Energetische Betrachtung bewegter Massen in Förderprozessen
(*Energy-related examination of moved masses in conveying processes*)

Weise, S.[1]; Strobel, J.[1]; Bergmann, A.[1]; Schumann, A.[2]

[1] *TU Chemnitz, Professur Fördertechnik*
[2] *Fa. TriboPlast, Chemnitz*

Abstract

Der immer höher werdende Automatisierungsgrad bei Herstellung und Distribution von Gütern führt dazu, dass auch die Zahl automatisierter Handlings- und Transportbewegungen stark ansteigt. Dies gilt nicht nur für reine industrielle Prozesse. Fast jeder trägt durch seinen privaten Konsum, z. B. durch Bestellungen im Versandhandel, dazu bei. Die jeweils eingesetzten fördertechnischen Anlagen sind zwar häufig seit Jahrzehnten Stand der Technik, waren aber dennoch bereits Ziel von Optimierungsmaßnahmen. Oft ging es dabei um Prozessoptimierung (z. B. hinsichtlich der Durchlaufzeiten oder des Gutstroms) oder Kostenoptimierung (z. B. hinsichtlich der Betriebskosten). Im Rahmen verschiedener Initiativen zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen sind viele Fördersysteme derzeit erneut Ziel von Optimierungsbemühungen, und zwar hinsichtlich ihres jeweiligen Energie- und Ressourcenverbrauches. Dabei liegt der Fokus häufig auf dem Anlagenbetrieb und der Anlagensteuerung. Potenziale der grundlegenden physikalischen Wirkprinzipien der Systeme werden kaum untersucht. Im vorliegenden Beitrag werden deshalb einige wesentliche physikalische Wirkprinzipen in Fördersystemen vorgestellt. Es wird gezeigt werden, welchen Einfluss diese Prinzipien auf die Energieeffizienz ganzer Systeme haben können. Dies bildet die Grundlage zur Diskussion darüber wie die gefundenen Potenziale Eingang in eine energiebezogene Lebenszyklusbetrachtung von Förderanlagen finden können.

The increasing automation level in production and distribution of goods causes a significant increase of the number of automated handling and transportation movements. Indeed, the used conveying systems are commonly the technical state of the

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013.
URN: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067

art for decades. But, nevertheless, they have been objects of improvement measures as well. Up to now, the usual objectives had been the optimization of processes (e. g., in terms of lead times or the flow of materials) or of costs (e. g., regarding the operating costs). Currently, within the scope of various initiatives for increasing energy efficiency in production processes, many conveying systems are again objects of optimization efforts. Here, the focus is often on the operation and the control of the systems. Potentials basing on the underlying physical principles of the systems are rarely investigated. To fill this gap, the paper firstly describes the physical principles of conveyor systems. Afterwards, the possible impacts of these principles on the overall energy efficiency of entire systems will be highlighted. This forms the basis for a subsequent discussion integrating the identified potentials with an energy-related life cycle consideration of conveying systems.

Keywords:

Energieeffizienz, Förderanlagen, physikalische Wirkprinzipien

energy efficiency, conveying systems, physical models

1 Einführung

1.1 Definition und Bedeutung der Fördertechnik

Die technischen Anlagen, Einrichtungen und Konzepte, die eingesetzt werden, um Güter oder auch Personen zu bewegen, werden unter dem Begriff „Transport-technik“ zusammengefasst. Innerhalb dieser Disziplin beschäftigt sich die *Fördertechnik* mit Verfahren und Einrichtungen zur Ortsveränderung von Personen und/oder Gütern über begrenzte Entfernungen. Ergänzend dazu versteht man unter *Verkehrstechnik* eine Ortsveränderung über im Prinzip unbegrenzte Entfernungen auf dem Festland, im Wasser oder in der Luft. [1]

Der Betrachtungsrahmen des vorliegenden Beitrages ist die Fabrik bzw. die Intralogistik. Der Fokus liegt deshalb auf der Fördertechnik. Sie ist ein Wirtschafts-zweig mit großer Bedeutung und gehört seit mehreren Jahren zu den Top-10-Branchen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus. [2]

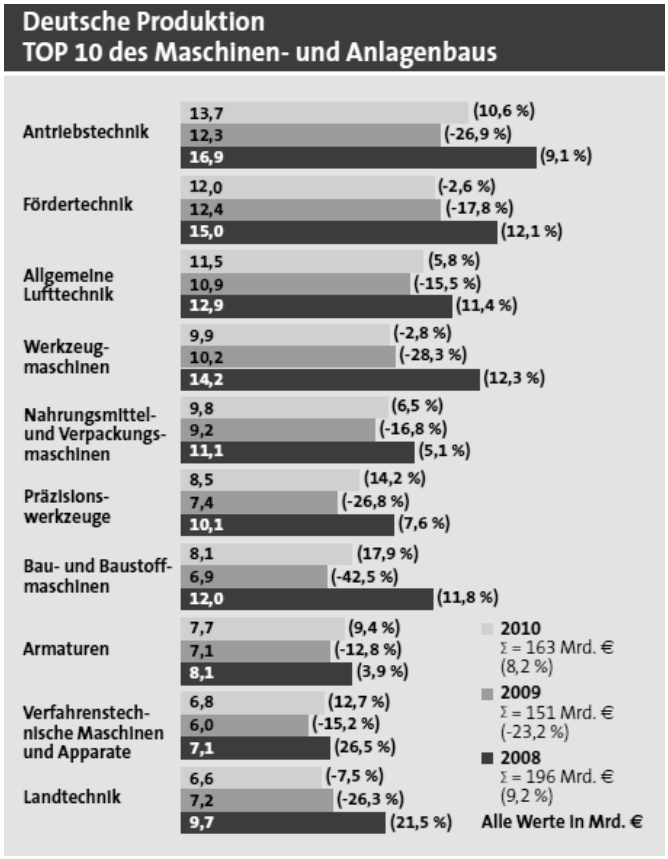


Bild 1: Top-10-Branchen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus nach Exportvolumen [3]

1.2 Systematik der Fördermittel

Die Vielzahl fördertechnischer Anlagen auf dem Markt lässt sich nach verschiedenen Kriterien systematisieren. Energetisch interessant ist dabei die Einteilung nach der Art des Fördervorganges. So genannte Stetigförderer bewegen das Gut auf festgelegten Routen gleichförmig mit konstanter Geschwindigkeit. Sie sind für Dauerbetrieb ausgelegt und es gibt nur wenige Anfahr- und Bremsvorgänge. Unstetigförderer hingegen bewegen das Gut in ungleichförmiger Bewegung auf zum Teil flexiblen Routen (z.B. Gabelstapler). Auch die Fördergeschwindigkeit ist hier flexibler (Bild 3).

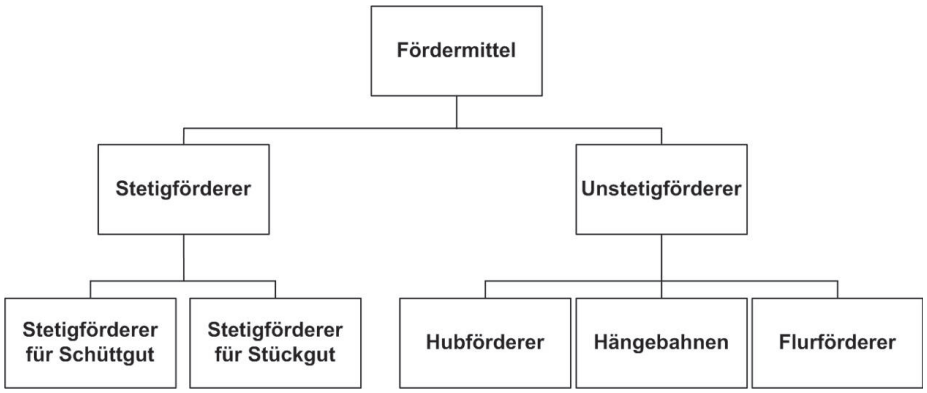


Bild 2: Systematik der Fördermittel [4]

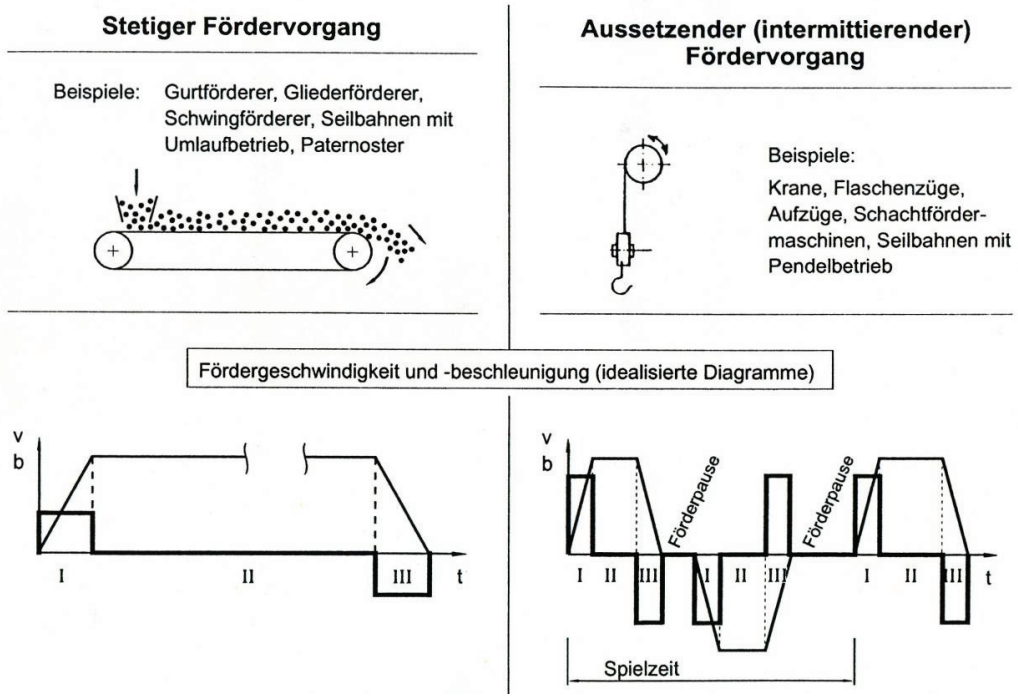


Bild 3: Fördervorgänge von Stetig- und Unstetigförderern mit Beispielen [4]

1.3 Klassifizierung des Fördergutes

Die technische Beschaffenheit einer Förderanlage wird im Wesentlichen durch die Eigenschaften des zu transportierenden Fördergutes bestimmt. Man unterscheidet zwischen Schüttgut und Stückgut.

Stückgüter sind einzelne Stücke, z. B. Kisten oder Säcke. Wesentliche Kenngrößen sind die Abmessungen, das Gewicht und die Form [1].

Schüttgüter sind in der Regel Massengüter und werden eingeteilt in stückige (z. B. Kohlebriketts), körnige (z. B. Getreide) und staubförmige (z. B. Mehl) Schüttgüter. Wesentliche Kenngrößen sind hier Korngröße, Schüttdichte und Schüttwinkel [1].

Die Beschaffenheit des Fördergutes hat auch Auswirkungen auf die energetischen Potenziale einer Förderanlage. Gerade bei Schüttgut ist es nämlich häufig nötig Förderhilfsmittel einzusetzen. Wichtige Beispiele sind hier Behälter, Paletten oder Gitterboxen. Sie alle haben die Funktion uniforme, logistische Einheiten zu bilden, Transportfähigkeit herzustellen und das Gut zu schützen [1]. Allerdings verursachen sie zusätzlichen Aufwand da u. a. ihr Eigengewicht immer mit zu bewegen ist. Dies gilt auch für alle Leerfahrten, wie sie z. B. in einem Behälterkreislauf auftreten.

2 Horizontaler Guttransport

2.1 Physikalische Wirkprinzipien

Häufig werden Güter bodenparallel bewegt. Auch wenn die Förderrichtung schräg nach oben oder unten verläuft, gibt es stets eine horizontale Komponente. Die Bewegung in der Ebene kann dabei geradlinig oder entlang einer mit Kurven versehenen Förderstrecke erfolgen. Beispiele hierfür sind aus dem Alltag jedem bekannt. So kennt jeder Fluggast die Gepäckrückgabebänder im Flughafen. Mancher wird sich an Rohrpostanlagen in Krankenhäusern und Postämtern erinnern. Und viele kennen die automatischen Autowaschanlagen, in denen das Fahrzeug ohne Zutun des Fahrers durch die Waschstraße gezogen wird.

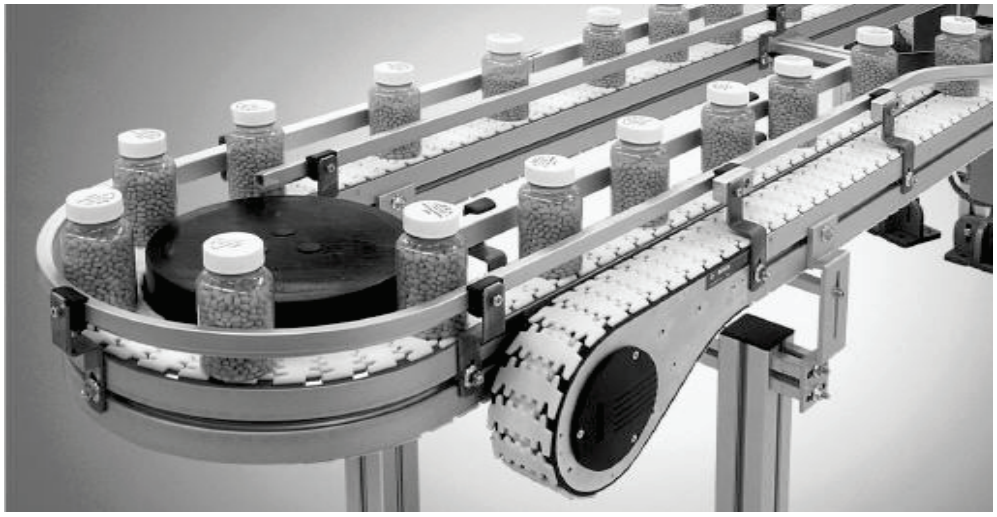


Bild 4: Gleitkettenförderer in der Pharmaindustrie [5]

Eine industrielle Transportanwendung zeigt das obige Beispiel. Für den Materialfluss in der Produktion werden zur Verkettung von Maschinen häufig so genannte *Gleitkettenförderer* eingesetzt. Hauptelement eines solchen Förderers ist eine Kette, deren einzelne Glieder aus Kunststoff oder Stahl bestehen und die mittels Gelenken raumbeweglich miteinander verbunden sind. Die Kette trägt dabei das Fördergut und bewegt sich durch ein Stütz- und Führungsprofil.

Hauptanwender solcher Systeme sind die Lebensmittel- und Kosmetikindustrie sowie die Elektronikindustrie. Hier werden Produkte mit geringem Stückgewicht (wenige kg) mit bis zu 2m/s transportiert.

Allen diesen Beispielen liegen die gleichen physikalischen Wirkprinzipien zu Grunde. In jedem Fall muss durch die eingesetzten Förderanlagen ein Bewegungswiderstand überwunden werden. Dabei handelt es sich systembedingt stets um Reibungswiderstände. Grundsätzlich wirkt in den Reibstellen eine Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung (Bild 5).

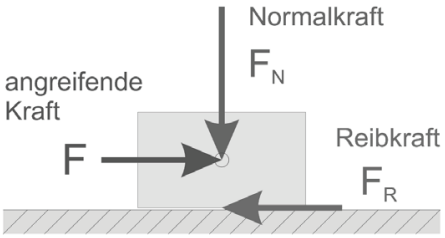


Bild 5: Kräfte am bewegten Körper

Die Reibung in der Wirkstelle wird durch den Reibungskoeffizienten μ als Systemkennwert beschrieben. Es ergibt sich der bekannte Zusammenhang

$$F_R = \mu * F_N \tag{1}$$

Die Normalkraft (F_N) resultiert im o. g. Beispiel aus dem Eigengewicht des Fördergutes und der Förderkette. Die Summe aller zu überwindenden Bewegungswiderstände der Gleitkette (Reibungskräfte zum Führungsprofil, Beschleunigungskräfte bei Anfahr- und Abbremsvorgängen usw.) muss als Umfangskraft (F_U) vom Antrieb aufgebracht werden.

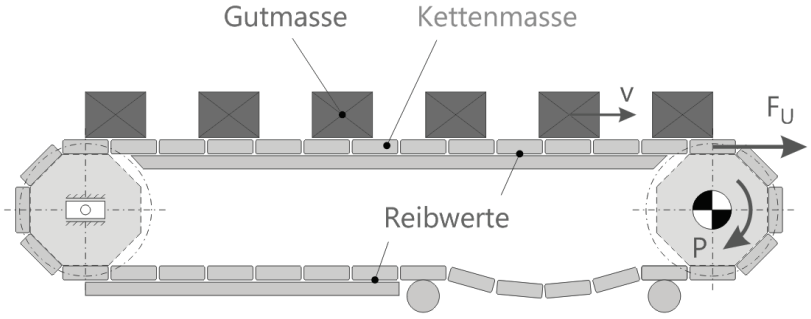


Bild 6: Kenngrößen eines Gleitkettenförderers [6]

Die mechanische Antriebsleistung ergibt sich aus dem Produkt von Kraft und Geschwindigkeit (v), d.h. im vorliegenden Fall aus

$$P_{An} = F_U * v \tag{2}$$

Mit dem Wissen, das auch der Antrieb verschiedene mechanische und elektrische Verluste aufweist und deshalb selbst nur einen Wirkungsgrad (η) kleiner 1 besitzt, kommt man unter Verwendung von Formel (1) zu einer vereinfachten Gleichung für die nötige elektrische Antriebsleistung:

$$P_{el} = \frac{\mu * F_N * v}{\eta} \tag{3}$$

2.2 Optimierungsmaßnahmen

Entsprechend Gleichung (3) gibt es verschiedenen Ansätze zur Verringerung der für horizontale Förderprozesse nötigen elektrischen Energie.

Sehr großes Potential bietet die Verringerung der Reibwerte in einer Förderanlage. Dies wird z. B. durch die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Kunststoff-Gleitkettenförderer deutlich. Noch vor wenigen Jahren betrug der Reibwert zwischen den für Kette und Führungsschienen eingesetzten Standardmaterialien ca. 0,3. Nach dem derzeitigen Stand der Technik erreichen die eingesetzten Komponenten Reibwerte von nur ca. 0,2 (vgl. [6]). Aktuelle Forschungsprojekte an der Professur Fördertechnik der TU Chemnitz haben zum Ziel, die Reibwerte noch weiter zu senken und ihre Langzeitstabilität sicher zu stellen. Im Folgenden werden zwei aktuelle Projekte zur Minimierung von Reibwerten – speziell an Kunststoff-Kunststoff-Paarungen – kurz dargestellt.

2.2.1 Oberflächenbeschichtung

Dünne, harte Schichten auf der Oberfläche von Kettenelementen sind geeignet, Reibwert- und Verschleißreduzierung zu erreichen. Solche Verschleißschutzschichten auf der Basis von kohlenstoffhaltigen Materialien werden mittels physikalischer Vakuumverfahren (physical vapour deposition, PVD) abgeschieden. Das eingesetzte Magnetronsputterverfahren ist zwar seit vielen Jahren Stand der Technik, fand bei Kunststoffoberflächen aufgrund der hohen Prozessenergien allerdings bislang keine Anwendung. Es werden amorphe Kohlenstoffschichten (a-C) und Kohlenstoff-Stickstoffschichten (CN_x) genutzt. Die Schichten haften sehr gut auf den gewählten, thermoplastischen Substraten und weisen eine geringe Rissanfälligkeit auf [7].

Die gemessenen Reibwerte liegen zwar nur leicht unter denen unbeschichteter Kunststoffe, sind nun aber über extrem lange Zeiträume hinweg konstant. Außerdem konnte der Verschleiß der beteiligten Komponenten stark reduziert

werden (Bild 7), was einer deutlichen Lebensdauerverlängerung der Förderketten entspricht.

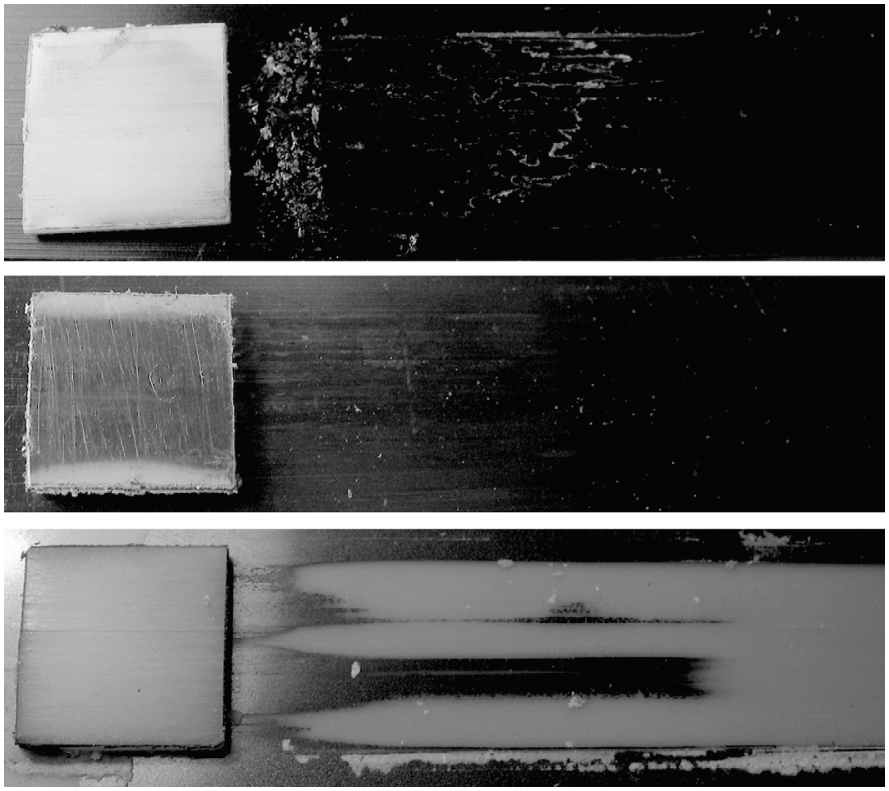


Bild 7: Ober- und Unterprobe nach dem Tribotest [7]
oben: Polyoyxmethylen (POM), unbeschichtet gegen Polyethylen (PE-UHMW; Unterprobe);
mitte: a-C-beschichtetes Polyamid (PA) gegen Polyethylen (PE-UHMW; Unterprobe);
unten: a-C-beschichtetes Polyamid (PA) gegen a-C-beschichtetes PA (Unterprobe)

2.2.2 Oberflächenstrukturierung

Durch gezielte Gestaltung der Oberflächenstruktur der Reibpartner können deren Reibungs- und Verschleißeigenschaften positiv beeinflusst werden. Die Formgebung der Oberfläche kann dabei kostengünstig durch Spritzgießen erfolgen.

Reibungs- und Verschleißeigenschaften sind auf adhäsive und deformative Reibungsanteile zurückzuführen [8]. Diese Reibungsanteile treten in Kombination auf, variieren jedoch in der Größe des jeweiligen Anteils. Adhäsive Reibung resultiert aus der Anziehung der aufeinander gleitenden Körper in den Bereichen der realen Kontaktfläche bzw. bei ausreichender Annährung der Reibflächen [8]. Das Ausmaß der daraus resultierenden atomaren und molekularen Wechselwirkungen ist auf die polaren Anteile der Oberflächenenergie der Reibpartner zurückzuführen. Kunststoffe mit hohem polaren Anteil werden als polar, solche mit geringem Anteil als unpolar klassifiziert [8]. Deformative Reibungsbedingungen treten vor allem zwischen rauen harten und weniger harten Reibflächen auf. Dann

dringen die harten Rauheitsspitzen in den Gegenkörper ein, was zu Verformungen führt. Beim Aufeinandergleiten der Körper wirken die zur Verformung notwendigen Kräfte bewegungshemmend [8]. Zur Reduzierung der deformativen Reibungsanteile sind glatte und harte Körper zu bevorzugen. Für polare Kunststoffe geht dies, aufgrund der Vergrößerung der realen Kontaktfläche und in Folge der Zunahme von Wechselwirkungen, mit einer Erhöhung des adhäsiven Reibanteils einher [8]. Für die Gestaltung reibungsreduzierender Strukturen folgt daraus, dass raue Oberflächen bei polaren Reibpartnern die Reduzierung des Reibwertes bewirken. Bild 8 zeigt die mögliche Reibwertreduzierung durch Oberflächenstrukturierung.

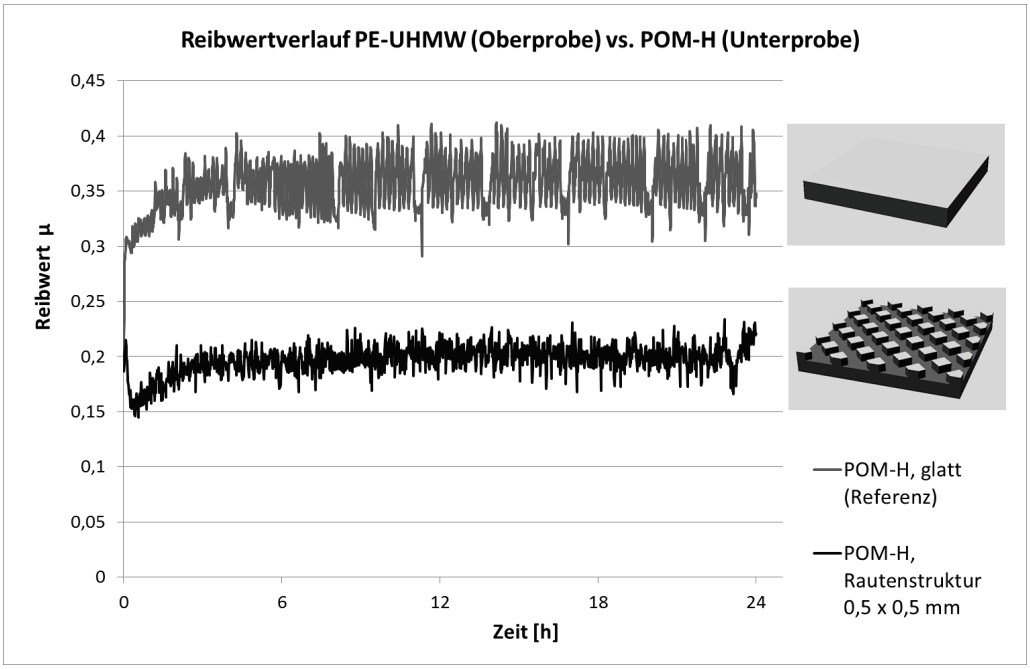


Bild 8: Reibwertverläufe glatter und strukturierter Proben [9]

3 Vertikaler Guttransport

3.1 Physikalische Wirkprinzipien

Zusätzlich zum reinen Fördern von einem zum anderen Ort gilt es oft auch Höhenunterschiede zu überwinden. Dies kann geradlinig vertikal erfolgen oder aber mit einer Horizontalbewegung überlagert sein. Für beides sind jedem Beispiele aus dem Alltag bekannt. Kräne befördern z. B. Baumaterialien auf Häuserdächer oder heben schwere Maschinenteile an. Wo keine Pumpen zum Einsatz kommen, muss Wasser mit einem an ein Seil gebundenen Eimer aus dem Brunnen geholt werden. Letztlich sind auch Personenaufzüge und Rolltreppen als Vertikalförderer bekannt. Ein weiteres Beispiel zeigt eine industrielle Anwendung:

Automatische Kleinteilelager finden häufig dort Anwendung, wo eine größtmögliche Anzahl von unterschiedlichen Artikeln kompakt und effizient kommissioniert und zwischengelagert werden muss. Die Einsatzgebiete reichen dabei von der Ersatzteilindustrie, der Kleinteiledistributionslogistik bis hin zum Pharmagroßhandel [10]. Die Bestückung des Regalsystems erfolgt meist mit Hilfe vollautomatischer *Regalbediengeräte (RBG)*, die aus einem horizontal verfahrbaren Mast und aus einem daran befestigten, vertikal verschiebbaren *Lastaufnahmemittel (LAM)* bestehen. Durch dieses Funktionsprinzip kann jede beliebige Position im Regal erreicht werden. Eine seitliche, teleskopartige Ausfahrbewegung ermöglicht dem Lastaufnahmemittel darüber hinaus den Eingriff in das Regalfach, um dabei einen Ein- oder Auslagerungsvorgang durchzuführen.



Bild 9: Regalbediengerät in automatischem Kleinteilelager [11]

Auch den vorgenannten Beispielen liegen jeweils die gleichen physikalischen Wirkprinzipien zugrunde. Es gilt stets die Höhe einer Last über dem Erdboden zu verändern. Die dafür notwendige Kraft bestimmt sich zum einen aus der Eigenmasse des Fördergutes, d.h. aus der Nutzlast. Zum anderen ist auch die Eigenmasse der Förder- (hilfs-) mittel entscheidend. Die Hubarbeit berechnet sich bekanntermaßen aus dem Produkt der zu hebenden Masse (m), der Hubhöhe (h) und der Erdbeschleunigung (g).

$$W_{Hub} = m * g * h \tag{4}$$

Abhängig von der Dauer des Hubvorganges (t) wird die nötige Leistung durch

$$P_{An} = \frac{W_{Hub}}{t} = \frac{m * g * h}{t} \tag{5}$$

bestimmt. Hieraus folgt auch, dass die für Beschleunigungsvorgänge aufzubringende Energie sehr wichtig ist: erfolgt der Hubvorgang mit großer Beschleunigung – also in kurzer Zeit – erhöht sich auch die nötige Leistung.

3.2 Optimierungsmaßnahmen

Eine Verminderung der Masse des Lastaufnahmemittels bzw. des kompletten Regalbediengerätes hat einen direkten Einfluss auf den Energiebedarf, da Energie sowohl zum horizontalen Verfahren und vertikalen Heben des LAM als auch zum Ein- und Auslagern der Last notwendig ist. Derzeit beträgt die Masse von LAM ca. zwei Drittel der zu hebenden Gesamtmasse, d. h. das LAM, welches häufig auch leer bewegt werden muss, wiegt doppelt so viel wie das einzulagernde Gut.

Um entsprechend der komplexen Anforderungen eine effektive und energieeffiziente Leichtbaulösung zu erarbeiten, wurde eine Vielzahl ehemals stählerner Komponenten aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt. Wichtige Gestellkomponenten wurden aus Aluminium gebaut und der Einsatz neuartiger Linearlager verringert die Reibung zwischen bewegten Komponenten, wie z. B. den Lasttischen.

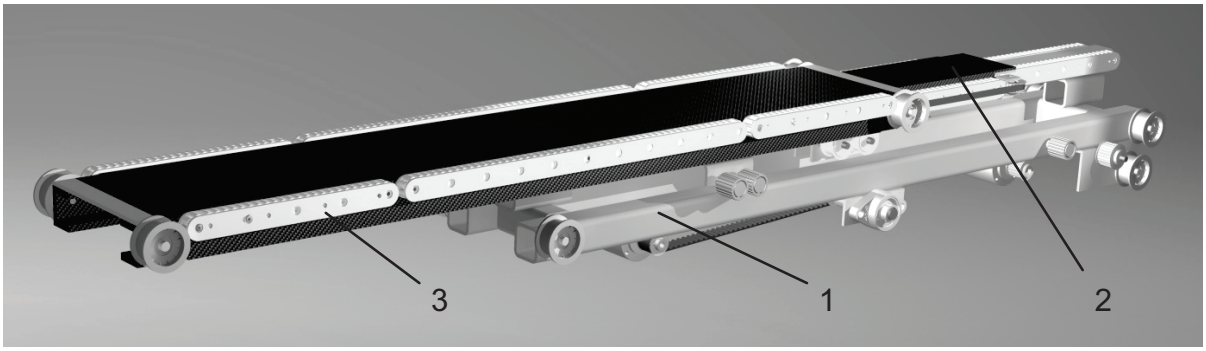


Bild 10: Massereduziertes Lastaufnahmemittel (CAD-Modell; 1-Gestell; 2, 3-bewegliche Tische)

Die Masseeinsparung durch diese CFK-Aluminium-Verbundbauweise beträgt gegenüber dem Stand der Technik ca. 50 Prozent. Dadurch können auch kleinere und leichtere Motoren verwendet werden, was nochmals eine erhebliche Masseeinsparung bedeutet.

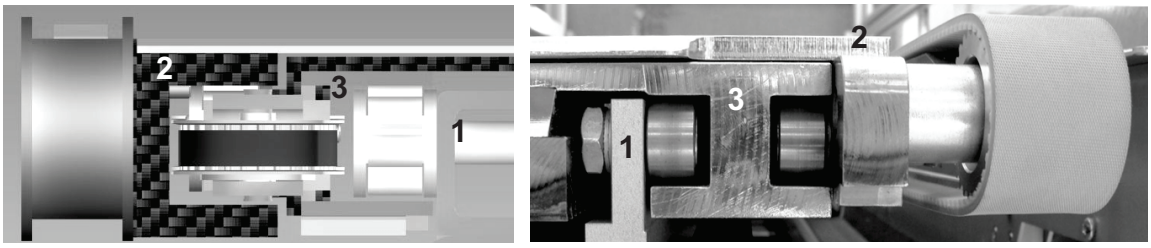


Bild 11: LAM von vorn; Vergleich Leichtbauweise - Stand der Technik (1 – Gestell; 2 – oberer Tisch; 3 – unterer Tisch)

Bild 11 zeigt das LAM in Leichtbauweise (links; m=60kg) im Vergleich zu einem LAM nach dem bisherigen Stand der Technik (rechts; m=120kg) von vorn. Die Komponenten sind im Wesentlichen die gleichen. Es ist allerdings deutlich zu erkennen, dass die Nutzung des Bauraumes stark auf die besonderen Materialeigenschaften der Faserbauteile angepasst wurde.

4 Potentiale der Energieeinsparungen

4.1 Horizontaler Guttransport

Reibung und Verschleiß verursachen in Industrieländern jährliche Verluste in Höhe von etwa 5% des Bruttosozialproduktes – für Deutschland bedeutet das ca. 35 Milliarden Euro pro Jahr [12]. Anhand des Energiebedarfes für einen konkreten Förderer (Bild 12) wird das Energieeinsparpotential durch geringere Reibwerte verdeutlicht.

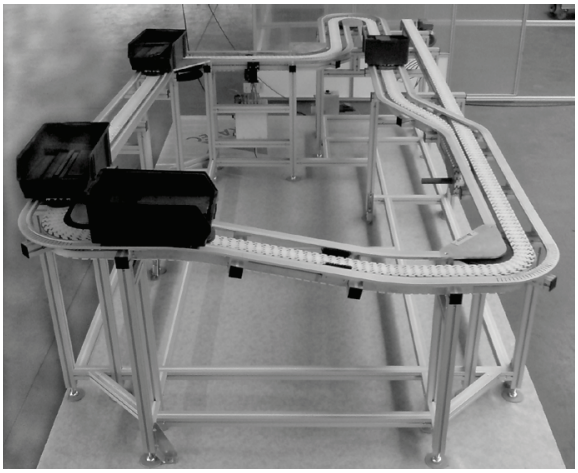


Bild 12: Gleitkettenförderer

Bei einem Reibwert von μ=0,30 beträgt die maximale Kettenzugkraft 690 N. Vom Antrieb ist dafür eine Leistung von 207 W (ohne Betrachtung des Wirkungsgrades des Antriebes) aufzubringen. Dieser Belastung hält die Kette ungefähr 1 Mio. Umläufe stand, das entspricht 1600 Werktagen im 3-Schichtbetrieb. Bei einem Reibwert von nur 0,15 beträgt die maximale Kettenzugkraft nur 190 N. Hierfür ist lediglich eine Leistung von 57 W aufzubringen (ΔP_{An} = -72%). Dieser verringerten Belastung hält die Kette 19-mal länger stand [13].

Lässt man die Antriebsleistung konstant könnte mit dem Förderer bei gleicher Kettenlebensdauer 8-mal mehr Fördergut auf einmal transportiert werden.

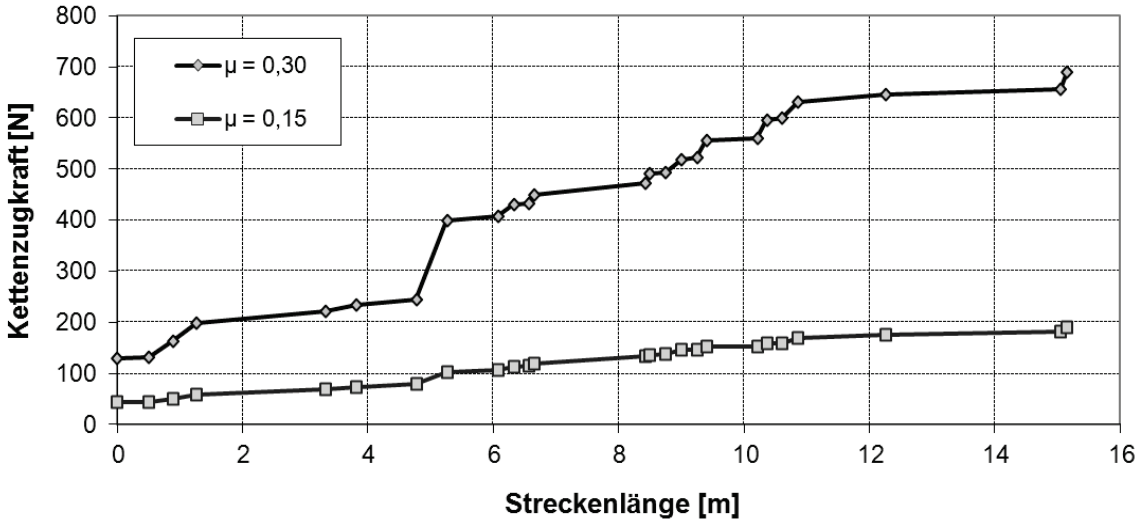


Bild 13: Zugkraftverlauf der Kette im Förderer (Förderstrecke 15m; Gutmasse 2,5kg/m; Geschwindigkeit 0,3m/s) [13]

4.2 Vertikaler Guttransport

Bild 14 zeigt den Einfluss der Massereduzierung des Lastaufnahmemittels auf den Energieverbrauch pro Einlagerungsvorgang in einem automatischen Kleinteilelager. Neben der Masse ist der Energieverbrauch von den räumlichen Gegebenheiten (Länge, Höhe) des Lagers sowie kinematischen Kenngrößen (max. Beschleunigung, max. Verfahrgeschwindigkeit) abhängig. Daraus wird deutlich, dass vor allem bei sehr hohen Lagern ein enormes Energieeinsparpotential aufgrund der zu verrichtenden Hubarbeit vorhanden ist. Bei gleicher Nutzlast ist mit dem massereduzierten LAM eine Energieeinsparung von mindestens 7.500 kWh im Jahr im Vergleich zum Stand der Technik realisierbar.

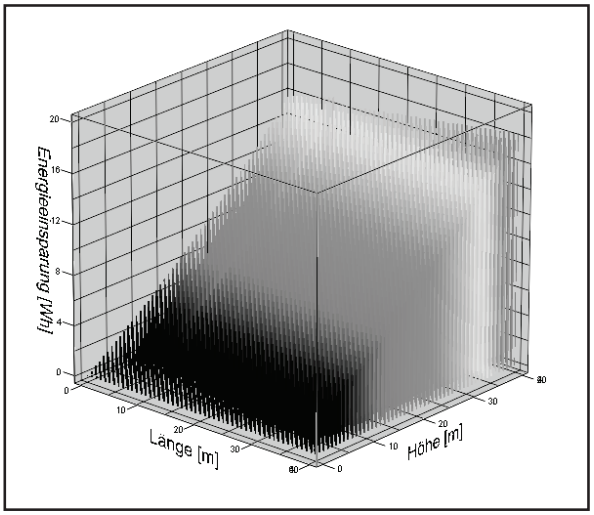


Bild 14: Energieeinsparung in Abhängigkeit der Lagerabmessungen; Annahmen: Massereduktion LAM 100 kg, Anfahr- / Bremsbeschleunigung 1,5 m/s² vertikal, 3m/ s² horizontal

In Bild 15 sind der Bewegungsablauf und der Energiebedarf eines typischen Regalbediengerätes für einen Auslagerungsvorgang grafisch dargestellt. Die dunkler gekennzeichneten Bereiche veranschaulichen das Energieeinsparpotential durch die Massenreduzierung des LAM.

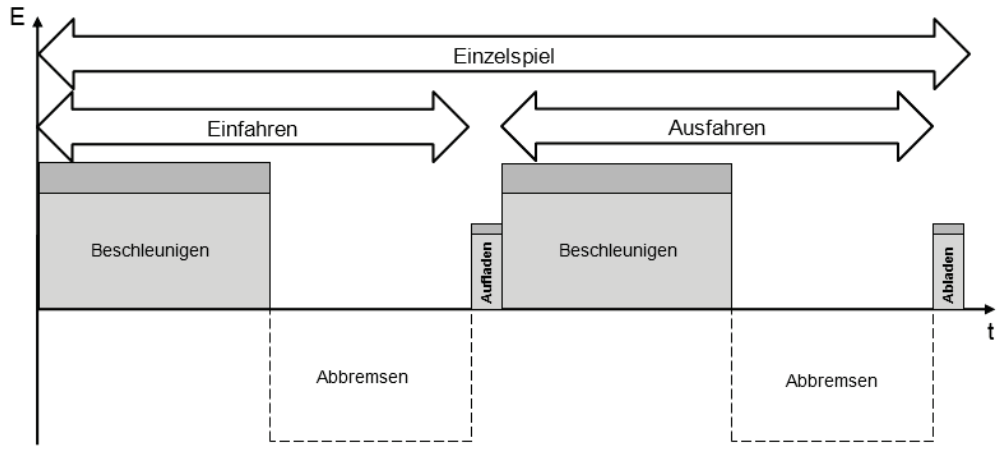


Bild 15: Abschnitte des Bewegungsablaufes und Energiebedarf eines typischen LAM

5 Fazit

Das Erreichen günstiger tribologischer Eigenschaften, d.h. Minimierung der Reibwerte zwischen allen relativ zueinander bewegten Bauelementen und Verringerung des auftretenden Verschleißes, birgt enormes Energieeinsparpotential auf vielen verschiedenen Ebenen:

- geringerer Bedarf an Antriebsenergie wegen verringerter Zugmittel-Zugkraft,
- sicherer Guttransport durch Verminderung des Stick-Slip-Verhaltens,
- längere Lebensdauer der Bauelemente durch weniger Abrieb und damit auch erhöhte Ressourceneffizienz der verwendeten Materialien
- Einsparen von Antriebsmotoren und Steuerungstechnik durch die Realisierung längerer Förderstrecken mit einem Antrieb.

Eine Massereduzierung eingesetzter Fördermittel bzw. Förderhilfsmittel kann genutzt werden

- für eine deutliche Verringerung der nötigen Antriebsenergie,
- für eine Erhöhung der Geschwindigkeit von Förder- und Lagervorgängen oder
- zur Erhöhung der Nutzlast.

Die beiden letzten Punkte erhöhen jeweils die Wirtschaftlichkeit der Prozesse und tragen zur Steigerung der Ressourceneffizienz der verwendeten Bauelemente bei. Die zu bewegenden Massen spielen auch eine wichtige Rolle bei Anfahr- und

Abbremsvorgängen, wie sie für Unstetigförderer üblich sind. Die Beschleunigungsenergien müssen unbedingt Beachtung bei der energetischen Beurteilung von Unstetigförderern finden, da sie je nach Bewegungszyklus großen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch haben können.

Die bezüglich des Kunststoffgleitkettenförderers gewonnenen Erkenntnisse können auch auf andere technische Wirkpaarungen mit Kunststoff-Kunststoff-Materialpaarungen übertragen werden. Ebenso sind die Maßnahmen am LAM bzgl. zu hebender Massen leicht auf andere Fälle vertikaler Gutförderung übertragbar. Damit kann ein wesentlicher Beitrag zur Nutzung von Energie- und Ressourceneffizienz-Potentialen, besonders in der Intralogistik, aber auch in vielen anderen Teilgebieten des Maschinen- und Anlagenbaus, geleistet werden.

Acknowledgement

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).

Gefördert aus Mitteln der Europäischen Union

Europa fördert Sachsen. EFRE Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Literaturangaben

[1] *Günthner. A.: Vorlesungsskript „Materialflusstechnik“; TU München; 2007*

[2] *www.tu-chemnitz.de/mb/FoerdTech/bedeutung.php [01.08.2012]*

[3] *Statistisches Bundesamt / VDMA: Zahlenkompass Fördertechnik, www.vdma.org/wps/portal/Home/de/Branchen/F/FOERD/Wirtschaft_und_Recht/FOERD_Wirtschaft_und_Recht?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/vdma/Home/de/Branchen/F/FOERD/Wirtschaft_und_Recht/FOERD_Wirtschaft_und_Recht [02.07.2011]*

[4] *Nendel K.: Vorlesungsskript „Grundlagen der Fördertechnik“; TU Chemnitz; Chemnitz; 2012*

[5] *N.N.: Produktkatalog „Kettenfördersysteme – VarioFlow“; Fa. Bosch Rexroth; Ausgabe 4.2; 2009*

[6] *Sumpf, J.: Vorlesung „Kettenfördersysteme“; TU Chemnitz; Chemnitz; 2012*

[7] Bergmann, A; Sumpf, J.; Schumann, A.; Nendel, K.; Stryhal, S.; Kupfer, H.; Richter, F.: Kohlenstoffbasierte PVD-Beschichtungen zur Optimierung der tribologischen Eigenschaften von Kunststoffbauteilen in Fördersystemen; Tagungsband zur 22. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren; TU Chemnitz; Chemnitz; 2011; S. 146-147

[8] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren; 3. Auflage; Carl Hanser Verlag; München; 2007

[9] Sumpf, J.: Vorlesung „Reibung und Verschleiß in Fördermitteln“; TU Chemnitz; Chemnitz; 2012

[10] N.N.: Kostengünstig und flexibel; Z. Materialfluss; Nr. 10, S. 10-12; 2007

[11] www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/materialflusslogistik/foerdertechnik/articles/123883/ [31.07.2012]

[12] www.gft-ev.de/tribologie.htm [05.08.2012]

[13] Sumpf, J.: Abschlusspräsentation des BMBF-Projektes „Langfaserverstärkte Zugmittel für Stetigförderer“; TU Chemnitz; Hannover; 2009