

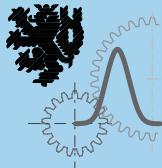
Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 434

Dipl.-Ing. Rolf Kamps,
Adliswil

Konzept und Realisierung eines Rohrfördersystems mit Schubelementen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des
Lehrstuhls für Konstruktion
an der Bergischen Universität Wuppertal

Konzept und Realisierung eines Rohrfördersystems mit Schubelementen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

im
**Fachbereich D- Architektur, Bauingenieurwesen,
Maschinenbau, Sicherheitstechnik**
der
Bergischen Universität Wuppertal

- Abteilung Maschinenbau -

vorgelegt von
Rolf Kamps
Adliswil - Schweiz

Wuppertal 2015

Erstgutachter: Herr Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Viktor Otte
Zweitgutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld
Drittgutachter: Herr Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Friedrich Krause

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Februar 2016

Fortschritt-Berichte VDI

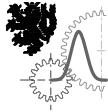
Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Rolf Kamps,
Adliswil

Nr. 434

Konzept und Realisierung
eines Rohrföldersystems
mit Schubelementen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des
Lehrstuhls für Konstruktion
an der Bergischen Universität Wuppertal

Kamps, Rolf

Konzept und Realisierung eines Rohrfördersystems mit Schubelementen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 434. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

214 Seiten, 182 Bilder, 7 Tabellen.

ISBN 978-3-18-343401-5, ISSN 0178-949X,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

Für die Dokumentation: Schubelementförderer – Methodenverknüpfung – Widerspruchsvororientierte Innovationsstrategie – Evolutionsstrategie – Rohrfördersysteme – Schüttguttechnik – Konstruktionsmethodik

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Konstruktionslehre und/oder der Schüttgutförderung. Sie beschreibt, wie unter Einsatz und geschickter Verknüpfung von konstruktionstheoretischen Methoden ein neuartiges Rohrfördersystem gefunden und entwickelt wird. Aufgrund der Neuartigkeit des Systems „Schubelementförderer“ sind in der Arbeit nicht nur die theoretischen Grundlagen dargestellt, sondern auch wesentliche konstruktive Ausprägungen im Sinne einer Produktentwicklung beschrieben. Dadurch bekommt die Gesamtarbeit nicht nur den Charakter einer wissenschaftlichen Forschungsarbeit, sondern in gewissen Teilen auch die Form einer Ideensammlung und eines anschliessenden Regelwerkes zur Dimensionierung und Gestaltung neuartiger, förderprinzipbedingter Bauelemente. Die theoretischen Überlegungen werden entwicklungsbegleitend mit Versuchen überprüft und verifiziert.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 468

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-343401-5

Vorwort

Phantasie heisst nicht, sich etwas auszudenken, sondern aus den Dingen etwas zu machen.

aus Thomas Mann: „Meerfahrt mit Don Quijote“

Seit hunderten von Jahren schaffen Ingenieure Fördersysteme für vielgestaltige Güter. Ständig wurden und werden diese Systeme optimiert und neue, überaus komplexe Förderprinzipien entwickelt.

Analysiert man die Förderprinzipien für Schüttgüter fällt allerdings auf, daß kein (in der Literatur bekanntes) Fördersystem existiert, mit dem vereinzelbare und hintereinander angeordnete Fördereinheiten oder -elemente in einem geschlossenen Druckstrang durch Schubkräfte¹ bewegt werden. Schub / Druck kommt in industriell eingesetzten Förderersystemen² zur Realisierung von grossen Transportwegen nach Kenntnis des Verfassers nicht vor, möglicherweise durch Bedenken des Ingenieurdenkens gegen den Einsatz von Druckkräften bei der Massenbewegung.

Die Krafteinleitung durch Zug lässt sich aber durchaus auch umkehren, sogar mit vielfältigen Vorteilen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Fördersystem vorgestellt, das die Bewegungseinleitung durch Schubkräfte auf eine, in einem Rohr befindliche „Kette“ vereinzelbarer Elemente realisiert.

Auf Grund der Neuartigkeit des Systems „Schubelementeförderer“ (Tubo³) sind in der Arbeit nicht nur die theoretischen Grundlagen dargestellt, sondern auch wesentliche konstruktive Ausprägungen im Sinne einer Produktentwicklung beschrieben. Dadurch bekommt die Gesamtarbeit nicht nur den Charakter einer wissenschaftlichen Forschungsarbeit sondern in gewissen Teilen auch die Form einer Ideensammlung und eines anschliessenden Regelwerkes zur Dimensionierung und Gestaltung

¹ Rohrpostsysteme mit Druckluft bewegen nur einzelne Behälter.

² Schubstangenförderer fördern das Gut, indem angetriebene Schubstangen oder Schubbalken das Schüttgut um einen bestimmten Betrag in Richtung Förderrichtung schieben, unter oder über dem Schüttgut den Rückhub machen und in der Vorwärtsbewegung das Gut wieder vorschieben. Die Schubstangenförderer werden z.B. für das Heraustransportieren von Spänen in Werkzeugmaschinen eingesetzt. Schubbalkenförderer arbeiten nach dem gleichen Wirkprinzip.

³ Der Produktnname TUBO, der in der Entwicklungsphase generalisierend für alle Aufgaben an diesem System verwendet wurde, ist nur ein Arbeitsbegriff. Nach Diskussionen mit Krause und Katterfeld wurde aus systematischen, klassifikatorischen Gründen der Begriff „Schubelementeförderer“ eingeführt.

neuartiger, förderprinzipbedingter Bauelemente. Es soll deshalb bereits hier darauf aufmerksam gemacht werden, daß diese Dualität erforderlich ist, um die Komplexität des Entwicklungsprozesses des Förderers über Idee, Konzept, Konstruktion/Berechnung und Versuch/Experiment verständlicher darzustellen.

Dem Autor stellte sich nach der Ideenfindung die prinzipielle Frage, mit welchen Theorien und Berechnungsverfahren der Fördertechnik dieses neuartige Transportprinzip behandelt werden kann. Dass eine Adaption vorhandener Berechnungsgrundlagen notwendig sein würde, war von vornherein klar. Welches aber sind die Verfahren, die zur Beschreibung des „Schubelementeförderers“ genutzt werden konnten? Da das Fördersystem einem Kettenförderer am nächsten kommt, lag der Ansatz nahe, bei Rohrkettenförderern nach adaptierbaren Theorien zu suchen. Sie wurden gefunden in der Dissertation von Katterfeld [Kat-2005], der 2005 eine Arbeit zur „Funktionsanalyse von Rohrkettenförderern“ vorstellt.

Aus der Analyse dieser Arbeit ergab sich im weiteren eine fruchtbare Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld selbst, dem ich hier ganz herzlich für seine eingebrachten Ansätze und Vorschläge danken möchte. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht entstanden und das vorliegende Produkt möglicherweise an einigen Stellen theoretisch nicht belegt. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Viktor Alfred Otte, der mich auf dem Gebiet des konstruktionssystematischen Denkens langjährig schulte, förderte und die gesamte Arbeit begleitete.

Um die Gesamtentwicklung in die Welt der Fördersysteme einordnen zu können, durfte ich aus dem grossen Erfahrungsschatz von Herrn Prof. (i. R.) Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Friedrich Krause schöpfen. Darüber hinaus war seine positive Bewertung der neuen Idee und seine ständige Ermunterung, diese Arbeit zu schreiben, für mich äußerst wichtig.

Der Dank gebührt aber auch allen Mitarbeitern des TUBO-Teams der Firma Busse, insbesondere ihrem Geschäftsführer, Herrn Felix Timm, Frau Ulrike Bodmer und Herrn Jan Hammer für die Umsetzung von Konstruktionsideen und den Herren Bertram Pscherer und Markus Huber aus dem TUBO – Entwicklungsteam Beilngries der Firma Bühler GmbH. Ihr pausenloses Engagement, ihre Begeisterung, ihre Bereitschaft grösste Herausforderungen zu meistern haben es erst möglich gemacht, in kurzer Zeit aus einer Idee ein Serienprodukt zu gestalten. Vielen Dank hierfür.

Die Fa. IBAF Engineering in Bochum führte nicht nur Finite Elemente Methoden (FEM)-Berechnungen und Mehrkörpersimulationen (MKS) zur Dimensionierung der Schubelemente durch, sondern ermöglichte durch eine geschickte Kombination unterschiedlichster Berechnungsverfahren die Optimierung der Rohrbogengeometrie mittels genetischer Algorithmen der Evolutionsstrategie nach Rechenberg mit anschließender Überlagerung von heuristischen Methoden. Hier möchte ich dem IBAF

Team, insbesondere Frau Dr. Maren Vaupel und Herrn Dr. Henning Haensel, herzlich danken.

Die Arbeit wäre auch nicht entstanden ohne die freundliche Förderung und Ermutigung meiner Vorgesetzten Frau Dr. Eliana Zamprogna, die mir den entwicklerisch-denkenden Ungehorsam erlaubte und mich ermutigte, von bereits vorgegebenen Lösungskonzepten abzuweichen und eigene Ideen zu untersuchen, dem Divisionsleiter „Grain Processing“, Herrn Bruno Mendlar, der frühzeitig das Potential des neuen Fördersystems erkannte und mir die notwendigen Ressourcen bereitstellte, mich zusätzlich durch straffe Termine forderte und somit den Projektfortschritt vorantrieb und der wohlwollenden Begleitung des Verwaltungsratspräsidenten der Bühler AG, Herrn Urs Bühler, der mit Ideen zu anderen Rohrbogenformen die Untersuchungen in eine erweiterte Richtung lenkte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gust danke ich für die freundliche Übernahme des Prüfungsvorstandes und bei Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Petra Winzer möchte ich mich für die langjährige Unterstützung in Qualitäts- und Sicherheitsthemen und für den Beisitz bei der Prüfungskommission bedanken.

Allen, auch den hier nicht genannten engagierten und stets aufgeschlossenen Verantwortlichen und Mitarbeitern danke ich von ganzem Herzen für ihre Mithilfe, meine Idee aus der Konzeptphase bis zu einem marktreifen Produkt begleitet zu haben.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VIII
Zusammenfassung	XIII
Abstract	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Fördertechnik in der Grundnahrungsmittelverarbeitung	2
1.3 Stetigförderer in der Müllerei	5
1.4 Besondere Anforderungen an das neue Fördersystem	13
1.5 Zielsetzung	14
2 Weiterentwicklung des Rohrkettenförderers mit Methoden der Konstruktionssystematik	17
2.1 Charakterisierung des Rohrkettenförderer-Prinzips	17
2.2 Untersuchungsgebisse mit modifiziertem Rohrkettenförderer	24
2.3 Ausgewählte Methoden der Konstruktionssystematik	26
2.4 Ideenfindung mit Methoden der Konstruktionssystematik	30
2.5 Konzeptentwicklung	35
3 Konzept- und Prinzipbestätigung	47
3.1 Konzept des Versuchsmodells Schubelementförderer	47
3.2 Aufbau des Versuchsmodells	51
3.3 Inbetriebnahme und erste Erkenntnisse	53
3.4 Systemrelevante Komponenten des Schubelementförderers	54
4 Theoretische und praktische Untersuchungen zu den Hauptbewegungswiderständen	57
4.1 Leistungsberechnung	57
4.1.1 Berechnungen zum Volumen- und Massenstrom	57
4.1.2 Berechnung der Bewegungswiderstände	58
4.1.3 Überprüfung der Berechnungsergebnisse mittels Kraftmesssystem im Schubelement	68
4.1.4 Berechnung der Antriebsleistung	69
4.2 Rohrbogenuntersuchungen	71
4.2.1 Überlegungen zur Rohrbogengeometrie	74

4.2.2 Versuche mit unterschiedlichen Rohrbogenformen	76
4.2.3 MKS - gestützte Optimierung des Rohrbogenverlaufes	81
5 Gestaltung ausgewählter Komponenten des Schubelementeförderers	90
5.1 Standardisierung des Schubelementeförderers	90
5.1.1 Baukastenentwicklung	92
5.1.2 Baureihenentwicklung	94
5.2 Berechnungen und Simulationen zum Schubelement	97
5.2.1 Gestalt	98
5.2.2 Festigkeitsbetrachtungen	107
5.2.3 Werkstoffauswahl und spezielle Herstellungsverfahren / Mehrkomponententechnik	120
5.3 Untersuchungen zum Antrieb	124
5.4 Hygienic Design	128
5.4.1 Hygienegerechte Konstruktion	129
5.4.2 Reinigung des Schubelementeförderers	139
5.5 Sensorik	146
5.6 Industrial Design	152
6 Prototypen im industriellen Einsatz	157
6.1 Weiterentwicklung des Konzeptmodells zur industriellen Nutzung	157
6.2 Versuchsstand zur Reibungsbestimmung im ersten Rohrbogen	161
6.3 Versuchsstand 6 Inch mit <i>basic</i> Antrieb für 15 t/h	165
6.4 Erweiterte 6 Inch Kundeninstallation mit <i>basic</i> Antrieb und 3-D Linienführung	167
6.5 Versuchsstand 8 Inch in S-Bogenform	168
6.6 Standard Antriebsvariante 8 Inch für 24 m Förderhöhe	170
7 Zukunftsvarianten	172
8 Zusammenfassung und Ausblick	180
9 Anlage	183
9.1 Experimentelle Untersuchungen zu einem modifizierten Rohrkettenförderer	183
9.2 Ableitung der Differentialgleichung für den Rohrbogen des Schubelementeförderers in Analogie zu [Kat-2005]	191
Literaturverzeichnis	192

Formelzeichen & Abkürzungen

Folgende Formelzeichen und Indizes finden in der vorliegenden Arbeit Anwendung. Alle Formeln und Gleichungen sind für die hier angegebenen Einheiten gültig.

Symbol	Einheit	Erklärung
A	m^2	Querschnittsfläche
\mathcal{A}_{hleer}	N	Abkürzungen für Berechnung des Bewegungswiderstands eines horizontalen Rohrbogens ohne Schüttgut
\mathcal{B}_{hleer}	N	
\mathcal{C}	N	
\mathcal{A}_{hvoll}	N	Abkürzungen für Berechnung des Bewegungswiderstands eines horizontalen Rohrbogens mit Schüttgut
\mathcal{B}_{hvoll}	N	
\mathcal{A}_{vleer}	N	Abkürzungen für Berechnung des Bewegungswiderstands eines vertikalen Rohrbogens ohne Schüttgut
\mathcal{B}_{vleer}	N	
\mathcal{A}_{vvoll}	N	Abkürzungen für Berechnung des Bewegungswiderstands eines vertikalen Rohrbogens mit Schüttgut
\mathcal{B}_{vvoll}	N	
d_{Ri}	m	Innendurchmesser des Rohrs
d_0	m	Teilkreisdurchmesser Kettenrad
F_0	N	Gesamtbewegungswiderstand beim Verlassen der Antriebsstation \rightarrow größte Schubelementekraft
F_0^*	N	Gesamtbewegungswiderstand beim Einlaufen in die Antriebsstation (muss negativ sein!)
F_i	N	Bewegungswiderstand im Wegabschnitt i
$F_{Bog\ Ende}$	N	Bewegungswiderstand am Ende eines Rohrbogens
$F_{Bog\ Anfang}$	N	Bewegungswiderstand am Anfang eines Rohrbogens
F_{hF_i}	N	Bewegungswiderstand in horizontalen Wegabschnitten im gefüllten Fördertrum

F_{hR_i}	N	Bewegungswiderstand in horizontalen Wegabschnitten im leeren Rücktrum
F_{SEmax}	N	Maximal zulässige Schubelementekraft
F_U	N	Umfangskraft am Antrieb
F_{vF_i}	N	Bewegungswiderstand in vertikalen Wegabschnitten im gefüllten Fördertrum
F_{vR_i}	N	Bewegungswiderstand in vertikalen Wegabschnitten im leeren Rücktrum
F_{vSE}	N	Hubwiderstand der Schubelemente
F_{vSG}	N	Hubwiderstand des Schüttgutes
$F_{\delta F_i}$	N	Bewegungswiderstand in geneigten Wegabschnitten im gefüllten Fördertrum
$F_{\delta R_i}$	N	Bewegungswiderstand in geneigten Wegabschnitten im leeren Rücktrum
g	m/s^2	Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2)
H_i	m	Höhe eines vertikalen Wegabschnitts
I_V	m^3/s	Volumenstrom
I_M	t/h	Massenstrom
$I_{M,soll}$	t/h	Geforderter Massenstrom
L_i	m	Horizontale Länge eines Wegabschnitts
l_R	m	Länge eines Schubelementes
m_R	kg	Masse eines Schubelementes
r	m	Radius des Rohrbogens
q_F	N/m	Meterlast des Schüttguts
q_{SE}	N/m	Meterlast der Schubelemente
P_A	kW	Antriebsleistung
P_{spez}	$\text{kW}\cdot\text{h/t}$	Spezifischer Leistungsbedarf
V	m^3	Rohrvolumen

V_{SE}	m^3	Volumen eines Schubelementes
v	m/s	Geschwindigkeit der Schubelemente
v_K	m/s	Geschwindigkeit der Kette
δ_i	$^\circ$	Neigungswinkel gegen die Horizontale eines geneigten Wegabschnitts
η_A	-	Antriebswirkungsgrad von Motor und Getriebe
η_F	-	Füllungsgrad
η_{Temp}	-	Thermischer Antriebswirkungsgrad von Motor und Getriebe
η_V	-	Volumenwirkungsgrad
λ_a	-	Aktiver Schüttgutdruckbeiwert / Horizontallastverhältnis
μ_{SE}	-	Wandreibwert eines Schubelementes gegen Rohr
μ_w	-	Wandreibwert des Schüttguts gegen Rohr
ρ_b	kg/m^3	Schüttdichte
φ_e	-	(Innerer) effektiver Reibwert
φ_s	-	Stufensprung
φ_P	-	Teilungswinkel
ψ_0	$^\circ$	Anfangswinkel eines Rohrbogens
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit
z	-	Zähnezahl

Abkürzung	Bedeutung
ASOM	Analyse, Synthese und Optimierung von Mehrgelenksystemen
ATO	Assemble to Order
BgVV	Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin
BLV	Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen
CAD	Computer-Aided Design
CROST	Constructive Resource & Result Oriented Strategy of Thinking
DMS	Dehnungsmessstreifen
EHEDG	European Hygienic Engineering and Design Group
ETO	Engineer to Order
FDA	Food and Drug Administration (USA)
FEM	Finite Elemente Methode
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GA	Genetischer Algorithmus
GF	Glasfaserverstärkt
GMP	Good Manufacturing Practise
IDZ	Internationales Design Zentrum
MKS	Mehrköpersimulation
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTF	Mean Time To Failure
MTO	Make to Order
PE	Polyethylen
POM	Polyacetal
PTO	Pick to Order
STL	Stereolithografie Teile

TRIZ	теория решения изобретательских задач „Teorija Reschenija Izobretatel'skich Zadac“ - Theorie des Erfinderischen Problemlösens ⁴
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
WOIS	Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie
2-D	Zweidimensional
3-D	Dreidimensional

⁴ Es sind unterschiedliche Schreibweisen in der Literatur zu finden, die hier gewählte Schreibweise entspricht der ursprünglich russischen Schreibweise die Orloff in [Orl-2006] verwendet.

Kurzzusammenfassung

Konzept und Realisierung eines Rohrfördersystems mit Schubelementen

Durch Kombination von Methoden der Konstruktionssystematik und der Theorie zur Vorgehensweise beim erforderlichen Lösen von Problemen TRIZ wurde eine neue Idee zur Förderung von Schüttgut im Rohr gefunden. In der vorliegenden Arbeit werden neben dem Entstehungsprozess von der Idee zum Produkt die wissenschaftlichen Grundlagen zur Dimensionierung und Auslegung des neuartigen Fördersystems, das im weiteren Verlauf Schubelementeförderer genannt wird, beschrieben. Der Schubelementeförderer lässt sich am ehesten mit einem „kettenlosen“ Rohrkettenförderer vergleichen. Die Theorie zur Auslegung von Rohrkettenförderern wurde adaptiert und weiterentwickelt, um das System rechnerisch auslegen zu können. Begleitend zur Theorieentwicklung wurden die berechneten Werte in experimentellen Versuchen verifiziert. So können für den Schubelementeförderer in einfachen Linienführungen die erforderlichen Leistungen und Kräfte im System, der Volumenstrom und somit der Massenfluss ermittelt werden. Es lassen sich zu erwartende Lebensdauern für Verschleißteile im System angeben. Zur Sicherung einer energieeffizienten Lösung mussten die Reibungsverhältnisse in der 90° - Umlenkung im Rohrbogen untersucht werden. Hier wurden Evolutionsalgorithmen mit überlagerten heuristischen Methoden eingesetzt, um optimale, verschleissoptimierte Bogenformen zu generieren. Erste Aussagen zu verbleibenden Restmengen des Fördergutes im Förderystem sind ableitbar. Darauf aufbauend werden Vorschläge zur Sanitation aber auch zur sensorischen Überwachung des Gesamtsystems entwickelt und experimentell erprobt. Die Arbeit fasst die theoretisch und experimentell gewonnenen Ergebnisse in einem Baukasten-, Baureihen- und Typengruppenkonzept für Schubelementeförderer zusammen, das als Ausgangspunkt zur Weiterentwicklung des Fördersystems für verschiedene Systemparameter (Fördergut, Förderhöhe, Förderleistung usw.) bis hin zur Serienfertigung dienen wird.

Abstract

Concept and realization of a tube conveyor system with push elements

A new idea for tubed transportation of bulk material was discovered through a combination of systematic design methodologies with the TRIZ theories of inventive problem solving. In addition to describing the idea-to-product origination process, this research paper describes the scientific basis for the design and dimensioning of the new conveying system, which is hereinafter referred to as a 'tube push conveyor'. The tube push conveyor is best likened to a "chainless" tube-chain drag conveyor. Tube-chain drag conveyor design theories have been adapted and improved, in order to be able to computationally model the system. Alongside development of the theory, derived figures were verified by experimental trial. For simple tube push conveyor configurations, it is thus possible to establish the necessary capabilities of the system and the required forces in the system, the volume flow and hence the mass flow. Lifetime expectancies of wearing parts in the system can now be specified. Provisional conclusions can be drawn as to amounts of residuals that may remain in the conveyor system. 90° bends were likewise investigated based on a circular corner arc model. Through superimposing heuristic methodologies onto evolutionary algorithms, it has proved possible to uncover other arc formats, which are paving the way to wear-resistance-optimized geometries.