Modellierung und Simulation von Altpapiersortieranlagen

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Anke Gottschling, M. Sc.

aus Seeheim-Jugenheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Tag der Einreichung:	09.02.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	18.05.2016

D17

ANKE GOTTSCHLING
HRSG. SAMUEL SCHABEL

MODELLIERUNG UND SIMULATION VON ALTPAPIERSORTIERANLAGEN

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

14

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik

PMV

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., 2016

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 978-3-8440-4548-2
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

In Altpapiersortieranlagen wird gesammeltes Altpapier einer trockenen mechanischen Aufbereitung unterzogen, um es als Rohstoff für die Papierherstellung bereitzustellen. Im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb dieser Anlagen ergeben sich Fragestellungen, bei deren Bearbeitung sich der Einsatz von Fließschemasimulationswerkzeugen anbietet. Bei der Fließschemasimulation werden verfahrenstechnische Prozesse mittels eines Netzwerks aus Stoffströmen und Grundoperationen abstrahiert, sodass sie virtuell untersucht werden können.

Aufgrund fehlender Werkzeuge kann das Potential von Fließschemasimulationen zum aktuellen Zeitpunkt allerdings nicht für die Altpapiersortierung erschlossen werden. Hauptziel dieser Arbeit ist es daher, eine Beschreibung für die Stoffströme und Modelle für die Grundprozesse der Altpapiersortierung zu entwicklen. Außerdem soll eine Methode zur Datenerfassung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen, die auf der Entnahme von Stichproben beruht, erstellt werden.

Zu Beginn der Arbeit wird der Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland zusammengefasst und der Stand des Wissens zu Werkzeugen für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen zusammengetragen.

Danach wird die Beschreibung der Stoffströme entwickelt. In dieser Beschreibung ist der Stoff Altpapier ein Gemisch von Stoffgruppen und diese Stoffgruppen sind durch Eigenschaften charakterisiert. 18 Stoffgruppen, die für die Altpapiersortierung relevant sind, werden in einem Stoffgruppenkatalog definiert. Als charakterisierende Eigenschaft wird die Verteilung der Teilchengröße in die Beschreibung aufgenommen. Die Stoffstrombeschreibung ist modular aufgebaut, sodass sie an unterschiedliche Fließschemasimulationsaufgaben angepasst werden kann.

Die Methode für die Datenerfassung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen wird anschließend auf Basis der Stoffstrombeschreibung erarbeitet. Es werden Verfahren zur Entnahme von Stichproben, zu deren Analyse und zur Bestimmung von Massenströmen festgelegt.

Für die Analyse der Stichproben wird ein Probenanalysegerät in Form einer automatischen Messanlage entwickelt. Der Hauptsensor dieser Anlage ist eine Farbkamera. Es werden Algorithmen zur Bildanalyse implementiert, welche die Verteilung

der Teilchengröße einer Altpapierprobe ermitteln. Zusätzlich werden Algorithmen zur Mustererkennung erstellt, sodass die Messanlage zwischen Objekten der Stoffgruppen Zeitungen, Illustrierte und Magazine, Werbedruck, weiße Papiere, graue Papiere und braune Wellpappen automatisch unterscheiden kann. Der Aufwand zur Analyse von Altpapierproben beträgt beim Einsatz der Anlage weniger als 1 Stunde pro 10 kg Probenmenge und liegt damit deutlich unter dem Aufwand einer rein händischen Probenanalyse.

Mittels der entwickelten Datenerfassungsmethode werden Daten in industriellen Altpapiersortieranlagen erhoben. Dafür werden fünf Anlagen, die Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung zum Hauptzielprodukt Deinkingware verarbeiten, im Normalbetrieb untersucht.

Als nächstes werden die Grundprozesse der Altpapiersortierung, die Grobsiebung, Feinsiebung, Paperspikeprozesse sowie die automatische und manuelle Klaubung, modelliert. Dabei wird ein grundlegendes Black-Box-Modell ohne zeitliche Abhängigkeiten erstellt, das die Grundprozesse der Altpapiersortierung allgemein beschreibt. Dieses Grundmodell wird für die einzelnen Prozesse konkretisiert. Bei der Konkretisierung wird bspw. für die Siebprozesse die Teilchengröße in Form von Trenngradkurven berücksichtigt. Die so gebildeten Modelle enthalten Parameter, die anschließend mittels der erfassten Messdaten bestimmt werden.

Zum Schluss der Arbeit wird die Anwendung der entwickelten Fließschemasimulationswerkzeuge demonstriert. Hierzu wird ein Gesamtanlagenmodell aus Grundprozessmodellen zusammengesetzt und mittels Messdaten validiert. Dieses Gesamtanlagenmodell wird in zwei Fließschemasimulationen mit praxisrelevanten Modellszenarien eingesetzt und dadurch gezeigt, dass die entwickelten Simulationswerkzeuge eine virtuelle Untersuchung von Altpapiersortieranlagen ermöglichen.

In der industriellen Praxis lassen sich die entwickelten Werkzeuge bspw. bei der Projektierung oder der Optimierung von Altpapiersortieranlagen anwenden. Auch in der Forschung bieten sich, z. B. bei Untersuchungen des Altpapierkreislaufs, Anwendungsmöglichkeiten.

Abstract

Recovered paper needs to be sorted before it can be used as a secondary raw material for the manufacture of new paper. For the planning or operation of sorting plants for recovered paper flowsheet simulations could be a valuable instrument. In flow sheet simulations an abstract network of material streams and unit operation models is generated to virtually investigate process plants.

Due to missing tools the potential of flow sheet simulations can currently not be exploited for recovered paper sorting. Therefore the main objective of this thesis is to develop a material stream description and models for the unit operations of recovered paper sorting. Additional aim is the development of a method for collecting data of material streams in industrial sorting plants based on sampling.

At the beginning of the thesis the state of the art of sorting plants for recovered paper in Germany is summarized and the state of knowledge about tools for flowsheet simulations of sorting plants for recovered paper is compiled.

The material stream description is developed afterwards. In this description recovered paper is a mixture of material groups and those groups are characterised by properties. In this thesis 18 materials groups, which are relevant for recovered paper sorting, are specified in a material group catalogue. The particle size distribution is taken into account as a characterising property. The structure of the material stream description is modular so that it can be adapted to different flowsheet simulation tasks.

The method for collecting data of recovered paper streams in industrial sorting plants is based on the material stream description. Procedures for sampling, for the analysis of samples and for measuring mass flows are defined.

For the analysis of samples an instrument in form of an automatic measuring system is designed. The main sensor of the system is a colour camera. Image analysis algorithms are implemented to determine the particle size distribution of a sample. Additional algorithms for pattern recognition are developed so that the system can automatically distinguish between objects of the material groups newspapers, magazines, advertisement, white papers, grey papers and brown corrugated board. The time needed for analysing samples with the system amounts to 1 hour per 10 kg

of recovered paper. This is substantially shorter than the time needed for manual sample analyses.

The developed method is used to collect data in industial sorting plants for recovered paper. Five plants that process recovered paper from household collection and produce sorted graphic paper for deinking are investigated during standard operation.

The unit operations for recovered paper sorting, coarse screening, fine screening, paperspike processes, hand picking and sensor-based sorting, are modelled afterwards. A basic steady state black box model is used to describe all unit operations in general. This basic model is specified for each individual unit operation. In the model for the screening processes the particle size is taken into account by screen classification functions. All unit operation models contain parameters which are fitted to the collected data.

At the end of the thesis the application of the developed flowsheet simulation tools is demonstrated. A flowsheet of an entire sorting plant for recovered paper is set up with unit operation models and validated by measured data. This flowsheet is used in two simulations with scenarios of practical relevance. The simulations show that the developed tools are suitable for a virtual investigation of sorting plants for recovered paper.

Application fields for the developed tools are the planning and operating of industrial sorting plants for recovered paper. In research the tools can, for example, be applied in investigations covering the circle of paper recycling.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis **XIII**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Zielstellung und Vorgehen 2

2 Stand des Wissens **5**
2.1 Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland 5
2.1.1 Grobsiebung 7
2.1.2 Feinsiebung 7
2.1.3 Paperspikeprozesse 9
2.1.4 Automatische Klaubung 9
2.1.5 Handklaubung 12
2.2 Werkzeuge für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen 13
2.2.1 Stoffstrombeschreibung 13
2.2.2 Modelle der Grundprozesse 13

3 Beschreibung der Stoffströme **19**
3.1 Stoffgruppen 20
3.2 Eigenschaften 23

4 Entwicklung einer Datenerfassungsmethode **25**
4.1 Probenahme 25
4.1.1 Grundlagen 25
4.1.2 Methode 27
4.2 Probenanalysegerät 29
4.2.1 Funktionsstruktur 30
4.2.2 Konzept 31
4.2.3 Mustererkennung 32
4.2.4 Fazit 44
4.3 Bestimmung der Massenströme 44

5 Durchführung der Datenerfassung 47
5.1 Probenahme 47
5.2 Bestimmung der Massenströme 47
5.3 Probenanalyse 49

6 Modellierung der Grundprozesse 53
6.1 Methoden 53
6.2 Grundmodell 54
6.3 Siebklassierung 56
6.3.1 Grobsiebung 60
6.3.2 Feinsiebung 66
6.4 Paperspikeprozesse 71
6.5 Automatische Klaubung 73
6.6 Handklaubung 76
6.7 Fazit 79

7 Modellvalidierung und Fließschemasimulation einer Altpapiersortieranlage 81
7.1 Gesamtanlagenmodell 81
7.2 Modellvalidierung 82
7.3 Beispielsimulationen 86
7.4 Fazit 89

8 Zusammenfassung und Ausblick 91

Literaturverzeichnis 94

A Automatische Messanlage für die Probenanalyse 101
A.1 Spezifikationen 101
A.2 Merkmalalgorithmen 101
A.2.1 Masse 101
A.2.2 Form 101
A.2.3 Farbe 102
A.2.4 Muster 105
A.3 Ergebnisse der statistischen Analyse der Merkmale 108

B Zuordnungskatalog der Stoffgruppen für händische Sortieranalysen 117

C Messdaten 119
C.1 Grobsiebung 119

C.2 Feinsiebung 127
C.3 Paperspikeprozess 129
C.4 Automatische Klaubung 130
C.5 Handklaubung 132
C.6 Gesamtanlage 134

Symbolverzeichnis

Symbole mit mehrfacher Bedeutung sind hier mehrfach aufgeführt. Sie ergeben sich aus dem jeweiligen Kontext, in dem sie auftauchen.
Symbole, die nur im Anhang dieser Arbeit vorkommen, sind dort erklärt und hier nicht aufgeführt.

Abkürzungen

B	Bücher
B.	Beschreibung
Dun	für Deinking ungeeignet
g	gemischte Objekte
H	Hygienepapiere
HSV	Hue, Saturation, Value
IM	Illustrierte und Magazine
K.	Kriterium
Kgr,b,ge	Karton und Pappe grau, braun und gefärbt
Kw,g,h	Karton weiß, gelb, hell
MIR	im mittleren Infrarotbereich
NIR	nahinfrarot
NTSC	National Television Systems Committee
pf	papierfremde Bestandteile
Pge	gefärbte grafische Papiere
Pgr	Papiere grau, gelblich
Pgrafisch	grafische Papiere
Pgrr	restliche grafische Papiere (erwünscht)
PPKu	sonstige ungeeignete Papiere, Pappen, Karton

PPKunerw	für Deinking unerwünscht
PPKv	Papiere, Pappen, Karton stark verschmutzt
Pr	restliche Papiere
Pw	Papiere weiß, hell
RGB	rot, grün, blau
RRSB	Rosin-Rammler-Sperling-Bennett
run11	restliche Papiere, in 1.11.00 unerwünscht
S	Sortierrest
un02	Papiere, in 1.02.00 unerwünscht
un04	Papiere, in 1.04.00 unerwünscht
UV	ultraviolett
V	restliche Verpackungen
VIS	im sichtbaren Lichtspektrum
Vs	sonstige Verpackungspapiere
W	Wellpappe
Wb	Wellpappen braun
Wd	Werbedruck
Ww	Wellpappen weiß
Z	Zeitungen

Formelzeichen

a	Massenanteil
b	Prüfmerkmal
$\bar{b}$	arithmetischer Mittelwert des Prüfmerkmals
C	Flächenanteil
D	Diffusionskoeffizient
e	Trennmerkmal
$E\,I$	Biegesteifigkeit
f	Funktion

f	Streckenlast
F	Trennfunktion
F	Kraft
G	Änderung der Masse durch Agglomerieren oder Zerteilen
H	Farbton
$\bar{H}$	mittlerer Farbton
$\Delta\bar{H}$	Differenz des mittleren Farbtons
l	Länge
m	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
Δm	Teilmasse
M	Anzahl der Freiheitsgrade
n	Steilheitsparameter
N	Anzahl
p	Modellparameter
q	Verteilungsdichte
$\bar{q}$	mittlere Verteilungsdichte
s	Schätzwert für die Standardabweichung
$s_{\bar{b}}$	empirische Standardabweichung des Mittelwerts des Prüfmerkmals
S	statistische Sicherheit
S	Farbsättigung
$\bar{S}$	mittlere Farbsättigung
t	kritischer Wert der t-Verteilung
Δt	Zeitintervall
T	Trenngrad
$\bar{T}$	mittlerer Trenngrad
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeit
v	Gutmassenanteil
w	Verschiebung

x	Teilchengröße bzw. -länge
x_1	Teilchenlänge
x_2	Teilchenbreite
$\bar{x}$	mittlere Teilchenlänge
Δx	Intervallbreite
x'	Lageparameter
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
Γ	Gammafunktion
μ	Erwartungswert

Indizes

a	Akzept
A	ausfließend
AK	automatische Klaubung
b	braun
B	Ballen
E	einfließend
f	Feingut
f	Papierfremdes
F	Förderband
FS	Feinsieb
g	Grobgut
g1	grau 1
g2	grau 2
ges	Gesamt-
GS	Grobsieb
k	Stoffgruppe
l	Fenster
L	Fenster mit Vordergrundpixeln

max	maximal bzw. Maximum
min	minimal
O	Objekt
P	Probe
P	Pixel
PS	Paperspike
r	Mengenart
r	Rejekt
t	mit regelmäßigem Text
un	für Deinking unerwünscht
UV	ultraviolett
v	volumenbezogen
w	weiß
z	Intervall