

Michaela Lindemann

Schriftenreihe zur
Aufbereitung und Veredlung

77

Untersuchungen zur Effizienz bei der Querstrom-Windsichtung

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

RWTHAACHEN

Untersuchungen zur Effizienz bei der Querstrom- Windsichtung

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

Michaela Lindemann

Master of Science RWTH
aus Lindlar

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Tag der mündlichen Prüfung: 28.05.2020

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 77

Michaela Lindemann

**Untersuchungen zur Effizienz
bei der Querstrom-Windsichtung**

Shaker Verlag
Düren 2020

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, 2020)

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 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7472-7

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

Umwege erweitern die Ortskenntnis.

Kurt Tucholsky

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Aufbereitung und Recycling (I.A.R.) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des I.A.R. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit. Ich habe viel von ihm gelernt und mich durch seine stets offenen Worte und sein Vertrauen immer gut am Institut aufgehoben gefühlt.

Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba, der sich als Zweitprüfer zur Verfügung gestellt hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dem Forschungszentrum VITO möchte ich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen eines Stipendiums danken und für die Möglichkeit, meinen Horizont durch die Arbeit in einem internationalen Team zu erweitern. Dr. Roeland Geurts und Mieke Quaghebeur, PhD, möchte ich dafür danken, dass sie mich einen Teil meines Weges begleitet haben und mir ihre naturwissenschaftlich geprägte Herangehensweise an die Erforschung der Windsichtung nähergebracht haben.

Für das Lesen dieser Arbeit und ihre Anregungen danke ich besonders Kay Blankenheim und Andrea Thomaе. Oberingenieur Dr.-Ing. Alexander Feil und meinen Kollegen von I.A.R. und TEER, insbesondere Nicolas Go und Marco Limburg, möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die Diskussionen über die Arbeit „Über den Einfluss von Luftbelastung und Materialstromzusammensetzung auf das Erreichen eines Trennziels am Beispiel einer Querstrom-Windsichtung“ danken. Der Titel hat es zwar nicht in die Dissertation geschafft, dafür aber das ein oder andere Ergebnis unserer Diskussionen.

Mein Dank geht auch an die studentischen Hilfskräfte des Instituts und den zahlreichen Studierenden, die ihre Abschlussarbeiten über die Windsichtung bei mir geschrieben haben. Ich danke insbesondere Susanne Funk und Alena Spies sowie Helena Schölwer, Janina Wildraut und Hendrik Handorf, die mit mir einige Stunden am Windsichter verbracht haben.

Neben all diesen fachlichen Wegbegleitern haben auch meine Freunde und Familie zu meinem Erfolg beigetragen. Danke!

Bei meinen Eltern und meiner Schwester möchte ich mich von Herzen dafür bedanken, dass sie mich immer unterstützt haben, sodass ich dadurch bestärkt meinen Weg gehen konnte.

Inhalt

Formelzeichenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
2 Eigenschaften von Abfällen und Aufbereitungsverfahren.....	4
2.1 Eigenschaften von Abfällen.....	4
2.2 Sortierung von Abfällen	10
3 Windsichter im Recyclingsektor	14
3.1 Funktionsprinzip und Ziele der Windsichtung.....	14
3.2 Schwerkraftnutzende Windsichterbauarten für den Recyclingsektor	16
4 Querstrom-Windsichtung und Einflussfaktoren auf das Trennergebnis	22
4.1 Verfahrensschritte einer Windsichtung.....	22
4.2 Einfluss unveränderlicher Randbedingungen auf das Trennergebnis.....	28
4.3 Einfluss von Betriebsparametern auf das Trennergebnis	36
4.4 Einfluss der Luftbeladung auf das Trennergebnis	42
5 Herleiten der Forschungsfragen.....	49
6 Charakterisieren der Versuchsanlage und des Versuchsmaterials.....	52
6.1 Bestandteile der Versuchsanlage.....	52
6.2 Betrieb und Versuchsdurchführung.....	59
6.3 Datenerhebung	65
6.4 Versuchsmaterial	66
6.5 Kennzahlen zur Bewertung des Trennerfolgs	68
6.6 Charakteristik des verwendeten Windsichters	73

Inhalt

7	Versuchsreihen.....	83
7.1	Zielstellung der Versuche.....	83
7.2	Versuchsübersicht.....	85
8	Ergebnisse und Auswertung der Versuche.....	89
8.1	Einfluss des Durchsatzes auf das Wertstoffausbringen	90
8.2	Einfluss der Aufgabegut-Zusammensetzung auf das Wertstoffausbringen ...	95
9	Beantwortung der Forschungsfragen.....	111
10	Schlussfolgerungen	115
	Quellenverzeichnis	119
	Abstract.....	128
	Kurzzusammenfassung.....	129
	Anhang	130
	Lebenslauf	138

Formelzeichenverzeichnis

A	[m ²]	Strömungsquerschnitt eines Sichtkanals
A _P	[m ²]	Anströmfläche eines Partikels
c _W	[-]	Widerstandsbeiwert
c _z	[-]	Reinheit eines Gemisches
F _G	[kg·m·s ⁻²]	Gewichtskraft
F _T	[kg·m·s ⁻²]	Trägheitskraft
F _W	[kg·m·s ⁻²]	Widerstandskraft
g	[m·s ⁻²]	Erdbeschleunigung
m	[kg]	Masse
m _{i,LM}	[kg]	Masse der Komponente i in Outputstrom LM
p _{dynamisch}	[Pa]	dynamischer Druck
Q	[kg·h ⁻¹] bzw. [m ³ ·h ⁻¹]	Durchsatz
R _{m,i}	[-]	Masseausbringen in Outputstrom i
R _{w,i}	[-]	Wertstoffausbringen der Komponente i
v	[m·s ⁻¹]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
Ḃ	[m ³ ·h ⁻¹]	Volumenstrom
v _{Band}	[m·s ⁻¹]	Förderbandgeschwindigkeit
v _F	[m·s ⁻¹]	Geschwindigkeit eines Fluids
V _P	[m ³]	Partikelvolumen
v _S	[m·s ⁻¹]	Sinkgeschwindigkeit eines Partikels

Griechische Variablen

κ	[-]	Trennschärfe
μ	[kg _s ·m ⁻³]	Feststoffbeladung der Luft, auch Luftbeladungsdichte
μ _{real}	[kg·m ⁻³]	tatsächliche mittlere Luftbeladung
ξ		Partikelmerkmalswert
ρ	[kg·m ⁻³]	Dichte, bei Feststoffen Rohdichte

Abkürzungsverzeichnis

Indizes

A	Aufgabegut
l	Luft
LG	Leichtgut
F	Fluid
P	Partikel
s	Feststoff
SG	Schwergut
25	25er Perzentil
75	75er Perzentil
i, n	Laufvariablen

Abkürzungsverzeichnis

AbfG	Abfallbeseitigungsgesetz
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BBP	<u>B</u> uch <u>b</u> inder <u>p</u> appe
E	Total Efficiency nach Worrell und Vesilind
EN	Efficiency Number nach Rietema
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
hl	<u>h</u> inten <u>l</u> inks
hr	<u>h</u> inten <u>r</u> echts
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LG	<u>L</u> eicht <u>g</u> ut
LGC	<u>L</u> eicht <u>g</u> ut- <u>C</u> ontainer
LM	<u>l</u> eichtes <u>M</u> aterial
Ma.-%	Masseprozent
Mg	<u>M</u> egagramm
PET	<u>P</u> oly <u>e</u> thylenterephthalat
PVC	<u>P</u> oly <u>v</u> inylchlorid
SG	<u>S</u> chwergut
SM	<u>s</u> chweres <u>M</u> aterial
SpM	<u>S</u> piegel <u>m</u> osaik
vl	<u>v</u> orne <u>l</u> inks
vr	<u>v</u> orne <u>r</u> echts

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundfließbild einer Abfolge von Prozessschritten mit Trennziel	12
Abbildung 2: Benennung der Output-Ströme bei der Windsichtung für das Trennziel Sortieren	15
Abbildung 3: Grundprinzip der Gegenstrom- und Querstrom-Sichtung im Schwerfeld	17
Abbildung 4: Sichtkanal eines Zick-Zack-Sichters.	18
Abbildung 5: Skizze eines Querstrom-Windsichters mit geneigtem Luftstrom	21
Abbildung 6: Verfahrensschritte der Windsichtung	23
Abbildung 7: Beispielhafter Aufbau eines Querstrom-Windsichters.....	24
Abbildung 8: Exemplarische Darstellung von Schwankungen eines Durchsatzes in Abhängigkeit der Zeit.....	25
Abbildung 9: Beispielflugkurven von Partikeln im Trennraum eines Querstrom-Windsichters und Visualisierung charakteristischer Bereiche, die von Leichtgut- und Schwer- gutpartikeln durchquert werden.....	27
Abbildung 10: Partikelflugbahnen zur Darstellung der Phasen eines Trennprozesses im Quer- strom-Windsichter. Darstellung von Partikeln mit horizontaler und vertikaler Kraftkomponente am Ende der einzelnen Phasen	28
Abbildung 11: Veränderliche Größen einer Querstrom-Windsichtung	37
Abbildung 12: Arbeitsbereiche der Windsichtung je nach Trennziel	38
Abbildung 13: Übersicht über die Form der verwendeten Versuchsmaterialien, Sichter-Bauarten und Trennverfahren anderer Veröffentlichungen.....	44
Abbildung 14: Schematische Darstellung des Schwarmeinflusses. Freie Umströmung eines Partikelschwarms und Durchströmung eines Partikelschwarms aufgrund eines begrenzten Strömungsfeldes	47
Abbildung 15: Aufbau des Querstrom-Windsichters des I.A.R.	53
Abbildung 16: Vibrationsförderrinne	54
Abbildung 17: Darstellung des Schiebers und seiner Anordnung in der Vibrationsförderrinne.	55
Abbildung 18: Sichtraum des verwendeten Windsichters	56
Abbildung 19: Geöffneter Leichtgut-Container und Zyklon.....	57
Abbildung 20: Messprinzip des Differenzdruckverfahrens.	60
Abbildung 21: Anordnung der Messebene im Zuluftkanal des Versuchs-Sichters	61
Abbildung 22: Anordnung der Messpunkte im Zuluftkanal	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 23: Vorbereitung des Versuchsmaterials in der Vibrationsförderrinne.	64
Abbildung 24: Versuchsmaterial	68
Abbildung 25: Bezeichnung und Ort des Auftretens der Luftströme	74
Abbildung 26: Messnetz für Strömungsprofilmessungen im Zuluftkanal	77
Abbildung 27: Strömungsprofil im Zuluftkanal bei 20 Hz.....	77
Abbildung 28: Strömungsprofil im Zuluftkanal bei 22 Hz.....	77
Abbildung 29: Darstellung der mittleren Luftgeschwindigkeit der Geraden für 20 Hz und 22 Hz ...	78
Abbildung 30: Trenngradkurve für PVC bei einer Luftbeladungsdichte von $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$	79
Abbildung 31: Transportkapazität für einen Luftvolumenstrom von $940 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$	80
Abbildung 32: Masseausbringen LG für einen Luftvolumenstrom von $940 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$	81
Abbildung 33: Wertstoffausbringen des PVC und BBP in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte für einen Luftvolumenstrom von $1.300 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$	90
Abbildung 34: Partikel an leichtem Material, die ins Leichtgut ausgebracht werden, in Abhängigkeit der aufgegebenen Partikelanzahl pro Sekunde.....	91
Abbildung 35: Maximale Bandbelegung der Versuche mit PVC/SpM und BBP/SpM in Abhängigkeit des erreichten Wertstoffausbringens des leichten Materials ins Leichtgut.....	92
Abbildung 36: Trendlinie je Zusammensetzung für das Wertstoffausbringen des PVC bei unterschiedlichen Luftbeladungsdichten.....	93
Abbildung 37: Wertstoffausbringen des PVC für Versuche gleicher Zusammensetzung in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte	93
Abbildung 38: Abnahme des Wertstoffausbringens des PVC je Luftbeladungsdichtenerhöhung...	94
Abbildung 39: Wertstoffausbringen des PVC ins Leichtgut in Abhängigkeit des Massenanteils von PVC im Aufgabegut.	96
Abbildung 40: Wertstoffausbringen des PVC in Abhängigkeit der Versuchsdauer für die Mischungen mit 3, 5 und 7 Ma % PVC für ein Aufgabevolumen von 2,1 l.	97
Abbildung 41: Wertstoffausbringen des PVC in Abhängigkeit der Bandbelegung für die Versuche mit konstanten Aufgabevolumina	98
Abbildung 42: Wertstoffausbringen des PVC in Abhängigkeit der Partikelanzahl an PVC im Aufgabegut.....	99
Abbildung 43: Wertstoffausbringen des PVC in Abhängigkeit der Partikelanzahl im Aufgabegut. 100	

Abbildung 44: Wertstoffausbringen des PVC ins Leichtgut in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte für drei Aufgabegutvolumina bei variierenden Zusammensetzungen des Aufgabegutes.	100
Abbildung 45: Linearized Efficiencies für getestete Zusammensetzungen und drei Aufgabevolumina.	102
Abbildung 46: Masse des PVC im Leichtgut in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte.	104
Abbildung 47: Wertstoffausbringen des PVC in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte.	105
Abbildung 48: Masse PVC im Leichtgut für Monoversuche und Mischversuche in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte von PVC.	106
Abbildung 49: Masse des PVC im Leichtgut in Abhängigkeit der Bandbelegung.	107
Abbildung 50: Mischung von PVC und SpM für gegebene Aufgabegutvolumina und variierende Zusammensetzung. Oben: Wertstoffausbringen des PVC in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte an PVC im Mischversuch. Unten: Ausbringen des SpM in das Leichtgut und Massenanteil des PVC in der Aufgabe.	110
Abbildung 51: Oben: Ausbringen des PVC ins Leichtgut in Abhängigkeit der Luftbeladungsdichte von PVC und der Luftbeladungsdichte. Unten: Ausbringen des SpM ins Leichtgut und ausgetragene Masse an SpM ins Leichtgut.	111
Abbildung 52: Wertstoffausbringen des PVC dargestellt in Abhängigkeit der Partikelanzahl pro Sekunde für einen Luftvolumenstrom von $1.040 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	114
Abbildung 53: Übersicht der Gewichtsverteilung von geschäumtem PVC, Buchbinderpappe und Spiegelmosaik.	131
Abbildung 54: Übersicht der ermittelten Schüttdichten von geschäumtem PVC, Buchbinderpappe und Spiegelmosaik.	131
Abbildung 55: Typenschild der Vibrationsförderrinne.	133
Abbildung 56: Zyklon im Technikum des I.A.R. mit Bemaßung.	134
Abbildung 57: Typenschild des Windsichter-Gebläses.	135
Abbildung 58: Wertstoffausbringen des PVC für verschiedene Anteile an PVC im Aufgabegut.	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Exemplarischer Vergleich der Kennzahlen zur Beschreibung der Feststoffbeladung..... 40

Tabelle 2: Eigenschaften der verwendeten Partikelsorten 68

Tabelle 3: Transportkapazität in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im
Zuluftkanal für leichte Materialien..... 82

Tabelle 4: Übersicht der konstanten und variablen Parameter der Versuchsreihen..... 84

Tabelle 5: Zusammensetzungen des Aufgabegutes für die Versuchsreihe V „Variierende
Zusammensetzung bei definierten Aufgabegut-Volumina“ 87

Tabelle 6: Zusammensetzungen des Aufgabegutes für die Versuchsreihe LM „Variierende
Masse an SM bei konstanter Masse an LM“ 88

Tabelle 7: Mögliche Einflussfaktoren auf das Trennergebnis und ihre Auswirkungen..... 89

Tabelle 8: Daten zur Berechnung der Trennschärfe..... 135