

Systemvergleich zwischen magnetisch erregten und piezoerregten Schwingförderern

System Comparison between Magnetically Excited and Energized Piezo-vibrating Feeders

Marc Dieckerhoff*
Christian Prasse*
Michael ten Hompel**

* Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Germany

** Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund, Germany

Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit von förder-technischen Anlagen sind in den vergangenen Jahren immer mehr in den Fokus der Betreiber und Hersteller gerückt. Im Rahmen einer Untersuchung am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML wurden diese beiden Aspekte an magnetisch erregten und piezoerregten Schwingförderern untersucht. Ein Systemvergleich stellt dabei die wesentlichen Vor- und Nachteile der jeweiligen Antriebsart dar und unterstützt sowohl bei der Auswahl als auch bei der Optimierung von Transportsystemen im logistischen Umfeld.

[Schlüsselwörter: Piezo, Schwingförderer, Energieeffizienz]

During the last years energy efficiency and effectiveness of conveying systems attract reasonable notice to producers and users. Within the scope of a system comparison between magnetically excited and energized piezo-vibrating conveyors these aspects were investigated at Fraunhofer Institute for Material flow and Logistics IML. Results are the main advantages and drawbacks of each type of drive. Concerning the system design and optimization these results assists to find a solution which meets the given requirements within a logistical field of application.

[Keywords: Piezo, swing conveyor, energy efficiency]

1 EINLEITUNG

Automatisierte Abläufe sind charakterisierende Kennzeichen einer modernen Produktionslogistik. Für einen großen Bereich der Industrie sind dabei Förder-techniken für Schüttgüter, wie Band- und Rinnenförderer verbindendes Element zwischen den einzelnen Produktionsschritten. Obwohl die Transporte nicht wertschöpfend und die Energieverbräuche hierfür im Vergleich zu den fertigungstechnischen Bedarfen gering sind, ist es dennoch sinnvoll energieeffiziente Technik einzusetzen.

Neben den Energieverbräuchen sind die Zuverlässigkeit, die Wartungsfreundlichkeit und nicht zuletzt der Preis ausschlaggebend für das Systemdesign. Dabei kann eine intelligente Konstruktion und Dimensionierung helfen den Energieverbrauch zu reduzieren [Jah10]. Darüber hinaus gilt es festzustellen, ob der Einsatz neuer oder alternativer Technologien, wie beispielsweise die Piezotechnik, die genannten Kriterien besser erfüllt.

Zu diesem Zweck wurde ein Systemvergleich zwischen magnetisch erregten und piezoerregten Schwingförderern für den Transport von Schüttgütern durchgeführt. Üblicherweise erfolgt der Einsatz von piezoerregten Förderern nur zur Zuführung von kleinen Teilen an Montagemaschinen oder -linien. Im Rahmen einer Untersuchung galt es zu zeigen, inwiefern sich diese Technik auch für klassische Transportaufgaben von Schüttgütern, wie sie beispielsweise in der Lebensmittelindustrie vorkommen, eignet. Auf Basis einer multikriteriellen Bewertung konnten die wesentlichen Vor- und Nachteile der jeweiligen Antriebsart erarbeitet werden.

Zunächst wird der Stand der Technik präsentiert, anschließend werden in Kapitel 3 die Bewegungsmodelle der Schwingförderer mathematisch beschrieben. Nach der Vorstellung der zu vergleichenden Antriebsarten in Kapitel 4 erfolgt im Rahmen von Kapitel 5 die ausführliche Darstellung des Systemvergleichs sowie die Diskussion der erzielten Ergebnisse. Abschließend werden in Kapitel 6 die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf noch zu beantwortende Fragestellungen gegeben.

2 STAND DER TECHNIK

Im Folgenden wird zunächst eine Auswahl von bestehenden Arbeiten aus dem Themengebiet der Optimierung von Fördertechnik vorgestellt, um dann speziell auf die Rinnenfördertechnik einzugehen.

2.1 OPTIMIERUNG VON FÖRDERTECHNIK

Zum Themenkreis der Optimierung von Förder-technik sind in der Literatur zahlreiche Beiträge vorhanden. Daher werden an dieser Stelle nur ausgewählte Veröffentlichungen im Kontext der Fragestellung dieses Papers vorgestellt.

Grundsätzlich können bei der Optimierung von förder-technischen Gewerken in Bezug auf die Energieeffizienz zwei Ansätze unterschieden werden. Zum einen können die technischen Komponenten hinsichtlich anforderungsgerechter Dimensionierung, Vermeidung von Reibung und Temperaturentwicklung etc. optimiert werden. Andererseits liegen wesentliche Potenziale in der Betriebsstrategie und in der Überwachung der Gesamtsysteme. In [PKG2011] wird ein Konzept zur Energieeffizienzmessung von intralogistischen Förder-techniken wie Band- und Rollenförderern beschrieben, das die Basis zur Ableitung neuer Steuerungsstrategien bildet. [ZT11; PL11a] stellen eine Geschwindigkeitssteuerung von Bandförderern zur Versorgung eines Kohlekraftwerkes vor, mit der sich Energieeinsparungen von 20% realisieren lassen. Über ein Monitoringsystem, beispielsweise zum Erkennen fehlerhaft arbeitender Stützrollen bei Bandförderern mit Hilfe von RFID [PL11b], können frühzeitig Störungen detektiert werden, sodass es nicht zu einem Systemausfall kommt. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 696 „Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen - Logistics on Demand“ wurden zudem zahlreiche neue Erkenntnisse im Bereich der Auslegung, der Instandhaltung, des Monitorings, dem Einsatz von neuen Werkstofftechniken etc. erarbeitet [SFB696].

In diesem Paper wird ein Vergleich der Leistungsaufnahme der Antriebssysteme mit der Gesamtleistungsaufnahme der betrachteten Förderer beschrieben. Der Fokus liegt hier also nicht nur auf der energieeffizienten Auslegung der Förder-technikkomponente oder der Optimierung der Betriebsstrategie des Fördersystems sondern vielmehr auf der Auswahl des energieeffizienteren physikalischen Wirkprinzips. Insbesondere messtechnisch wird aber auf die bereits erarbeiteten Ergebnisse und Verfahren zurückgegriffen.

2.2 SCHWINGFÖRDERER

Schwingförderer sind aufgeständerte Stetigförderer, die eine oszillierende Bewegung ausführen. Sie dienen zur waagerechten, schwach geneigten oder senkrechten Beförderung von Gütern, wobei das Gut durch Massenkräfte bewegt wird. Sie sind in fast allen Industriezweigen verbreitet und dienen dort vor allem zur Beförderung von nicht klebenden oder backenden Schüttgütern oder kleinen Einzelteilen (Stückgut) [JS00; DIN94a; VDI65]. Bei den Schwingförderern sind grundsätzlich die zwei Hauptgruppen Schüttelrutschen und Schwingrinnen zu unterscheiden [DIN94a; VDI65]. Beide Ausführungsfor-

men haben eine periodische hin und her gehende Bewegung des Fördermittels in Förderrichtung gemein. Bei Schwingrinnen überschreiten die senkrechten Rinnenbeschleunigungen den Wert der negativen Fallbeschleunigung. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Fördermitteln, da die vertikalen Beschleunigungen bei den Schüttelrutschen stets kleiner als die negative Fallbeschleunigung bleiben. Es ergibt sich somit bei beiden Ausführungsformen ein unterschiedlicher Fördervorgang [VDI65]. Kennzeichnend für den Fördervorgang ist die Gutbewegung, die mit Hilfe der Wurfkennzahl Γ beschrieben wird. Die Wurfkennzahl gibt das Verhältnis der maximalen negativen Vertikalkomponente der Rinnenbeschleunigung zur Fallbeschleunigung an, wodurch im Allgemeinen zwischen $\Gamma \leq 1$ (Schüttelrutschen) und $\Gamma \geq 1$ (Schwingrinnen) unterschieden werden kann [Böt57; MRW04].

2.2.1 SCHÜTTELRUTSCHEN

Bei Schüttelrutschen erfolgt der Antrieb in der Regel über Druckluftkolbenmotoren oder Schubkurbelantriebe (vgl. Abbildung 1). Ebenso ist es möglich diese Förderer mit Kurvenscheiben- oder Ellipsenradgetrieben, rotierenden Unwuchten oder elektromagnetischen Schwingantrieben zu betreiben. Schüttelrutschen werden durch diese Antriebe in eine Bewegung mit kleiner Hingangs- und so großer Rückgangsbeschleunigung versetzt, dass beim Rückgang die Massenkraft größer als die Reibungskraft zwischen Rutschenboden und Gut ist. Beim Rinnenhingang wird das Fördergut zunächst durch Reibschluss mit der vorwärts gehenden Rinne mitbewegt. Nach Aufhebung des Reibschlusses gleitet das Fördergut durch die Massenkräfte weiter, während sich die Rinne bereits zurück bewegt. Schüttelrutschen arbeiten überwiegend nach dem Gleitverfahren ($\Gamma \leq 1$).

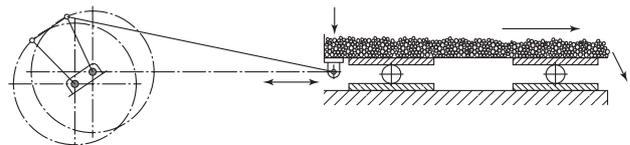


Abbildung 1. Schematische Darstellung einer Schüttelrutsche (nach [Mar09, Bild 5.55]).

2.2.2 SCHWINGRINNEN

Im Bereich der Schwingrinnen haben sich verschiedene Ausführungsformen entwickelt, die im Wesentlichen durch ihre Antriebsformen unterschieden werden können. Hauptsächlich lässt sich zwischen Schwingrinnen mit Schubkurbelantrieb, rotierenden Unwuchten sowie elektromagnetischem Vibrator differenzieren. Schwingrinnen arbeiten vorwiegend nach dem (Mikro-) Wurfverfahren ($\Gamma \geq 1$). Die Rinne wird in Förderrichtung nach vorn aufwärts und zurück abwärts bewegt. Beim Rinnenrücklauf (Abwärtsbewegung) wird die Vertikalbeschleunigung der Rinne größer als die Fallbeschleunigung, wodurch sich das Fördergut von der Rinne abhebt. Es wird somit nach

der ersten Phase der Schwingbewegung von der Schwingrinne in Transportrichtung geworfen. Daher kommt bei den Schwingrinnen zu der bei Schüttelrutschen vorliegenden Gleitbewegung noch eine Wurfbewegung des Fördergutes hinzu.

Schwingrinnen setzen sich im Wesentlichen aus der federnd abgestützten Rinne und dem Antriebssystem zusammen. Die Rinnen werden über Gummi-, Schrauben- oder Blattfedern gegen das Fundament oder einen schwingungs isoliert aufgestellten Gegenschwingrahmen abgestützt. Eine Aufhängung ist ebenfalls möglich sowie die Verwendung von Speicherfedern. Schwingungstechnisch lässt sich noch zwischen Ein- und Zweimassensystemen unterscheiden. Bei Schwingrinnen mit Schubkurbelantrieb wird die Erregerkraft von einer getrennt von der Rinne aufgestellten Kurbel- oder Exzenterwelle über eine Schubstange aufgebracht. Wuchtmassenantriebe erzeugen die Schwingungen durch die Fliehkräfte rotierender Unwuchtscheiben. Elektromagnetisch angetriebene Schwingrinnen bestehen aus einem fest mit der Rinne verbundenen Anker eines Elektromagneten und einer Freimasse, die sich über vorgespannte Schrauben- oder Blattfedern gegen die Rinne als zweite Masse abstützt. Die Erregerkraft wird durch den Elektromagneten aufgebracht, der durch Anschluss an eine Wechselspannung pulsierende Zugkräfte erzeugt [MRW04, Mar09, VD165].

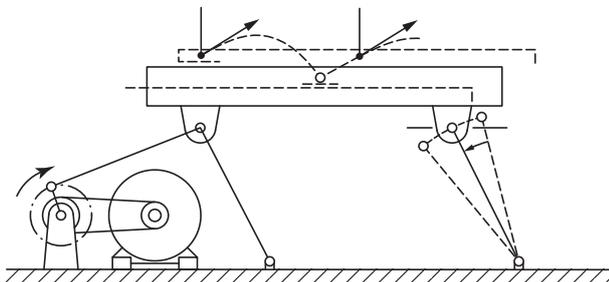


Abbildung 2. Schwingrinne mit Schubkurbelantrieb (nach [Mar09, Bild 5.59])

3 MATHEMATISCHER HINTERGRUND

Die Detailbetrachtung des Förderprozesses setzt eine geeignete, allgemeine Theorie des Bewegungsablaufes von Fördergut und -rinne voraus, um den Bewegungsablauf des Fördergutes mathematisch abzubilden und berechenbar zu machen. Die Bewegungsverhältnisse des Fördergutes lassen sich entsprechend der in Kapitel 2.2.2 erläuterten Arbeitsweise der Schwingrinnen (Wurfverfahren) in verschiedene Phasen einteilen. Das von der Rinnenoberfläche abgeworfene Fördergut befindet sich zunächst in einer Flugphase, bevor es wieder mit der Rinne in Kontakt kommt. Die Geschwindigkeit des Fördergutes wird demnach in dieser Stoßphase momentan verändert. An die Stoßphase schließt sich eine Berührphase an, in der sich das Fördergut in Kontakt mit der Rinne befindet. Für ein vereinfachtes, mechanisches Modell der Rinne

und des Gutes lässt sich, wie in Abbildung 3 gezeigt, zunächst ein Koordinatensystem zur Beschreibung der Rinnen- und Gutbewegung definieren. Eine mögliche Neigung der Förderrinne gegenüber der Horizontalen wird vernachlässigt. Die x -Koordinate zeigt in Förderrichtung und die y -Koordinate in Richtung der Flächennormalen der Rinnenoberfläche. Die Richtung s bezeichnet die Schwingungsrichtung bzw. die Wirkungslinie des Antriebes. Die Indizes R und G stehen für die Rinne bzw. das Fördergut. Die Bewegung schüttgutförmigen Fördergutes auf einer schwingenden Oberfläche kann für eine mathematische Berechnung auf die Betrachtung eines einzelnen Massenpunktes begrenzt und dadurch vereinfacht werden. Abbildung 4 zeigt das mechanische Ersatzsystem für Fördergut und Rinne [Böt57; Weh61; Ste80].

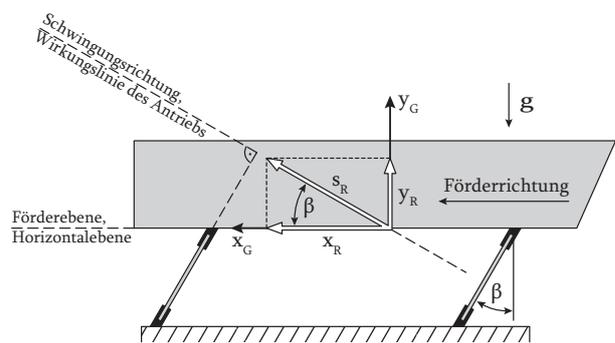


Abbildung 3. Definition des Koordinatensystems, nach [Ste80, Bild 2]

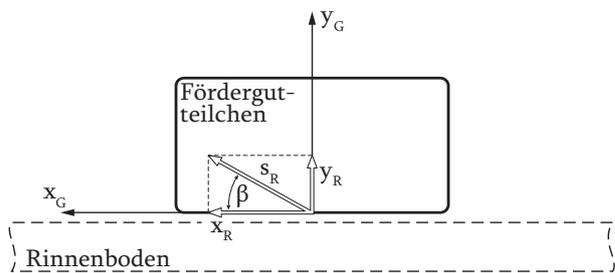


Abbildung 4. Mechanisches Ersatzsystem für Fördergut und Rinne, nach [Ste80, Bild 2]

Die getroffenen Annahmen sowie der Aufbau des mathematischen Modells folgen im Wesentlichen der Arbeit von Steinbrück [Ste80; Böt57]:

- Das Fördergut bewegt sich als fester Körper und wird als ein Massenpunkt angesehen,
- die Stoßphase wird als reibungsbehafteter, plastischer Stoß angesehen,
- es wird von einem schrägen Wurf im luftleeren Raum ausgegangen und
- für die Rinnenbewegung wird eine im Zeitverlauf harmonische, sinusförmige Bewegung angenommen.

Eine wichtige Kenngröße für Schwingförderer stellt die Wurfkennzahl Γ dar. Sie beschreibt das Verhältnis der maximalen negativen Vertikalbeschleunigung $\ddot{y}_{R,max}$ der Rinne zur Fallbeschleunigung g [Böt57]. Nach den Grundgleichungen der Mechanik ergibt sich, bei dem Sonderfall einer periodischen, harmonischen Schwingung, der Rinnenweg zu [Bal09]:

$$s_R(t) = r \cdot \cos(\omega t - \phi)$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$, dem Nullphasenwinkel θ und der Rinnenwegamplitude r . Die ersten beiden Zeitableitungen führen zur Rinnengeschwindigkeit bzw. -beschleunigung:

$$v_R(t) = \dot{s}_R(t) = -r \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

$$a_R(t) = \ddot{s}_R(t) = -r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t - \phi)$$

Unter Berücksichtigung des Anstellwinkels β lässt sich hiermit die Rinnenbewegung in horizontaler und vertikaler Richtung beschreiben. Die Wurfkennzahl ergibt sich dann mit der maximalen, negativen Vertikalbeschleunigung der Rinne $\ddot{y}_{R,max}$ und $\cos(\omega t - \phi) = 1$ zu:

$$\Gamma = \frac{\ddot{y}_{R,max}}{-g} = \frac{-r \cdot \omega \cdot \sin \beta}{-g} = \frac{r \cdot 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot \sin \beta}{g}$$

Schwingrinnen arbeiten vorwiegend in einem Wurfkennzahlbereich von $1 \leq \Gamma \leq 3,3$. Die mathematische Betrachtung beschränkt sich daher auf diesen, als ersten Einzelsprungbereich bezeichneten, Bereich. Innerhalb dieses Bereiches befindet sich das Fördergut nach dem Abwurf nur während der ersten Schwingungsperiode in der Luft, bevor es wieder auf der Rinnenoberfläche aufkommt. Mit Hilfe der horizontalen und vertikalen Bewegungsgleichungen von Fördergut und Rinne lassen sich Fördergut- und Rinnen-Zeit-Verläufe bestimmen. Die Fördergutbewegungen unterscheiden sich bei verschiedenen Schwingförderern mit unterschiedlichen Eingangsvariablen vor allem in horizontaler Richtung. Nach [Ste80] lassen sich zehn verschiedenartige Verläufe für die horizontale Gutbewegung (Bewegungsformen) theoretisch nachweisen. Für diese zehn Bewegungsformen können sich entsprechende Bewegungsgleichungen für die einzelnen Bewegungsphasen aufstellen werden. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 5 die *Bewegungsform II* gezeigt, welche eine übersichtliche Darstellung der einzelnen Bewegungsphasen sowie deren charakteristische Zeitpunkte bietet. Diese Bewegungsform umfasst sämtliche grundsätzlich möglichen Bewegungsphasen. Andere Bewegungsformen unterscheiden sich lediglich dadurch, dass einige der Bewegungsphasen innerhalb der Berührphase entfallen [Ste80; Mar09].

4 BETRACHTETE ANTRIEBSSYSTEME

Im Rahmen dieses Kapitels werden die verwendeten Antriebssysteme der elektromagnetischen Anregung und Piezo-Feder-Antriebe erläutert.

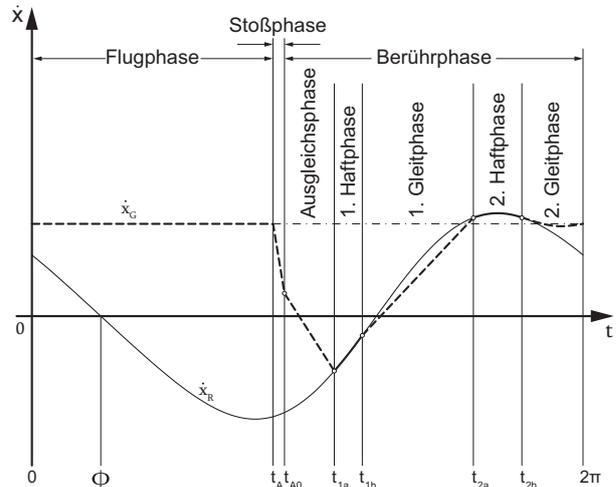


Abbildung 5. Phasen der horizontalen Gut- und Rinnenbewegung (Bewegungsform II), nach [Ste80, Bild 4]

4.1.1 ELEKTROMAGNETISCHE ERREGUNG

Eines der am häufigsten eingesetzten Antriebssysteme für Schwingrinnen stellen die Elektromagnetvibratoren dar. Abbildung 6 stellt vereinfacht eine Schwingrinne mit einem elektromagnetischen Antrieb dar. Zu erkennen sind der Anker A , die Freimasse m_F , die Nutzmasse m_N und der erforderliche Luftspalt s [Mar09; VDI65].

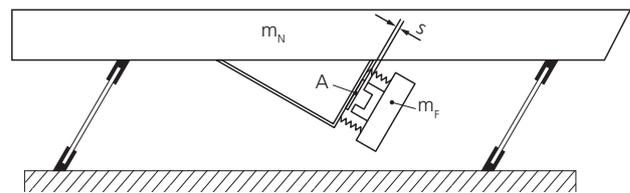


Abbildung 6. Schwingrinne mit elektromagnetischem Antrieb (nach [Mar09, Bild 5.64])

4.1.2 FEDER-PIEZO-ANTRIEBE

Bei den meisten Antriebssystemen für Schwingförderer sind die Rinnen federnd abgestützt und die Erregerkraft wird von einem Antriebssystem aufgebracht. Piezoelektrische Antriebe sind ein Sonderfall, da sie die Funktionen Abstützen und Aufbringung der Erregerkraft vereinen. Derart angetriebene Schwingrinnen bestehen im Wesentlichen aus fest mit der Rinne verbundenen aktiven Biegeelementen (piezoelektrische Wandler), die wiederum fest mit einer Grundplatte oder Unterkonstruktion verbunden sind. Abbildung 7 zeigt eine skizzenhafte Darstellung einer Schwingrinne mit einem piezoelektrischen Antrieb. Die aktiven Biegeelemente bestehen im Wesent-

lichen aus einer Trägerplatte sowie auf der Trägerplatte angebrachten Platten aus einem piezoelektrischen Keramikmaterial. Die Trägerplatten bestehen zumeist aus einem federnden Kunststoff oder Faserverbundwerkstoff. Durch Anschluss der Biegeelemente an einer Wechselspannung beginnen diese, aufgrund des inversen piezoelektrischen Effekts, mit der Frequenz der Wechselspannung zu schwingen bzw. zu vibrieren und erzeugen somit eine pulsierende Erregerkraft [HMS07].

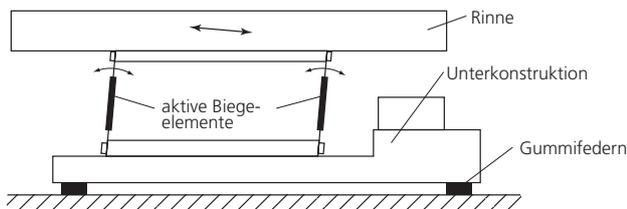


Abbildung 7. Skizze einer Schwingrinne mit piezoelektrischem Antrieb

5 SYSTEMVERGLEICH

In diesem Kapitel erfolgt der Systemvergleich zwischen einem elektromagnetisch erregten und einem piezoerregten Schwingförderer. In einem ersten Schritt werden die beiden Vergleichsförderer vorgestellt. Anschließend erfolgen die Beschreibung der Versuchsplanung sowie die Darstellung der durchgeführten Versuche. Abschließend werden die Ergebnisse des Systemvergleiches herausgestellt.

5.1 VERGLEICHSFÖRDERER

Die beiden Vergleichsförderer stellen sich wie folgt dar. Der elektromagnetisch erregte Schwingförderer gehört zu einer Kartoffelchips-Produktionslinie eines lebensmittelproduzierenden Unternehmens. Der in Abbildung 8 gezeigte Funktionsbereich befindet sich zwischen zwei Produktionsbereichen und dient der Zuführung und Pufferung des Produktes. Der grundsätzliche Aufbau des Förderers sowie die Förderrichtung ist in Abbildung 8 ebenfalls zu erkennen.

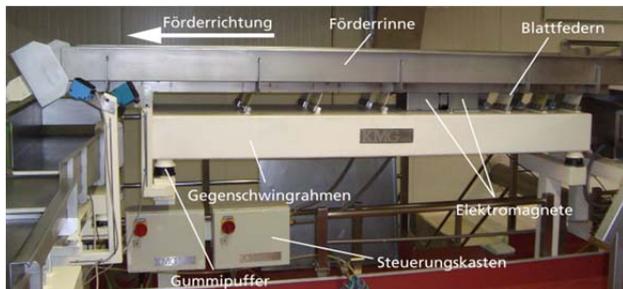


Abbildung 8. Der magnetisch erregte Schwingförderer

Die Förderrinne besitzt eine Länge von 3.100 mm, eine Breite von 600 mm, eine Höhe von 150 mm und ist über 14 Blattfedern aus einem Faserverbundwerkstoff auf einem Gegenschwingrahmen gelagert. Das Antriebssystem

des Förderers besteht aus zwei spiegelbildlich angeordneten Elektromagneten. Diese Elektromagnete sind fest mit dem Gegenschwingrahmen verbunden und werden mit Hilfe eines Frequenzsteuergerätes betrieben. Die für den Betrieb des Förderers benötigte Freimasse ist fest mit der Förderrinne verbunden, wie in Abbildung 9 zu erkennen ist.

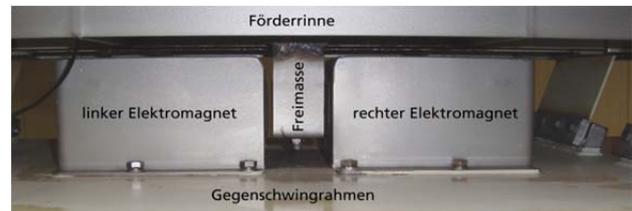


Abbildung 9. Detailansicht der Elektromagnete

Der piezoerregte Schwingförderer ist ein Versuchsobjekt und wurde eigens für den hier behandelten Systemvergleich entworfen und gebaut. Das Antriebssystem des Förderers besteht aus piezoerregten, aktiven Federelementen, sogenannten PKF-Elementen (PKF = Piezo-Keramische-Federn). Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung des piezoerregten Schwingförderers.

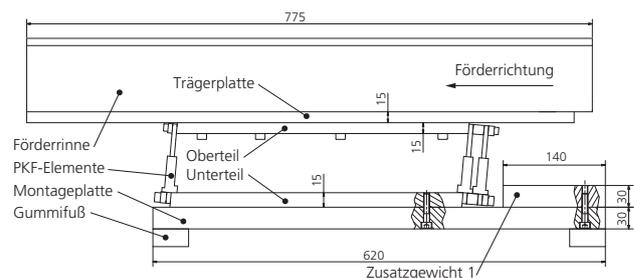


Abbildung 10. Konzeption des piezoerregten Schwingförderers

Die Förderrinne besitzt eine Länge von 775 mm, eine Breite von 400 mm, eine Höhe von 100 mm und ist über neun PKF-Elemente auf dem Gegenschwingrahmen federnd gelagert. Neben den mechanischen Komponenten werden noch ein Frequenzsteuergerät, ein Sicherungskasten sowie ein Netzentstörfilter für den Betrieb des Förderers benötigt (vgl. Abbildung 11). Die für den Betrieb des Förderers benötigten PKF-Elemente sind in Abbildung 12 im eingebauten Zustand dargestellt.

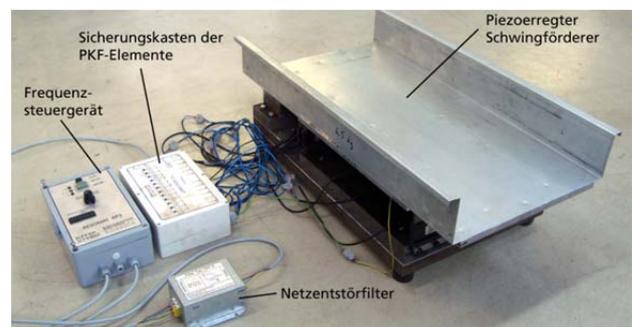


Abbildung 11. Der piezoerregte Vibrationsförderer



Abbildung 12. Eingebaute piezoelegte, aktive Federelemente (PKF-Elemente)

5.2 STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG

Während bei einer herkömmlichen *statistischen Versuchsplanung (DoE)* ein System mit seinen Eingangsgrößen und Ergebnissen oder Zielgrößen untersucht wird, wird in diesem Paper ein Vergleich zweier Systeme durchgeführt [SvH10]. Das methodische Vorgehen der statistischen Versuchsplanung wird allerdings zur Planung und Auswertung der Versuchsreihen genutzt. Die Durchführung eines DoE gliedert sich im Wesentlichen in drei Phasen, die in Abbildung 13 dargestellt sind.

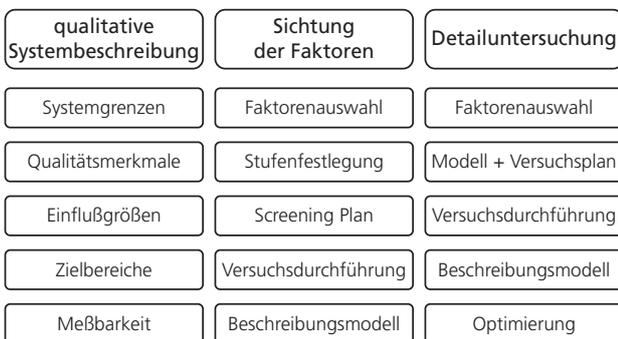


Abbildung 13. Schematische Darstellung des Ablaufes eines DoE nach [SvH10, Abb. 11.1]

In der ersten Phase - *Qualitative Systembeschreibung* - werden eine Systemgrenze sowie die bestimmen Qualitätsmerkmale für beide Systeme gemeinsam festgelegt. Eine weitere wichtige Aufgabe in der ersten Phase besteht in der Bestimmung von Einfluss- und Störgrößen, der Herausstellung von Zielbereichen sowie der Untersuchung der Messbarkeit dieser Größen [SvH10]. Die zweite Phase - *Sichtung der Faktoren* - unterscheidet sich für den Systemvergleich der beiden Förderer in ihrem Aufbau vom klassischen Ablauf eines DoE. Eine wesentliche Aufgabe dieser Phase besteht, beim klassischen DoE sowie auch bei dem in diesem Paper angestellten Systemvergleich, in der Bestimmung der zu untersuchenden *Faktoren*. Hierzu werden zunächst die möglichen Einflussgrößen (*Parameter*) des Systems herausgearbeitet. Anschließend werden die das System beeinflussenden

signifikanten Faktoren herausgestellt und auf Vollständigkeit überprüft [SvH10]. Die Auswahl der zu untersuchenden Parameter für den angestrebten Vergleich der beiden Förderer erfolgt hier im Gegensatz zum klassischen Vorgehen zielgerichtet. Hierbei stehen die, die *Industrietauglichkeit* betreffenden Unterschiede der Förderer, im Vordergrund. Eine Auswahl zu untersuchender Faktoren erfolgt aus den Parametern, die die folgenden Qualitätskategorien direkt oder indirekt betreffen:

- Energieeffizienz
- Fördereigenschaften
- Wartung und Instandhaltung

Die dritte Phase - *Detailuntersuchung* - weicht, wie die zweite Phase, für den Vergleich der beiden Förderer vom klassischen Vorgehen des DoE ab. Da einer der beiden betrachteten Förderer in der laufenden Produktion eingesetzt wird, kann eine Variation (Stufenbildung) nicht erfolgen [SvH10]. Die eingestellten Werte der Faktoren müssen demnach bei beiden Systemen als feste Größen angesehen werden. Ein Vergleich kann daher nur entsprechend möglicher Fragestellungen bezüglich der Erreichung der Zielbereiche, der Qualitätsmerkmale und der wesentlichen Systemunterschiede zwischen den Förderern geschehen. Hierzu müssen geeignete Versuche bzw. Detailbetrachtungen durchgeführt werden, die eine Vergleichbarkeit der eingestellten Größen der zu untersuchenden Faktoren der Förderer gewährleisten. Der in Abbildung 13 dargestellte Aufbau des DoE kann dem spezifischen Fall des Vergleichs der beiden Förderer angepasst werden. Der dieser Arbeit zugrunde liegende Ablaufplan ist in Abbildung 14 dargestellt. Hierin lassen sich die Unterschiede zum klassischen Ablauf eines DoE, wie in Abbildung 13 dargestellt, vor allem in der zweiten Phase erkennen.

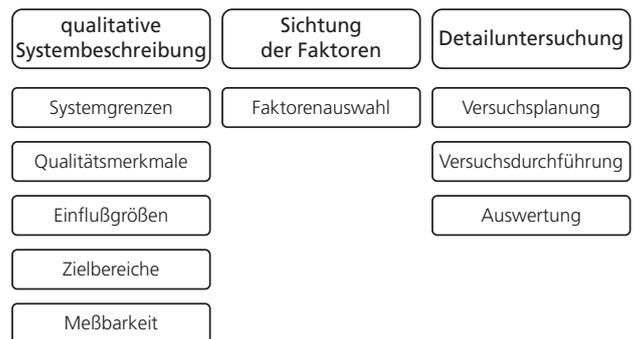


Abbildung 14. Ablaufplan des Vergleiches der beiden betrachteten Förderer

5.2.1 QUALITATIVE SYSTEMBESCHREIBUNG

Die qualitative Systembeschreibung beginnt mit der Definition einer gemeinsamen Systemgrenze für die beiden betrachteten Förderer. Aus dem Aufbau und der

Arbeitsweise beider Systeme lassen sich mit dem *Förderer*, dem *Fördergut* und der *Steuerung* drei Hauptelemente ableiten. Diese bilden ein System, aus dem ein Parameterdiagramm (vgl. Abbildung 15) aufgestellt werden kann [SvH10]. Dieses Diagramm beinhaltet alle das System betreffenden Einflussgrößen, Störgrößen, Qualitätsmerkmale sowie unerwünschte Ergebnisse (*error states*). Die Einflussgrößen teilen sich hierbei noch in Signal- und Steuergrößen auf. In einem nächsten Schritt wird nun die *Messbarkeit* der identifizierten Qualitätsmerkmale

- erreichter Durchsatz
- geringe Leistungsaufnahme
- einfache Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen
- minimale Anzahl an Wartungsintervallen

untersucht. Der erreichte Durchsatz kann nicht direkt gemessen werden. Er hängt zum einen von den Abmessungen der Förderrinne im Zusammenhang mit der Förderguthöhe auf der Förderrinne und zum anderen mit der Fördergeschwindigkeit zusammen. Der erreichte Durchsatz kann aber durch Bestimmung der Fördergeschwindigkeit und Ermittlung des Fördergutquerschnittes bestimmt werden. Die Leistungsaufnahme beider Förderer ist ebenfalls eine Größe, die nur indirekt ermittelt werden kann. Ihr liegen Spannung-Zeit- und Strom-Zeit-Verläufe sowie mögliche Phasenverschiebungswinkel zugrunde. Es ist also erforderlich, diese Verläufe sowie den Phasenverschiebungswinkel zu

ermitteln, um daraus die Leistungsaufnahme beider Förderer zu bestimmen. Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen wurden ebenso wie lange Wartungsintervalle in dieser Versuchsreihe nur theoretisch betrachtet.

5.2.2 AUSWAHL DER FAKTOREN

Nachdem im vorherigen Kapitel die Einflussgrößen, Störgrößen, *error states* und Qualitätsmerkmale des Systems (Abbildung 15) herausgestellt wurden, werden nun die Parameter ausgewählt, die für einen Vergleich der beiden Förderer untersucht werden müssen. Die Industrietauglichkeit mit den drei Kategorien Energieeffizienz, Fördereigenschaften und Instandhaltung steht hierbei im Vordergrund.

Die Leistungsaufnahme der Förderer ist von großer Bedeutung für die Industrietauglichkeit, da sie als Stetigförderer im stationären Dauerbetrieb arbeiten. Wie in Kapitel 5.2.1 erläutert, lässt sich die Leistung nicht direkt ermitteln, sie muss über Spannung-Zeit- und Strom-Zeit-Verläufe sowie mögliche Phasenverschiebungswinkel ermittelt werden. Beide Förderer werden mit einer Wechselspannung betrieben, daher müssen bei der Berechnung der Leistung die Schein-, Wirk- und Blindleistung bestimmt werden. Bei der Ermittlung der Leistungsaufnahme ist in erster Linie die gesamte Leistung der Förderer, einschließlich der Steuerung, zu bestimmen. Diese Gesamtleistung entspricht dann der aus dem Versorgungsnetz entnommenen Leistung. Des Weiteren wird aber auch die Leistungsaufnahme der Antriebe unter Vernachlässigung der Steuerungstechnik bestimmt, um die für die Bewegung der Förderrinne benötigte Leistung zu ermitteln. Hierbei

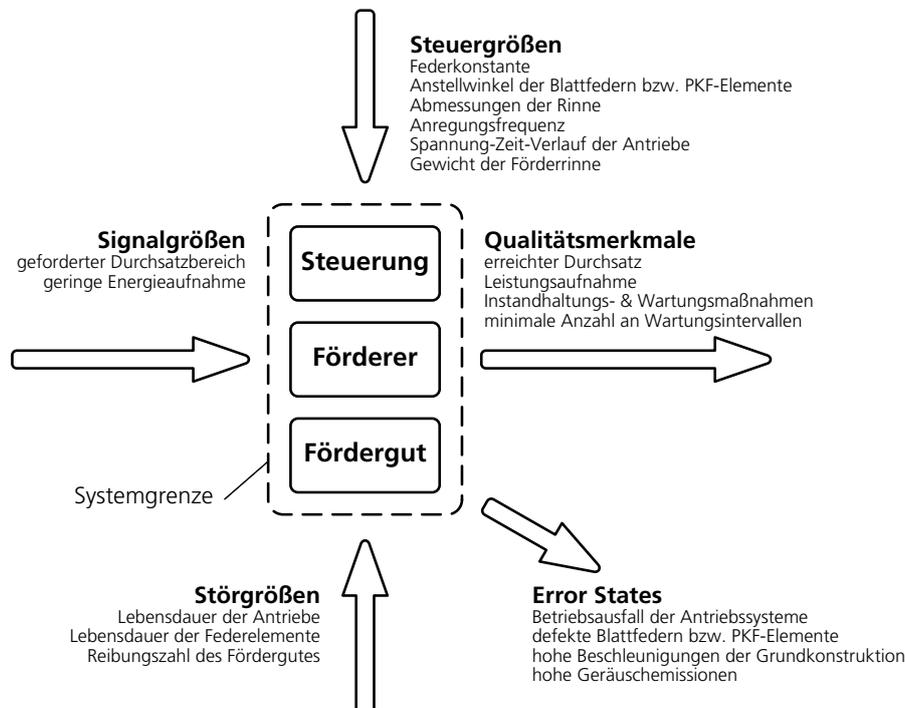


Abbildung 15. Parameterdiagramm

stehen die zugrundeliegenden physikalischen Effekte des Elektromagnetismus sowie der Piezoelektrizität und ihre Nutzbarkeit im Vordergrund. Die Fördereigenschaften beider Systeme werden im Wesentlichen durch den erreichten Durchsatz definiert. Entsprechend Kapitel 5.2.1 lässt sich der Durchsatz durch Bestimmung der Fördergeschwindigkeit sowie der Ermittlung des Fördergutquerschnittes bestimmen. Hierbei ist es möglich, die Fördergeschwindigkeit auf zwei Arten zu bestimmen. Zum einen kann sie durch entsprechende Messmethoden direkt ermittelt werden oder zum anderen indirekt durch die in Kapitel 3 aufgestellte Theorie der Fördergutbewegung. Für eine theoretische Berechnung der Fördergutbewegungen müssen dann der Reibungskoeffizient μ zwischen Fördergut und Rinnenoberfläche, der Anstellwinkel der (Blatt-)Federn β sowie die Anregungsfrequenz f der Förderrinne (vgl. Kapitel 3) bestimmt werden. Eine weitere wichtige Größe in Bezug auf die Fördereigenschaften, insbesondere der Rinnenbewegung, ist die maximale Rinnenbeschleunigung in x-Richtung $\ddot{x}_{R,max}$. Mit Hilfe dieser Größe lässt sich etwa die Rinnenwegamplitude r unter Berücksichtigung des Anstellwinkels β berechnen. Die für den Vergleich der beiden Förderer zu untersuchenden Faktoren liegen fest. In Tabelle 1 sind die ausgewählten Faktoren, geordnet nach ihrer die Industrietauglichkeit betreffenden Kategorie aufgelistet.

Tabelle 1. Auflistung der ausgewählten Faktoren

Energieeffizienz	Spannung-Zeit-Verlauf $u(t)$
	Strom-Zeit-Verlauf $i(t)$
	Phasenverschiebungswinkel φ
Förder-eigenschaften	Fördergeschw. (real, gemessen)
	Fördergeschw. (theoretisch, berechnet)
	Reibungskoeffizient μ
	Anstellwinkel der (Blatt-)Federn β
	Anregungsfrequenz f
	max. Rinnenbeschleunigung $\ddot{x}_{R,max}$
Wartung & Instandhaltung	Maßnahmen (elektromagn. erregter Förderer)
	Maßnahmen (piezoerregter Förderer)

5.2.3 VERSUCHE

In einem ersten Schritt mussten verschiedene Kennwerte beider Förderer ermittelt werden. Hinsichtlich einer vereinfachten Schreibweise werden im Folgenden der piezoerregte Förderer mit *Förderer A* und der magnetisch erregte Förderer mit *Förderer B* bezeichnet. Die Indizes A und B der Formelzeichen folgen dieser Konvention.

In einer Versuchsreihe wurde zunächst der Haftreibungskoeffizient μ der Materialpaarung Kartoffelchip und Edelstahl ermittelt. Der Reibungskoeffizient ergab sich zu:

$$\mu = 0,235.$$

Die Anstellwinkel β der Blattfedern bzw. PKF-Elemente wurden ermittelt zu

$$\beta_A = 5^\circ \quad \text{und} \quad \beta_B = 22^\circ.$$

Die Anregungsfrequenzen f_A und f_B sind wesentliche Bestandteile der theoretischen Betrachtung der Fördergutbewegung. Entscheidend sind jedoch die tatsächlichen Frequenzen der Förderrinnen. Diese wurden mit Hilfe eines Beschleunigungssensors in Verbindung mit einem Speicheroszilloskop wie folgt ermittelt:

$$f_A = 115,5 \text{ Hz} \quad \text{und} \quad f_B = 25 \text{ Hz}$$

Aus den aufgezeichneten Beschleunigungsverläufen wurden zudem die maximalen Rinnenbeschleunigungen beider Förderer ermittelt:

$$\ddot{x}_{max,A} = 27,6 \text{ g} \quad \text{und} \quad \ddot{x}_{max,B} = 6,6 \text{ g}$$

Zur Ermittlung der Leistungsaufnahme müssen die Spannung-Zeit- und Strom-Zeit-Verläufe ($u(t)$, $i(t)$) sowie der Phasenverschiebungswinkel φ bestimmt werden. Beide Förderer werden über das Versorgungsnetz mit einer periodischen, sinusförmigen Wechselspannung betrieben. Beim Strom hingegen sind aufgrund der Steuerungstechnik zu einem großen Teil periodische, nicht sinusförmige Verläufe zu erwarten. Bei Betrachtung der Energieversorgung der Antriebe ohne Beachtung der Steuerungstechnik sind ebenfalls Verläufe mit periodischen, nicht sinusförmigen Wechselgrößen zu erwarten. Es lässt sich daher bei den Verläufen kein einheitlicher Phasenverschiebungswinkel φ angeben und die Schein-, Wirk- und Blindleistung lassen sich somit nicht aus den Effektivwerten der Verläufe von $u(t)$ und $i(t)$ bestimmen. Die Verläufe von Strom und Spannung müssen demnach zumindest über eine Periodenlänge aufgezeichnet und näher untersucht werden. Mit Hilfe einer *Fouriertransformation* können im *Zeitbereich* vorliegende Funktionen in den *Frequenzbereich* umgeformt werden. Durch die Transformation der gegebenen Funktion aus dem *Zeitbereich* in den *Frequenzbereich* ist es möglich die Amplituden der sinus- und cosinusförmigen Funktionen in einem *Frequenzspektrum* darzustellen. Hieraus werden dann die bestimmenden Frequenzen für die Leistungsberechnung ersichtlich [BHW02].

Für die Versuchsreihen hinsichtlich der Spannung- und Strom-Verlaufskurven werden zwei Messpunkte definiert. Der erste Messpunkt befindet sich vor der Steuerungseinheit der Förderer. Dieser Messpunkt wird gewählt, um die gesamte Energieaufnahme der Förderer ermitteln zu können. Der zweite Messpunkt befindet sich direkt vor den Antrieben der Förderer. Für den *Förderer A* werden alle neun PKF-Elemente als geschlossene Einheit aufgefasst. Dies ist möglich, da alle PKF-Elemente gleichzeitig und in die gleiche Richtung angeregt werden.

Bei Förderer B wird aufgrund der gespiegelten Anordnung je eine Messung pro Elektromagnet durchgeführt.

In Abbildung 16 bis Abbildung 19 sind, beispielhaft für diese Messreihe, die Spannungs- und Stromverläufe

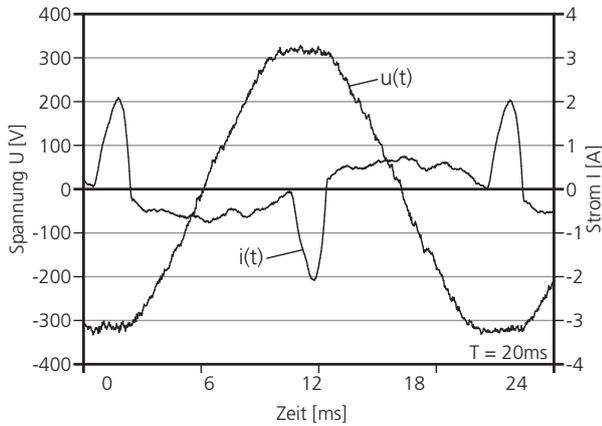


Abbildung 16. Spannung- und Stromverlaufskurven des Förderers A am Messpunkt 1

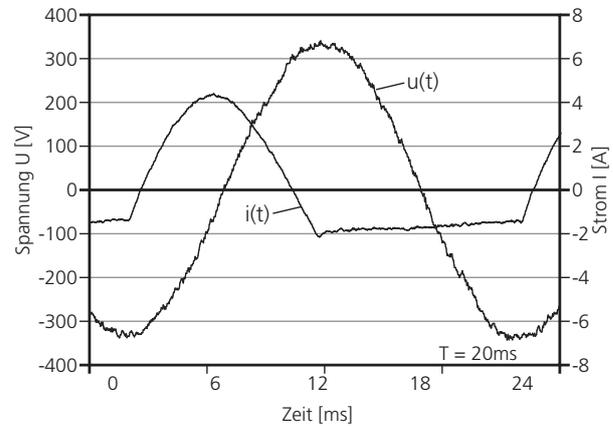


Abbildung 18. Spannung- und Stromverlaufskurven des Förderers B am Messpunkt 1

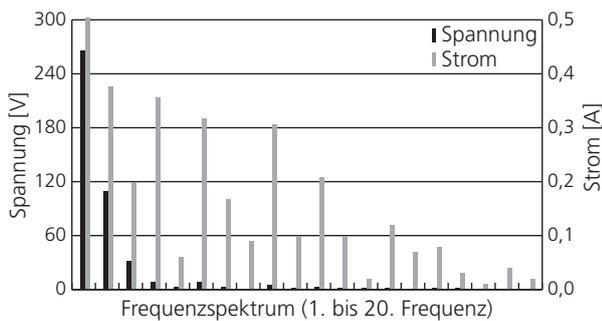


Abbildung 17. Frequenzspektrum des Förderers A am Messpunkt 1

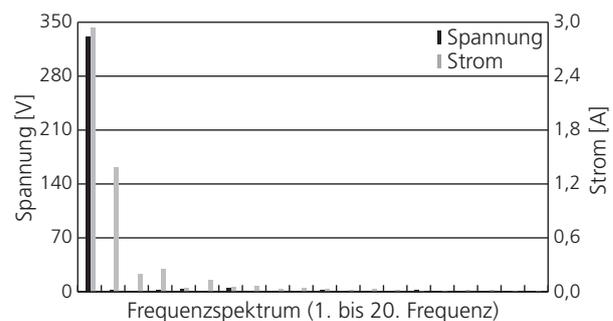


Abbildung 19. Frequenzspektrum des Förderers B am Messpunkt 1

Zur Untersuchung der Fördergutbewegung wurde zunächst die reale Fördergeschwindigkeit der beiden Förderer ermittelt. Da es sich beim Fördergut um ein Lebensmittel handelt, musste die Messung berührungslos erfolgen. Ein Einbringen von Marken oder Ähnlichem war nicht möglich. Eine geeignete Messung konnte durch die Verwendung einer digitalen Videokamera durchgeführt werden. Mit der Kamera wurden Aufnahmen der Fördergutbewegung über mehrere Sekunden gemacht und anschließend die Einzelbilder der Videosequenz ausgewertet. Hierbei wurden einzelne Fördergutteilchen am Bildschirm über eine definierte Strecke verfolgt und die dafür benötigte Zeit bestimmt. Aus diesen Versuchen ergaben sich die Fördergeschwindigkeiten der beiden Förderer zu:

$$v_{A, \text{real}} = 0,26 \text{ m/s} \quad \text{und} \quad v_{B, \text{real}} = 0,29 \text{ m/s}.$$

Um die theoretische Fördergeschwindigkeit zu ermitteln, wurden zunächst die Wurfkennzahlen (s. Kapitel 3) der Förderer ermittelt:

$$\Gamma_A = 2,449 \quad \text{und} \quad \Gamma_B = 2,667$$

Hieraus wurden dann zunächst die entsprechenden Bewegungsformen und im Weiteren die theoretischen Verläufe der Fördergeschwindigkeiten ermittelt.

Bezüglich der notwendigen Maßnahmen im Rahmen der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten wurden die Einzelkomponenten der zu vergleichenden Förderer untersucht. Methodisch wurden hierzu im Falle des piezotriebenen Vibrationsförderers (Förderer A) Versuche im Labor des IML durchgeführt und die PKF-Elemente auf Basis der technischen Dokumentation analysiert. Da sich der magnetisch erregte Förderer im industriellen Betrieb befindet, konnten aufgrund von Befragungen von Mit-

arbeitern der Instandhaltung des Lebensmittelproduzenten die qualitativen Daten ermittelt werden.

5.3 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der in Kapitel 5.2.3 durchgeführten Versuche bzw. Untersuchungen und die Darstellung der Ergebnisse. Es gliedert sich entsprechend der in Kapitel 5.2 aufgestellten, die Industrietauglichkeit betreffenden, Qualitätskategorien.

5.3.1 ENERGIEEFFIZIENZ

Die aufgezeichneten Spannung- und Stromverlaufskurven stellen sich als nicht sinusförmig dar. Insbesondere die Berechnung eines Effektivwertes des Stroms ist bei beiden Förderern nicht möglich, da sich die Stromverlaufskurven generell als nicht sinusförmig darstellen. Im Sinne einer einheitlichen Berechnung werden daher alle Verläufe als periodisch und nicht sinusförmig angenommen.

Eine wichtige Eigenschaft der Fouriertransformation (vgl. Kapitel 5.2.3) drückt das *Parsevalsche Theorem* aus. Es besagt, dass das Integral über das Produkt zweier

Funktionen ($g(t)$, $h(t)$) im Zeitbereich auch durch die Faltung im Frequenzbereich ausgedrückt werden kann [GRS07]. Ist $g(t) = h(t)$, gilt speziell:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g(is)|^2 ds$$

und für den Fall zeitdiskreter Funktionen [BHW02]

$$\sum_{k=0}^{N-1} |c_k|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |y_k|^2$$

Nach dem Parsevalschen Theorem kann daher die Berechnung der Schein-, Wirk- und Blindleistung (S, P, Q) im Frequenzbereich erfolgen.

An dieser Stelle folgen die Zusammenfassung der Auswertungen sowie die entsprechende Darstellung der Leistungsaufnahme beider Förderer. Abbildung 20 stellt die über das gesamte Frequenzspektrum aufsummierten Schein-, Wirk- und Blindleistungen beider Förderer an den Messpunkten 1 und 2 dar. Die Ergebnisse für den Messpunkt 1 stellen hierbei jeweils die für den Betrieb des

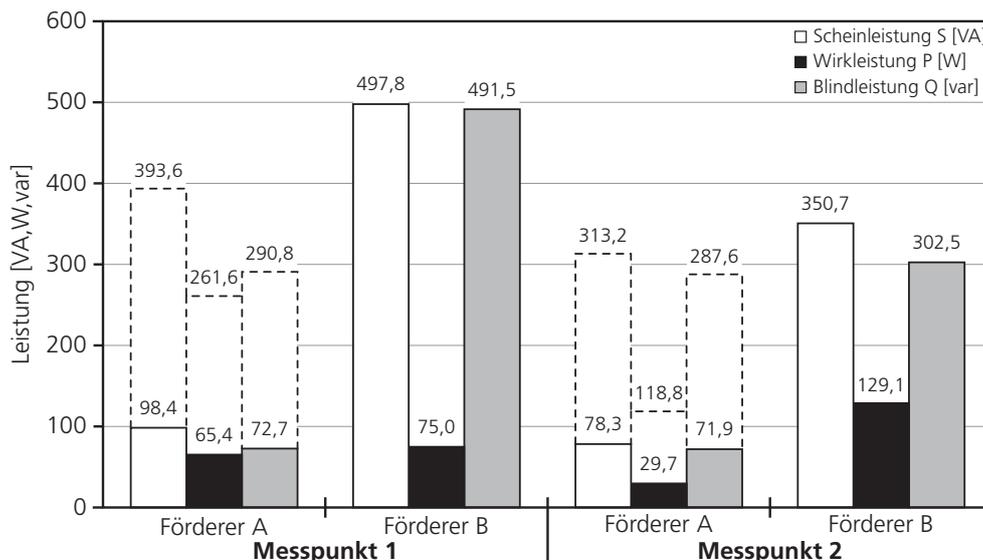


Abbildung 20. Zusammenfassung der Auswertungen für die Messpunkte 1 und 2

Förderers benötigte Leistungsaufnahme dar, da alle elektrotechnischen Komponenten berücksichtigt werden. Die Ergebnisse für den Messpunkt 2 stellen die Leistungsaufnahme der Antriebseinheiten der Förderer dar, unter Vernachlässigung der elektrotechnischen Komponenten.

Zunächst ist aus Abbildung 20 zu entnehmen, dass die von den Förderern im Betrieb aufgenommene Wirkleistung in einem vergleichbaren Bereich liegt (*Förderer A* 65,4 W und *Förderer B* 75,0 W- Faktor 1,15). Es besteht jedoch ein erheblicher Unterschied in der für den Betrieb der Förderer benötigten Blindleistung. Mit 72,7 var für den *Förderer A* und 491,5 var für den

Förderer B liegt hier ein Faktor von 6,76 zwischen den beiden Förderern. Der hohe Anteil der Blindleistung resultiert vermutlich- zu einem großen Teil - aus der induktiven Last der Magneterregung. Der in der Richtlinie DIN 40110-1 definierte Leistungsfaktor λ ergibt sich für die Förderer zu [DIN94b]

$$\lambda_{A1} = \frac{|P_{A1}|}{S_{A1}} = 0,66 \quad \lambda_{B1} = \frac{|P_{B1}|}{S_{B1}} = 0,15$$

Der Leistungsfaktor kann als Bewertungskriterium hinsichtlich der Energieeffizienz verwendet werden. Er kann zwischen 0 und 1 liegen, wobei 1 die größte Effektivität

darstellt. Demnach arbeitet der *Förderer A* 4,4 mal effizienter als *Förderer B*.

Die Ergebnisse am Messpunkt 2 liefern Aussagen zur Energieeffizienz der Antriebssysteme unter Vernachlässigung der elektrotechnischen Komponenten. Abbildung 20 ist zu entnehmen, dass die Antriebe des *Förderers A* 29,7 W und des *Förderers B* 129,1 W im Betrieb aufnehmen. Das vergleichbare Niveau der Wirkleistungen am Messpunkt 1 verschiebt sich am Messpunkt 2 zugunsten des *Förderers A* (Faktor 4,35). Bezüglich der Blindleistung nimmt das Verhältnis auf den Faktor 4,2 ab. Die Leistungsfaktoren am Messpunkt 2 ergeben sich zu

$$\lambda_{A2} = \frac{|P_{A2}|}{S_{A2}} = 0,38 \quad \lambda_{B2} = \frac{|P_{B2}|}{S_{B2}} = 0,37$$

Die Antriebseinheiten der *Förderer* arbeiten demnach etwa gleich effizient.

Um eine eindeutige Vergleichbarkeit der *Förderer* zu erreichen, muss die Länge der Förderrinnen berücksichtigt werden. Die Förderrinne des *Förderers B* ist mit einer Länge von 3.100 mm vier Mal so lang wie die des *Förderers A* (775 mm). Hinsichtlich der Skalierbarkeit des *Förderers A* können im Rahmen dieser Arbeit keine Aussagen getroffen werden. Die Schein-, Wirk- und Blindleistung müssen daher mit dem Faktor 4 multipliziert werden, was einer Kaskadierung des *Förderers A* entspricht. Die resultierenden Werte sind als Balken mit gestrichelter Linie ebenfalls in Abbildung 20 dargestellt. Hinsichtlich der Leistungsfaktoren ergeben sich hierbei keine Änderungen. Durch die Kaskadierung ändert sich das Verhältnis zwischen den Schein-, Wirk- und Blindleistungen an beiden Messpunkten jedoch erheblich. Am Messpunkt 1 liegt ein Faktor von 3,49 zwischen den Wirkleistungen (*Förderer A* 261,6 W und *Förderer B* 75,0 W) und 1,69 zwischen den Scheinleistungen (*Förderer A* 290,8 W und *Förderer B* 491,5 W). Hinsichtlich der Antriebseinheiten ist festzustellen, dass sich die *Förderer* durch die Kaskadierung auf einem vergleichbaren Leistungsniveau befinden. Für die Wirkleistung ergibt sich ein Faktor von 1,09 und für die Blindleistung von 1,05.

Hinsichtlich der Energieeffizienz der Gesamtsysteme ist der *Förderer A* höher zu bewerten als der *Förderer B*, was durch die Leistungsfaktoren am Messpunkt 1 deutlich wird. Allerdings sollte die Energieaufnahme, die durch die Wirkleistung repräsentiert wird, nicht unbeachtet bleiben. Hinsichtlich der Industrietauglichkeit sollte ein Vergleich der Energieaufnahme auf einer vergleichbaren Förderstrecke aufbauen. Für den Vergleich der Energieaufnahme müssen somit die um den Faktor 4 skalierten Werte des *Förderers A* verwendet werden. Hierbei ist festzustellen, dass der *Förderer A* im Betrieb 3,49 mal so viel Wirkleistung aufnimmt wie der *Förderer B*. Werden lediglich die Antriebssysteme beachtet, kann festgestellt werden, dass die Energieeffizienz sowie die Energieaufnahme annähernd vergleichbar sind. Diese Schlussfolgerungen

machen deutlich, dass die Energieeffizienz sowie die Energieaufnahme beider Systeme maßgeblich durch die steuerungstechnischen Komponenten bestimmt werden. Eine Blindleistungskompensation führt hierbei zu einer Verbesserung der Leistungsfaktoren, was einer Verbesserung der Energieeffizienz entspricht.

5.3.2 FÖRDEREIGENSCHAFTEN

In Kapitel 5.2.3 wurden die reale mittlere Fördergeschwindigkeit anhand von Videosequenzen und die theoretische Fördergeschwindigkeit durch Anwendung der entsprechenden Berechnungsformeln für beide *Förderer* ermittelt. Die Analyse der theoretischen Fördergutbewegung ergab, dass die theoretische Fördergeschwindigkeit $\dot{x}_{G(t)}$ maßgeblich durch die Fluggeschwindigkeit des Fördergutes bestimmt wird. Da der Anteil der Gleitphasen marginal ist, kann die Fluggeschwindigkeit als Durchschnittswert der Fördergutgeschwindigkeit verwendet werden. Tabelle 2 fasst noch einmal die ermittelten Geschwindigkeiten zusammen:

Tabelle 2. Übersicht der ermittelten Fördergeschwindigkeiten

	Förderer A	Förderer B
reale mittlere Geschwindigkeit	0,26 m/s	0,29 m/s
Theoretische Geschwindigkeit	0,33 m/s	0,40 m/s

Aus den in Tabelle 2 dargestellten Werten lässt sich erkennen, dass die reale mittlere Geschwindigkeit des *Förderers B* etwa 16% größer ist als die des *Förderers A*. Ein branchenüblicher Durchsatz von 850 kg / h lässt sich bei *Förderer A* mit einer Förderguthöhe von 37,8 mm und bei *Förderer B* mit einer Höhe von 22,2 mm erreichen. Die geringere Förderguthöhe resultiert, neben der höheren Fördergeschwindigkeit, aus der größeren Rinnenbreite des *Förderers B*.

Bei einem Vergleich der theoretischen mit den realen Fördergeschwindigkeiten lässt sich feststellen, dass *Förderer A* 78,8% der theoretisch möglichen Fördergeschwindigkeit erreicht, im Gegensatz zu *Förderer B*, der nur 72,5% erreicht. Der Fördervorgang des *Förderers A* ist, infolge einer kürzeren Berührphase, die aus der unterschiedlichen Bewegungsform resultiert, mit weniger Verlusten behaftet. Des Weiteren resultiert aus der größeren Vertikalbeschleunigung der Förderrinne des *Förderers B* ein stärkeres Abheben des Fördergutes. Diese Feststellung spiegelt sich auch in den ermittelten Wurfkennzahlen ($\Gamma_{piezo} = 2,449$, $\Gamma_{magn} = 2,667$) wieder. Hinsichtlich eines schonenden Guttransportes ist eine höhere Wurfbewegung als negativ zu betrachten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der *Förderer A* zwar eine etwas geringere Fördergeschwindigkeit als der *Förderer B* aufweist, aber hinsichtlich der Fördergutbewegung als effizienter und „gutschonender“ zu bewerten ist.

5.3.3 WARTUNG UND INSTANDHALTUNG

Das für *Förderer A* verwendete Frequenzsteuergerät ist ein Laborgerät und erfüllt daher keine Industrieforderungen. Es muss beim Einsatz des Förderers in einer Industrieumgebung durch ein industrietaugliches Frequenzsteuergerät ersetzt werden. Wird ein solches Gerät verwendet, kann es weitestgehend als wartungsfrei mit einer Lebensdauer über die gesamte Produktlebenszeit angesehen werden.

Die Lebensdauer des *Förderers A* wird maßgeblich durch die PKF-Elemente bestimmt. Diese setzen sich im Wesentlichen aus einer piezoelektrischen Keramik und aus einer Trägerplatte zusammen. Im betrachteten Fall besteht die Trägerplatte aus einem Carbonfaser-Verbundwerkstoff. Bei der Untersuchung der Lebensdauer der PKF-Elemente werden diese beiden Komponenten getrennt voneinander betrachtet. Der zulässige Betriebstemperaturbereich der piezoelektrischen Keramik ist hauptsächlich abhängig von der *Curie-Temperatur*, die von der chemischen Zusammensetzung der Kristalle beeinflusst wird. Die Curie-Temperatur sollte nicht überschritten werden, da der piezoelektrische Effekt oberhalb dieser Temperatur nicht mehr vorhanden ist [HMS07]. In Versuchen des Herstellers sind Betriebstemperaturen von bis zu +120 °C ohne Beeinträchtigungen der Funktionsweise erreicht worden. Mit niedrigen Temperaturen liegen hingegen nur wenige Erfahrungswerte vor. Durch den Hersteller wurden mögliche Betriebstemperaturen von bis zu -10 °C angegeben. Eine Zerstörung der kristallinen Struktur führt zum Ausfall der PKF-Elemente. Hiermit ist nicht die mechanische Zerstörung des gesamten PKF-Elementes gemeint, sondern vielmehr das Eindringen eines Fremdkörpers in die Schutzisolierung. Hinsichtlich der Trägerplatten wurde festgestellt, dass die Trägerplatten eine hohe Federsteifigkeit durch die Verwendung eines Carbonfaser-Verbundwerkstoffes besitzen, die über einen langen Zeitraum unverändert bleibt. Bei anderen in der Industrie eingesetzten Vibrationsförderern mit vergleichbaren PKF-Elementen lassen sich über Anwendungszeiträume mehrerer Jahre (seit 2002) keine merklichen Schwächungen der PKF-Elemente (messbar z. B. durch Vergrößerung der Amplitude) feststellen.

Bezüglich der Untersuchung der Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen für den *Förderer B* konnte ermittelt werden, dass bei den Blattfedern aus einem Faser-verbundwerkstoff im Wesentlichen zwei Fehler auftreten. Zum einen nimmt die Federkonstante im Dauerbetrieb langsam ab und zum anderen kommt es zu Dauerbrüchen bei den Federn. Die Federkonstante wird durch die Kontrolle der Amplitude des Förderers im laufenden Betrieb überprüft. Überschreitet die Amplitude den zulässigen Wert müssen die Blattfedern ausgetauscht werden. Die genannten Fehler sind in ihrer Häufigkeit abhängig von den klimatischen Bedingungen in der Produktionsumgebung (Luftfeuchtigkeit, Temperatur

etc.). Die Austauschzeitpunkte der Blattfedern liegen in der Regel in einem Bereich von 3 - 4 Monaten. Als mögliche Ursache für einen Ausfall des *Förderers B* konnte die Befestigung des Elektromagnetantriebes auf dem Gegenschwingrahmen identifiziert werden. Ein Versagen der Schraubenverbindungen zwischen Elektromagnet und Gegenschwingrahmen kann durch Bruch der Schraube oder Nachlassen der Vorspannkraft erfolgen. Eine daraus resultierende Relativbewegung des Elektromagnetantriebes führt zu einem Ausfall des Förderers. An der als Schweißkonstruktion ausgeführten Förderrinne kommt es an hoch belasteten Schweißnähten (Befestigungspunkte der Federn, der Freimasse, Versteifungsblechen etc.) zu Rissen aufgrund der vorherrschenden Schwingungen. Für das Frequenzsteuergerät des *Förderers B* ergibt sich, analog zum *Förderer A*, eine Lebensdauer über die gesamte Produktlebenszeit.

6 FAZIT

Zusammenfassend wird festgestellt, dass der Ersatz von magnetisch erregten Förderern durch piezoerregte Förderer aus Sicht der Energieeffizienz nur dann sinnvoll ist, wenn die durch die induktiven Lasten der Magnet-erregung verursachte Blindleistung nicht kompensiert werden kann. Andernfalls ist die Schwingungsanregung durch Elektromagnete als energetisch günstiger einzustufen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass der piezoelektrisch angeregte Förderer noch deutliche Optimierungspotenziale beinhaltet. So kann beispielsweise durch eine Massenreduktion der Schwingrinne der Energieeinsatz herab gesetzt werden. Die Detailauswertungen der Mikrowurfbewegung zeigten, dass auch der Vergleichsförderer nicht das technische Optimum bezogen auf das zu fördernde Gut darstellt. Piezoerregte Vibrationsförderer zeichnen sich allerdings, auf Grund der größeren Anzahl gleichartiger Antriebselemente, durch eine höhere Betriebssicherheit aus. Insgesamt weist die vorgestellte Piezotechnik umfangreiche Steuerungsmöglichkeiten auf, die aber für einfache Transportaufgaben, wie in dem Anwendungsfall vorgestellt, ungenutzt bleiben und so ökonomisch nicht zu rechtfertigen sind. In der Sortier- und Dosiertechnik finden piezoerregte Kleinförderer durchaus ihre Berechtigung.

Insbesondere ist durch eine Erhöhung der Betriebsfrequenz sowie -beschleunigung und eine Herabsetzung des Anstellwinkels bei konventionellen magnetisch erregten Förderern eine Verringerung der Wurfkennzahl und somit ein schonenderer Transport und ein reduzierter Verschleiß im Bereich der Blattfedern zu erwarten. Im Hinblick auf einen optimalen Betriebspunkt sollte diese Fragestellung in zukünftigen Arbeiten weiter untersucht werden.

LITERATUR

- [Bal09] Balke, H.: *Einführung in die Technische Mechanik: Kinetik*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – ISBN 3–540–894489
- [BHW02] Burg, K. ; Haf, H. ; Wille, F.: *Höhere Mathematik für Ingenieure - Band III Gewöhnliche Differentialgleichungen, Distributionen, Integraltransformationen*. 4., durchgesehene u. erw. Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2002. – ISBN 3–519–32957–3
- [Böt57] Böttcher, S.: *Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen*, Technische Hochschule Hannover - Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1957
- [DIN94a] DIN15201-1: *Stetigförderer; Benennungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 04 1994
- [DIN94b] DIN40110-1: *Wechselstromgrößen; Zweileiter-Stromkreise*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 03 1994
- [GRS07] Girod, B.; Rabenstein, R.; Stenger, A. K. E.: *Einführung in die Systemtheorie - Signale und Systeme in der Elektrotechnik*. 4., durchgesehene und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: B. G. Teubner/GWV Fachverlage GmbH, 2007
- [HMS07] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. 10. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007. ISBN 978–3–540–71855–0
- [Jah10] Jahn, D.: *Green Logistics - Hype oder Muss*. Green-Logistics-Konferenz 2010, Juni 2010, LOGISTIK HEUTE.
- [JS00] Jünemann, R.; Schmidt, T.: *Materialflusssysteme – Systemtechnische Grundlagen*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2000 – ISBN 3–540–65076–8
- [Mar09] Martin, Heinrich: *Transport- und Lagerlogistik*. 7., erw. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009 (Praxis). – ISBN 978–3–8348–0451–8
- [MRW04] Martin, H.; Römisch, P.; Weidlich, A.: *Materialflusstechnik - Konstruktion und Berechnung von Transport-, Umschlag- und Lagermitteln*. 8., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2004. – ISBN 3–528–74061–2
- [PL11a] Pang, Y.; Lodewijks, G.: Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control. In: *Logistics and Industrial Informatics (LINDI), 2011 3rd IEEE International Symposium on*, 2011, S. 159 -164
- [PL11b] Pang, Y.; Lodewijks, G.: The application of RFID technology in large-scale dry bulk material transport system monitoring. In: *Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2011 IEEE Workshop on*, 2011, S. 1 –5
- [PKG11] Prasse, C.; Kamagaew, A.; Gruber, S.; Kalischewski, K.; Soter, S.; ten Hompel, M.: Survey on energy efficiency measurements in heterogeneous facility logistics systems. In: *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2011 IEEE International Conference on*, S. 1140-1144, 2011
- [SFB696] *Übersicht der Technical Reports*. <http://www.sfb-696.uni-dortmund.de/index.php?id=349>
- [Ste80] Steinbrück, K.: *Zur Fördergutrückwirkung auf Schwingrinnen*, Universität Hannover - Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1980
- [SvH10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-642-05492-1
- [VDI65] VDI2333: *Übersichtsblätter Stetigförderer; Schwingförderer*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1965
- [Weh61] Wehmeier, K.-H.: *Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwingrinnen*, Technische Hochschule Hannover - Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1961
- [ZT11] Zhang, S.; Tang, Y.: Optimal scheduling of belt conveyor systems for energy efficiency; With application in a coal-fired power plant. In: *Control and Decision Conference (CCDC), 2011 Chinese*, 2011, S. 1434 -1439