^a)^b}{100^{(a \cdot b - 1)}}$ <p>Parameter: <math>a = 1; b = 3</math></p>	 <p>The graph shows a coordinate system with both axes ranging from 0 to 100. A diagonal line represents the identity function <math>R_{1,c} = R_{2,c}</math>. A smooth, concave curve starts at the origin (0,0) and ends at (100,100), remaining above the diagonal line.</p>

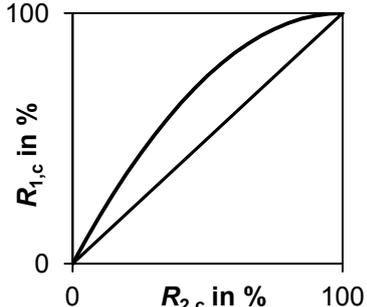
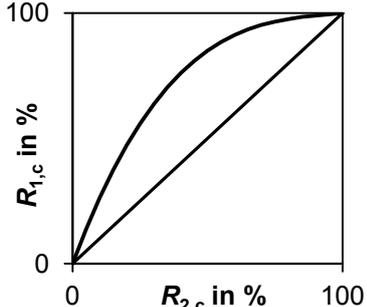
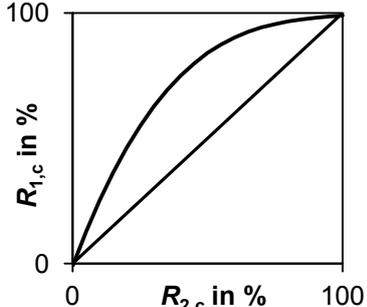
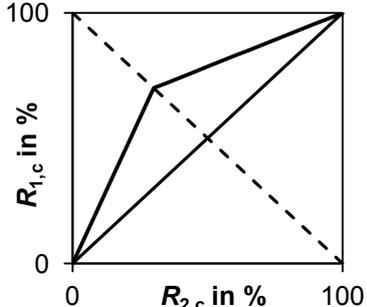
# Anlagen

Fortsetzung Tabelle 66

Funktion und Eigenschaften	Beispiel
<p>Gleichung (28), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = \frac{(a(100 - R_{2,c}) + b + 100)R_{2,c}}{(a(100 - R_{2,c}) + b + R_{2,c})}$ <p>Parameter: <math>a = 0,2; b = 2,5</math></p>	
<p>Gleichung (29), Quelle: [114]</p> $R_{1,c} = 100 \cdot \exp(-a \cdot (100 - R_{2,c})^b)$ <p>Parameter: <math>a = 4 \cdot 10^{-11}; b = 5,3</math></p>	
<p>Gleichung (30)</p> $R_{1,c} = 100(1 - \exp(-a(R_{2,c})^b))$ <p>Parameter: <math>a = 0,03; b = 1,2</math></p>	
<p>Gleichung (31)</p> $R_{1,c} = 100 + (1 - \exp(-a(R_{2,c})^b))$ <p>Parameter: <math>a = -12; b = -0,7</math></p>	
<p>Gleichung (32)</p> $R_{1,c} = a \cdot \exp(-R_{2,c}/b) + 100$ <p>Parameter: <math>a = -100; b = 24</math></p>	

# Anlagen

Fortsetzung Tabelle 66

Funktion und Eigenschaften	Beispiel
<p>Gleichung (33), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = 100 - (1 + 100a)(100 - R_{2,c}) + a(100 - R_{2,c})^2$ <p>Parameter: <math>a = -0,01</math></p>	
<p>Gleichung (34), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = 100 + a(100 - R_{2,c}) + b(100 - R_{2,c})^2 + c(100 - R_{2,c})^3$ <p>Parameter: <math>a = -0,1; b = 0,001; c = -0,0001</math></p>	
<p>Gleichung (35), Quelle: [116, 122]</p> $R_{1,c} = a + b(100 - R_{2,c}) + c(100 - R_{2,c})^2 + d(100 - R_{2,c})^3$ <p>Parameter: <math>a = 99; b = -0,1; c = 0,001; d = -0,0001</math></p>	
<p>Gleichung (36), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = 100 - (100 - R_{2,c}) \cdot (a - 100) / a, \text{ obere H\u00e4lfte}$ $R_{1,c} = -R_{2,c} \cdot a / (a - 100), \text{ untere H\u00e4lfte}$ <p>Parameter: <math>a = 70</math></p>	
<p>Gleichung (37), Quelle: [122]</p> $R_{1,c} = 100 - (100 - R_{2,c}) \cdot (a - 100) / a, \text{ obere H\u00e4lfte}$ $R_{1,c} = -R_{2,c} \cdot b / (b - 100), \text{ untere H\u00e4lfte}$ <p>Parameter: <math>a = 70; b = 85</math></p>	