

Verfahrenstechnische Modellierung der trockenen Altpapiersortierung ausgehend von der Betriebspraxis

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte
Dissertation
von
Dipl.-Ing. Winfrid Leonhard Rauch
aus Starnberg / Bayern

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel
Mitberichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Lieselotte Schebek

Tag der Einreichung: 25. August 2014
Tag der mündlichen Prüfung: 3. Februar 2015

WINFRID LEONHARD RAUCH
HRSG. SAMUEL SCHABEL

VERFAHRENSTECHNISCHE MODELLIERUNG DER TROCKENEN ALTPAPIERSORTIERUNG AUSGEHEND VON DER BETRIEBSPRAXIS

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

12

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4373-0

ISSN 1865-7419

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wird ein verfahrenstechnischer Modellvorschlag entwickelt, der die Vergleichbarkeit verschiedener Anlagen- und Maschinenkonfigurationen für die trockene Aufbereitung von Altpapier (AP) ermöglicht.

Die Arbeit erklärt die nach dem Stand der Technik bisher unzureichend definierten Pflichtenhefte des modellierten Prozesses und seiner Teilprozesse und die Unterschiede zwischen Anlagenfunktionen, Maschinenprinzipien und Wirkeffekten. Stoffspezifische Sekundäreffekte, wie z. B. die "Brückenbildung", können Maschinenprinzipien zugeordnet werden.

Die verfahrenstechnische Darstellung dieser Prozesstechnik ermöglicht qualitative und quantitative Ergebnisse zur Sensibilität des Verfahrens in Bezug auf Partikelgröße, Materialzusammensetzung, Materialfeuchte und andere stoffspezifische Parameter.

Dazu werden bekannte mathematische Gleichungen für Zerkleinerung, Verdichtung, Förderung, Siebung und Sortierung an die Gegebenheiten dieser besonderen Verfahrenstechnik angepasst und ergänzt.

Weiterhin können bei jedem Prozessteilschritt (oder Anlagenteil) Bilanzgrenzen gelegt werden und die berechneten Ergebnisse mit dem anfangs formulierten Pflichtenheft verglichen werden.

In einem iterativen Prozess werden Informationen der Maschinenhersteller und Anlagenexperten verglichen mit den vom jeweiligen Anlagenbetreiber bekannt gegebenen Maschinenleistungen. Die zusätzlich durchgeführten Probennahmen ergänzen die prozessrelevanten Informationen. So können die untersuchten Anlagen verfahrenstechnisch dargestellt und mit den empirischen Werten der Betriebspraxis validiert werden.

Durch geeignete Parametrisierung können die erarbeiteten Basis-Modelle auch genutzt werden, um über die untersuchten Anlagen hinausgehende Aussagen zu machen und andere Anlagentypen zu untersuchen. Wesentliche Vergleichsgrößen für verschiedene Anlagenkonzepte sind der mengenbezogene Energieverbrauch in Form einer Prozess-Effizienz und die Durchgangszeit des AP-Materials.

Die Anlagentypen, für die das Modell erstellt worden ist, sind händische, mechanische und optische Sortieranlagen in Deutschland, deren Eingangsmaterial zum Großteil auf der Blauen-Tonnen-Sammlung basieren.

Andere Modellrechnungen wurden für das Schweizer Bündelsystem und das französische Gelbe-Sack-System erstellt. Auch die "Single Stream"-Sammlung in Großbritannien und in den USA wird zum Vergleich herangezogen.

Bestehende Widersprüche in der Anlagenauslegung und in der Ressourceneffizienz können systematisch erklärt werden.

Diese Widersprüche treten z. B. dadurch zutage, dass heute der Bestand von verschiedenen Anlagentypen beobachtet werden kann.

Dieses Fortbestehen von verschiedenen Anlagentypen kann anhand dieser Modellbildung mit den Unterschieden in den AP-Eigenschaften sowie mit technikhärenten Effizienzproblemen begründet werden.

Die Sortier- und Reinheitseffizienz lassen sich im jeweiligen Modell definieren und als Funktion der Zusammensetzung des Eingangsmaterials und des Durchsatzes darstellen. Es lässt sich feststellen, dass die Grundprozesse im Rahmen der Teilprozesse von Vor-, Haupt- und Nachsortierung durch verschiedene Maschinentypen ausgefüllt werden können, die unterschiedliche Sortier- und Reinheitseffizienzen erzeugen.

Es gibt demnach ein Leistungsoptimum (Maximum) der Sortier- und Reinheitseffizienz, das nicht gleichzusetzen ist mit dem maximalen Einsatz aller nach Stand der Technik verfügbarer Maschinentypen.

Diese technikhärente Logik gibt also eine erste Erklärung, warum verschiedene Maschinentypen in der heutigen, trockenen AP-Sortierung parallel bestehen.

Die Energieeffizienz wird als Ergebnis im erstellten Modell ermittelt und kann bezogen auf den Durchsatz berechnet werden. Alle Grundprozesse, die im Rahmen der hier beschriebenen Teilprozesse von Materialaufgabe bis zur Transportvorbereitung auftreten, haben verschiedene Energieintensitäten. Je nach gewählter Wirkweise und je nach Maschinentyp sind sehr unterschiedliche Energieeffizienzen berechnet worden.

Es gibt demnach ein Leistungsoptimum (Minimum) des Energieverbrauchs, das nicht gleichzusetzen ist mit dem maximalen Einsatz aller nach Stand der Technik verfügbarer Maschinentypen.

Diese technikhärente Logik gibt demnach eine zweite Erklärung, warum verschiedene Maschinentypen in der heutigen, trockenen AP-Sortierung parallel bestehen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit vom November 2008 bis Mai 2014 als externe Doktorarbeit am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) im Fachbereich Maschinenbau der technischen Universität Darmstadt angefertigt.

Mein herzlicher Dank gilt dem Berichterstatter und Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel, der meine Dissertation, die als externe Doktorarbeit für das Institut die allseits bekannten Schwierigkeiten mit sich brachte, mit viel Geduld und Unterstützung begleitet hat.

Besonderer Dank gilt auch meiner Darmstädter Kollegin Sabine Weinert, die mich nach besten Mitteln unterstützt und gefördert hat.

Meinen anderen PMV-Kollegen sei ebenso gedankt für Ihre langjährige Unterstützung wie den AiF-Partnern des PMV sowie den Kollegen und externen Partnern, ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre: Manfred Berghofer (Fa. BT-Wolfgang Binder / AT), Laurent Chrétien (Fa. Coved / FR), Jonathan Clarke (Fa. TOMRA / NO), Manfred Feil (Fa. Feil / DE), Jean Gabriel Frey (Fa. Vauché / FR), Giuseppe Garonne (Fa. Vauché Bioma / IT), Dr. Manfred Geistbeck (Fa. UPM / DE), Dr. Bert Handschick (Fa. RTT / DE), Reiner Hungermann (Fa. Matthiessen Lagertechnik / DE), Cédric Leroux (Fa. Véolia / FR), Peter Linz (Fa. ROWE / DE), Sébastien Mandelli (Fa. Matthiessen Engineering / FR), Barbara Müksch (Fa. Sita Entsorgungstechnik / DE), Ursina Mutzner (Fa. Stadler / DE), Christophe Oudot (Fa. Coved / FR), Michael Pinkel (Fa. IUT / AT), Dr. Michael Ralfs (Fa. RSG / DE), Denis Tranzer (Fa. Paprec / FR), Laurent Tesson (Fa. Sita France / FR), Thierry Oudart (unabhängiger Experte / FR), Dr. Dennis Voss (Fa. Utzenstorf Papier / CH).

Die Beschäftigung mit diesem Forschungsthema hat meinen Berufsweg sehr bereichert und meinen Lebensweg gekennzeichnet.

Meiner Familie, besonders meiner Frau Agnès, danke ich für sehr viel Geduld und Verständnis.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Quellen und Hilfsmittel, selbständig verfasst habe.

25. August 2014

Datum, Unterschrift

Inhaltverzeichnis

Kurzfassung.....	5
Vorwort.....	7
Erklärung.....	8
Inhaltverzeichnis	9
1. Einleitung	13
1.1 Materialeigenschaften	13
1.2 Maschinentchnik	15
1.3 Anlagenmodelle.....	16
1.4 Komplexe Modellbildung.....	17
2. Stand von Wissenschaft und Technik: Bisherige Modellierung.....	21
2.1 Anlagen- und Prozessschemata.....	21
2.2 Technikentwicklung am Beispiel von Deutschland (1980-2010).....	22
2.2.1 Verpressung (bis ca. Mitte der 1980er Jahren).....	22
2.2.2 Handsortierung (bis ca. Mitte 1990er)	23
2.2.3 Teilmechanische Vorsortierung (bis ca. 2000).....	24
2.2.4 Integration der mechanischen und optischen Sortiergeräte (bis ca. 2008)	25
2.2.5 Spezialisierung und weitgehende Mechanisierung (seit ca. 2008).....	26
2.3 Technische Entwicklung des Eingangsmaterials.....	26
2.4 Technikentwicklung ausserhalb Deutschlands.....	27
2.4.1 Technikentwicklung in Europa	27
2.4.2 Begriffsklärung "Single Stream"- und "Dual Stream"-Sammlung.....	28
2.4.3 Technikentwicklung der trockenen AP-Sortierung außerhalb Europas.....	29
3. Problemstellung und Zielsetzung	30
3.1 Betriebswirtschaftliche Problemstellung mit technunabhängigen Gründen.....	31
3.2 Volkswirtschaftliche Problemstellung mit technunabhängigen Gründen.....	33
3.3 Technikinhärente Problemstellung, von wirtschaftlichen Randparametern überdeckt	34
3.4 Darstellung der technischen Problemstellung	35
3.4.1 Prozessbildung.....	36
3.4.2 Eigenschaftsvektoren	38
3.4.3 Energiebedarf, Zeitfunktion, Pflichtenheft und Maschinenlösung	42
4. Methodische Grundlagen	44
4.1 Begriffsdiskussion und Begriffsdefinitionen	44
4.1.1 Stoffdefinition.....	44

4.1.2 Trennkriterium und Sekundäreffekte	46
4.1.3 Grundfunktion	50
4.1.4 Maschinentyp	51
4.1.5 Spezifischer Energiebedarf	52
4.1.6 Teilprozess oder Anlagenteil.....	53
4.1.7 Sortier-Begriffe: Sortiereffizienz, Reinheit, Sortierkriterium, positive Sortierung	55
4.1.8 Sortier-Fractionen und Hohl-/Flachkörper.....	56
4.2 Pflichtenheft der Anlagenteile bzw. der Teilprozesse und Diskussion	57
4.2.1 Sammlung und Behälterwahl	57
4.2.2 Transport und Vorbehandlung	58
4.2.3 Zerkleinerung und Aufgabe	59
4.2.4 Entfrachtung, Klassierung und Vorsortierung.....	60
4.2.5 Hauptsortierung.....	60
4.2.6 Nachsortierung und Qualitätskontrolle	61
4.2.7 Transportvorbereitung und Vorbereitung auf den nachfolgenden Prozess	61
4.2.8 Diskussion der Anlagenteile bzw. Teilprozesse.....	62
4.3 Berechnung der Grundfunktionen	68
4.3.1 Lagerung, Förderung und Transport.....	68
4.3.1.1 "Sammelbehälter"	68
4.3.1.2 "Transportfahrzeug"	70
4.3.1.3 "Hebwerkzeug"	70
4.3.1.4 "Pufferlager"	71
4.3.1.5 "Fördereinheit"	73
4.3.1.6 Zusammenfassung: Lagerung, Förderung und Transport	73
4.3.2 Zerkleinerung.....	74
4.3.2.1 Altpapier-Zerkleinerung als makroskopisches Problem	74
4.3.2.2 Material „ohne Gedächtnis“	74
4.3.2.3 Weitere Modellannahmen	75
4.3.2.4 Bruchfunktion	76
4.3.2.5 Energiefunktion (Rittinger-Gleichung) der Zerkleinerung.....	78
4.3.2.6 Zusammenfassung: Zerkleinerung von Altpapier.....	78
4.3.3 Klassierung	79
4.3.3.1 Grundprozess-Kombination "Grob- und Feinsieb"	81
4.3.3.3 "Magnet-Sortierung"	82

4.3.3.4 "Wirbelstromscheider".....	82
4.3.3.5 Zusammenfassung: Klassierung von Altpapier	83
4.3.4 Sortierung (in der AP-Sortierungsprozessstechnik).....	84
4.3.4.1 Grundprozess-Kombination "Händische Sortierung"	84
4.3.4.2 Grundprozess-Kombination "Mechanische Sortierung durch Paperspike"	86
4.3.4.3 Grundprozess-Kombination "Optische Sortierung"	86
4.3.4.3.1 "Beschleunigungsband"	86
4.3.4.3.2 "Optische Erkennung"	88
4.3.4.3.3 "Ausortierung"	90
4.3.4.4 Zusammenfassung: Sortierung	92
4.3.5 Verdichtung und Verpressung	93
5. Einführung in die Datenerhebung und Modellierung der in der Betriebspraxis angetroffenen Anlagentypen	96
5.0 Modellierung der in der Betriebspraxis angetroffenen Anlagentypen.....	96
5.0.1 Modellierung aus der Perspektive der Altpapierqualität	97
5.0.2 Modellierung aus der Perspektive der Anlagen-Konzeption	98
5.0.3 Modellierung aus der Perspektive der Grundfunktionen und Maschinentypen.....	99
5.0.4 Gewählte Modellierungen.....	100
5.0.5 Übersicht der Modellierungen.....	101
5.1 Vereinfachte Handsortierung für sortenreine Bündelsammlung.....	102
5.2 Handsortierung für die Blaue Tonne ohne große Pappen.....	104
5.3 Mechanische Vorsortierung für Schüttgut aus Blauer Tonne	106
5.4 Sortierung für Sacksammlung (Verpackungsabfälle und PPK).....	108
5.5 Teilmechanisierte Sortierung für Blaue Tonne.....	110
5.5.1 Standardanlage mit Grob- und Feinsieb	110
5.5.2 Modellrechnung mit Feuchteinfluss	111
5.6 Optische Sortierung für Blaue Tonne	113
5.7 Teilmech. Sortierung für vorsortiertes Schüttgut aus Gelber Tonne.....	115
5.8 Mechan. und opt. Sortierung für Schüttgut aus Gelber Tonne	117
5.9 Mechan. und opt. Sortierung für "Single stream"-Ware (mit Glas).....	120
5.10 Auswertung der Modelle	122
5.10.0 Betriebspunkt, Regelbereich und Maschineneinstellungen	122
5.10.1 Durchsatz.....	123
5.10.2 Automatisierungsgrad	124
5.10.3 Anzahl der Anlagenteile.....	125

5.10.4 Anzahl der eingebauten Maschinen	126
5.10.5 Deinking-Anteil im Eingangsmaterial.....	128
5.10.6 Durchlaufzeiten	129
5.10.7 Deinkingqualität und Verschmutzungsarten	130
5.10.8 Sekundäreffekte.....	131
5.10.9 Absoluter und relativer Energiebedarf.....	132
5.10.10 Leistungsoptimum der eingesetzten Energie.....	133
5.10.11 Energiebedarf pro Teilprozess	134
5.10.12 Leistungsoptimum der Sortiereffizienz und Sortierreinheit	135
6. Ergebnisse dieser Arbeit: Zusammenfassung und Ausblick	136
Anhang: Einführung in die Methodik der In-Situ-Arbeiten, der iterativen Modellerstellungsschritte und der Modellabgrenzung	139
0.1 Zusammenfassung der In situ-Arbeiten und Literaturrecherchen	139
0.2 Iterative Modellerstellungsschritte	140
0.3 Modellabgrenzung.....	141
0.4 Modellrechnung pro AP-Typ.....	142
Anhang: Modellrechnung 5.5.1.....	143
1. Sammlung.....	143
2. Transport.....	146
3. Aufgabe und Zerkleinerung.....	148
4. Klassierung.....	152
5. Hauptsortierung	159
6. Nachsortierung.....	164
7. Transportvorbereitung	166
8. Zusammenfassung.....	171
Anhang: Matrixrechnung für Zerkleinerungsfunktionen	180
"Ballenaufreisser".....	180
"Haufen-Dosierer"	182
"Pappenzerreisser"	183
"Sacköffner"	185
"Aktenvernichter"	186
Anhang: Übersicht der Abbildungen und technischen Tabellen	187
Anhang: Verwendete Abkürzungen	191
Literaturverzeichnis	192