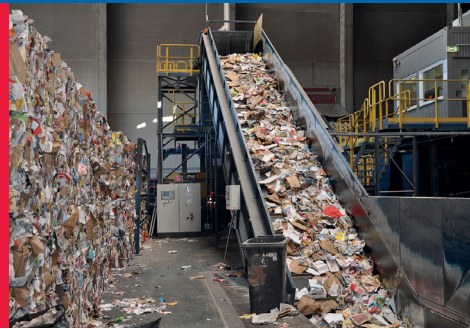


TOBIAS KREBS
HRSG. SAMUEL SCHABEL

SENSORBASIERTE CHARAKTERISIERUNG UND KLASSIFIZIERUNG VON ALTPAPIER- OBJEKTEN UND DEREN ANWENDUNG ZUR MODELLIERUNG VON SORTIERANLAGEN

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

20



**Sensorbasierte Charakterisierung und Klassifizierung
von Altpapierobjekten und deren Anwendung
zur Modellierung von Sortieranlagen**

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

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

Dissertation

vorgelegt von

Herrn Tobias Krebs, M. Sc.

aus Sulzbach am Main

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel
Mitberichterstatterin: Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Tag der Einreichung: 01.02.2021
Tag der mündlichen Prüfung: 05.05.2021

Darmstadt 2021

D17



TOBIAS KREBS
HRSG. SAMUEL SCHABEL

SENSORBASIERTE CHARAKTERISIERUNG UND KLASSIFIZIERUNG VON ALTPAPIER- OBJEKTEN UND DEREN ANWENDUNG ZUR MODELLIERUNG VON SORTIERANLAGEN

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

20

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8312-5

ISSN 1865-7419

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) an der Technischen Universität Darmstadt. Mein Dank gilt an erster Stelle Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel für das in mich gesetzte Vertrauen und die Betreuung meiner Arbeit. Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens meiner Arbeit.

Ich möchte mich außerdem ganz herzlich bei allen früheren und aktuellen Kolleginnen und Kollegen am PMV für die tolle Zusammenarbeit sowie die vielen fruchtbaren Diskussionen bedanken. Dipl.-Ing. Klaus Villforth möchte ich explizit herausgreifen, der mir mit seinem herausragenden technischen Sachverstand und seiner Kreativität in einigen kniffligen Situationen sehr kompetent weiterhelfen konnte.

Danke auch an alle Studierenden, die durch ihre Abschluss- und Projektarbeiten oder Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskräfte einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. Eine Auflistung aller von mir betreuten wissenschaftlichen Arbeiten mit Bezug zu dieser Arbeit ist am Ende der Arbeit aufgeführt.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir nicht nur das Studium und damit auch diese Arbeit ermöglicht haben, sondern auch in absolut jeder Situation einen sicheren Rückhalt für mich darstellten, auf den ich mich immer verlassen konnte. Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Oma Helena bedanken, die wie keine Zweite an mich geglaubt hat und die die Fertigstellung dieser Arbeit so gerne miterlebt hätte.

Kurzfassung

Altpapier ist der wichtigste Rohstoff in der deutschen Papierindustrie, dessen Einsatz sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht sinnvoll ist. Willkürlich gemischte Altpapierströme, insbesondere aus der haushaltsnahen Sammlung, sind aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung in den meisten Fällen als Rohstoff für die Herstellung neuer Papierprodukte ungeeignet. Daher werden sie in industriellen Sortieranlagen in Fraktionen getrennt und unter den entsprechenden Sortenbezeichnungen an altpapierverarbeitende Papierfabriken weiterverkauft. Die Qualität der Sortiererergebnisse vieler industrieller Sortieranlagen ist jedoch bei weitem noch nicht ideal. Es mangelt u. a. an Werkzeugen zur Simulation von Altpapiersortieranlagen, die eine Optimierung der Prozessparameter ermöglichen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein Simulationswerkzeug vorgestellt, mit dem sich sowohl Teilprozesse als auch komplexe Gesamtprozesse von Altpapiersortieranlagen durch geeignete Verschaltungen der Teilprozesse simulieren lassen. Zur Generierung der Trennprozessmodelle ist die Analyse der Zusammensetzung von großen Altpapiermengen aus den Stoffströmen der Sortieranlagen unerlässlich. Manuelle Analysen kommen aufgrund des großen Aufwands an ihre Grenzen. Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird daher die Entwicklung eines automatischen Messsystems zur sensorbasierten Charakterisierung und Klassifizierung von Altpapierobjekten beschrieben, das es ermöglicht, größere Mengen an Altpapierproben hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und weiterer Stoffeigenschaften zu analysieren.

Im Stand des Wissens am Anfang der Arbeit werden sowohl Vorarbeiten zur Modellierung und Simulation von Altpapiertrennprozessen als auch bestehende Messsysteme zur Analyse von Altpapierzusammensetzungen betrachtet.

Das entwickelte Simulationswerkzeug beinhaltet ein Modell für eine Stoffstrombeschreibung, ein Grundmodell für Trennprozesse in Form eines Blackbox-Ansatzes und eine Bibliothek von Modellbausteinen, die auf der grafischen Benutzeroberfläche von Matlab/Simulink zu komplexen Prozessmodellen verknüpft

werden können. Die wesentlichen Weiterentwicklungen des vorgestellten Verfahrens im Vergleich zu einem früher entwickelten Verfahren sind die einfache Anwendung durch Verbindung von Bausteinen auf einer grafischeren Benutzeroberfläche in einer etablierten Entwicklungsumgebung, die Möglichkeiten beliebig komplexe Verschaltung auch mit Stoffstromrückführungen darzustellen und beliebig viele unterschiedliche Trennmerkmale und mehrdimensionale Trennfunktionen abzubilden. Des Weiteren können in der Entwicklungsumgebung Optimierungsalgorithmen zur Anlagenoptimierung angewandt werden. Die Leistungsfähigkeit konnte mit einer Beispielsimulation mit realen Daten einer Altpapiersortieranlage verifiziert werden.

Das automatische Messsystem arbeitet analog zur manuellen Sortierung von Altpapierproben. Die Altpapierobjekte werden durch verfahrenstechnische Trennprozesse vereinzelt, Messdaten am Einzelobjekt durch geeignete, im Messsystem verbaute Sensoren erfasst und schließlich Objektmerkmale aus den Sensordaten extrahiert, die mit Hilfe von künstlicher Intelligenz dazu verwendet werden, die Objekte einer von elf Objektklassen zuzuordnen. Als Sensoren kommen sowohl eine Farbkamera und eine Spektroskopiekamera als auch eine Waage und ein eigens entwickelter Sensor zur Bestimmung von mechanischen Papiereigenschaften zum Einsatz. Zur Klassifizierung werden verschiedene Modelle aus dem Bereich des klassischen maschinellen Lernens, aber auch Deep Learning Ansätze getestet und miteinander verglichen. Die Erkennungsraten konnten im Vergleich mit anderen in der Literatur beschriebenen Messsystemen gesteigert werden, sodass Altpapierproben sehr genau hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert werden können.

Die Kombination aus dem vorgestellten Simulationswerkzeug und dem automatischen Messsystem stellt damit einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur rechnergestützten Optimierung von Altpapiersortieranlagen dar. Darüber hinaus bietet sich das Messsystem auch als Referenz für neu entwickelte Messtechnik zur Bestimmung von Altpapierzusammensetzungen an.

Abstract

Recovered paper is the most important raw material in the German paper industry, and its use makes sense from both an ecological and an economic point of view. Arbitrarily mixed recovered paper streams, especially from household collections, are in most cases unsuitable as raw material for the production of new paper products due to their heterogeneity in composition. Therefore, they are sorted into fractions in industrial sorting plants and sold on to recovered paper processing paper mills under the corresponding grade designations. However, the quality of the sorting results of many industrial sorting plants is still far from ideal. Among other things, there is a lack of tools for the simulation of recovered paper sorting plants, which enable the optimization of process parameters.

In the first part of this thesis, a simulation tool is presented which can be used to simulate sub-processes as well as complex overall processes of recovered paper sorting plants by suitable linking of the sub-processes. To generate the models of the separation processes, the analysis of the composition of large quantities of recovered paper from the material flows of the sorting plants is essential. Manual analyses reach their limits due to the large amount of manual work required. Therefore, the second part of this thesis describes the development of an automatic measuring system for sensor-based characterization and classification of recovered paper objects in order to analyze larger quantities of recovered paper samples with respect to their composition and other material properties.

In the state of the art at the beginning of the work, preliminary work on the modeling and simulation of recovered paper separation processes is considered as well as existing measurement systems for the analysis of recovered paper compositions.

The developed simulation tool includes a model for a mass flow description, a basic model for separation processes in the form of a black box approach and a library of model modules that can be linked to complex process models on the Matlab/Simulink graphical user interface. The main advancements of the presented method in comparison to an earlier developed method are the simple application by connecting modules on a graphical user interface in an established

development environment, the possibilities to represent arbitrarily complex interconnections also with material flow feedbacks and to represent as many different separation features and multidimensional separation functions as desired. Furthermore, optimization algorithms for plant optimization can be applied in the development environment. The performance could be verified with an example simulation with real data of a recovered paper sorting plant.

The automatic measuring system works similar to manual sorting of recovered paper samples. The recovered paper objects are separated by separation processes, measurement data on the individual object are recorded by suitable sensors built into the measurement system, and finally object characteristics are extracted from the sensor data, which are used with the aid of artificial intelligence to assign the objects to one of eleven paper classes. The sensors used are a color camera and a spectroscopy camera as well as a scale and a sensor developed in-house for determining mechanical paper properties. For classification, different models from the field of classical machine learning and deep learning are tested and compared. The recognition rates could be increased in comparison with other measurement systems described in the literature, so that recovered paper samples can be analyzed very accurately with regard to their composition.

The combination of the presented simulation tool and the automatic measuring system thus represents an important step on the way to computer-aided optimization of recovered paper sorting plants. In addition, the measuring system can also be used as a reference for newly developed measuring technology for determining recovered paper compositions.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung.....	3
2	Stand des Wissens.....	5
2.1	Altpapiersortierung	5
2.2	Modellierung von Altpapiertrennprozessen.....	8
2.2.1	Fließschemasimulation von Feststoffprozessen.....	8
2.2.2	Stoffstrombeschreibung	9
2.2.3	Beschreibung von Trennprozessen.....	11
2.2.4	Modellansätze für Trennprozesse	14
2.3	Sensorbasierte Charakterisierung von Altpapier	17
2.3.1	Sensortypen zur Altpapiercharakterisierung	17
2.3.2	Messsysteme zur Bestimmung der Altpapierzusammensetzung.....	20
2.4	Lernende Systeme.....	25
3	Modellierung von Altpapiertrennprozessen	29
3.1	Rahmenbedingungen der Modellierung	29
3.2	Stoffgruppen	31
3.3	Simulationen in Matlab/Simulink	32
3.3.1	Stoffstrombeschreibung	33
3.3.2	Grundmodell.....	35
3.3.3	Bibliothek in Matlab/Simulink	37
3.3.4	Simulation einer Sortieranlage.....	39
3.4	Fazit zur Modellierung.....	45
4	Automatisches Messsystem zur Altpapieranalyse	47
4.1	Anlagenkonzept	47

4.2	Beschreibung des Gesamtprozesses	50
4.3	Hyperspektralkamera	53
4.4	Durchlaufwaage	54
4.5	RGB-Kamera.....	55
4.6	Taktiler Sensor.....	55
5	Datenerfassung zur Altpapiercharakterisierung.....	59
5.1	Objektdatenbank.....	59
5.2	Datenaufnahme der Hyperspektralkamera	61
5.2.1	Datenaufnahme mittlerer NIR-Spektren.....	61
5.2.2	NIR-Spektren von Papier	64
5.2.3	Verarbeitung der NIR-Daten	66
5.2.4	Unterscheidung papierfremder Objekte	71
5.3	Datenerfassung durch Bildanalyse	72
5.3.1	Bilddatenaufnahme	72
5.3.2	Daten aus klassischer Bildanalyse	74
5.3.3	Daten aus Deep Learning Algorithmen.....	79
5.4	Daten des taktilen Sensors.....	82
6	Modelle zur Altpapierklassifizierung.....	87
6.1	Klassische Modelle.....	87
6.2	Deep Learning Modelle	89
6.3	Klassifikationsergebnisse	92
6.4	Schlussfolgerungen aus den Klassifikationsmodellen	94
7	Zusammenfassung und Ausblick	97
A	Anhang	101
A.1	Modellierung von Altpapiertrennprozessen.....	101
A.2	Automatisches Messsystem zur Altpapieranalyse	111
A.3	Datenerfassung zur Altpapiercharakterisierung	120
A.4	Modelle zur Altpapierklassifizierung.....	142
	Literaturverzeichnis.....	152

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ASM	Angular Second Moment
CAD	Computer-Aided Design
CNN	Convolutional Neural Network
FC	Fully Connected
GLCM	Gray-Level Co-Occurrence Matrix
HSV	Hue, Saturation, Value
Kf	Frischfaserkartons
Kr	Recyclingkartons
LDA	Linear Discriminant Analysis
LED	Light-Emitting Diode
M	Magazine
MIR	Mittleres Infrarot
MLR	Multiple Linear Regression
NaN	Not a Number
NIPALS	Nonlinear Iterative Partial Least Squares
NIR	Nahes Infrarot
PCR	Principal Component Regression
Pd	Durchgefärbte Papiere
Pf	Papierfremde Bestandteile
Pg	Graue Papiere
PLS	Partial Least Squares
PLS-DA	Partial Least Squares Discriminant Analysis
PLSR	Partial Least Squares Regression
PTFE	Polytetrafluorethylen
Pw	Weiße Papiere

RGB	Rot, Grün, Blau
SGF	Savitzky-Golay-Filter
SIMPLS	Simple PLS
SNV	Standard Normal Variate
SVM	Support Vector Machine
UV	Ultraviolett
W	Werbehefte
Wb	Braune Wellpappen
Ww	Weißer Wellpappen
Z	Zeitungen

Formelzeichen

a	Stoffeigenschaften, Ausrüstungs- oder Betriebsparameter
f	Abbildung
I	Intensität
J	Intervallmittenmatrix
k	Stoffgruppe
M	Massenstrommatrix
\dot{m}	Massenstrom
m	Dimensionen im Vektorraum
n	Dimensionen im Vektorraum
N	Anzahl
p	Modellparameter
q	Verteilungsdichte
S	Transformationsmatrix
T	Trennfunktion bzw. Trennmatrix
x	Partikelmerkmal
v	Massenanteil
λ	Wellenlänge

Indizes

<i>A</i>	Akzept
<i>E</i>	Eingang
<i>G</i>	Grobgut
<i>i</i>	Zählvariable
<i>j</i>	Zählvariable
<i>k</i>	Stoffgruppe
<i>l</i>	Zählvariable
<i>R</i>	Rejekt
<i>S</i>	Schwarzreferenz
<i>W</i>	Weißreferenz
<i>WB</i>	Weißabgeglichen
