

Sebastian Kaufeld

Schriftenreihe zur
Aufbereitung und Veredlung

71

Beitrag zum Stoffparametereinfluss auf die
Klassierung in Trommelsiebmaschinen am
Beispiel zweidimensionaler Materialien

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

RWTHAACHEN

**Beitrag zum Stoffparametereinfluss auf die Klassierung in
Trommelsiebmaschinen am Beispiel zweidimensionaler Materialien**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **M.Sc.**

Sebastian Kaufeld

aus Wittlich

**Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme**

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Oktober 2018

Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Band 71

Sebastian Kaufeld

**Beitrag zum Stoffparametereinfluss
auf die Klassierung in Trommelsiebmaschinen
am Beispiel zweidimensionaler Materialien**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95700, Fax +49(0)241 - 8092232
E-Mail: lehrstuhl@ifa.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95705, Fax +49(0)241 - 8092624
E-Mail: info@teer.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba
Lochnerstraße 4 - 20
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-97246, Fax +49(0)241 - 8092635
E-Mail: amr@amr.rwth-aachen.de

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6756-9

ISSN 1617-6545

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Aufbereitung und Recycling (I.A.R.) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Im Besonderen möchte ich mich bei meinem Doktorvater, dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz für seine fachlichen Anregungen, die von ihm gewährten Freiräume am Institut und das mir entgegengebrachte Vertrauen beim Erstellen dieser Arbeit bedanken. Für seine Anleitung zum wissenschaftlichen sowie ingenieurtechnischen Arbeiten und den Zugang zu Forschungs- und Tätigkeitsfeldern, die über das Thema dieser Dissertation hinausgehen, bin ich ihm sehr dankbar.

Weiterhin bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme für die Übernahme des Korreferats, sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Arno Jantzen für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und den stets konstruktiven Gedankenaustausch. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba bedanke ich mich für die Übernahme der Pflichten des Prüfungsvorsitzenden.

Bei meinen Freunden und Kollegen Dr.-Ing. Nils Bauerschlag, Dr.-Ing. Mattias Berwanger, Dr.-Ing. David Rießmann und Kay Johnen möchte ich mich für die stete Bereitschaft zur Diskussion und das Korrekturlesen sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus danke ich Herrn Dr.-Ing. Alexander Feil und den ehemaligen sowie aktuellen Mitarbeitern des I.A.R. für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Mein besonderer Dank gilt Marco Haus für die Unterstützung bei den Trommelsiebversuchen.

Danken möchte ich auch den Kollegen des Ressourcenkolleg.NRW. Die gemeinsame Zeit, die wir in Aachen und Münster sowie auf Konferenzen und bei Workshops verbracht haben, bleibt mir nachhaltig in Erinnerung.

Meiner Familie und im Besonderen meinen Eltern möchte ich für die bedingungslose, liebevolle und vielseitige Unterstützung in allen Lebenslagen von Herzen danken.

Zu guter Letzt danke ich meiner Freundin Lisa, die mir stets den Rücken freihält, im Chaos den Weg zeigt und mich immer wieder motiviert, von ganzem Herzen. Ich bin sehr froh, dass ich dich habe.

Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Trommelsiebklassierung als Trennprozess mechanischer Aufbereitung	3
2.1	Einordnung der Siebklassierung in den Kontext mechanischer Aufbereitung	3
2.2	Trennung disperser Stoffsysteme durch Siebklassierung	6
2.2.1	Partikelmerkmale als Trennkriterium	6
2.2.2	Trennmerkmal der Korngröße	7
2.2.3	Trennmerkmal der Kornform	10
2.2.4	Prozessgrundlagen der Siebklassierung	11
2.2.5	Bewertung des Trennerfolgs	13
2.2.6	Trennung mittels Siebklassierern	15
2.3	Grundlagen der Trommelsiebklassierung	16
2.3.1	Aufbau und konstruktive Eigenschaften	16
2.3.2	Siebgutbewegung im Trommelsieb	18
2.3.3	Einflussparameter der Trommelsiebklassierung	24
2.3.4	Mathematische Beschreibung der Siebkinetik über Siebmodelle	33
3	Trommelsiebklassierung am Beispiel der Aufbereitung von Siedlungsabfällen ...	37
3.1	Siedlungsabfall als disperses Stoffsystem	37
3.1.1	Rechtliche Rahmenbedingungen und Definition	37
3.1.2	Menge	39
3.1.3	Behandlung von Siedlungsabfällen	40
3.1.4	Zusammensetzung und Heterogenität	42
3.1.5	Partikel- und Kollektiveigenschaften	44
3.2	Trommelsiebklassierung zur Aufbereitung von Abfällen	50
3.2.1	Parametrierungen von Trommelsiebmaschinen zur Abfallaufbereitung	50
3.2.2	Verfahrenstechnische Positionierung	51
3.2.3	Zweidimensionale Materialien als siebschwieriges Gut	54
4	Ableitung der Forschungsfrage	56
5	Material und Methode	58
5.1	Versuchsstand – Aufbau und Funktionsweise	58
5.1.1	Trommelsiebmaschine	59
5.1.2	Gurtförderer	61
5.1.3	RFID-Messsystem	62
5.2	Versuchsmaterial	65
5.2.1	Darstellung des Feinkorns	66
5.2.2	Zweidimensionales Modellmaterial	68
5.3	Versuchsplan	73
5.3.1	Versuchskonstellationen	73

5.3.2	Versuchsdurchführung	75
5.4	Auswertungsmethodik und Ergebnisdarstellung.....	75
6	Versuchsergebnisse und Interpretation	81
6.1	Einfluss der Menge an 2D-Modellmaterial	81
6.1.1	Ergebnisse	81
6.1.2	Auswertung und Interpretation	82
6.2	Einfluss der Abmessungen des 2D-Modellmaterials	85
6.2.1	Ergebnisse	85
6.2.2	Auswertung und Interpretation	87
6.3	Einfluss der Materialart des 2D-Modellmaterials	90
6.3.1	Ergebnisse	90
6.3.2	Auswertung und Interpretation	91
6.4	Geschwindigkeitskonstanten des siebkinetischen Modells.....	94
6.5	Zusammenfassende Erkenntnisse	96
7	Zusammenfassung	97
8	Anhang	100
9	Literaturverzeichnis.....	120
	Kurzzusammenfassung.....	133
	Abstract	135
	Lebenslauf.....	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung der Siebklassierung in den Kontext der mechanischen Verfahrenstechnik – eigene Darstellung nach [Kellerwessel 1997; Kwade & Schwedes 2014; Müller 2005; Pretz & Julius 2010; Rumpf 1961; Stieß 2009].....	4
Abbildung 2: Trennung nach dem Trennmerkmal des Korndurchmessers – idealisierter Prozess in Anlehnung an [Bunge 2012].....	6
Abbildung 3: Verteilungssummenkurve (oben) und Verteilungsdichtekurve (unten) nach [Müller 2008].....	9
Abbildung 4: Einteilung der Siebmaschinentypen nach [Bunge 2012; Höfl 1986; Schmidt et al. 2003].....	16
Abbildung 5: Seitenansicht einer Trommelsiebmaschine – eigene Darstellung nach [Beyer 2002; Schmidt et al. 2003; Sullivan et al. 1992].....	17
Abbildung 6: Die vom Siebgut durchlaufenen Zonen durch Umwälzung (Kaskadenbewegung) im Trommelsieb (Teilausschnitt) in Anlehnung an [Krampitz 2017], [Schmidt et al. 2003], [Schubert 1989] und [Vorstman & Tels 1981].....	19
Abbildung 7: Kräftegleichgewicht am Partikel in der Aufstiegszone nach [Glaub et al. 1982; Höfl 1986; Krampitz 2017].....	20
Abbildung 8: Abwurfpunkt bei einer Kataraktbewegung nach [Alter et al. 1981; Glaub et al. 1982; Höfl 1986; Krampitz 2017].....	21
Abbildung 9: Bewegungsarten in Trommelsieben am Beispiel der Bewegung von grobkörnigen Kugeln – modifiziert nach [Höfl 1986].....	22
Abbildung 10: Qualitativer Einfluss bedeutender Maschinen- und Betriebsparameter auf die Siebgüte – eigene Darstellung nach [Beyer 2002; Chen et al. 2010; Glaub et al. 1982; King 2001; Pereira 2015; Stessel 1991, 1996; Wheeler et al. 1989].....	30
Abbildung 11: Zusammensetzung der Siedlungsabfallmenge 2015 in Deutschland – eigene Darstellung nach [Statistisches Bundesamt 2017a].....	40
Abbildung 12: Erstbehandlungswege der Siedlungsabfallmenge 2015 in Deutschland – eigene Darstellung nach [Statistisches Bundesamt 2017b].....	41
Abbildung 13: Siedlungsabfallbehandlung in den 28 Staaten der Europäischen Union in 2014 – Darstellung in Anlehnung an [Thomé-Kozmiensky 2014] – Datengrundlage: [Eurostat 2018].....	42
Abbildung 14: Mittlere Zusammensetzung von Restabfall [Hoffmann et al. 2011], Gewerbeabfall [Dehne et al. 2011] und Leichtverpackungsabfall [Bothe 2017].....	44
Abbildung 15: Durchgangssummenkurve ausgewählter Stoffgruppen von Rohhaushüll < 60 mm – modifizierte Darstellung der Daten aus [Uepping 2008, S. 83].....	45
Abbildung 16: Einzelstückmassenverteilung ausgewählter Stoffgruppen – modifiziert nach [Uepping 2008, S. 76].....	47
Abbildung 17: Mechanische Aufbereitung der MBA Hannover nach [Vielhaber 2015].....	52
Abbildung 18: Schematische Darstellung der LVP-Sortierung nach Stand der Technik [Dehoust & Christiani 2012].....	53
Abbildung 19: Zeitabhängige Feststoffvolumenströme des Inputs und Siebüberlaufs einer Trommelsiebmaschine bei der Trommelsiebung von Hausmüll – modifizierte Darstellung aus [Coskun et al. 2017].....	55

Abbildung 20: Versuchsstand zur Untersuchung des Verweilzeitverhaltens von Feinkorn nach [Kaufeld 2013; Pereira 2015]	59
Abbildung 21: Systemeinheit der Trommelsiebmaschine; Frontansicht (links); Seitenansicht (rechts) nach [Kaufeld 2013]	60
Abbildung 22: Maße einer verwendeten Lochplatte nach [DIN 4185-2]	61
Abbildung 23: Funktionsweise eines RFID-Systems nach [Kern 2007]	63
Abbildung 24: Passiver RFID-Transponder (oben: Vorderseite. unten: Rückseite) [Pereira 2015]	63
Abbildung 25: Eingesetzter UHF-Reader (Typ: SIMATIC RF685R)	64
Abbildung 26: Abmessungen der Feinkornprüfkörper – Links: Maße der Prüfkörper; Rechts: siebrelevante Abmessungen	66
Abbildung 27: Feinkornprüfkörper mit RFID-Transpondern [Kaufeld et al. 2017]	67
Abbildung 28: Verteilung des Stückgewichts der Prüfkörper (n = 400)	68
Abbildung 29: Zweidimensionales Modellmaterial der Abmessung 200 mm x 200 mm – dünne PE-Folie (1), dicke PE-Folie (2), Textilverbund (3), Milchkarton (4)	69
Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Verformbarkeit der 2D-Materialien	70
Abbildung 31: Biegelinien der 2D-Modellmaterialien	71
Abbildung 32: Bestimmung des Haftreibungswinkels nach [Böge & Böge 2017]	71
Abbildung 33: Punkte der Wertepaare von drei Versuchswiederholungen der Konstellation 400 Feinkornprüfkörper + 100 Textilverbundstücke der Abmessung 200 mm x 200 mm	77
Abbildung 34: Über den Durchgang gemittelte Wertepaare zur Zeit t'_i mit hinterlegter Schwankungsbreite	78
Abbildung 35: Darstellung des ausgetragenen Feinkornprüfkörperstroms über dem zugehörigen Versuchsfortschritt für drei Zweikomponentengemische (ZKG)	79
Abbildung 36: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit dünner PE-Folie – Variation der Menge an dünner PE-Folie der Abmessung 200 mm x 200 mm	81
Abbildung 37: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Variation der Menge an dünner PE-Folie der Abmessung 200 mm x 200 mm	83
Abbildung 38: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit dünner PE-Folie der Abmessung 200 mm x 200 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten $t_{D\%}$	85
Abbildung 39: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit dünner PE-Folie – Variation der Mengen an dünner PE-Folie der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm	86
Abbildung 40: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm bei unterschiedlicher Menge an dünner PE-Folie	87
Abbildung 41: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit dünner PE-Folie der Abmessung 400 mm x 400 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten $t_{D\%}$	88

Abbildung 42: Korrelation zwischen der Gesamtfläche an 2D-Material beider 2D-Materialabmessungen in den ZKG mit dünner PE-Folie und der Austragszeit $t_{90\%}$	89
Abbildung 43: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 200 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	91
Abbildung 44: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 200 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	92
Abbildung 45: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material und der Austragszeit $t_{90\%}$ für alle 2D-Materialien beider Abmessungen (ohne Milchkarton der Abmessung 400 mm x 400 mm).....	93
Abbildung 46: Vergleich zwischen einer auf Messwerten beruhenden Austragskurve und einer über das siebkinetische Modell errechneten Austragskurve am Beispiel von 400 FKP – 150 dünne PE-Folie (200 mm x 200 mm)	95
Abbildung 47: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit dicker PE-Folie – Variation der Menge an dicker PE-Folie der Abmessung 200 mm x 200 mm	100
Abbildung 48: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit Textilverbund – Variation der Menge an Textilverbund der Abmessung 200 mm x 200 mm	100
Abbildung 49: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit Milchkarton – Variation der Menge an Milchkarton der Abmessung 200 mm x 200 mm	101
Abbildung 50: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Variation der Menge an dicker PE-Folie der Abmessung 200 mm x 200 mm	101
Abbildung 51: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Variation der Menge an Textilverbund der Abmessung 200 mm x 200 mm	102
Abbildung 52: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Variation der Menge an Milchkarton der Abmessung 200 mm x 200 mm	102
Abbildung 53: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit dicker PE-Folie der Abmessung 200 mm x 200 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten t_D	103
Abbildung 54: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit Textilverbund der Abmessung 200 mm x 200 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten t_D	103
Abbildung 55: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit Milchkarton der Abmessung 200 mm x 200 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten t_D	104
Abbildung 56: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit dünner PE-Folie – Variation der Menge an dünner PE-Folie der Abmessung 400 mm x 400 mm	104

Abbildung 57: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit dicker PE-Folie – Variation der Menge an dicker PE-Folie der Abmessung 400 mm x 400 mm	105
Abbildung 58: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit Textilverbund – Variation der Menge an Textilverbund der Abmessung 400 mm x 400 mm	105
Abbildung 59: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit Milchkarton – Variation der Menge an Milchkarton der Abmessung 400 mm x 400 mm	106
Abbildung 60: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit dicker PE-Folie der Abmessung 400 mm x 400 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten $t_{D\%}$	106
Abbildung 61: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit Textilverbund der Abmessung 400 mm x 400 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten $t_{D\%}$	107
Abbildung 62: Korrelation zwischen der Anzahl an 2D-Material der ZKG mit Milchkarton der Abmessung 400 mm x 400 mm und zugehörigen, definierten Austragszeiten $t_{D\%}$	107
Abbildung 63: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit dicker PE-Folie – Variation der Mengen an dicker PE-Folie der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm	108
Abbildung 64: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit Textilverbund – Variation der Mengen an Textilverbund der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm	108
Abbildung 65: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer für die Zweikomponentengemische mit Milchkarton – Variation der Mengen an Milchkarton der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm	109
Abbildung 66: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm bei unterschiedlicher Menge an dicker PE-Folie	109
Abbildung 67: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm bei unterschiedlicher Menge an Textilverbund	110
Abbildung 68: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der Abmessungen 200 mm x 200 mm und 400 mm x 400 mm bei unterschiedlicher Menge an Milchkarton	110
Abbildung 69: Korrelation zwischen der Gesamtfläche an 2D-Material beider 2D-Materialabmessungen in den ZKG mit dicker PE-Folie und der Austragszeit $t_{90\%}$	111
Abbildung 70: Korrelation zwischen der Gesamtfläche an 2D-Material beider 2D-Materialabmessungen in den ZKG mit Textilverbund und der Austragszeit $t_{90\%}$	111
Abbildung 71: Korrelation zwischen der Gesamtfläche an 2D-Material beider 2D-Materialabmessungen in den ZKG mit Milchkarton und der Austragszeit $t_{90\%}$	112
Abbildung 72: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 50 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	112

Abbildung 73: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 100 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	113
Abbildung 74: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 150 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	113
Abbildung 75: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 25 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	114
Abbildung 76: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 38 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	114
Abbildung 77: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 50 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	115
Abbildung 78: Kumulierter Siebdurchgang in Abhängigkeit der Siebdauer – Vergleich der 2D-Modellmaterialien bei einer Menge von 100 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	115
Abbildung 79: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 50 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	116
Abbildung 80: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 100 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	116
Abbildung 81: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 150 Stück der Abmessung 200 mm x 200 mm	117
Abbildung 82: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 25 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	117
Abbildung 83: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 38 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	118
Abbildung 84: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 50 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	118
Abbildung 85: Ausgetragener Feinkornprüfkörperstrom in Bezug auf den zugehörigen Versuchsfortschritt – Vergleich der unterschiedlichen 2D-Materialien bei einer Menge von 100 Stück der Abmessung 400 mm x 400 mm	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflussparameter auf einen Trommelsiebprozess	25
Tabelle 2: Differenzierungsebenen der Sortierrichtlinie Sachsens am Beispiel von Fe-Metallen und Kunststoffen [INTECUS 2015].....	43
Tabelle 3: Elastizitätsmoduln (E-Moduln) ausgewählter und in Abfall befindlicher Stoffgruppen	48
Tabelle 4: Spezifikationen der Trommelsiebmaschine	60
Tabelle 5: Spezifikationen des Gurtförderers	62
Tabelle 6: Siebrelevante Abmessungen der Feinkornprüfkörper	66
Tabelle 7: Flächengewichte und Materialdicken der 2D-Modellmaterialien	69
Tabelle 8: Haftreibungswinkel der Modellmaterialien auf dem Siebboden und untereinander.....	72
Tabelle 9: Anzahl und Gesamtfläche des zweidimensionalen Materials.....	73
Tabelle 10: Füllgrade und Schüttdichten der Zweikomponentengemische	74
Tabelle 11: Steigungen und Achsenabschnitte zur Berechnung der Austragszeiten $t_{90\%,ZKG}$ in Abhängigkeit der 2D-Materialanzahl im ZKG	92
Tabelle 12: Geschwindigkeitskonstanten des siebkinetischen Modells aller Zweikomponentengemische und zugehörige Bestimmtheitsmaße	95
Tabelle 13: Erfassungsraten der Versuche aller Zweikomponentengemische.....	119

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungen:

Auto-ID	Automatische Identifikation und Datenerfassung
Alu	Aluminium
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BP	Betriebsparameter
DEM	Diskrete Elemente Methode
DepV	Deponieverordnung
EBS	Ersatzbrennstoff
E-Modul	Elastizitätsmodul
EPC-ID	Elektronischer Produktcode - Identifikationsnummer
Fe-Metall	Ferromagnetisches Metall; eisenhaltige Metalle
FKN	Flüssigkeitskartonage
FKP	Feinkornprüfkörper
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS	Kunststoff
KS-HK	Kunststoff-Hohlkörper
LVP	Leichtverpackungen
MBA	mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MKS	Mischkunststoff
MP	Maschinenparameter
NE-Metall	Nicht-Eisen-Metall
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Kartonagen
PS	Polystyrol
RFID	Radiofrequenz-Identifikation
SP	Stoffparameter
TS	Trommelsieb
UHF	Ultra-High-Frequency
ZKG	Zweikomponentengemisch

Formelzeichen:

A_o	relative offene Siebfläche [-; %]
A_{ges}	Gesamtfläche des zweidimensionalen Materials im ZKG [m ²]
α	Ablösewinkel von der Trommelwand [°]
α_B	Böschungswinkel [°]
α_{TS}	Neigung der Siebtrommel gegen die Horizontale [°]
β	Auftreffwinkel [°]
b	Breite des Stegs zwischen den Sieböffnungen [mm]
$b_{D\%,ZKG}$	y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden in Abhäng. von D(t) u. ZKG
$c_{f,A}$	Feinkornanteil in der Aufgabe [-; %]
$c_{f,F}$	Feinkornanteil im Feingut [-; %]
$D(x); D(t); D(n)$	Durchgangssumme [-; %]
D_T	Trommeldurchmesser [m, mm]
d	Partikel-/Korndurchmesser [mm]
d_T	zur Trennung genutzter Partikel-/Korndurchmesser [mm]
d_{st}	Stokes-Durchmesser (Äquivalentdurchmesser) [mm]
F_G	Schwerkraft [N]
F_{GN}	Normalkomponente der Schwerkraft [N]
F_{GT}	Tangentialkomponente der Schwerkraft [N]
F_N	Normalkraft [N]
F_R	Reibungskraft [N]
F_Z	Zentrifugalkraft [N]
g	Schwerebeschleunigung [m/s ²]
k	Geschwindigkeitskonstante des siebkinetischen Modells [-]
K_v	SiebKennziffer [-]
L_{eff}	mit Sieböffnungen versehene Siebfläche [m; mm]
L_T	konstruktive Sieblänge [m, mm]
m	Masse, allgemein [kg]
m_A	Masse der Aufgabe [kg]
m_F	Masse des Feinguts [kg]
m_G	Masse des Grobguts [kg]
$m_{tD\%,ZKG}$	Steigung der Ausgleichsgeraden in Abhängigkeit von D(t) und des ZKG
n_{TS}	Drehzahl der Siebtrommel des Trommelsiebes [1/s]

$n_{TS,krit}$	kritische Drehzahl der Siebtrommel des Trommelsiebes [1/s]
N, n	Anzahl, allgemein [-]
N_{Off}	Anzahl der Sieböffnungen [-]
N_{2D}	Anzahl an zweidimensionalem Material [-]
N_z	Anzahl der Anhebe- und Abrollvorgänge des Partikels je Umdrehung [-]
q	Verteilungsdichte [1/mm]
Q	Verteilungssumme [-; %]
r	Korrelationskoeffizient [-]
R^2	Bestimmtheitsmaß einer Regression [-]
R	Radius der Siebtrommel [m; mm]
$R(x); R(t); R(n)$	Rückstandssumme [-; %]
$R_{m,F}$	Feingutausbringen [-; %]
$R_{m,G}$	Grobgutausbringen [-; %]
r	Mengenart [-; m; m ² ; m ³]
S	Oberfläche [mm ²]
S_{em}	empirischer Längenversatz bei einer Anhebung im Trommelsieb [m]
S_{th}	theoretischer Längenversatz bei einer Anhebung im Trommelsieb [m]
t	Zeit, allgemein [s; ms]
$t_{D\%}$	Zeit zum Erreichen einer prozentualen Siebdurchgangssumme D [s]
$T_G(x)$	Trenngradkurve des Grobguts
$T_F(x)$	Trenngradkurve des Feinguts
$W_D; W_{D'}$	Durchgangswahrscheinlichkeit [-]
w	Sieböffnungsweite [mm]
v_{th}	theoretische, axiale Transportgeschwindigkeit des Siebguts [m/s]
$v(z)$	Biegelinie [-; mm]
x	Korngröße [mm]
x_{max}	maximale Korngröße [mm]
x_{min}	minimale Korngröße [mm]
x_{50}	mittlere Korngröße (Median) einer Korngrößenverteilung [mm]
x_t	Trennkorngröße [mm]
\bar{x}	Mittelwert einer Stichprobe [-]
\bar{y}	Mittelwert einer Stichprobe [-]
ζ	Partikelmerkmal [-]

ζ_T	Trennmerkmalswert [-]
ψ_n	relative Drehzahl [-]
ψ_{Wa}	Sphärizität nach Wadell [-]
$\varphi_{\alpha,\beta}$	Formfaktor [-]
η_s	Siebgütegrad [-; %]
η_E	Erfassungsrate [-; %]
δ	Winkel zwischen Flugbahn und einer Normalen zur Trennfläche [°]
δ_s	Bereich der Siebtrommel, in dem eine Siebung stattfindet [°]
ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]; Drehrichtung der Siebtrommel
μ	Reibungszahl [-]
μ_o	Haftreibungszahl [-]
ρ_0	Haftreibungswinkel [°]
γ	Anstellwinkel [°]