

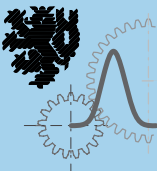
## Reihe 1

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

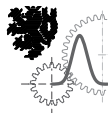
## Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Rolf Kamps,  
Adliswil

## Nr. 434

## Konzept und Realisierung eines Rohrfördersystems 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:** Schubelementeförderer – Methodenverknüpfung – Widerspruchsorientierte 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 „Schubelementeförderer“ 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 Schubkräfte<sup>1</sup> bewegt werden. Schub / Druck kommt in industriell eingesetzten Förderersystemen<sup>2</sup> 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“ (Tubo<sup>3</sup>) 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

---

<sup>1</sup> Rohrpostsysteme mit Druckluft bewegen nur einzelne Behälter.

<sup>2</sup> Schubstangenförderer fördern das Gut, indem angetriebene Schubstangen oder Schubballen 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. Schubballenförderer arbeiten nach dem gleichen Wirkprinzip.

<sup>3</sup> Der Produktname 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“ vorstellte.

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 entwicklerischen Ungehorsam erlaubte und mich ermutigte, von bereits vorgegebenen Lösungskonzepten abzuweichen und eigene Ideen zu untersuchen, dem Divisionsleiter „Grain Processing“, Herrn Bruno Mendler, 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 Prüfungsvorsitzes 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

<b>Nomenklatur</b>	<b>VIII</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Weiterentwicklung des Rohrkettenförderers mit Methoden der Konstruktionssystematik</b>	<b>17</b>
2.1 Charakterisierung des Rohrkettenförderer-Prinzips	17
2.2 Untersuchungsergebnisse mit modifiziertem Rohrkettenförderer	24
2.3 Ausgewählte Methoden der Konstruktionssystematik	26
2.4 Ideenfindung mit Methoden der Konstruktionssystematik	30
2.5 Konzeptentwicklung	35
<b>3 Konzept- und Prinzipbestätigung</b>	<b>47</b>
3.1 Konzept des Versuchsmodells Schubelementeförderer	47
3.2 Aufbau des Versuchsmodells	51
3.3 Inbetriebnahme und erste Erkenntnisse	53
3.4 Systemrelevante Komponenten des Schubelementeförderers	54
<b>4 Theoretische und praktische Untersuchungen zu den Hauptbewegungswiderständen</b>	<b>57</b>
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
<b>5</b>	<b>Gestaltung ausgewählter Komponenten des Schubelementeförderers</b>	<b>90</b>
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
<b>6</b>	<b>Prototypen im industriellen Einsatz</b>	<b>157</b>
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
<b>7</b>	<b>Zukunftsvarianten</b>	<b>172</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>180</b>
<b>9</b>	<b>Anlage</b>	<b>183</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>192</b>

# 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 → größte Schubelementkraft
$F_0^*$	N	Gesamtbewegungswiderstand beim Einlaufen in die Antriebsstation (muss negativ sein!)
$F_i$	N	Bewegungswiderstand im Wegabschnitt $i$
$F_{Bog\text{Ende}}$	N	Bewegungswiderstand am Ende eines Rohrbogens
$F_{Bog\text{Anfang}}$	N	Bewegungswiderstand am Anfang eines Rohrbogens
$F_{hFi}$	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 <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$H_i$	m	Höhe eines vertikalen Wegabschnitts
$I_V$	m <sup>3</sup> /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 Schüttgutes
$q_{SE}$	N/m	Meterlast der Schubelemente
$P_A$	kW	Antriebsleistung
$P_{spez}$	kW·h/t	Spezifischer Leistungsbedarf
$V$	m <sup>3</sup>	Rohrvolumen

$V_{SE}$	$m^3$	Volumen eines Schubelementes
$v$	$m/s$	Geschwindigkeit der Schubelemente
$v_K$	$m/s$	Geschwindigkeit der Kette
$\delta_i$	$^\circ$	Neigungswinkel gegen die Horizontale eines geneigten Wegabschnitts
$\eta_A$	-	Antriebswirkungsgrad von Motor und Getriebe
$\eta_F$	-	Füllungsgrad
$\eta_{Temp}$	-	Thermischer Antriebswirkungsgrad von Motor und Getriebe
$\eta_V$	-	Volumenwirkungsgrad
$\lambda_a$	-	Aktiver Schüttgutdruckbeiwert / Horizontallastverhältnis
$\mu_{SE}$	-	Wandreibwert eines Schubelementes gegen Rohr
$\mu_w$	-	Wandreibwert des Schüttguts gegen Rohr
$\rho_b$	$kg/m^3$	Schüttdichte
$\varphi_e$	-	(Innerer) effektiver Reibwert
$\varphi_s$	-	Stufensprung
$\varphi_P$	-	Teilungswinkel
$\psi_0$	$^\circ$	Anfangswinkel eines Rohrbogens
$\omega$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit
$z$	-	Zähnezahl

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
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	Mehrkörpersimulation
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 <sup>4</sup>
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
WOIS	Widerspruchorientierte Innovationsstrategie
2-D	Zweidimensional
3-D	Dreidimensional

---

<sup>4</sup> 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 erfinderischen 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 Fördersystem 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

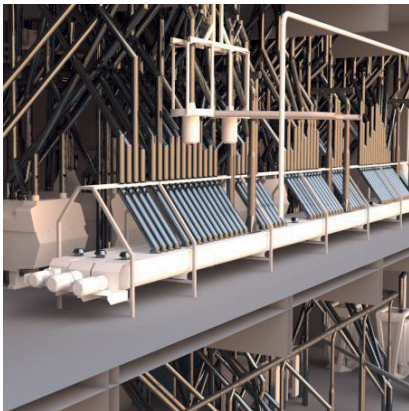
A new idea for tubed transportation of bulk material was discovered through a combination of systematic design methodologies with the TRIZ theories of inventive problem solving. In addition to describing the idea-to-product origination process, this research paper describes the scientific basis for the 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.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

In der Grundnahrungsmittelverarbeitung werden im Verarbeitungsprozess die Roh-, Zwischen- und Endprodukte in der Regel mehrfach gefördert, überhoben oder verschoben. Die zurzeit eingesetzten Förderverfahren entsprechen nicht mehr den gestiegenen Anforderungen an Raumbedarf, Energieeffizienz, Hygiene und Flexibilität. Abbildung 1-1 zeigt eine typische Situation für Fördertechnik in einer Getreidemühle. Man erkennt im Beispiel, daß die Platzverhältnisse für die Aufstellung der Förderanlagen sehr begrenzt sind.

Da Marktwachstum in erster Linie in den Schwellenländern erwartet wird, sind die Herstellkosten eines Fördersystems sehr wichtig. Für marktführende Hersteller bedeutet das, daß nur preiswerte Systeme oder Systeme mit zusätzlichen, herausragenden Eigenschaften angeboten werden sollten, da eine Vielzahl von lokalen, nationalen und internationalen Anbietern in der Fördertechnik Marktanteile übernehmen



möchte.

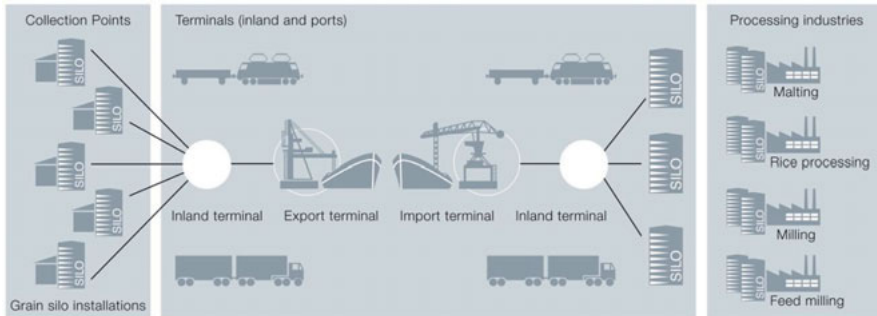
Die vorliegende Arbeit beschreibt die Ideenfindung, Konzipierung / Prinzipbestimmung, wissenschaftliche Untersuchung, Dimensionierung und Gestaltung eines neuartigen Fördersystems unter besonderer Beachtung der Anforderungen an Raumbedarf, Hygiene, Herstellkosten und Energieeinsatz für eine relativ kleine Gutpalette, vor allem für körnige und gut fließende Schüttgüter bei kleinen bis mittleren Massenströmen von 5 t/h bis ca. 150 t/h.

**Abbildung 1-1: Typische Anordnung der vielfältigen Fördertechniken in einer Getreidemühle [Bühler AG]**

Insbesondere aufgrund der engen Platzverhältnisse in Mühlen soll Ziel dieses Entwicklungsprozesses ein Fördersystem nach dem Prinzip „Schüttgut im Rohr“ sein. Selbstverständlich gilt, daß neben den o.g. Anforderungen auch alle weiteren klassischen Einschränkungen und Bedingungen an Schüttgutfördersysteme erfüllt werden müssen.

## 1.2 Fördertechnik in der Grundnahrungsmittelverarbeitung

Im Bereich der Grundnahrungsmittelverarbeitung wird der Produktfluss und die dazu notwendige Fördertechnik entlang der Prozessschritte betrachtet. Fördertechnik wird aber nicht nur in den Verarbeitungsbetrieben benötigt, sondern bereits ab der Ernte müssen die Grundnahrungsmittel transportiert werden. Für Getreide (Grain) können die Transportwege wie in der Übersicht dargestellt (Abbildung 1-2) aussehen.



**Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des Getreide Managements von der Ernte bis zur Verarbeitungsindustrie [Bühler AG]**

Zunächst soll der Weg vom Feld zum Verarbeitungsbetrieb betrachtet werden. Die Verarbeitungsbetriebe sind lokal, national oder international aufgestellt. Viele Grundnahrungsmittel werden deshalb exportiert bzw. importiert und werden bis zum eigentlich Verarbeitungsbetrieb mehrere Male verladen, transportiert und zwischengelagert. In der Regel wird nach der Ernte das Getreide oder der Reis von den Produzenten in Sammelstellen (Collection - Points<sup>5</sup>, Abbildung 1-3) angeliefert. Hier findet eine erste Grobreinigung statt, es wird oft auch schon getrocknet und zwischengelagert, um ein Verderben der Nahrungsmittel zu verhindern. Große Mengen Schüttgut müssen innerhalb kurzer Zeit angenommen werden. Die Fördertechnik muss im 3-Schichtbetrieb die Güter schnell von der Annahmestelle zu den entsprechenden Vorverarbeitungsstellen oder Zwischenlagerstellen transportieren.

<sup>5</sup> Collection- Points sind Sammelstellen, an denen die Erzeuger ihre Grundnahrungsmittel anliefern. Das Erntegut ist meistens nur durch die Erntemaschine vorgereinigt und ist noch nicht getrocknet.





**Abbildung 1-3: Collection Point, Anlieferung der Feldernte an die Sammelstellen [Bühler AG]**

Die Zwischenlagerung erfolgt meistens in großen Siloanlagen mit mehreren tausend Tonnen Lagerkapazität. Die Siloanlagen sind bis zu 100 m hoch und bestehen aus einer Anzahl einzelner Silos. Von dort wird das Schüttgut entweder in die lokalen Verarbeitungsbetriebe oder für den Export zum Hafen und zu den Inlandterminals geschickt. Der Transport findet per LKW, Bahn oder Inlandsschiffen statt. Auch hier muss die Be- und Entladung innerhalb kurzer Zeit stattfinden.

In den Hafenanlagen werden größte Mengen bis zu 2.000 t/h umgeschlagen, d.h. be- und entladen. Aufgrund kurzer Liegezeiten der Schiffe arbeiten diese Anlagen im 3-Schichtbetrieb sieben Tage die Woche und müssen größte Zuverlässigkeit und hohen Verschleißschutz bei kleinstem Wartungsaufwand garantieren (Abbildung 1-4).



**Abbildung 1-4: Hafenanlage mit Schiffsentlader und Siloeinrichtungen zur Lagerung großer Mengen Getreide [Bühler AG]**

Erreichen die Nahrungsmittel die Verarbeitungsstätten, müssen die Transportfahrzeuge schnell entladen werden.

Die sich anschließende Fördertechnik und Fördertechnikkapazität richtet sich dann allerdings nach der Leistung der Maschinen im weiteren Verlauf des Verarbeitungsprozesses. Große Mühlen haben eine Tagesleistung von bis zu 2.000 t/Tag, allerdings ist die Leistung der einzelnen Verarbeitungsmaschinen in der Regel nicht höher als bis zu ca. 150 t/h, wobei der größere Anteil der Fördertechnik, der in Mühlen benötigt wird, eine Förderkapazität von 20 t/h bis 50 t/h besitzt. Somit wird im gesamten Verarbeitungsprozess die Fördertechnik nach Leistung und Verarbeitungsprozessstufen unterschieden. Im Bereich der Schiffsentlader werden Saugentlader und Trogkettenförderer sowie Elevatoren eingesetzt. Hier werden die höchsten Förderleistungen benötigt; die Förderleistungen beginnen bei 1.000 t/h und können 4.000 t/h erreichen.

Etwas geringer sind die Anforderungen an die Leistungen der Fördergeräte in den Collection Points, hier beginnen in der Regel die Leistungen ab 200 t/h und reichen bis 1.000 t/h.

In der verarbeitenden Industrie umfasst das Leistungsspektrum der Fördergeräte einen Bereich von 5 t/h bis ca. 150 t/h. In diesem Leistungssegment soll das neu zu entwickelnde Fördersystem eingesetzt werden.

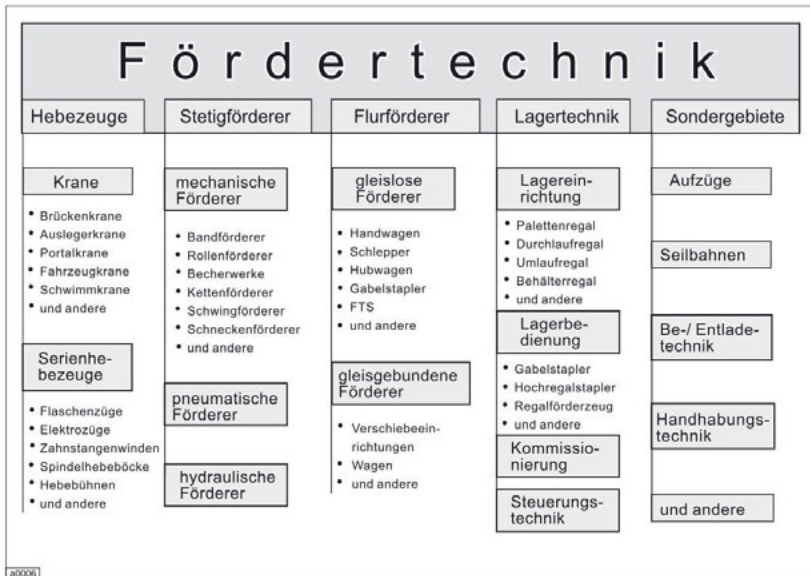
Typische Getreidemühlen (Abbildung 1-5) verarbeiten ca. 30 bis 50 t/h Getreide im 3-Schichtbetrieb und kommen so auf eine Tagesleistung von 700 bis 1.200 t/Tag. Die in Abbildung 1-5 gezeigte Getreidemühle ist eine Standardgröße mit 50t/h Kapazität über mehrere Stockwerke mit einer Gesamthöhe von ca. 50 m. Die Gebäude sind ebenso wie die Siloanlagen über Fördersysteme verbunden.



Abbildung 1-5: Getreidemühle in den Niederlanden mit Silozellen [Bühler AG]

### 1.3 Stetigförderer in der Müllerei

In Mühlenbetrieben werden je nach Förderaufgabe und Prozessschritt unterschiedliche Fördergeräte eingesetzt. Es ist nicht immer einfach, für das zu fördernde Produkt das geeignete Fördermittel auszuwählen, da die Verschiedenartigkeit der zu fördernden Produkte bezüglich Schüttgewicht, Granulation, Fließverhalten, Empfindlichkeit gegen Bruch, Hygiene und weiteren Eigenschaften durch das Fördergerät berücksichtigt werden muss. Feststoffförderer werden in Stetigförderer und Unstetigförderer unterschieden [Schw-2013]. Die DIN 15201-1 klassifiziert und benennt die Fördergeräte. Die in Mühlen eingesetzten Förderer gehören zur Gruppe der Stetigförderer (Abbildung 1-6).



**Abbildung 1-6: Klassifizierung von Fördergeräten [Gün-2010]**

Fast alle der in der DIN 15201-1 genannten mechanischen und pneumatischen Fördersysteme aus der Gruppe der Stetigförderer werden in Mühlenbetrieben eingesetzt.

Mühlen werden über mehrere Stockwerke geplant und aufgebaut. Der Walzenstuhlboden ist die Etage, auf dem die Walzenstühle stehen und der Zerkleinerungsprozess stattfindet. Das Mahlgut wird von höher liegenden Etagen den Walzenstühlen zugeführt, nach Durchlauf und Zerkleinerung fällt das Mahlgut in tiefer liegende Etagen, um dann wieder in höher liegende Etagen transportiert zu werden. Die Collage in Abbildung 1-7 stellt einen klassischen Mühlenaufbau über mehrere Etagen dar.

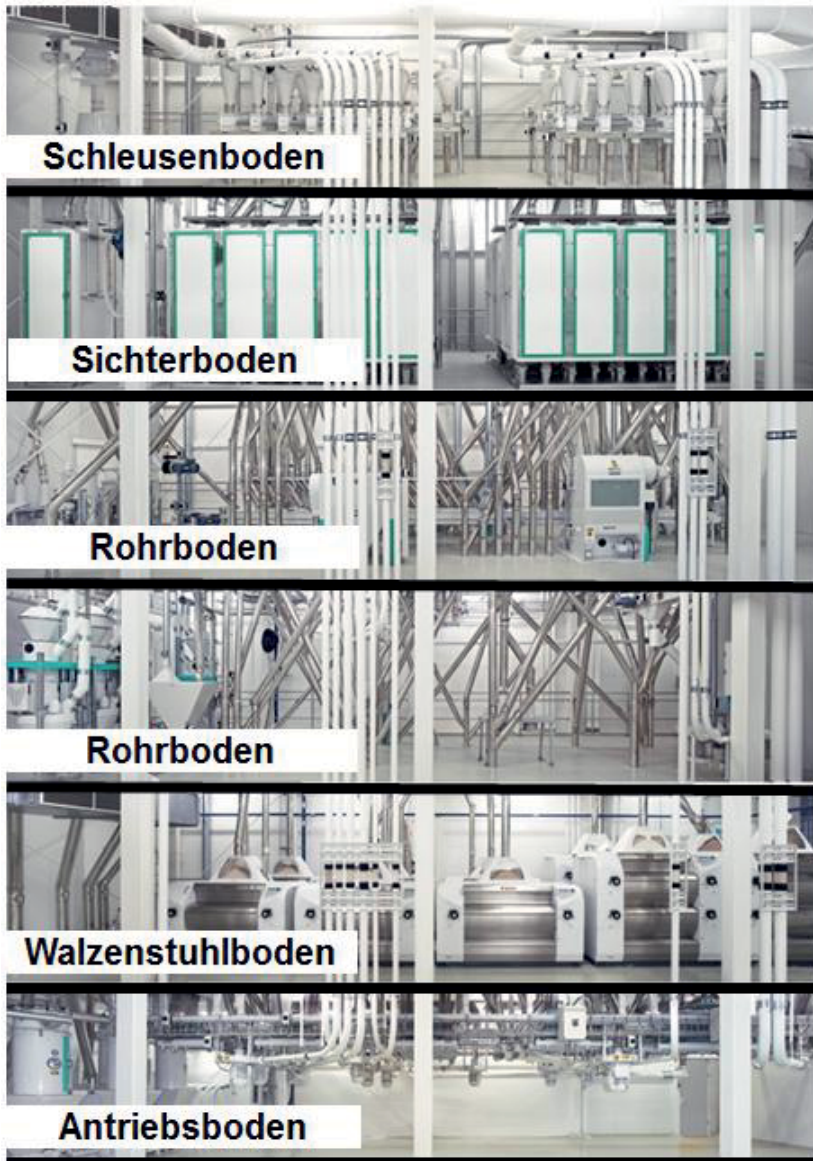


Abbildung 1-7: Aufbau und Darstellung einer modernen Industriegroßmühle [Bühler AG]

Durchschnittlich sind in einer Mehlmüllerei ca. 45 Fördereinrichtungen im Einsatz, die gesamte Förderstrecke beträgt in Summe mehrere hundert Meter, die maximale Förderhöhe beträgt in den meisten Fällen bis ca. 50 m. Überwiegend werden in Mühlen

mechanische und pneumatische Fördersysteme eingesetzt. Zu nennen sind folgende Systeme:

**Trog- und Rohrschneckenförderer** (Abbildung 1-8) mit Vollgewindeschnecken sind einfache und robuste Förderer, die fast alle mehlig und grobstückigen Produkte fördern. Klebrige Produkte können nicht gefördert werden. Während des Transports entsteht besonders bei Produkten mit unterschiedlichen Granulationen und Dichten die Gefahr der Entmischung. Insgesamt ist das Fördersystem sehr reibungsbehaftet und die Förderleistung sinkt bei Schrägstellung. Da zwischen Förderschnecke und Schneckenrohr ein Spalt besteht, verbleibt eine Restmenge Schüttgut im System und kann zum Brutplatz für Schädlinge werden. Empfindliche Schüttgüter können während des Transports brechen, im Spalt zwischen Schnecke und Trog wird das Gut gemahlen. Die Fördergeschwindigkeit beträgt bis ca. 0,4 m/s, bei Steil- und Senkrechtförderern kann die Geschwindigkeit bis 2,5 m/s betragen [VDI-3971].



**Abbildung 1-8: Rohrschneckenfördersysteme [Bühler AG]**

**Trogkettenförderer** (Abbildung 1-9) fördern vergleichsweise große Volumenströme mit relativ kleinem Energiebedarf. Diese Förderer laufen mit Geschwindigkeiten bis zu 1,2 m/s, Senkrechtförderer sogar bis 3 m/s. Für den schonenden Transport empfindlicher Schüttgüter sind sie eher nicht geeignet. Mit steigender Fördergeschwindigkeit nimmt sowohl der Kettenverschleiß als auch die Geräuschentwicklung zu. Das Gut wird in Abhängigkeit von der Mitnehmer-Geometrie kraft- und formschlüssig transportiert. Unterschiedliche Ausführungsformen der Förderketten ermöglichen ei-



nen horizontalen, einen ansteigenden und einen vertikalen Transport. Bei Kettenantrieben entsteht aufgrund der Teilung des Kettenrades ein sogenannter Polygoneffekt (siehe Abschnitt 2.1). Dieser Polygoneffekt führt zu Schwingungen im Antriebsstrang. Aufgrund der relativ hohen Fördergeschwindigkeit sind die Staubentwicklung an der Produktaufgabe- und Produktabgabestelle sowie der Explosionsschutz besonders zu beachten.



**Abbildung 1-9: Geneigte und horizontale Trogkettenfördersysteme [Bühler AG]**

**Gurtbecherwerke** (Elevatoren) (Abbildung 1-10) sind Senkrechtförderer und fördern Schüttgüter mit kleinem Energieeintrag über große Höhen. Die Zugträger können Gurte oder Ketten sein. Die Fördersysteme laufen mit Geschwindigkeiten bis ca. 1 m/s als Langsamläufer, mit 2 m/s als Schnellläufer und in Sonderfällen bis zu 6 m/s (vergl. VDI Richtlinie 3971); eine Mindestgeschwindigkeit wird immer benötigt, um das Fördergut gezielt auswerfen zu können. Im Bereich des Elevatorfußes, wo das Gut aufgenommen wird, und im Bereich des Auswurfes können empfindliche Güter beschädigt werden. Restmengen des Schüttgutes im Elevatorfuß sind Brutstätten für Schädlinge und Schimmelstellen. Da das Produkt in den Elevatorfuß hineinfallen und dann über die eigentliche Förderhöhe hinaus gehoben werden muss, um das Schüttgut aus den Bechern auswerfen zu können, benötigen diese Systeme zusätzlichen Bauraum in der Höhe. Für besonders sensitive Produkte eignet sich der Elevator eher nicht.



**Abbildung 1-10: Elevatoren mit Antriebseinheit im Elevatorkopf [Bühler AG]**

**Gurtbandförderer** (Abbildung 1-11) fördern sehr schonend große Mengen über weite Entfernungen. Die Fördersysteme laufen leise mit geringem Energieverbrauch. Bandförderer können nicht nur für den vertikalen Transport eingesetzt werden sondern auch Steigungen bis zu  $20^\circ$  bewältigen. Fördergeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s lassen sich mit Gurtbandförderern erreichen. Die Abwurfvorrichtungen und insbesondere Zwischenabwurfstellen sind aufwendig. Ebenfalls ist die Staubentwicklung aufgrund der großen Geschwindigkeiten zu beachten. Die Systeme sind aus Gründen der Staubexplosion und auch aus Gründen der Hygiene beim Transport von Nahrungsmitteln einzuhausen.



**Abbildung 1-11: Offene Gurtbandanlagen im Hafen zur Schiffsentladung [Bühler AG]**



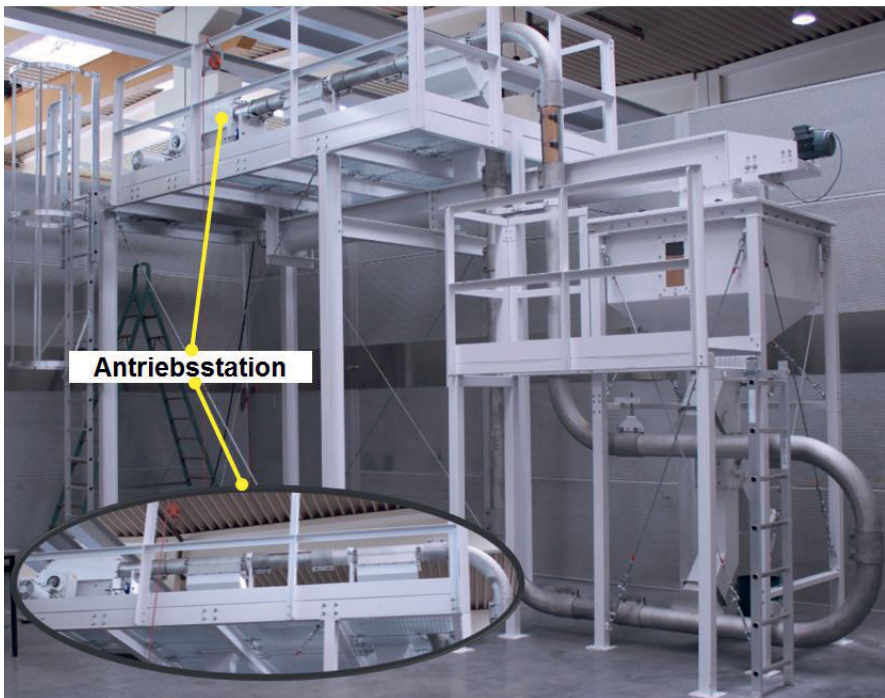
**Pneumatische Fördersysteme** mit Saug- und Druckpneumatik (Abbildung 1-12) werden aufgrund ihrer flexiblen Rohrführung in großer Zahl in Mühlen eingesetzt. Die Saugpneumatik wird meist zum Transport von Zwischenprodukten in der Mühle genutzt. Hier macht man sich den Vorteil zunutze, daß das System Staub und Wärme aus den Prozessanlagen heraustransportieren kann. Die Druckpneumatik wird häufig zur Getreidereinigung oder zum Transport in Mehlsilos oder Mischanlagen verwendet. Grundsätzlich muss bei der Produktaufgabe und Produktabgabe eine Produktschleuse vorgesehen werden, um die Unterdruck - oder Überdruckstrecke von den unter Umgebungsdruck stehenden Anlagen zu trennen. Die Anlagen benötigen hohe Energieleistungen, die Gebläse sind laut und die Abluft muss entstaubt werden. Da die Fördergeschwindigkeiten bis zu 40 m/s betragen, je nach Dünnstromförderung oder Dichtstromförderung [VDI-2329], ist dieses Fördersystem für empfindliche Schüttgüter weniger geeignet. Allerdings zählen die Saug- und Druckluftfördersysteme aus Sicht der Hygiene zur Zeit zu den besten Fördergeräten in der Grundnahrungsmittelverarbeitung.



**Abbildung 1-12: Druckpneumatikförderstrecken mit Zellradschleusen zum Einschleusen des Fördergutes [Bühler AG]**

**Stauscheibenförderer (Rohrkettentransportsysteme)** werden dort eingesetzt, wo Fördersysteme mit kleinsten Bauraumabmessungen das Produkt fördern sollen. Bei Rohrkettentransportern mit Rundgliederketten als Zugträger oder Seilen können 3-D Linienführungen realisiert werden. In der VDI Richtlinie 3971 [VDI-3971] wird das Arbeitsprinzip wie folgt beschrieben: „Durch ein Rohr mit horizontalen, schrägen oder senkrechten Förderstrecken werden Scheiben gezogen, die durch ein zentrales Zugmittel miteinander verbunden sind und das Schüttgut vor sich herschieben. Der Antrieb erfolgt formschlüssig über ein in das Zugmittel eingreifendes Rad.“

Fördersysteme ohne Spannstation ermöglichen in der Regel nur einfache Linienführungen, schwierigere Linienführungen benötigen Spann- und/oder Umlenkstationen (Abbildung 1-13). Die verwendeten Laschenketten oder Rundgliederketten mit großen Kettenteilungen führen zum Polygoneffekt (siehe Abschnitt 2.1). Die maximal erreichbaren Fördergeschwindigkeiten betragen bis ca. 0,4 m/s. Eine weitere Ausführungsvariante sind die aeromechanischen Tellerfördersysteme. Anstelle der Kette werden hier Seile (meist Stahlseile) eingesetzt, an denen in bestimmten Abständen Mitnehmer angebracht sind. Die Systeme laufen mit hoher Fördergeschwindigkeit bis zu 10 m/s und bringen ausreichend Luft ins Fördergut, um es zu fluidisieren. Die Charakterisierung der Rohrkettenförderer erfolgt noch detaillierter in Kapitel 2.1.



**Abbildung 1-13: Rohrkettenförderer mit obenliegender Antriebstation**

Allen genannten Fördersystemen mit Ausnahme der Saug- und Druckpneumatik gemein ist, daß sich in den Umlenkstationen, im Rohr oder Trog, in den Aufgabee- und Abgabestationen sowie in den Spannstationen Toträume bilden, wo Produktreste liegen bleiben können. Aufgrund der Förderart, d.h. der Art und Weise, wie das Produkt aufgenommen und wieder abgegeben wird, kann das Schüttgut mehr oder we-

niger stark beschädigt werden. Bei den pneumatischen Fördersystemen werden häufig in den Rohrbögen sogenannte Totschläger<sup>6</sup> eingesetzt. Dann entstehen auch hier Toträume, in denen Restmaterial liegen bleibt.

### 1.4 Besondere Anforderungen an das neue Fördersystem

Die Anforderungen an Hygiene (Sanitation) sowie Lebensmittelsicherheit (Food Safety) verlangen, daß im gesamten Verarbeitungsprozess möglichst keine zusätzlichen Verunreinigungen in das Produkt eingebracht werden. Auch soll vermieden werden, daß sich Schüttgut in der Anlage anlagert und durch Bakterien oder Schimmelpilze verdirbt (z.B. Abbildung 1-14). Im Rahmen der Sicherheit werden mehr und mehr vollkommen geschlossene Fördersysteme verlangt, um ein unbeabsichtigtes und unkontrolliertes Beimischen von Fremdstoffen in den Förderkreislauf zu verhindern. Alle Werkstoffe im Produktbereich und im direkten Kontakt mit dem Schüttgut müssen eine Lebensmittelzulassung nach europäischen Recht und der amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) haben.



**Abbildung 1-14: Schüttgutablagerungen in Trogkettenförderern an den Mitnehmern und im Einlaufbereich einer Trogschnecke**

Das zu schaffende Fördersystem soll für Fördermengen von 5 bis 120 t/h einsetzbar sein und auch den vertikalen Transport zwischen 5 und 50 m Förderhöhe ermöglichen. Das Fördersystem soll sammeln können, das heißt, innerhalb der Förderstrecke muss das Schüttgut an unterschiedlichen Aufgabestellen zuführbar sein. Weiter-

<sup>6</sup> Totschläger werden 90° Winkel mit einem Depot für Schüttgut genannt. Das ankommende Material wird über das im Depot liegende Material abgebremst, bevor es eine Richtungsänderung erfährt. Hierdurch soll der Verschleiß in den Rohren, insbesondere in den Rohrbögen reduziert werden, da bei hohen Geschwindigkeiten das Schüttgut sehr abrasiv wirken und damit zu hohem Abrasivverschleiß führen kann.

hin soll das System auch verteilen können, das heißt, daß das Fördergut an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Förderstrecke ausfließen kann.

Die Schüttgüter werden, entsprechend der üblichen Firmenterminologie, in die Gruppen körnige Schüttgüter, mehliges Schüttgüter und Reis klassifiziert. Hieraus leiten sich unterschiedliche Anforderungen an das System ab. Bei den trockenen körnigen und mehliges Schüttgütern ist oft ein hoher Staubanteil im Produkt. Im Transportprozess darf das nicht zu explosionsauslösenden Situationen führen. Bei Reis ist ein schonender Transport notwendig. Transportiert wird der ungeschälte Reis vom Feld als sogenannter Paddyreis, der, mit viel Sand versehen und damit sehr abrasiv, von der Produktannahme zum Reinigen und Trocknen transportiert werden muss. Im späteren Verarbeitungsprozess wird der Paddyreis vom Silo zu den weiteren Verarbeitungsmaschinen gefördert. Im gesamten Reisverarbeitungsprozess wird von der Fördertechnik verlangt, daß kein Reisbruch entsteht. Die Fördergeschwindigkeiten sind daher im Vergleich zu nicht so empfindlichen Fördergut sehr gering und liegen bei Elevatoren z.B. nur bei ca. 0,3 m/s. Die Anforderungen an die Hygiene sind eher gering; der sogenannte Brownreis (nach dem Schälen) hat noch seine fetthaltige und klebrige Branschicht<sup>7</sup> und darf für das Fördersystem bezüglich Anhaftungen von Schüttgut zu keinen Problemen führen.

Getreide wie Weizen, Gerste oder Hafer müssen über große Distanzen in hohen Volumenströmen gefördert werden. Die Anforderungen an die Hygiene und an den Bruchanteil sind gering, somit sind hier auch hohe Fördergeschwindigkeiten zulässig. Bei den Zwischenprodukten in der Mühle wie Flocken, Griesen und mehliges Produkten gelten höchste Hygieneanforderungen. Da das Korn vor dem Mahlprozess in der Regel aufgefuechtet und im Mahlprozess Wärme in das Produkt eingebracht wird, haften die Produkte schnell an kühlen Bauteilen und sammeln sich in Hohlräumen aller Art im Fördersystem.

## 1.5 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und wissenschaftliche Analyse eines Fördersystems für den Transport von Schüttgütern im Mühlenprozess dargestellt. Das Fördersystem soll neben den Produkten im Mühlenbereich darüber hinaus auch für empfindliche Güter wie Reis, Kaffee, Gewürze und Hülsenfrüchte eingesetzt wer-

---

<sup>7</sup> Branschichten sind ölhaltige Schichten, die den weißen Reiskern umgeben. Die Branschichten sind braun und haften auf Grund ihres Ölgehaltes sehr leicht an Transportflächen.

den können. Das System soll mindesten eine 2-D Linienführung ermöglichen und einen Förderleistungsbereich von 5 t/h Reis bis 120 t/h Weizen abdecken. Der Hygieneaspekt soll deutlich besser berücksichtigt sein als bei Elevatoren oder Trogkettenförderern. Toträume und Produktsammelstellen im Förderstrang sind zu vermeiden.

Eine Vielzahl von Wettbewerbspartnern führt dazu, daß keine Verkaufspreise über den landesüblichen Marktpreisen erlaubt sind. Somit muss das Fördersystem zu Landesmarktpreisen herstellbar und lieferbar sein. Als Zielmärkte sind hier neben Europa, Amerika, Lateinamerika, vor allem China und Indien zu sehen. Hier gibt es eine Vielzahl kleiner lokaler Wettbewerber in der Fördertechnik.

Der Marktpreis muss in den unterschiedlichen Regionen ermittelt werden. Als Benchmark wurde der indische Markt betrachtet und nach dem Prinzip des Target Costing<sup>8</sup> [Ehr-2000] die zulässigen Herstellkosten festgelegt. Diese Vorgehensweise (Abbildung 1-15) ermöglicht schon früh im Entwicklungsprozess eine Abschätzung darüber, ob die Zielvorgaben erreichbar sind.



**Abbildung 1-15: Festlegung der zulässigen Herstellkosten nach dem Target Costing Prinzip [Erl-2000]**

Aufgrund der engen Platzverhältnisse in Mühlen soll Ziel der Entwicklung sein, ein Fördersystem nach dem Prinzip „Schüttgut im Rohr“ zu entwickeln. Eines der zentralen Fundamente der Entwicklungslehre von Altschuller [Alt-1998] (vergl. auch [Kle-2002]) ist der Begriff der idealen Maschine oder des idealen Prozesses. Das Förder-

<sup>8</sup> Beim Target Costing liegt der Marktpreis fest und die Herstellkosten werden anhand einer rückwärtigen Kalkulation festgelegt. Die Herstellkosten des gesamten Fördersystems werden dabei bis auf Baugruppen oder Komponenten heruntergerechnet.

system, wenn es innovativ ist, muss der idealen Maschine oder dem idealen Prozess nach Altschuller näher kommen als bestehende Lösungen.

In [Alt-1998] definiert Altschuller einige Idealsituationen:

*“-Ideale Maschine: Es ist keine Maschine vorhanden, die geforderte Wirkung wird aber erreicht*

*-Ideales Verfahren: Es gibt keinen Zeit- und Energieverbrauch, aber die geforderte Wirkung*

*-Idealer Stoff: Es ist kein Stoff vorhanden, seine Funktion wird aber erfüllt“*

Weiter heißt es :

*„Die Entwicklung aller Systeme verläuft in Richtung einer Erhöhung des Grades der Idealität“.*

Demnach besteht die Entwicklungsaufgabe darin, ein System zu erzeugen, daß mit weniger Energie und weniger Materialeinsatz auskommt und, bei Reduzierung der Abmessungen, mindestens die gleiche Leistung erbringt wie die heutigen, bekannten Systeme.

Ein System, einfach im Aufbau, das die guten hygienischen Eigenschaften eines pneumatischen Systems mit den guten Eigenschaften eines sicheren und schonenden Transportes von mechanischen Fördersystemen kombinieren würde, käme dem Ziel einer idealen Maschine einen Schritt näher.

## 2 Weiterentwicklung des Rohrkettenförderers mit Methoden der Konstruktionssystematik

### 2.1 Charakterisierung des Rohrkettenförderer-Prinzips

Bereits 1908 erwähnte Hanffstengel in [Hanf-1908] das Stauscheibenförderprinzip als Möglichkeit zur Förderung von Schüttgütern (Abbildung 2-1). In seinem Lehrbuch wird der Förderer in die Klasse der Schlepper eingeordnet. Das Zugmittel greift im Schwerpunkt des Förderelementes an. Katterfeld beschreibt [Kat-2005] die Entwicklung der Rohrkettenförderer bis zum heutigen Stand.

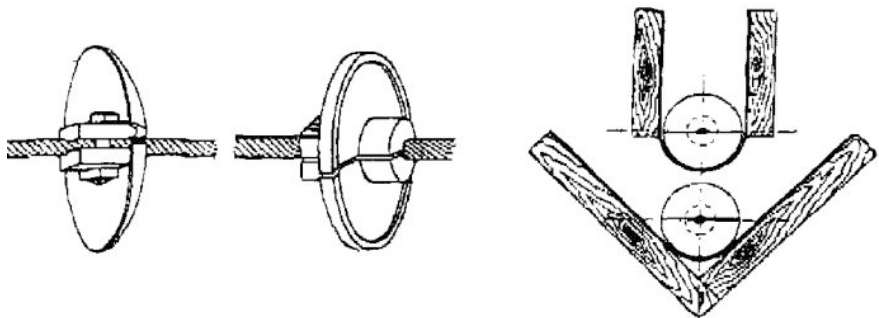
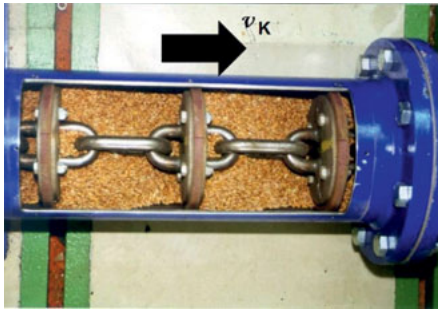


Abbildung 2-1: Erste Darstellung von Stauscheibenförderern in der Literatur [Hanf-1908]

Stauscheibenförderer, auch Rohrkettenförderer genannt, gehören nach DIN 15201 Teil 1 zu den Stetigförderern. In DIN 15201 Teil 1 (April 1994) „Stetigförderer, Benennungen“ [DIN-15201-1] wird folgendes physikalische Wirkprinzip für Stauscheibenförderer unter Punkt 3.3 definiert:

*„Kettenförderer mit Scheiben als Mitnehmer, die das Fördergut in einem Rohr oder einer gemuldeten Rinne vorwärts schieben (in schwach oder leicht geneigten Wegabschnitten), bzw. auf- und abwärts tragen (bei Steil- und Senkrechtförderung).“*



Das Funktionsprinzip der heute eingesetzten Rohrkettenförderer erkennt man in der Abbildung 2-2. Das umlaufende Zugmittel ist hier eine Rundstahlgliederkette, andere eingesetzte Ausführungen nutzen Laschenketten oder Seile.

**Abbildung 2-2: Förderung von Weizen im Rohrkettenförderer mit Stauscheiben [Kat-2005]**

Bei dem dargestellten Rohrkettenförderer bewegt sich die Rundstahlgliederkette mit befestigten Stauscheiben axial mittig in einem Rohr. Die Kette wird als endloses, umlaufendes Zugmittel eingesetzt. Das Rohr ist das Tragmittel für alle wesentlichen Komponenten und der Förderkanal für das zu fördernde Schüttgut. Über einen oder mehrere Einläufe (auch Intake genannt) kann das Schüttgut in das Rohr gefüllt werden. Die Mitnahme erfolgt dann über die Stauscheiben in Bewegungsrichtung der Kette (in der Abbildung 2-2 mit einem Pfeil und  $v_K$  gekennzeichnet). Eine dreidimensionale Linienführung lässt sich bei einem Rohrkettenförderer nur mit Rundstahlgliederketten realisieren. Oft werden noch zusätzlich Ketten- bzw. Felgenreifen verwendet (siehe hierzu auch Abbildung 2-6).

In Aufbau und Funktion weist der Rohrkettenförderer große Ähnlichkeiten mit Trogketten- oder Kratzerförderern auf. Jedoch bestehen gegenüber dem Förderprinzip von Trogketten- und Kratzerförderern nach Krause [Krau-1997] entscheidende Unterschiede:

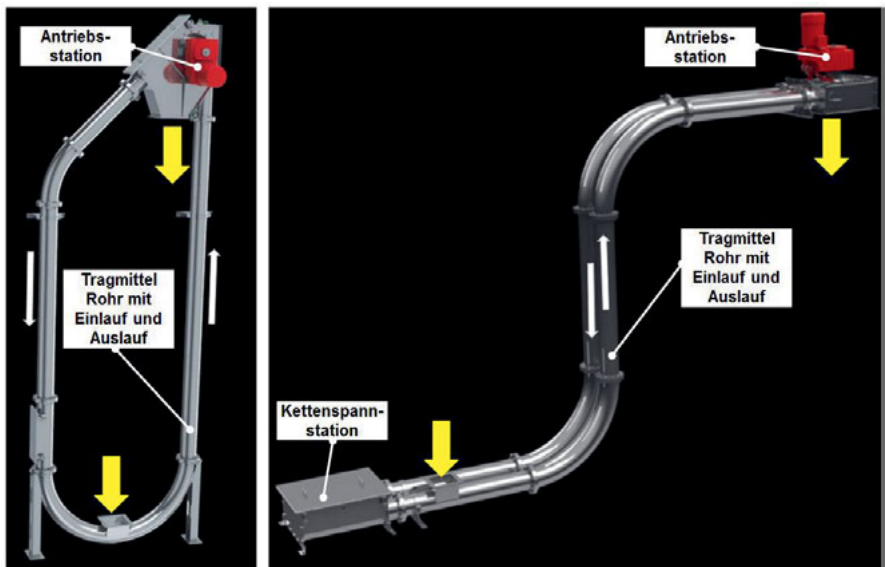
- Die Gutmitnahme erfolgt fast über den gesamten Rohrquerschnitt durch die Stauscheiben.
- Es wird nur eine Rundgliederkette oder Laschenkette eingesetzt. Die Stauscheiben sind mittig angebracht, so daß die Kette keinen Kontakt zur Rohrwandung aufweist.
- Das Zugmittel stützt sich über die Stauscheiben auf dem Tragmittel ab.
- Das Tragmittel ist ein geschlossenes Rohr.
- Rohrbögen und Umlenkstationen ermöglichen Umlenkungen mit kleinen und größeren Umlenkradien.
- Die Kettenglieder werden aufgrund der Umlenkung in den Rohrbögen oder Umlenkrädern höher belastet.
- Bei dreidimensionaler Linienführung werden die Anforderungen an die Zugmittel und Mitnehmer höher.



Im Allgemeinen sind die Rohrkettenförderer aus folgenden Komponenten aufgebaut:

- dem Rohr als Tragmittel (mit Ein- und ggf. Auslauf),
- der Kette mit den daran befestigten Stau- bzw. Mitnehmerscheiben als Zugmittel,
- der Antriebsstation,
- der Spannstation, wenn sich die Kette nicht selbst spannt,
- und weiteren Komponenten wie Umlenkstationen, Klappen, Aspirationen, Bürsten etc..

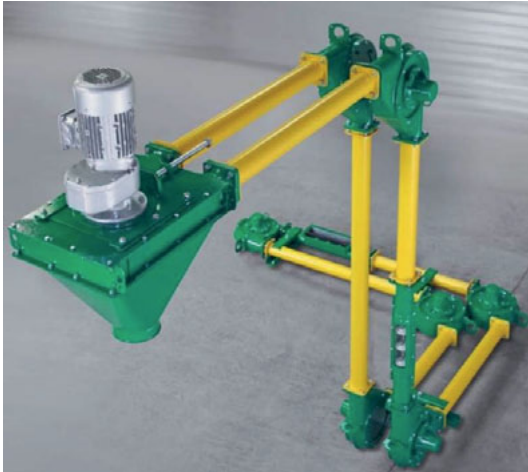
Die Grundkomponenten Rohr, Kette mit Zugmittel, Antriebsstation, Produkteinlauf und Produktauslauf benötigt jeder Rohrkettenförderer. Abbildung 2-3 zeigt diese Variante. Wird die Kette aufgrund der Streckenführung und der Schwerkraft der Kette nicht selbsttätig gespannt, muss zusätzlich eine Spannstation eingesetzt werden. In Abbildung 2-3 (rechte Abbildung) ist ein Rohrkettenförderer mit Spannstation abgebildet.



**Abbildung 2-3** linkes Bild: Prinzipieller Aufbau eines vertikalen Rohrkettenförderers ohne Kettenspannstation [Schrage Rohrkettenysteme GmbH]

rechtes Bild : Prinzipieller Aufbau eines Rohrkettenförderers mit horizontalen und vertikalen Wegabschnitten mit Kettenspannstation [Schrage Rohrkettenysteme GmbH]

Einer der großen Vorteile des Rohrkettenförderers ist bei Verwendung von Rundstahlgliederketten oder Seilen als Zugtrum die flexible, dreidimensionale Linienführung.

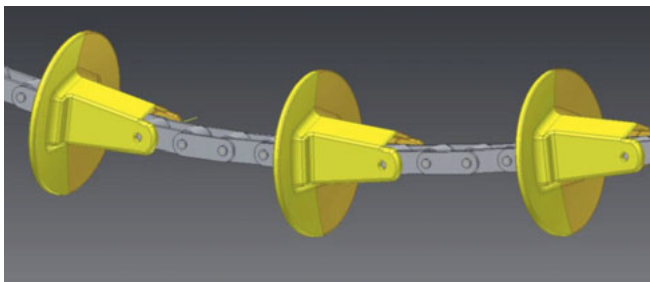


Der Einsatz von Rohrbögen oder auch Umlenkstationen (mit Umlenkfelge oder Umlenkkettenrad, siehe auch Abb. 2-6) ermöglichen eine relativ flexible Streckenführung. Abbildung 2-4 zeigt einen typischen Aufbau mit Umlenkrollen (auch Felgenräder genannt) in den Rohrbögen.

**Abbildung 2-4: Rohrkettenförderer mit Umlenkrollen und Spannstation [Horstkötter GmbH & Co.KG]**

In Voruntersuchungen wurde ermittelt, inwieweit sich eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit, eine Geräuschreduzierung, eine Linienführung ohne Umlenkstationen, eine Verbesserung der hygienischen Eigenschaften und eine Senkung der Herstellkosten in Rohrkettenfördersystemen erreichen lassen.

Eine wesentliche Eigenschaft zur Leistungssteigerung ist die Stabilität, mit der die Stauscheiben im Rohrbogen geführt werden und die hierdurch erreichbare maximale Fördergeschwindigkeit. Die Reduzierung des Polygoneffektes (siehe unten) ist ebenfalls notwendig, um Geschwindigkeitsschwankungen im Antriebsstrang möglichst klein zu halten. Aus diesem Grund sind in Abbildung 2-5 die Stauscheiben nicht wie herkömmlich mittig auf dem Zugtrum befestigt, sondern in Zugrichtung vorverlegt, um den Krafteinleitungspunkt nach vorn zu verlagern.



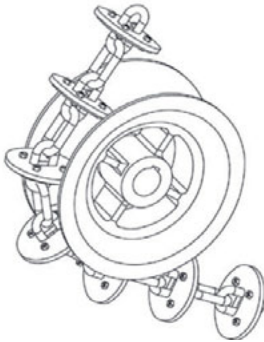
So kann die Stauscheibe um einen bestimmten Winkel um ihren Anlenkpunkt schwingen, um im Rohrbogen eine möglichst zent-

**Abbildung 2-5: Stauscheiben mit vorverlegten Krafteinleitungspunkt**

rische Axiallage der Kette zu erreichen. Die Teilung der Kette (Modul) wurde in den Voruntersuchungen so klein wie möglich gewählt, damit möglichst große Fördergeschwindigkeiten realisiert werden können ( $v_{\max} = 1,2 \text{ m/s}$ ).

Aus Markterfahrungen ist bekannt, daß bei zu kleinen Rohrbögen oder Felgenreädern wie in Abbildung 2-6 die radiale Last auf die Stauscheiben in den Umlenkungsbögen oder auf den Felgenreädern so groß werden kann, daß die Stauscheiben brechen.

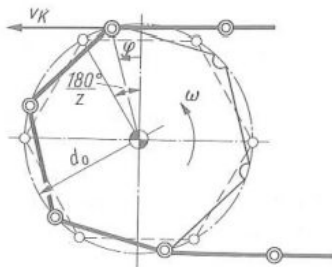
Aus diesem Grund wurde bei den Untersuchungen die Teilung der Stauscheiben zu den Rohrbogenradien so gewählt, daß sich mindestens 4 Stauscheiben in einer  $90^\circ$  Umlenkung im Umlenkungsabschnitt befinden.



Mit der Gestaltung des Antriebsrades wird der Polygoneffekt (vielseitige Auflage der Kette auf dem Kettenrad) festgelegt.

**Abbildung 2-6: Stauscheiben auf kleinem Felgenread [Kat-2005]**

Entsprechend der Kettenteilung umschließt die Kette das Kettenrad als Vieleck. Hierdurch entsteht in dem Kettentrieb ein periodisch schwankendes Übersetzungsverhältnis, das insbesondere bei kleinen Zähnezahlen eine dynamische Belastung des Kettengetriebes zur Folge hat. Je kleiner der Durchmesser und damit die Zähnezahl  $z$  des Kettenrades wird, desto grösser werden die Geschwindigkeitsschwankungen



gen  $v_K$  im Kettenstrang, da sich die Kreissekanten (Abbildung 2-7) immer stärker vom Kreisbogen unterscheiden und damit die Auf- und Ablaufgeschwindigkeiten am Kettenrad stärker schwanken [Sche-1994], auch [Kra-1993].

Bei gleichmäßiger Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  schwankt die Kettengeschwindigkeit  $v_K$  zwischen einem Minimum und Maximumwert.

**Abbildung 2-7: Kettenrad als Polygon in vereinfachter Darstellung nach [Volmer-1992]**

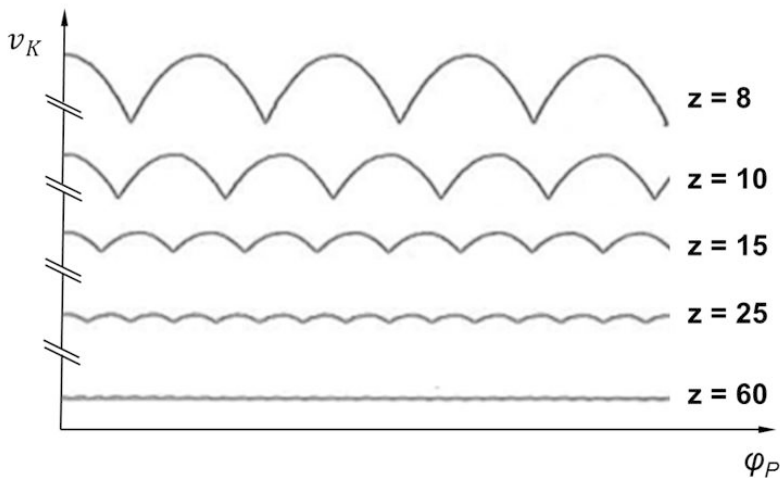
Es gilt:

$$V_K = \omega \frac{d_0}{2} \cos \varphi \quad (2.1)$$

In Volmer [Volm-1992] wird empfohlen, eine Mindestzähnezahl bei Kettentrieben von

$$z \gg 17$$

zu wählen, um die periodischen Schwankungen in der Geschwindigkeit und Beschleunigung gering zu halten.



**Abbildung 2-8: Einfluss der Zähnezahl auf Schwankungen in der Kettengeschwindigkeit  $v_K$  in Anlehnung an [Volm-1992]**

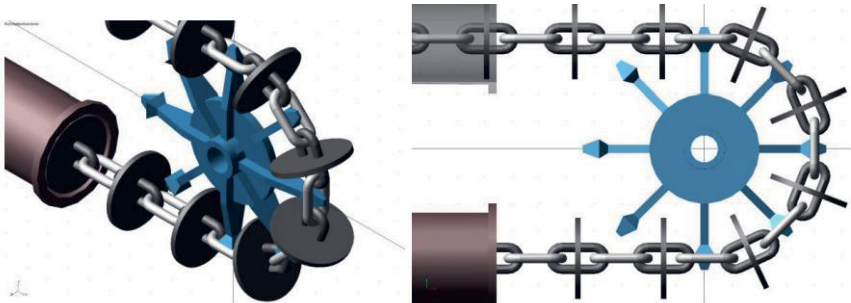
Der Teilungswinkel  $\varphi_P$  ergibt sich zu

$$\varphi_P = \frac{p}{r} = \frac{2p}{zm} \quad (2.2)$$

mit  $p$  als Teilung und  $m$  als Modul. Wird die Zähnezahl  $z$  geringer, steigt der Teilungswinkel  $\varphi_P$  und damit die Differenz zwischen

$v_{K\min}$  und  $v_{K\max}$ .

Typische Antriebe von Rohrkettenförderern (siehe Abbildung 2-9) haben kleine Zähnezahlen, somit sind die Bewegungen stoß- und ruckbehaftet.



**Abbildung 2-9: Typischer Kettenantrieb für Rohrkettenförderer [Hau-2005]**

Dadurch können allerdings nur geringe Fördergeschwindigkeiten ( $v \leq 0,4 \text{ m/s}$ ) realisiert werden, da ansonsten der Ketten- und Stauscheibenverschleiß so stark ansteigen, daß das Fördersystem unwirtschaftlich wird.

## 2.2 Untersuchungsergebnisse mit modifiziertem Rohrkettenförderer

Die konzeptionelle Entwicklung eines neuen Förderers und daraus abgeleitet die voraussichtlich umfangreichen Aufwendungen für wissenschaftliche Untersuchungen, experimentelle Prüfungen, Konstruktionsausführungen und -änderungen und vielfältige Vorbereitungen auf eine Markteinführung führen in der Regel im industriellen Alltag zu dem Schluss, doch noch einmal die gegenwärtig auf dem Markt befindlichen Fördersysteme zu prüfen und ggf. für diese die definierten Einsatzbedingungen zu verbessern.

Den in Kap. 1.4 vorgegebenen Forderungen kommen Rohrkettenförderer am nächsten. Betriebliche Interessen nach minimalen Aufwendungen und reduziertem Entwicklungsrisiko führten deshalb zu der Aufgabe, das Prinzip Rohrkettenförderer noch einmal zu untersuchen, verschiedene mögliche Modifikationen vorzunehmen und daraus letztendlich ein Resümee zu ziehen, das eine Weiterentwicklung favorisiert oder doch eine Neuentwicklung in den Bereich der Möglichkeiten rückt.

Die in Anlage 9.1 dokumentierten umfangreichen Versuche führten zu dem Ergebnis, daß zwar verschiedene Verbesserungen nachweisbar, diese allerdings nicht so bedeutsam waren, um die grundsätzlichen Schwachstellen des Systems zu kompensieren.

Die Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ein Zugtrum im Kettenförderer erfordert meistens eine Spannstation, sobald die Streckenführung nicht eine einfache Anordnung ist.
- Das Verdrehen des Zugtrums im Förderkanal während des Umlaufes führt insbesondere bei Rundgliederketten und Laschenketten zu erheblichen Verschleiß.
- Bei der Montage bedarf es besonderer Beachtung, damit die Kette nicht verdreht eingezogen wird.
- Das Grundprinzip des Rohrkettenförderers verursacht stets zusätzliche Reibung in allen Innenrohrbögen.
- Der Rohrkettenförderer benötigt eine tragende Struktur der Rohre, um die Antriebsstation und die Antriebskräfte aufnehmen zu können. Die Antriebsstation befindet sich in der Regel an der höchsten Stelle im Fördersystem, dies ist eine besondere Herausforderung für Montage und Wartung.
- Die Antriebsstation und die Spannstation kommen mit dem Förderprodukt in Berührung und beeinflussen damit die hygienischen Eigenschaften des Förderers negativ.

- Der verschlissene Zugtrum kann nur komplett gewechselt werden.
- Aufgrund großer Kettenteilung beim Einsatz von Ketten mit hoher Bruchkraft begrenzt der Polygoneffekt im Antrieb die Geschwindigkeit.
- Bei aufwendigeren 3 dimensional Linienführungen werden Umlenkstationen benötigt. Auch hier kommt das Fördergut mit den Umlenkeinheiten in Kontakt und es bleibt Fördergut in den Stationen liegen.

Die parallel zu den Versuchen erfolgten weiteren Untersuchungen führten zu der Auffassung, daß fast alle genannten Schwachstellen des Rohrkettenförderers entweder prinzipbedingt unvermeidbar sind (z.B. Spannstationen, Montage- und Austauschprobleme der Kette, ungünstige Lage der Antriebsstation, Umlenkstationen bei 3-D Linienführungen) oder in ihren realen Auswirkungen (hygienische Situation des Fördergutes) nur minimiert werden können.

Die Neuentwicklung eines optimaleren Fördersystems für den Einsatz in der Grundnahrungsmittelindustrie hat sich damit als unbedingt notwendig erwiesen.

## 2.3 Ausgewählte Methoden der Konstruktionssystematik

In der Konstruktionslehre wird zwischen der Konstruktionswissenschaft und der Konstruktionsmethodik unterschieden [Hub-1989]. Anders als in der Konstruktionswissenschaft, die anstrebt, mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden den Aufbau technischer Systeme und deren Beziehungen zu ihrem Umfeld zu analysieren und zu synthetisieren, soll die Konstruktionsmethodik ein problemorientiertes Vorgehen bei der Suche nach neuen Lösungen ermöglichen. Die Methodik soll branchenunabhängig anwendbar und erfindungs- und erkenntnisfördernd sein. Es sollen mit ihr optimale Lösungen gefunden werden [Pah-2003].

Seit 1953 Bischoff und Hansen erste Methoden zum „Rationelle(n)s Konstruieren“ [Bis-1953] vorstellten, (zuvor hatte G. Biniek in einem Vortrag im Jahre 1951 bereits den Ausdruck Konstruktionssystematik benutzt, siehe [Han-1966]), wurden bis in die Gegenwart eine Vielzahl von Methoden und auch Methodensystemen (zusammengefasst unter dem Begriff „Konstruktionsmethodik“) neu- und weiterentwickelt.

Eine Konstruktionsmethodik soll, aufbauend auf der grundsätzlich notwendigen Intuition und Erfahrung, den Ingenieuren zusätzlich Hilfestellung in der Erreichung der technischen Ziele geben, sie bei der Entwicklung neuartiger Produkte mit besseren Produkteigenschaften unterstützen und damit zur Erfüllung der Kundenanforderungen sowie zum Kundennutzen und zur Reduzierung der Kundenkosten beitragen. Sie soll aber auch die Erreichung der internen organisatorischen Ziele, wie Rationalisierung der Konstruktionsarbeit, Verkürzung der Konstruktions- und Produktlieferzeit, Erleichterung der Teamarbeit und Nachvollziehbarkeit von Konstruktionen ermöglichen. Persönliche Ziele, wie die Hilfestellung in neuartigen Situationen, Steigerung der Kreativität, Erweiterung des Problembewusstseins, bessere Darstellung der Konstruktionsschritte und Konstruktionsergebnisse sollen mittels Konstruktionsmethodik unterstützt bzw. erst ermöglicht werden. Und nicht zuletzt soll die Methodik auch didaktische Ziele, wie die Lehrbarkeit und die Rationalisierung der Lehre fördern [Ehr-2003].

Ein problemorientiertes Vorgehen unterscheidet sich von der klassischen Lösung einer Konstruktionsaufgabe. Eine Aufgabe, wie eine übliche Varianten- oder einfache Anpassungskonstruktionen mit vorgegebenen Mustern und bekannten Lösungsprinzipien wird in der Regel routiniert mit meist formalisierten Operationen erledigt. Das Ziel ist klar umrissen, der Lösungsfreiraum begrenzt und bekannt, die Mittel an Wissen, Können und die notwendigen Sachmittel sind dem Konstrukteur gut vertraut.



Anders ist es, wenn das Ziel nicht sofort exakt definierbar und der Lösungsfreiraum unklar ist und die einzusetzenden Mittel unklar und das persönliche Wissen vor Beginn der Bearbeitung möglicherweise nicht ausreichend sind. Dies tritt vor allem bei Neukonstruktionen auf. Neben den Folgerungen aus der Begrenztheit unseres Kurzzeitgedächtnisses aber auch der Begrenztheit unseres Langzeitgedächtnisses [Dör-2003], die hier nicht weiter behandelt werden sollen, muss doch kurz auf die Konsequenzen unseres Denkens zur Aufwands- und Zeitminimierung und den unbewussten und intuitiv ablaufenden Denkvorgängen eingegangen werden.

*„Denken ist anstrengender als Fühlen. Rationelles Abwägen erfordert mehr Willenskraft, als sich der Intuition hinzugeben“* [Dob-2012]. Ohne den eigentlich vorteilhafteren diskursiven, rationalen und logisch gesteuerten Denkvorgängen den Vorzug zu geben, entscheiden und denken wir intuitiv und emotional [Ehr-2003].

Um bekannte Denkmuster mit bekannten Lösungsprinzipien zu durchbrechen und um zu neuen innovativen Lösungskonzepten zu gelangen, sind erfolgsversprechende Kreativitätstechniken und Lösungsfindungsmethoden notwendig. Hier können Kernelemente von Entwicklungsmethoden eingesetzt werden [Lin-1993].

Grundsätzlich lassen sich alle Methoden in intuitiv orientierte Methoden, in systematisch orientierte Methoden und in widerspruchorientierte Methoden einteilen [Lin-1993].

Die intuitiv orientierten Methoden stellen vor allen Methoden dar, die auf das Hervorbringen neuer Denkresultate gerichtet sind. Der Konstrukteur sucht und findet Lösungen zu schwierigen Problemen oft intuitiv. Die Lösung findet er nach einer Such- und Überlegungsphase durch einen guten Einfall oder durch eine neue Idee<sup>9</sup>. Dieser Einfall oder diese Idee dringen mehr oder weniger ganzheitlich in sein Bewusstsein und die Entstehung dieser Gedanken kann nicht hergeleitet werden. Der Einfall wird dann in der Regel weiterentwickelt, angepasst und gewandelt, bis eine Lösung des Problems möglich ist. Der Einfall ist aber schon fast immer bereits vorher im Unterbewusstsein aufgrund von Fachkenntnissen und Erfahrung, auch Erfahrung aus bekannten Aufgabenlösungen, präsent und ist – wiederum unbewusst - schon weitgehend auf Eignung untersucht worden. Häufig reicht ein Anstoß oder eine Verbindung zu einer anderen Idee aus, um diesen Einfall ins Bewusstsein treten zu lassen. Viele gute Lösungen und Produkte entstehen so. Allerdings birgt diese Herangehensweise aber auch gewisse Gefahren, wenn sich der Konstrukteur nur auf seine Intuition ver-

---

<sup>9</sup> Unter einer Idee ist ein bewusster, zielgerichteter Denkprozess zu verstehen, nach dem man sich orientieren oder nach dem man handeln kann. Ein Einfall entsteht weit unbewusster und tritt plötzlich und unvermittelt ins Bewusstsein.

lässt. Es wird schwierig, eine gute Idee zum rechten Zeitpunkt zu finden, wenn man sich nur auf den Zufall oder auf die mehr oder weniger seltenen Einfälle verlässt. Neue Wege werden wegen bestehender Konventionen und bereits fixierter Vorstellungen selten erkannt, neue Technologien oder neue Verfahren dringen aufgrund mangelnder Informationen selten in das Bewusstsein des Konstrukteurs vor. Hinzu kommt, daß die Gefahren der „Fachblindheit“ umso grösser werden, je mehr die Spezialisierung fortschreitet [Pah-2005].

Einige typische Vertreter der intuitiv orientierten Methoden sind das Brainstorming (nach Osborn [Osb-1957]), Brainwriting, Ideenkonferenz, Laterales Denken (nach De Bono [Bon-1995]), das Fragebogenverfahren, das Interviewverfahren, die Delphi Methode, die Synektik oder die Methode 635 [Sch-1993].

Die systematisch orientierten Methoden sind durch eine schrittweise und zielorientierte Vorgehensweise gekennzeichnet. Die Arbeitsschritte sind beeinfluss- und mitteilbar [Pah-2005]. Intuition wird nicht ausgeschlossen, aber der Focus wird stärker auf die einzelnen Stufen des Entwicklungsprozesses gelegt. Ehrlenspiel schreibt in [Erl-2003]: „*Eine Systematik ist eine Ordnung von Lösungselementen oder von Merkmalen, die für die Lösung wesentlich sind*“.

Hier seien z.B. der morphologische Kasten, die Black-Box Methode, die Bionischen Methoden nach Hill [Hil-1997], die Variationsmethode, die systematische Heuristik nach Müller [Mül-1990] oder die Konstruktionssystematik nach Hansen oder Konstruktionsmethoden nach Koller [Kol-1994], Roth [Rot-2000], Pahl/Beitz [Pah-2004], Rodenacker [Rod-1991] oder Ehrlenspiel [Erl-2003] genannt.

Linde und Hill erweitern die Methodenübersicht um die Klasse der widerspruchsorientierten Methoden [Lin-1993].

In Anlehnung an die von Altschuller [Alt-1998] entwickelte Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ, von russisch: Teorija Reschenija Izobretatel'skich Zadac ) befasst sich dieses „Denkverfahren“ mit der Entwicklung innovativer Ideen und Produkte. Eines der Hauptmerkmale der Methode ist die Formulierung technischer und/oder physikalischer Widersprüche mit dem Ziel, diese Widersprüche aufzulösen. Hierzu bietet TRIZ im Gegensatz zur Lösungssuche nach der Methode „Versuch und Irrtum“ empirisch ermittelte Entwicklungsgesetze technischer Systeme an und erlaubt hierdurch eine gezielte Suche nach Problemlösungen. Die vier Kategorien, in denen die TRIZ Methoden und Werkzeuge unterteilt sind, sind die Systematik, das Wissen, die Analogie und die Vision. In der Kategorie der Analogie erscheint die Methode des Widerspruchs.

Bei den widerspruchsorientierten Methoden wurden der Algorithmus zur Lösung erfinderischer Aufgaben nach Altschuller, das Programm zur Herausarbeitung von Erfindungsaufgaben nach Rindfleisch und Thiel [Rin-1986] und die widerspruchsorien-

tierte Innovationsstrategie (WOIS) nach Linde und Hill [Lin-1993] oder die Constructive Resource & Result Oriented Strategy of Thinking & Transforming (CROST) nach Orloff [Orl-2006] entwickelt.

Daneben unterscheidet Ehrlenspiel in [Ehr-2003] zwischen den organisatorischen Methoden der Produktentwicklung und den sachgebundenen Methoden für die Entwicklung und Konstruktion. Organisatorische Methoden sind hier beispielsweise Organisationsmodelle wie Sparten- oder Matrixorganisation oder Ablauforganisationsmodelle. Sie unterscheiden sich von den sachgebundenen Methoden, da sie Prozesse gestalten, währenddessen die sachgebundenen Methoden auf die Erreichung eines Sachziels wie z.B. eines Objektes oder eines Dokumentes ausgerichtet sind. Diese Methoden sind in der Hauptsache auf das Suchen von Lösungen zur Erfüllung der Funktionsanforderungen bezogen [Ehr-2003].

Unter konstruktionsmethodischem Vorgehen versteht man grundsätzlich ein konkretes Vorgehen mit Handlungsanweisungen, um technische Produkte zu entwickeln und zu konstruieren [Pah-2003]. Die Konstruktionsmethodik soll unter anderem, neben problemorientiertem Vorgehen, erkenntnis- und erfindungsfördernd sein und Lösungen nicht nur zufallsbedingt erzeugen.

Allgemein gilt, daß Methoden intelligente Prozesse steuern und sie sich in algorithmische und heuristische Methoden unterscheiden lassen [Mül-1990]. Algorithmische Methoden sind eine Menge endlich geordneter Vorschriften. Adäquat angewendet wird nach endlich vielen Operationen das angestrebte Ergebnis erreicht, oder aber es kann sicher begründet werden, warum abzubrechen ist. Heuristische Methoden nutzen auch eine endlich geordnete Menge von Vorschriften. Diese Methoden, adäquat angewendet, garantieren allerdings nicht, daß das angestrebte Ziel erreicht werden kann, sie erhöhen nur die Wahrscheinlichkeit der Lösungsfindung. Es wird aber vor allem bewirkt, daß der Bearbeitungsprozess zielstrebig und sicherer und auch transparenter verläuft.

## 2.4 Ideenfindung mit Methoden der Konstruktionssystematik

Wie schon in Kapitel 2.2 festgestellt, müssen zur Verbesserung des Rohrkettenförderers eine Vielzahl von Problemen gelöst werden. Ideen zur Problemlösung findet man aber nur, wenn man sich mit den gegebenen Situationen umfangreich auseinandersetzt, wie in den vorstehend dargestellten Konstruktionsmethoden eindringlich betont wird. Die nochmalige Auflistung der Probleme des Rohrkettenförderers, die durch sein Arbeitsprinzip und letztlich durch die Kette, also durch das Zugmittel, entstehen, erscheint deshalb notwendig, um das Problembewusstsein zu schärfen. Erst dann kann man davon ausgehen, daß neue Ideen zur Problemlösung generiert werden können.

Die Kette

- erfordert meistens eine Spannstation,
- kann beim Verdrehen, insbesondere bei Rundgliederketten und Laschenketten, zum Verschleiß führen,
- benötigt bei der Montage besondere Beachtung, damit die Kette nicht verdreht eingezogen wird,
- verursacht über die Stauscheiben Reibung in allen Innenbögen der Rohre,
- benötigt eine tragende Struktur der Rohre, um die Antriebsstation an der Stelle der größten Kettenkraft zu installieren,
- kann bei Verschleiß nur komplett gewechselt werden,
- erzeugt bei großer Kettenteilung den Polygoneffekt im Antrieb.

Auch die gesamte Bauart, letztlich das Prinzip des Rohrkettenförderers, führt zu Nachteilen, denn

- bei erweiterter drei-dimensionaler Linienführung sind meist Umlenkstationen notwendig,
- bei herkömmlicher Bauart beträgt die maximal erreichbare Fördergeschwindigkeit in der Regel nicht mehr als 0,4 m/s,
- die Bauart bedingt, daß Antriebsstation und Spannstation mit dem Förderprodukt in Berührung kommen,
- durch die Bauart entstehen in den Umlenkstationen, Spannstationen und Antriebsstationen große Toträume, in denen sich Produktreste ansammeln können,
- die Antriebsstation ist bauartbedingt an der höchsten Stelle des Rohrkettenförderers (hier wirkt die größte Kettenkraft) anzubringen.

Linde beschreibt in der „Widerspruchorientierten Innovationsstrategie“ [Lin-1993] in Anlehnung an Altschuller [Alt-1984], daß bei der üblichen Lösungsfindung im Entwicklungsprozess sehr häufig technische oder wirtschaftliche Eigenschaften schlechter werden, wenn sich andere Eigenschaften verbessern. Wird z.B. die Struktur stabiler, nimmt das Gewicht oder das Volumen zu. Wenn die Leistungsfähigkeit zunimmt, wird mehr Energie benötigt. Viele weitere Beispiele ließen sich anführen. Linde/Hill schlagen deshalb vor, das Problem so zu formulieren, daß ein technischer oder wirtschaftlicher Widerspruch oder auch Zielkonflikt erkannt wird. Zum Beispiel soll das Gewicht reduziert werden, gleichzeitig soll aber die Festigkeit zunehmen. Gelingt es, diesen Widerspruch aufzulösen, erhält man innovative neue Lösungskonzepte (z.B. Strukturbauweise oder Sandwichbauweise).

Für die Weiterentwicklung des Kettenförderers könnte dies heißen:

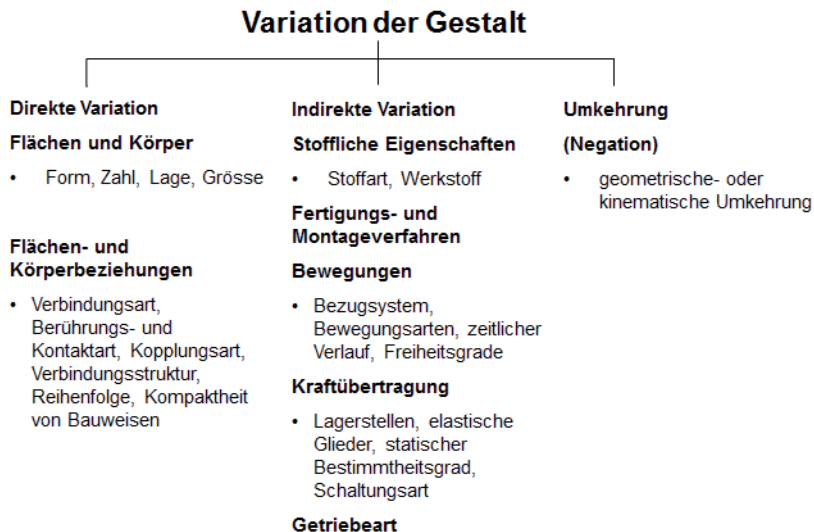
- das Zugmittel (oder der Trum) soll vorhanden, aber nicht geschlossen sein, und / oder
- Stauscheiben müssen in fester Formation im Rohr bewegt werden, sollen aber nicht an der Kette befestigt, sondern Einzelelemente sein.

Nach Altschuller verlaufen technische Entwicklungen nicht zufällig, sondern folgen gewissen Gesetzmäßigkeiten. Er hat den Verlauf der Entwicklung technischer Systeme in drei Gruppen unterschieden. Die Entwicklung wird maßgeblich beeinflusst durch:

- Aufbaugesetze,
- Bewegungsgesetze oder
- Tendenzgesetze.

Richtig genutzt, sollen die Entwicklungsgesetze die Gesamteffektivität der zugrunde liegenden Ausgangslösung erhöhen. Effektivität eines Systems entwickelt sich bei Altschuller immer in Richtung der „idealen Maschine“.

Von Wichtigkeit für das weitere Vorgehen ist auch die Berücksichtigung von Möglichkeiten der Gestaltvariation. Hier soll die Systematik von Ehrlenspiel [Ehr-2003] verwendet werden (Abbildung 2-10).



**Abbildung 2-10: Gestaltvariation nach Ehrlenspiel [Ehr-2003]**

Kombiniert man den bereits oben formulierten Widerspruch am Beispiel des Rohrkettenförderers nach dem Ansatz von Altschuller und Linde/Hill mit dem Element der Umkehrung (Negation) aus den Möglichkeiten der Gestaltvariation kann folgende Idee formuliert werden:

**Ein geschlossener Trum, der aber nicht geschlossen sein darf** (das ist der Widerspruch), **fördert das Schüttgut im Rohr.**

Demnach besteht der neu definierte Trum aus einzelnen Elementen, die sowohl – im Sinne der Gesamtfunktion des Trums - im geschlossenen Verband wirken als auch definierte Einzelelemente sind. Einzelelemente können grundsätzlich nicht im Verband durch ein Rohr gezogen werden. Verwendet man nun zusätzlich die Methode der Umkehrung (Negation) aus dem Tool zur Variation der Gestalt ergibt sich:

**Die Elemente werden nicht gezogen, sondern geschoben.**

Es wird also – durch die Anwendung der Systematik- eine Schubbewegung angeboten.

Die neu entstandene Idee soll zusammengefasst werden:

Die geforderte Förderfunktion lässt sich mit Einzelementen (als Schubelemente) erreichen, die durch das Rohr geschoben werden. Die einzelnen Schubelemente bilden in der „Druckstrecke“ einen geschlossenen Druckverband. Es bleiben aber Einzelemente, die, wenn sie nicht im Druckverband zusammengeführt sind, wieder Einzelemente sind und sich auch so verhalten<sup>10</sup>.

Durch die von der Methodik „angebotene“ kinematische Umkehrung haben wir anstelle eines Zugtrums einen Drucktrum, anstelle gezogener Elemente verwenden wir geschobene Elemente. Wir haben einen **Schubelementeförderer** generiert.

Eine Einordnung des neuen Schubelementeförderers in die Systematik der Fördertechnik wird in Kapitel 8 vorgeschlagen.

Die Abbildung 2-11 zeigt erste Skizzen zur Idee.

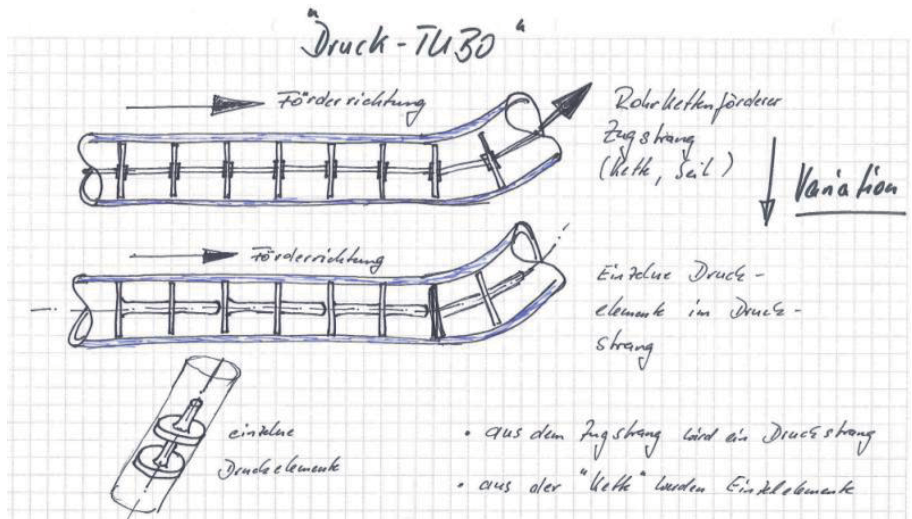


Abbildung 2-11: Erste Skizzen zur Idee eines Schubelementeförderers<sup>11</sup>

Daraus lassen sich in der Ideenfindungsphase auch gleich Anforderungen an mögliche Antriebssysteme der Schubelemente ableiten. Erste Adaptionen bekannter Getriebeprinzipien sind in Abbildung 2-12 dargestellt.

<sup>10</sup> Das Schüttgut wird auch bei einem Stauscheibenförderer von den Stauscheiben durch das Rohr geschoben. Die Stauscheiben allerdings werden durch ein Zugmittel durch das Rohr gezogen. Bei dem Schubelementeförderer werden sowohl das Schüttgut vor den Mitnehmerscheiben als auch die Schubelemente durch das Rohr geschoben.

<sup>11</sup> Druck-TUBO ist der Arbeitsname des Schubelementeförderers und eine firmeninterne Bezeichnung.

Die eingangs genannten notwendigen Verbesserungen des Rohrkettenförderers bedeuten u.a. für das neue Antriebssystem, daß Antriebsschwankungen in Geschwindigkeit, Leistung oder Drehmoment möglichst kleingehalten werden müssen, da sich das System ansonsten ähnlich verhalten würde wie bekannte Kettenfördersysteme mit Polygoneffekt. Die angedachten Vorteile des neuen Fördersystems würden sich damit verringern, die Realisierung der Idee wäre in Frage gestellt.

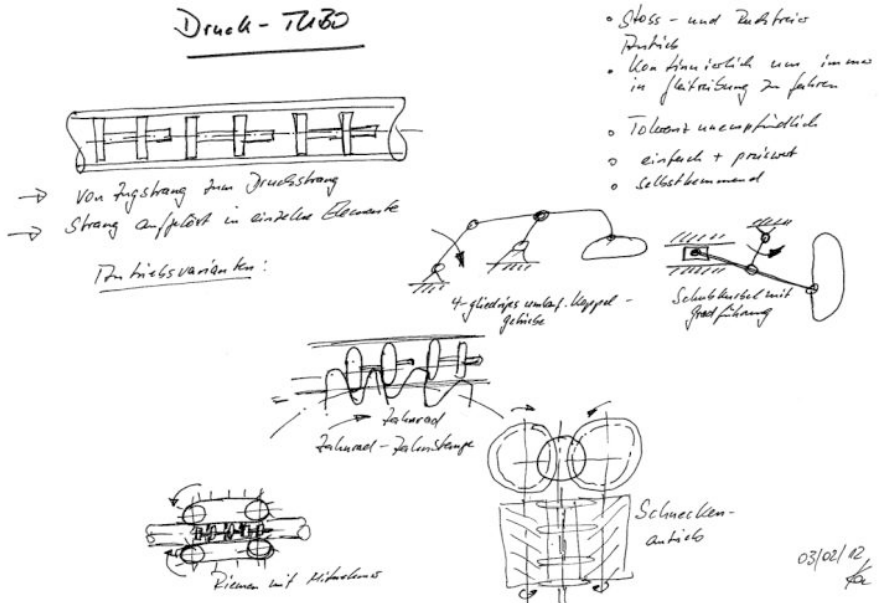


Abbildung 2-12: Skizzen zu möglichen Antriebskonzepten für die Schubelemente im Rohr

In Kapitel 5.3 werden die dargestellten Getriebevarianten im Sinne einfacher, zuverlässiger und kostengünstiger Realisierung weiter untersucht.



## 2.5 Konzeptentwicklung

Die VDI Richtlinie 2221 [VDI-2221] beschreibt das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren. In einem Vorgehensplan aus sieben Arbeitsschritten wird ein Vorgehensplan von der Aufgabe bis zur (weiteren) Realisierung dargestellt.

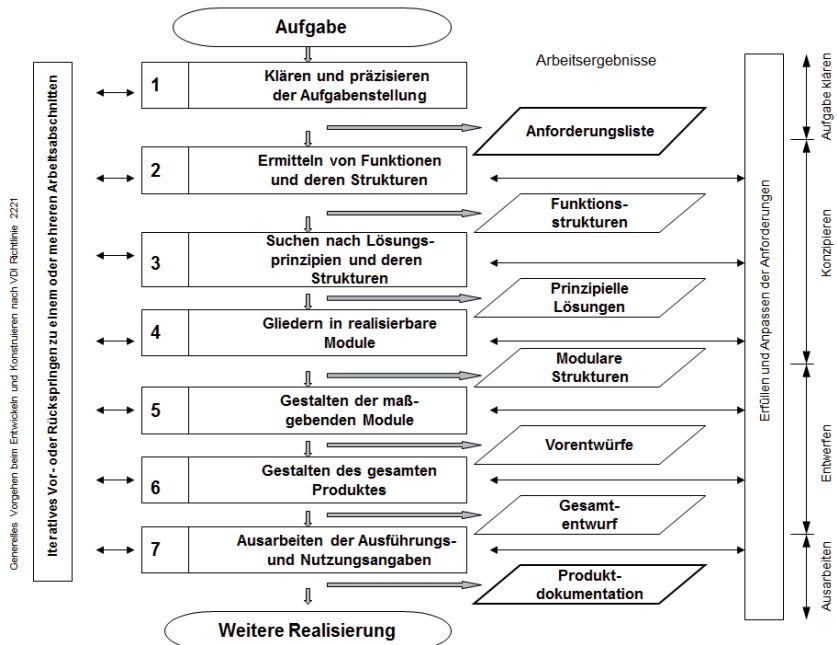


Abbildung 2-13: Generelle Vorgehensweise bei Entwicklungsaufgaben nach VDI 2221

In Anlehnung an die VDI Richtlinie stellen Pahl/Beitz [Pah-2005] die Hauptschritte beim Planen und Konzipieren in detaillierteren Arbeitsschritten vor. Bei Neukonstruktionen müssen immer die rechts im Bild dargestellten Phasen

1. Planen und Klären der Aufgabe
2. Konzipieren
3. Entwerfen und
4. Ausarbeiten

durchlaufen werden.

Im allgemeinen Konstruktionsprozess ist das Konzept die erste Fassung eines Plans, oder eine heuristische Abfolge zum Vorgehen. Hier wird die Festlegung des prinzipiellen Lösungsprinzips aufgezeigt. Unter Lösungsprinzip wird die grundsätzliche Verwirklichung einer oder mehrerer verknüpfter Funktionen durch die Auswahl von

Effekten und wirkstrukturellen Festlegungen verstanden [Ehr-2003]. Pahl/Beitz schreibt dazu: *“Konzipieren ist die prinzipielle Festlegung einer Lösung.”* [Pah-2005]

Bei der weiteren Konzeptentwicklung müssen neben den allgemeinen maschinenbautechnischen Regeln (vergl. hier auch Vorgehensweisen wie in den VDI-Richtlinien empfohlen [VDI-2220; VDI-2222/1-2; VDI-2225/1-5]) auch die besonderen Eigenschaften der Schüttgüter berücksichtigt werden.

Ähnlich wie bei Festkörpern oder Flüssigkeiten wendet man die Gesetze der Newtonschen Flüssigkeiten und Hookschen Festkörper als einfachste Kontinua der Mechanik an [Sti-2009]. Durch Analogievergleich können die Besonderheiten von Schüttgütern gut dargestellt werden.

Newtonsche Flüssigkeiten:

- übertragen keine Zugspannungen,
- übertragen nur ruhend Druckspannungen,
- übertragen Schubspannungen nur in Bewegung (fließend),
- deformieren sich unter der Wirkung von Schubspannungen irreversibel (fließen),
- haben eine vom Spannungszustand praktisch unabhängige Dichte (inkompressibel).

Hooksche Festkörper:

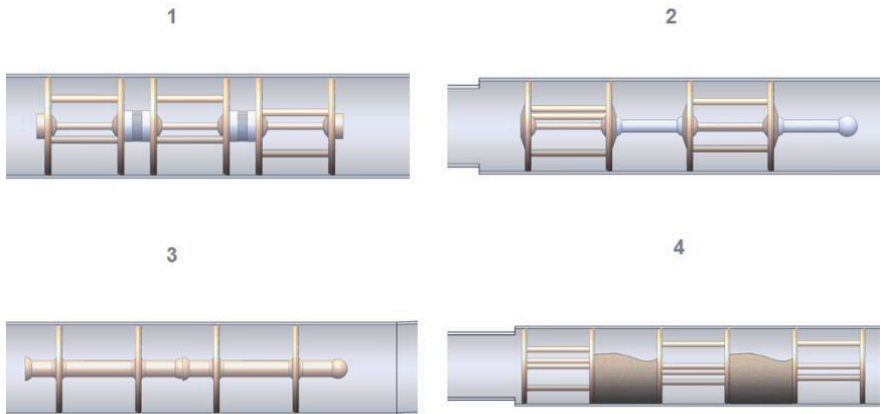
- übertragen Zug-, Druck- und Schubspannungen,
- fließen nicht unter Einwirkung von Schubspannungen,
- deformieren sich unter Einwirkung von Spannungen (Zug, Druck oder Schub) reversibel,
- haben eine vom Spannungszustand praktisch unabhängige Dichte (inkompressibel).

Schüttgüter:

- übertragen keine oder nur sehr kleine Zugspannungen,
- übertragen ruhend nur Druck- und Schubspannungen,
- fließen unter Einwirkung von Schubspannungen, wenn sie ausreichend hoch sind (Fließgrenze),
- haben eine vom Spannungszustand unabhängige Fließgrenze,
- ändern abhängig von Belastung und Bewegung ihre Dichte.

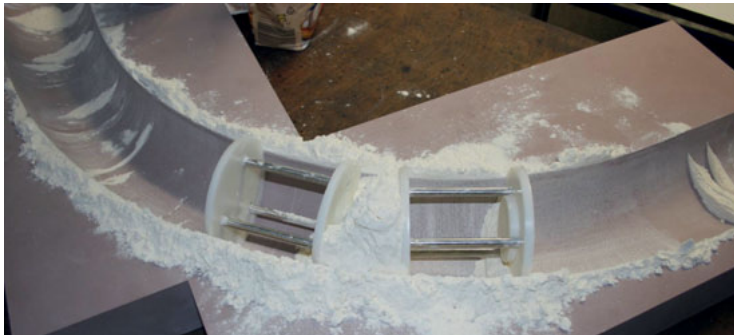
### Konzept zum Schubverband

Für die Konzeptentwicklung ist von Bedeutung, daß im Zugstrang bestehender Fördersysteme ein einachsiger Spannungszustand herrscht, es werden nur Zugspannungen eingeleitet und übertragen. Beim Druckprinzip hingegen werden Schubelemente durch das Rohr geschoben. Der Druckstrang wird auf Druck und somit auf Knickung und Biegung beansprucht. Somit sind in den Schubelementen immer mehrachsige Spannungszustände vorhanden, insbesondere in den Rohrbögen. Die Krafteinleitung für die Schubkraft beeinflusst ebenfalls die Spannungsverteilung in den Schubelementen. Die Form und die Kontaktstelle von Schubelement zu Schubelement ist ebenfalls entscheidend. Die Kontaktstellen sollen so ausgeführt werden, daß eine 3-D Fähigkeit des Fördersystems erreicht werden kann. Erste Konzeptentwürfe sind in Abbildung 2-14 dargestellt.



**Abbildung 2-14: Varianten der Koppelstelle zwischen den Schubelementen**

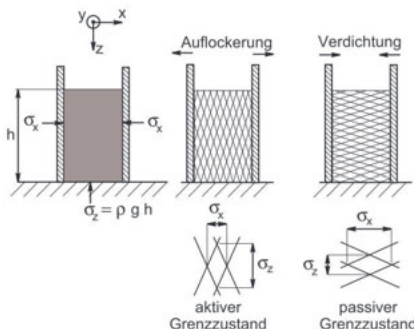
Für die Bewertung der Konzeptentwürfe der Schubelemente und ihrer Koppelstellen müssen ebenfalls die Spannungsverhältnisse im Schüttgut berücksichtigt werden. Variante 1 und Variante 2 in Abbildung 2-14 mit gekoppelten Schubelementen, die über ein Kugelgelenk formschlüssig verbunden sind, schieden nach einem ersten Versuch aus. Hierzu wurden die Teile als Muster aufgebaut und ein Strang mit den Schubelementen im Rundbogen - bei mit Mehl gefüllter Koppelstelle - verschoben (Abbildung 2-15). Da sich Schüttgüter nicht wie Newtonsche Flüssigkeiten verhalten, wird das Schüttgut im Rohrbinnenbogen komprimiert. Das Schüttgut floss im Versuch nicht nach außen und die Druckspannungen wurden im Rohrbinnenbogen so groß, daß die formschlüssige Koppelstelle zerstört wurde.



**Abbildung 2-15: Versuch mit formschlüssig verbundenen Schubelementen im Rohrbogen mit Weizenmehl in der Koppelstelle**

Wird nun die Koppelstelle analog der „idealen“ Koppelstelle nach Altschuller betrachtet, bildet das Schüttgut selbst die Koppelstelle, wie Abbildung 2-14, Variante 4. zeigt. Aufgrund des passiven Grenzzustandes des Schüttgutes müssen allerdings die Rohrreibungskräfte berücksichtigt werden, das System würde sehr große Bewegungswiderstände erzeugen.

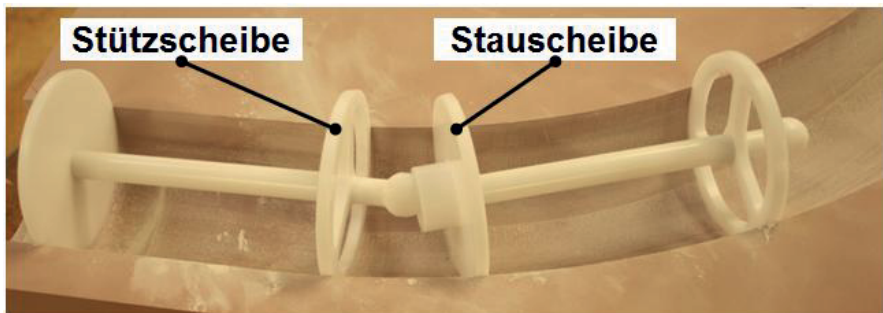
Nach Rankine [Ran-1857] sind zwei Ursachen denkbar, wenn ideales Schüttgut beginnt, sich gleichmäßig zu verformen. Entweder entsteht eine gleichmäßige Auflockerung, die als „aktiver Grenzzustand“ bezeichnet wird oder aber eine gleichmäßige Verdichtung, die man „passiven Grenzzustand“ nennt. Hierbei wird nach Rankine die Volumenänderung vernachlässigt. Im passiven Spannungszustand ist die Spannungs Komponente in x-Richtung grösser als die Spannungs Komponente in z-Richtung (Abbildung 2-16).



**Abbildung 2-16: Unterschiedliche Grenzzustände für Schüttgut im Rohr [Kat-2005]**

Die Wandreibung zwischen Schüttgut und Rohrwandung nimmt über die in z-Richtung eingeleitete Kraft so zu, daß eine Bewegung im Rohr nicht mehr möglich

wird. Das bedeutet für die weitere Entwicklung, daß immer sichergestellt sein muss, daß die Kopplung zwischen den Schubelementen nur über die dafür vorgesehenen Koppelstellen, nie über das Schüttgut realisiert werden darf. Abbildung 2-17 zeigt eine entsprechende Ausführung der Schubelemente als Einzelemente. Die Stauscheibe hat in etwa Rohrrinnendurchmesser analog dem Rohrkettenförderer. Um die Schubelemente beim Verlassen des Schubverbandes wieder in Eingriff zu bringen, muss eine Stützscheibe die Vorzentrierung übernehmen. Soll ein 3-D fähiges Rohrfördersystem ermöglicht werden, ist die Koppelstelle in Form einer Kugel-Kalotte auszuführen. Da eine Drehung der Schubelemente im Rohr im Gegensatz zu Kettensystemen keine Probleme bereitet, sondern aus Gründen der gleichmässigeren Belastung und der Verschleissverteilung sogar gewünscht ist, konnte in Vorversuchen diese Form der Koppelung bestätigt werden. Die Stützscheibe hat also lediglich die Funktion, die Schubelementespitze vorzuzentrieren. Damit keine Druckspannungen durch das Schüttgut in den Rohrbögen zwischen den einzelnen Schubelementen aufgebaut werden können, ist die Fläche der Stützscheibe möglichst weit durchbrochen.



**Abbildung 2-17: Schubelemente im Verband mit Stauscheibe und Stützscheibe, Koppelung über Kugel-Kalotte**

### **Antriebskonzept**

Wie die Mängelanalyse der Antriebssituation des Kettenförderers gezeigt hat, wird eine entscheidende Komponente für die Bewertung des Schubelementförderers der Antrieb der Schubelemente sein.

Die noch nicht näher definierte Antriebsstation muss folgende Bedingungen erfüllen:

- Aufnahme der einzelnen Schubelemente nach ihrem Fallen im Fallrohr und Erzeugung eines Verbandes,
- Aufbringung einer Linearbewegung auf einzelne Schubelemente über einen gewissen Wegbereich zur Erzeugung der Bewegung des Gesamtverbandes,

- Sicherung der gleichförmigen Geschwindigkeit des Verbandes zur Vermeidung von Schwingungen im Rohr /der Förderstrecke (kontinuierliche und konstante Vorschubgeschwindigkeit).

Zur Realisierung einer derartigen Aufgabe kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Getriebe in Frage.

Da die Vorschubkraft des Antriebs auf das Schubelement übertragen werden muss ist auch grundsätzlich festzulegen, ob die Kraft über den Druckstab in der Schubelementmitte oder über die Mitnehmerscheibe eingeleitet werden soll.

Als Getriebe für Geradföhrungen kommen neben Ketten, Riemen- oder Schraub- bzw. Schneckenantrieben, wie in Abbildung 2-18 dargestellt, insbesondere auch Koppelgetriebe in Betracht.

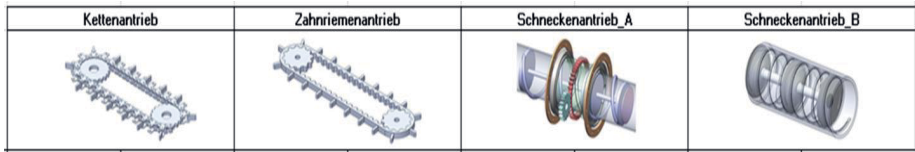


Abbildung 2-18: Antriebsvarianten für die Schubelemente

In Otte [Ott-2012] werden verschiedene Koppelgetriebe für Geradföhrungen zusammengefasst.

Die Abbildung 2-19 zeigt sogenannte Lenkergeradföhrungen. Bei Bewegung des Antriebspunktes A auf einer Kreisbahn (Kurbelantrieb) föhrt der Koppelpunkt C eine ebene Bewegung aus, die – je nach Dimensionierung – eine gerade/lineare Teilbahn enthält.

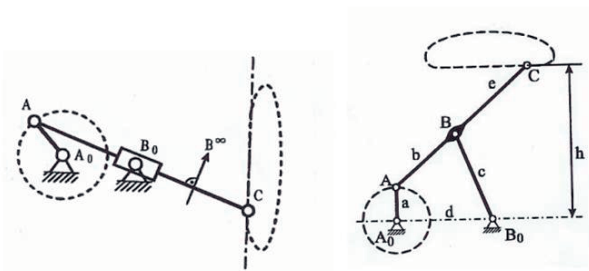
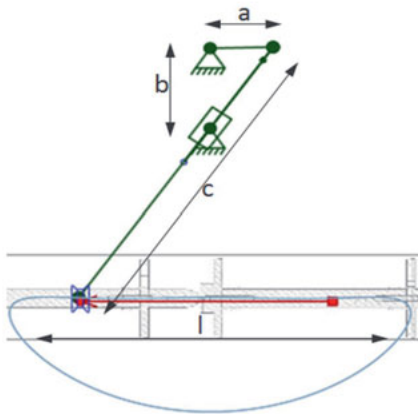


Abbildung 2-19: Lenkergeradföhrungen nach [Volm 1992]

In einer Untersuchung mit dem Getriebesimulationsprogramm ASOM<sup>12</sup> wurden unterschiedliche Geradführungssysteme betrachtet. Eine hinreichend gute Annäherung an eine gerade Bahn wird mit dem Lenkergeradführungsgetriebe aus Abbildung 2-20 erreicht. Hinsichtlich Vorgaben bezüglich Geschwindigkeitsschwankungen auf der linearen Teilbahn, der Drehmomentschwankungen am Antrieb und der Abweichung von der Geraden im Vorschubteil konnte ein optimiertes Getriebe gestaltet werden. Da Getriebe für unterschiedliche Baugrößen des Fördersystems benötigt werden, waren skalierbare Parameter einzuführen.<sup>13</sup> Abbildung 2-20 zeigt die variablen Größen.



**Abbildung 2-20: Skalierbares Lenkergeradführungsgetriebe**

Die Adaption auf den Schubelementeantrieb mit den geometrischen Abmessungen für eine 6 Inch Fördersystemvariante wird in der Abbildung 2-21 dargestellt.

<sup>12</sup> ASOM ist der Produktname einer Software zur Analyse, Synthese und Optimierung von Mehrgelelenksystemen der **info-key GmbH & Co. KG**, Wuppertal

<sup>13</sup> Es gibt Verhältnisse in Lenkergeradführungssystemen, die für bestimmte Fragestellungen optimiert werden können. So z.B. führen die folgenden Verhältnisse zu einer optimierten Geradführung:

$$b/a \approx 1,660$$

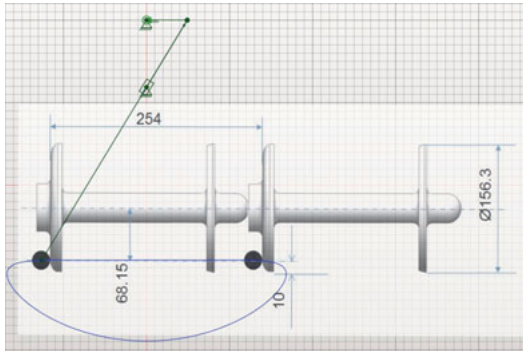
$$c/a \approx 6,964 \text{ mit}$$

a: Stablänge der Kurbel

b: Abstand zwischen Festlager und Schublager

c: Länge der Schubstange gemäß Skizze

Die Länge der Geradführung entspricht dabei etwa  $l = 5,2 \cdot a$ , die zylindrische Toleranzzone der Geradführung hat eine Höhe von etwa  $t = 0,004 \cdot a$ .

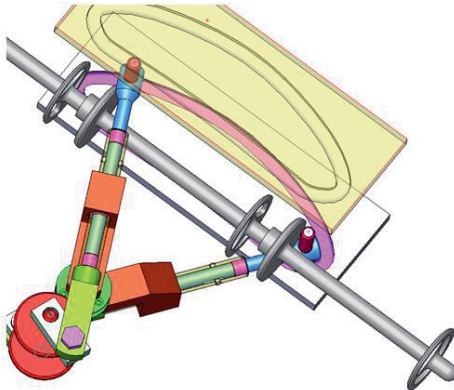


**Abbildung 2-21: Schubelementantrieb mit Lenkergeradföhrungsgetriebe an der Mitnehmerscheibe**

Der Antrieb lässt sich aber nur über 180° der Kurbelbewegung aufrechterhalten. Für eine Verwendung im hier interessierenden Fall muss das Bewegungssystem deshalb so ausgeführt werden, daß ein zweites Lenkergetriebe nach 180° die Bewegung übernimmt.

In Abbildung 2-22 wird das Modell eines derartigen Antriebes gezeigt. Untersuchungen mit einem CAD – Modell bestätigen die getroffenen Annahmen.

Wesentlich ist, daß der Antrieb eine Linearführung erzeugt, die nur einen geringen Versatz besitzt, sich also nur geringfügig von einer Geraden unterscheidet und der gesamte Linear- Bereich mit einer konstanten Geschwindigkeit durchfahren wird, damit Schwingungen im System vermieden werden.



**Abbildung 2-22: CAD-Modell eines Lenkergetriebes**

Wie die Abbildung 2-23 und 2-24 zeigen, können diese Forderungen erfüllt werden.



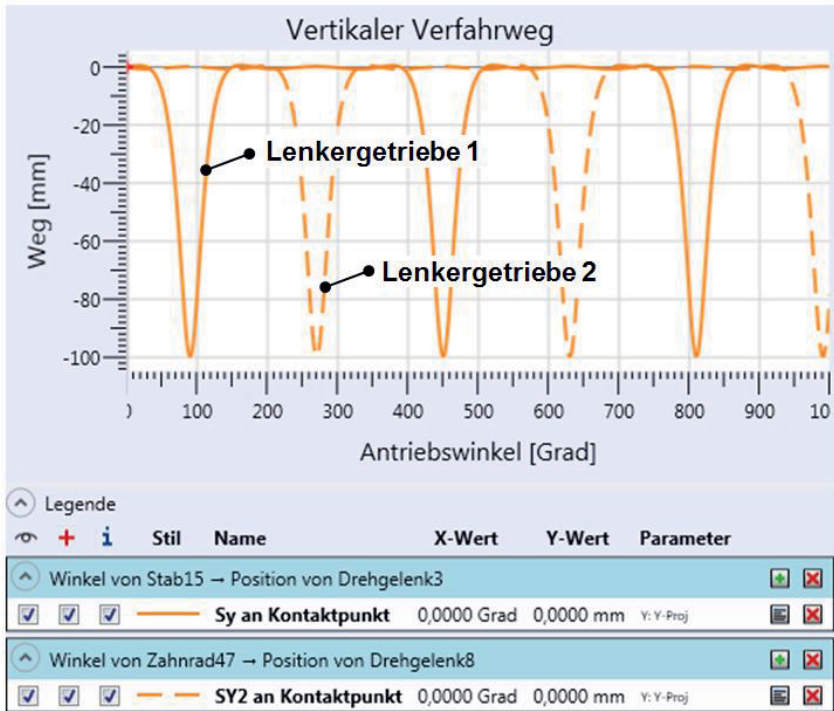


Abbildung 2-23: Verfahrweg der zwei Lenker über 360° Kurbelantrieb und sich überlappende Geradföhrungen über ca. 180°

Die Abbildung 2-24 stellt die Bewegungen beider Lenkerpunkte überlappend über je 180° dar.

Der horizontale bzw. lineare Verfahrweg eines Lenkers (im Bild oben parallel zum Antriebswinkel abzulesen) entspricht ca. 180° der Kurbeldrehung; der vertikale Verfahrweg, d.h. der Ausschlag der gesamten Bahnkurve des Koppelpunktes C ist grundsätzlich über 360° zu messen. Über den Antriebsweg des Schubelementes, d.h. den Bereich des linearen Verfahrweges, weicht die Gerade im Beispiel um ca. 1,5 mm ab. Diese Aussage ist von Bedeutung, da sie der Relativbewegung zwischen Antriebsselement und Mitnehmerscheibe des Schubelementes entspricht, die ihrerseits wieder für Reibungsverluste an der Koppelstelle verantwortlich ist.

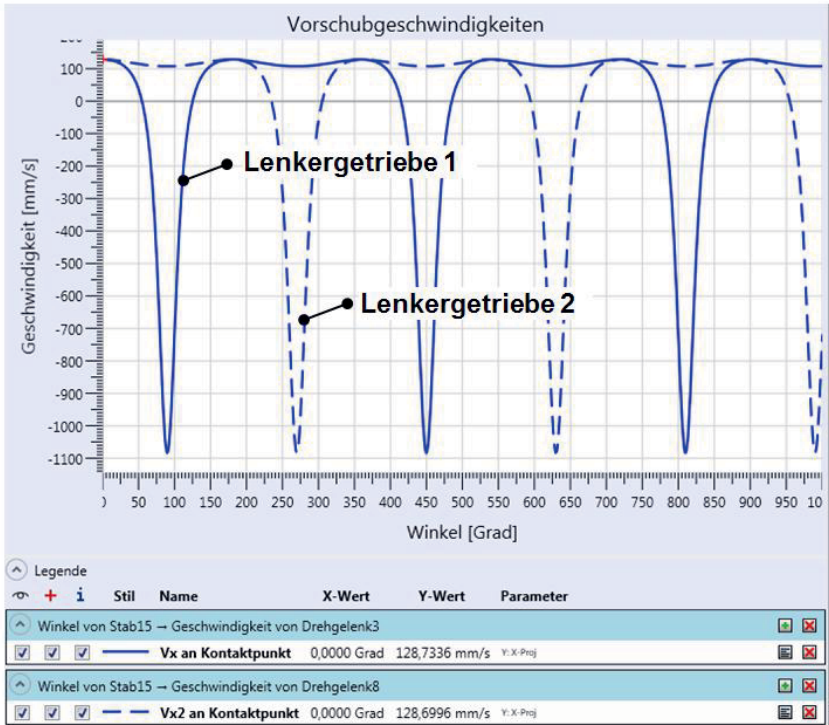


Abbildung 2-24: Geschwindigkeiten des Lenkerpunktes C, für beide Lenker dargestellt

Es zeigt sich, daß die Geschwindigkeitsänderungen (Abweichungen von  $v_{\max}=128$  mm/s) auf der Linearstrecke gering sind.

Trotz der prinzipiell möglichen Verwendung des Lenkerantriebes wurde letztlich davon Abstand genommen, da sich die konstruktive Ausführung der Koppelstelle mit dem Schubelement als zu kompliziert erwies. Für spätere Antriebsvarianten bleibt er allerdings eine Option. Zurückgegriffen wurde auf den in Abbildung 2-18 gezeigten Kettenantrieb.

Für die Prinzipbestätigung wurde die einfachste Variante eines Kettentriebes gewählt; die Krafteinleitung findet an den Stauscheiben statt (Abbildung 2-25).

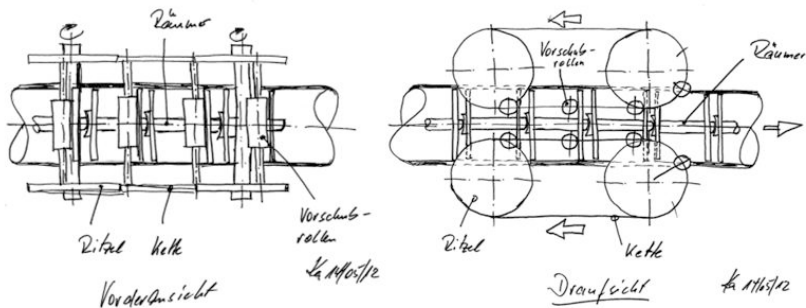
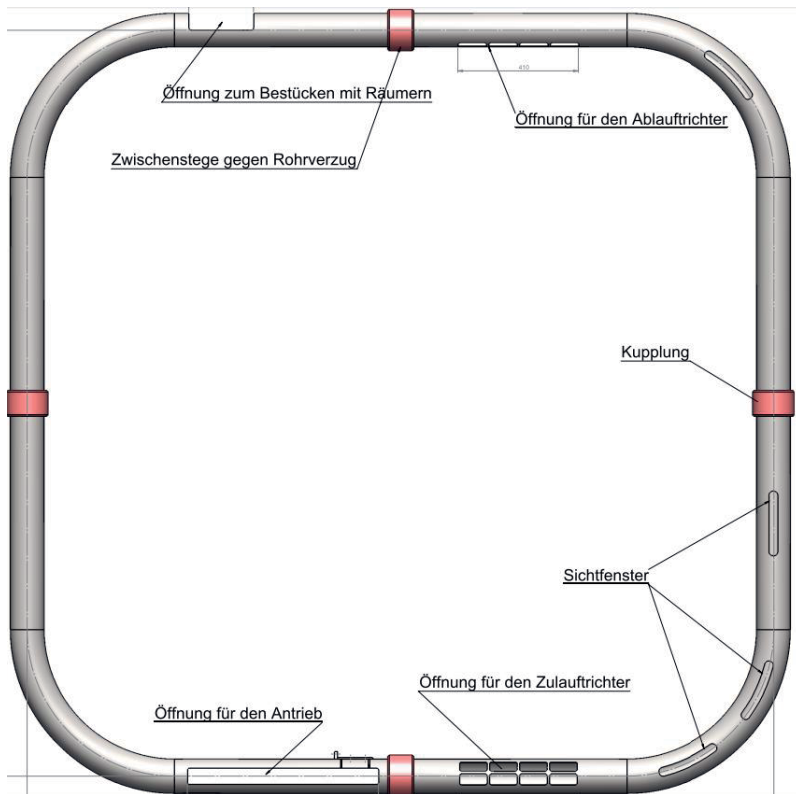


Abbildung 2-25: Skizze zur Antriebseinheit für Schubelementförderer mit Kettentrieb<sup>14</sup>

Ein einfacher Versuchsaufbau zeigte, daß das Prinzip des Kettenantriebs grundsätzlich die Funktion der Schüttgutförderung im Rohr erfüllt.

Der Versuchsaufbau beinhaltete eine kleine Förderstrecke (2-D Rohrstrecke in sogenannter O-Anordnung mit 4 x 90° Rohrbögen) mit Produktaufgabestation und Produktabgabestation. Die Gesamtabmessungen betrugen 2.500 x 2500 mm, als Rohrdurchmesser wurde ein Durchmesser  $d_a = 114$  mm gewählt (Abbildung. 2-26).

<sup>14</sup> Die Bezeichnung Räumer wurde in den Begriff Schubelement geändert.



**Abbildung 2-26: Rohrstruktur in einfacher 2-D in O-Anordnung für Konzeptuntersuchungen**

Untersuchungen an diesem Modell sollten auch nachweisen, daß die durch Verwendung von Kunststoffschubelementen entstehende elektrostatische Aufladung nicht zu einer Explosionsgefährdung führt<sup>15</sup>. Zum weiteren Nachweis der Anforderungserfüllung musste das Konzept hinsichtlich Skalierung für geforderte Förder-volumen unter industriellen Einsatzbedingungen bestätigt werden.

<sup>15</sup> Auch bei einem einfachen Versuchsstand müssen in der Industrie grundsätzlich die Rahmenbedingungen der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG berücksichtigt werden. Im Anhang I der Maschinenrichtlinie ist bezüglich Explosionsschutz folgendes festgehalten: Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass jedes Explosionsrisiko vermieden wird, das von der Maschine selbst oder von Gasen, Flüssigkeiten, Stäuben, Dämpfen und anderen von der Maschine freigesetzten oder verwendeten Stoffen ausgeht. Hinsichtlich des Explosionsrisikos, das sich aus dem Einsatz der Maschine in einer explosionsgefährdeten Umgebung ergibt, muss die Maschine den hierfür geltenden speziellen Gemeinschaftsrichtlinien entsprechen

---

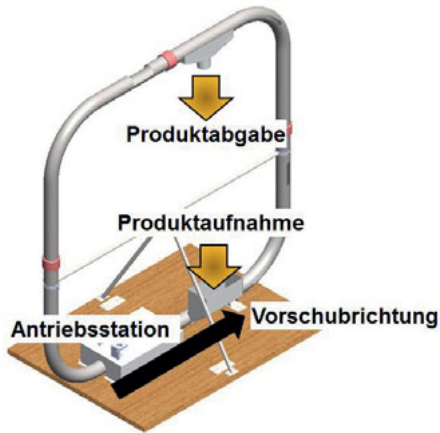
## 3 Konzept- und Prinzipbestätigung

### 3.1 Konzept des Versuchsmodells Schubelementeförderer

Die getroffenen Annahmen zum Schubelementeaufbau und zum Antrieb müssen experimentell überprüft werden. Das Modell soll grundsätzlich klären, ob sich ein Antriebskonzept mit Schubelementen realisieren lässt und ob die eingeleiteten Kräfte über die Rohrstruktur und die Schubelemente aufgenommen werden können. Das Versuchsmodell muss die elementaren Komponenten des Schubelementeförderers enthalten. Diese sind:

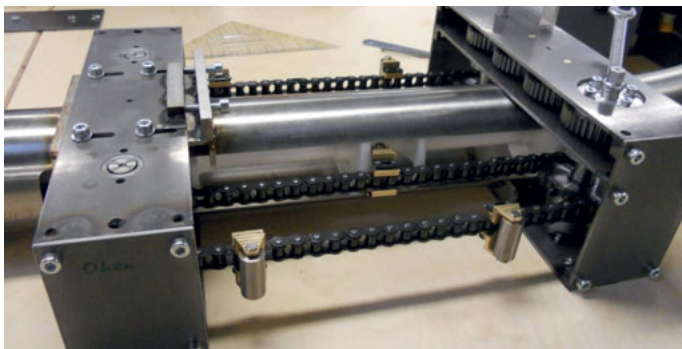
- das Rohr als Förderrohr mit Produkteinlauf und Produktauslauf,
- die Rohrbögen mit Verbindungsstellen,
- die Antriebsstation zur Förderung der Schubelemente,
- die Schubelemente.

Im Vergleich zum Rohrkettenförderer kann eine geänderte Anordnung gewählt werden. Der Antrieb kann unten angebracht werden, er muss in Förderrichtung vor dem Produkteinlauf liegen, weil in der Antriebsstation das Rohr geöffnet ist und Fördergut austreten könnte. Durch diese Lage des Antriebs muss das Rohr nicht die Reaktionskräfte und die Gewichtskraft der Antriebsstation aufnehmen und kann in der Wandstärke dünner als bei vergleichbaren Rohrkettenförderern ausgelegt werden. In Anlehnung an den Rohrstrukturbau aus der Saug- und Druckpneumatik wurden Rohre aus diesem Bereich gewählt.



**Abbildung 3-1: Versuchsmodell des Schubelementeförderers mit Produktaufnahme, Produktabgabe und Antriebsstation**

Die Vorschubbewegung der Schubelemente wird mit einem Kettentrieb realisiert. Es werden zwei Antriebsketten verwendet, die sich jeweils links und rechts neben dem Rohr befinden. Die Ketten tragen Mitnehmerbolzen, die die Antriebskraft auf die Schubelemente übertragen (Abbildung 3-2).

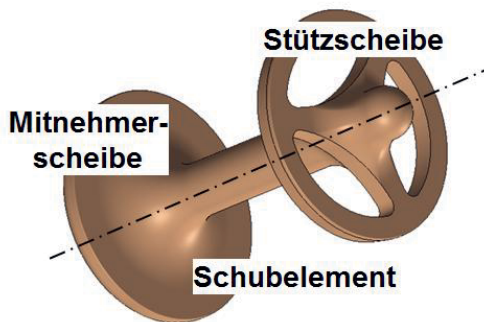


**Abbildung 3-2: Antrieb für Schubelementeförderer mit Kettentrieb**

Das Antriebssystem ist auf eine maximale Geschwindigkeit von 1,2 m/s ausgelegt. Grundsätzlich soll die Fördergeschwindigkeit im Bereich  $\leq 1\text{ m/s}$  liegen um sekundäre Explosionsschutzmassnahmen zur Vermeidung wirksamer Zündquellen (vergl. DIN EN 1127-1 und VDI Richtlinie 2263 Blatt 8.1) zu erfüllen. Primäre Schutzmassnahmen werden durch eine Minimierung der Fallhöhe, durch eine

geschlossene, staubdichte Bauweise und durch eine Aspiration (Entstaubungsvorrichtung) an den Produktaufgabe- und Produktabgabestellen vorgesehen.

Die Schubelemente wurden - wie in Kapitel 2.5 gezeigt - als Einzelelemente, mit jeweils Kugel und Kalotte<sup>16</sup> als Kopplungspartner zum Nachbarelement (siehe Abbildung 3-3) gestaltet. So kann ein 3-D fähiges System mit guten Führungseigenschaften und hoher Belastungsfähigkeit bei geringer Flächenpressung aufgebaut werden. Auch hier, wie beim untersuchten Rohrkettenförderer, sollten sich mindestens vier Schubelemente im 90° Bogen befinden. Von Bedeutung ist weiterhin die Gestaltung des Verhältnisses von Schubelementlänge zu Rohrdurchmesser. Das Längen-Durchmesserverhältnis darf nach Katterfeld [Kat-2005] unter Berücksichtigung des Höhen-Breiten-Verhältnisses bei der Auslegung von Bunkern und Silos nicht über 2:1 betragen, wenn der Spannungszustand in der Produktsäule nicht zur Verdichtung des Fördergutes führen und somit eine Förderung durch Druckkräfte oder wie beim Schubelementeförderer durch Schub verhindern soll (siehe passiver Grenzzustand des Schüttgutes Abschnitt 2.5). Für die Versuchseinrichtung wurde, auch unter Berücksichtigung der Kettenteilung, ein Längen / Durchmesserverhältnis von ca. 1,9:1 festgelegt.



**Abbildung 3-3: Grundsätzlicher Aufbau eines Schubelementes**

<sup>16</sup> Die Kugel-Kalotte Kombination erlaubt es auch, bei grösseren Flächenpressungen die Koppelstelle in Stahl auszuführen und hier anstelle der Kunststoffkugel eine Kugellagerkugel einzusetzen. Diese Kugeln sind rostfrei, gehärtet, mit besten Rundlaufeigenschaften. Der Schwenkwinkel zwischen den Schubelementen richtet sich nach den Radien der Rohrbögen.



**Abbildung 3-4: Schubelemente für das Versuchsmodell aus mehrteiligen Drehteile**

Für die Modelluntersuchungen wurden die Schubelemente (Abbildung 3-4) als Drehteile in geschraubter Ausführung gestaltet.



## 3.2 Aufbau des Versuchsmodells

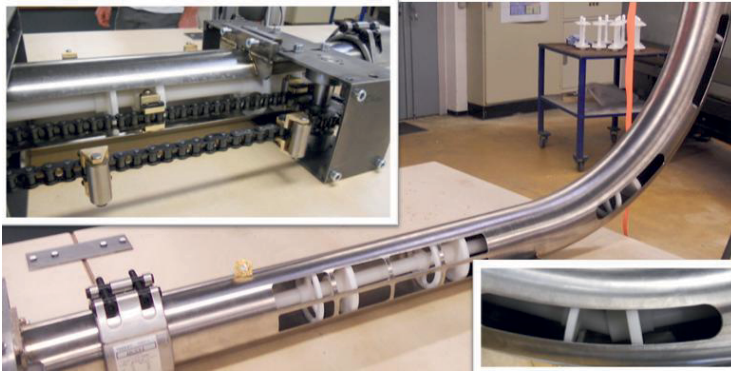
Das Modell für den Laborversuch mit den äußeren Abmessungen von ca. 2500 x 2500 mm (Breite x Höhe ) zeigt Abbildung 3-5. Der Rohraußendurchmesser beträgt 114,3 mm (4 Inch) bei einer Rohrwandstärke von 2 mm.

Es wurden Edelstahlrohre eingesetzt. Analog zu Bauelementen aus der pneumatischen Fördertechnik wurden die Rohre und Rohrverbinder aus bekannten Komponenten der Saug- und Druckpneumatik ausgewählt. Die Schenkellängen der Rohrbögen wurden so festgelegt, daß keine zusätzliche Rohrverbindung notwendig wurde.



**Abbildung 3-5: Versuchsmo­dell im Teilaufbau als O-Anordnung mit Produkteinlass und Produktauslass sowie Antriebsstation**

Die Abbildung 3-6 verdeutlicht Details der Versuchsanlage in den Bereichen des Antriebs, des Produkteinlasses und des Rohrbogens.



**Abbildung 3-6: Kettenantrieb, Rohröffnung im Bereich Produkteinlauf und Schubelemente im Rohrbogen im Sichtfensterbereich**

Der Antrieb erfolgte bewusst mit einer Handbohrmaschine (Abbildung 3-7), um erste Aussagen über die Leistungsaufnahme machen zu können.



**Abbildung 3-7: Schubelementefördererantrieb mit elektrischer Handbohrmaschine**

Da zum Zeitpunkt des Modellaufbaus noch keinerlei Rechenmodelle zur Verfügung standen, mussten im Analogieschluss aus bestehenden Rohrkettenförderern die zu erwartenden Kräfte und Leistungen für die Auslegung zugrunde gelegt werden.

### 3.3 Inbetriebnahme und erste Erkenntnisse

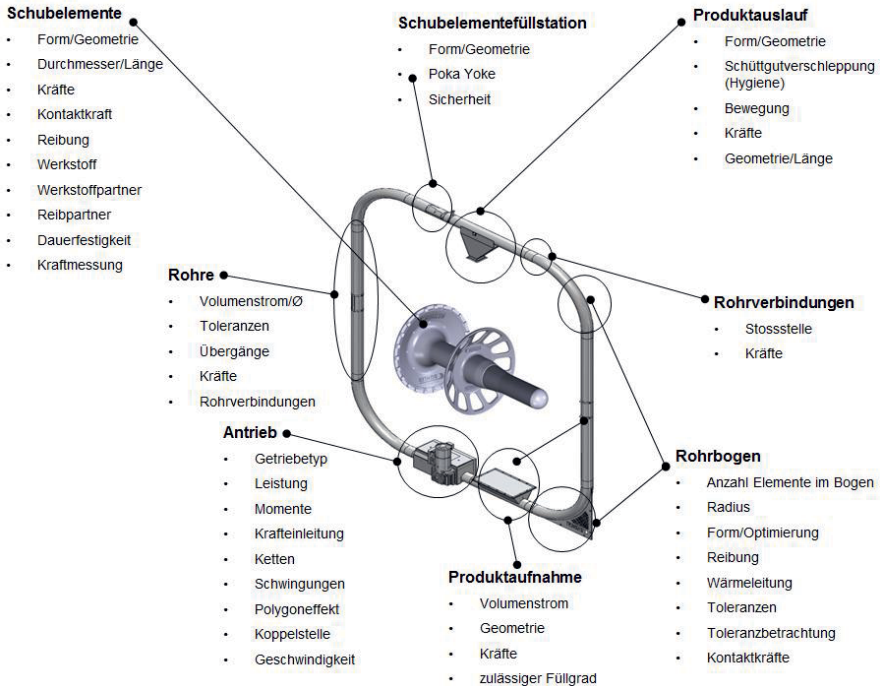
Die Laborversuche führten zu einer Reihe wichtiger Erkenntnisse:

- Das Schüttgut, eingefüllt in die Schubelemente, lies sich im Schubverband im Rohr fördern. Damit war das Arbeitsprinzip des Schubelementeförderers grundsätzlich bestätigt.
- Die Antriebsleistung der Handbohrmaschine mit 500 W Leistungsaufnahme reichte aus, um ca. 7 t Weizen pro Stunde auf 2,5 m Höhe zu transportieren.
- Die Reibung zwischen Schüttgut und Rohr, insbesondere im Rohrbogen, war nicht auffällig, d.h., es konnten keine heißen Rohrstellen festgestellt werden. Die Wärmeverteilung im Rohr blieb aber weiterhin Untersuchungsgegenstand.
- Das Einlaufen der Schubelemente aus der Fallstrecke in die Antriebsstation war störungsfrei.
- Der Auslauf der Schubelemente aus der Antriebsstation in das wieder geschlossene Rohrsystem war durch den sich dort ebenfalls befindlichen Rohrausschnitt (zum Einfüllen des Schüttgutes) gestört (die Schubelemente zeigten Schlagstellen). Einlaufhilfen bzw. Änderungen in der Ausschnittsgestaltung waren erforderlich. Durch Anordnung des Ausschnittes schräg zur Rohrachse konnten die Störungen beseitigt werden.
- Die Stabilität der Schubelemente erschien hinreichend, es kam zu keinen Beschädigungen, auch die Koppelstelle der einzelnen Schubelemente zwischen Kugel und Kalotte zeigte keinen Verschleiß.
- Beim Einlauf und Auslauf der Schubelemente in die Antriebsstation wurden Geschwindigkeitsschwankungen festgestellt, die sich letztlich auf die Ausführung des Kettenantriebes zurückführen ließen. Eine Neugestaltung des Kettenantriebes bei allen neu konzipierten Versuchsanlagen war erforderlich.

Die Laborversuche bestätigten die grundsätzliche Möglichkeit, Schüttgut im Rohr durch Schubelemente zu fördern. Die praxiswirksame Auslegung eines entsprechenden Schubelemente -Fördersystems erforderte allerdings die Entwicklung einer Vielzahl neuer und angepasster Grundlagen zur Berechnung, Dimensionierung und Gestaltung der einzelnen Systemkomponenten.

### 3.4 Systemrelevante Komponenten des Schubelementeförderers

Aus den Funktions-, Wirk-, Bau- und allgemeinen Systemzusammenhängen lassen sich ingenieurtechnische Aufgaben zur Auslegung, Dimensionierung, Berechnung, Konstruktion und weiteren theoretischen Untersuchungen festlegen. Abbildung 3-8 zeigt die Hauptkomponenten und Hauptbaugruppen des Schubelementeförderers<sup>17</sup>.



**Abbildung 3-8: Baustuktur Schubelementeförderer mit Hauptkomponenten und zugeordneten ingenieurtechnischen Fragestellungen**

In Abhängigkeit vom Wirkprinzip des Förderers sind dabei systemrelevante von allgemein maschinenbauüblichen Teilsystemen (Komponenten / Baugruppen) zu unterscheiden. Die Besonderheit des Förderprinzips erfordert also, daß vorwiegend die Teilsysteme im Gesamtsystem betrachtet werden, die die neuartige Förderfunktion garantieren.

<sup>17</sup> Der Schubelementeförderer der Bühler AG hat den Markenname TUBO.

Das sind:

- Schubelement,
- Rohr / Rohrbogen,
- Antrieb.

Hier stellen sich aufgrund des neuartigen Förderprinzips eine Reihe von Fragen, die bisher in der Literatur nicht explizit behandelt wurden (z.B. Kräfteverhältnisse im Rohr bei Schub). Andererseits sind Dimensionierungs- und Gestaltungsfragen für neuartige Bauelemente anzupassen. Damit ergeben sich zu den genannten Teilsystemen die einzelnen, zu untersuchenden Schwerpunkte:

- **Schubelement**

- **Geometrie**

- Prinzipielle Gestalt,
    - Längen- / Durchmesser Verhältnis,
    - Zentrierung und Rohrübergänge,
    - Abhängigkeit der Geometrie von den Schüttgutparametern,
    - Toleranzen Außenmaße zum Rohrdurchmesser.

- **Festigkeitsbetrachtungen**

- Druckkräfte im Schubverbund,
    - Kontaktkräfte im Rohrbogen,
    - Krafteinleitung über Mitnehmer,
    - Pressung an der Kontaktstelle zwischen den Schubelementen,
    - Dauerfestigkeitsuntersuchungen.

- **Werkstofffragen**

- Materialauswahl,
    - Reibung,
    - Kontaktkräfte im Rohrbogen,
    - Spezielle Herstellverfahren / Mehrkomponententechnik.

- **Rohr / Rohrbogen**

- **Geometrie**

- Rohrquerschnitt,
    - Wanddicke,
    - Rohrbogen bzw. Krümmerformen,
    - Einlass- / Auslassgeometrie,
    - Werkstofffragen,

- Verschleiß und Wärmeentwicklung.

- **Antrieb**

- Allgemeine Geradföhrungsgetriebe,
- Kettentrieb,
- Kinematik an der Koppelstelle Antriebselement / Schubelement,
- Krafeinleitung an der Koppelstelle Antriebselement / Schubelement,
- Einlauf- / Auslaufverhalten der Antriebselemente an der Koppelstelle,
- Kraftbestimmung für Druckstrecke,
- Leistungsbestimmung für Gesamtföhrersystem.

---

## 4 Theoretische und praktische Untersuchungen zu den Hauptbewegungswiderständen

Die erforderliche Antriebsleistung eines Fördersystems wird neben der Förderhöhe, dem Fördergut und dem gewünschten Massenstrom maßgeblich durch Reibungswiderstände beeinflusst. Bei einem Förderprinzip, das Schubkräfte auf sogenannte Schubelemente im Rohr ausübt, treten als zu beachtende Hauptbewegungswiderstände spezifische Reibungszustände zwischen Schubelement und Rohr und Schüttgut und Rohr auf. Die Dimensionierung und Gestaltung eines Schubelementförderers erfordert demnach die Kenntnis dieser Größen.

### 4.1 Leistungsberechnung

#### 4.1.1 Berechnungen zum Volumen- und Massenstrom

Die Berechnung des Volumen- und Massenstroms erfolgt analog zum Berechnungsmodell der Rohrkettenförderer [Kat-2005]. Das theoretisch mögliche, vom Schüttgut einnehmbare Volumen, ergibt sich durch Subtraktion des Volumens der Schubelemente  $V_{SE}$  vom idealen Rohrvolumen  $V$ . Das Verhältnis des tatsächlich ausfüllbaren Volumens zum idealen Rohrvolumen ist kleiner 1 und wird als Volumenwirkungsgrad mit  $\eta_V$  bezeichnet

$$\eta_V = \frac{V - V_{SE}}{V}. \quad (4.1)$$

Für die geplante 6 Inch Variante ergibt sich der Volumenwirkungsgrad bei einem Rohrinne Durchmesser von 161,9 mm, einer Schubelementlänge von 254 mm und einem Schubelementevolumen von 450 mm<sup>3</sup> zu  $\eta_V = 0,91$ . Damit errechnet sich der theoretische Volumenstrom  $I_v$  mit dem Volumenwirkungsgrad  $\eta_V$  und dem Füllgrad  $\eta_F$  zu:

$$I_v = \eta_F \cdot \eta_V \cdot A \cdot v = \eta_F \cdot \eta_V \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{Ri}^2 \cdot v. \quad (4.2)$$

Mit der Schüttdichte  $\rho_b$  wird der Massenstrom  $I_M$  berechnet.

$$I_M = \rho_b \cdot I_v = \rho_b \cdot \eta_F \cdot \eta_w \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{Ri}^2 \cdot v \quad (4.3)$$

Der Füllgrad beim Schubelementeförderer soll zwischen 0,6 und 0,7 betragen, höhere Füllgrade wären möglich, sind aber nur bei Förderhöhen kleiner 15 m sinnvoll. Der Volumenwirkungsgrad liegt beim 6 Inch Schubelementeförderer bei ca. 0,886. Die zu erwartende Produktdichte  $\rho_b$  variiert in der Regel zwischen 90 kg/m<sup>3</sup> bei getrocknetem Kaffee und 1400 kg/m<sup>3</sup> bei Futterkreide.

#### 4.1.2 Berechnung der Bewegungswiderstände

Katterfeld [Kat-2005] betrachtet zur Beschreibung des Förderverhaltens von Rohrkettenförderern, ihres Leistungsbedarfs und der auf die Kette wirkenden Kräfte die auftretenden Bewegungswiderstände. Hier wird ähnlich vorgegangen.

Die nachstehenden Berechnungsgrundlagen für Schubelementeförderer basieren vor allem auf der Arbeit von Katterfeld zum Rohrkettenförderer, gehen partiell jedoch über diese hinaus.

Analog zu vielen Arbeiten zu Schüttgutförderern (z.B. Trogkettenförderer [Sal-1987] und Schneckenförderer [Vol-2000]) soll im Weiteren ein aktiver Rankine'scher Spannungszustand im Schüttgut während der Förderung angenommen werden.

Aufgrund des kleinen Spaltmaßes, welches mit 2 mm umlaufend zwischen Mitnehmerscheibe und Rohrrinnenwand festgelegt wurde, wird weiterhin davon ausgegangen, daß kein signifikantes Verkleben der Partikel im Spalt zwischen Räumer und Rohr auftreten wird. Daher wird die Annahme getroffen, daß die für den Rohrkettenförderer formulierte Theorie des Spalteinflusses für den Schubelementeförderer nicht zutreffend ist.

#### Bewegungswiderstände in den horizontalen Wegabschnitten

Die Bewegungswiderstände in horizontalen Wegabschnitten des Rohres resultieren zum größten Teil aus der Reibung der Schubelemente am Rohr  $F_{hSE}$  und der Reibung des Schüttgutes an der Rohrrinnenwand  $F_{hSG}$ .

Der Anteil des Bewegungswiderstandes, der durch die Reibung zwischen den Schubelementen und der Rohrwandung infolge der Metergewichtskraft der Schubelemente  $q_{SE}$  verursacht wird, kann gemäß dem Coulomb'schen Reibungsgesetz durch folgende Gleichung beschrieben werden:



$$F_{hSE} = L \cdot q_{SE} \cdot \mu_{SE} \quad (4.4)$$

$L$  bezeichnet dabei die Länge des Wegabschnitts und  $\mu_{SE}$  den Reibwert zwischen Schubelement und Rohrwand.

In [Kat-2005] konnte gezeigt werden, daß für eine Berechnung des Bewegungswiderstands infolge Schüttgutreibung die reale kreisförmige Querschnittsfläche mit guter Genauigkeit durch eine quadratische Querschnittsfläche angenähert werden kann. Folgende weitere vereinfachende Annahmen wurden getroffen:

- Die Betrachtung der Schüttgutdrücke ist auf einen Schubelementeabschnitt mit der Länge eines Wegabschnittes begrenzt (zur Bezeichnung der Wegabschnitte im Rohr siehe auch Abbildung 4-4).
- Es wird eine horizontale Schüttgutoberfläche im Schubelementeabschnitt angenommen.
- Der Einfluss des im Schubelementeabschnitt mittig verlaufenden Schubelemente-Stegs auf das Schüttgut wird vernachlässigt.

Wie in [Kat-2005] ausführlich gezeigt, ergibt sich mit den getroffenen Vereinfachungen folgende Gleichung für den Bewegungswiderstand infolge Schüttgutreibung:

$$F_{hSG} = L \cdot q_F \cdot \left(1 + \frac{\eta_F}{\eta_V} \cdot \lambda_a\right) \cdot \mu_w \quad (4.5)$$

### Bewegungswiderstände in den vertikalen Wegabschnitten

Der Gesamtbewegungswiderstand in vertikalen Wegabschnitten kann in folgende Bestandteile zerlegt werden:

- Hubwiderstand der Schubelemente  $F_{vSE}$  sowie
- Hubwiderstand des Schüttguts und Bewegungswiderstand infolge Schüttgutreibung  $F_{vSG}$ .

Der Hubwiderstand der Schubelemente lässt sich unter Berücksichtigung der Hubhöhe  $H$  wie folgt berechnen:

$$F_{vSE} = H \cdot q_{SE} \quad (4.6)$$

Für die Berechnung des Schüttgut-Bewegungswiderstands kann die Scheibenelementemethode nach Janssen angewendet werden. Dazu werden die Kräfte an einem differentiell kleinen Abschnitt der vertikalen Fördergutsäule betrachtet. Auf die Herleitung der Gleichung soll hier verzichtet werden, da sie in [Kat-2005] ausführlich

dargestellt ist und sich keine Unterschiede zwischen dem Berechnungsmodell für Rohrkettenförderer und Schubelementeförderer ergeben.

Unter Berücksichtigung der Schubelementeteilung  $l_{TS}$  ergibt sich folgende Gleichung für  $F_{vSG}$ :

$$F_{vSG} = H \cdot q_F \cdot \frac{d_{Ri}}{4l_{TS}\mu_w\eta_V\eta_F\lambda_a} \left( e^{\frac{4}{d_{Ri}}\mu_w\lambda_a\eta_V\eta_F l_{TS}} - 1 \right). \quad (4.7)$$

### Bewegungswiderstände in geneigten Wegabschnitten

Für geneigte Wegabschnitte ergibt sich unter Berücksichtigung des Neigungswinkels  $\delta$  des Rohres folgende Berechnungsmöglichkeit:

$$F_\delta = (F_{hSE} + F_{hSG}) \cdot \cos \delta + (F_{vSE} + F_{vSG}) \cdot \sin \delta. \quad (4.8)$$

### Bewegungswiderstände in Rohrbögen

Für die Ermittlung der Bewegungswiderstände im Rohrbogen wurde in [Kat-2005] eine allgemeine Theorie für Rohrbögen mit beliebigen Raumlagen diskutiert, die hier übernommen und die als Grundlage der Modifikationen für den Schubelementeförderer anzusehen ist. Die Abbildung 4-1 zeigt das mechanische Modell :

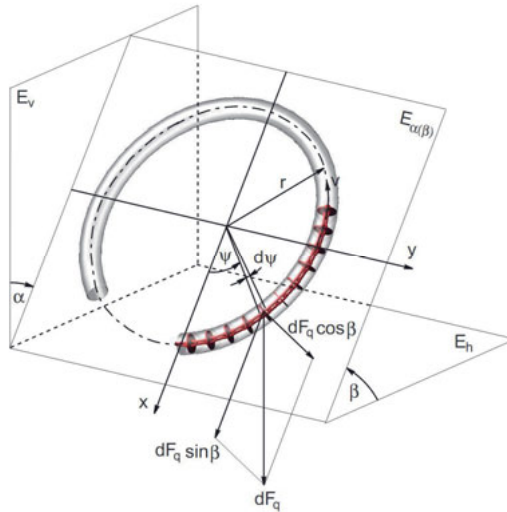


Abbildung 4-1: Allgemeines Berechnungsmodell für Rohrbögen. Im Falle eines vertikal stehenden Rohrbogen folgt für die Neigungswinkel  $\alpha$  und  $\beta$ :  $\alpha=0^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$  [Kat-2005]

Dazu betrachtet man einen Kreis mit dem Radius  $r$ , der die Mittellinie des Rohrbogens darstellt. Zur besseren Vorstellung ist in der Abbildung ein dreidimensionales Modell eines transparenten Rohrbogens mit einem Kettenstück eingeblendet. Für die theoretische Betrachtung spielt dies jedoch keine Rolle, da folgende Annahmen formuliert werden:

- Es wird eine Förderkette mit differentieller Kettenteilung angenommen, d.h. auf der gedachten Kette befinden sich unendlich viele Stauscheiben mit verschwindend kleinem Durchmesser. Die Ketten-Stauscheibenvorstellung kann direkt auf die Schubelemente im Schubelementeförderer übertragen werden.
- Der Reibvorgang reduziert sich damit auf eine Linienreibung zwischen dem auf die Mittellinie reduzierten Rohrbogen, die man sich als eine feststehende Stützlinie vorstellen kann und der auf die massenbelegte Mittellinie reduzierten Förderkette bzw. hier Schubelemente.

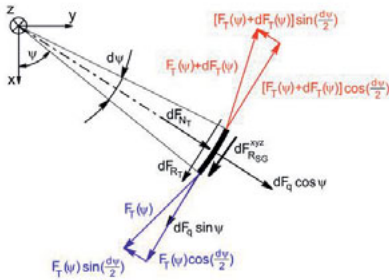
Der Berechnungsansatz lässt sich auf die Euler - bzw. Eytelwein'sche Gleichung zur Berechnung der Seilkräfte zurückführen. Nach dieser Theorie sind die entstehenden Kräfte im Zugmittel nur abhängig vom Reibwert zwischen Zugmittel und Trog sowie vom Umlenkwinkel. Die Kräfte sind somit unabhängig vom Umlenkradius, wenn ein biegeschlaffes Seil angenommen wird.

Da kein besserer analytischer Ansatzes vorliegt, wird mit diesen Annahmen gerechnet, aber wissend, daß weder beim Rohrkettenförderer noch beim Schubelementeförderer ein solches biegeschlaffes Seil exakt vorhanden ist.

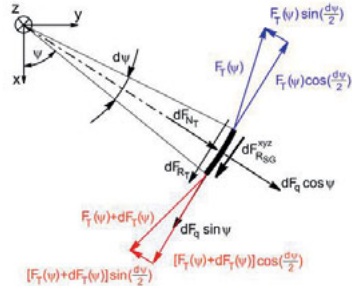
Für die in Abbildung 3-5 dargestellte Linienführung, auch als O-Anordnung bezeichnet, kann von vertikal stehenden Rohrbögen ausgegangen werden. Das vereinfacht die Berechnung.

Im Linienmodell wird das Kräftegleichgewicht an einem differential kleinen Bogenstück mit der Position  $\psi$  und dem Bogenwinkel  $d\psi$  betrachtet. Der Unterschied im Berechnungsmodell von Rohrkettenförderer und Schubelementeförderer wird in Abbildung 4-2 deutlich.

konventioneller Rohrkettenförderer:



Schubelementeförderer ("Druck-TUBO"):



**Abbildung 4-2: Vergleich der beiden Rohrbogen-Berechnungsmodelle für Rohrkettenförderer und Schubelementeförderer. Die größere Kraft  $F_T(\psi) + dF_T(\psi)$  (rot eingefärbt) wirkt an unterschiedlichen Enden des Rohrbogens**

Beim Rohrkettenförderer mit ziehendem Zugmittel werden die Kräfte im Rohrbogen in Förderrichtung größer, da das Kraftmaximum in der obenliegenden Antriebsstation auftritt. Beim Schubelementeförderer, der die Schubelemente und das Schüttgut durch das Rohrsystem drückt, entstehen die größten Kräfte in der untenliegenden Antriebsstation. Daraus folgt, daß beim Schubelementeförderer die Kräfte im Rohrbogen abnehmen.

Für den Schubelementeförderer mit vertikal stehenden Rohrbogen kann folgendes Kräftegleichgewicht aus Abbildung 4-2 (rechts) abgeleitet werden:

Radial:

$$dF_{NT} + dF_q \cos \psi - F_T(\psi) \sin \frac{d\psi}{2} - (F_T(\psi) + dF_T(\psi)) \sin \frac{d\psi}{2} = 0. \quad (4.9)$$

Tangential:

$$-F_T(\psi) \cos \frac{d\psi}{2} + (F_T(\psi) + dF_T(\psi)) \cos \frac{d\psi}{2} + dF_{RT} + dF_{RSG}^{xyz} + dF_q \sin \psi = 0. \quad (4.10)$$

Aufgrund der differentiellen Kleinheit von  $d\psi$  können folgende vereinfachenden Annahmen getroffen werden:

$$\cos \frac{d\psi}{2} \approx 1, \quad \sin \frac{d\psi}{2} \approx \frac{d\psi}{2} \quad \text{und} \quad dF_T(\psi) \frac{d\psi}{2} \approx 0. \quad (4.11)$$

Für die Reibkraft in tangentialer Richtung  $dF_{RT}$  gilt:

$$dF_{RT} = \mu_{SE} dF_{NT} = \mu_{SE} (F_T(\psi) d\psi - F_q \cos \psi). \quad (4.12)$$

Für die Gewichtskraft der Schubelemente gilt:

$$F_q = q_{SE} \mu_{SE} d\psi. \quad (4.13)$$

Die Reibung des Schüttguts am Rohr wird durch die vertikale und horizontale Komponente analog den Gl. 4.5 und 4.7 berechnet:

$$F_{RSG}^{xyz} = F_{hSG_{Bogen}} + F_{vSG_{Bogen}}. \quad (4.14)$$

Für eine differentiell kleine horizontale Länge  $r \cdot d\psi \cdot \cos \psi$  folgt für  $F_{hSG_{Bogen}}$ :

$$F_{hSG_{Bogen}} = r d\psi \cos \psi q_F \mu_W \left( 1 + \frac{\eta_F}{\eta_V} \lambda_a \right). \quad (4.15)$$

Für eine differentiell kleine vertikale Länge  $r \cdot d\psi \cdot \sin \psi$  folgt für  $F_{vSG_{Bogen}}$ :

$$F_{vSG_{Bogen}} = \frac{r d\psi \sin \psi q_F d_{Ri}}{4 l_{TS} \mu_W \eta_V \eta_F \lambda_a} \left( e^{\frac{4}{d_{Ri}} \mu_W \lambda_a \eta_V \eta_F l_{TS}} - 1 \right). \quad (4.16)$$

Nach Durchführung der Vereinfachungen gemäß Gl. (4.11) und dem Einsetzen von Gl. (4.12)-(4.16) in die Gl. (4.9) und (4.10) kann für vertikal stehende Rohrbögen in Schubelementeförderern folgende Differentialgleichung aufgestellt werden:

$$\frac{dF_T(\psi)}{d\psi} + \mu_{SE} F_T(\psi) = -\mathcal{A} \sin \psi - \mathcal{B} \cos \psi. \quad (4.17)$$

Dabei wurden folgende Abkürzungen verwendet:

$$\mathcal{A} = \frac{r q_F d_{Ri}}{4 l_{TS} \mu_W \eta_V \eta_F \lambda_a} \left( e^{\frac{4}{d_{Ri}} \mu_W \lambda_a \eta_V \eta_F l_{TS}} - 1 \right) + r q_{SE}. \quad (4.18)$$

$$\mathcal{B} = r q_F \mu_W \left( 1 + \frac{\eta_F}{\eta_V} \lambda_a \right) - r q_{SE} \mu_{SE}. \quad (4.19)$$

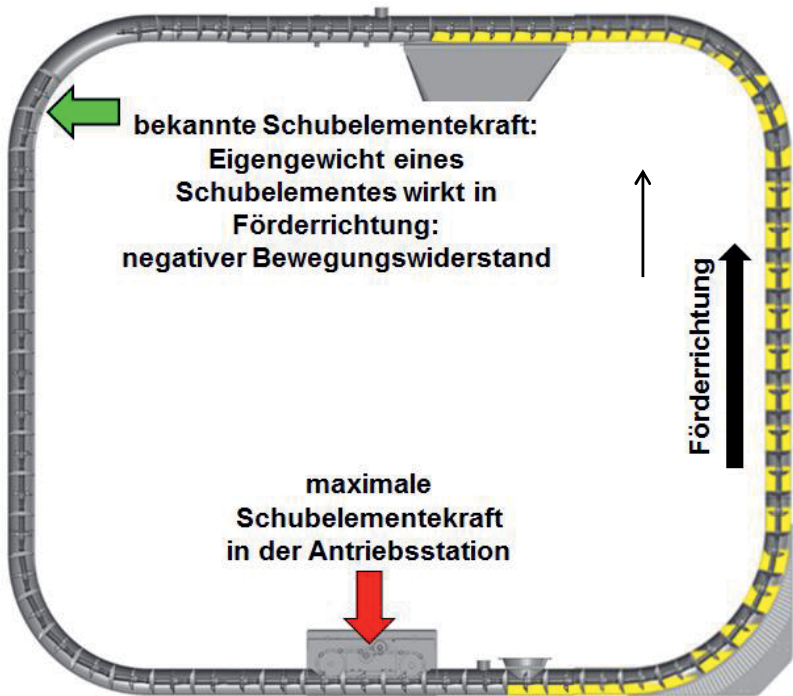
Die rekursive Lösung dieser inhomogenen linearen Differentialgleichung wird, wieder in Analogie zu Katterfeld, durch Variation der Konstanten ermittelt. Es ergibt sich folgende Lösung:

$$\begin{aligned}
 F_T(\psi) = e^{-\mu_{SE}(\psi-\psi_0)} & \left[ F_T(\psi_0) + \frac{\mathcal{A}(\mu_{SE} \sin \psi_0 - \cos \psi_0)}{\mu_{SE}^2 + 1} \right. \\
 & + \left. \frac{\mathcal{B}(\mu_{SE} \cos \psi_0 + \sin \psi_0)}{\mu_{SE}^2 + 1} \right] - \frac{\mathcal{A}(\mu_{SE} \sin \psi - \cos \psi)}{\mu_{SE}^2 + 1} \\
 & - \frac{\mathcal{B}(\mu_{SE} \cos \psi + \sin \psi)}{\mu_{SE}^2 + 1}.
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Im Vergleich zur Lösung für den Rohrkettenförderer erfolgt damit nur eine Vorzeichenumkehr. Die Lösung der Differentialgleichung bestimmt die Kraft am Ende der Rohrbogens  $F_T(\psi)$  in Abhängigkeit von der Kraft am Anfang des Rohrbogens  $F_T(\psi_0)$ .

Das Berechnungsmodell zeigt, daß die Berechnung von Schubelementeförderern der Berechnung von Rohrkettenförderern weitestgehend entspricht. Nur bei der Berechnung des Rohrbogens ergibt sich eine neue Berechnungsgleichung. Im Vergleich zum Rohrkettenförderer kehrt sich das Kräftegleichgewicht um.

Der wesentliche Unterschied in der Berechnung von Schubelemente- und Rohrkettenförderer ist aber der, daß die Kraft auf die Schubelemente nur an einer Stelle als bekannt angenommen werden kann, nämlich am Beginn des vertikalen Rücktrums (s. Abbildung 4-3, grüner Pfeil). Wird vorausgesetzt, daß das Rohrsystem nicht komplett mit Schubelementen gefüllt ist, fällt am Beginn des vertikalen Rücktrums ein einzelnes Schubelement durch sein Gewicht nach unten. Da die Gravitation in Förderrichtung wirkt, wird der Bewegungswiderstand an dieser Stelle negativ.



**Abbildung 4-3: Kräfte am Schubelement**

Beim Rohrkettenförderer ist die Kraft an der Spannstation bekannt. Für Rohrkettenförderer können die Bewegungswiderstände in Förderrichtung in den einzelnen Wegabschnitten des Fördertrums, von der Spannstation ausgehend bis zum Antrieb, berechnet werden. Danach erfolgt eine Berechnung der Bewegungswiderstände im Rücktrum entgegengesetzt zur Förderrichtung.

Beim Schubelementeförderer müssen zur Berechnung der größten Schubelementekraft (s. Abbildung 4-3, roter Pfeil) zunächst die Bewegungswiderstände entgegengesetzt zur Förderrichtung berechnet werden.

Die Einteilung in Wegabschnitte erfolgt analog zum Rohrkettenförderer. Ein neuer Wegabschnitt beginnt dort, wo eine Unstetigkeitsstelle, also eine Veränderung der Beladung oder der Linienführung auftritt. Die Abbildung 4-4 zeigt die Einteilung in Wegabschnitte für den beschriebenen Schubelemente-Kreisförderer.

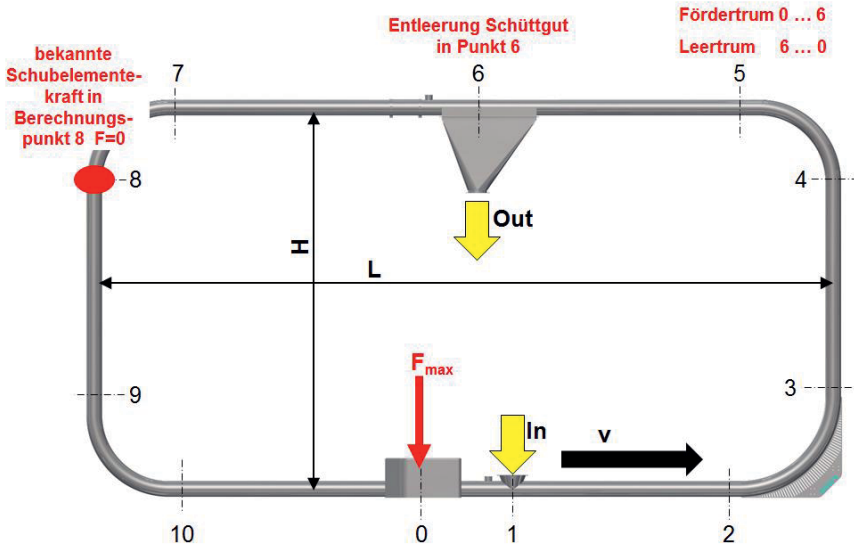


Abbildung 4-4: Einteilung eines Schubelemente-Kreisförderers in Weg-bzw. Berechnungsabschnitte

Ausgehend von der bekannten Schubelementekraft an Punkt 8 (s. Abbildung 4-4), können die Bewegungswiderstände entgegengesetzt der Förderrichtung bis zum Punkt 0 berechnet werden.

Da die Bewegungswiderstände entgegengesetzt zur Förderrichtung ansteigen, können sie für horizontale und vertikale Wegabschnitte addiert werden. Es folgt also zum Beispiel bei bekannter Schubelementekraft am Punkt 7 für den Punkt 6:

$$F_6 = F_7 + F_{hR} + F_{hSG} = F_7 + L_{6-7} \cdot q_{SE} \cdot \mu_{SE} + L_{6-7} \cdot q_F \cdot \left(1 + \frac{\eta_F}{\eta_V} \cdot \lambda_a\right) \cdot \mu_w \quad (4.21)$$

Für die Kraft am Anfang des vertikalen Fördertrunks (Punkt 3) folgt dementsprechend:

$$F_3 = F_4 + F_{vR} + F_{vSG},$$

$$F_3 = F_4 + H_{3-4} \cdot q_{SE} + H_{3-4} \cdot q_F \cdot \frac{d_{Ri}}{4l_{TS}\mu_w\eta_V\eta_F\lambda_a} \left( e^{\frac{4}{d_{Ri}}\mu_w\lambda_a\eta_V\eta_F l_{TS}} - 1 \right). \quad (4.22)$$

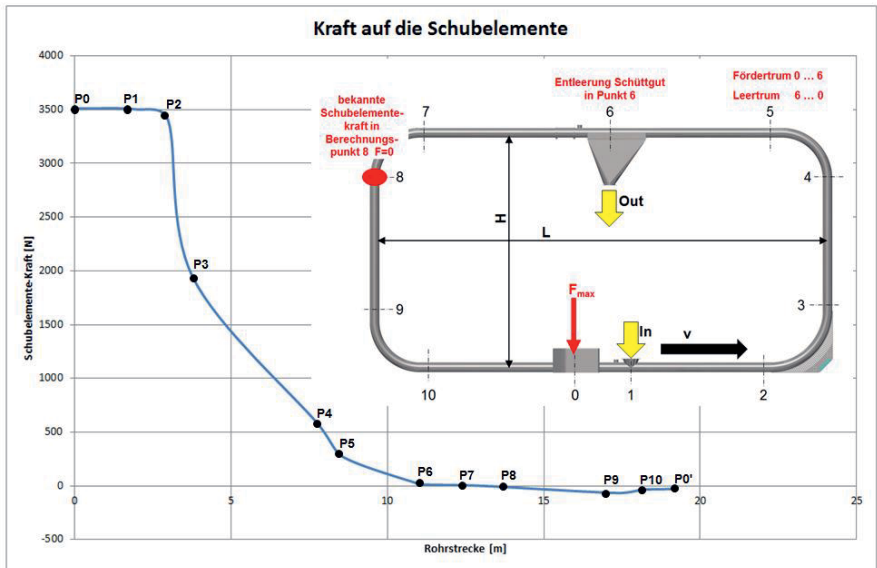
Für die Berechnung der Bewegungswiderstände im Rohrbogen muss die Gl. (4.20) umgestellt werden, da die Kraft am Ende des Rohrbogens  $F_T(\psi)$  bekannt ist und die Kraft am Anfang des Rohrbogens  $F_T(\psi_0)$  ausgerechnet werden muss.



Es folgt:

$$F_T(\psi_0) = e^{\mu_{SE}(\psi - \psi_0)} \left[ F_T(\psi) + \frac{\mathcal{A}(\mu_{SE} \sin \psi - \cos \psi)}{\mu_{SE}^2 + 1} + \frac{\mathcal{B}(\mu_{SE} \cos \psi + \sin \psi)}{\mu_{SE}^2 + 1} \right] - \frac{\mathcal{A}(\mu_{SE} \sin \psi_0 - \cos \psi_0)}{\mu_{SE}^2 + 1} - \frac{\mathcal{B}(\mu_{SE} \cos \psi_0 + \sin \psi_0)}{\mu_{SE}^2 + 1}. \quad (4.23)$$

Es ergibt sich ein Verlauf der Schubelementkräfte nach Abbildung 4-5 für einen Schubelementeförderer in O-Anordnung.



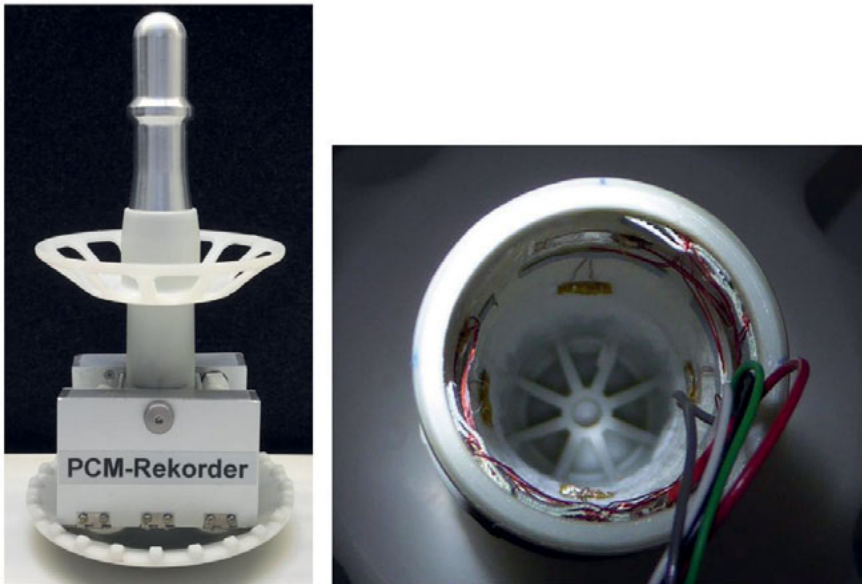
**Abbildung 4-5: Verlauf der Schubelementkräfte eines Schubelemente-Kreisförderers in O-Anordnung an den Rohrstreckenpunkten P0 über P10 bis P0'<sup>18</sup>**

Der dargestellte qualitative Kraftverlauf stellt sich unabhängig vom Beispiel bei einer O-Anordnung ein. Es zeigt sich damit, daß die größte Last auf das Schubelement stets im Bereich der Antriebsstation liegen wird.

<sup>18</sup> Im Punkt P8 ist die Kraft 0. Das Schubelement fällt durch die Gewichtskraft auf die Schubelementesäule, die am Antrieb ansetzt. Die Gewichtskraft dieser Säule ist hier negativ dargestellt, da der Antrieb um die Gewichtskraft der Schubelementesäule entlastet wird.

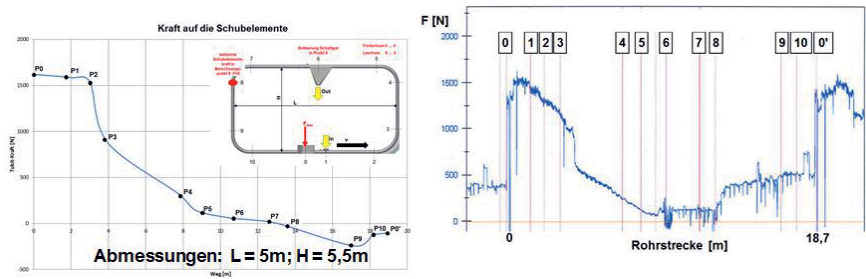
### 4.1.3 Überprüfung der Berechnungsergebnisse mittels Kraftmesssystem im Schubelement

Das Theoriemodell muss experimentell überprüft werden. Hierzu werden die Kräfte im System gemessen. Es wurde ein Schubelement mit DMS<sup>19</sup> und einer Aufzeichnungsbox versehen (Abbildung 4-6) in den Förderkreislauf eingebracht. Gemessen werden die Kräfte, die im Druckstab des Schubelementes entlang der Linienführung auftreten. Geschwindigkeit, Schüttgutdichte, Füllgrad und Position der Messvorrichtung sind bekannt. Die gemessenen Kräfte werden mit den theoretisch berechneten Werten in Abbildung 4-7 verglichen. Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigen, daß die gemessenen Werte in der Tendenz mit den berechneten Werten einhergehen, allerdings liegen die theoretischen Werte vom Kraftniveau etwas höher. Hier gilt es im weiteren, die angenommenen Wandreibungswerte für die Schüttgüter und Schubelemente zu überprüfen.



**Abbildung 4-6: Messschubelement mit Aufzeichnungsgerät und Spannungsversorgung und Blick in die Messspitze mit eingeklebten DMS**

<sup>19</sup> DMS sind **Dehnungs-Mess-Streifen**. Mit DMS werden stauchende und dehnende Verformungen an Bauteiloberflächen gemessen. Bei geringen Verformungen ändern sie ihren elektrischen Widerstand. In den Schubelementen wurden jeweils zwei Wheatstone'sche Messbrücken geklebt um Kräfte im Betrieb messen zu können. Die Messdaten wurden während der Messfahrten aufgezeichnet und anschließend ausgelesen. Eine vorherige Kalibrierung ermöglichte eine direkte Zuordnung der gemessenen Werte.



**Abbildung 4-7: Darstellung der theoretische Berechnung und Messaufzeichnung einer Messfahrt mit Schüttgut im 6 Inch Schubelementförderer**

Auch Messungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zeigen, daß wie das Theoriemodell vorhersagt, die Fördergeschwindigkeit auf den Kraftverlauf des Schubelementetransports keinen Einfluss hat.

#### 4.1.4 Berechnung der Antriebsleistung

Das Theoriemodell zur Berechnung der Antriebsleistung basiert auch auf Erkenntnissen zum Leistungsbedarf für Rohrkettenförderer [Kat-2005]. Die maximale Schubelementekraft in der Antriebsstation, reduziert um die Kraft im Leertrum in der Antriebsstation, ergibt die Vorschubkraft, die vom Antrieb erzeugt werden muss. Aus der Vorschubkraft berechnet sich das an der Antriebswelle erforderliche Drehmoment.

$$M_{an} = \frac{F_{ges SE} \cdot d_{Teilkreis}}{2} \quad (4.24)$$

In Abhängigkeit von der gewünschten Vorschubgeschwindigkeit der Schubelemente können nun Motor und Getriebe ausgelegt werden.

Um einen quantitativen Vergleich der Leistungen unterschiedlicher Förderprinzipien erstellen zu können [Krau-1996], kann ein spezifischer Energie- bzw. Leistungsfaktor  $\psi_P$  berechnet werden [Kat-2010]. Dieser stellt das Verhältnis der notwendigen Antriebsleistung ( $\Sigma F_W \cdot v$ ) zur Transportleistung ( $l_m \cdot g \cdot L$ ) dar.

Werden spezifische Randbedingungen und Bewegungswiderstände nicht berücksichtigt, ergeben sich für die in Tabelle 4-1 genannten Förderprinzipie spezifische Leistungsbedarfe.

Bei Rohrkettenförderern liegt der spezifische Leistungsfaktor  $\psi_P$  demnach zwischen 0,6 und 1,5 (vergl. Tabelle4-1).

Förderprinzip	Spezifischer Leistungsfaktor $\psi_P$
Gurtförderer, Wellkantenförderer	$\psi_P = f = 0,02 \dots 0,04$
Trogkettenförderer, Rohrkettenförderer	$\psi_P = 0,6 \dots 1,5$
Schneckenförderer	$\psi_P = 2 \dots 4$
Pneumatische Flugförderung	$\psi_P = 3 \dots 5$

**Tabelle 4-1: Spezifischer Leistungsfaktor für unterschiedliche Förderprinzipien [Krau-1996]**

Für den Schubelementeförderer kann aufgrund des günstigen Verhältnisses der Schubelemente-Meterlast zur Schüttgut-Meterlast der spezifische Leistungsfaktor  $\psi_P$  zu 0,5 bis 0,7 berechnet werden. Der Schubelementeförderer ist damit energetisch günstiger einzusetzen als vergleichbare Kettenförderer.

Für den 6 Inch Schubelementeförderer lassen sich folgende Werte berechnen<sup>20</sup> (siehe Abbildung 4-8).

---

<sup>20</sup> Für den 6 Inch Schubelementeförderer ergibt sich eine Meterlast von ca. 16 N/m ohne Schüttgut, vergleichbare Werte für einen Rohrkettenförderer liegen bei > 50N/m.

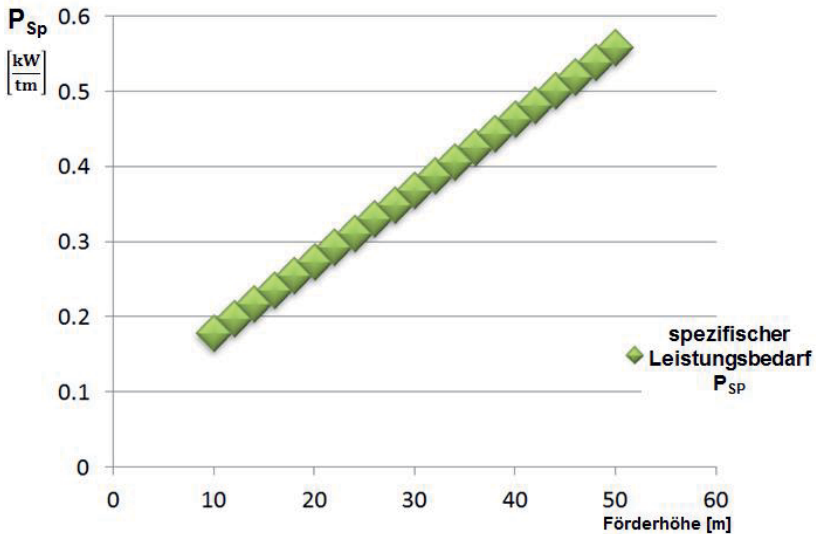
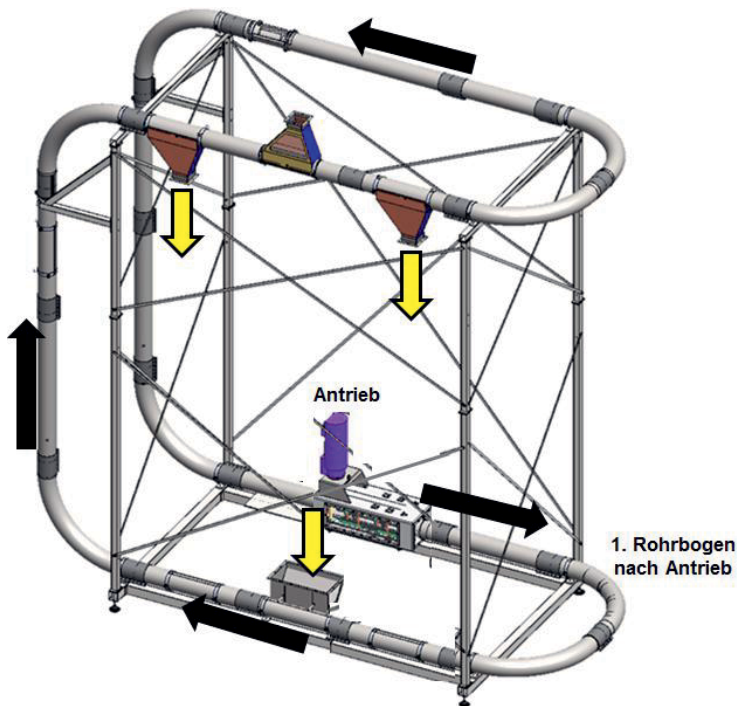


Abbildung 4-8: Spezifischer Leistungsbedarf für den 6 Inch Schubelementeförderer in Abhängigkeit von der Förderhöhe für Rohweizen mit einer Dichte von  $750 \text{ kg/m}^3$

Da es sich beim Schubelementeförderer um ein reibungsbehaftetes Förderprinzip mit Schüttgutreibung im Rohr und einer Reibung der Schubelemente auf der gesamten Förderstrecke handelt, wird der spezifische Leistungsbedarf in Abhängigkeit von der Linienführung und der Förderweglänge und -höhe grösser. Die aktuell berechneten Werte bleiben aber stets unter den Werten, die mit Trogkettenförderern und Rohrkettenförderern erreicht werden.

## 4.2 Rohrbogenuntersuchungen

Die Reibungsverluste werden entscheidend durch die Linienführung und die Förderhöhe beeinflusst. Um große Reibungsverluste im System darstellen zu können, wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der zunächst eine horizontale Umlenkung von  $180^\circ$  vorsieht, bevor die Förderung als vertikale Förderstrecke weitergeführt wird. So lassen sich bei geringen Förderhöhen hohe Kräfte im Förderstrang darstellen. Abbildung 4-9 zeigt den schematischen Aufbau. Die größten Reibungsverluste werden nach dem Berechnungsmodell im ersten Rohrbogen nach der Antriebsstation erwartet.



**Abbildung 4-9: Versuchsaufbau eines Schubelementeförderers mit horizontaler 180° Umlenkung zur Erzeugung großer Schubkräfte und Reibungskräfte**

Temperaturmessungen, die entlang der gesamten Förderstrecke am Versuchsaufbau vorgenommen wurden, bestätigten die Annahmen. Die Messungen zeigen, daß die höchsten Temperaturen am Rohraußenbogen des ersten Rohrbogens nach der Antriebsstation entstehen. Es konnten Temperaturen von über 80°C unter Last an der Rohraußenwand des ersten Rohrbogens nach der Antriebsstation (im hinteren Bildteil der Fotoaufnahme in Abbildung 4-10) mit einem Laser – Temperaturmessgerät gemessen werden.

Als Material für den Rohrbogen wurde im Versuch Edelstahl verwendet aus der Kenntnis heraus, daß hier - gegenüber normalem Stahl - eine um den Faktor 4 grin-

gere Wärmeleitfähigkeit vorliegt<sup>21</sup> und damit örtliche Wärmenester besser lokalisiert werden können.

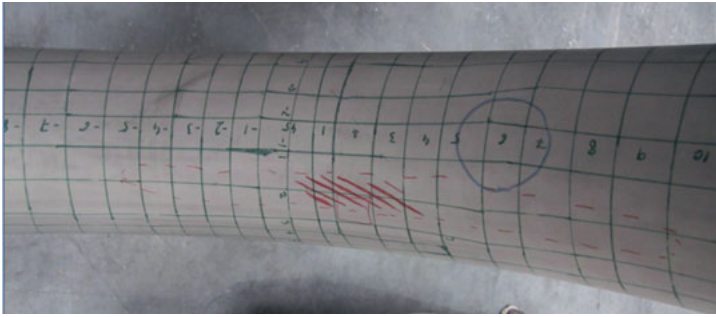


**Abbildung 4-10: Rohrbogen nach der Antriebsstation**

Die in Abbildung 4-11 auf dem Rohrbogen aufgetragenen Quadrate dienen der Kartierung und Zuordnung der Messwerte.

Die Auswertung der Messungen ergab eine örtlich stark unterschiedliche Temperaturverteilung mit lokalen, teilweise in wechselnder rhythmischer Abfolge liegenden Spitzenwerten.

<sup>21</sup> Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Stahl liegt bei ca.  $50 \dots 58 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ , von Edelstahl bei ca.  $14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ . Die dünne Rohrwandstärke von 3,2 mm und die Wahl des Werkstoffes Edelstahl erschweren die Wärmeableitung.



**Abbildung 4-11: Rohrbogen mit Messraster zur Temperaturmessung**

Höhere Temperaturen signalisieren höhere Verlustleistungen, die vom Antriebssystem ausgeglichen werden müssen. Sie erzwingen weiterhin Einschränkungen bei der Materialauswahl der Schubelemente.

Da im Rohrbogenradius offensichtlich sehr komplexe Reibungsverhältnisse vorliegen, muss der Einfluss der Rohrbogengeometrie genauer untersucht werden.

### 4.2.1 Überlegungen zur Rohrbogengeometrie

Das Berechnungsmodell zeigt, daß mit größer werdendem Rohrbogenradius die Antriebsleistung und die max. Kraft am Schubelement kleiner werden. Daneben scheint aber auch die Schubelementlänge einen Einfluss auf die Verlustreibung im System zu haben. Die Länge der Schubelemente im Verhältnis zum Rohrbogenradius wurde unter Nutzung von Erkenntnissen bei Rohrkettenförderern so festgelegt, daß sich stets mindestens vier Schubelemente in einem  $90^\circ$  Rohrbogenabschnitt befinden müssen. Gestützt wird diese Festlegung aus Schadensfällen bei Rohrkettenförderern, bei denen an Umlenkstellen Felgenreäder eingesetzt wurden. Wird der Felgendurchmesser zu klein gewählt, werden die radialen Kräfte auf den Stirnflächen der Stauscheiben so groß, daß diese einknicken können<sup>22</sup> (siehe Abbildung 2-6).

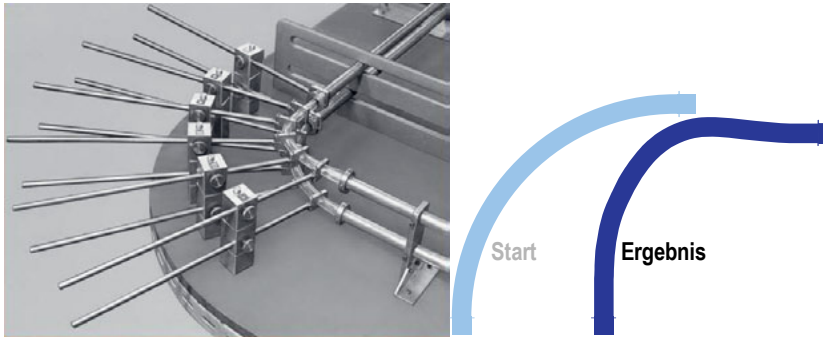
In weiteren Versuchen musste deshalb ermittelt werden, ob die Länge der Schubelemente und der Rohrbogenradius einen messbaren Einfluss auf die Verlustleistung im ersten Rohrbogen haben.

Untersuchungen von Rechenberg [Rec-1973] in den siebziger Jahren für fluiddurchströmte Rohre zeigten, daß der klassische  $90^\circ$  und  $180^\circ$  -Rohrbogenkrümmer nicht

<sup>22</sup> Katterfeld beschreibt in [Kat-2005], dass die Bestimmung der Anzahl der Stauscheiben auf der Umlenkrolle trotz vereinfachter Annahmen nur schwierig analytisch beschreibbar ist. Erfahrungen bei der BÜHLER AG haben gezeigt, dass die Radien der Umlenkstationen hinreichend groß gewählt werden müssen, da sonst ein Versagen der Stauscheiben zu befürchten ist.



immer als optimale Rohrbogenform angesehen werden können. Seine Berechnungs- und Optimierungsergebnisse mit Evolutionsalgorithmen ergaben Bogenformen, die auch im Experiment bis zu 9% weniger Strömungsverluste erzeugten<sup>23</sup> (Abbildung 4-12).



**Abbildung 4-12: Versuchsaufbau einer flexiblen Rohrumlenkung zur Optimierung des 90° Viertelkreises mittels Mutations-Selektions-Prinzips von Rechenberg [Rec-1975], Startbogen und Ergebnis**

Aus dem Maschinenbau ist bekannt, daß die klassische Kerbgestaltung zur Minimierung von Randspannungen auch nicht grundsätzlich durch einfache Kreisbögen realisiert werden kann. Die im Versuch der TU Berlin gefundene Form ähnelt der Form der Entlastungskerbe nach Mattheck [Mat-2003; Mat 2006; Mat-2010]. Mattheck untersucht die Spannungen in Bauteilen und reduziert die Kerbspannungen mit Seileckverfahren<sup>24</sup>. Auch hier nimmt die Krümmung stetig zu, übersteuert allerdings nicht wie in Rechenbergs gefundener Form (Abbildung 4-13).

<sup>23</sup> Rechenberg führte seinerzeit einen Versuch zur Optimierung einer rechtwinkligen Rohrumlenkung durch [Rec-1973]. Ziel war es, das Mutations-Selektions-Prinzip der biologischen Evolution zur Leistungssteigerung technischer Systeme anzuwenden. Im Versuchsaufbau wurden zwei Kunststoffschlauchkrümmen im Viertelkreis angebracht. Ein Krümmer blieb in dieser Lage, während der andere nach dem Evolutionsalgorithmus ständig variiert wurde. Die Druckdifferenz zwischen den beiden Krümmern zeigte eine Verbesserung oder Verschlechterung des variierten Krümmers an. Hier wurde eine Lösung gefunden, die dem Strömungstechniker vorher nicht bekannt war. Die optimierte Krümmerform weicht vom Standardviertelkreis schon im Einlauf ab, da der Einstieg nicht über einen plötzlichen Krümmungssprung beginnt. Die gefundene Form beginnt mit einer stetig zunehmenden Krümmung und am Auslauf findet sogar eine Krümmungsumkehr statt.

<sup>24</sup> C. Mattheck reduziert die Kerbspannungen bei Bauteilen, die klassischerweise mit einem Radius reduziert werden, je nach Lastfall und Abmessungsverhältnisse um mehr als 25%. Die Entlastungskerbe wird mit Hilfe des Seileckverfahrens konstruiert. Die gefundenen Punkte werden mit einem Spline verbunden.

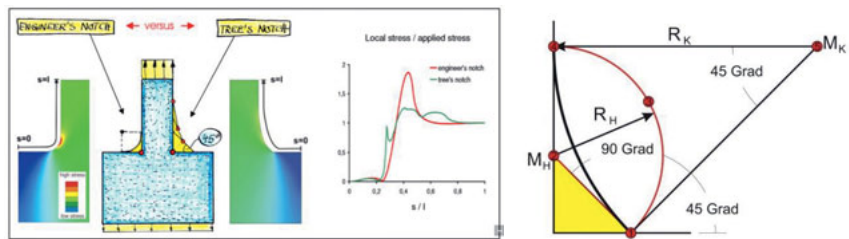


Abbildung 4-13: Mattheck – Methode zur Reduzierung von Kerbspannungen [Mat-2006]

Es entsteht also die Frage, ob die Änderung des Rohrbogenverlaufs einer 90° und 180° Rohrumlenkung vom Kreisbogen auch Effekte für den Schubelementeförderer zeigen würde, d.h., ob sich die Reibungskräfte im Rohrbogen beeinflussen und optimieren lassen.

4.2.2 Versuche mit unterschiedlichen Rohrbogenformen

Im Versuch wurden folgende unterschiedlichen 90° Rohrbogen - Varianten untersucht (Abbildung 4-14):

- 1. Rohrbogen als Viertelkreis mit kleinem Radius
- 2. Rohrbogen als Viertelkreis mit größerem Radius
- 3. Rohrbogen als Mattheck - Spline
- 4. Rohrbogenform nach Rechenberg

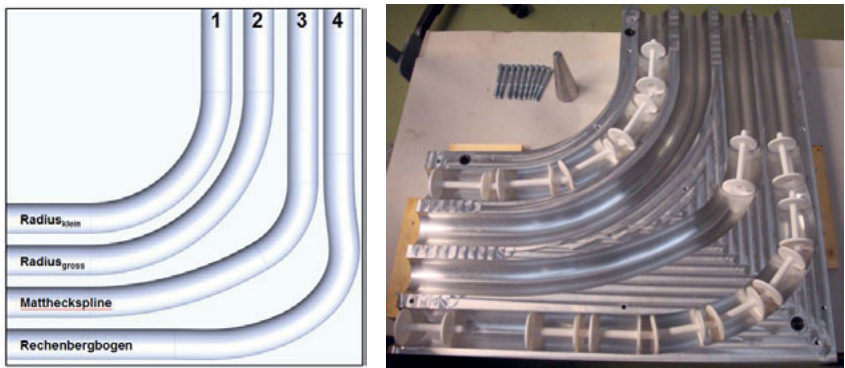
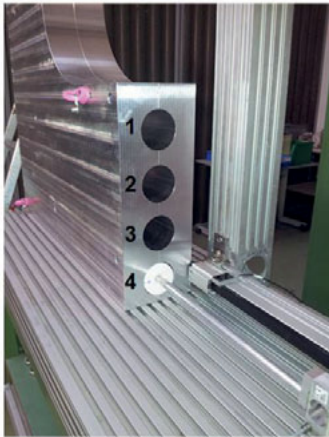


Abbildung 4-14: Experimentell untersuchte Rohrbogenformen

Gleichzeitig wurden in den genannten Rohrbogenformen Schubelemente mit unterschiedlichem Längen / Durchmesser Verhältnis ( $l/d$  von ca. 1.98/1 und 1.61/1) und zwei unterschiedlichen Koppelstellen Kugel – Kalotte (Abbildung 4-15 und 4-18)<sup>25</sup> eingesetzt, d.h. also, vier verschiedene Schubelementvarianten untersucht. Die Vorschubgeschwindigkeiten wurden im Bereich zwischen 100 und 200 mm/s variiert.



**Abbildung 4-15: Blick auf die montierten Rohrbogenhälften und eingesetzte Schubelemente (kurz und lang)**

Die Abbildung 4-16 zeigt den kompletten Versuchsaufbau.

<sup>25</sup> Die Aluminiumplatten wurden im montierten Zustand auf einem Nutentisch montiert. Die Schubelemente wurden aus ABS-Kunststoff auf einem 3-D-Drucker angefertigt. Die vier unterschiedlichen Varianten wurden nun durch die verschiedenen Bogenformen geschoben. Dies erfolgte mit einem an einem Linear-Antrieb montierten Druckstab. Die an der Stoßstange anliegende Kraft wurde mittels DMS, der durch den Linear-Antrieb zurückgelegte Weg der Schubelemente über einen Weg-aufnehmer mit einer Datenerfassung aufgezeichnet.

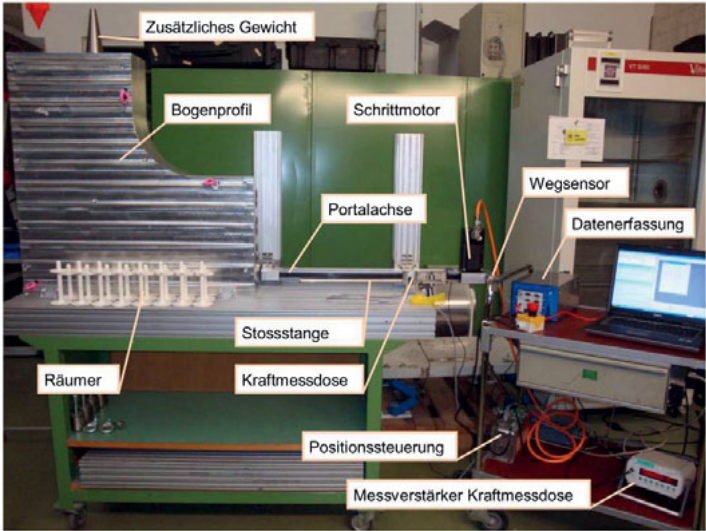
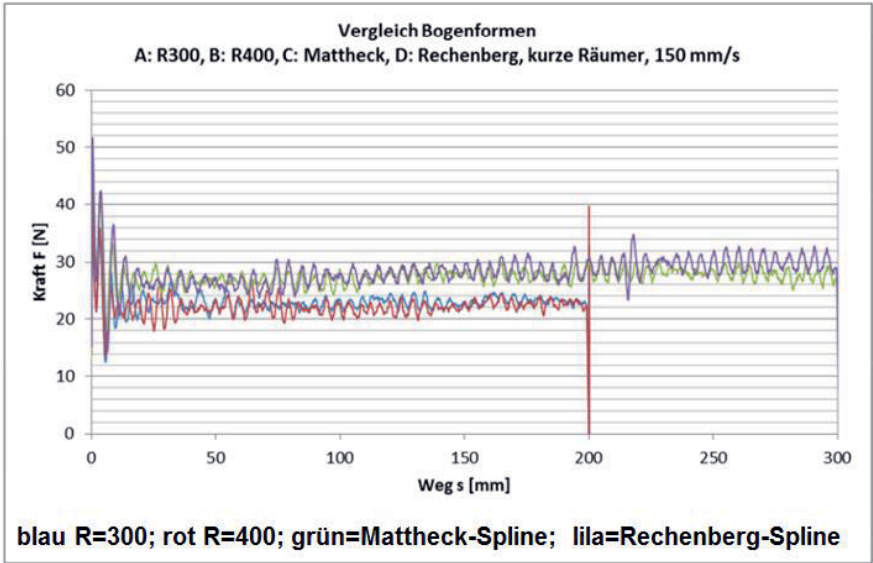


Abbildung 4-16: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Rohrbogeneinflusses

Die nachstehenden Messprotokolle (Abbildung 4-17) zeigen die Versuchsergebnisse bei 150 mm/s Vorschub für alle 4 Rohrbogenformen und für das kurze und lange Schubelement (mit der Koppelstelle Kugel – Kalotte außerhalb der Mitnehmerscheibe entsprechend Abbildung 4-19).



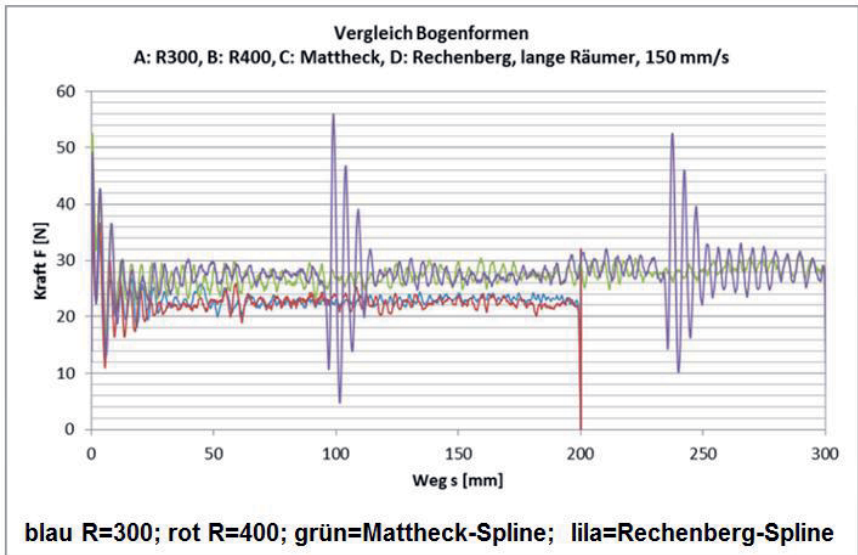


Abbildung 4-17: Kraft –Weg – Diagramme<sup>26</sup> für verschiedene Bogenformen und Schubelemente bei 150 mm/s Fördergeschwindigkeit<sup>27</sup>

Die Variation der Lage der Kalotte an der Stützscheibe zeigt Abbildung 4-18.

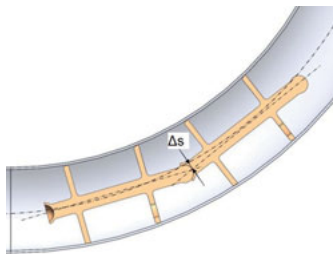


Abbildung 4-18: Versuchsschubelemente mit unterschiedlichem Koppelpunkt bzw. Drehpunkt der Kugel in der Kalotte; Stützscheibe 2: Drehpunkt hinter der Mitnehmerscheibe; Stützscheibe 1: Drehpunkt innerhalb der Mitnehmerscheibe

<sup>26</sup> Die Schubelemente werden in der Diagrammdarstellung als „Räumler“ bezeichnet.

<sup>27</sup> Aus jeweils 5 Versuchsmessungen wurde der Mittelwert gebildet und als Ergebnis dokumentiert.

Die Ergebnisse mit dem Drehpunkt der Schubelemente hinter der Mitnehmerscheibe waren tendenziell schlechter, da die Schubelemente an der Stützscheibe im Rohrbogen anliefen und zusätzliche Reibungskräfte ins System einbrachten. Simulationen im CAD - Datenmodell bestätigten, daß die Stützscheibe im Rohrbogen anlaufen konnte. Da der Drehpunkt hinter der Mitnehmerscheibe liegt, um die das vorlaufende Schubelement dreht, wird das nachlaufende Schubelement zusätzlich aus der Rohrbogenmitte ausgelenkt (Abbildung 4-19).



**Abbildung 4-19: Auslenkung des nachfolgenden Schubelementes bei Drehpunkt hinter der Mitnehmerscheibe**

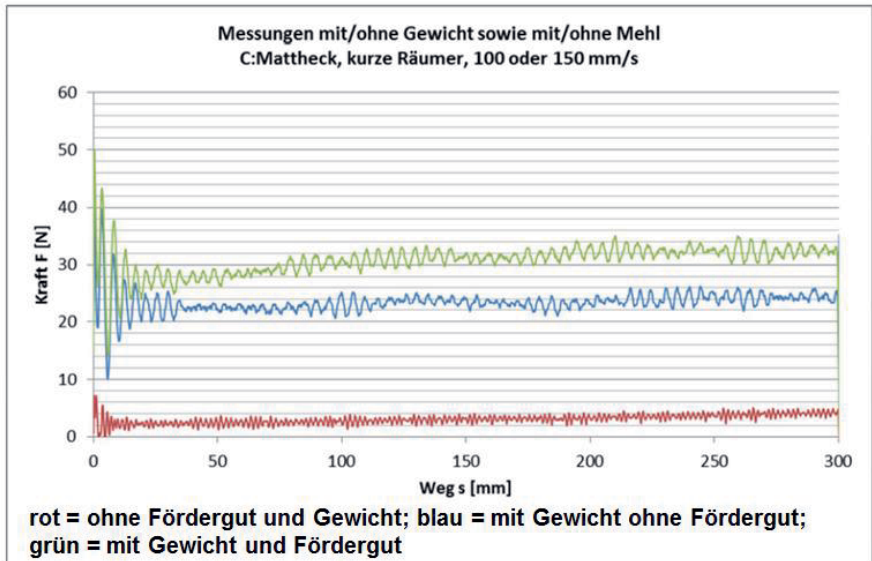
Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Grundsätzlich sind die Kraftausschläge (Indizien für die Reibung) in den 90° - Kreisbögen geringer als in den Rohrbogenformen nach Rechenberg und Mattheck.
- Das Kraftniveau ist im kleinen und großen Rohrbogen in Abhängigkeit von der Schubelementelänge unterschiedlich. Kurze Schubelemente in Kombination mit dem großen Rohrbogenradius (Viertelkreis) benötigen die geringsten Vorschubkräfte bei gleichzeitig geringstem Schwankungsniveau.
- Geschwindigkeitsänderungen sind neutral, d.h. ohne Auswirkung auf die Vorschubkraft.
- Ist die Koppelstelle der Schubelemente im Bereich Kugel / Kalotte innerhalb der Mitnehmerscheibe angeordnet, zeigen sich geringere Kraftschwankungen bei geringerem Kraftniveau als bei der außerhalb liegender Koppelstelle.

Bei einer Wiederholung der Versuche mit Mehlfüllung wurde die gleiche Tendenz gemessen. Eine parallel durchgeführte Versuchsreihe mit einem 8 Inch Förderer zeigte bei unterschiedlichen Füllgraden und Förder-Geschwindigkeiten, daß Geschwindigkeitserhöhungen auf Grund von starken Schwingungserscheinungen nicht

möglich waren<sup>28</sup>. Antworten auf diese Frage konnten mit den vorstehend beschriebenen Versuchen nicht gegeben werden.

Die Versuche wurden zunächst ohne Schüttgut in der Paarung Kunststoff- Aluminium durchgeführt (Abbildung 4-20). Beim Einfüllen von Mehl zeigte sich, daß sich die Kräfte am Antrieb erhöhten. Schlussfolgernd bedeutet das, daß die Reibwerte der Materialpaarung Schubelement-Mitnehmerscheibe / Rohrwandungsmaterial und die Reibkoeffizienten des Schüttgutes das Gesamtleistungsniveau im ersten Rohrbogen entscheidend beeinflussen.



**Abbildung 4-20: Messungen mit und ohne zusätzliches Gewicht auf den Schubelementen und Messung mit und ohne Mehl, dargestellt im Rohrbogenverlauf nach „Mattheckspline“**

#### 4.2.3 MKS - gestützte Optimierung des Rohrbogenverlaufes

Die Untersuchungen im vergangenen Abschnitt haben Kraftschwankungen im Rohrbogen gezeigt. Mit der Schubelementgröße ändert sich zwar die Kraftamplitude, nicht aber ihre prinzipiellen Schwankungen. Die lokal überhitzten Stellen im Rohrbogen

<sup>28</sup> Das System wurde abgeschaltet, weil der zulässige Motorstrom in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich unter Last überschritten wurde. Wurde dieser Geschwindigkeitsbereich ohne Schüttgut, also lastlos durchfahren, konnte trotz weiterer Erhöhung der Geschwindigkeit die Anlage mit einem hohen Füllgrad gefahren werden. Es muss das Durchfahren einer System-Eigenfrequenz vermutet werden. Dynamische Berechnungen wurden allerdings nicht durchgeführt.



blieben trotz optimierten Durchmesser / Längenverhältnisses von Schubelement und Rohrbogenradius erhalten. Auch für die im letzten Abschnitt erwähnte Dynamik bei Geschwindigkeits- und Füllstandsänderungen der Schubelemente fehlt noch eine akzeptable Erklärung.

Zur weiteren Klärung wird sinnvollerweise angenommen, daß das Schubelement im Verlauf des Rohrbogentransfers unterschiedlichen Reibungssituationen ausgesetzt ist. Es wurden deshalb Methoden gesucht, mit denen man die Kraft– und damit verbunden die Reibungssituation im Rohrbogen, detailliert erfassen kann. Grundsätzlich wurde dabei auch die Rohrbogengeometrie nochmals in Frage gestellt, d.h., es wurde gefragt, ob sich im vorgegeben Rahmen noch weitere optimale Rohrbogenformen als der Viertelkreis finden lassen könnten.

Als Methodenabfolge wurde festgelegt:

- Nutzung der Evolutionsstrategie nach Rechenberg [Rec-1973] zur Ermittlung optimaler Rohrbogenformen.
- Berechnung der Verlustleistungen im Rohrbogen über Mehrkörpersimulationen (MKS) mit flexiblen Körpern. Die Werte für Massenträgheit, Reibung und Steifigkeit des Schubelementes werden in die Betrachtungen einbezogen.
- Definition eines Gütekriteriums der Energieeffizienz (hier sogenannter „Fitnesswert“ als Ausdruck des Verlustes an mechanischer Arbeit im Rohrbogen) und Bewertung der Varianten.
- Bildung neuer Varianten nach der Evolutionsstrategie unter Nutzung von Varianten mit den besten Fitnesswerten und zyklische Wiederholung.
- Heuristische Suchraumeinschränkung unter Veränderung der Grenzwerte für den zugelassenen Rohrbogenradius.

Die Berechnungen im Rahmen dieser Methodenabfolge wurden durch die Fa. IBAF Engineering realisiert [Kat-2016].

Der genetische Algorithmus (GA) ist ein Verfahren zur Suche nach Lösungen für Optimierungsaufgaben, das in Anlehnung an die klassische Evolutionstheorie arbeitet. Größter Vorteil des Algorithmus ist, daß zu seiner Anwendung über das generelle Verhalten der Fitnessfunktion nichts bekannt sein muss. Der geometrische Suchraum für die Optimierung der Rohrbogengeometrie wurde festgelegt auf eine Abmessung von 4000 mm x 4000 mm. Die zu minimierende Zielfunktion, also die sogenannte Fitnessfunktion, ist der Leistungsverlust im Rohrbogen. Die Form des Rohrbogens wird durch  $n = 8$  Stützpunkte beschrieben, wobei der erste und letzte Stützpunkt festgelegt und eine Richtungsumlenkung von  $90^\circ$  vorgegeben sind (siehe Ab-



bildung 4-21). Die möglichen Stützpunkte sind auf die Radien beschränkt, die in äquidistanten Winkeln zueinander stehen. Damit wird die Kurve durch ein Genom von  $n - 2 = 6$  Variablen variierbar. Die Stützpunkte über variierbare Radien wurden unter anderem auch deshalb gewählt, weil diese Formen über bestimmte Rohrbiegemaschinen herstellbar sind. Weiterhin wurden bestimmte Einschränkungen in der Modellierung getroffen, um unsinnige Formen wie Hinterschnidungen oder Schlaufen zu vermeiden. Die Wahl von kubischen Splines stellt einen krümmungsstetigen Verlauf sicher. Für die Anwendung des genetischen Algorithmus wird zunächst ein Individuum mathematisch durch eine feste Menge an Parametern/Variablen (6 Radien sowie den festen Einlauf- und Auslaufpunkt, also 8 Stützpunkte) beschrieben. Dieses erzeugte „Genom“ wird durch den Algorithmus variiert. Durch Anpassung der Genome wird versucht, den Fitness-Wert zu minimieren. Der Algorithmus behandelt immer eine bestimmte Menge von Individuen, eine sogenannte Generation, gleichzeitig. Die darauf folgende Generation hängt von den Ergebnissen der Fitnessfunktion ab. Die erste dieser Generationen kann zufällig sein oder auch teilweise oder ganz vorgegeben werden. In jedem Schritt des GA wird eine Generation erzeugt und anschließend per Fitness-Funktion bewertet. Die Erzeugung der Generation hängt dabei von den Fitness-Werten der Vorgänger-Generation ab. Die Individuen der neuen Generation werden in mehreren Schritten durch Selektion, Rekombination und Mutation gebildet. Bei der Selektion werden die neuen „Eltern“ für die Nachfolgeneration anhand der Ergebnisse des Fitnesswertes ausgewählt, bei der Rekombination<sup>29</sup> überleben einzelne, besonders erfolgreiche Individuen. Die Mutation<sup>30</sup> sorgt für den Einfluss des Zufalls im Variationsprozess. Durch diese Vorgehensweise der ständigen Neubewertung zufällig variierten Genome und die Beibehaltung bzw. Kombination besonders erfolgreicher Genome werden die Individuen von Generation zu Generation immer besser angepasst, d.h., es entstehen immer neue Individuen mit verbesserten Fitnesswerten.

Im weiteren seien einige Schwerpunkte des Berechnungsablaufes demonstriert.

<sup>29</sup> Die Rekombination zweier Individuen erfolgt durch Extrapolation der Genome der Elternteile. Die Werte des neuen Genoms liegen dabei in einem kleinen Abstand vom Wert der erfolgreichereren Elternteils entfernt, und zwar in der Richtung vom Elternteil mit den schlechteren zum Elternteil mit den besseren Fitness-Werten.

<sup>30</sup> Die Mutation addiert zufällige Werte zum Genom eines Elternindividuums. Die zufälligen Werte folgen dabei der Gauß'schen Normalverteilung.

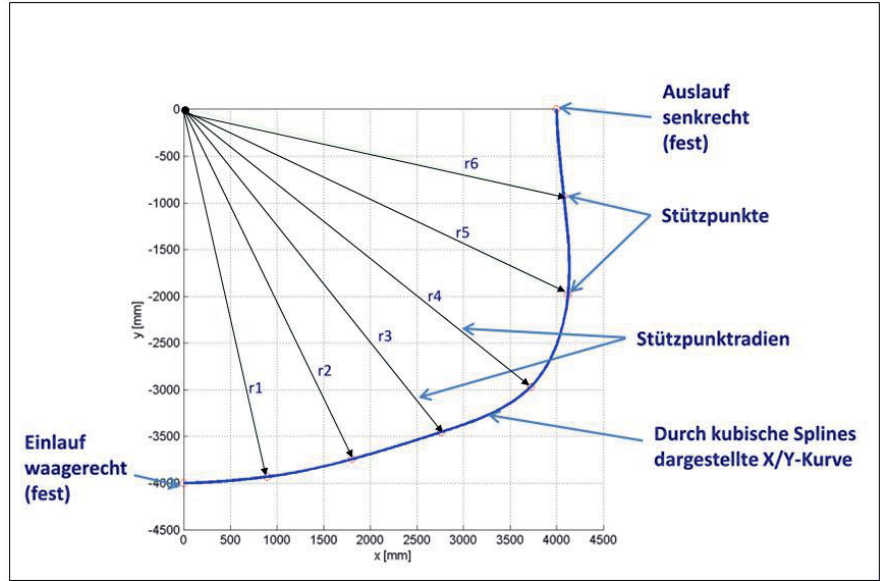


Abbildung 4-21: Radienvariation im zu verändernden Rohrbogen

In Abbildung 4-22 wird die Schubelementesäule dargestellt, die durch den 90° - Bogen mit Hilfe der Mehrkörpersimulation „hindurchgerechnet“ wird. Jeweils ermittelt werden Leistung und Kontaktkräfte, also die zur Fitnessbestimmung erforderlichen Werte.

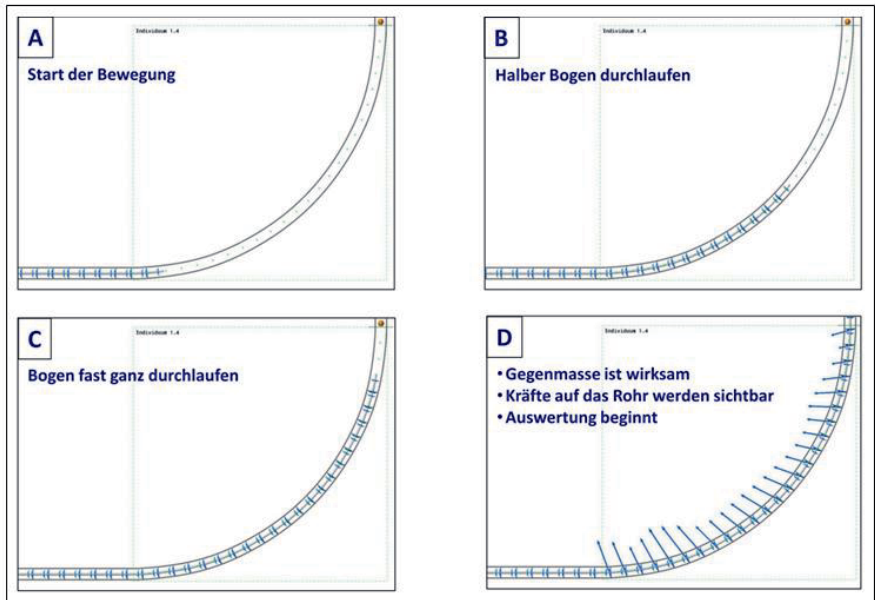


Abbildung 4-22: MKS-Simulation der Schubelemente im Rohrbogen

Wie bereits beschrieben können auch Rohrbogenformen als empirische Startvarianten vorgegeben werden. Nach Anwendung der Evolutionsstrategie folgen weitere zufällige Rohrbogenformen, wie sie z.B. Abbildung 4-23 und mit Leistungsbewertung Abbildung 4-24 zeigen.

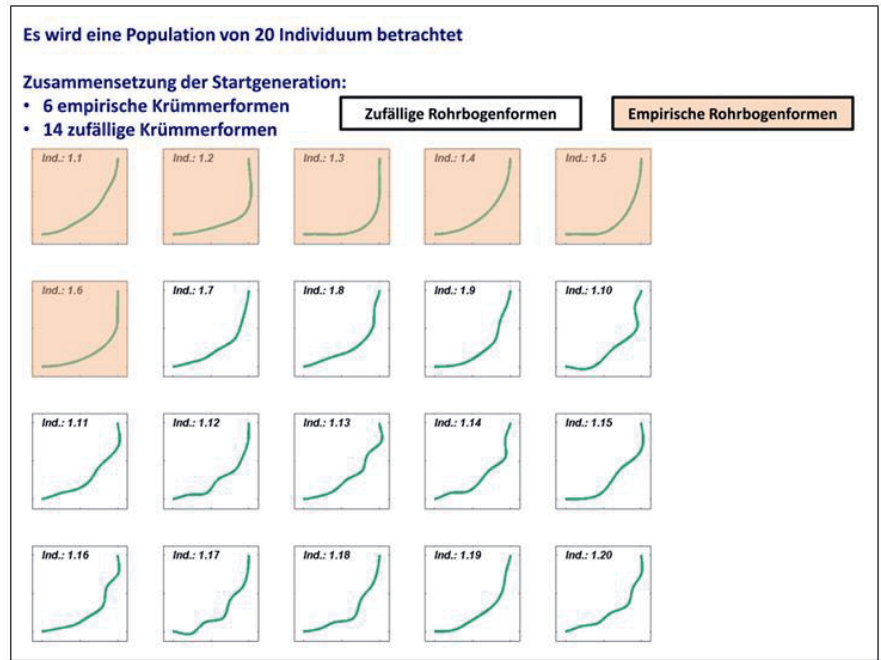


Abbildung 4-23: Startgenerationen und generierte Rohrbogenformen

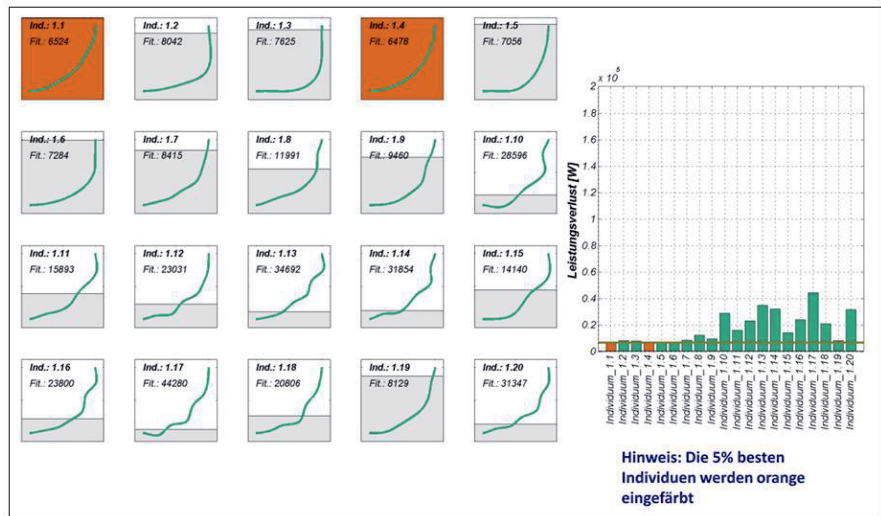
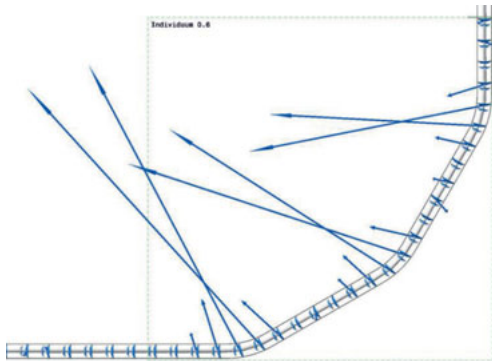


Abbildung 4-24: Generierte Rohrbogenformen mit Bewertung der Leistungsverluste

Im Ergebnis der genetischen Optimierung konnten zunächst ca. 40 Individuen, d. h. also Rohrbogenformen mit vergleichbarem Energieverlust (5% Bereich um die optimale Variante) gefunden werden. Wird auch die Systemgrenze verändert (Systemgrenze = Flächenbereich in mm mal mm, in dem der Bogen liegen darf) lassen sich sogar Individuen mit max. 4% geringerem Leistungsverlust als beim Viertelkreisbogen finden. Eine genaue Analyse des Leistungsverlustes hinsichtlich der räumlichen Verteilung zeigte aber darüber hinaus, daß sich - je nach Bogenform - auch nach dem eigentlichen Bogen noch unterschiedliche Leistungsverluste ergeben können<sup>31</sup>. Bei einer Bewertung sowohl des Verlustes im Bogen als auch im nachfolgenden geraden Bereich verbleiben die optimierten Varianten hinsichtlich Fitnesswert damit auf dem Niveau des Viertelkreisbogens, d.h. also, eine Veränderung der Kreisbogen - Rohrgeometrie ist nicht sinnvoll.

Bei der weiteren Analyse der Optimierungsergebnisse zeigte sich, daß das gewählte Gütekriterium zwar die Bestimmung einer energieoptimierten (-minimierten) Rohrbogenform ermöglicht, innerhalb dieser Rohrbogenform aber noch sehr starke Kraftschwankungen möglich bleiben (Abbildung 4-25).



**Abbildung 4-25: vom Schubelement auf das Rohr übertragene Kräfte in Betrag und Richtung im Modellfeld von 5000 x 5000 mm**

<sup>31</sup> Entsprechend konnte bei einer Systemgrenze von 5000 mm x 5000 mm (und damit einem zusätzlichem Einbezug von 1000 mm geradem Rohr nach dem Bogen) zwar keine Verbesserung im Vergleich zum Viertelkreisbogen erreicht werden, interessanterweise lieferte die Optimierung der Bogenform hinsichtlich des Leistungsverlustes jedoch verschiedene Individuen abweichend vom Kreisbogen, die einen bis zu 8% besseren Fitnesswert besitzen. Allerdings wird durch die geänderte Bogenform der Leistungsverlust im geraden Bereich nach dem Bogen wieder erhöht.

Gerade die Kraftschwankungen, ausgelöst durch unterschiedliche Reibungssituationen des Schubelementes mit der Rohrwand und der veränderlichen Krafrichtung im Koppelpunkt Kalotte / Kugel der verbundenen Schubelemente, führen aber zu Verschleißerscheinungen und damit zu den beobachteten Schwankungen der Antriebsleistung, die sich indirekt durch die gemessenen Wärmenester im Rohrbogen zeigen. Eine Mittelwertbildung und Minimierung der Beträge der Kraftvektoren im Rohrbogen, wie sie im Optimierungsalgorithmus vorgenommen wurde, genügt also nicht. Für eine möglichst gleichförmige Antriebsleistung müssen die Beträge der einzelnen Kraftvektoren im Rohrbogen etwa gleich groß sein, sich zumindest in ihrer einzelnen Ausprägung vom Mittelwert (Streuung) nicht stark unterscheiden. Werden die Startvarianten und die generierten Varianten hinsichtlich Reibungsverlusten und Kontaktkräften im Rohrbogen verglichen, ergibt sich folgenden Situation: Der Viertelkreisbogen mit kleinem Radius hat größere Verlustleistungen im Rohrbogen als der Viertelkreisbogen mit großem Radius. Der Grund liegt darin, daß die Kontaktkraftschwankungen bei einem kleinen Viertelkreisbogen grösser sind als bei einem großem Bogen (siehe Abbildung 4-26 und 4-27).

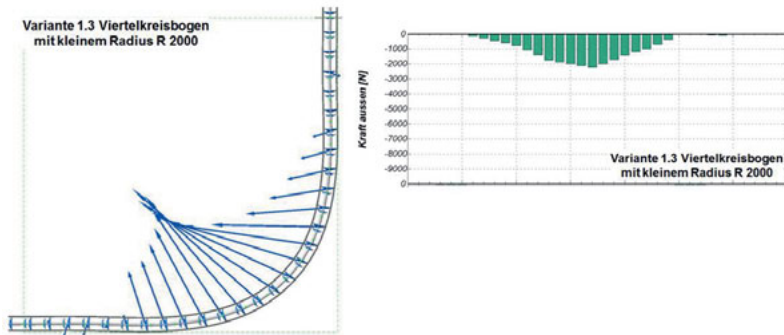


Abbildung 4-26: Kontaktkräfte im Viertelkreisbogen mit kleinem Radius

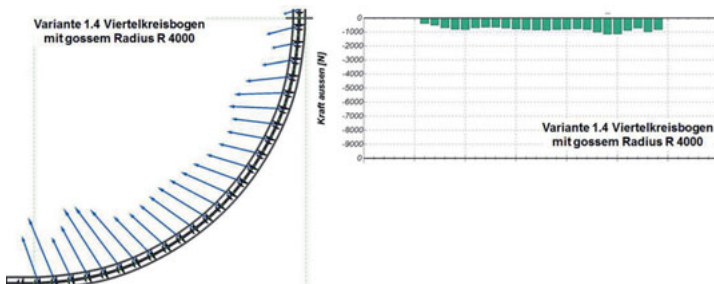


Abbildung 4-27 Kontaktkräfte im Viertelkreisbogen mit großem Radius

Eine Verringerung der Streuung der Kontaktkräfte im Rohrbogen kann also über eine weitere Modifikation der gefundenen Varianten erreicht werden. Die Abbildung 4-28 und 4-29 zeigen noch einmal im Vergleich die Auswirkungen einer Optimierung bzgl. Minimierung der Kraftschwankungen bzw. nur bzgl. der Reibungs- und Verlustminimierung.

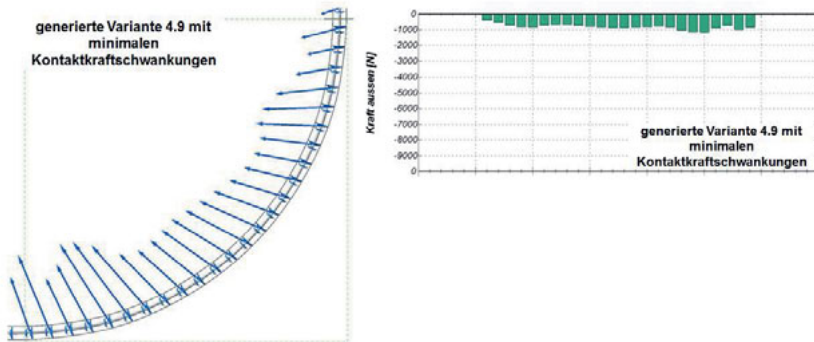


Abbildung 4-28: Variante mit minimalen Kraftschwankungen im Rohrbogen

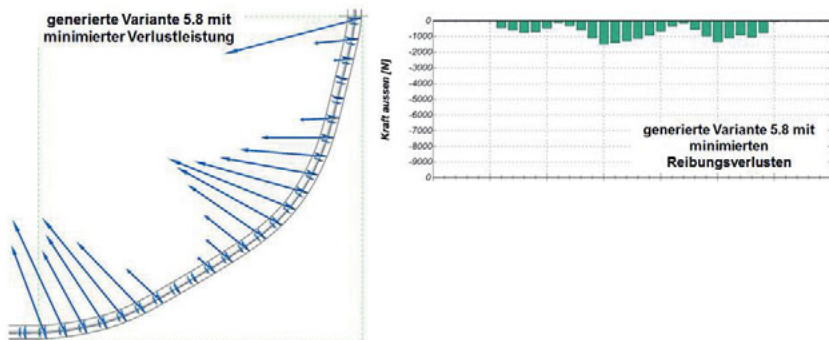


Abbildung 4-29: Variante mit minimierter Verlustleistung durch Reibung im Rohrbogen

In der Summe aller Kriterien – Energieeffizienz und homogene Kraftverteilung - zeigt sich der 90° -Kreishbogen weiterhin gleichbleibend als günstigster Kompromiss. Die kompletten Variationsergebnisse sind dem Bericht [Kat-2016 in print] zu entnehmen.

# 5 Gestaltung ausgewählter Komponenten des Schubelementeförderers

## 5.1 Standardisierung des Schubelementeförderers

Die konstruktive Gestaltung und Ausarbeitung der Fertigungsunterlagen für Schubelementeförderer erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Standardisierung und Modularisierung. Die einzelnen Elemente werden sinnvollerweise über eine hierarchische Klassifikation festgelegt.

Nach Einordnung des Förderprinzips des Schubelementeförderers in die Gruppe der Stetigförderer wird ein Baukasten konzipiert, der über Funktionsgruppen definiert ist. Den Funktionsgruppen selbst werden Bausteine zugeordnet. Eine weitere Unterteilung der einzelnen Bausteine in Baureihen dient der geometrischen Skalierung. Eine Baureihe lässt sich wiederum in verschiedene Typengruppen aufteilen. Nach dieser grundlegenden Klassifikation in Anlehnung an Koller [Kol-1994], kann für den Schubelementeförderer die in Abbildung 5-1 dargestellte Systematik entwickelt werden.

Als Baugruppen werden im weiteren Aggregationen von Bauelementen verstanden, die aus verschiedenen Gesichtspunkten wie Fertigung, Logistik usw. zusammengefasst werden.

Die frühzeitigen Festlegungen des modularen Baukastens durch die erforderlichen Funktionen, die Bausteine, die Baureihe und die Typengruppen ermöglichen die Erfüllung der Kundenanforderungen nach qualitativ hochwertigen Bauteilen, schneller Teilverfügbarkeit und der Berücksichtigung eventueller Erweiterungen.

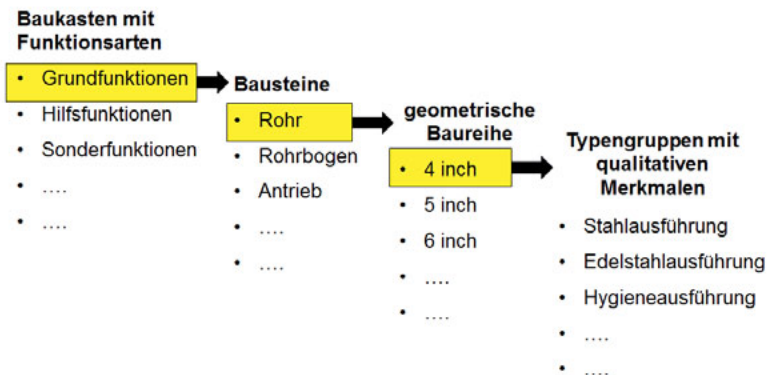


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung zur Vorgehensweise der Standardisierung des Schubelementeförderers



Für den Hersteller bedeuten standardisierte Produkte, daß neben den o.g. Kundenvorteilen Projektierung, Angebotserstellung, Fertigung, Kalkulation und Schnittstellen einfacher sind, da fertige Unterlagen zur Verfügung stehen. Mit hoch standardisierten Baukästen können die meisten Kundenapplikationen mit geringem Aufwand für Anpassungskonstruktionen realisiert werden.

Bereits in der Konzeptphase soll auch eine Strategie der späteren Produktstrukturierung berücksichtigt werden. Aus dem Supply Chain Management sind verschiedene Fertigungsansätze bekannt, die Unternehmen die Möglichkeit bieten, beim Herstellungsprozess zum Beispiel Lagerkosten, Herstellkosten, Vorfertigung, Herstellzeiten oder Nachfrageerwartungen zu berücksichtigen. Hier seien die Fertigungsansätze nach [Hom-2011] genannt.

- PTO (Pick to Order): Standardprodukte wie z.B. Dichtungen, Schrauben, Ersatzteile,...
- ATO (Assemble to Order): Standardprodukte mit herstellerspezifischen Varianten wie z.B. Fräsmaschinen, ....
- MTO (Make to Order): Standardprodukte mit kundenspezifischen Varianten wie z.B. Elevatoren
- ETO (Engineer to Order): Einzelprodukte wie z.B. gesamte Mühlenanlagen oder Siloanlagen

Der häufig bevorzugte Geschäftstyp für ein Fördersystem ist ein Assemble to Order (ATO). Das Produkt wird erst bei Kundenauftrag gefertigt. Es besteht aber aus vom Hersteller standardisierten Komponenten, Modulen und Baugruppen, die auch aufgrund der geplanten Nachfrage vorproduziert werden können. Erreicht wird eine schnelle Fertigung bei geringem Engineeringaufwand und geringen Lagerkosten.

Um eine große Verfügbarkeit weltweit zu gewährleisten, wird von der Konstruktion gefordert, einen möglichst hohen Anteil der verwendeten Bauteile aus Normalien- und Standardbauteilen zu verwenden. Die Rohre sind zum Beispiel so zu wählen, daß sie weltweit verfügbar sind. Überlegungen zur Lieferkette unterteilen die Komponenten in Bauteile, die an zentralen Fertigungsstellen gefertigt werden können und in Bauteile, die lokal dazu zu kaufen sind. So kann zum Beispiel vermieden werden, daß Rohre von Europa nach Asien oder in die USA gesendet werden müssen, wenn diese Rohre auch lokal beschafft werden können. Lokale Fertigungsstandorte mit entsprechenden Fertigungskompetenzen können die benötigten Blechteile herstellen und als Teilkomponenten direkt zu den Kunden versenden, die Montage kann dann am Betreiberort stattfinden. So findet auch eine Rationalisierung im Sinne der Redu-

zierung der Transportkosten statt, Handelsbeschränkungen, Zölle und Währungsschwankungen können so weitestgehend umgangen werden.

5.1.1 Baukastenentwicklung

Bei der Baukastenentwicklung wird zwischen einem offenen und einem geschlossenen Baukasten unterschieden [Pah-2005]. Da das Förderprinzip und die Grundfunktionen immer die gleichen sind, bietet sich hier die Entwicklung eines geschlossenen Baukastens an. Hierzu werden die Funktionen klassifiziert, wie in Abbildung 5-2 dargestellt.

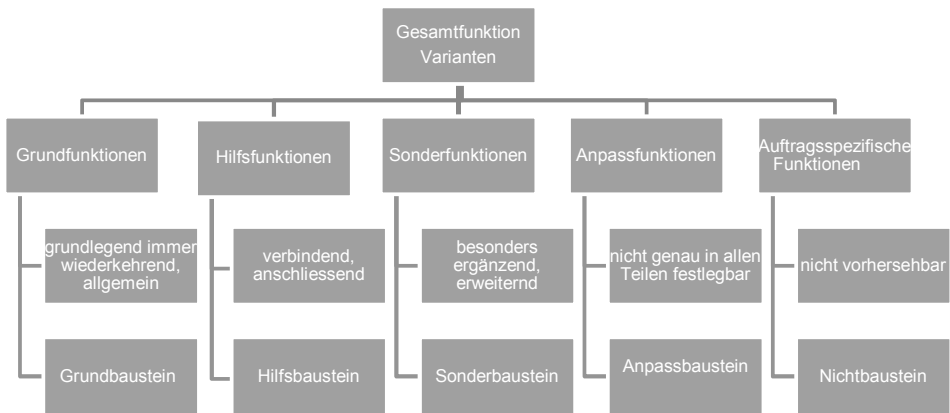


Abbildung 5-2: Funktions- und Bausteinarten nach [Pah-2013]

Die Funktionen oder Bausteine lassen sich wie folgt charakterisieren:

**Grundfunktionen** (Grundbausteine) sind MUSS-Bausteine. Sie sind in einem System grundlegend und immer wiederkehrend. Zur Erfüllung der Gesamtfunktion sind sie unerlässlich.

**Hilfsfunktionen** (Hilfsbausteine) sind meistens MUSS-Bausteine. Sie sind verbindend und anschließend. Im Allgemeinen sind es Verbindungs- und Anschlusselemente mit entsprechenden Größenstufen.

**Sonderfunktionen** (Sonderbausteine) sind KANN-Bausteine für besondere und/oder ergänzende aufgabenbezogene Teilfunktionen. Sie sind nicht wiederkehrend in der Grundvariante. Die Bausteine sind spezielle Ergänzungs- oder Zubehörteile.

**Anpassfunktionen** (Anpassbausteine) sind KANN- oder MUSS-Bausteine. Sie dienen der Anpassung an andere Systeme und zur Anpassung an Randbedingungen. Sie sind in der Regel nur zum Teil konstruktiv festgelegt und müssen bei Bedarf in ihren Abmessungen angepasst werden.

**Auftragsspezifische Funktionen** (Nichtbausteine) sind KANN-Bausteine und werden für besondere, ergänzende oder aufgabenspezifische Teilfunktionen benötigt. Sie sind nicht Bestandteil des Baukastens und sind auftragsbezogen zu konstruieren.

Werden die Baugruppen des Schubelementeförderers tabellarisch wie in Tabelle 5-1 aufgelistet, lassen sich die Bausteine zuordnen. In der Abbildung sind die Grundbausteine gelb gekennzeichnet.

Rohrdurchmesser	(4") 114.3	(5") 139.7	(6") 168.3	(8") 219.1	(10") 273	(12") 323	
Antrieb	basic	standard	heavy duty				
Werkstoff	Stahl	Edelstahl	Edelstahl vergütet				
Oberfläche	ohne	lackiert	gepulvert	galvanisch			
Rohre	2 m	3 m	4 m	6 m	andere		
Antrieb	AS	AS mit FU					
Verbinder	standard	mit Adaption	verstärkt				
Bogen	90	60	45	30	verstärkt	90 mit Verstärker	
Steigrohr	standard	verstärkt	Silo	Sonderausführung			
Sichtfenster	nein	einfach	doppelt				
Regenschutz	ohne	standard	verstärkt				
Sensorik	keine	Laufüberwachung	Füllstandsüberwachung	Stauklappenüberwachung	Verschleißüberwachung		
Steuerung	standard	erweitert	mit ges. Überwachung				
Sanitation	keine	Aspiration	Reinigungsbürsten	Reinigungsstrecke	Punktfilter		
Einfüllklappe	standard	Poke Yoke	abschliessbar				
Einlass	einfach	sammeln	Handaufschüttung	automatisch	mit Sensorik	mit Magnetabscheider	
Auslass	einfach	mit Bypass	automatisch	Meldekappe	verteilen		
Schubelement	standard	mit Signalgeber	basic	standard	heavy duty	Verschleissanzeige	Farbe
Option	Weiche	Zwischenantrieb	Serviceschalter	Faltbremse	Bürstenantrieb zum Antr.		
Zubehör	Reinigungskugeln		Inspektionstool	Montagehilfe	Sondenwerkzeug		

**Tabelle 5-1: Zuordnung der Grundbausteine**

Für die Festlegung des Baukastens und insbesondere für die Gestaltung der Bausteinschnittstellen ist es von großem Vorteil, bereits bei der Konzeption der Bauteile Kenntnis über die Variantentreiber zu haben. Zur Ermittlung der Variantentreiber<sup>32</sup> werden die Beziehungen zwischen Marktparametern und Produktparametern betrachtet. Abbildung 5-3 zeigt die Auswirkungen auf die entsprechenden Baugruppen und Bauelemente.

<sup>32</sup> Variantentreiber sind Marktparameter, die innerhalb der Gruppe der Produktparameter einen besonderen Einfluss auf Art und Zahl der Baugruppen und Bauelemente besitzen. Vergl. hierzu auch Pahl/Beitz [Pah-2013] „Variantentreiber identifizieren“.


Variantentreiber Schubelementeförderer														
Produktparameter														
 <b>Marktparameter</b>	Förderprodukt	Korn Mehl Reis Zucker Futter Kaffee Kakao												
	Fördergeschwindigkeit	0,4; 0,6; 0,8; 1,0 m/s												
	Förderkapazität	5 -100 t/h												
	Förderhöhe	2- 50m												
	Produktbruch	< 0,3%												
	Sanitation	< 600g												
	Spannung	240, 400, 500, 600 V												
	Frequenz	50 : 60 Hz												
	Aussentemp.	-20°C, RT; >25°C												
	Luftfeuchte	bis 65% und >65%												
	Innen/Aussenbereich													
	Vorschriften	CE; ATEX; UL; FDA, ...												
	...													

Abbildung 5-3: Variantentreiber des Baukastens Schubelementeförderer

Es wird deutlich, daß das Förderprodukt, die Fördergeschwindigkeit, die notwendige Förderkapazität, die Förderhöhe und der Aufstellort maßgeblich die Varianten beeinflussen. Im Konstruktionsverlauf wurden hier sinnvolle Einschränkungen getroffen wie z.B. Festlegung von Geschwindigkeitsklassen und zulässigen Schubelemente Kräften, um die Variantenzahl gering zu halten.

5.1.2 Baureihenentwicklung

Wie eingangs bereits erwähnt, können erhebliche Rationalisierungen im Konstruktions- und Fertigungsbereich durch die Entwicklung einer Baureihe erreicht werden. Unter einer Baureihe wird ein technisches Gebilde verstanden, das systematisch nach Größen gestuft wird [Ehr-2003]. Dabei sind die Merkmale Funktion, konstruktive Lösung und nach Möglichkeit auch Werkstoffe und Fertigungsverfahren gleich. Unterschiedlich sind die Leistungsdaten und die Abmessungen. Aufgrund der eingeschränkten Größenauswahl sind die Leistungsdaten und Betriebskosten für die notwendigen Betriebsverhältnisse nicht optimal, durch die Festlegung sinnvoller Größenabmessungen lässt sich die Teilevielfalt allerdings reduzieren.

Für den Schubelementeförderer wird eine Baureihe für den Fördermassenstrom von 5 t/h bis 150 t/h Weizen festgelegt. In Abhängigkeit von den Rohrdurchmessern, die weltweit verfügbar sind, wird eine Größenabstufung mit einem Querschnittszuwachs von ca. 50% von Baugröße zu Baugröße ausgewählt (Tabelle 5-2). Das entspricht einem Stufensprung von ca.  $\varphi_S = 1,5$  mit

$$\varphi_s = \frac{A_2}{A_1} \quad (5.1)$$

Die mögliche Förderleistung wird nicht nur über die Rohrquerschnittsfläche festgelegt, sondern auch über unterschiedliche Fördergeschwindigkeiten.

Abmessung [inch]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	$\varphi_s$
<b>4"</b>	110.3	9555	
<b>5"</b>	134.7	14250	<b>1.49</b>
<b>6"</b>	161.1	20384	<b>1.43</b>
<b>8"</b>	211.9	35266	<b>1.73</b>
<b>10"</b>	263.1	54367	<b>1.54</b>
<b>12"</b>	311.9	76405	<b>1.41</b>

**Tabelle 5-2: Rohrquerschnittsfestlegung mit Stufensprüngen**

Die Rohrabmessungen werden seitens der Lieferfähigkeiten der Rohrhersteller in Inch ausgelegt und angegeben. Die Stufensprünge beziehen sich auf den Rohrquerschnittszuwachs. Die Volumen- und Massenstromberechnung erfolgt nach Kapitel 4.1.1.

Das Berechnungsmodell zeigt, daß die Förderhöhe einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Antriebsleistung und die auf die Schubelemente wirkende, maximale Kraft besitzt. Um die Schubelemente und den Antrieb nicht grundsätzlich auf die maximale Förderhöhe und Fördergeschwindigkeit auslegen zu müssen, werden zulässige Kraftbereiche für die Schubelemente als auch zulässige Fördergeschwindigkeiten in zulässige Größen eingeteilt.

Für den 6 Inch Schubelementeförderer werden die Geschwindigkeitsstufen 0,4 m/s, 0,6 m/s, 0,8 m/s und 1 m/s festgelegt. Durch diese Entscheidung lässt sich die Vielzahl der notwendigen Antriebsvarianten (Motor- und Getriebekombination) drastisch reduzieren. Eine kraftabhängige Festlegung von Antriebsvarianten führt zur Einteilung in **basic**, **standard** und **heavy duty** Baureihen.

FEM-Berechnungen haben ergeben, daß mit dem kostengünstigen **basic** Antrieb Kräfte bis 3,5 kN in das Schubelement eingeleitet werden dürfen. Mit dem **standard** Antrieb können hingegen Kräfte bis 7 kN übertragen werden. Für Rohrdurchmesser ab 8 Inch sind nur die Antriebsvarianten **standard** und für besonders rauen Einsatz **heavy duty** zugelassen. Es ergeben sich die Zuordnungen nach Tabelle 5-3.

<b>Grösse</b>	<b><i>basic</i></b>	<b><i>standard</i></b>	<b><i>heavy duty</i></b>
4 inch	<b>x</b>		
5 inch	<b>x</b>	<b>x</b>	
6 inch	<b>x</b>	<b>x</b>	
8 inch		<b>x</b>	<b>x</b>
10 inch		<b>x</b>	<b>x</b>
12 inch		<b>x</b>	<b>x</b>

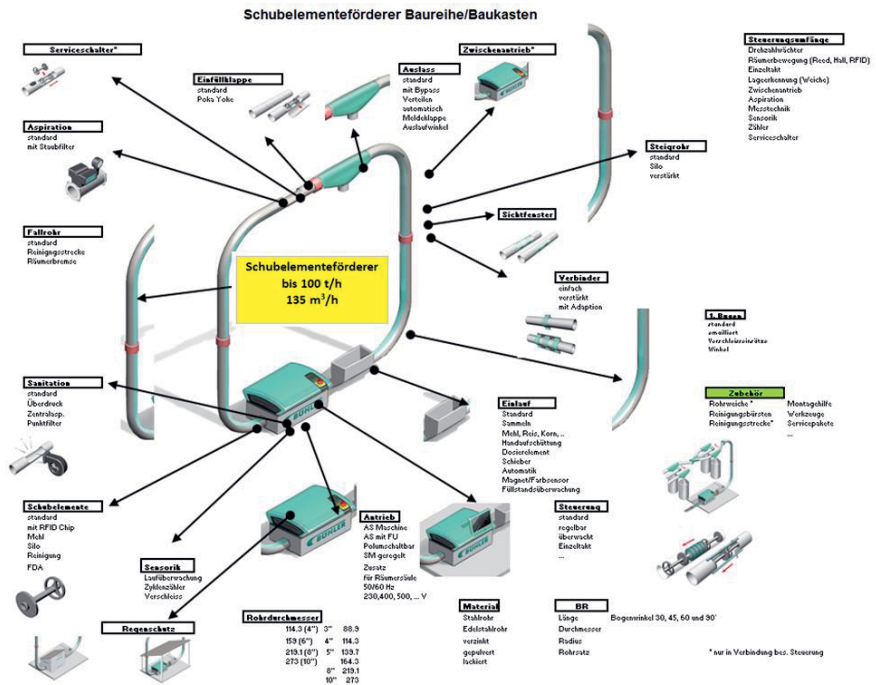
Tabelle 5-3: Antriebsvarianten in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser

Die unterschiedlichen qualitativen Forderungen nach Sanitation und Hygiene werden durch Stahlausführung oder Edelstahlausführung abgesichert, Komfortanforderungen werden über Typengruppen festgelegt (Tabelle 5-4).

Eine grafische Darstellung des Baukastens und die Beschreibung der Baureihen und Typengruppen unterstützt schon sehr früh im Entwicklungsverlauf eine stringente Vereinheitlichung und hilft, die Schnittstellen klar zu definieren. In Abbildung 5-4 sind zusammenfassend der Baukasten, die Baureihe und die Typengruppen dargestellt.

Baureihe	Typengruppen		
Phys. Größen	Gestalt	Werkstoff/Oberfläche	Qualität
Leistung	O-Anordnung	Stahl	Genauigkeit
Fördervolumen	S-Anordnung	Edelstahl	Zuverlässigkeit
Geschwindigkeit	2-D Anordnung	Lackiert	Lebensdauer
Förderhöhe	3-D Anordnung	Gepulvert	Komfort
...	...	Doppelt gepulvert	.....
		Farbe	
		...	

Tabelle 5-4: Beschreibung der Baureihe und Typengruppen



**Abbildung 5-4: Entwurf zur Darstellung des Baukastens, der Baureihen und der Typengruppen des Schubelementeförderers**

Die vorgenannten Begriffsbestimmungen und Festlegungen zum Baukasten, zur Baureihe und zu Typengruppen sind eine wesentliche Voraussetzung für die zielgerichtete Bestimmung und Auswahl der Berechnungs- und Simulationsmethoden, die zur Entwicklung der fördersystemrelevanten Elemente benötigt werden.

Allgemein sollte beachtet werden, daß der Umfang von Untersuchungen für eine Produkt - Neuentwicklung durch den festgelegten Standardisierungsrahmen bestimmt wird.

## 5.2 Berechnungen und Simulationen zum Schubelement

Das entscheidende, neuartige Bauteil im Förderer ist das Schubelement. Das Bauteil leitet die Vorschubkraft im Druckverband weiter, fördert das Schüttgut, nimmt die axialen Kräfte im Bogen auf und führt den gesamten Schubverband. Erste Entwürfe in der Konzeptphase wurden intuitiv bestimmt und in einfachen Vorversuchen erprobt. Für die Konzepterprobung wurde ein Schubelement gemäß Abbildung 5-5 und Abbil-

dung 5-6 festgelegt. Als Koppelstelle wurde eine Verbindung Kugel / Kalotte gewählt, um ein 3-D fähiges Fördersystem realisieren zu können. An der geschlossenen Mitnehmerscheibe sollen die Vorschubkräfte eingeleitet werden.

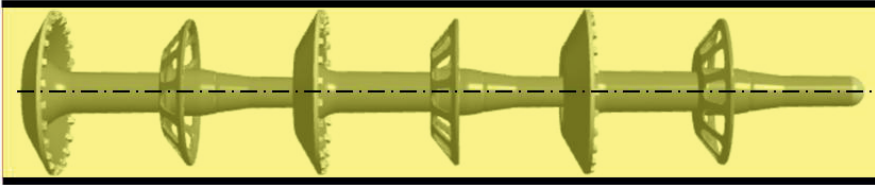


Abbildung 5-5: Schubelemente im Verbund

### 5.2.1 Gestalt

Die grundlegende Frage bei der Entwicklung des neuen Fördersystems war die Frage nach der prinzipiellen Geometrie / Gestalt der Schubelemente. Wie bereits gesagt, mussten nicht nur die Probleme der Übertragung der Schubkräfte über den gesamten Verband, die Kurvenführung im Rohrbogen und die Schüttgutaufnahme und -abgabe geklärt werden, sondern auch die Lösung des Verbandes nach Produktabgabe in der freien Fallstrecke und die störungsfreie Wiederausammenfügung zum Druckverband vor der Antriebseinheit.

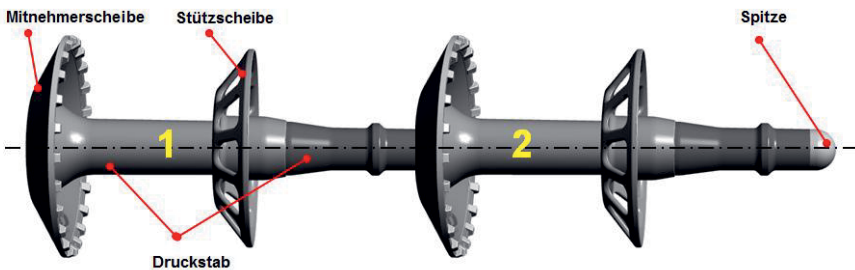
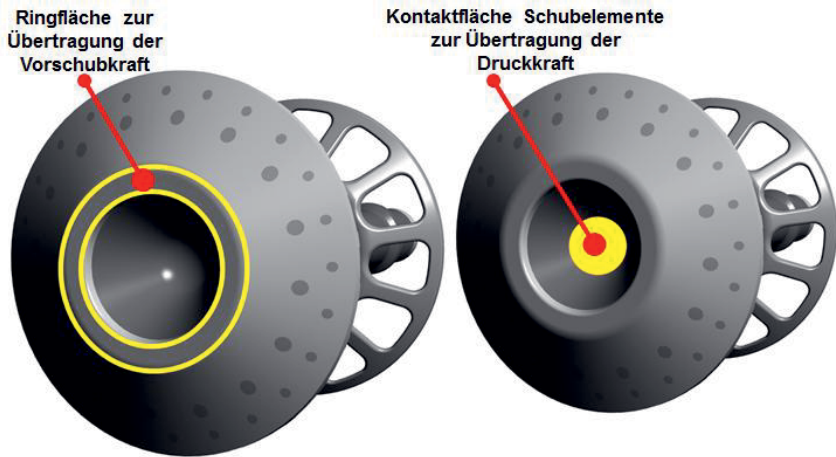


Abbildung 5-6: Schubelement als Druckstab zur Übertragung der Druckkräfte

Der Hauptkörper des Schubelementes 1 nimmt in seiner Randzone, der Mitnehmerscheibe, die Antriebs-Druckkräfte auf und gibt sie über die Spitze (Kugel) an die Kalotte des Schubelementes 2 weiter (Spitze von 1 verdeckt da bereits in Element 2). Die Stützscheibe dient der Führung im Rohr im freien Fallbereich der Rohrstrecke. Abbildung 5-7 zeigt noch einmal die am Kraftfluss beteiligten Strukturen des Schubelement-Hauptkörpers.





**Abbildung 5-7: Einleitung und Weiterleitung der Vorschubkräfte am Schubelement**

### Längen - / Durchmesser Verhältnis

Eine zentrale Frage bei der Geometriebestimmung des Schubelementes ist die Festlegung des Längen-Durchmesserhältnisses. Hier sind folgende Problemstellungen zu betrachten:

- Mindestanzahl der Schubelemente im 90° - Kreisbogen bei kleinen Rohrbogenradien (zur Erzeugung kleiner Bauabmessungen des Förderers),
- Minimierung der Kontaktkräfte zwischen Schubelement und Rohrwandung; (siehe Abschnitt 5.1.2),
- Reduzierung der Gesamtanzahl der Schubelemente bezogen auf die Gesamtlänge des Fördersystems (Anzahl Schubelemente pro laufendem Meter Rohr),
- Länge als Funktion der Kettenteilung (antriebsabhängig),
- Minimierung der Druckstablänge zur Verringerung der Druckstab-Knickung bei gleichzeitiger Sicherung des optimalen Förderungsvolumens (FEM-Rechnung).

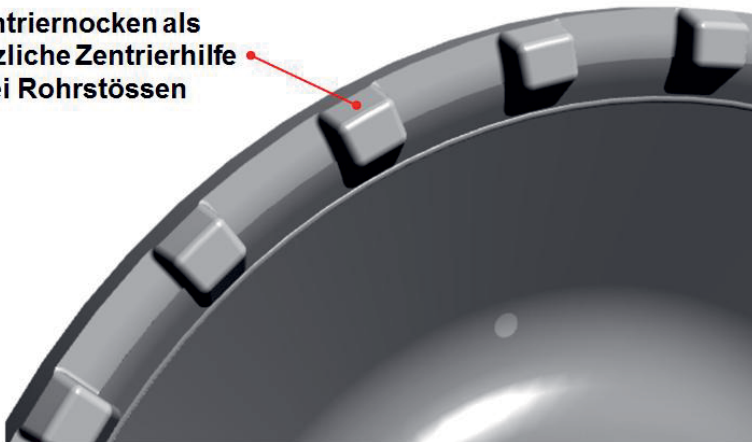
### Zentrierung und Rohrübergänge

Ein Verkanten der Schubelemente im Rohr würde zu massiven Funktionsstörungen und zur Zerstörung verschiedener Baueinheiten führen.

Eine Fase am Schubelement ist unvorteilhaft, da sie ein Eindringen des Schüttgutes zwischen Rohrwand und Schubelement begünstigt. Die Schubelemente werden deshalb nur sequentiell über zusätzliche Zentriernocken angefast (Abbildung 5-8).

Auch die Rohre sollten an ihren Zusammenbaustellen angefasst werden. Allerdings ist diese Maßnahme in der Montagephase nicht immer garantiert. Fasen an Rohrübergängen und Zentriernocken sind also im gewissen Sinn als redundante Maßnahmen anzusehen.

**Zentriernocken als  
zusätzliche Zentrierhilfe  
bei Rohrstößen**



**Abbildung 5-8: Zentrierhilfen an der Mitnehmerkante des Schubelementes**

Ein zusätzlicher Vorteil derartiger Zentriernocken ergibt sich bei Rohrdurchmesseränderungen der verbundenen Rohre, die zwar im Rahmen der Toleranz liegen können, aber eine Stoßstelle im Übergang erzeugen (Abbildung 5-9).



**Abbildung 5-9: Zentrierhilfen am Schubelement unterstützen die Zentrierfunktion bei unzureichender Fase an den Rohrstoßstellen**

### **Abhängigkeit der Geometrie des Schubelementes von den Schüttgutparametern**

Auf die Bedeutung der Schubelementengeometrie bei der Förderung verschiedener Schüttgüter wurde bereits in Abschnitt 2 – Konzeptentwicklung siehe Abbildung 2-7 eingegangen. Das Schubelement – hier als offener Zylinder ausgeführt – erzeugt Schüttgutballungen / Verdichtungen am Innenradius, die bis zum Auflösen des Druckverbandes der Elemente führen können. Das gestauchte Schüttgut im Rohrbogen kann nicht zur Außenseite des Rohrbogens „abfließen“.

Dieses Verhalten konnte mit modifizierten Koppelstellen verhindert werden. Hierzu wurde eine Seite der Koppelstellenscheiben bis auf eine kleine Stützgeometrie reduziert (Abbildung 5-10).



**Abbildung 5-10: Koppelstelle der Schubelemente mit reduzierter Stützgeometrie**

Zur Verhinderung derartiger Störungen wird für die Serienlösung die Stützscheibe durchbrochen ausgeführt (Abbildung 5-11). Ein Schüttgutabfluss in beliebige Ausgleichsrichtungen wird dadurch leicht möglich.

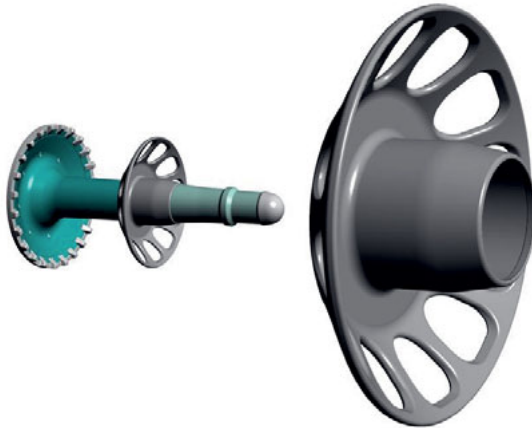


Abbildung 5-11: Schubelement mit durchbrochener Stützscheibe

Die Stützscheibe sichert zusätzlich die Zentrierung von Schubelement zu Schubelement, wenn der Druckverband in der Fallstrecke des Fördersystems aufgehoben ist. Ohne Stützscheibe würden sich die Kopplungsstellen Kugel – Kalotte nicht zentrieren und damit das Gesamtsystem ggf. blockieren (Abbildung 5-12).

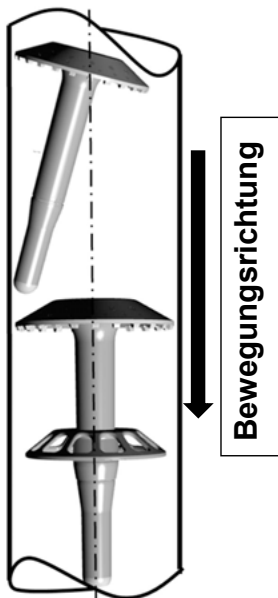
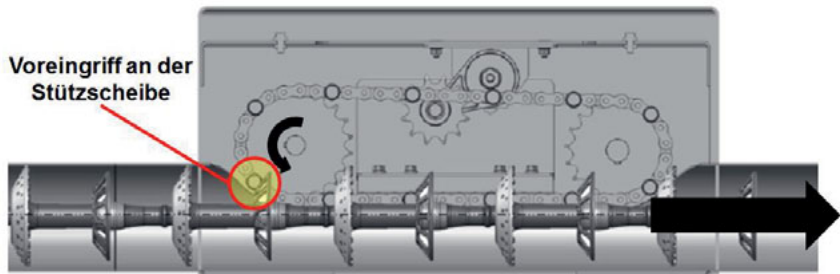


Abbildung 5-12: Schubelemente im Verband ohne Stützscheibe in der Fallstrecke

Die Geometrie der Stützscheibe unterstützt den Eingriff des Mitnehmerbolzens der Kette, da sie durch den Voreingriff des Mitnehmerbolzens (Abbildung 5-13) dafür sorgt, daß der Mitnehmer immer an der regulären Krafteinleitungsstelle der Mitnehmerscheibe angreift. Ist das in die Antriebsstation einlaufende Schubelement nicht in Kontakt mit dem vorauslaufenden Schubelement, findet eine Positionskorrektur statt.



**Abbildung 5-13: Voreingriff des Mitnehmerbolzens der Antriebskette an der Stützscheibe**

### **Toleranzen der Außenmaße des Schubelementes zum Rohrdurchmesser**

Der Spalt zwischen dem Außendurchmesser des Schubelementes und dem Innendurchmesser des Rohres ist für den Transport des Elementes im Rohr von grundsätzlicher Bedeutung. Seine Größe und die festgelegten Toleranzen müssen aber schüttgutabhängig festgelegt werden. In Anlehnung an Untersuchungen durch Katterfeld [Kat-2005] ist es zweckmäßig, für die Schüttgüter in der Grundnahrungsmittelindustrie (körnige, mehlige und sensitive Produkte (wie z.B. Reis)) den umlaufenden Mindestspalt mit ca. 2 mm vorzugeben.

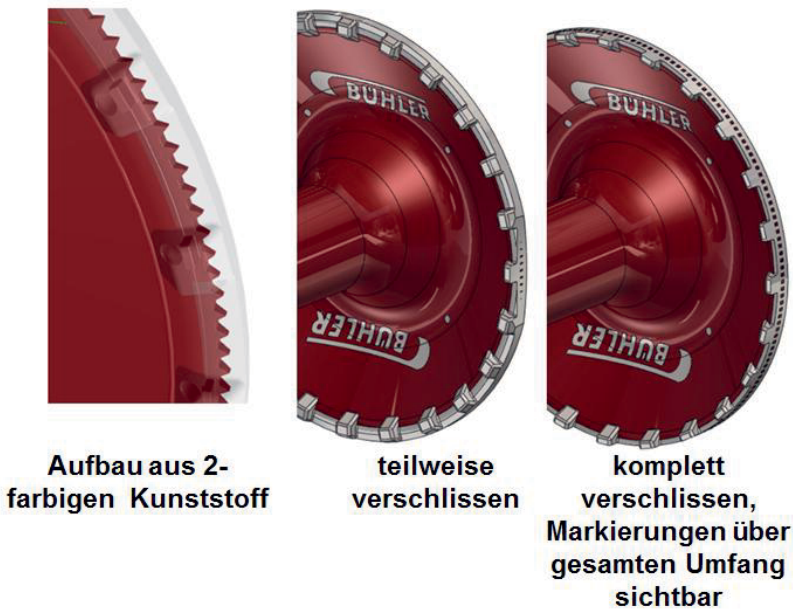
Wird der Spalt grösser, wird zu viel des zu fördernden Materials im Spalt vorbeigeführt, rieselt nach unten und wird bei Umlenkung und Kontaktwechsel des Schubelementes im Rohrbogen zerquetscht. Daraus können starke Belastungsänderungen im Antriebssystem resultieren. Indirekte Nachweise erfolgten über Temperaturmessungen an den Rohrbögen (siehe Abbildung 4-11).

Wird der Spalt zu klein, können auf Grund der Fertigungstoleranzen der Rohrbögen die Schubelemente im Rohrbogen klemmen.<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Bei den üblichen Biegeverfahren für Rohrbögen können sich die Kreisquerschnitte der Rohre elliptisch verformen und damit die Schubelemente im Transport behindern.

Trotz vorgegebener Spiele zwischen Schubelement und Rohr kommt es im Laufe der Betriebszeit zum Verschleiß am Außendurchmesser der Mitnehmerscheibe. Als Indikator für den Verschleißzustand sind Farbmarkierungen am Außendurchmesser angebracht, die je nach Verschleißgrad sichtbar werden.

Vorteil dieser Kennzeichnung ist, daß der Verschleißzustand ohne zusätzliche Hilfsmittel bei laufendem Betrieb auch von ungeschultem Personal erkannt werden kann. Abbildung 5-14 zeigt links eine Mitnehmerscheibe, bei der der Verschleiß am Außendurchmesser - in der Mitte beginnend - sichtbar wird; das rechte Bild zeigt eine verschlissene Scheibe.

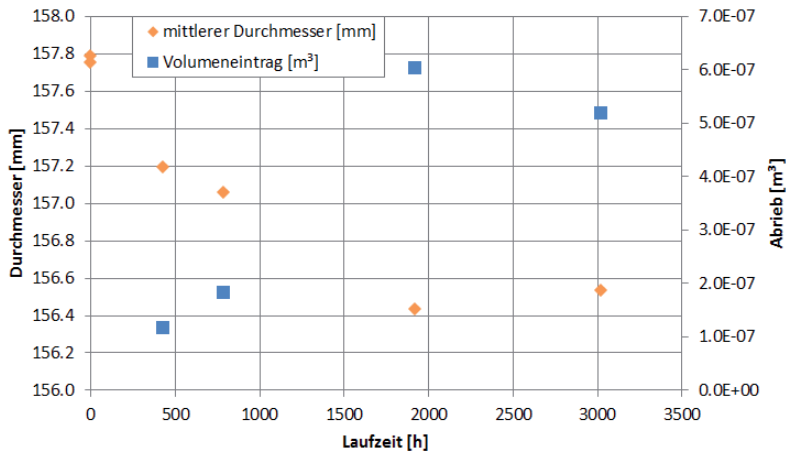


**Abbildung 5-14: Verschleißanzeiger am Schubelement aus 2-farbigem Kunststoff**

Die reale Verschleißsituation in einem Fördersystem führt zwangsläufig zu einem Abrieb an Kunststoff und Rohrmaterial, der vom Schüttgut aufgenommen wird. Derartige Kontaminierungen werden in der Regel durch das Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetz (LBGF) [LBGF-2005] und seine Verordnungen, die US-amerikanische FDA – Zulassung oder, bei Wasser, durch die Trinkwasserverordnung [Tri-2001] limitiert. Da nur die Trinkwasserverordnung definierte Mengengrenzen der Kontaminierungen festlegt, wurde im vorliegenden Fall darauf Bezug genommen. In den Gesetzestexten heißt es z.B. „Lebensmittel dürfen nicht verunreinigt

werden, die organoleptischen Eigenschaften dürfen nicht beeinträchtigt werden“. Konkrete Angaben, welche Partikelgrößen noch zulässig sind oder welche Materialien gefährlich oder weniger gefährlich sein könnten sind in Vorschriften und Gesetzen nicht zu finden. Lediglich die US amerikanische FDA hat für Ihre Lebensmittelspektoren Interpretationsrichtlinien erlassen, ab welchen Dimensionen solche Fremdkörper als unzulässig zu bewerten sind. Das Hauptaugenmerk dieser Regelung richtet sich aber klar nach Verletzungen im Mundbereich oder im Verdauungstrakt aus. Verletzungen müssen vermieden werden. Kleinst- oder Mikropartikel werden bis jetzt als eher untergeordnetes Problem betrachtet (im Vergleich zu Pestizid- oder anderen Rückständen in den Lebensmitteln), da sie vom Magen und Verdauungstrakt nicht aufgenommen werden.

Nachstehende Grafik (Abbildung 5-15) zeigt den experimentell ermittelten Kunststoffverschleiß an einer 6-Zoll Versuchsanlage.<sup>34</sup>



**Abbildung 5-15: Durchmesserreduzierung (rechte Ordinate) und Volumenverlust (linke Ordinate) pro Schubelement an der 6 Inch Versuchsanlage über der Betriebslaufzeit der Anlage**

Wird der Volumenverlust des Kunststoffes für die gesamte Förderanlage, also für alle eingesetzten Schubelemente ermittelt und auf die kumulierte Fördermenge und in

<sup>34</sup> Zur Ermittlung des Kunststoffeintrages in das Schüttgut wurden Durchmesseränderungen der Mitnehmerscheibe über der Laufzeit gemessen. Die Messung erfolgte an jeweils 6 Stellen der Scheibe, die regelmäßig über den Umfang verteilt wurden, um gleichzeitig, neben der absoluten Verschleißangabe, auch eine Aussage über die Verteilung des Verschleißes am Umfang treffen zu können. Die Experimente ergaben, daß der Verschleiß an allen Umfangs-Messpunkten gleichmäßig erfolgte, d.h., sich das Schubelement während des Transportes gedreht haben muss. Diese, aus ersten Beobachtungen bereits erkannte Bewegung, ist äußerst günstig für das gesamte Verschleißverhalten des Fördersystems.

Kunststoffeintrag pro Tonne geförderttes Schüttgut umgerechnet, so ergibt sich Abbildung 5-16.

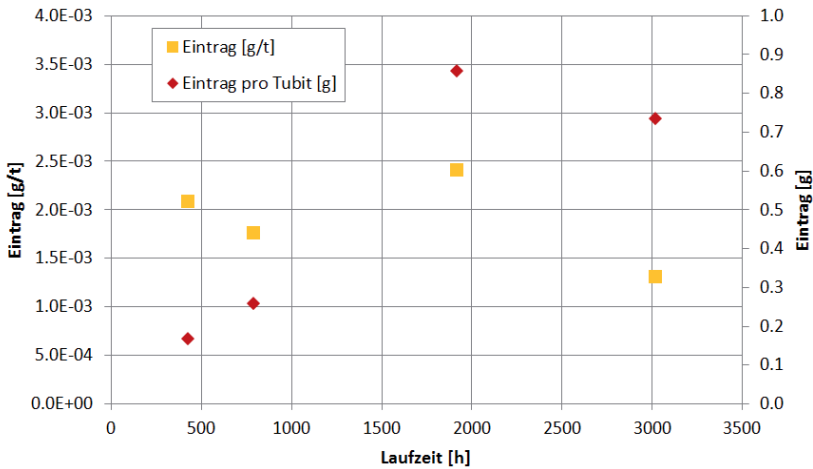


Abbildung 5-16: Kunststoffeintrag pro geförderte Tonne Schüttgut über der Betriebszeit, ermittelt an der 6 Inch Versuchsanlage<sup>35</sup>

Die Auswertung der Messungen zeigt, daß der eingebrachte Kunststoffanteil in Gramm pro Tonne des geförderttes Schüttgutes sehr gering ist. In einer 8 Inch Versuchsanlage wurden nach 400.000 t geförderttem Schüttgut Weizen Werte zwischen 0,01 bis 0,06 g/t berechnet (Abbildung 5-17). Der anfängliche höhere Verschleiß stabilisierte sich auf einen niedrigen Wert, nachdem die Anlage hinreichend „eingelauften“ war. Dies lässt sich darauf zurückführen, daß die Rohrrinnenwandrauigkeit im Dauerbetrieb abnimmt, das heißt, sowohl die Schubelemente als auch das Schüttgut polieren die Rohrrinnenwandung. Für den Eintrag an Mikroplastik gibt es keine allgemeine Vorschrift. Der Gesetzgeber geht davon aus, das Mikroplastik nicht im Körper verbleibt.

<sup>35</sup> Tubit ist die firmeninterne Bezeichnung für ein Schubelement



Das Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV äußert sich hierzu in seinem Amtsblatt<sup>36</sup>.

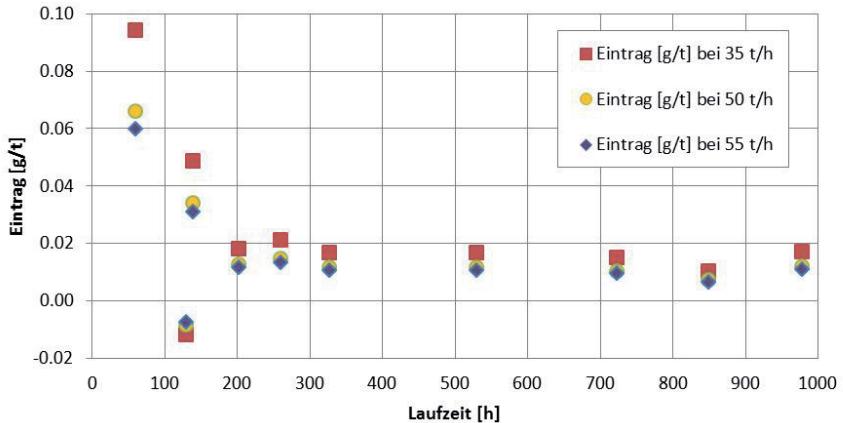


Abbildung 5-17: Kunststoffeintrag in das zu fördernde Produkt über der Betriebslaufzeit für verschiedene Fördermengen in der 8“ Versuchsanlage

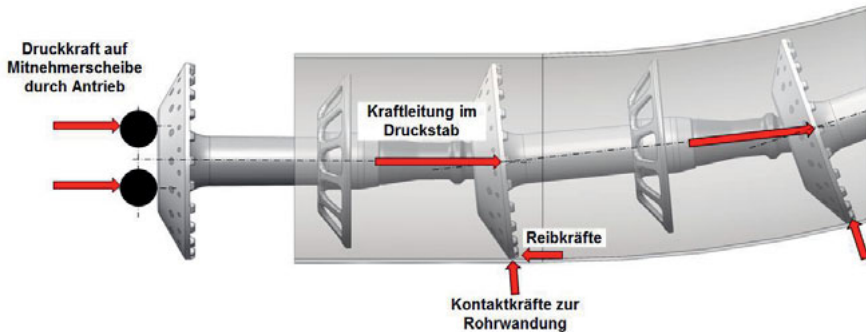
### 5.2.2 Festigkeitsbetrachtungen

Festigkeitsberechnungen am Schubelementeförderer setzen die Kenntnis der vorliegenden Beanspruchungen voraus.

Betrachtet man ein Schubelement isoliert, so lassen sich zwei maßgebliche Krafteinwirkungen erkennen (Abbildung 5-18):

<sup>36</sup> Mikroplastik: „Kleinste Rückstände von Plastik können via Umwelt auch in Lebensmittel, z.B. Honig, gelangen. Die bisher in Lebensmitteln in geringsten Mengen nachgewiesenen Plastikteilchen stellen für die Konsumentinnen und Konsumenten keine Gesundheitsgefährdung dar, da sie schnell wieder ausgeschieden werden und nicht im Körper verbleiben. Das BLV behält die Entwicklung aber im Auge. Als Mikroplastik werden kleinste Kunststoffteilchen mit einer Größe im Mikrometerbereich bezeichnet. In Form von Basispellets wird Mikroplastik als Grundmaterial für die Plastikproduktion eingesetzt. Auch in Kosmetik wie Peelings, Zahnpasta und Handwaschmittel werden solche Mikrokügelchen aus Plastik verwendet. Mikroplastik kann auch durch physikalische, biologische und chemische Degradation von größeren Plastikteilen entstehen. Mikroplastik kann übers Abwasser in die aquatische Umwelt gelangen. Geringe Rückstände von Plastik können so auch in Lebensmittel gelangen. Dies hat kürzlich eine deutsche Studie bestätigt, die Mikroplastik in Honig und im Trinkwasser nachgewiesen hat. Die Herkunft der Plastikteilchen konnte dabei jedoch nicht festgestellt werden. Die gesundheitliche Gefahr, welche von Mikroplastik in Nahrungsmitteln und Kosmetika ausgeht, wird als gering eingestuft. Diese Beurteilung liegt darin begründet, dass die geringen Mengen an Mikroplastik nach oraler Aufnahme im Magen-Darm-Trakt wieder ausgeschieden werden und nicht im Organismus bleiben. Das in Kosmetika verwendete Plastikmaterial, zumeist aus Polyethylen, ist inert und nicht toxisch. Mikrokügelchen in den Kosmetika können die unverletzte Haut nicht penetrieren und gelangen somit nicht in den Körper. Das BLV wird die Situation zum Mikroplastik in Lebensmitteln und Kosmetika weiter im Auge behalten“. BLV Bekanntgabe vom 24.03.2014.

1. Druckkraft auf die Mitnehmerscheibe über den Antrieb und die Kraftleitung im Druckstab auf Vorgängerelemente im Schubverband
2. Kontaktkraft zwischen Mitnehmerscheibe und Rohrwand



**Abbildung 5-18: Maßgebliche Kräfteinwirkungen auf das Schubelement**

Da es sich um ein neuartiges Fördersystem handelt, müssen bei der Inanspruchnahme von Theorien und Modellen Analogien zu bisherigen Systemen gesucht werden. Am ehesten sind die Methoden zur Bestimmung der Kräfte im Schubförderer aus den Theorien zur Kraftberechnung am Rohrkettenförderer [Kat-2005] ableitbar. Im Folgenden wird darauf explizit Bezug genommen.

### **Druckkräfte im Schubverband**

Basierend auf den in Kapitel 4.1 hergeleiteten Berechnungsgrundlagen wurde ein Berechnungstool zur Berechnung der Leistungsdaten und Kräfte im Fördersystem erstellt.

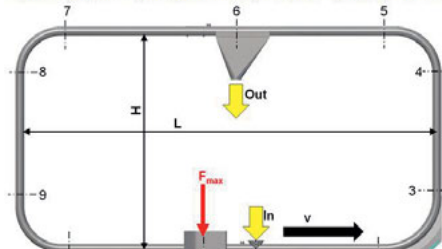
Nach Eingabe von konstruktiven Parametern wie z.B. Rohrrinnendurchmesser, Rohrbogenradius, Schubelementgrößen, sogenannten operativen Werten wie z.B. der Fördergeschwindigkeit, vorgegebenen Schüttgutparametern und der horizontalen und vertikalen Linienführung der Förderstrecke errechnet das Programm unter Annahme vorgegebbarer Reibwerte zwischen Schüttgut und Rohrwand die Kräfte im Förderstreckenverlauf und die daraus folgende, notwendige Antriebsleistung.

Die Abbildung 5-19 zeigt die Eingabemaske eines typischen Berechnungsfalles in O-Anordnung und die berechneten Werte.

## 5.2 Berechnungen und Simulationen zum Schubelement

Berechnung eines Schubsegmentförderers / Druck-TUBO mit Linienführung vom allgemeinen O-Typ

O-Typ wurde erkannt



Gut:	Korn
Massenstrom [t/h]:	25
max. Geschwindigkeit [m/s]:	0.5
Füllungsgrad:	
Linienführung:	
B [m]:	5
H [m]:	5
L oben [m]:	0
L unten [m]:	0
Position Auslauf bezogen auf Einlauf:	
B [m]:	3
H [m]:	0
L oben [m]:	0
benutzerdefinierte Wegabschnitt:	Länge [m]:
0 - 1	2
1 - 2	1
Berechnete Antriebsparameter:	
Umfangskraft am Antrieb [N]:	1907.12
Antriebsmoment [Nm]:	154.11
Antriebsleistung [W]:	1248.20
Spezifischer Leistungsbedarf [kW*h/t]:	0.0499
Gewählter TUBO:	Basic 06
max. Füllungsgrad:	0.33
berechnete Geschwindigkeit [m/s]:	0.5
max. Kraft [N]:	2025.783504

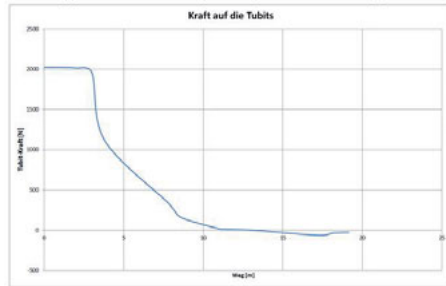
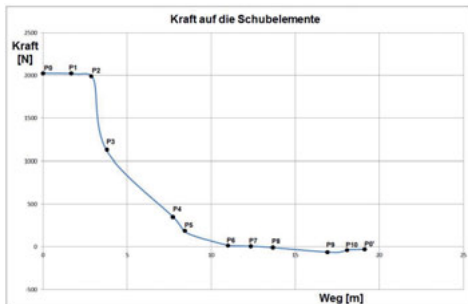


Abbildung 5-19: Eingabe und Ausgabe des Berechnungstools zur Auslegung des Schubelementförderers

Der sich ergebende Kraftverlauf über der Förderstrecke nach Abbildung 5-20 lässt erkennen, daß die an der Antriebseinheit vorliegende maximale Kraft über den Rohrbogen bis zur Entleerung abfällt. Die Schubelemente werden also in der Antriebseinheit am stärksten belastet.



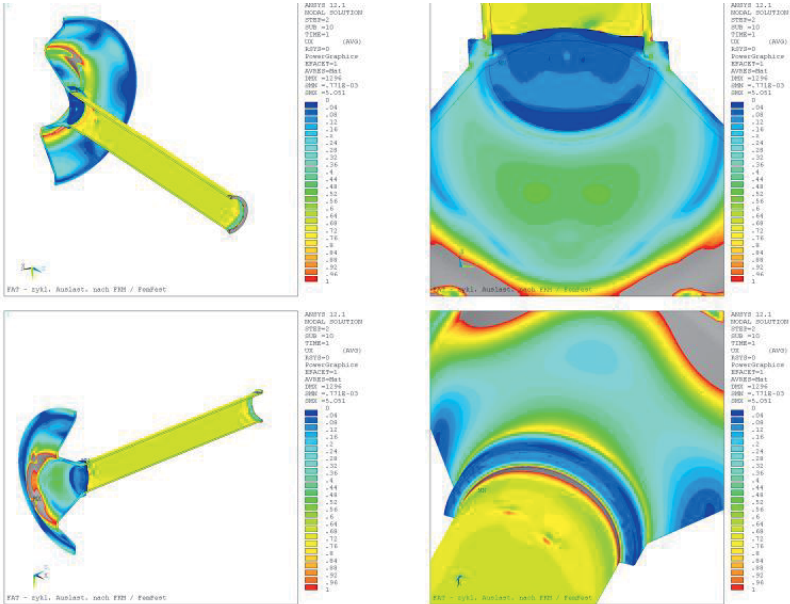
Wegabschnitte		Weg		Kraft
O-Typ	L-Typ	Weg [m]	Kraft [N]	
0	0	0	2025.783504	
1	1	1	2025.783504	
2	2	2	1997.070562	
3	3	3	1326.266876	
4	4	4	7.76338183	340.038846
5	5	5	6.37078625	180.8270119
6	6	6	11.07078633	12.20870561
7	7	7	11.07078633	12.20870561
8	8	8	11.07078633	12.20870561
9	9	9	11.07078633	12.20870561
10	10	10	11.07078633	12.20870561
11	11	11	11.07078633	12.20870561
12	12	12	11.07078633	12.20870561
13	13	13	11.07078633	12.20870561
14	14	14	11.07078633	12.20870561
15	15	15	11.07078633	12.20870561
16	16	16	11.07078633	12.20870561
17	17	17	11.07078633	12.20870561
18	18	18	11.07078633	12.20870561
19	19	19	11.07078633	12.20870561
20	20	20	11.07078633	12.20870561
21	21	21	11.07078633	12.20870561
22	22	22	11.07078633	12.20870561
23	23	23	11.07078633	12.20870561
24	24	24	11.07078633	12.20870561
25	25	25	11.07078633	12.20870561
26	26	26	11.07078633	12.20870561
27	27	27	11.07078633	12.20870561
28	28	28	11.07078633	12.20870561
29	29	29	11.07078633	12.20870561
30	30	30	11.07078633	12.20870561
31	31	31	11.07078633	12.20870561
32	32	32	11.07078633	12.20870561
33	33	33	11.07078633	12.20870561
34	34	34	11.07078633	12.20870561
35	35	35	11.07078633	12.20870561
36	36	36	11.07078633	12.20870561
37	37	37	11.07078633	12.20870561
38	38	38	11.07078633	12.20870561
39	39	39	11.07078633	12.20870561
40	40	40	11.07078633	12.20870561
41	41	41	11.07078633	12.20870561
42	42	42	11.07078633	12.20870561
43	43	43	11.07078633	12.20870561
44	44	44	11.07078633	12.20870561
45	45	45	11.07078633	12.20870561
46	46	46	11.07078633	12.20870561
47	47	47	11.07078633	12.20870561
48	48	48	11.07078633	12.20870561
49	49	49	11.07078633	12.20870561
50	50	50	11.07078633	12.20870561
51	51	51	11.07078633	12.20870561
52	52	52	11.07078633	12.20870561
53	53	53	11.07078633	12.20870561
54	54	54	11.07078633	12.20870561
55	55	55	11.07078633	12.20870561
56	56	56	11.07078633	12.20870561
57	57	57	11.07078633	12.20870561
58	58	58	11.07078633	12.20870561
59	59	59	11.07078633	12.20870561
60	60	60	11.07078633	12.20870561
61	61	61	11.07078633	12.20870561
62	62	62	11.07078633	12.20870561
63	63	63	11.07078633	12.20870561
64	64	64	11.07078633	12.20870561
65	65	65	11.07078633	12.20870561
66	66	66	11.07078633	12.20870561
67	67	67	11.07078633	12.20870561
68	68	68	11.07078633	12.20870561
69	69	69	11.07078633	12.20870561
70	70	70	11.07078633	12.20870561
71	71	71	11.07078633	12.20870561
72	72	72	11.07078633	12.20870561
73	73	73	11.07078633	12.20870561
74	74	74	11.07078633	12.20870561
75	75	75	11.07078633	12.20870561
76	76	76	11.07078633	12.20870561
77	77	77	11.07078633	12.20870561
78	78	78	11.07078633	12.20870561
79	79	79	11.07078633	12.20870561
80	80	80	11.07078633	12.20870561
81	81	81	11.07078633	12.20870561
82	82	82	11.07078633	12.20870561
83	83	83	11.07078633	12.20870561
84	84	84	11.07078633	12.20870561
85	85	85	11.07078633	12.20870561
86	86	86	11.07078633	12.20870561
87	87	87	11.07078633	12.20870561
88	88	88	11.07078633	12.20870561
89	89	89	11.07078633	12.20870561
90	90	90	11.07078633	12.20870561
91	91	91	11.07078633	12.20870561
92	92	92	11.07078633	12.20870561
93	93	93	11.07078633	12.20870561
94	94	94	11.07078633	12.20870561
95	95	95	11.07078633	12.20870561
96	96	96	11.07078633	12.20870561
97	97	97	11.07078633	12.20870561
98	98	98	11.07078633	12.20870561
99	99	99	11.07078633	12.20870561
100	100	100	11.07078633	12.20870561

Berechne

Abbildung 5-20: Typischer Kraftverlauf über der Förderstrecke bei einer O-Anordnung und tabellarische Darstellung der berechneten Werte (vergl. Abbildung 4-5)

**FEM-Berechnungen zur Auslegung der Schubelemente**

Mit den berechneten Belastungen, fiktiv für verschiedene Baugrößen des Fördersystems durchgeführt, sind nun Auslegungsrechnungen für die Schubelemente möglich. Die Berechnungen (realisiert von der Firma IBAF-Bochum [Kat-2015]) zeigen am Beispiel eines 8 Inch Schubelementes aus Stahl S 235 die Spannungssituation (Abbildung 5-21).



**Abbildung 5-21: Durch FEM-Analyse berechnete Spannungen im Schubelement**

Auf die genannte Weise wurde die festigkeitsentsprechende Konstruktion aller Schubelemente der einzelnen Fördersystem - Baugrößen durch FEM – Rechnungen und Dauerfestigkeitsnachweise [Hän-2003] nach der FKM-Richtlinie [FKM-2012] bestätigt<sup>37</sup>.

**MKS-Berechnungen zur Bestimmung der Kontaktkräfte zwischen den Schubelementen im Rohr / Rohrbogen**

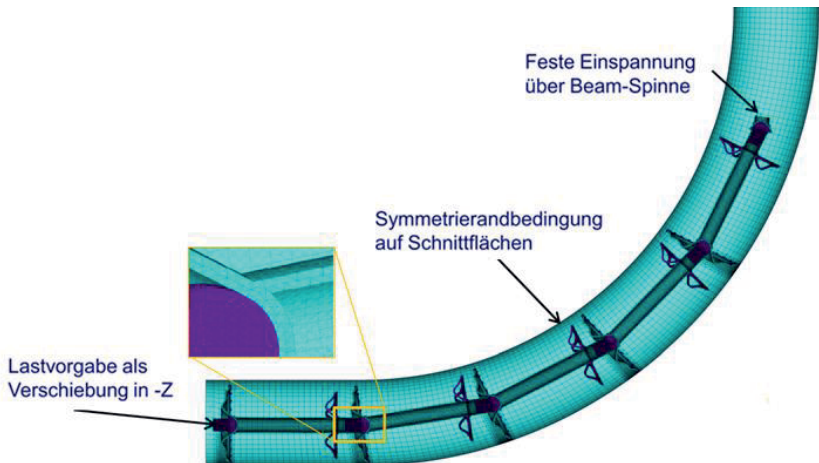
Wie Abbildung 5-20 zeigt, sind die Kräfte bis zum ersten Rohrbogen nach der Antriebsstation am größten. Detailuntersuchungen ergeben, daß im Rohrbogen nicht

<sup>37</sup> FKM steht für Forschungskuratorium Maschinenbau. Hier werden Festigkeitsnachweise für Maschinenbauteile verbindlich geregelt.

von einem stetigen Kraftverlauf ausgegangen werden kann, sondern, daß je nach Rohrbogenform und Schubelementlänge, sehr starke Kontakt - Kraftschwankungen erwartet werden müssen. Abbildung 5-20 zeigt demnach nur einen Durchschnittsverlauf an.

Für die Ermittlung der für den Verschleiß von Rohrwandung und Schubelement maßgeblichen Kontaktkräfte, insbesondere ihrer Schwankungen, sind klassische Berechnungsverfahren nicht nutzbar. Hier müssen entweder experimentelle Untersuchungen oder ein modernes Berechnungsverfahren wie die Mehrkörpersimulationen (MKS) eingesetzt werden. Abbildung 5-22 zeigt das verwendete Simulationsmodell und Abbildung 5-23 Ergebnisse für die ausgewählten Elemente.

Die für die Dimensionierung ebenfalls relevanten Kontaktkräfte zwischen Schubelementen und Rohrbogen sind bereits in Kapitel 4.2.3 behandelt worden.



**Abbildung 5-22: Eingangsgrößen für die Mehrkörpersimulation und Bestimmung der Reaktionskräfte**

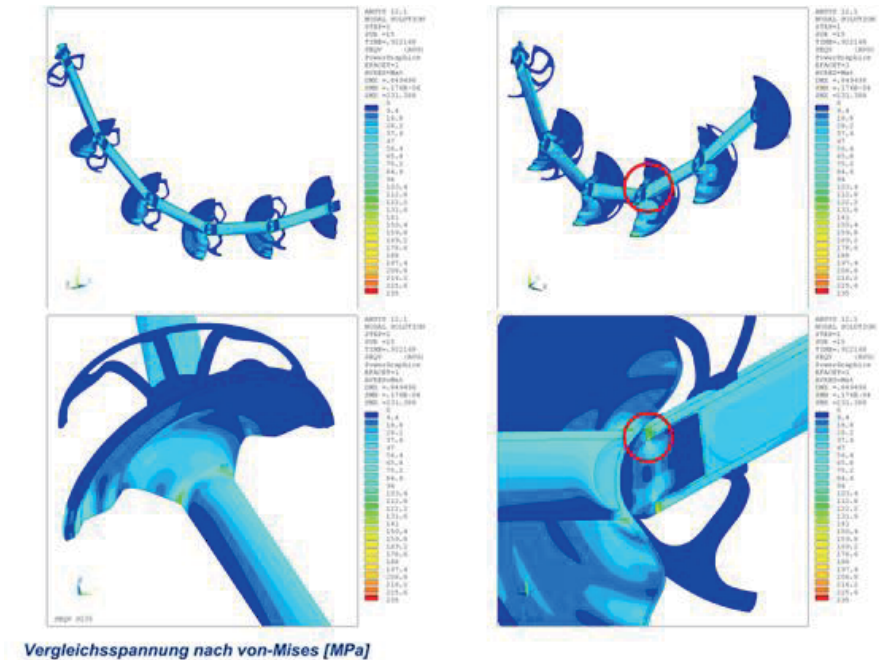


Abbildung 5-23: Bestimmung der Bauteilspannungen und Verformungen

Die ermittelten Ergebnisse bestätigen die Annahme, daß die grössten Bauteilspannungen in der Antriebsstation zu erwarten sind. Die Schubelementedimensionierung muss demnach von diesen Spannungen ausgehen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, welche Kräfte in der Antriebsstation bei unterschiedlichen Fördervolumen, bei unterschiedlichen Schüttgutdichten und bei unterschiedlichen Förderhöhen auftreten. Die Berechnungen berücksichtigen insbesondere die bei den Antriebsvarianten auftretenden unterschiedlichen Krafthöhen an den Schubelementen.

Sollen die auf diese Weise ermittelten Werte zur Dimensionierung der Schubelemente herangezogen werden ergibt sich die Notwendigkeit, verschiedene Antriebsvarianten (als künftige Grundlage für Typengruppen) einzuführen.

Für kleine Fördervolumen und kleine Förderhöhen wird nach Kapitel 5.1.2 das Antriebssystem **basic** verwendet. Hier liegt nach Abbildung 5-24 der Kettenantrieb horizontal einseitig am Schubelement an.

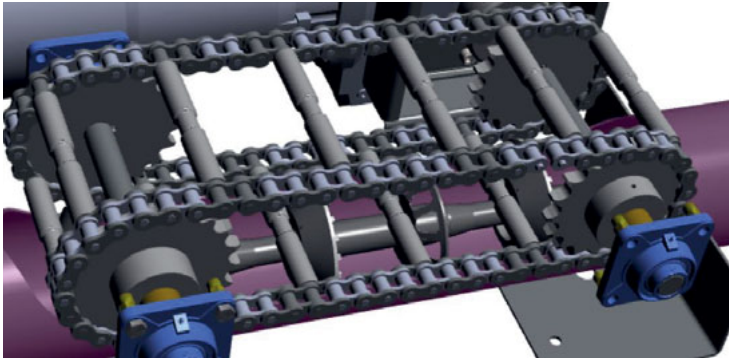


Abbildung 5-24: Vereinfachter *basic* - Antrieb mit einem Kettenpaar und asymmetrischer Krafteinleitung

Für größere Höhen und größere Fördervolumina wird die Antriebsvariante **standard** festgelegt (Abbildung 5-25). Hier werden die Schubelemente beidseitig mit senkrecht stehenden Kettenrädern angetrieben.

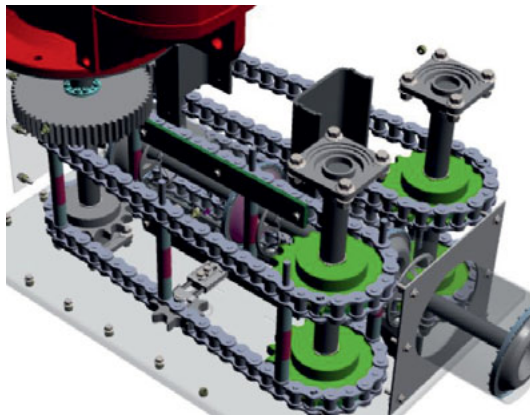


Abbildung 5-25: *Standard* - Antrieb mit zwei Kettenpaaren und symmetrischer Krafteinleitung

Für sehr große Höhen und Fördervolumina steht eine **heavy duty** Ausführung mit dem Antriebsprinzip der **standard** - Variante zur Verfügung.



Die Annahme einer rein statischen Belastung der Elemente ist allerdings nicht ausreichend. Sie muss um theoretische und experimentelle Untersuchungen zu dynamischen Belastungsauswirkungen ergänzt werden<sup>38</sup>.

Zur Absicherung der von IBAF [Kat-2015] ermittelten statischen - und Dauerfestigkeitsberechnungen wurden deshalb begleitend Versuche durchgeführt:

- für eine statische Druckbelastung bis zum Bauteilbruch,
- für eine dynamische Bauteilbelastung bis zu einer Grenzspielzahl von  $2 \cdot 10^6$  Zyklen.

Für die statische Bruchlastbestimmung wird die Situation im Rohr unter achsparalleler Krafteinleitung ( $0^\circ$ -Anordnung) und die Situation im Rohrbogen unter einem Winkel von  $15^\circ$  ermittelt<sup>39</sup> (siehe Abbildung 5-26).



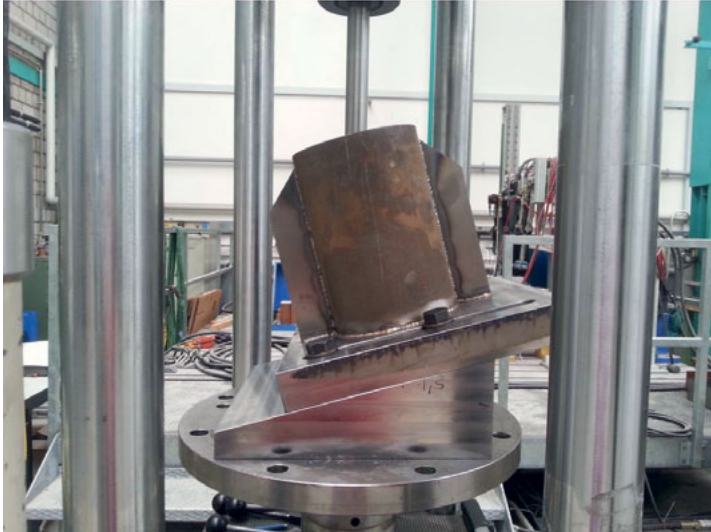
**Abbildung 5-26: Winkelstellung  $\alpha_1=15^\circ$  im Rohrbogen**

Die Abbildung 5-27 zeigt den Versuchsaufbau für die statische Prüfung unter  $\alpha_1=15^\circ$ . Das Rohr stützt das Schubelement, das sich am Boden in einer Kalotte abstützt. Die Belastung wird über einen Stahlstößel mit Kugelkopf eingeleitet.

<sup>38</sup> Mittels der Dauerfestigkeitsberechnung nach der FKM Richtlinie kann ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis geführt werden. Die Berechnung von Kunststoffwerkstoffen ist problematisch, da die FKM Richtlinie Werkstoffkennzahlen für Stahl, für nichtrostende Stähle, für Eisengusswerkstoffe und Aluminium angibt. Kennzahlen für Kunststoffe sind in der Regel Schätzwerte.

<sup>39</sup> Der Rohrbogenradius für den 6"- Schubelementeförderer wurde mit  $R=1000$  mm festgelegt, somit beträgt die maximale Winkelabweichung von der Geraden ca.  $15^\circ$ .





**Abbildung 5-27: Versuchsaufbau für den statischen Druckversuch unter  $\alpha_1=15^\circ$ , Seitenansicht**

Die geringsten durch das Schubelement übertragbaren Kräfte wurden in achsparallelen Neigungsversuchen ( $\alpha_1 = 0^\circ$ ) ermittelt. Hier sind die Kontaktkräfte der Schubelemente zur Rohrwandung geringer, so daß die Reibkraft sehr klein wird. Die Reibkraft wirkt aber entgegen der Lasteinleitung. Alle Neigungsänderungen  $> 0^\circ$  führen damit zwangsläufig zur Erhöhung der Reibkräfte, die allerdings durch den Antrieb zu kompensieren sind. Die  $0^\circ$  -Version ist also relevant für die Bestimmung der maximal zulässigen Kraft auf das Schubelement.

Alle Schubelemente versagten, wie in Abbildung 5-28 zu sehen ist, an der gleichen Stelle, an der Spitze des Druckstabes.



**Abbildung 5-28: Versagtes Schubelement nach statischer Druckbelastung**

Die Auswertung der Druckversuche nach Abbildung 5-29 und 5-30 zeigt ein Versagen, d.h. eine plastische Verformung bis zum Bruch des Schubelementes, bei einem Stauchungsweg von  $\geq 9$  mm.

Bei 5 Proben je Belastungsrichtung ( $0^\circ$  und  $15^\circ$ ) ergaben sich jeweils 5 Kraft-Messwerte für den Versagensfall.

Ihre Streuung ermittelt sich zu

$$s = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (x_i - \bar{x})^2 \quad 40 \quad (5.2)$$

Für die Messungen mit der  $0^\circ$ -Neigung ergibt sich  $s = 0,3$  und damit eine Schätzung der Versagenskraft von  $N = (15,02 \pm 0,3)$  kN für 68% der Grundgesamtheit. Bei  $2s = 0,6$ , d.h. einer Erfassung von 95% der Grundgesamtheit, ergibt sich die Kraft im Bereich von 14,42 bis 15,62 kN. Da die Druckbelastung des Schubelementes in der Antriebsstation auf 7 kN begrenzt ist folgt damit eine experimentell ermittelte Sicherheit von ca.  $\nu = 2$  gegen mechanisches Versagen auf Druckbelastung. Die Streuung für beide Belastungsrichtungen ist relativ gering (im Fall der  $0^\circ$ - Neigung gilt  $s = 0,3$  kN), so daß angenommen werden darf, daß der Fertigungsprozess der Schubelemente stabil ist, die Teile also reproduzierbar gefertigt werden können.

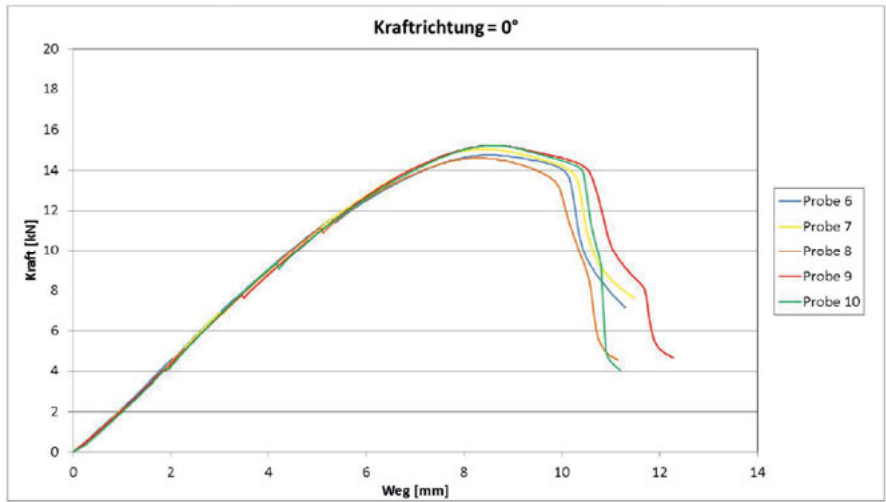
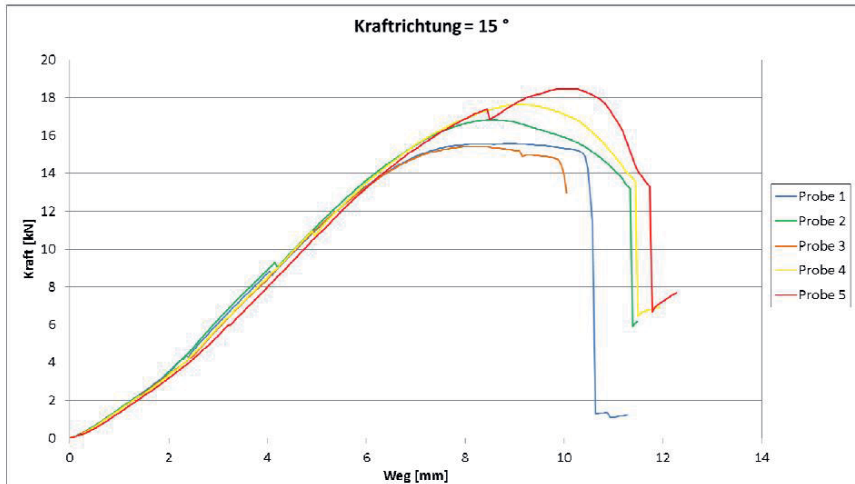


Abbildung 5-29: Kraft- Weg Verlauf bei  $0^\circ$  Winkelabweichung für das 6'' Schubelement

<sup>40</sup> Mit  $x_i$  werden die einzelnen Messwerte, mit  $\bar{x}$  der Mittelwert der Messungen bezeichnet.

Für eine  $15^\circ$  Neigung steigen die übertragbaren Kräfte an (Abbildung 5-30), d.h., eine Dimensionierung des Schubelementes muss für die achsparallele Krafteinleitung ( $0^\circ$  -Variante) durchgeführt werden.



**Abbildung 5-30: Kraft- Weg Verlauf bei  $15^\circ$  Winkelabweichung für das 6“ Schubelement**

Eine dynamische Bauteilerprobung soll die Situation in der Antriebsstation simulieren. Hier sind - wie bereits gesagt und wie sich in den ersten Versuchen auch zeigte - die größten Belastungen auf das Schubelement zu erwarten.

Experimentell untersucht wurden die beiden Antriebssituationen nach (Abbildung 5-31).



**Abbildung 5-31: Versuchsaufbau zur dynamischen Belastung mit hydraulischem Pulsator: links: einseitige (unsymmetrische) Krafteinleitung mit 3,6 kN wie in der *basic*-Variante; rechts: doppelseitige (symmetrische) Krafteinleitung mit 7kN wie in der *standard* - Variante**

Es wurden jeweils zwei Proben mit  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln geprüft. Die maximale Vorschubkraft wurde mit einer bzw. zwei drehbar gelagerten Rollen analog zur Situation in der Antriebsstation eingeleitet. Das Schubelement wurde dann wieder entlastet bis auf eine Restlast von 200 N. Die Deformation wurde über der Lastwechselzahl aufgezeichnet. Für beide simulierten Antriebsvarianten ergeben sich völlig unterschiedliche Effekte. Während, wie Abbildung 5-32 zeigt, bei einseitiger Belastung mit wachsender Lastwechselzahl eine permanente Verkürzung des Schubelementes stattfindet, ergibt sich bei der doppelseitigen Belastung zwar auch eine Verkürzung der Schubelemente, diese stabilisiert sich aber bei ca.  $1 \cdot 10^6$  Lastwechseln (Abbildung 5-33). Danach findet keine nennenswerte weitere plastische Verformung der Schubelemente statt. Die  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel wurden von allen Proben erreicht, ohne daß eine Zerstörung oder Anrisse am Bauteil erkennbar waren<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Mit  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel ist zwar nicht die Dauerfestigkeit nachgewiesen sondern nur die sogenannte Zeitfestigkeit. Bei Dauerfestigkeiten müssen Zyklen  $> 10^7$  Lastwechsel ausgehalten werden. Es wird allerdings für unseren Anwendungsfall eine ausreichende Lebensdauer der Bauteile erreicht. Beim Einsatz eines Schubelementeförderers im 3 Schichtbetrieb über 360 Tage im Jahr durchläuft ein Schubelement ca. 500.000 mal die Antriebsstation und wird mit dieser Zykluszahl be- und entlastet. Mit dem Dauerschwingversuch wurde somit nachgewiesen, daß die geforderte Standzeit  $> 1$  Jahr erreicht werden wird.

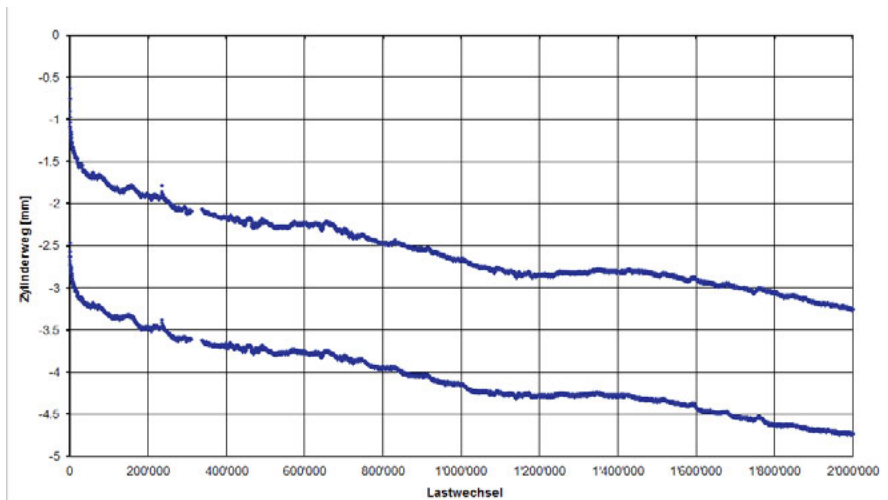


Abbildung 5-32: Dauerschwingversuch mit Modellierung des 6 Inch *basic*-Antriebes

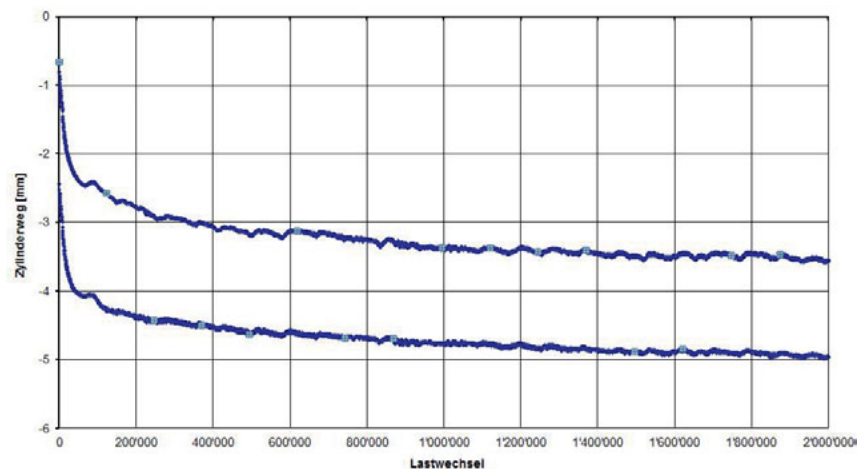


Abbildung 5-33: Dauerschwingversuch mit Modellierung des 6 Inch *standard*-Antriebes

Die Verkürzung stagniert allerdings nicht völlig; hier zeigt sich, daß die Wöhleraussagen für Kunststoffe nicht ohne Anpassung übernommen werden können.

### 5.2.3 Werkstoffauswahl und spezielle Herstellungsverfahren / Mehrkomponententechnik

Die Schubelemente für das Fördersystem können aus metallischen oder/und nicht-metallischen Werkstoffen gefertigt werden. Sie müssen dabei einer Vielzahl von Forderungen genügen:

- Erfüllung aller Gestaltanforderungen (Koppelstellen, Zentriermasen,...),
- geringes Gewicht bei ausreichender Festigkeit,
- geringes Bauvolumen zur Erhöhung des Volumen-Wirkungsgrades,
- geringe Reibung zwischen Schubelement und Rohrwandung und geringer Verschleiß,
- geringer Reibungsverschleiß an der Koppelstelle Kugel / Kalotte der Schubelemente,
- hohe Lebensmittelverträglichkeit,
- Vermeidung eines Farbeintrages durch Werkstoffabrieb in das zu fördernde Produkt,
- Vermeidung einer statischen Aufladung, da Betrieb in staubhaltiger Umgebung,
- geringe Korrosionsanfälligkeit,
- geringer Unterschied der Werte von Gleit- und Haftreibungskoeffizient zwischen Schubelement und Rohrwandung,
- Nutzung spezifischer Fertigungsverfahren, um unerlaubten Nachbau zu erschweren (Plagiatproduktion)
- Temperaturstabilität des Werkstoffes bis 80°C

Selbstverständlich sind geringe Fertigungs – und Materialkosten sowie schnelle Teilverfügbarkeit und hohe Reproduzierbarkeit ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Grundsatzentscheidung zum Werkstoff ergibt sich aus den notwendigen Festigkeiten. Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Baureihe (siehe auch Kapitel 5.2.2) folgen aus den Festigkeitsberechnungen folgende Abhängigkeiten Tabelle 5-5:

Baugröße	Maximale zulässige Kraft am Schubelement	Werkstoff
6 inch basic	3,6 kN	Kunststoff
6 inch standard	7 kN	Kunststoff
8 inch standard	16 kN	Kunststoff/ Stahl
8 inch heavy duty	30 kN	Kunststoff/ Stahl

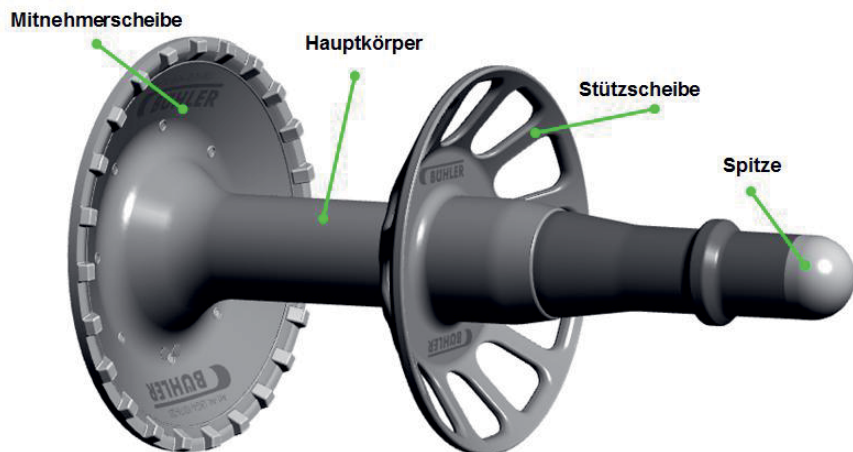
Tabelle 5-5: Festigkeitsklassen für Schubelemente

**Schubelement aus Kunststoff**

Die Werkstoffwahl für die Schubelemente ist durch die Nutzung im Lebensmittelbereich begrenzt. Faserverbundwerkstoffe, z.B. glasfaserverstärkte Materialien, können nicht als Reibpartner verwendet werden, da sie sich hochabrasiv verhalten. Die geforderten Festigkeitswerte lassen sich aber nur mit glasfaserverstärkten Kunststoffen erreichen. Die Konstruktionsregel „Funktionswerkstoff an den Funktionsort“ erfordert also zwingend eine Mehrkomponentenbauweise.

Mit der Mehrkomponenten-Spritztechnik lassen sich Kombinationen unterschiedlicher Kunststoffmaterialien mit besonderen Eigenschaften und Effekten herstellen [Erh-1999]. Diese Technologie bietet die Möglichkeit, verschiedenartige Kunststoffwerkstoffe gezielt im Urformverfahren an den Funktionsort zu bringen. So lassen sich verschiedene Kunststoffe entweder in formschlüssigen oder stoffschlüssigen Verbindungen fügen. Die Schmelzen werden bei dem gewählten Verfahren voneinander getrennt sequenziell in die entsprechende Werkzeugkavität eingebracht [Bri-2011]. Der Werkstoff, der als Reibpartner zur Rohrwandung und zu den Mitnehmerbolzen verwendet werden soll, muss Forderungen hinsichtlich Festigkeit und Verschleiß erfüllen. Der Gleitverschleiß zu Stahl und Edelstahl soll gering sein. Die Reibungskoeffizienten  $\mu_{\text{Haft}}$  und  $\mu_{\text{Gleit}}$  sollen nahezu gleiche Werte besitzen, um einen Stick-Slip Effekt zu vermeiden und ein gutes Anfahrverhalten eines gefüllten Förderers zu ermöglichen [Hel-2010]. Bei bestimmten Kombinationen der ausgewählten Kunststoffe kann keine stoffschlüssige (Haftung oder Aufschmelzung und Verbindung der unterschiedlichen Komponenten) Verbindung erreicht werden. Da als Gleitpartner zum Förderrohr ein Polyacetal (POM) gewählt wurde, muss die Verbindung der Werkstoffe demnach formschlüssig erfolgen.

Schubelemente aus Kunststoff sind - wie schon gesagt - aus drei Teilen, dem Hauptkörper, der Stützscheibe und der Spitze aufgebaut, die selbst wieder aus mehreren Teilen unterschiedlicher Werkstoffe bestehen (siehe Abbildung 5-34).



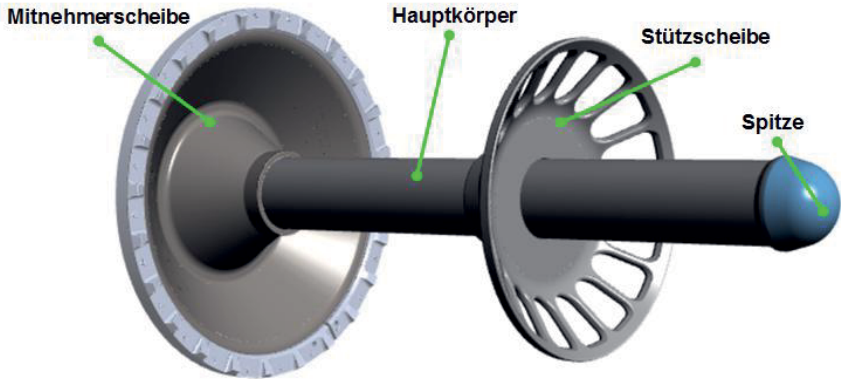
**Abbildung 5-34: Schubelement in Kunststoffausführung als Explosionszeichnung zur Darstellung der Einzelkomponenten**

Im Hauptkörper eingelassen ist die Kalotte als Kupplungselement für die Kugel des nachfolgenden Schubelementes. Die Bauteilkomponente des Hauptkörpers, die zur Fixierung der Stützscheibe und zur Druckübertragung auf die Spitze dient, wird mit der Kalotte gemeinsam umspritzt. Die Spitze, mit der umspritzten Kugel wird im Hauptkörper durch eine Klippverbindung befestigt, die selbst durch den Stützring abgedeckt wird. Kalotte und Kugel als unmittelbare kraftübertragende Kopplungsstellen mit Relativbewegung zueinander bestehen aus einem reibungsarmen POM-Werkstoff, die restlichen Elemente des Schubelementes aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

### **Schubelement aus Metall / Kunststoff**

Der prinzipielle Aufbau der Schubelemente aus einer Metall – Kunststoff - Kombination ist mit seinen drei Teilen – dem Hauptkörper, der Stützscheibe und dem Druckstab dem Aufbau der Kunststoff-Schubelemente gleich (siehe Abbildung 5-35).





**Abbildung 5-35: Schubelement in Stahl / Kunststoffbauweise**

Der prinzipielle Unterschied besteht in der Verwendung von Metallwerkstoffen an allen kraftübertragenden Stellen. In Kunststoff sind nur die Kugel zur Reibungsminimierung, die Stützscheibe und der sogenannte Gleitring mit den Zentriernocken ausgeführt.

Der strukturelle Aufbau beider Schubelementvarianten dient allerdings nicht nur der Sicherung der Kraftübertragung für die unterschiedlich vorgegebenen Maximalkräfte, sondern gestattet auch, die oben einleitend genannten Forderungen optimal zu erfüllen. Dazu gehört auch der nicht zu vernachlässigende „Kopierschutz“. Plagiat-orientierte Mitbewerber bekommen dadurch mehrere, nicht so einfach überbrückbare Hürden in den Weg gestellt.

## 5.3 Untersuchungen zum Antrieb

In der Phase der Konzeptentwicklung (Kapitel 3) wurden verschiedene Antriebsvarianten prinzipiell vorgestellt. Der Kettenantrieb wurde favorisiert, da er eine einfache und schnelle Lösung des Antriebsproblems durch leicht verfügbare Bauelemente (Kettenrad, Kette, Antriebsbolzen) verspricht. Eine Vielzahl von Versuchen und Beobachtungen im Dauerbetrieb von Schubelementeförderern weisen allerdings darauf hin, daß eine kontinuierliche Aufbringung von Schubkräften auf die in der Antriebsstation befindlichen Schubelemente nicht grundsätzlich garantiert werden kann. Es ist deshalb hier und zukünftig von Bedeutung, der getriebetechnischen Situation in der Antriebsstation weitere Aufmerksamkeit zu widmen.

Ein kinematisch zweckmäßiger und reibungsarmer Antrieb muss sichern, daß

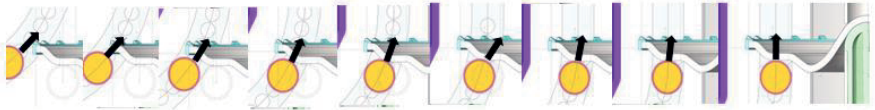
- die Einleitung der Schubbewegung zwischen Kettenbolzen und Mitnehmerscheibe des Schubelementes so erfolgt, daß eine gleichmäßige, d.h. konstante Übersetzung erzeugt wird,
- möglichst geringe Gleitreibung zwischen den Koppelstellen der Übertragungselemente auftritt,
- in der Antriebsstation mehrere Schubelemente tragen, d.h. die Kraft zur Bewegung der Schubelementsäule sinnvoll aufgeteilt wird,
- Spiele zwischen den Schubelementen, die sich durch Verschleiß ergeben, kompensiert werden.

Die Einlaufsituation zwischen Mitnehmerbolzen und Mitnehmerscheibe wird in Abbildung 5-36 dargestellt. Die einzelnen Bildsequenzen zeigen den Bewegungs - und Kontaktablauf zwischen den Kontaktpartnern. (Der Bolzen wird durch das Kettenrad bewegt und ändert dabei seine jeweilige Position zur linear bewegten Mitnehmerscheibe). Als variabel können sowohl der Durchmesser der Mitnehmerbolzen als auch die Kettenraddurchmesser des Antriebssystems betrachtet werden. Unterschiedliche Durchmesser am „einlaufenden“ und am „auslaufenden“ Rad verändern die Kontaktsituation zwischen Bolzen und Mitnehmerscheibe am Einlauf und Auslauf der Schubelemente gravierend<sup>42</sup>. Bei unterschiedlichen Zähnezahlen werden die

---

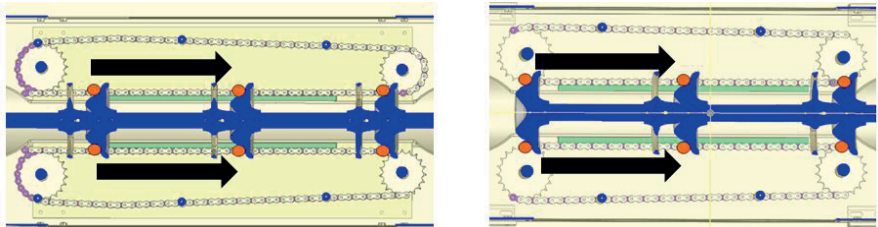
<sup>42</sup> Die Bewegung zwischen Bolzen und Schubelement kann in Analogie zu einer Triebstockverzahnung betrachtet werden. Die Kontaktkurve auf der Mitnehmerscheibe entspricht dann einer Orthozykloide, die durch den Mitnehmerbolzen berührt wird. Damit kann eine konstante Übersetzung während der gesamten Kontaktzeit garantiert werden. Wird der Mitnehmerbolzen gelagert, lässt sich zusätzlich der Verschleiß zwischen Kurve und Bolzen minimieren, da die Gleitreibung durch Rollreibung ersetzt wird und damit an der Kontaktstelle reines Wälzen auftritt [Ott-2014].

Zahnflanken der Räder außerdem statistisch gleichmäßiger belastet und damit der Verschleiß der Kettenräder reduziert. Die Raddurchmesser wurden auch so bestimmt, daß sich in der Antriebsstrecke eine ungerade Anzahl von Mitnehmerbolzen befindet. Durch das Einfügen zusätzlicher „Zwischenmitnehmerbolzen“, die sich im halben Schubelementabstand befinden, wird ein einzelner Bolzen abwechselnd belastet und erreicht damit eine höhere Standzeit.



**Abbildung 5-36:** Einzelne Sequenzen des Andockens des Mitnehmerbolzens an die Mitnehmerscheibe; der Pfeil stellt die Bewegungsrichtung dar, die aus der Kreisbewegung des Mitnehmerbolzens resultiert, bis sie in eine Linearbewegung der Kette übergeht

Für eine optimale Kraftaufteilung auf die in der Antriebsstation befindlichen Schubelemente muss die Länge der Antriebsstation festgelegt werden. Ein Eingriff und Vorschub über mehrere Schubelementelängen bietet eine zusätzliche Sicherheit im Bereich der Antriebsstation (Abbildung 5-37), da die erforderliche Schubkraft bei gleichzeitigem Eingriff auf alle beteiligten Schubelemente verteilt werden kann.



**Abbildung 5-37:** Antriebsstation mit drei Mitnehmerbolzenpaaren (links) und mit zwei Mitnehmerbolzenpaaren (rechts) in der Linearbewegung im Eingriff. (Im rechten Bild ist das Mitnehmerbolzenpaar ganz rechts schon in der Kreisbewegung und trägt nicht mehr zur Kraftübertragung bei)

Die errechneten Leistungen für verschiedene Schubelementeförderer wurden den gemessenen Werten der Versuchsanlagen 6“ **basic** und 8“ **standard** gegenübergestellt (Abbildungen 5-38, Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40). Die Kurven zeigen, daß sich mit dem verwendeten Berechnungsmodell zu geringe Werte im unteren

Füllgradbereich ergeben. Steigt hingegen der Füllgrad, verringert sich diese Tendenz<sup>43</sup>.

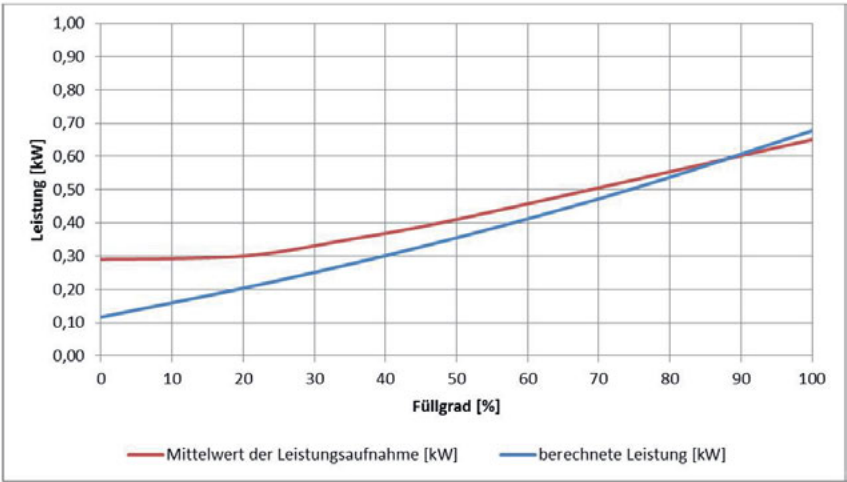


Abbildung 5-38: Verlauf der berechneten und gemessenen Leistungen am 8“ *standard* Schubelementeförderer in Beilngries bei 1,28 m/s und einem Antriebswirkungsgrad von 0,5

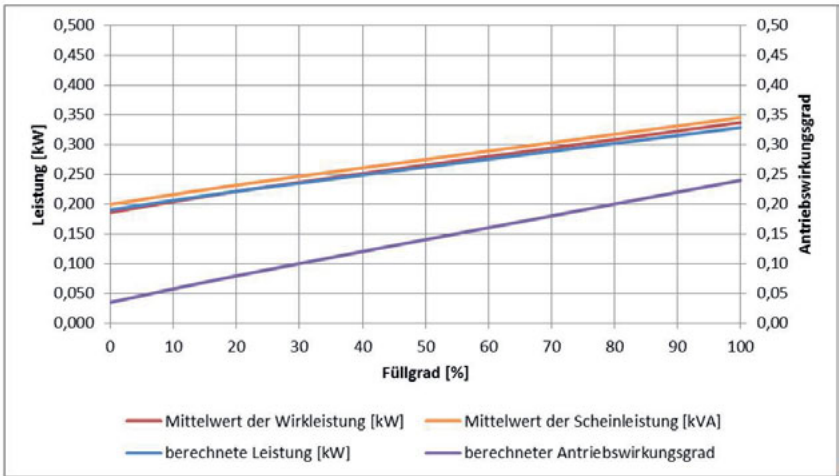
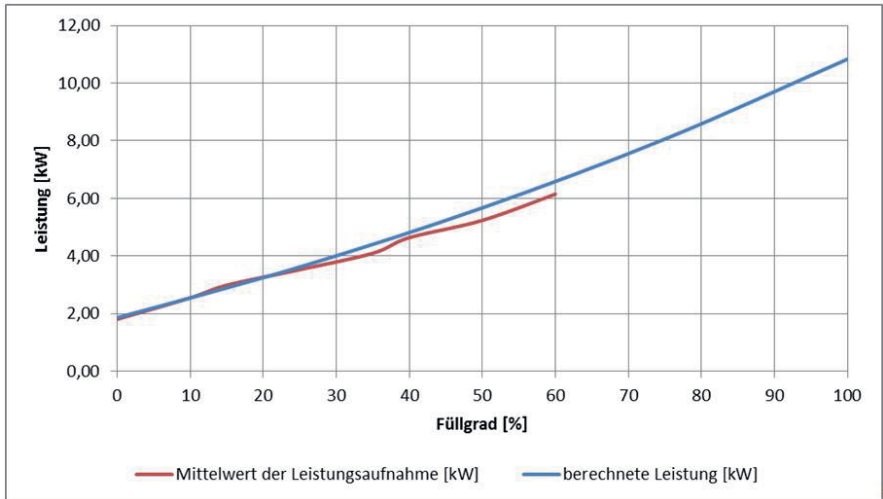


Abbildung 5-39: Verlauf der berechneten und gemessenen Leistungen am 6“ *basic* Schubelementeförderer bei 0,4 m/s und variablem Antriebswirkungsgrad

<sup>43</sup> Die Testanlagen werden alle mit frequenzgeregelten Drehstromasynchronmotoren betrieben. Für die Leistungsberechnung wurde deshalb der Ansatz eines variablen Antriebswirkungsgrades notwendig, da die Verlustleistung über den Frequenzbereich nicht konstant ist.



**Abbildung 5-40:** Verlauf der berechneten und gemessenen Leistungen am 8“ *standard* Schubelementeförderer in Beilngries bei 1,28 m/s und einem Antriebswirkungsgrad von 0,5

Zusammenfassend lässt sich sagen, daß mit zunehmender Belastung des Antriebes die Abweichungen vom Berechnungsmodell zu den gemessenen Werten geringer werden. Da die Leistungsaufnahme der Versuchsanlagen gering ist und sich der Antriebswirkungsgrad bei geringen Leistungsaufnahmen nur sehr schwer ermitteln lässt, sind die berechneten Werte in weiteren Versuchsanlagen, die in Planung und Aufbau sind, zu überprüfen.

## 5.4 Hygienic Design

Maschinen für die Grundnahrungs- und Lebensmittelherstellung müssen bestimmten Hygienebestimmungen entsprechen. Die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG regelt das Inverkehrbringen von Maschinen in den EU – Binnenmarkt, der Schweiz und der Türkei. In der o.g. Richtlinie werden im Punkt 2.1.1 die allgemeinen Grundsätze des Hygienic Design festgeschrieben. Mittels harmonisierter Normen (EN 1672-2 und EN ISO14159) werden diese allgemein gehaltenen Vorschriften präzisiert. Weitergehende und präzisere Anleitungen zum Hygienic Design werden in den EHEDG - Richtlinien beschrieben. Für sämtliche Werkstoffe, die in Kontakt mit dem Nahrungsmittel kommen können, bestehen gesonderte EU- Verordnungen. Für Lebensmittelverarbeitungsmaschinen gelten darüber hinaus besondere EU-Verordnungen und Richtlinien. In der Verordnung EG 2023/2006 über „Gute Herstellerpraxis“ (GMP<sup>44</sup>) werden auch Forderungen an ein Hygienic Design gestellt. Was aber bedeutet Hygienic Design und wie können die Vorschriften umgesetzt werden?

Hauser [Haus-2008-1 und Haus-2008-2] sowie die Richtlinien der EHEDG (European Hygienic Engineering and Design Group) verstehen unter Hygienic Design die leicht reinigbare und hygienegerechte Gestaltung von Prozessanlagen mit dem Ziel der Vermeidung von Bereichen konstruktiv schlecht reinigbarer Schwachstellen zur Erhöhung der Prozesssicherheit und Qualität. Hygienegerechtes Design erfolgt als Gesamtbetrachtung über den gesamten Entwicklungszyklus von der Konzeption bis zu Betrieb und Reinigung. Der Schubelementeförderer soll primär für trockene, allerdings auch für feuchte und nasse Produkte einsetzbar sein. Die unterschiedlichen Einsatzgebiete erfordern eine differenzierte Betrachtungsweise der möglichen Gefährdungen. Die Betrachtung erfolgt mittels einer Risikoanalyse. Hierzu wird das Fördersystem auf die potentiellen, d.h., die biologischen, chemischen und physikalischen Gefahren hin untersucht und bewertet.

Als biologische Gefahren gelten:

- Wachstum von Mikroorganismen wie Schädlinge/ Keime/ etc.,
- Kontamination mit Mikroorganismen,

---

<sup>44</sup> GMP steht für "good manufacturing practice". Die Verordnung (EG) Nr. 2023/2006 der Kommission schreibt dazu : GMP "...bezeichnet jene Aspekte der Qualitätssicherung, die gewährleisten, dass Materialien und Gegenstände in konsistenter Weise hergestellt und überprüft werden, damit ihre Konformität mit den für sie geltenden Regeln gewährleistet ist und sie den Qualitätsstandards entsprechen, die dem ihnen zugeordneten Verwendungszweck angemessen sind, und ohne die menschliche Gesundheit zu gefährden oder eine unvermeidbare Veränderung der Zusammensetzung der Lebensmittel oder eine Beeinträchtigung ihrer organoleptischen Eigenschaften herbeizuführen".

- Kreuzkontamination durch andere Produkte, vor allem bezüglich Zöliakie<sup>45</sup>.

Chemische Gefahren sind:

- Kontamination durch Reinigungsmittel, Schmiermittel, etc.,
- Korrosion.

Als physikalische Gefahren gelten:

- interne Fremdkörper aus der Maschine,
- Schrauben, Bolzen,
- Abrieb, Verschleiß,
- externe Fremdkörper im Rohstoff.

Die Risikoanalyse untersucht analog einer FMEA<sup>46</sup>, welche Gefährdungen eintreten können und bewertet diese mit dem Schweregrad der Gefährdung, mit der Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung und mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit der Gefährdung, bevor ein Schaden für Personen entsteht.

Um die Gefährdungen systematisch aufzulisten, zu bewerten und diese Teilbewertungen zu einer Gesamtgefährdung zusammenzufassen, wurde die FMEA – Methodik entsprechend angepasst.

#### 5.4.1 Hygienegerechte Konstruktion

Untersuchungen bei Rohrkettenförderern und Elevatoren zeigen, daß die Rohrinnenwandungen, Produkteinlassbereiche, Elevatorfüße oder Elevatorköpfe stark verschmutzungsgefährdet sind.

Die Problematik von anhaftenden Produktresten gilt auch für Trogkettenförderer und Schneckenförderer. Typische Anhaftungen und Umgebungsbedingungen zeigt Abbildung 5-41.

<sup>45</sup> Die Zöliakie ist eine Glutenunverträglichkeit. Sie ist charakterisiert durch eine chronische Erkrankung der Dünndarmschleimhaut aufgrund einer Überempfindlichkeit gegen Bestandteile von Gluten, dem in vielen Getreidesorten vorkommenden Klebereiweiß. Die Unverträglichkeit bleibt lebenslang bestehen, sie ist zum Teil erblich und kann derzeit nicht ursächlich behandelt werden. Für Menschen mit dieser Krankheit ist glutenhaltiges Getreide nicht verträglich. Glutenhaltige Produkte sind entsprechend gekennzeichnet.

<sup>46</sup> FMEA steht für: Failure Mode and Effects Analysis, deutsch: „Fehlermöglichkeits- und -einflußanalyse“ Die FMEA wird zur Fehlervermeidung und Erhöhung der technischen Zuverlässigkeit vorbeugend eingesetzt und ist ein induktives Analyseverfahren. Es werden die Gefahrenpotentiale für jede Komponente ermittelt und bewertet.



**Abbildung 5-41: Problematische Hygieneverhältnisse bei Stetigfördersystemen in der Grundnahrungsverarbeitung**

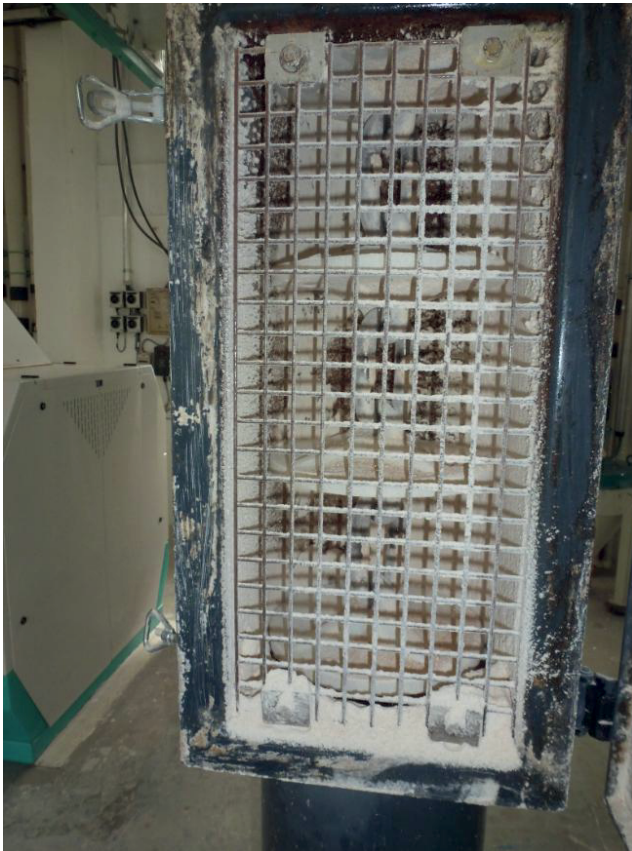
Aber auch Rohrrinnenwandungen können stark verschmutzen. Abbildung 5-42 zeigt die Rohrrinnenansicht eines Fördersystems in einer Reismühle in Indien.



**Abbildung 5-42: Ablagerung im Zulaufrohr eines Elevators in einer Reismühle**



Bei Rohrkettenfördersystemen mit innen laufenden Stauscheiben treten ebenfalls Hygieneprobleme auf, wie in Abbildung 5-43 dargestellt. Sowohl an der Rohrwandung als auch in dem Totraum der Revisionsöffnung ist starker Schimmelbefall zu erkennen. Dies ist auf eine unzureichende Reinigungsfähigkeit (Bestandteil des Hygienic Design) zurückzuführen, da z.B. Toträume zum Teil nicht konstruktiv vermieden werden konnten und, wo es möglich gewesen wäre, nicht vermieden wurden und sich somit Platz für Anbackungen und mikrobielles Wachstum ergab.



**Abbildung 5-43: Rohrkettenförderer mit Ablagerungen an der Rohrwandung und in den Toträumen**

Bei der Entwicklung des Schubelementeförderers wurden bereits in der Konzeptphase Themen zur Hygiene und Sanitation diskutiert und berücksichtigt. Kameraauf-

nahmen mit einem speziell modifizierten Schubelement<sup>47</sup> (Abbildung 5-44) zeigten das Innere des Schubelementeförderers und gaben Auskunft über Verschmutzungs-herde. (In Kapitel 7 wird das Schubelement als Inspektionstool vorgestellt.)



**Abbildung 5-44: Kameraschubelement**

Produktbereiche gekennzeichnet sind.

Unterschieden werden:

- Lebensmittelbereich / Produktbereich:  
Alle Oberflächen mit direktem Lebensmittelkontakt und alle Oberflächen, von denen das Lebensmittel durch Abfließen, Tropfen, Ausströmen oder Auslaufen wieder in den Produktstrom gelangt.
- Spritzbereich:  
Alle Oberflächen mit direktem Lebensmittelkontakt, von denen das Lebensmittel nicht in den Produktstrom zurückgelangt.
- Nicht- Produktbereich:  
Alle sonstigen Oberflächen und Bereiche.

Aufnahmen, die vor und nach der Reinigung gemacht wurden zeigen deutlich, wie wichtig die Vermeidung von Toträumen in der Anlage ist. Man erkennt, daß sich in Rohrbereichen mit einer klaren einseitigen Anlage, z.B. im Rohrbogen, Ablagerungen an der Rohrwandung bilden. Jedoch ist die Ablagerungsschicht viel dünner als ursprünglich angenommen.

Ein Fördersystem wird gemäss der Harmonisierte(n) Hygiene-Normen zur Maschinenrichtlinie DIN EN 1672–2:2005 (Nahrungsmittelmaschinen–Allgemeine Gestaltungsleitsätze– Teil 2: Hygieneanforderungen [DIN 1672-2] in Hygienebereiche eingeteilt (Abbildung 5-45).

Der Grad der Hygieneanforderungen hängt dabei von Faktoren ab, die durch die unterschiedlichen

<sup>47</sup> Eine Kamera wurde zentral in einem Schubelement montiert und LED Beleuchtungselemente leuchten den Rohrrinnenbereich aus.

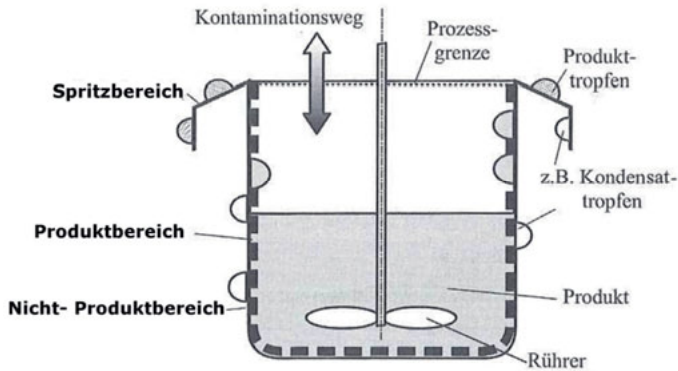


Abbildung 5-45: Hygienebereiche nach DIN 1672-2 [DIN 1672-2]

In der Designphase müssen alle Produkt- und Spritzbereiche betrachtet und entsprechend ihrer Gefährdung so gestaltet werden, daß die ermittelten Risiken reduziert werden können.

Die Hauptbaugruppen werden den Hygienebereichen zugeordnet und entsprechend der Risiken mit konkreten Konstruktionsvorschlägen optimiert.

Abbildung 5-46 zeigt alle Hauptbaugruppen des Schubelementeförderers, die für eine Hygieneuntersuchung relevant sind.

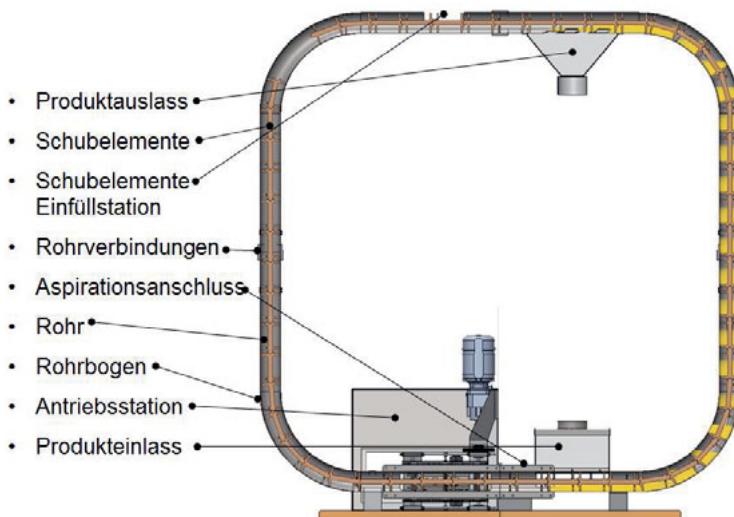


Abbildung 5-46: Hauptbaugruppen zur Bestimmung von Hygienebereichen

Am Beispiel der Antriebsstation wird die Vorgehensweise bis zum konstruktiven Lösungsvorschlag exemplarisch betrachtet.

Abbildung 5-47 zeigt die verschiedenen Hygienebereiche in einer **basic**-Antriebsstation.

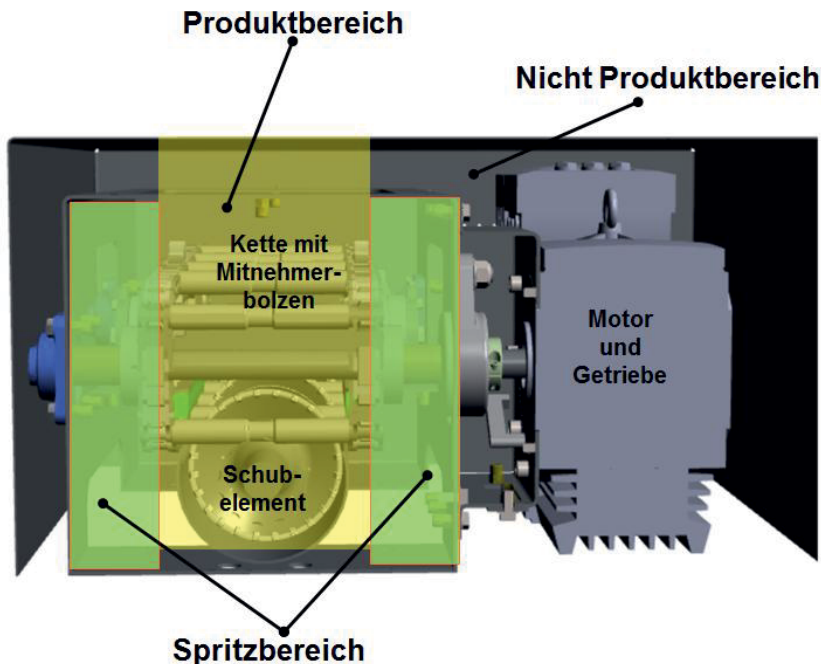
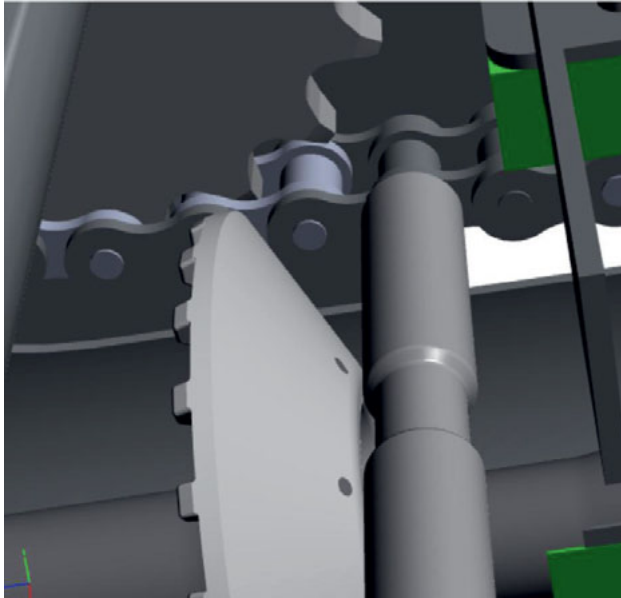


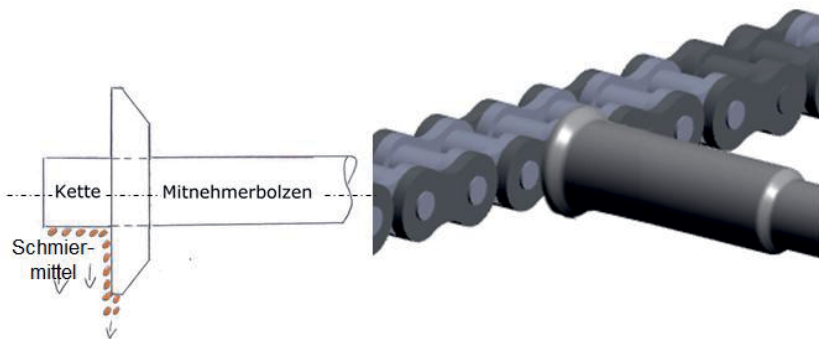
Abbildung 5-47: Einteilung der Hygienebereiche einer Antriebsstation der **basic**-Variante

Kritisch sind die Übergänge zwischen Produkt-, Spritz- und Nicht-Produktbereich, bei denen keine konstruktive Trennung der einzelnen Bereiche möglich ist und deshalb eine zusätzliche Überprüfung notwendig wird. Wird die Antriebskette mit den Mitnehmerbolzen betrachtet (Abbildung 5-48), stellt man fest, daß sich die Kette im Spritzbereich, hingegen die Mitnehmerbolzen im Produktbereich befindet. Hier besteht ein Kontaminationsrisiko, da das Kettenschmiermittel über die Mitnehmerbolzen bis in den Produktbereich fließen und dort in das Produkt tropfen könnte.



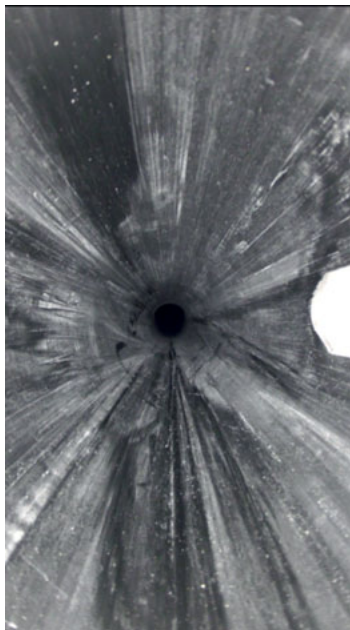
**Abbildung 5-48: Kette mit Mitnehmerbolzen: Übergang vom Spritzbereich zum Produktbereich**

Über eine geometrisch mit einer Abtropfkante geformten Anlaufscheibe wird verhindert, daß austretendes Schmiermittel in den Produktbereich gelangt. Abbildung 5-49 zeigt eine mögliche Lösung. Zusätzlich sollte festgelegt werden, daß zur Schmierung der Kette nur Schmiermittel der Klasse H1 verwendet wird, welches für unbeabsichtigten Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen ist [DIN EN ISO 21469].



**Abbildung 5-49: Anlaufscheiben mit Abtropfkante als konstruktive Lösung zur Vermeidung von Kontaminationen des Fördergutes mit Kettenschmiermittel**

Das Steigrohr nach Abbildung 5-50, linke Darstellung zeigt, daß eine Anlage der Schubelemente an allen Bereichen der Rohrrinnenwand stattfindet. Hier können sich keine festen Ablagerungen bilden, da die Schubelemente den gesamten Rohrrinnenbereich immer wieder frei schaben, d.h., der gesamte Innendurchmesser ist ablagerungsfrei.



**Abbildung 5-50: Geringe Ablagerungen im Steigrohr, ohne feste Anlagerungen (linke Darstellung) und Anlagerungen im Rohrbogen (rechte Darstellung)**

In den Rohrbögen (Abbildung 5-50, rechte Darstellung) lagern sich allerdings Schüttgutreste an den anlageabgewandten Seiten an.

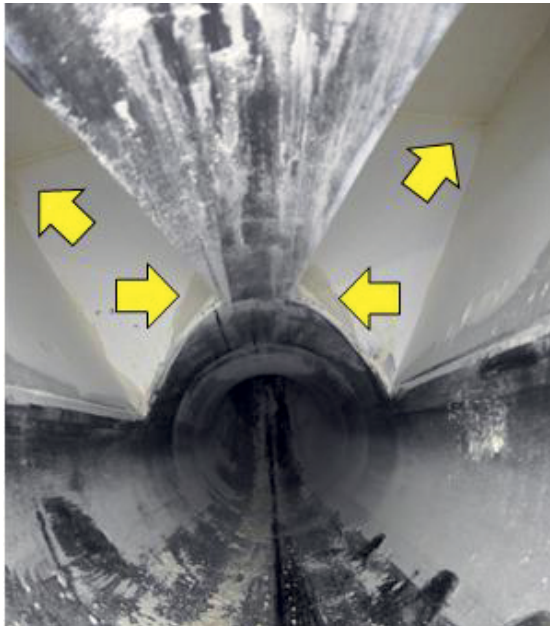
Schüttgut, besonders mehliges Produkt, bleibt an allen Stellen liegen, an denen der Produktfluss nicht kontinuierlich vorbeiströmt. An flachen Stellen häuft sich Material (wie in Abbildung 5-51) oder in Toträumen staubt das Material und bildet Ablagerungen bzw. Anbackungen.





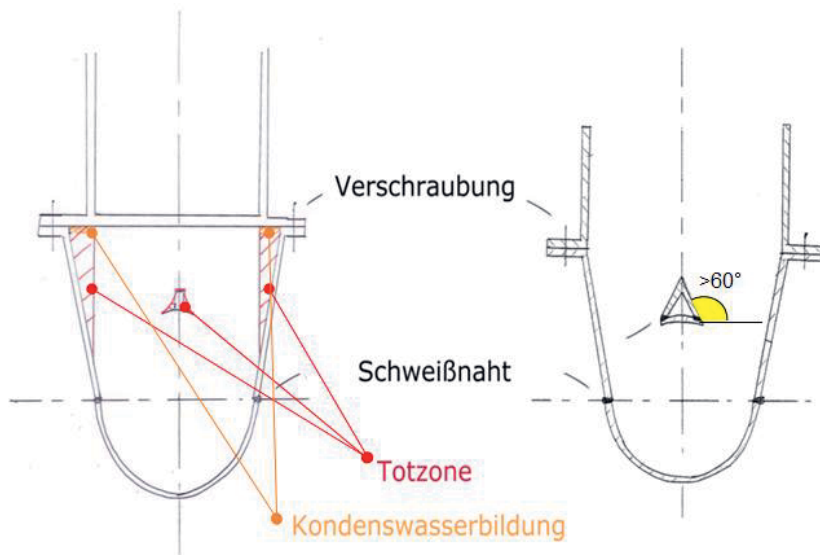
**Abbildung 5-51: Restmaterial im Bereich des Produkteinlaufs**

Körnige Produkte werden meistens vor dem Mahlvorgang angefeuchtet. Im Mahlprozess wird zusätzlich Wärme eingebracht, so daß das Wasser verdunstet. Die im Produkt befindliche Feuchtigkeit kondensiert an den kühleren Stellen im Fördersystem. Deswegen ist es wichtig, Toträume in allen Bereichen des Schubelementeförderers zu vermeiden. Im Bereich Produkteinlauf sind in der dargestellten Ausführung (Abbildung 5-52) Ablagerungen in den Toträumen erkennbar.



**Abbildung 5-52: Ablagerungen in den Toträumen des Produkteinlaufs**

Abhilfe schafft eine hygienegerechte Gestaltung. Die Abbildung 5-53 zeigt in einer Skizze den Einlaufbereich vor und nach der Überarbeitung unter hygienischen Gesichtspunkten. Sämtliche Toträume und Kondensatbildungsstellen konnten eliminiert werden.



**Abbildung 5-53: Einlaufbereich mit Toträumen links und in überarbeiteter Version ohne Toträumen und Kondensationsflächen rechts**

Der neu gestaltete Einlaufbereich wird regelmäßig und allseitig vom Schüttgut durchströmt. Ablagerungen werden immer wieder durch das fließende Schüttgut mitgenommen und somit die Ablagerungsflächen gereinigt. Staubablagerungen als auch ebene Flächen, wo Schüttgut sich aufbauen und liegenbleiben kann, wurden vermieden. Abbildung 5-54 zeigt den überarbeiteten Einlauf als Stereolithographie (STL)-Bauteil<sup>48</sup>.

<sup>48</sup> STL steht für Stereolithografie und beschreibt das technische Prinzip der Datenerstellung aus dem CAD über CAM zum schichtweisen Aufbau der Rapid Prototyping Bauteile [Ger-2000]. Hier wurde das FDM Verfahren eingesetzt (Fused Deposition Modeling), bei dem ein Kunststoffdraht in einer Düse aufgeschmolzen wird.





Abbildung 5-54: Hygienic Design, Einlaufbereich ohne Totzonen als STL Teil

#### 5.4.2 Reinigung des Schubelementeförderers

Bei trockenen Produkten ist eine trockene Reinigung einer nassen vorzuziehen, da bei einer nassen Reinigung der Anlage besondere Bedingungen hinsichtlich der Stellen, an denen Reste der Reinigungsmittel eindringen und verbleiben könnten, gelten. Da der Schubelementeförderer in erster Linie für trockene Schüttgüter vorgesehen ist, wird in dieser Arbeit nur die trockene Reinigung betrachtet. Zudem wird durch die Einbringung von Wasser mikrobiologisches Wachstum bei trockenen Produkten gefördert bzw. erst ermöglicht. Eine besondere Beachtung bedürfen trockene Produkte mit folgenden Eigenschaften, bei denen nass gereinigt werden muss:

- öl- oder fetthaltige Produkte,
- verbleibendes Produkt verursacht Qualitätsminderungen oder mikrobielles Wachstum,
- verbleibendes Produkt ist hygroskopisch oder klebrig,
- trockenes Produkt, aber hohe Luftfeuchtigkeit,
- harte, trockene Stoffe, die eine Schmutzschicht bilden können,
- hohe mikrobiologische Sensibilität,
- trockenes, aber warmes Produkt.

In der Lebensmittelverarbeitung ist es mitunter wichtig, Vermischungen von unterschiedlichen Produkten zu vermeiden. Insbesondere bei Unverträglichkeiten bestimmter Inhaltsstoffe muss dem Anlagenbetreiber neben der Vorgabe eines Reinigungskonzeptes auch eine verlässliche Aussage darüber gemacht werden, welche

Restmengen in der Anlage bei Förderende oder Produktumstellung verbleiben. Dies ist ganz besonders wichtig bei allergenen Stoffen, die eine Zöliakie auslösen können und wo eine entsprechende Kennzeichnungspflicht<sup>49</sup> besteht. Um Erkenntnisse über die hygienische Situation im Schubelementeförderer zu erhalten wird in einer Versuchsreihe ermittelt, wieviel Produkt in der Anlage verbleibt. Im Anschluss daran werden unterschiedliche Reinigungskonzepte untersucht, um die nach der Reinigung noch verbleibende Restmengen quantifizieren zu können. Bisher gab es keine Daten darüber, wieviel Produkt tatsächlich in einer Anlage nach Förderende und nach erfolgter Reinigung noch vorzufinden ist. Zudem soll überprüft werden, ob die im Lastenheft festgelegten Ziele (Ablagerung bei körnigen/mehligten Produkten < 600g; bei reisartigen Produkten < 1000g) erreicht werden. Es wird wie folgt vorgegangen: Zuerst wird eine definierte, vorher genau gewogene Menge von 10 kg eines Produktes in die Anlage eingefüllt und bis zum Auslauf gefördert<sup>50</sup>. Nach Produktaustrag an der Auslaufstation wird die geförderte Menge gewogen. Die Differenz zur eingefüllten Menge wird als noch in der Anlage verbliebene Fehlmenge bestimmt.

Folgende Reinigungsmethoden werden untersucht:

- ein Schubelementeumlauf als Leerfahrt,
- fünf Schubelementeumläufe als Leerfahrten,
- zehn Schubelementeumläufe als Leerfahrten,
- ein Umlauf mit Reinigungsbürste,
- fünf Umläufe mit Reinigungsbürste.

Für die Reinigung mit Bürste wird ein Schubelement lediglich mit einer Bürste nach Abbildung 5-55 ausgestattet. Dieses Reinigungselement kann kontinuierlich mitfahren oder aber nur zu Reinigungszwecken in die Förderstrecke eingeschleust werden.

---

<sup>49</sup> Sowohl in der Schweiz wie auch in allen Staaten der EU gilt die Kennzeichnungspflicht für Lebensmittel mit allergenen Zutaten. Glutenhaltige Getreide und daraus hergestellte Erzeugnisse müssen immer deklariert werden. Anhand der Zutatenliste auf der Verpackung lässt sich somit erkennen, ob für die Herstellung eines Produkts rezepturmässig glutenhaltige Zutaten verwendet wurden. Zusätzlich gilt in der Schweiz – im Gegensatz zur EU – eine Kennzeichnungspflicht für unbeabsichtigte Vermischungen, sofern der Gehalt im Produkt über 20 mg Gluten pro 100 g Trockenmasse liegt oder liegen könnte (Hinweis wie z.B. «Kann Gluten enthalten»). Glutenfreie Speziallebensmittel dürfen höchstens 20 mg Gluten pro 100 g Trockenmasse enthalten. Im Rahmen der Harmonisierung des Schweizer Rechts mit dem europäischen Recht soll die tolerierte Menge an Gluten in Speziallebensmitteln auf 20 mg Gluten pro kg Lebensmittel festgesetzt werden. Auch mit den besten Gesetzen und Verordnungen ist es aber nicht möglich, für Allergiker beziehungsweise Zöliakie-Betroffene eine 100-prozentige Sicherheit zu schaffen.

<sup>50</sup> Die eingefüllte Fördermenge wurde aufgrund der Anlagengröße auf 10 kg festgelegt.

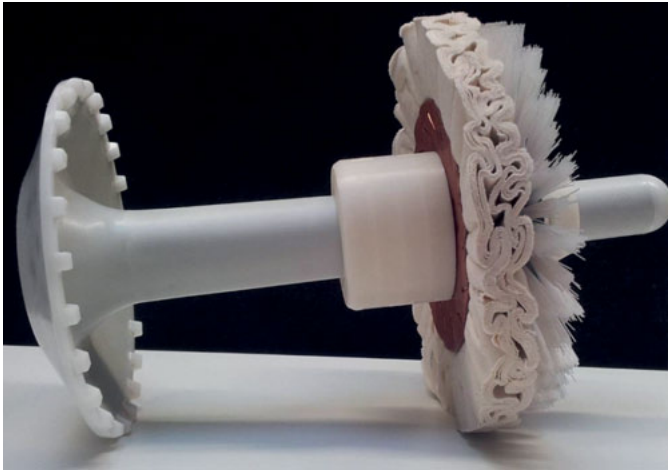


Abbildung 5-55: Reinigungsschubelement mit Bürstenvorsatz und Mikrofaserscheibe

Die unterschiedlichen Reinigungsmethoden werden wie folgt bewertet:

Die Produktmenge, die sich nach den unterschiedlichen Reinigungsdurchgängen aus dem Fördersystem zurückgewinnen lässt, wird gemessen und daraus die dann noch verbleibende Fehlmenge ermittelt. In Abbildung 5-56 sind die Fehlmengen aus den Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Reinigungsmethoden grafisch dargestellt.

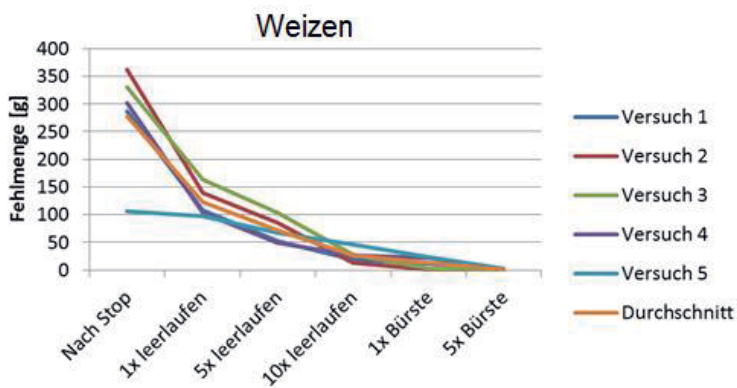
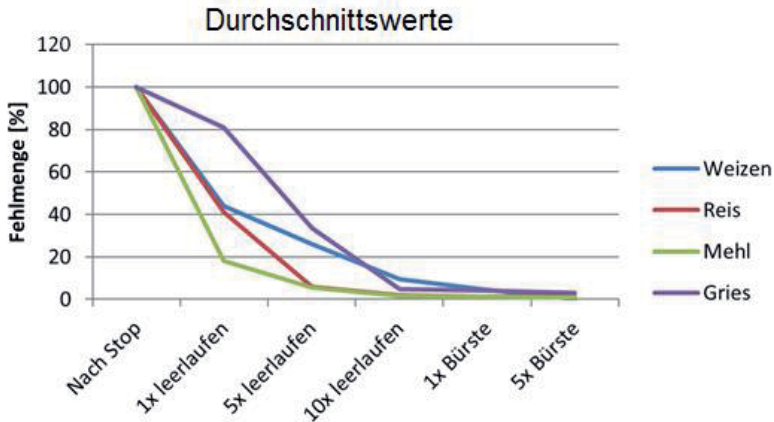


Abbildung 5-56: Verbleib der Restmenge im Schubelementeförderer nach unterschiedlichen Reinigungsmethoden

Es wurden jeweils fünf Versuchsreihen gefahren, um die Reproduzierbarkeit der gemessenen Fehlmengen beurteilen zu können.

Die Versuchsreihen wurden mit unterschiedlichen Produkten durchgeführt. Die Abbildung 5-57 stellt Fehlmengen bei unterschiedlichen Produkten grafisch gegenüber.



**Abbildung 5-57: Fehlmengenreduzierung mit unterschiedlichen Reinigungsmethoden für verschiedene Produkte**

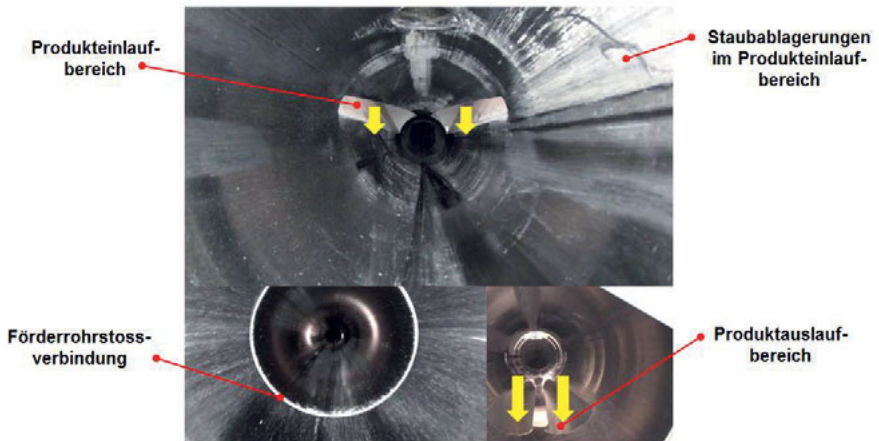
Folgende grundsätzliche Erkenntnisse lassen sich gewinnen:

Die Verschmutzung der Anlage ist nicht abhängig von der Länge der einzelnen Rohrelemente im Steig- und Fallrohr. Da die Schubelemente willkürlich an der Rohrrinnenwandung anliegen, lagern sich dort keine Produktreste an. Die scharfe Kante an der Schubelementemitnehmerscheibe schabt die Rohrrinnenwandung immer wieder frei, nur geringste Mengen Staub können sich dort anlagern.

Der Verschmutzungsgrad und die Restmengen, die im Fördersystem nach Förderungsbeendigung bleiben, sind abhängig von den unterschiedlichen Streckenbereichen sowie der Produktart (mehlig, körnig, reisartig). Begleitend zu den Versuchen wurden auch diese Aussagen mit Aufnahmen durch das Schubelement mit Kamera belegt.

Insgesamt ist die verbleibende Restmenge nach den unterschiedlichen Reinigungskonzepten deutlich besser als bei vergleichbaren Rohrkettenförderern, Elevatoren oder Trogkettenförderern. Hier sammeln sich große Restmenge in den Toträumen, die das neue Schüttgut über lange Zeit kontaminieren können wenn nicht eine gründ-

liche Reinigung, das bedeutet bei diesen Systemen eine Demontage von Baugruppen, stattfindet. Hingegen kann beim Schubelementeförderer die Reinigungsbürste einfach in den Strang eingebracht und hierdurch schon eine große Reinigungswirkung erreicht werden (Abbildung 5-58).



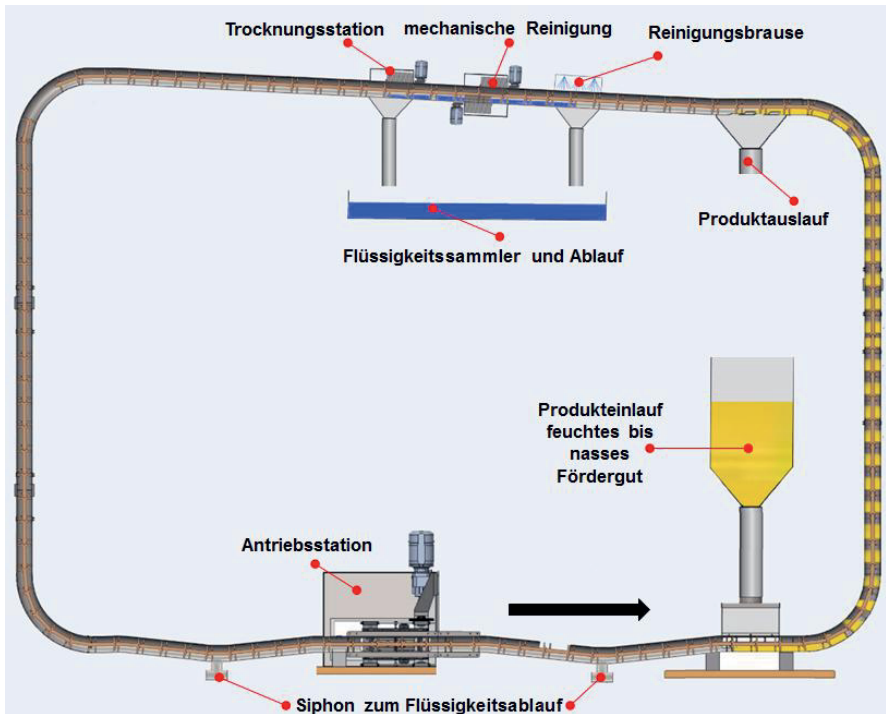
**Abbildung 5-58: Streckenabschnitte im Schubelementeförderer nach der Reinigung mit einem Bürstenelement**

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Konzept für einen Schubelementeförderer entwickelt, der für feuchte bis nasse Produkte geeignet ist. Dieser Förderer kann mit verschiedenen Reinigungskonzepten ausgestattet werden, wie z.B.:

- In-Place Reinigungsbrausen<sup>51</sup> mit/ ohne anschließender Trocknung,
- Reinigungsöffnungen für manuelles Hochdruckreinigen.

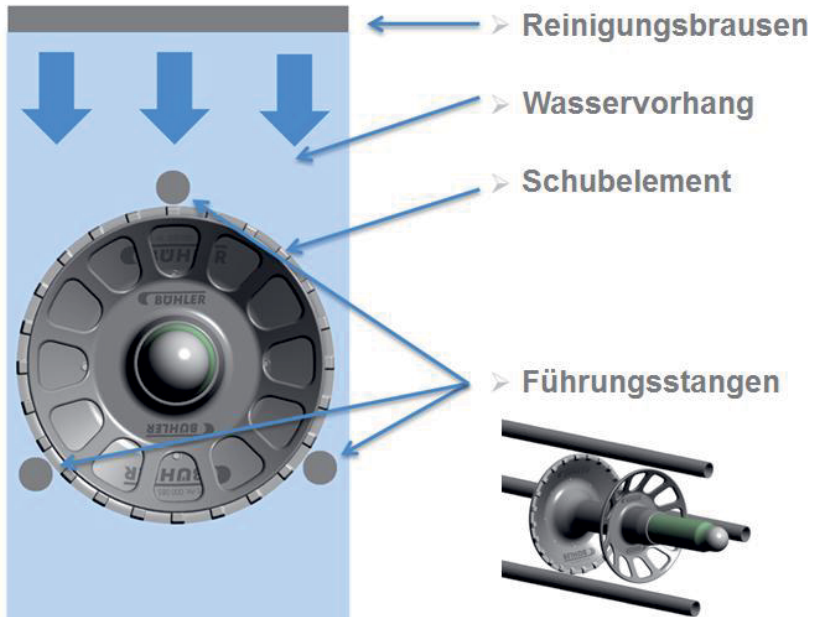
Ferner werden Wasserablaufstellen geplant (Siphons), die die Reinigungsstation und die Antriebsstation vor Überflutung von Restwasser schützen sollen. Für die gesamte Anlage ist rostfreier Stahl vorgesehen. Durch entsprechende Rohrneigungen wird erreicht, daß sich Restflüssigkeiten in Richtung Ablaufstellen bewegen. Abbildung 5-59 zeigt die konzipierte Bauweise des Schubelementeförderers für feuchte bis nasse Produkte.

<sup>51</sup> In Place Reinigung wird auch CIP –Fähigkeit genannt. CIP steht hier für cleaning in place. Mit geeigneten Reinigungsmitteln und Temperaturen der Reinigungsmittel kann auch eine Sterilisation (SIP – Fähigkeit für Sterilisation In Place) erreicht werden.



**Abbildung 5-59: Konzept für einen Schubelementeförderer mit Reinigungsanlage, geeignet für feuchte bis nasse Produkte**

Die Reinigungsstation, in der anhaftendes Schüttgut nass abgereinigt wird, kann in die Strecke nach dem Auslauf eingebaut werden. Hier besteht dann auch die Möglichkeit, den Druckverband aufzulösen und damit die Schubelemente so zu vereinzeln, daß auch der Kugel- und Kalottenbereich gereinigt werden kann.



**Abbildung 5-60: Reinigung der Schubelemente durch Wassersprühdüsen**

Es ist auch möglich, Teile des Förderrohres aufzutrennen und die Rohrrührung der Schubelemente durch z.B. drei Stangen-Systeme zu ersetzen, so daß eine In-Place-Reinigung durchgeführt werden kann. So können die Schubelemente gereinigt werden, ohne daß sie aus dem Verbund entfernt werden müssen. Die Reinigung kann vollautomatisch durch Reinigungsbrausen oder manuell erfolgen. Abbildung 5-60 zeigt die Funktionsweise einer In-Place Reinigung der Schubelemente.

## 5.5 Sensorik

Die EU Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [EG-2006/42] schreibt vor, daß Anlagen einen sicheren Betrieb gewährleisten müssen. Die Sicherheit beschränkt sich nicht nur auf Sicherheit gegenüber Personen, die sich im Arbeitsbereich der Maschine aufhalten, sondern erstreckt sich auch auf den Schutz der Anlage gegen Selbstzerstörung.

Eine Massnahme zum Schutz von Mensch und Maschine kann über eine Überwachung des Schubelementeförderers mit geeigneter Sensorik geschehen. So soll die Überwachung Fremtteile, die über das Fördersystem in das Schüttgut gelangen, erkennen oder verhindern, daß die Teile in den Produktstrom gelangen. Fremtteile können z.B. Schrauben oder Bruchstücke der Schubelementen sein. Zum Schutz der Anlage muss frühzeitig erkannt werden, wann ein Betriebszustand erreicht wird, der zur Zerstörung der Anlage führen kann.

Über eine Konstruktions-FMEA<sup>52</sup> [Mas-1988] werden die Fehlermöglichkeiten ermittelt und daraus ein Sensorkonzept abgeleitet.

Als mögliche Fehler mit der grössten Auswirkung auf die Anlage wurden der Schubelementbruch, ein Verklemmen der Schubelemente im Rohr oder eine Asynchronität der Antriebsketten erkannt.

Werden im Betrieb die Schubelemente zerstört, z.B. aufgrund zu grosser Belastung, durch Fremtteile im Schüttgut oder Dauerbruch, können Bruchstücke der Schubelemente ins Produkt gelangen. Sind die Schubelemente aus Kunststoff hergestellt, lassen sich Bruchstücke im Produkt nicht mehr finden. Bestenfalls über Siebe könnten sie dann selektiert und ausgesondert werden.

Verklemmen sich die Schubelemente im Rohr, zerstören sie ggf. die Antriebsstation, das bedeutet, die Zerstörungen können dann auf weitere Schubelemente und zuletzt auch auf die gesamte Antriebsstation übergreifen.

Durch Asynchronität oder Bruch der Ketten liegen die Mitnehmerbolzen nur noch einseitig an den Schubelementen und es kann zu einer punktuellen Überbelastung der Anlageflächen an den Schubelementen kommen, die Bauteile könnten sich verformen oder durch Überlastung versagen. Die genannten Fehler sind schwerwiegend und führen zum Ausfall der Förderanlage. Da bei Ausfall der Fördertechnik in der Regel die gesamte Prozessanlage bis zur Reparatur der

---

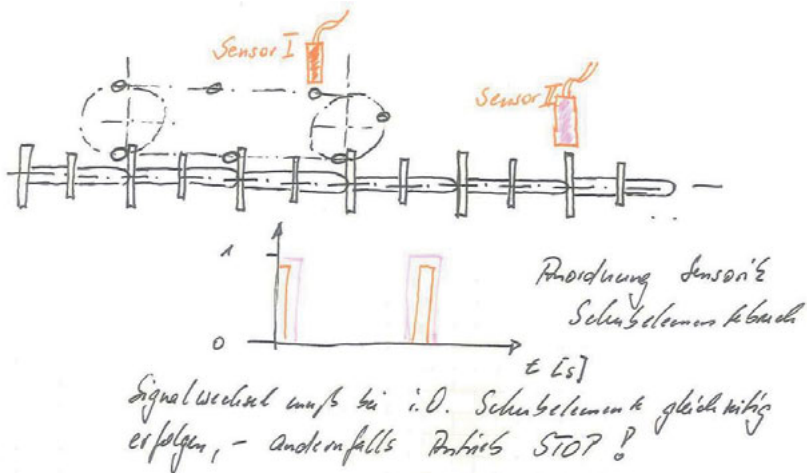
<sup>52</sup> In der Qualitätssicherung [Mas-1988] spricht man von der Produkt-FMEA. Je nach Zuordnung zur Entwicklungsphase oder Produktionsplanungsphase wird zwischen der Konstruktions-FMEA und der Prozess-FMEA unterschieden. Der VDA unterscheidet weiter in eine System-FMEA, wo auch die umliegenden Systeme und deren Einfluss mit berücksichtigt werden und auch in eine Schnittstellen-FMEA, wo nur die Schnittstellen betrachtet werden.



Fördertechnik still steht, werden höchste Anforderungen an die Dauerfestigkeit, an die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit der Fördergeräte gestellt. Somit muss bei Versagen der Bauteile eine schnelle Abschaltung der Anlage erfolgen, um Folgeschäden zu vermeiden.

Bei Schubelementeversagen ändert sich in der Regel immer die Einzellänge der Schubelemente und die Gesamtlänge im Schubverband. Wenn die Gesamtlänge einer bestimmten Anzahl von Schubelementen überwacht wird kann Versagen sofort erkannt werden. Hierzu wird in einem Versuchsaufbau ein induktiver Messsensor über einem Mitnehmerbolzen platziert und ein kapazitiver Messsensor zwischen Antriebsstation und Produkteinlauf über der Mitnehmerkante eines Schubelementes eingesetzt (siehe Skizze in Abbildung 5-61).

Das Messkonzept sieht vor, daß beide Sensorsignale beim Versagen des Schubelementes gleichzeitig einen Signalwechsel anzeigen.



**Abbildung 5-61:** Skizze zum Versuchsaufbau: Erkennung eines Schubelementebruchs durch Überwachung der Länge des Schubverbandes

Im vorliegenden Messaufbau (Abbildung 5-62) wird geprüft, ob bei Geschwindigkeiten bis 1,2 m/s beide Messsignale klar erkannt und dem gleichen Zeitfenster zugeordnet werden können. Bei Verschiebung der Signale soll die Antriebseinheit abgeschaltet werden.

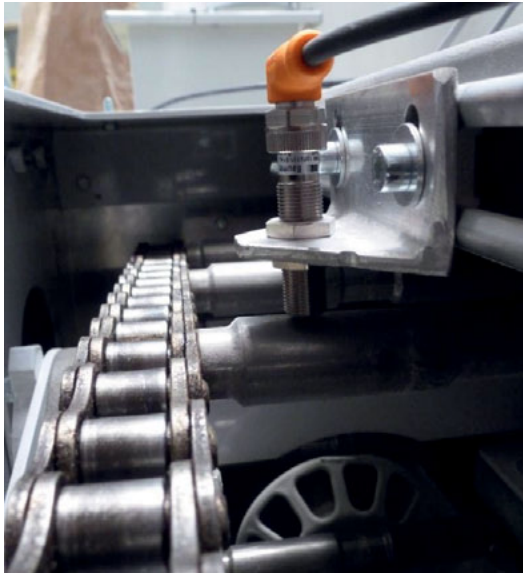


Abbildung 5-62: Anordnung des induktiven Messensors über dem Mitnehmerbolzen

Die Messaufzeichnungen belegen, daß die Signale erkannt und klar zugeordnet werden können; bei manipulierten Schubelementen mit reduzierter Länge schaltete der Antrieb ab. Die Abbildung 5-63 zeigt eine Messaufzeichnung der Signale.

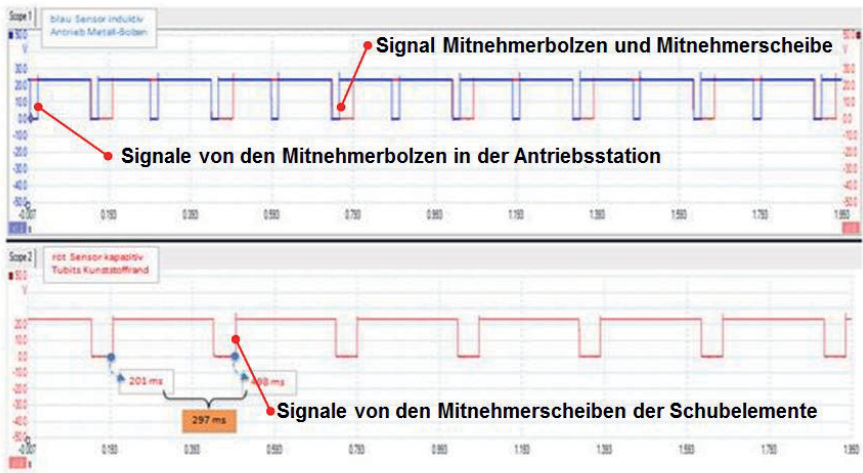


Abbildung 5-63: Aufzeichnung der Messsignale zur Überwachung der Schubelemente und der Mitnehmerbolzen

Eine Sensorik im Fördersystem soll aber nicht nur Fehler in der Anlage anzeigen, sondern auch legale Prozessparameter wie Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenfluss, Verschleiß oder Umlaufzyklen der Schubelemente im Fördersystem ermitteln. Für die Volumenmessung wurde ein kapazitiver Sensor im Bereich der vertikalen Förderstrecke angeordnet. Das Messprinzip soll hier die Zeit messen, an denen das Schüttgut am Sensor vorbeibewegt wird (Abbildung 5-64). Das Schüttgut richtet sich waagrecht auf den einzelnen Schubelementen im Steigrohr aus. Die Geschwindigkeit ist über die Signale aus der Antriebsstation bekannt, anhand der Signalzeit kann nun der Füllgrad ermittelt und über die Dichte des Schüttgutes der Volumenstrom in den Massenstrom umgerechnet werden.



**Abbildung 5-64: Messaufbau zur Fördervolumenmessung**

Die erreichbaren Genauigkeiten erfüllen nicht die Anforderungen, die bei Dosieranlagen notwendig sind, die Messungen geben aber dem Betreiber der Anlage einen hinreichend guten Hinweis auf den aktuellen Massenstrom.

In Abbildung 5-65 werden die vorgeschlagenen und getesteten Überwachungssysteme zusammengefasst.

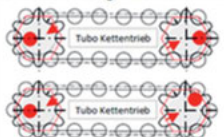
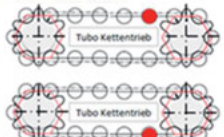

Nr.	Anforderung	Wert	M / W	Bemerkungen
<b>3 Verfahrenssteuerung</b>				
3.1	Tubitbruch: S= Sensor $S1_{ind} + S2_{kap}$ Förderelementüberwachung im Antriebssystem. korsp.(Pkt 1 gem. Entw.Tabelle)	EPD Error Puls Detektion Detektion : Tuboring kap.Sensor Detektion : Antr.welle ind.Sensor Bei Phasenverschiebung oder Ausbleiben eines Signals = Stopp	M	Brucherkenkung durch Stauchung oder Quetschung der Förder-elemente
3.2	Initiator Tubit-Säule $S3_{kap}$ Sensormontage im Rohrbau absteigender Zweig.(Offenes Rohr-System)	Bei Ausbleiben oder Verspätung eines Signals = Stopp	M	Tubits können sich verklemmen oder verhaken im Rohrbau.
3.3	Kettenstreckung: oben $S4_{ind} + S5_{ind}$ Kettenstreckung: unten $S9_{ind} + S10_{ind}$ 	Überwachung Kettentriebe  entweder Mitnehmerbolzen+ Ritzel2 $\Delta\alpha$ = Ketten gelangt = Stopp  oder $\Delta\varphi$ in Ritzel1 $\Delta\varphi$ = Ketten gelangt = Stopp	M	Auch feststehende Ketten können erkannt werden.
3.4	Synchronität: $S6_{ind} + S7_{ind}$ zweier Kettentriebe 	Beide Signale müssen gleichzeitig eintreffen. Sonst: Versatz der Ketten zueinander.  Versatz = Stopp	M	Bei Doppelkettentrieben wird auf synchrones Verhalten beider Antriebe getestet.
3.5	Volumenstrom-Massenstrommessung: $S8_{kap}$ e.g. $\Delta t1$ Füllgrad 	Bekanntes Volumen, $\Delta t$ = Füllgrad via Füllvolumen kann auf Massenstrom geschlossen werden. Sensormontage im Rohrbau steigender Zweig (geschl. Rohr-System) Messung an befüllten Tubits	M	Die Massenstrommessung entspricht einer Richtgröße und sollte nicht für Totalisatoren verwendet werden.
3.6	Magnetfeldmessung $S11_{mag}$ Initialisierung spezieller Referenztubit (mit Permanentmagneten)	Kombination 3.2 Magnetfeld Sensor Counter Initialisierung 1.Element und 3.3 kap.Sensor next Element.	M M M	Ringzähler: Anzahl Tubits Stundenzähler CS
	2.ter Sensor kap. weitere Standardtubit Anzahl Tubit's im Rohrsystem		M	Detektionspositionierung via Tubitadresse kann ein Tubit explizit an die Detektionsstelle gefahren werden
3.7	ESD Elektrostatische Entladung jedes Foerderelements	Detektion mit Hilfe Ableitbürstenkontakte. ESD_Relaismodul Re_ZRelais MEAG Digitaler Input	M M M	Jeder Tubit Kontaktring kleinere Durchmesser 24VDC / 230VAC DI_Input
3.8	Verschleissmessung $S12_{kap}$ spezial Schaltabstand 2-30mm Messtiefe einstellbar.	Detektion Kante am Förderelement Bei Ausbleiben eines Detektionspulses bzw. Signals = Stopp	M	Damit kann der Abriebgrad definiert werden.
3.9	Verschleissmessung evtl. Lasermessung Messtechnologie noch nicht entschieden	Wenglor System M11 Li 40mm Hinweis: definierte Tubitauflage Für reproduzierbare Ø-Messwerte	W	LASER usw.

Abbildung 5-65: Zusammenstellung der möglichen Sensorik zur Anlagenüberwachung <sup>53</sup>  
(M steht für Mussforderung, W steht für Wunschforderung)

<sup>53</sup> Die Abkürzung SE steht für Schubelement.

Alle Messungen werden mit bekannten und bereits vielfach in der Grundnahrungsmittelverarbeitung verwendeten Sensoren durchgeführt. Lediglich die Auswertung der Signale erfolgt auf der Basis neu getroffener Annahmen.

Für die Anlagenüberwachung gegen Bruch, Verschleiß oder Fehlfunktionen soll das Ziel sein, zukünftig auch hier in „Richtung des Ansatzes von Altschuller“ eine ideale Maschine (siehe Kapitel 1.5).anzustreben, d.h., eine sich selbst überwachende Anlage ohne zusätzliche Sensorik zu gestalten.

## 5.6 Industrial Design

Das neuartige Fördersystem eines Schubelementeförderers muss auch in der äußeren Erscheinung sichtbar werden. Das Produktdesign soll aber nicht nur den Neuheitsgrad darstellen, sondern auch im Sinne des Corporate Design das Unternehmensbild als Technologieführer mit Verantwortungsbewusstsein für Lebensmittelsicherheit, Innovationskraft und Trendsetter zum Ausdruck bringen.

Bürdek [Bür-1991] verwendet zur Definition von „Gutem Design“ eine Ausarbeitung, die vom Internationalen Design Zentrum Berlin (IDZ) 1979 im Rahmen einer Ausstellung erarbeitet wurde:

- Gutes Design darf keine Umhüllungstechnik sein. Es muss die Eigenart des jeweiligen Produkts durch eine entsprechende Gestaltung zum Ausdruck bringen.
- Gutes Design muss die Funktion des Produkts, seine Handhabung, sichtbar und damit für den Benutzer klar ablesbar machen.
- Gutes Design muss den neuesten Stand der technischen Entwicklung transparent werden lassen.
- Gutes Design darf sich nicht nur auf das Produkt selbst beschränken, sondern muss auch Fragen der Umweltfreundlichkeit, der Energieeinsparung, der Wiederverwendbarkeit, der Langlebigkeit und der Ergonomie berücksichtigen.
- Gutes Design muss das Verhältnis von Mensch und Objekt zum Ausgangspunkt der Gestaltung machen, besonders im Hinblick auf die Aspekte der Arbeitsmedizin und der Wahrnehmung.

In der Gestaltung von Maschinen und Investitionsgütern spricht man auch von fünf Dimensionen, die betrachtet werden müssen [Tim-2014]:

1. Grundaßoziation und Markenpositionierung
2. Modularität, Skalierbarkeit, Ordnungselemente und Produktfamilie
3. Verhausung<sup>54</sup> und Maschinenverkleidung
4. Funktionseinheit und Innenraum
5. Mensch-Maschine Schnittstelle

Zusätzlich zu diesen fünf Dimensionen sind Marktpositionierung, Zielgruppen, Zielmärkten, Benchmark, Skalierungen für Baureihen und Baukästen und Gestaltung

---

<sup>54</sup> Mit Verhausung wird im designtechnischen Sinne die Gestaltung der Maschinenverkleidung bezeichnet. Hier wird festgelegt, welche Baugruppen und Bauteile in welcher Art und Weise in das Gestaltkonzept einbezogen werden, also welche Komponenten innerhalb oder außerhalb der Maschinenverkleidung bleiben. Auch wird mit der Verhausung der sicherheitsrelevante Bereich umschrieben.

des Innenraumes mit Servicefreundlichkeit bis hin zu Bedienung und Bedienbarkeit in unterschiedlichen Kulturkreisen zu betrachten.

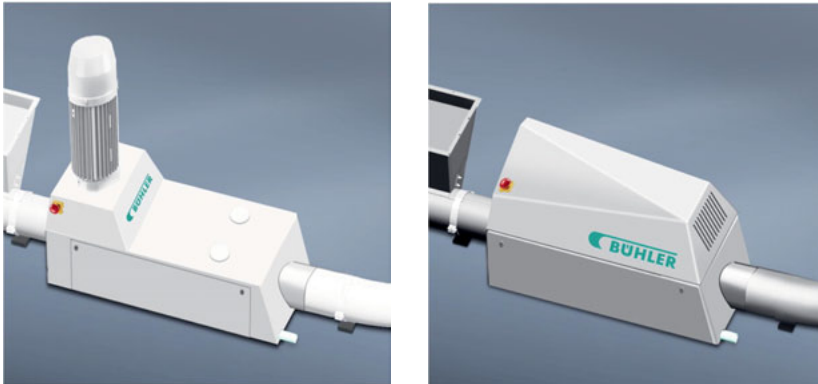
In der äußeren Gestaltung soll hier nur auf die wichtige Gestaltwahrnehmung eingegangen werden, denn Wahrnehmung und Gestalt gehören untrennbar zusammen [Kra-2000]. Die „Wahrnehmungselemente“ können anhand der Gestaltgesetze bzw. Gestaltfaktoren so ausgewählt werden, daß eine sinnliche Wahrnehmung stattfindet. Mit der Gestaltfestlegung lässt sich auf diese Weise eine gewollte Nachricht mit einem jeweiligen Informationsgehalt verbinden, d.h., diese Nachrichten geben Auskunft über das Wesen des Schubelementeförderers. So lassen sich Auskünfte über das technisch-technologische Niveau, über Gebrauchswertversprechen, über Gebrauchsweise, Aufbau, Funktion und Gefahrenstellen oder über Sauberkeit und Übersichtlichkeit übermitteln (vergl. hier auch zur Wahrnehmung, Designkriterien und Vorgehensweise die VDI-Richtlinien [VDI-2424-1, VDI-2424-2 und VDI-2424-3]).

Zur Beschreibung und Bewertung von Design werden Assoziationen genutzt, um Stimmungsrichtungen und formalästhetische Eindrücke kommunizieren zu können.

Während die ästhetische Empfindung als Ergebnis „sinnlicher Wahrnehmung gepaart mit Phantasie und Erfahrung“ [Bus-1998] stark vom individuellen Geschmack abhängig ist, können dennoch durch bestimmte formale Elemente und deren Kombination personen- und auch kulturübergreifend nahezu identische Assoziationen erzeugt werden. Diese Universalität des Designs und dessen provozierte Assoziationen sind bei der Gestaltung von weltweit in identischer Bauform eingesetzten Maschinen und Anlagen vorteilhaft, weil so mit einem Design bei allen Kunden die gleichen Empfindungen hervorgerufen werden können. Um eine bewusste Assoziation bei den Kunden in der Beurteilung der äußeren Erscheinung des Förderers zu erreichen, wurden verschiedene Designvarianten untersucht.

Formal beständige Assoziationen können Vorstellungen wie: „leicht, robust, technisch, edel, dynamisch oder sinnlich sein“ erzeugen und sind eher trendunabhängig. Kontextabhängige Assoziationen von klassischem, modernem, innovativem oder futuristischem Design sind eher trendbeeinflusst.

Aufgrund der gewählten Bauweise ist die Antriebsstation das optisch sichtbarste Element des Schubelementeförderers. Die allgemeinen Zusammenhänge wurden deshalb für die Antriebsstation spezifiziert. Die Abbildung 5-66 zeigt z.B. im linken Bild eine minimalistische, zurückhaltende, einfach preiswerte und bauraumoptimierte Variante.



**Abbildung 5-66: Minimalistische Designvariante, linke Darstellung und dynamisch und wiedererkennbare Designvariante, rechte Darstellung**

Hingegen wird mit der in der Abbildung rechts gezeigten Variante ein dynamischer, moderner, technisch präziser, wiedererkennbarer, wesentlich prägnanterer und archetypischer Eindruck erzeugt.

Im Verlauf der Entwicklung der Antriebsstationen wurden verschiedene Designvarianten entwickelt und hinsichtlich ihrer ästhetischen Wirkung gegenübergestellt (Abbildung 5-67 und 5-68).

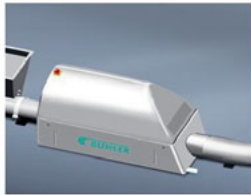


**Abbildung 5-67: Designentwürfe mit ihren Assoziationen**

Da verschiedene Ausstattungs- und Preisklassen der Anlagen geplant sind (z.B. Sanitation Line, Stainless steel line), werden polarisierendere Gestaltungselemente für hochpreisige Varianten reserviert, während für die Standard-Varianten eine stark reduzierte Formensprache mit großen Flächen und dem Gestaltungsfokus auf Radien



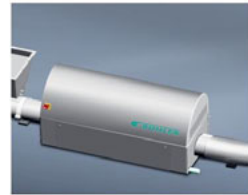
und den Einsatz von Lüftungsschlitzen als Designelemente vorgesehen ist. Im Rahmen weiterer Überlegungen wurde entschieden, daß sich der Antriebsmotor innerhalb der Maschinenverkleidung befinden soll, so daß ein deutlich höherwertiges und aufgeräumtes Erscheinungsbild entsteht. Ziel soll auch eine bessere und einfachere Reinigung der Anlage sein (Abbildung 5-70).



- reduziert, minimalistisch,
- dynamisiert, trotzdem freundlich,
- bauraumoptimiert,
- kaum Fläche für Staub,
- wiedererkennbar.



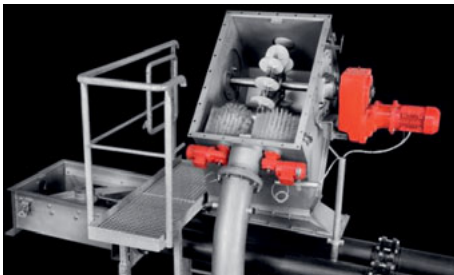
- dynamisch,
- modern,
- kantig und präzise,
- technisch,
- polarisierender, markanter,
- wiedererkennbar.



- rund, weich,
- sympathisch, freundlich,
- wenig technisch,
- kaum Fläche für Staublagerungen,
- symmetrisch,
- bekannte Sehgewohnheit, aber kaum Wiedererkennbarkeit.

**Abbildung 5-68: Entwürfe von Designvarianten für hochpreisige Ausführungen**

Als Vergleichsmaßstab für die Gestaltung werden zur Beurteilung vorhandene Modelle des Wettbewerbs für Rohrkettenförderer herangezogen. Abbildung 5-69 zeigt z.B. ein Wettbewerbsmodell.



**Abbildung 5-69: Erscheinungsbild eines Rohrkettenförderers [Schräge Rohrkettenysteme GmbH]**

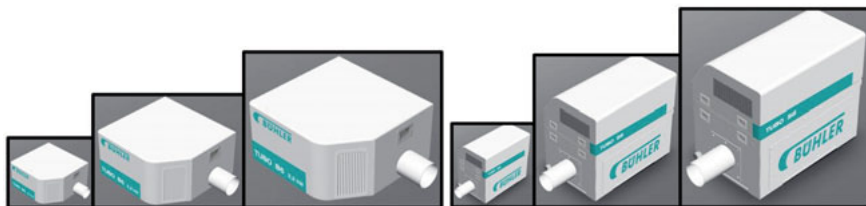
Das abgebildete Modell setzt den außen liegenden Motor als eingefärbtes Gestaltungselement ein. Die Kühlrippen des Motors sind allerdings zerklüftet und in der Gesamtgeometrie befinden sich unzählige Rücksprünge, Absätze und Ecken. Das Gerät lässt sich schlecht reinigen. Hinzu kommt, daß alle Verkleidungen der

Anlage sichtbar geschraubt werden, was zu einer gestalterisch zerklüfteten und somit geringwertigen Anmutung ohne Seriencharakter führt.

Im aktuellen Fall zeigt die Gestaltung der Schubelemente-Gehäuse eine deutliche Verbesserung, da in der Außenhülle fast keine Befestigungselemente sichtbar sind. Durch große flächige oder schräg gestellte Oberflächen wird zudem die Ablage für Staub reduziert und eine einfache Reinigung ermöglicht.

Für eine optimale Zugänglichkeit wird die Haube zweiteilig ausgeführt, so daß für einen einzelnen Service-Techniker ein optimaler Zugang zu den funktionalen Elementen des Antriebs gegeben ist. Die Funktionselemente des Innenraums sind nach dem Entfernen der äußeren Maschinenverkleidung gut zugänglich.

Durch die Anordnung des Motors unter die Antriebsabdeckung erhalten so die verschiedenen Leistungsklassen innerhalb einer Baugröße Gleichteile und auch ein identisches Design, so daß neben dem Stückzahl-Effekt in der Herstellung auch eine sehr durchgängige Erscheinung erreicht werden kann. Auch kann das gewählte Design sehr gut auf die verschiedenen Baugrößen (Abbildung 5-70) übertragen werden. Die Proportionen werden einfach skaliert und das optische Erscheinungsbild bleibt erhalten.



**Abbildung 5-70: Designvarianten, skaliert auf unterschiedliche Baugrößen für die Antriebsvarianten *basic* und *standard***

Bei den Farbkonzepten wurde aufgrund der geltenden, sehr reduzierten Farbanwendung im Unternehmen, eine rein weiße Gestaltung der Anlage (Beispiel für Standard-Ausführung) gewählt, die lediglich mit grün ausgeführtem Firmenlogo versehen ist. Hier sind aber durchaus auch weitere Gestaltungsvarianten denkbar.

---

## 6 Prototypen im industriellen Einsatz

Der Schubelementeförderer ist ein neuartiges Fördersystem. Somit sind in der Literatur keine Beschreibungen oder Berechnungen zu diesem Förderverfahren zu finden. Grundsatzuntersuchungen und Versuche zur Validierung der theoretischen Modelle sind somit zwingend notwendig. Im Entwicklungsverlauf wurden, begleitend zum Entwicklungsstand, unterschiedliche Versuchsmodelle aufgebaut. Diese Modelle lieferten die ersten Erfahrungen im Betrieb. Um Messdaten zum Dauerlaufverhalten, zum Leistungsbedarf, zu erreichbaren Fördergeschwindigkeiten, zur Bestimmung von Kräften im System und um Aussagen zum Verschleiß machen zu können, wurden verschiedenartige Modelle und Prototypen geplant und aufgebaut. Diese Modelle sollten auch Hinweise darüber geben, ob die Materialwahl den Anforderungen genügt, sowie erste Hinweise auf Dauerfestigkeit der Einzelteile, Montierbarkeit der Anlage, Inbetriebnahmeprozeduren, Umgang mit Betriebsstörungen mit Störungsbeseitigung und Anforderungen an die Schnittstelle zu anderen Prozessmaschinen gestatten. Die Prototypen ermöglichen auch die Optimierung der Fertigungsverfahren und eine Validierung der Berechnungsmodelle und Preiskalkulationen. Die Anlagen ermöglichen eine erste Überprüfung, ob die Kostenziele erreicht werden können. Im Dauerbetrieb können auch Erkenntnisse zu der Gestaltung der Produktaufnahmestation und Produktabgabestation sowie über Restmengen von Schüttgut in der Anlage und Fördergutbeschädigung bzw. zum Bruchanteil von besonders sensitivem Fördergut ermittelt werden.

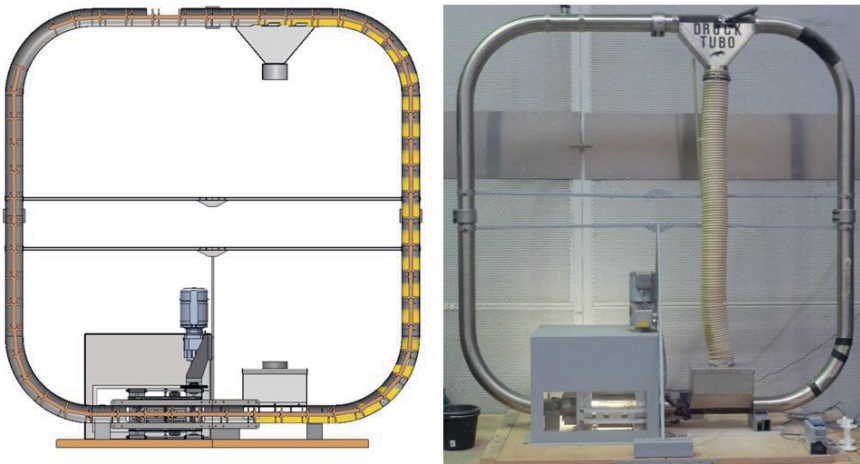
### 6.1 Weiterentwicklung des Konzeptmodells zur industriellen Nutzung

Das in Kapitel 3 vorgestellte und prinzipiell bestätigte Funktionsmodell eines Schubelementeförderers wurde für die industrielle Nutzung wie folgt konstruktiv weiterentwickelt:

- Austausch des Handbohrmaschinenantriebes gegen eine Drehstromasynchronmaschine mit Frequenzumrichter, um unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten realisieren zu können,
- Austausch des Kettentriebes mit außen laufenden Laufrollen durch Kettenantrieb mit Mitnehmerbolzen,
- Änderung der Produkteinlaufföffnungen im Rohr von rechtwinkligen zu pfeilförmigen und nierenförmigen Ausschnitten,

- Verstärkung der Rohröffnungen mit Längsstreben zur Reduzierung der vorliegenden Knickbelastung der Schubelemente,
- Reduzierung der Stützscheibendurchmesser, um einen Kontakt der Stützscheiben im Rohrbogen mit der Rohrrinnenwand zu vermeiden,
- Verlegung der Kontaktstellen der Schubelemente vom Außenbereich in den Innenbereich der Mitnehmerscheibe, um Klemmungen im Rohrbogen durch geometrische Überbestimmungen zu vermeiden,
- Schaffung einer Absaugung von staubhaltiger, verdrängter Luft zwischen Produkteinlauf und Antriebsstation.

Die Abbildung 6-1 zeigt den Neuaufbau des Fördersystems „Schubelementeförderer“.

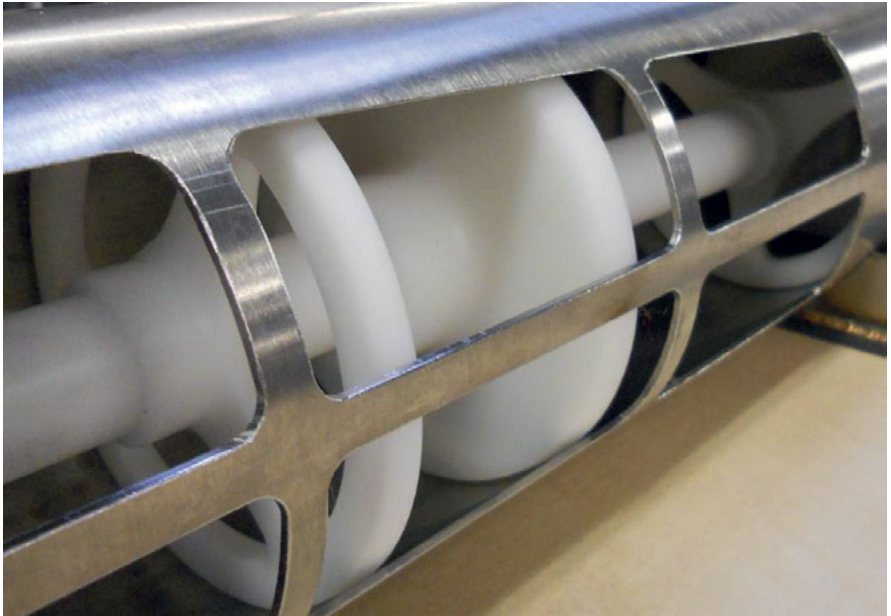


**Abbildung 6-1: Schnittdarstellung und Versuchsaufbau des weiterentwickelten Konzeptmodells**

An Beispielen sollen die konstruktiven Änderungen demonstriert werden. Der umgebaute Antrieb mit Drehstromasynchronmaschine und überarbeitetem Kettenantrieb erlaubt Geschwindigkeiten bis 1,2 m/s. Auch bei der nun erreichbaren maximalen Geschwindigkeit läuft der weiterentwickelte Schubelementeförderer ohne erkennbare Schwingungen oder Störungen. Die Schubelemente fallen auch schnell genug im Fallrohr herunter, so daß ein ausreichender Staudruck dafür sorgt, daß sie im geschlossenen Verband in die Antriebsstation einlaufen.

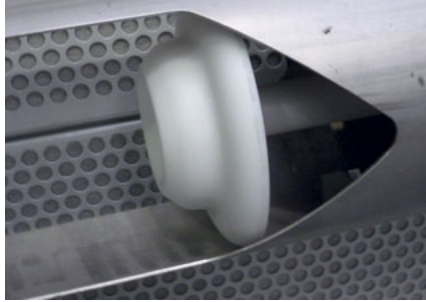
Die Produkteinlauföffnungen im Rohr wurden ursprünglich, wie Abbildung 6-2 zeigt, rechtwinklig zur Rohrachse eingebracht. Hier entstanden Schlagkanten für die Schu-

belemente und für das Produkt, Körner wurden beschädigt. Die Öffnungskante parallel zur Rohrachse verursachte eine Punktberührung über die gesamte Öffnungskante im Rohr an der gleichen Stelle am Schubelement.



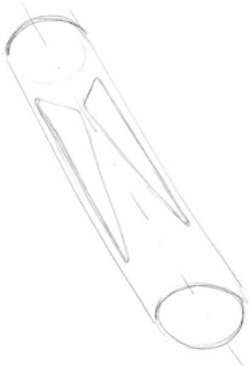
**Abbildung 6-2: Ursprüngliche Rohröffnung im Bereich des Produkteinlaufs rechtwinklig zur Rohrmittelnachse**

Die Geometrie der Öffnung wurde im Rahmen der konstruktiven Weiterentwicklung in der Weise so modifiziert, daß die Öffnung pfeilförmig zuläuft, um eine Zentrierung der Schubelemente zu ermöglichen. Abbildung 6-3 zeigt einen Entwurf und dessen Ausführung.



**Abbildung 6-3: Rohröffnung mit Zentrierwirkung zur Vermeidung von Produktbruch, Entwurf und erste Ausführung**

Wird diese Geometrie weiter optimiert, um in der Druckstrecke eine ausreichende Abstützung der Drucksäule im Rohr zu ermöglichen, bietet sich an, die Kontaktkante auf den Umfang des Schubelementes zu verteilen. Es entsteht eine Nierenform mit Mittelsteg (Abbildung 6-4).



**Abbildung 6-4: Rohröffnung als Nierenform zur Zentrierung und Abstützung der Schubelemente, Entwurf und erste Ausführung**

Auch die Schubelemente mussten neu gestaltet werden um ihr Verhalten in den Rohrbögen und die Fähigkeit ihrer freien Anlage im Rohr zu verbessern. Die Stützscheiben mussten so verändert werden, daß sie im Schubverband keinen Kontakt zur Rohrwandung bekommen, da andernfalls die kraftschlüssige Verbindung der Kugel/Kalotte Koppelung im Rohrbogen aufgehoben werden kann. Das bedeutet, daß nur die Mitnehmerscheiben die Zentrierung der Schubelemente übernehmen dürfen. Es zeigte sich bei den Erprobungen, daß der Abstand zwischen Produkteinlauf und Antriebsstation nicht zu gering sein darf, da sonst die Gefahr einer Einstaubung der

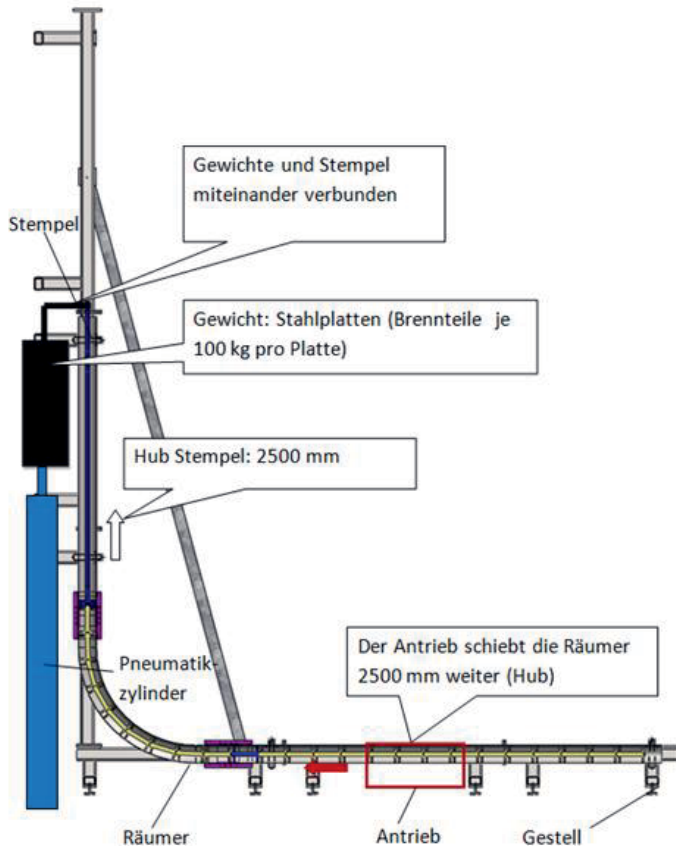
Station besteht. Die staubhaltige verdrängte Luft aus dem Einlauf entweicht in Richtung Antriebsstation. Somit muss entweder der Abstand zwischen Antrieb und Produkteinlauf groß genug gewählt werden oder aber ein Aspirationsanschluss<sup>55</sup> vorgesehen sein.

## 6.2 Versuchsstand zur Reibungsbestimmung im ersten Rohrbogen

Das Fördersystem soll Förderhöhen bis 50 m bedienen können. Die Aufbauhöhe von Erprobungshöhen im Versuchsumfeld sind aber limitiert auf max. 6m durch Halleneinbauten. So musste ein Ersatzmodell entwickelt werden, um größere Förderhöhen unter realistischen Bedingungen mit den gegebenen Restriktionen zu ermöglichen. Das Labormodell und die ersten Berechnungsergebnisse mit dem Berechnungsmodell zeigen, daß die größten Belastungen an den Schubelementen in der Antriebsstation auftreten und das im ersten Rohrbogen nach dem Antrieb und Produkteinlauf die größten Reibungskräfte wirken. Hier ist auch der stärkste Verschleiß an den Schubelementen und an den Rohren insbesondere im ersten Rohrbogen zu erwarten. Die vertikale Last durch die Gewichtskraft der Schubelemente und des Schüttgutes, die Reibung der Schubelemente und des Schüttgutes an der Rohrwandung lassen sich durch eine auf das erste Schubelement im vertikalen Steigrohr aufgebrachte Last darstellen. Dies kann durch einen pneumatischen Zylinder oder durch eine entsprechende Masse mit der entsprechenden Gewichtskraft erfolgen. Wenn ein Schubelement von der Antriebsstation bis zum Anfang des Steigrohres geschoben wird, hat dieses Schubelement die maximalen Kräfte im Antrieb und die maximale Reibung im gesamten ersten Rohrbogen aufzunehmen.

---

<sup>55</sup> Aspirationsanlagen sind zentrale Elemente in Mühlen. Vielfältige Aufgaben werden durch sie erledigt, so z.B. die Verhinderung von Staubentwicklungen, die Verhinderung von Staubaustritt, Verrichtung von Arbeitsleistung für Reinigungsmaschinen, Kühlen und Trocknen von Produkten oder auch Reduktion von Staubexplosionsgefahren. Aspirationsanlagen arbeiten mit geringem Unterdruck und werden in der Regel nach einem bestimmten Luftvolumenstrom ausgelegt [Ulm-2009].



**Abbildung 6-5: Entwurf Versuchstand zur Reibungsuntersuchung im ersten Rohrbogen mit Lastsimulation**

Für diese Untersuchung wurde ein 8 Inch Rohrdurchmesser festgelegt. In dieser Baugröße soll ein Schubelementeförderer ca. 50 t/h bis zu einer Höhe von ca. 50 m fördern können. Wird das Fördervolumen und die erreichbare Höhe nach den Berechnungsgrundlagen ermittelt, ergeben sich eine maximale Kraft am Schubelement (Räumern) in der Antriebsstation von ca. 30 kN je nach Füllgrad bei einer Förderleistung von ca. 50 t/h und einer Förderhöhe von 50 m. Bei einer Förderleistung von ca. 80t/h und einer Förderhöhe von 30 m treten ebenfalls 30 kN Schubelementebelastung in der Antriebsstation auf. Als Schüttgut wurde Weizen mit einer Schüttdichte von  $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$  zugrunde gelegt.







**Abbildung 6-7: Montierter Versuchsstand bei der Inbetriebnahme zur Reibungsuntersuchung im ersten Rohrbogen**

Im Dauerbetrieb zeigte sich bereits nach kurzer Zeit, daß im Rohrbogen aufgrund der Reibung erhebliche Reibungswärme entsteht. Auch findet eine erhebliche Verwindung des Rohrbogens aufgrund der eingeleiteten Reibungskräfte statt. Der erste Rohrbogen nach der Antriebsstation, also dort wo große Kräfte erwartet werden, wurde deshalb durch ein Stützblech (Abbildung 6-8) verstärkt. Darüber hinaus leitet das Stützblech Reibungswärme aus dem Rohrbogen ab.



**Abbildung 6-8: Rohrbogen mit Stützblech**

### 6.3 Versuchsstand 6 Inch mit *basic* Antrieb für 15 t/h

Das Antriebskonzept der bisher aufgebauten Erprobungsmuster schiebt die Schubelemente rechts und links mit zwei Mitnehmersträngen (Abbildung 6-9) an der Mitnehmerscheibe. Eine preiswertere Alternative kann ein Antriebssystem mit nur einem Antriebsstrang sein (Abbildung 6-10). Dieses Antriebskonzept wurde konstruiert und zu Erprobungszwecken aufgebaut. Eine FEM Rechnung (vergl. Kap. 5.2.2) ermittelt die zulässige maximale Kraft, die das Schubelement aufnehmen kann. Auch hier gilt, daß die größte Schubkraft im Bereich der Antriebsstation erwartet wird.

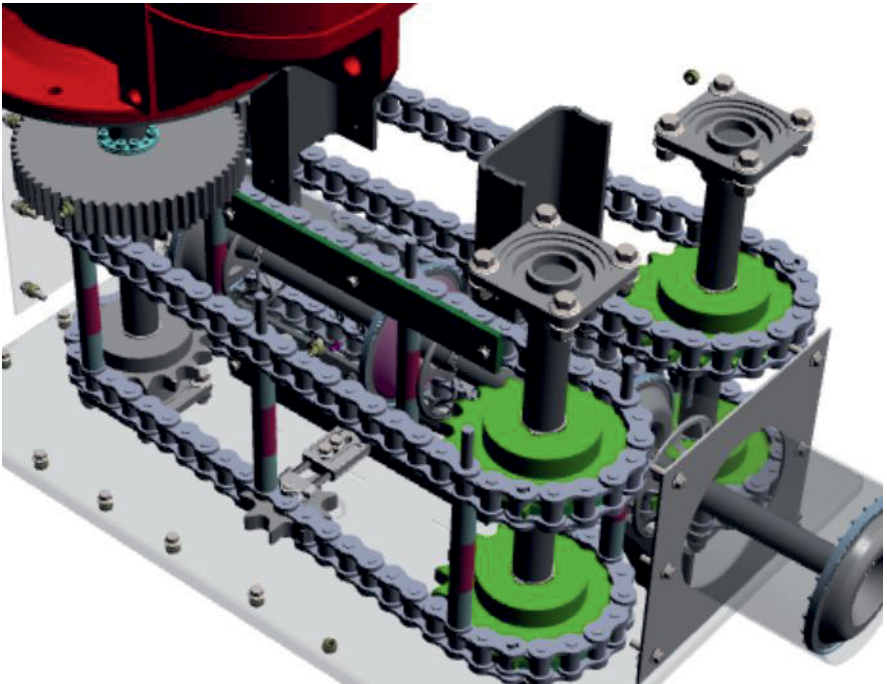


Abbildung 6-9: Antriebsstation mit zwei Kettenpaaren und symmetrischer Vorschubkrafteinleitung (als *standard* Antrieb bezeichnet)

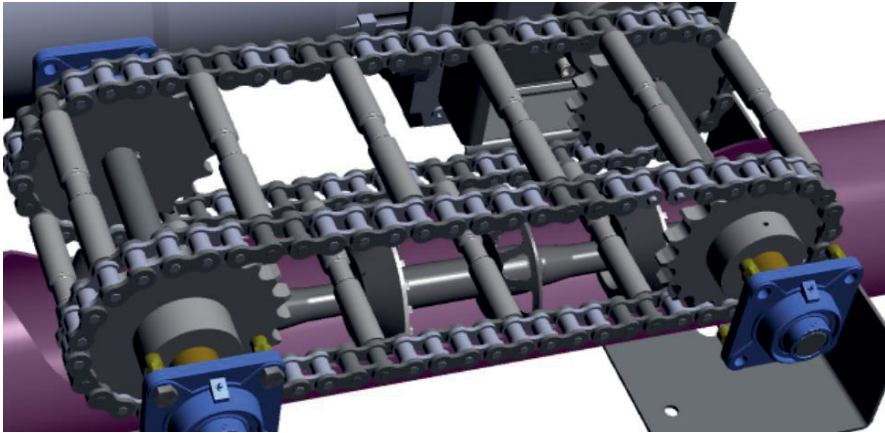


Abbildung 6-10: Antriebsstation in vereinfachter Ausführung mit einem Antriebskettenpaar (als *basic* Antrieb bezeichnet)

Die vereinfachte Antriebsvariante wurde konstruiert und als Versuchsanlage aufgebaut (Abbildung 6-11).



Abbildung 6-11: 6 Inch Versuchsanlage als Grundvariante mit *basic*-Antriebsvariante

Zwischenzeitlich hat die Versuchsanlage mehrere tausend Stunden Dauererprobung absolviert und läuft in ersten Felderprobungsprojekten in Kundenapplikationen. Es werden Fördersysteme in O-Anordnung bis 20 m Förderhöhe für Reisanwendungen erprobt. Abbildung 6-12 zeigt das Erprobungsmodell in einer Reismühle.



Abbildung 6-12: 6 Inch Versuchsanlagen mit *basic* Antrieb für Reisanwendungen (Bangalore Indien)

### 6.4 Erweiterte 6 Inch Kundeninstallation mit *basic* Antrieb und 3-D Linienführung

Zur Überprüfung, ob eine 3-D Linienführung machbar und für den rauen industriellen Einsatz verwendet werden kann, wurde eine Applikation in einer Futtermühle aufgebaut. Die Umrüstung einer bestehenden Anlage erforderte eine 3-D Linienführung, um vorhandene Einrichtungen nicht demontieren zu müssen. Neben den 90°-Rohrbögen wurden lediglich weitere 15°-Rohrbögen eingesetzt und die vertikalen Rohrstränge schräg gestellt (Abbildung 6-13). Die Anlage zeigt, daß auch diese Art der Streckenführung problemlos möglich ist.

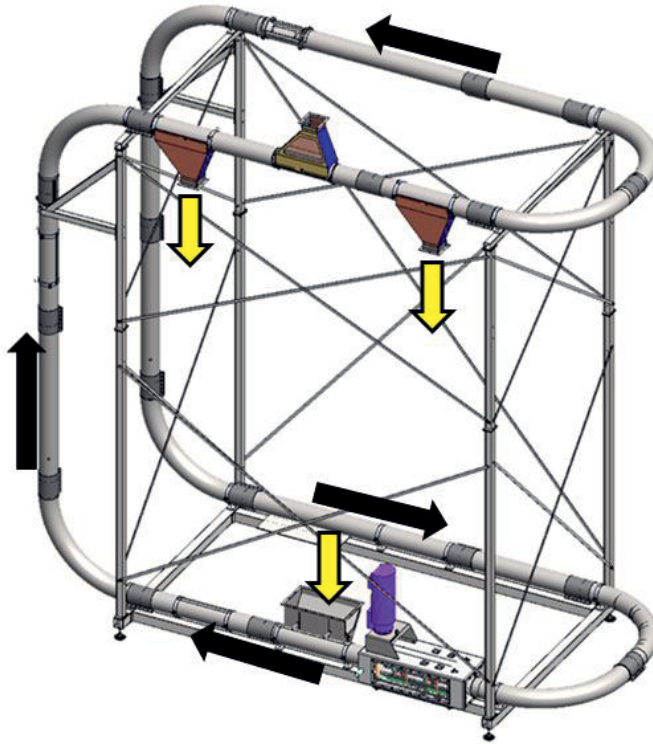




Abbildung 6-13: Planung der 3-D Linienführung im CAD und Darstellung der aufgebauten Förderanlage

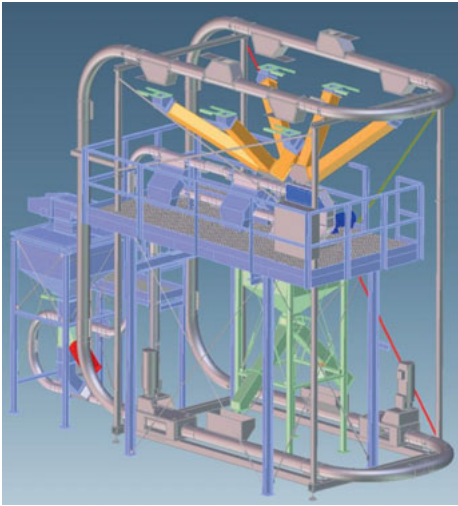
### 6.5 Versuchsstand 8 Inch in S-Bogenform

Bisherige Berechnungen und Messungen haben Anlagen in einfacher O-Anordnung untersucht. Das neue Fördersystem eignet sich jedoch auch zur Realisierung schwieriger Linienführungen. Analog zu pneumatischen Linienführungen und typischen Anordnungen aus Trogkettenförderern oder Schneckenförderern in Kombination mit Elevatoren wurde eine S- oder Z-Linienführung geplant. Nach Produktaufnahme im Einlauf soll die Linienführung eine 180° Richtungsänderung in der Horizontalen durchlaufen, bevor die Linienführung in die Vertikale übergeht. Ist die Förderhöhe erreicht, soll ebenfalls eine 180°-Richtungsänderung in der horizontalen Ebene erfolgen. So wird eine Gesamtwinkelsumme von  $8 \times 90^\circ = 720^\circ$  erreicht. Die Anlage soll mehrere Produktausläufe haben, so daß der Leistungsbedarf für unterschiedliche Förderstrecken gemessen werden kann. So können auch erste Messungen zum Anteil der Produktüberschleppung erfolgen. Diese Messungen sind notwendig, um das Auslaufverhalten des Produktes in Verbindung mit den Schubelemente zu untersuchen. Anhand der Fördergeschwindigkeit muss die Geometrie, hier insbesondere die Querschnittsfläche und Querschnittsform, des Produktauslaufes bestimmt werden.



**Abbildung 6-14: Planung eines Versuchsstandes in S-Bogenform für die Erprobung**

Der geplante Aufbau in Abbildung 6-14 und dann in der Realität ausgeführte Linienführung verhält sich wie rechnerisch vorausgesagt. Um eine kürzere Bauform zu erreichen wurde – wie im Bild zu sehen ist - der obere Bereich über den unteren geklappt. Nach der Produktaufnahme kann gleich nach einem 90° Rohrbogen in das vertikale Steigrohr gefördert werden. Ein Umbau der Antriebsstation ermöglicht aber auch eine Linienführung, in der nach Produktaufnahme erst eine horizontale Strecke mit zwei 90° Rohrbögen durchfahren werden muss, bevor das Schüttgut in das vertikale Steigrohr weiter transportiert wird.



**Abbildung 6-15: Versuchsanlage in S - Bogenform mit den beiden Antriebsvarianten direkt hinter dem Fallrohr und direkt vor dem Steigrohr als Planung und aufgebaut in der Dauerbetriebserprobung**

Die Erprobungsanlage zeigte, daß auch schwierige Linienführungen möglich und eine Gesamtwinkelsumme der Rohrbögen von  $720^\circ$  umsetzbar sind. Allerdings zeigt sich das System bei vielen Rohrbögen in der Linienführung anfällig für Schwingungen. Unter bestimmten Lastbedingungen und bei bestimmten Geschwindigkeiten konnte die Fördergeschwindigkeit nicht erhöht werden, da der Motorstrom anstieg und die Motorstrombremse den Antrieb abschaltete. Wurde der Geschwindigkeitsbereich ohne Produkt durchfahren, war oberhalb dieser Geschwindigkeitsbereiche kein Anstieg des Motorstromes bis zur Abschaltgrenze erkennbar. Dieses Verhalten des Antriebes muss in weiteren Untersuchungen überprüft werden. Erste Überlegungen gehen in Richtung eines Aufschwingens des Lasttrums unter bestimmten Lastbedingungen, d.h., es liegen Resonanzbedingungen vor.

### 6.6 Standard Antriebsvariante 8 Inch für 24 m Förderhöhe

Um größere Fördervolumen zu erproben, wurde eine 8 Inch Anlage in einer Weizenmehlmühle installiert (Abbildung 6-16). Hier werden je nach Auslastung der Mühle

40-50 t Weizen pro Stunde aus dem Silo auf den ersten Schrotwalzengang gefördert. Die Förderhöhe beträgt 24 m.





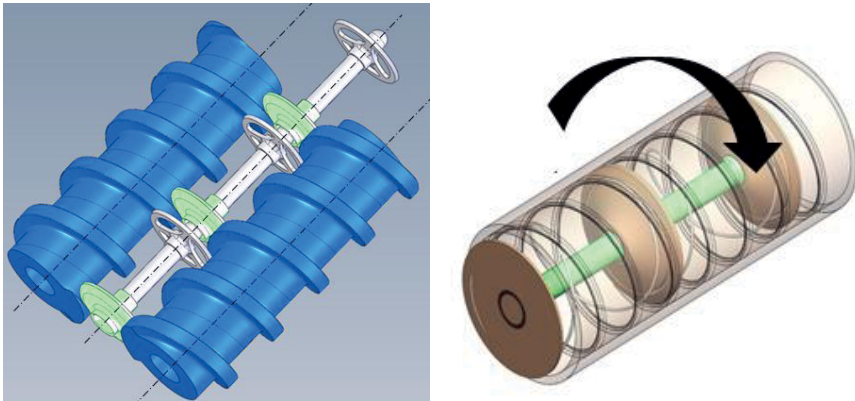
**Abbildung 6-16: 8 Inch Versuchsanlage in einer Weizenmühle in Frankreich**

Es wurden insbesondere Leistungsmessungen vorgenommen. Die berechneten Leistungen nach dem Theoriemodell wurden mit den tatsächlichen Leistungsmessungen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, daß mit Wirkungsgradkorrekturfaktoren bezüglich der Verlustleistung durch den Frequenzumrichter eine gute rechnerische Leistungsermittlung durchgeführt werden kann (vergl. Abschnitt 5.3).

## 7 Zukunftsvarianten

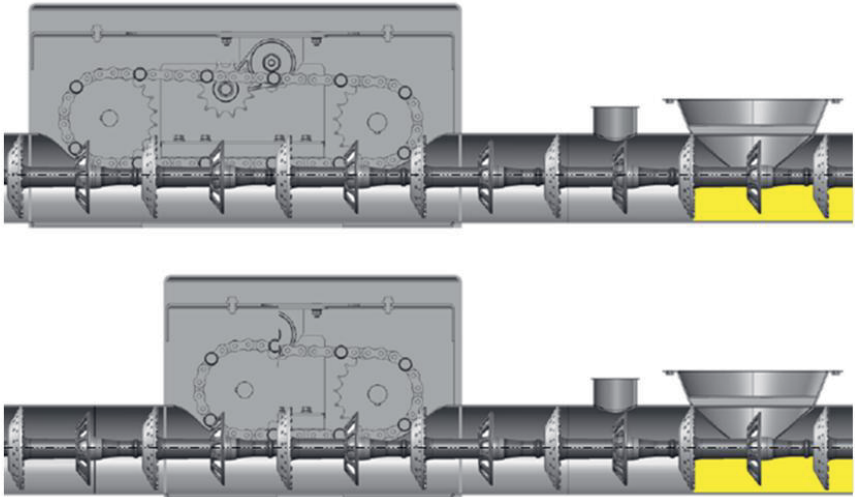
Die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Varianten zum Schubelementförderer geben nur den ersten, aktuellen Stand der Untersuchungen und Erkenntnisse zum neuartigen Fördersystem wieder. Bei keiner Neuentwicklung bleibt es aber aus, daß auch weitere Überlegungen hinsichtlich zukünftiger Anwendungsmöglichkeiten und Varianten angestellt werden. Einige dieser möglichen Varianten werden nachstehend kurz vorgestellt. Damit wird auch das Ziel verfolgt, einen Rahmen für weitere Untersuchungen zu geben.

Der gewählte Kettenantrieb ist nur eine mögliche Antriebsvariante. Grundsätzlich wäre zu prüfen, ob ein Schneckenantrieb wie in Abbildung 7-1, linke Darstellung, Vorteile bieten könnte. Hier wäre über die Schneckensteigung der Ein- und Auslauf der Schubelemente so gestaltbar, daß Toleranzen durch Kettenlängung und Schubelementeverkürzung ausgeglichen werden können. Eine vollkommen geschlossene Variante würde durch ein Wälzmutter- bzw. Rollringgetriebe erreicht werden (eine schematische Darstellung zeigt die rechte Abbildung).



**Abbildung 7-1: Antriebsvariante mit Schnecken oder geschlossenem „Rollringgetriebe“**

Für den Schubelementeförderer wurde festgelegt, daß aus Kontinuitätsgründen mindestens zwei Schubelemente gleichzeitig in der Antriebsstation im Eingriff sein müssen.



**Abbildung 7-2: Antriebsstation für eine *basic* Variante, aktuelle und verkürzte Ausführung**

Es ist deshalb zu prüfen, ob nicht auch eine Schubelementlänge ausreichend ist, hierdurch würde sich die Antriebsstation verkürzen, auch die Übergabe von Mitnehmerbolzen zu Mitnehmerbolzen wäre unabhängiger von den Toleranzen der Schubelemente und der Kettenlänge über der Standzeit (Abbildung 7-2).

Mit Variationen in der Positionierung der Antriebseinheit lassen sich Rohrquerschnitte deutlich grösser als 12 Inch und Förderhöhen bis 60 m realisieren. Das Berechnungsmodell zeigt, daß mehr als 30% der Antriebsleistung als Reibung im ersten Rohrbogen gewandelt werden. Mit einer Variante „Antriebsrad im Rohrbogen“ (Abbildung 7-3) lassen sich auch kleinere Aufstellflächen bedienen, die bis heute hauptsächlich von Elevatoren abgedeckt werden.

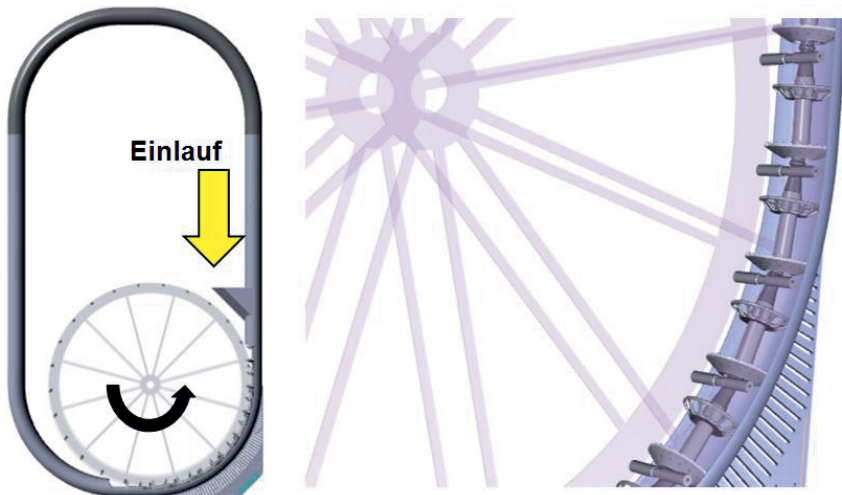


Abbildung 7-3: Antrieb über ein Antriebsrad im Rohrbogen

Der Antrieb könnte analog einer Triebstockverzahnung die Schubelemente im Einlauf in den Rohrbogen übernehmen und danach den gesamten Verband durch den Rohrbogen schieben, bis die  $90^\circ$  - Umlenkung erreicht ist. Der Abstand der Mitnehmerbolzen im Antriebsrad ist auf die Schubelementlänge einzustellen, die sich aufgrund der Neigung der Schubelemente im Rohrbogenradius an der Krafteinleitungsstelle ergibt. Besonderer Gestaltung bedarf der Bereich, an dem die Mitnehmerbolzen den Rohrbogen verlassen und das Schubelement ins Steigrohr übergeben wird. Hier ist die Geometrie der Koppelstelle Mitnehmerbolzen – Hauptkörper so auszubilden, daß die übertragene Geschwindigkeit konstant bleibt.<sup>56</sup>

Durch diese Bauweise entfällt allerdings der Vorteil der reduzierten Bauhöhe des Schubelementeförderers mit horizontal liegender Antriebsstation. Da sich der Antrieb unterhalb der Produktaufnahme befindet, vergrößert sich die Höhe des Förderers. Neben dem Antriebskonzept im Rohrbogen kann der Antrieb auch im vertikalen Steigrohr als „Becherwerk - Anordnung“ vorgesehen werden (Abbildung 7-4). Damit ließen sich sowohl die **basic** als auch die **standard** und **heavy duty** Antriebsvarianten realisieren. Die Produktaufnahme geschieht im Steigrohr. Allerdings baut diese Variante auch höher, da die Produktaufgabe über der Antriebsstation und dem Rohrbogen erfolgt, wodurch Bauraumhöhe benötigt wird.

<sup>56</sup> Otte [Ott-2014] hat in einer kinematischen Untersuchung dazu eine Reihe von Gestaltungsmöglichkeiten unterbreitet.

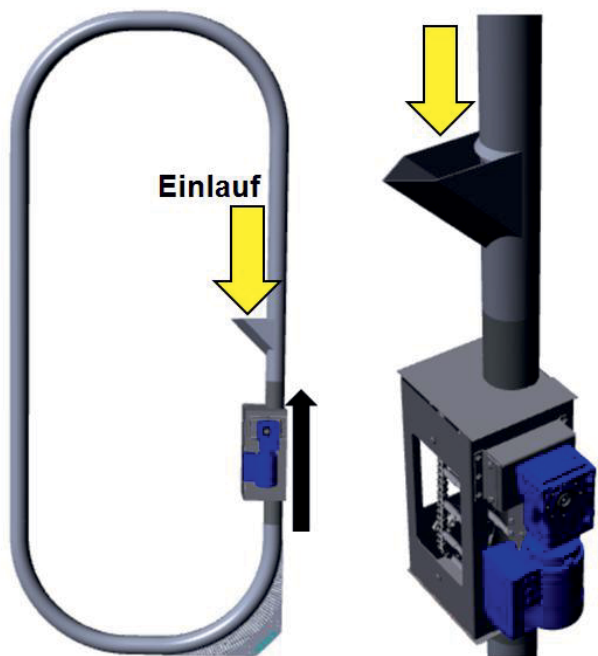


Abbildung 7-4: Schubelementeförderer als Becherwerk-Anordnung

Bei der Berechnung der Antriebsvariante „Becherwerk“ (siehe Tabelle 7-1) ergeben sich nach dem Berechnungsmodell im Vergleich zur herkömmlichen O-Anordnung mit Antrieb im horizontalen Antriebsstrang erheblich kleinere Kräfte, die auf die Schubelemente wirken und somit auch kleinere Antriebsleistungen für vergleichbare Fördervolumina.

Geschwindigkeit	Füllgrad	max. Schubelementebelastung	Antriebsleistung	Linienführungsvariante
0,8 m/s	0,62	2,1 kN	2,1 kW	O- Anordnung
0,5 m/s	1	3,3 kN	2,1 kW	O- Anordnung
0,8 m/s	0,62	0,9 kN	0,87 kW	Becherwerk Anordnung
0,5 m/s	1	1,4 kN	0,87 kW	Becherwerk Anordnung

Tabelle 7-1      Leistungsvergleich O- Anordnung zu Becherwerksvariante

So reduziert sich die Kraft, die in der Antriebsstation auf das erste Schubelement wirkt, um mehr als die Hälfte von 2,1 kN auf 0,9 kN und auch die Antriebsleistung

reduziert sich um mehr als die Hälfte von 2,1 kW auf 0,87 kW bei gleicher Förderhöhe und gleichem Fördervolumen<sup>57</sup>.

Der in dieser Arbeit behandelte Schubelementeförderer mit horizontaler Antriebseinheit bietet gegenüber bisherigen Fördersystemen Vorteile, die im weiteren beispielhaft am Aufbau von klassischen Reismühlen aufgezeigt werden sollen.

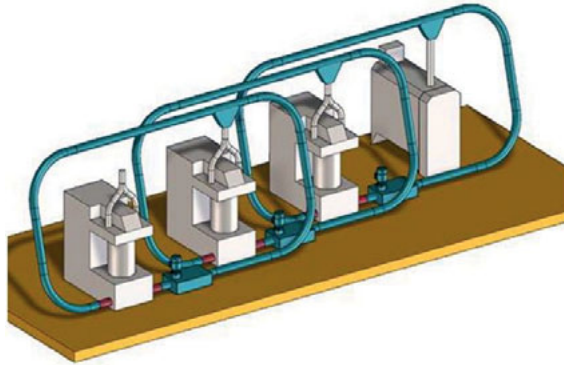
Die meisten Reismühlen werden über drei Etagen geplant und aufgebaut. Eingesetzte Elevatoren fördern den behandelten Reis jeweils von der unteren in die obere Etage, von der aus er im Sinne einer Bearbeitungskaskade wieder einer Prozessmaschine zugeführt wird. In der mittleren Etage stehen die Prozessmaschinen zum Entspelzen, Schleifen und Polieren. Bei konventioneller Planung stehen unter den Prozessmaschinen die Elevatorfüsse in einem tiefer liegendem Stockwerk, damit der Elevator schöpfend das Fördergut aufnehmen und in die 3. Etage transportieren kann. Die Elevatorköpfe befinden sich dann ein Stockwerk über den Prozessmaschinen, um den Reis aus den Bechern abzuwerfen und der nächsten Prozessmaschine zuführen zu können (Abbildung 7-5).



**Abbildung 7-5: Aufbau einer klassischen Reismühle über drei Stockwerke mit den wesentlichen Umfängen**

<sup>57</sup> Die Werte wurden mit dem Berechnungstool erstellt. Die Variante ist als Becherwerk (BW) Berechnungsmöglichkeit bereits in der Basisversion des Berechnungstools enthalten.

Mit dem Schubelementeförderer könnten alle Prozesse und Antriebe auf einer Etage zusammengestellt werden, d.h. die Reismühle baut um zwei Etagen flacher, sofern nicht die untere Etage als Lagerfläche genutzt werden soll (Abbildung 7-6).



**Abbildung 7-6: Entwurf einer Reismühle auf einer Etage mit dem Schubelementeförderer**

Es gibt weitere Anwendungsvarianten. Bruchempfindliche, sensitive Schüttgüter könnten beispielsweise in Behältern durch das Rohr geschoben werden. Hierzu ließen sich entsprechende Schubelemente gestalten und auch die Befüllung und Entleerung würde in besonderen Stationen erfolgen, wie in Abbildung 7-7 angedeutet.

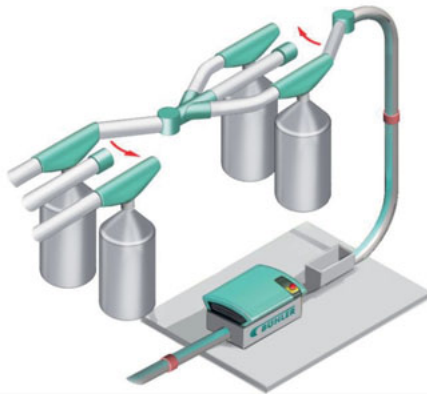


**Abbildung 7-7: Transport empfindlicher Schüttgüter in Behältern**

Es bieten sich auch vollkommen neue Möglichkeiten an. Interessant erscheint z.B. die Möglichkeit, unterschiedliche Förderstrecken über Rohrweichen zu bedienen. Da ein Druckverband aus einzelnen Schubelementen vorliegt, können die Schubelemen-

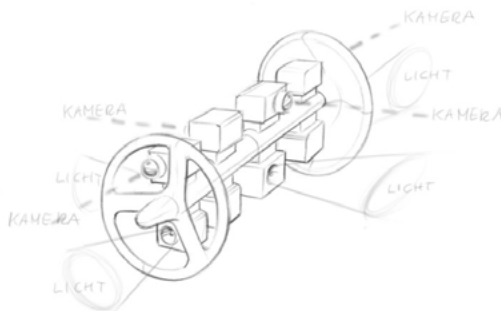


te über eine Rohrweiche in eine andere Linienführung umgelenkt werden, wie in Abbildung 7-8 gezeigt<sup>58</sup>.



**Abbildung 7-8: Weichen im Förderstrang**

Zusätzlich können Sonderelemente in das Fördersystem eingebracht werden. Für bestimmte, sensible Anwendungen des Schubelementeförderers können Dienstleistungen wie Rohrinspektionen mit einem mit Kamera und Beleuchtungseinheit ausgestatteten Schubelement angeboten werden. Eine erste derartige Version wurde für Messzwecke im Bereich Hygienic Design bereits aufgebaut (Abbildung 7-9).



**Abbildung 7-9: Inspektionsschubelement zur Rohrinspektion**

Weitere Optionen können Schubelemente in verschiedenster Ausführung in Form, Farbe und Festigkeit sein, es können Schubelemente mit besonderem Inlet zur

<sup>58</sup> In DIN 15201 Teil 2 Stetigförderer, Zubehöerteile werden ein Reihe unterschiedlicher Weichentypen wie Schiebe-, Dreh-, Schwenk-, Überlagerungs-, Zungen- und flexible Weichen aufgeführt.



Wärmespeicherung oder Kühlung angedacht werden, weiterhin Schubelemente mit Reinigungselementen oder Schubelemente mit besonderen, selbstreinigenden Oberflächen<sup>59</sup>.

Mit Zwischenantrieben, ob es nun Geradführungsgetriebe oder die hier untersuchten Kettenantriebe sind, können auch große Distanzen in horizontaler Ebene überbrückt werden. Die Rohrstrecke zwischen Produktauslass und Antrieb, also die Strecke, in der der Schubverband aufgehoben wird, könnte mit flexiblen oder mit sehr viel dünneren Wandstärken der Rohre gestaltet werden. In der Förderstrecke bietet es sich an, das Schüttgut chemisch, mit Wärme oder mit Strahlen zu behandeln, um z.B. toxikologische Aktivitäten zu reduzieren<sup>60</sup>. Wie bereits erwähnt lässt sich durch eine geschickte Anordnung von Sensoren der Volumenstrom ermitteln und damit eine Aussage über das Fördervolumen oder den Massenstrom bereits innerhalb des Fördersystems machen; heute - bei klassischen Fördersystemen - eine kaum realisierbare Aufgabe. Die gesamte Anlage kann wärmetechnisch isoliert werden, um bestimmte Produkteigenschaften zu erhalten. Im Nassbereich können Reinigungs- und Trocknungszonen parallel zur Förderlinie installiert werden, so daß eine automatische Reinigung der Anlage durchgeführt werden kann.

Die aufgeführten Möglichkeiten zeigen, daß das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten und Adaptionen des Schubelementeförderers immens ist. Die Arbeit stellt somit nur erste Überlegungen vor und es kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, daß sich sowohl aus der weiteren wissenschaftlichen Beschäftigung mit dem vorgestellten Förderprinzip und seinen ersten Ausführungsvarianten als auch aus den Anforderungen der Praxis noch viele weitere Möglichkeiten ergeben werden.

<sup>59</sup> Selbstreinigende Oberflächen sind auch unter der Bezeichnung „Lotus Effekt“ bekannt geworden. Die geringe Benetzbarkeit einer nanostrukturierten Oberfläche verursacht, dass Wasser abperlt und Schmutzpartikel aufnimmt.

<sup>60</sup> Mittels schwacher Begasung mit einem Gemisch aus Wasserstoffperoxid und Ethanol lassen sich erhebliche Reduktionen von Bakterien und Schimmel auf der Kornoberfläche erzielen. Die Mischung ist so gering, dass weder Probleme hinsichtlich Explosionsgefahr noch Brandgefahr zu erwarten sind.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Entwicklung des Schubelementeförderers liegt ein neuartiges Fördersystem vor, mit dem Schüttgut im Rohr gefördert wird. Das Förderprinzip lässt sich in der aktuellen DIN 15201 Teil 1 nicht einordnen. Aus systematischen Gründen wird die Bezeichnung „Schubelementeförderer“ vorgeschlagen. Im Verlauf dieser Arbeit wurde der Begriff bereits verwendet, die Bezeichnung TUBO, in manchen Abbildungen noch aufgeführt, ist lediglich ein firmeninterner Arbeitstitel.

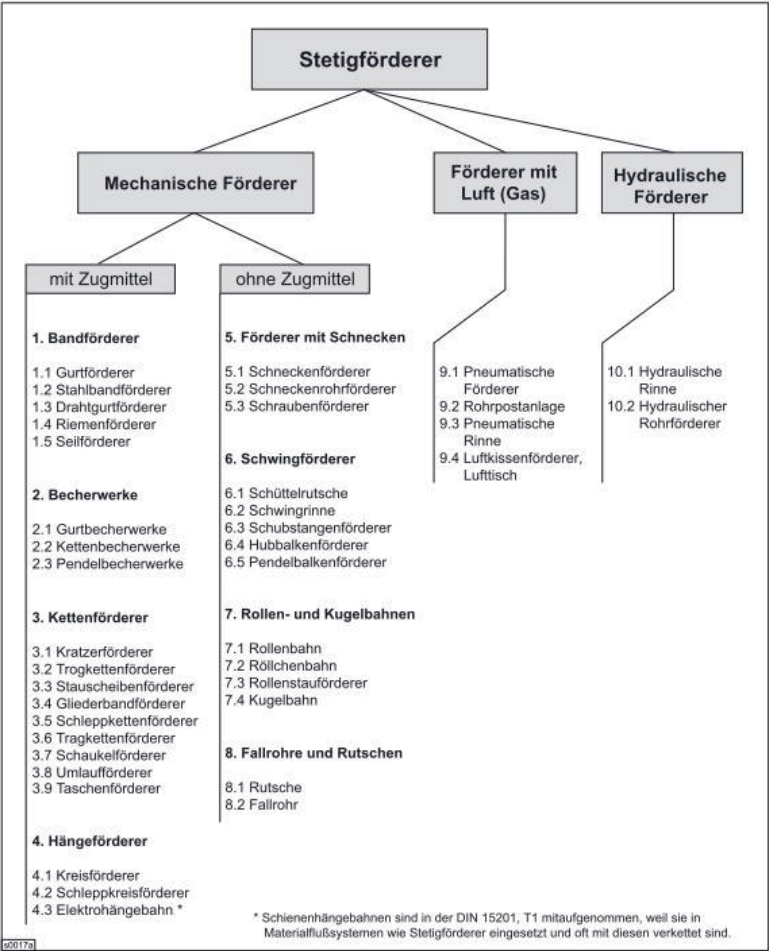


Abbildung 8-1: Übersicht Stetigförderer zur Schüttgutförderung [Gün-2010]

Die Einordnung des Schubelementeförderers ließe sich in der gegebenen Struktur unter

Stetigförderer ➡ Mechanische Förderer ➡ ohne Zugmittel

(Abbildung 8-1) durchführen.

Die Definition/Erklärung könnte lauten: „*Stetigförderer mit einzelnen Schubelementen, die im Verband durch ein Rohr geschoben werden und das Fördergut waagrecht bis senkrecht frei im Raum (3-D) transportieren.*“

Die Versuchsanlagen und die dazu begleitend erstellten Berechnungen und Simulationen zeigen, daß das grundsätzlich veränderte Vorschubkonzept von Zug auf Druck geeignet ist, Schüttgüter im Rohr zu transportieren. Die Versuchsanlagen zeigen auch, daß Fördersysteme nach diesem Transportprinzip in der Lage sind, Volumenströme bis 150 m<sup>3</sup>/h und mehr zu fördern. Die notwendige Antriebsleistung und damit der Energieaufwand liegen unter den Verbräuchen bestehender Stauscheibenträger. Untersucht wurde das Prinzip mit trockenen und feuchten Schüttgütern in der Grundnahrungsmittelverarbeitung. Hier werden aktuell Volumenströme bis 120 m<sup>3</sup>/h und Massenströme bis 85 t/h erreicht. Die vorliegenden Versuchsanlagen fördern in vertikaler Richtung bis zu 25 m Förderhöhe. Größere Anlagen sind in Planung.

Erste grundsätzliche Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Idee nachzuweisen. Begleitend zu den Überlegungen wurde nach theoretischen Erklärungsmodellen gesucht und die in der Theorie vorhergesagten Ergebnisse wurden in vielen Fällen mit Experimenten und Messungen an den Versuchsanlagen belegt.

Erste mathematische Optimierungen in Bezug auf Schubelementlänge zu Durchmesser, zur Rohrbogenform und zur Antriebssituation wurden durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Optimierungsarbeiten konnten experimentell nachgewiesen werden.

Das in der Arbeit vorgestellte Konzept eines hochmodularen Baukastens, einer Baureihe und einer Typengruppe ermöglichen in der Praxis einen flexiblen Aufbau von Förderanlagen für unterschiedliche Förderaufgaben.

Die Anforderungen nach schonendem Produkttransport und hohen hygienischen Standards können prinzipbedingt gut realisiert werden. Die Verschleppung von Fördergut durch die Schubelemente ist gering und bei entsprechender Gestaltung der Einlauf- und Auslaufstationen lassen sich höchste hygienische Anforderungen an die

Lebensmittelsicherheit erreichen. Erste Versuche zeigen, daß das System auch zur Förderung feuchter bis nasser Schüttgüter eingesetzt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde nur der Einsatz im sogenannten Foodbereich<sup>61</sup> betrachtet, der gesamte Nonfood<sup>62</sup> Bereich wie z.B. die Kunststoffindustrie, die Pharmazie, die Holzverarbeitung (Transport von Holzpellets) u.v.a. wurde nicht einbezogen. Hier ist der Einsatz des Fördersystems ebenfalls denkbar.

Im Hinblick auf Energieeffizienz konnten erste Grundsatzüberlegungen vorgenommen werden. Der Einsatz neuer Antriebstechnologien, neuer Werkstoffe, eine weitere Optimierung der Schubelemente oder der Koppelstellen zwischen Schubelementen und Mitnehmer sind weiteren Arbeiten vorbehalten, ebenfalls Betrachtungen und Erklärungsmodelle für das Aufschwingen des Antriebssystems unter bestimmten Betriebsbedingungen. Auch Langzeituntersuchungen zur Verfügbarkeit<sup>63</sup> [Ber-2000; Bir-1997] des Fördersystems sind noch anzuschließen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

In der hier vorgelegten Arbeit wird die Praxistauglichkeit einer Idee für ein neuartiges Fördersystem mit ersten Berechnungen, Theoriemodellen, experimenteller Begleitung und Erprobung erster Prototypen unter Produktionsbedingungen überprüft. Weiterhin werden für viele Detailprobleme (wie z.B. Hygiene, Design, Gestaltung der Schubelemente...) konstruktive Lösungen aufgezeigt. Für die Vielzahl weiterer Modifikationen des Transportprinzips mit der notwendigen wissenschaftlichen und praktischen Begleitung sind weitere Untersuchungen erforderlich.

---

<sup>61</sup> Foodbereich bezeichnet die Produktpalette der Grundnahrungsmittel und im Futterbereich.

<sup>62</sup> Nonfoodbereich bezeichnet Produkte außerhalb der Nahrungsmittel, z.B. Holz, Kunststoffe, Erze und andere.

<sup>63</sup> Die Verfügbarkeit eines technischen Systems ist das Mass oder die Wahrscheinlichkeit, dass ein System vereinbarte Anforderungen in einem bestimmten Zeitrahmen erfüllt und wird als Qualitätskriterium in einer Kennzahl ausgedrückt. Berechnet wird die Verfügbarkeit wie folgt:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Gesamtzeit} - \text{Gesamtausfallzeit}}{\text{Gesamtzeit}}.$$

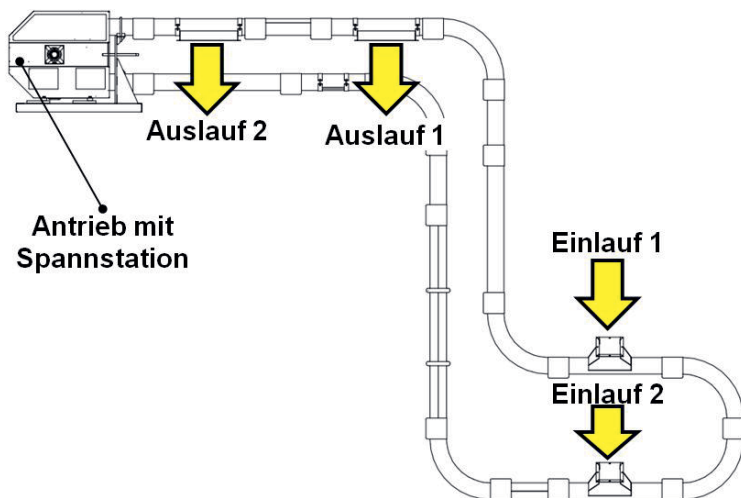
## 9 Anlage

Diese Anlage enthält weitere Untersuchungsergebnisse zum modifizierten Rohrkettenförderer ergänzend zu Punkt. 2.2.

Hier wird auch die Herleitung der Differentialgleichung aus Kapitel 4.1.2 dargestellt.

### 9.1 Experimentelle Untersuchungen zu einem modifizierten Rohrkettenförderer

Zur Überprüfung der Überlegungen hinsichtlich Zähnezah, Stauscheibenbefestigung, Kettenvorspannungen und Kettentyp soll die Leistungsfähigkeit eines modifizierten Stauscheibenförderers genauer untersucht werden. Hierzu wurde eine Versuchsanlage geplant und aufgebaut (Abbildung 9-1 und 9-2). Weiterhin sollte an unterschiedlichen Produktaufnahmestationen und Produktabgabestellen der Einfluss der Anzahl der Rohrkrümmer untersucht werden.



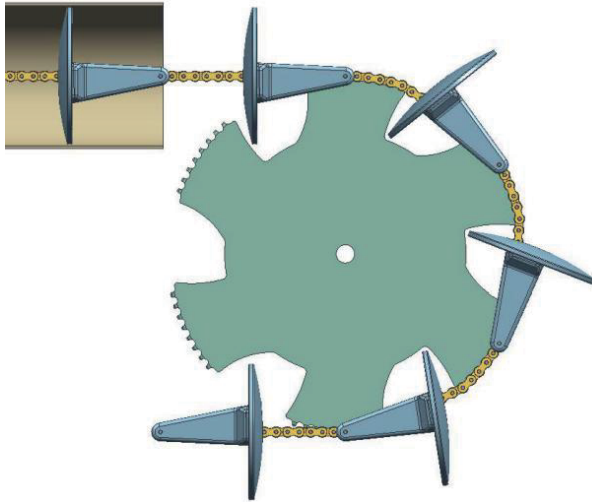
**Abbildung 9-1:** Linienführung des modifizierten Rohrkettenförderers mit zwei Produkteinläsen und zwei Produktauslässen

Die Versuchsanlage ließ sich über eine speicherprogrammierbare Gesamtsteuerung betreiben. Es konnten unterschiedliche Geschwindigkeiten per Eingabe geändert werden. Die Anzeige gab Auskunft über die wichtigsten Parameter der Anlage. Die Versuchsdaten wurden mitgeschrieben und ausgewertet.



**Abbildung 9-2: Versuchsanlage mit optimierten Stauscheiben und Blick auf das Bedienerdisplay**

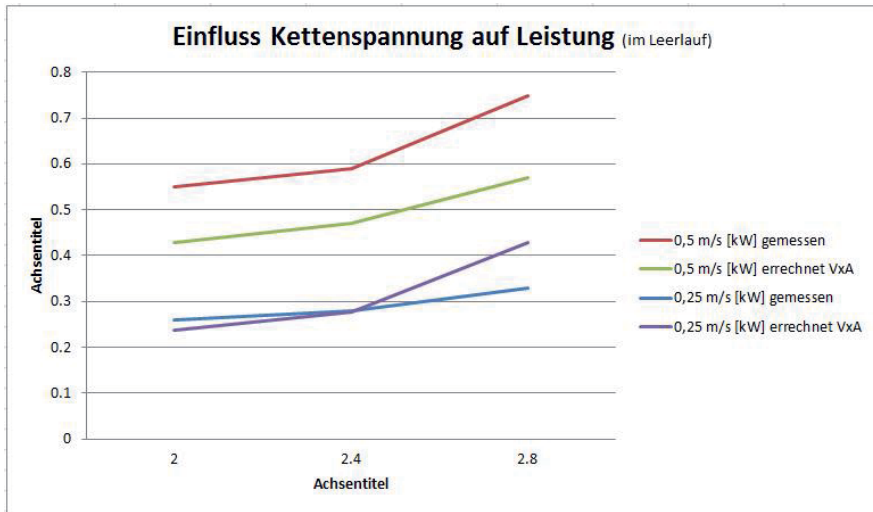
Wie bereits dargestellt, lässt sich der Polygoneffekt durch die Kettenteilung und/oder den Durchmesser des Antriebsrades beeinflussen. Eine kleine Kettenteilung ermöglicht die Wahl eines kleineren Antriebsrades, eine größere Kettenteilung erfordert ein im Durchmesser größeres Antriebsrad. Um den Polygoneffekt gering zu halten wurde die Antriebsstation mit großem Antriebsrad und kleiner Kettenteilung geplant. In der Versuchsanordnung mit dem Antrieb und den beweglichen Befestigungen der Stauscheiben auf der Kette nach Abbildung 9-3 wurden in der dargestellten Versuchsanlage erhebliche Verbesserungen hinsichtlich Laufruhe, zulässigen Fördergeschwindigkeiten und somit erreichbarem Volumenstrom erzielt.



**Abbildung 9-3: Antriebsrad in der Versuchsstation**

Die Linienführung wurde nach Abbildung 9-1 als sogenannter S-Typ in 2 Dimensionen mit  $180^\circ$  Umschlingung in der Antriebsstation und 6 Rohrbögen mit jeweils  $90^\circ$  gewählt. Somit ergibt die Winkelsumme aller Umlenkungen  $720^\circ$ . Der Rohrdurchmesser betrug 168,1 mm (6“ Standardrohre bekannt aus Pneumatik Anwendungen). Die Versuchsanlage wurde aus einem Edelstahlrohr mit 3,2 mm Wandstärke aufgebaut. Das Schüttgut konnte an zwei unterschiedlichen Stellen aufgegeben und an zwei unterschiedlichen Stellen ausgelassen werden.

Im Versuchsbetrieb ließen sich Fördergeschwindigkeiten von 1,2 m/s mühelos erreichen. Die Antriebsleistung verhielt sich wie erwartet im gleichen Niveau wie bei einem vergleichbaren Kettenförderer mit zentrisch montierten Mitnehmerscheiben, allerdings waren die Kraftschwankungen im Antrieb geringer. Mit zwei Messaufnehmern in der Antriebsstation wurde die Spannkraft der Kette gemessen. Die Anlage wurde mit unterschiedlichen Kettenvorspannkraften betrieben. Die Temperaturentwicklung und die Leistungsaufnahme stiegen bei Erhöhung der Kettenvorspannung. Die Kettenspannung hat direkten Einfluss auf die Leistungsaufnahme des Antriebes. So nahm die Leistungsaufnahme wie erwartet mit steigender Kettenspannung zu. Auch die Temperatur in den kritischen Rohrbögen nahm mit steigender Kettenspannung zu (Abbildung 9-4).



**Abbildung 9-4: Einfluss der Kettenspannung auf die Leistungsaufnahme**

Der Antrieb wurde durch eine Drehstromasynchronmaschine realisiert und konnte über einen Frequenzumrichter geregelt werden, so daß sich Geschwindigkeiten stufenlos von 0,1 m/s bis 1,2 m/s einstellen ließen. Die Asynchronmaschine besaß einen Fremdlüfter, so daß bei geringen Fördergeschwindigkeiten der Antrieb mit ausreichender Kühlung versorgt werden konnte.

Je nach Schüttgutdicke und Füllgrad ließen sich ein Massenstrom mit bis zu 20 t/h Förderleistung erreichen. Gefördert wurde Weizen mit einer Dichte von 750 kg/m<sup>3</sup> und Paddy Reis mit einer Dichte von 550 kg/m<sup>3</sup>.

Die Schwingungen im Antriebsstrang wurden auch bei höheren Fördergeschwindigkeiten bis 1,2 m/s nicht kritisch, trotz der 720° Gesamtumlenkungswinkel lagen die Kräfte in der Spannstation im erwarteten Größenbereich. Kraftspitzen, wie bei den Untersuchungen von Katterfeld [Kat-2005] im Stauscheibenförderer mit Rundgliederkette, konnten nicht gemessen werden; allerdings wurden in den durchgeführten Untersuchungen nur die Lagerkräfte direkt an den Lagerstellen und nicht im Zugstrang ausgewertet. Die Kette war nicht mit einer Kraftmessvorrichtung ausgestattet. Die Kettenkraft konnte aber indirekt über die Lagerkräfte ermittelt werden (Abbildung 9-5).





Abbildung 9-5: Messaufnehmer zur Messung der Lagerkräfte

Die Kettenspannung hatte –wie erwartet - einen Einfluss auf die Geräuschemissionen. Gemessen wurde der Schalldruckpegel in dB(A) mit einem üblichen Geräuschpegelmessgerät in ca. 2 m Abstand von der Fördereinrichtung in 1,7 m Höhe . Die Messungen wurden ohne Produktförderung durchgeführt, da die Geräusche mit Produkt im Rohr das Ergebnis je nach Schüttgut erheblich beeinflussen. Mit steigender Kettenspannung reduzierte sich die Lärmemission wie Abbildung 9-6 zeigt.

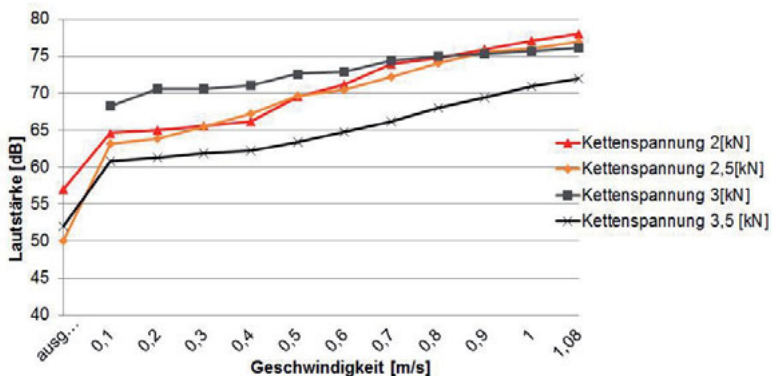
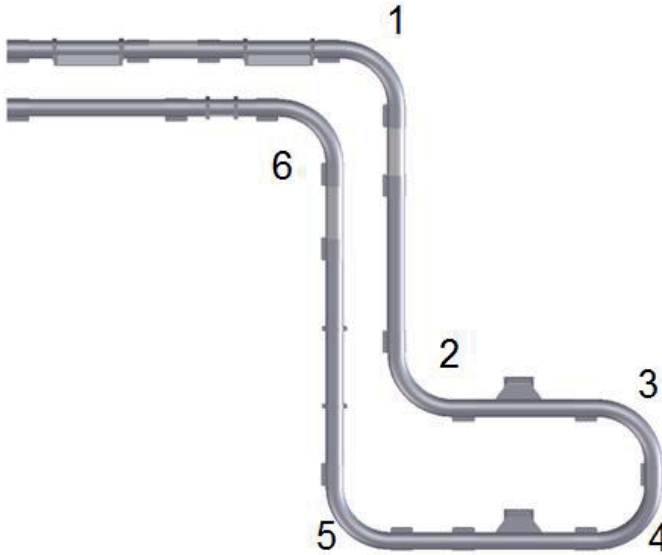


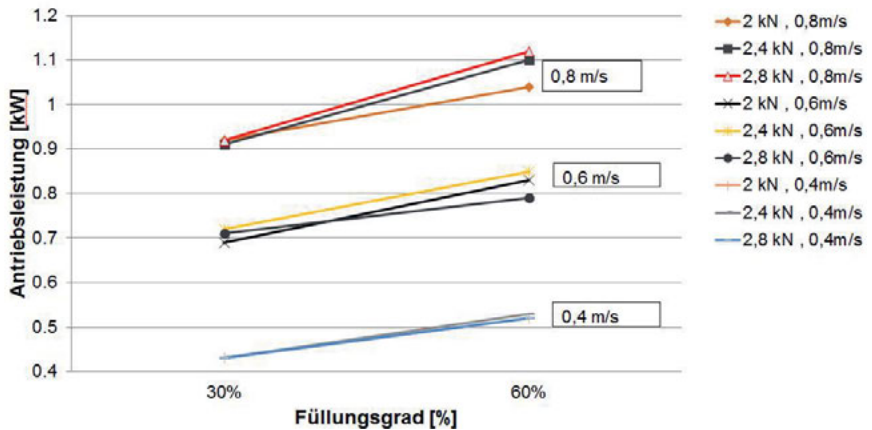
Abbildung 9-6: Akustikmessung modifizierter Rohrkettenförderer im Leerlauf

Die Temperatur wurde an verschiedenen Messstellen erfasst (Abbildung 9-7). Mit einem üblichen Lasermessgerät konnte die Temperatur berührungslos gemessen werden. Die zulässige Temperatur wurde mit 80°C festgelegt. Die Kunststoffmitnehmer erreichen bei diesem Temperaturniveau den kritischen Wert, an dem Festigkeit und Härte deutlich abnehmen.



**Abbildung 9-7: Temperaturmesspunkte in der Versuchsvorrichtung**

Im Messpunkt 2 wurden bei Geschwindigkeiten oberhalb von 0,6 m/s die kritischen 80°C erreicht. Nach etwa 20 min Dauerbetrieb stellt sich bei Raumtemperatur- Umgebung ein Temperaturgleichgewicht ein. Die Temperatur wird maßgeblich über die Fördergeschwindigkeit und den Füllgrad der Anlage beeinflusst.



**Abbildung 9-8: Antriebsleistung als Funktion des Füllungsgrades in Abhängigkeit von der Kettenspannung und der Fördergeschwindigkeit (Kettenspannung als farbiger Parameter)**

Die Abbildung 9-8 zeigt, daß der Einfluss der Kettenspannung auf die Leistungsaufnahme relativ gering ist. Allerdings nimmt der Verschleiß der Stauscheiben bei zunehmender Kettenspannung zu.

Die erreichten Verbesserungen konnten aber die übrigen grundsätzlichen Schwachstellen an den Rohrkettenfördersystemen nicht beheben:

- ein Zugtrum im Kettenförderer erfordert meistens eine Spannstation, sobald die Streckenführung nicht eine einfache Anordnung ist,
- das Verdrehen im Förderkanal während des Umlaufes führt insbesondere bei Rundgliederketten und Laschenketten zu erheblichem Verschleiß,
- bei der Montage bedarf es besonderer Beachtung, damit die Kette nicht verdreht eingezogen wird,
- das Grundprinzip des Rohrkettenförderers verursacht stets Reibung in allen Innenrohrbögen,
- der Rohrkettenförderer benötigt eine tragende Struktur der Rohre, um die Antriebsstation und die Antriebskräfte aufnehmen zu können. Die Antriebsstation befindet sich in der Regel an der höchsten Stelle im Fördersystem, dies ist eine besondere Herausforderung für Montage und Wartung,
- die Antriebsstation und die Spannstation kommen mit dem Förderprodukt in Berührung und beeinflussen damit die hygienischen Eigenschaften des Förderers negativ,
- der verschlissene Zugtrum kann nur komplett gewechselt werden,

- aufgrund großer Kettenteilung beim Einsatz von Ketten mit hoher Bruchkraft begrenzt der Polygoneffekt im Antrieb die Geschwindigkeit,
- bei aufwendigeren 3 dimensional Linienführungen werden Umlenkstationen benötigt. Auch hier kommt das Fördergut mit den Umlenkeinheiten in Kontakt und es bleibt Fördergut in den Stationen liegen.

Diese Schwachstellen zeigen, daß eine Neuentwicklung eines Fördersystems für den Einsatz in der Grundnahrungsmittelindustrie sinnvoll und notwendig wird.

## 9.2 Ableitung der Differentialgleichung für den Rohrbogen des Schubelementeförderers in Analogie zu [Kat-2005]

Differentialgleichung:

$$\left( \frac{d}{d\psi} T(\psi) \right) + \mu T(\psi) = -A \sin(\psi) - B \cos(\psi)$$

Allgemeine Lösung:

$$T(\psi) = e^{(-\mu \psi)} \cdot C_1 - \frac{-A \cos(\psi) + A \mu \sin(\psi) + B \mu \cos(\psi) + B \sin(\psi)}{\mu^2 + 1}$$

\_C1 Variable durch Definition von Randbedingungen zu lösen:  $T(\psi_0)$  an Position  $\psi_0$ :

$$T(\psi_0) = e^{(-\mu \psi_0)} \cdot X - \frac{-A \cos(\psi_0) + A \mu \sin(\psi_0) + B \mu \cos(\psi_0) + B \sin(\psi_0)}{\mu^2 + 1}$$

$$T(\psi_0) + \frac{-A \cos(\psi_0) + A \mu \sin(\psi_0) + B \mu \cos(\psi_0) + B \sin(\psi_0)}{\mu^2 + 1}$$

$$X := \frac{e^{(-\mu \psi_0)}}{e^{(-\mu \psi_0)}}$$

Einsetzen in Ergebnis der DGL:

$$T(\psi) = \frac{e^{(-\mu \psi)} \left( T(\psi_0) + \frac{-A \cos(\psi_0) + A \mu \sin(\psi_0) + B \mu \cos(\psi_0) + B \sin(\psi_0)}{\mu^2 + 1} \right)}{e^{(-\mu \psi_0)}} - \frac{-A \cos(\psi) + A \mu \sin(\psi) + B \mu \cos(\psi) + B \sin(\psi)}{\mu^2 + 1}$$

Vereinfachen:

$$T(\psi) = e^{(-\mu (\psi - \psi_0))} \left( T(\psi_0) + \frac{-A \cos(\psi_0) + A \mu \sin(\psi_0) + B \mu \cos(\psi_0) + B \sin(\psi_0)}{\mu^2 + 1} \right) - \frac{-A \cos(\psi) + A \mu \sin(\psi) + B \mu \cos(\psi) + B \sin(\psi)}{\mu^2 + 1}$$

Umstellung nach  $T(\psi_0)$ :

$$T(\psi_0) := e^{(\mu (\psi - \psi_0))} \left( T(\psi) + \frac{-A \cos(\psi) + A \mu \sin(\psi) + B \mu \cos(\psi) + B \sin(\psi)}{\mu^2 + 1} \right) - \frac{-A \cos(\psi_0) + A \mu \sin(\psi_0) + B \mu \cos(\psi_0) + B \sin(\psi_0)}{\mu^2 + 1}$$

---

## Literaturverzeichnis

- [Alt-1984] Altschuller, G. S.: Erfinden Wege zur Lösung technischer Probleme. PI Verlag Cottbus 1984
- [Alt-1998] Altschuller, G. S.: Erfinden Wege zur Lösung technischer Probleme. PI Verlag Cottbus 1998
- [Ber-2004] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Springer Verlag Berlin 2004
- [Bir-1997] Birolini, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. Springer Verlag Berlin 1997
- [Bis1953] Bischoff, W.; Hansen, F.: Rationelles Konstruieren Konstruktionsbücher Band 5 VEB Verlag Technik Berlin 1953
- [Bon-1995] Bono de, E.: Denkschule Zu mehr Innovation und Kreativität. Orbis Verlag München 1995
- [Bri-2011] Brinkmann, T.: Handbuch Produktentwicklung mit Kunststoffen. Hanser Verlag München Wien 2011
- [Bug-1990] Bugdahl, V.: Methoden der Entscheidungsfindung. Vogel Verlag Würzburg 1990
- [Bug-1991] Bugdahl, V.: Kreatives Problemlösen. Vogel Verlag Würzburg 1991
- [Bul-2007] Bullinger, H.-J.: Technologieführer Grundlagen - Anwendungen - Trends. Springer Verlag Berlin 2007
- [Bür-1991] Bürdek, B.E.: Design. Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung. DuMont Verlag Ostfildern 1999
- [Bus-1998] Busse, R.: Was kostet Design. Art Books Intl Ltd Verlag London 1998
- [DIN EN 1127-1] DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1 Grundlagen und Methodik - deutsche Fassung. Beuth Verlag Berlin 2011
- [DIN-1672-2] DIN EN 1672-2: Nahrungsmittelmanipulationen – Allgemeine Gestaltungsgrundsätze – Teil 2 Hygieneanforderungen. Beuth Verlag Berlin 2009
- [DIN-10528] DIN 10528: Lebensmittelhygiene – Anleitung für die Auswahl von Werkstoffen, für den Kontakt mit Lebensmitteln – Allgemeine Grundsätze. Beuth Verlag Berlin 2009

- [DIN-14159] DIN EN ISO 14159: Sicherheit von Maschinen – Hygieneanforderungen an die Gestaltung von Maschinen. Beuth Verlag Berlin 2009
- [DIN 15201-1] DIN 15201: Teil 1 Stetigförderer Benennungen. Beuth Verlag Berlin 1994
- [DIN-21469] DIN EN ISO 21469: Sicherheit von Maschinen – Schmierstoff mit nicht vorhersehbarem Produktkontakt - Hygieneanforderungen. Beuth Verlag Berlin 2006
- [DIN 25448] DIN 25448: Ausfalleffektanalyse. Beuth Verlag Berlin 1990
- [Dob-2012] Dobelli, R.: Die Kunst des klugen Handelns. Hanser Verlag München 2012
- [Dör-1999] Dörner, D.: Bauplan für eine Seele. Rowohlt Verlag Reinbeck 1999
- [Dör-2003] Dörner, D.: Die Logik des Misslingens Strategisches Denken in komplexen Situationen. Rowohlt Verlag Reinbeck 2003
- [EG-1935/2204] Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober. 2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen.
- [EG-2006/42] Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen
- [EG 2023/2006] (EG) Nr. 2023/2006 der Kommission vom 22. Dezember 2006 über gute Herstellungspraxis für Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen
- [EHEDG-Gui-8] EHEDG Guidelines, Dokument 8, Gestaltungskriterien für hygienegerechte Maschinen, Apparate und Komponenten. 2. Auflage April 2004
- [EHEDG-Gui-22] EHEDG Guidelines, Document 22, General hygienic design criteria for the safe processing of dry particulate materials. Second edition, March 2014
- [Erh-1999] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. 2. Auflage Hanser Verlag München Wien 1999
- [Erl-2003] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung Denkabläufe Methodeneinsatz Zusammenarbeit. Hanser Verlag München 2003

- [Erl-2000] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer Verlag Berlin 2000
- [FKM-2012] Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 6. überarbeitete Ausgabe VDMA-Verlag 2012
- [Geb-2000] Gebhardt, A.: Rapid Prototyping. Hanser Verlag München 2000
- [Gün-2010] Günthner, W.A.: Materialflusstechnik Skript Lehrstuhl Förderungstechnik Materialfluss Logistik. TU München 2010
- [Han-1966] Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Verlag Technik Berlin 1966
- [Hän-2003] Hänel, B.; Haibach, E.; Seeger, T.; Wirthgen, G.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, Forschungskuratorium Maschinenbau. VDMA Verlag Frankfurt 2003
- [Hanf-1908] Hanffstengel, G.v.: Die Förderung von Massengütern Erster Band Bau und Berechnung der stetig arbeitenden Förderer. Springer Verlag Berlin 1908
- [Hau-2005] Haut, H.; Katterfeld, A.: Kettenförderer, Kettentriebe, Kettenfahrwerke – eine neue Anwendung der Mehrkörpersimulation. 10. Fachtagung Schüttgutfördertechnik Tagungsband 2005
- [Haus-2008-1] Hauser, G.: Hygienische Produktionstechnologie. WILEY-VCH Verlag Weinheim 2008
- [Haus-2008-2] Hauser, G.: Hygienegerechte Apparate und Anlagen. WILEY-VCH Verlag Weinheim 2008
- [Hel-2010] Hellrich, W.; Harsch, G.; Baur, E.: Werkstoffführer Kunststoffe. 10. Auflage Carl Hanser Verlag München 2010
- [Her-2000] Herb, R.: TRIZ - der systematische Weg zur Innovation. Moderne Industrie Verlag Landsberg 2000
- [Hil-1997] Hill, B.: Innovationsquelle Natur Naturorientierte Innovationsstrategie für Entwickler, Konstrukteure und Designer. Shaker Verlag Aachen 1997
- [Hil-1999] Hill, B.: Naturorientierte Lösungsfindung Entwickeln und Konstruieren nach biologischen Vorbildern. Expert Verlag Renningen 1999
- [Hom-2011] Hompel, M.; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. Springer Verlag Heidelberg 2011



- [Hub-1989] Hubka, V.; Schregenberger, J.W.: Eine Ordnung konstruktionswissenschaftlicher Aussagen. VDI-Z 131 Seite 33-36 1989
- [Kat-2005] Katterfeld, A.: Funktionsanalyse von Rohrkettenförderern Dissertation. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität 2005
- [Kat-2010] Katterfeld, A.; Krause, F.: Innovationen und Trends in der Schüttgutförderung Fachaufsatz in Schüttgut Vol 16 Nr.1 2010
- [Kat-2016] Katterfeld, A.; Haensel, H.: Berechnung und Simulation des Schubelementeförderers Schüttguttagung 2016 in print
- [Kle-2002] Klein, B.: TRIZ/TIPS - Methodik des erfinderischen Problemlösens. Oldenbourg Verlag München 2002
- [Kol-1994] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. 3. Auflage Springer Verlag Berlin 1994
- [Kol-1998] Koller, R.; Kastrop, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Springer Verlag Berlin 1998
- [Kra-1993] Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinwerktechnik. Hanser Verlag München 1993
- [Kra-2000] Krause, W.: Gerätekonstruktion in der Feinwerktechnik und Elektronik. 3.Auflage Hanser Verlag München 2000
- [Krau-1997] Krause, F.; Banse, W.; Schmolke, S.; Lorz, S.: Beanspruchung der Rundstahlgliederkette von Stauscheibenförderern (Rohrkettenförderer). Tagungsband Schüttguttagung Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Förder- und Baumaschinentechnik, Stahlbau und Logistik Magdeburg 1997
- [Krau-1996] Krause, F.: Anforderungen an die Schüttgutfördertechnik. Tagungsband zur Fachtagung Schüttgutfördertechnik 1996. Logisch Verlag Magdeburg 1996
- [LFGB-2005] Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände und Futtermittelgesetzbuch-2005
- [Lin-1993] Linde, H.J.; Hill, B.: Erfolgreich erfinden Widerspruchorientierte Innovationsstrategie für Entwickler und Konstrukteure. Hoppenstedt Verlag Darmstadt 1993
- [Lind-2005] Lindemann, U.: Methodisches Entwicklung technischer Produkte Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer Verlag Berlin 2005
- [Mas-1988] Masing, W.: Handbuch der Qualitätssicherung. 2. Auflage Carl Hanser Verlag München Wien 1988
- [Mat-2003] Mattheck, C.: Warum alles kaputt geht Form und Versagen in Natur und Technik. Karlsruhe 2003

- [Mat-2006] Mattheck, C.: Verborgene Gestaltgesetze der Natur. Karlsruhe 2006
- [Mat-2010] Mattheck, C.: Denkwerkzeuge nach der Natur. Karlsruhe 2010
- [Mül-1990] Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer Verlag Berlin 1990
- [Ori-2006] Orloff, M.A.: Grundlagen der klassischen TRIZ Ein praktisches Lehrbuch des erfinderischen Denkens für Ingenieure. Springer Verlag Berlin 2006
- [Osb-1957] Osborn, A.F.: Applied Imagination Principles and procedures of creative problem solving. Scribner New York 1957
- [Ott-2012] Otte, V.: Getriebe für Geradfürungen Zusammenstellung zur Nutzung Projekt Tubo. Bühler AG Schweiz 2012
- [Ott-2014] Otte, V.: Untersuchungen zum Einsatz von Zykloiden Verzahnungen im Antrieb des Schubelementeförderers Projekt Tubo. Bühler AG Schweiz 2014
- [Pah-1993] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre Methoden und Anwendung. Springer Verlag Berlin 1993
- [Pah-2004] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendungen. Springer Verlag Heidelberg 2004
- [Pah-2005] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Springer Verlag Berlin 2005
- [Pah-2013] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer Verlag Berlin 2013
- [Ran-1857] Rankine, W. J .M.: On the Stability of loose Earth Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Jg.147 1857
- [Rec-1973] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie Optimierung technischer Systeme nach den Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann Verlag Stuttgart 1973
- [Rin-1986] Rindfleisch, H.-J.; Thiel, R.: Beiträge zur Erhöhung des erfinderischen Schaffens-Schulungsmaterial. Bauakademie Berlin 1986
- [Rod-1991] Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Springer Verlag Berlin 1991
- [Rot-2000] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer Verlag Berlin 2000

- [Sal-1987] Saller, M.: Fortschritts-Berichte VDI-Reihe 13. Bd. 30: Beitrag zur Berechnung und Optimierung senkrechter Trogkettenförderer. VDI Verlag Düsseldorf 1987
- [Sch-1993] Schlicksupp, H.: Kreativ- Workshop Ideenfindungs-, Problemlösungs- und Innovationskonferenzen planen und veranstalten. Vogel Verlag Würzburg 1993
- [Sche-1994] Scheffler, M.: Grundlagen der Fördertechnik – Elemente und Triebwerke. Vieweg Verlag Braunschweig 1994
- [Schw-2013] Schwister, K. Leven, V.: Verfahrenstechnik für Ingenieure. Hanser Verlag München 2013
- [See-2005] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme. Springer Verlag Berlin 2005
- [Sti-2009] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie1. Springer Verlag Berlin 2009
- [Tim-2014] Timm, F.: Erfolgsfaktoren und Leitfaden für die Gestaltung von Maschinen und Investitionsgütern. Ausgabe 01/02-2014 der mav Konradin Mediengruppe
- [Tri-2013] Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) BGBl. I S.959 Bundesrechtsverordnung
- [Ulm-2009] Ulmer, K.: Maschinenkunde Müllerei, Schweizerische Berufsbildungskommission Müller. Zollikofen 2009
- [VDI-2220] VDI 2220: Produktplanung Ablauf, Begriffe, Organisation. VDI Verlag Düsseldorf 1980
- [VDI-2221] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI Verlag Düsseldorf 1993
- [VDI-2222-1] VDI 2222 Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien (Entwurf). VDI Verlag Düsseldorf 1996
- [VDI-2222-2] VDI 2222 Blatt 2: Konstruktionsmethodik Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. VDI Verlag Düsseldorf 1982
- [VDI-2225-1] VDI 2225 Blatt-1: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Vereinfachte Kostenermittlung. VDI Verlag Düsseldorf 1997
- [VDI-2225-2] VDI 2225 Blatt 2: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Tabellenwerk. VDI Verlag Düsseldorf 1997

- [VDI-2225-3] VDI 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Technisch-wirtschaftliche Bewertung. VDI Verlag Düsseldorf 1997
- [VDI-2225-4] VDI 2225 Blatt 4: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Bemessungslehre. VDI Verlag Düsseldorf 1997
- [VDI-2263-8] VDI Richtlinie 2263 Blatt 8: Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen - Brand- und Explosionschutz an Elevatoren. VDI Verlag Düsseldorf 2008
- [VDI-2329] VDI Richtlinie 2329: Pneumatische Förderanlagen Grundlagen, Anlagen, Baugruppen. Entwurf VDI Verlag Düsseldorf 2012
- [VDI-2422] VDI 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. VDI Verlag Düsseldorf 1994
- [VDI-2424-1] VDI 2424 Blatt 1: Industrial Design, Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen. VDI Verlag Düsseldorf 1986
- [VDI-2424-2] VDI 2424 Blatt 2: Industrial Design, Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen Darstellung an Beispielen. VDI Verlag Düsseldorf 1986
- [VDI-2424-3] VDI 2424 Blatt 3: Industrial Design, Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen Der Industrial-Design-Prozess. VDI Verlag Düsseldorf 1988
- [VDI-3971] VDI Richtlinie 3971: Mechanische Steil- und Senkrechtförderer für Schüttgut - Bauarten und Auswahl. VDI Verlag Düsseldorf 1994
- [Vol-2000] Vollmann, A.: Untersuchung der Schüttgutförderung in geeigneten Schneckenförderern. Dissertation Technische Universität München 2000
- [Volm-1987] Volmer, J.: Getriebetechnik Lehrbuch. VEB Verlag Technik Berlin 1987
- [Volm-1992] Volmer, J.: Getriebetechnik Grundlagen. VEB Verlag Technik Berlin 1992
- [Wer-2012] Werdich, M.: FMEA-Einführung und Moderation. Springer Vieweg Verlag 2012
- [Zob-1991] Zobel, D.: Erfinder Praxis. Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1991
- [Zob-2006] Zobel, D.: TRIZ FÜR ALLE der systematische Weg zur Problemlösung. Expert Verlag Renningen 2006

- [Zob-2007] Zobel, D.: Kreatives Arbeiten Methoden - Erfahrungen - Beispiele. Expert Verlag Renningen 2007
- [Zwi-1966] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. Droemer Knaur Verlag München 1966



---

# Lebenslauf

Rolf Theodor Kamps  
geb. am 22.06.1959  
Geburtsort Kleve (BRD)  
e-mail: rolf.kamps@web.de

## Berufspraxis

- seit 2011 Senior Projektleiter im Bereich R&D bei der Bühler AG in Uzwil Schweiz Durchführung und Leitung von Innovationsprojekten
- 2009 bis 2011 Entwicklungsleiter bei der Schwab Verkehrstechnik Schaffhausen Schweiz  
Entwicklung von sicherheitsrelevante Komponenten für die Bahntechnik
- 2009 - 2009 Technische Leitung bei der Firma Arau GmbH Automatisierungstechnik, Reinigungs- und Entgratungstechnik
- 2001- 2009 Leiter der Produktentwicklung bei der Firma Huf Hülsbeck und Fürst Automobilzulieferunternehmen Fahrzeugzugangsberichtigungssysteme
- 1999 -2001 Leiter der Technischen Entwicklung bei der Firma Böddecker & Co.GmbH & Co.KG Fahrzeugschließsysteme
- 1988 - 1999 Leitung Entwicklung und Konstruktion der Firma STOCKO - YKK Fasteners GmbH Sondermaschinenbau, Pressenbau
- 1987 - 1988 Leiter Produktentwicklung der Firma Wilde MIT Membran Impuls Technik gedruckte Elektronik
- 1985 - 1987 Konstrukteur bei der Firma Rico - Rego Maschinen GmbH
- 1985 Jungingenieur bei der Firma Oehmichen & Bürgers

## Studium und Berufsausbildung

- 2007 – 2009 Zweitstudium im Bereich Qualitätswesen, Abschluss mit Zulassung zur Promotion an der Bergischen Universität Wuppertal
- 1985 Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg Ausbildung zum Schweißfachingenieur
- 1981 – 1985 Fachhochschule Krefeld Niederrhein Studium Allgemeiner Maschinenbau, Schwerpunkt Konstruktionstechnik Abschluss : Diplom-Ingenieur
- 1975-1978 Deutsche Bundesbahn Ausbildung zum Maschinenschlosser

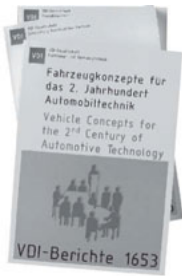




## Online-Shops



**Fachliteratur und mehr -  
jetzt bequem online recher-  
chieren & bestellen unter:  
[www.vdi-nachrichten.com/](http://www.vdi-nachrichten.com/)  
Der-Shop-im-Ueberblick**



**Täglich aktualisiert:  
Neuerscheinungen  
VDI-Schriftenreihen**



Im Buchshop von [vdi-nachrichten.com](http://vdi-nachrichten.com) finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

**VDI-Berichte** und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

**Fortschritt-Berichte VDI:**

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

**Newsletter „Neuerscheinungen“:**

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

**Autoren-Service:**

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

**Buch- und Medien-Service:**

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

## Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
  - 2 Fertigungstechnik
  - 3 Verfahrenstechnik
  - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
  - 6 Energietechnik
  - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
  - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
  - 10 Informatik/Kommunikation
  - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
  - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
  - 15 Umwelttechnik
  - 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
  - 21 Elektrotechnik
  - 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-343401-5