

Spart es wirklich Energie? Geschwindigkeitsregelung bei Gurtförderern

Dipl.Ing. Hans Lauhoff, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
für Förder- und Materialflusstechnik, insbesondere Stetigförderer,
Ingenieurbüro Hans Lauhoff

Sonderdruck aus Glückauf 1/2 (2006)

Geschwindigkeitsregelung bei Gurtförderern – spart es wirklich Energie?



Dipl.-Ing. Hans Lauhoff, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Förder- und Materialflusstechnik, insbesondere Stetigförderer, Ingenieurbüro Hans Lauhoff, Beckum

Für den Transport von mineralischen Rohstoffen und Erden haben sich Gurtförderer besonders bewährt. Sie sind heute für die Bewältigung der dabei anfallenden wachsenden Schüttgut-Massenströme über kurze und mittlere Förderstrecken meist die kostengünstigste Lösung. Trotz der schon günstigen Kosten besteht bei Gurtförderern der Wunsch, die Kosten weiter zu senken.

Aus der Literatur (1) ist zu entnehmen, dass zur Vergleichmäßigung des Füllungsgrads die Gurtgeschwindigkeit entsprechend der Beladung geregelt werden soll. Somit soll eine Senkung des Energieverbrauchs erreicht werden. In (2) und (3) wird der Eindruck erweckt, dass eine Reduzierung des Energieverbrauchs von bis zu 30 % dann möglich sein soll, wenn durch Regelung der Fördergeschwindigkeit mit dem Nenn-Volumenstrom als Führungsgröße – also einem Füllungsgrad von $\varphi = 1$ ($\varphi = 100\%$) – der Gurtförderer auch dann betrieben wird, wenn der zu fördernde Volumenstrom Schwankungen unterworfen ist. In diesem Zusammenhang werden in (2) und (3) Achsabstände von mehr als 1400 m genannt. Auch in (4) wird in der Zusammenfassung eine wirtschaftlichere Betriebsweise suggeriert, wenn drehzahlvariable Antriebe für Gurtförderer eingesetzt werden. Einschränkend ist in (4) ein Hinweis auf die geringere Energie zum Beschleunigen des Förderguts an der Aufgabe bei geringerer Gurtgeschwindigkeit zu finden. In (2) und (3) wird als Grundlage für diese Aussagen die DIN 22101 genannt (5). Die Veröffentlichungen (1) und (4) geben für diese Aussagen keine Bezugsquellen an.

Vor diesem Hintergrund sollte für die Voith Turbo GmbH & Co. KG, Crailsheim, ein Gutachten darüber erstellt werden, ob – pauschal gültig – bei Gurtförderern ein geringerer Energieverbrauch und damit eine vermeintlich wirtschaftlichere Betriebsweise eintritt, wenn als Führungsgröße für die Gurtgeschwindigkeit v der Füllungsgrad φ der Gurtmulde mit $\varphi = 1$ genutzt wird.

Prinzipielle Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Bewegungswiderstände von Gurtförderern

Der Energieverbrauch von langen, horizontal verlegten Gurtförderanlagen im stationären Betriebszustand wird durch die Bewegungswider-

stände im Ober- und Untertrum bestimmt. Diese bestehen aus dem Laufwiderstand der den Gurt tragenden Rollen sowie dem Walkwiderstand von Fördergut und -gurt beim Lauf über die Tragrollen. Die zur Überwindung dieser Widerstände erforderliche Energie wird von verschiedenen betrieblichen und konstruktiven Kenngrößen bestimmt. Bei der Überwindung von Höhenunterschieden wird relativ zu den übrigen Widerständen ein großer Energiebedarf benötigt. Das Heben von Massen auf ein anderes Niveau bestimmt hier primär die aufzuwendende Energie und ist daher nicht beeinflussbar. Als Bewegungswiderstände werden alle auf den Gurt längs der Förderrichtung wirkenden Kräfte bezeichnet, welche beim Betrieb des Gurtförderers überwunden werden müssen.

Berechnungsmethode gemäß der DIN 22 101 – Übersicht

Nach der DIN 22 101 (5) werden die Bewegungswiderstände F_w aufgeteilt in:

- ⇨ Hauptwiderstände (F_H).
- ⇨ Nebenwiderstände (F_N).
- ⇨ Steigungswiderstände (F_{St}).
- ⇨ Sonderwiderstände (F_S).

Zur Optimierung der Betriebsweise von Gurtförderern wird vorzugsweise in der deutschsprachigen Literatur in den letzten Jahren wiederholt empfohlen, die Gurtgeschwindigkeit von Gurtförderern zu regeln. Als Führungsgröße für diesen Regelvorgang soll der Füllungsgrad φ der Gurtmulde mit $\varphi = 1$ dienen. Es soll mithin immer eine hohe Auslastung des Förderquerschnitts bei einer gegebenenfalls geringeren Gurtgeschwindigkeit herbeigeführt werden. Mit einer derartigen Betriebsweise sollen der Energieverbrauch und somit die Betriebskosten gesenkt werden. Der vorliegende Beitrag setzt sich kritisch mit dieser Empfehlung auseinander. Die Einflussgrößen auf den Bewegungswiderstand bei Gurtförderern werden dargestellt. Unter Verwendung der in der einschlägigen Literatur recherchierten Abhängigkeiten der Einzelwiderstände und der Kenngröße „spezifischer Energiebedarf“ wird gezeigt, dass in den üblichen Füllungsgradbereichen zum Zweck der Energieeinsparung eine Geschwindigkeitsregelung abwegig ist.

Hauptwiderstände F_H

Zum Hauptwiderstand werden alle entlang dem Gurtförderer auftretenden reibungsbedingten Widerstände mit Ausnahme der Sonderwiderstände gerechnet. Die Hauptwiderstände F_{Hi} auf den Teilabschnitten werden vereinfachend unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Widerständen und bewegter Last für jeden Teilabschnitt i getrennt nach Ober- und Untertrum bestimmt.

$$F_{Hi} = l_i \cdot f_i \cdot g \cdot [m'_{R,i} + (m'_G + m'_{L,i}) \cdot \cos\delta] \dots\dots\dots [1]$$

Die Summe aller Teilstrecken bildet den gesamten Hauptwiderstand:

$$F_H = \sum_{i=1}^n F_{Hi} \dots\dots\dots [2]$$

Nebenwiderstände F_N

Nebenwiderstände sind Reibungs- und Trägheitswiderstände, die nur an einzelnen Stellen des Gurtförderers auftreten. Hierzu gehören:

- ▷ Fördergutaufgabewiderstand (F_{Auf}).
- ▷ Reibungswiderstand zwischen Fördergut und Schurre (F_{schb}).
- ▷ Reibungswiderstand der Gurtreiniger (F_{Gr}).
- ▷ Umlenk- und Trommelwiderstand des Gurts an Trommeln.

Die Nebenwiderstände sind unabhängig von der Länge des Gurtförderers und von konstanter Größe. Sie verlieren daher bei großen Achsabständen gegenüber den über die Förderstrecke verteilten Bewegungswiderständen – den Hauptwiderständen – an Bedeutung. Bei geringem Anteil der Nebenwiderstände am Gesamtwiderstand ist eine pauschale Bestimmung zulässig. Die Gesamtheit der Nebenwiderstände wird durch den Beiwert C berücksichtigt (5).

$$F_N = (C - 1) \cdot F_H \dots\dots\dots [3]$$

Der Richtwert für den Beiwert C liegt bei einer Förderlänge von $\geq 1\,000$ m bei $C < 1,09$.

Sonderwiderstände F_S

Sonderwiderstände sind solche, die nicht bei allen Gurtförderern auftreten. Hierzu gehören insbesondere der Sturzwiderstand von Tragrollen, der Reibungswiderstand von seitlichen Schurren au-

Berhalb von Aufgabestellen und Widerstände von Einrichtungen zur Fördergutabgabe auf der Förderstrecke.

Anwendungsbereich der DIN 22101

Die DIN 22101 enthält die Grundlagen für die Berechnung und Auslegung von Gurtförderern für Schüttgut. Für die Bestimmung der Hauptwiderstände wird ein dem Coulombschen Reibungsgesetz entsprechender Ansatz zu Grunde gelegt. Die gesamte Gewichtskraft der bewegten Massen von Fördergut, Gurt und Tragrollen, multipliziert mit dem fiktiven Reibungsbeiwert f_i ergibt den Hauptwiderstand F_H . Die Wahl des fiktiven Reibungsbeiwerts hat eine überragende Bedeutung für die Größe der Hauptwiderstände. Dies gilt insbesondere, je geringer die Steigungswiderstände sind. In der Norm werden für verschiedene Betriebs- und Anlagenparameter Werte für f_i angegeben. Hierzu sind in der Norm mehrere Randbedingungen benannt, die zu diesen Werten geführt haben. Bei sorgfältigem Abwägen der Einflussgrößen und Erfahrungswerte liegt der Vorteil der DIN 22101 darin, dass eine schnelle Auslegung von Gurtförderanlagen zu hinreichend genauen Ergebnissen führt. Das heißt, sie ermöglicht es, wesentliche Anforderungen an wichtige Bauteile in Abhängigkeit von der gestellten Förderaufgabe zu bestimmen, und beschreibt einen Weg für die Auslegung des Fördergurts. Andererseits ist ebenso die Gefahr der falschen Abschätzung durch wenig sichere Kenntnisse von Betriebsverhältnissen verborgen. Unterschiedliche Gurteigenschaften – insbesondere ein von der Beladung abhängiges Verhalten – finden keine Berücksichtigung.

Die Parameter – wie zum Beispiel fiktiver Reibungsbeiwert f_i und Streckenlast infolge Fördergut m'_L – für die Berechnung der Hauptwiderstände werden als konstante Werte angenommen (5).

Dass insbesondere der fiktive Reibungsbeiwert f_i nicht konstant ist, wurde beispielsweise bereits in (6) dargestellt (Bild 1).

Daher sollte und kann die DIN 22101 nicht unmittelbar als Berechnungsgrundlage für sich ändernde Betriebsverhältnisse angewandt werden.

Einzelwiderstandsverfahren – Übersicht

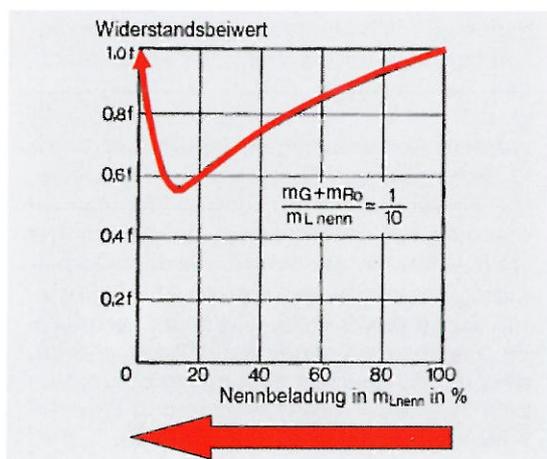
Wünschenswert für die Gutachtenerstattung war daher eine Methode zur Berechnung der Hauptwiderstände, in der die einzelnen Widerstandsanteile, basierend auf physikalischen Grundlagen, getrennt ermittelt und möglichst auf alle Einflussgrößen eingehen. Erstmals wurde dies von Lachmann (7) und Vierling (8) verwirklicht (9).

Hauptwiderstand im Einzelwiderstandsverfahren – Übersicht

Demnach sind die Hauptwiderstände F_H in zwei Gruppen unterteilt:

- ▶ Tragrollenlaufwiderstand (U').
- ▶ Walkwiderstände (U'').
- ▷ Eindrückrollwiderstand (U''_e).

Bild 1. Reibungsbeiwert f in Abhängigkeit von der Beladung (6).



- ◊ Schwingbiegewiderstand des Gurts (U''_G).
 - ◊ Fördergutwalkwiderstand (U'').
- Die Bewegungswiderstände F_w werden demgemäß wie folgt ermittelt:

$$F_w = F_H + F_N + F_{St} + F_S \dots \dots \dots [4]$$

$$F_w = \Sigma[U' + (U''_E + U''_G + U''_L)] + F_N + F_{St} + F_S \dots \dots [5]$$

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten haben sich in den letzten Jahrzehnten mit dieser rechnerischen Differenzierung zur Berechnung der Einzelwiderstände beschäftigt (7, 9, 10, 11, 12, 13, 14). Aufgrund des komplizierten Einflusses der konstruktiven, technologischen und betrieblichen Kenngrößen auf die Größe des Walkwiderstands hat sich die Einzelwiderstandsmethode zur Ermittlung des Hauptwiderstands in der Vergangenheit bisher nicht durchgesetzt (13). Auch fehlte es an einzelnen Kenngrößen, die es erlauben, im Vorgriff auf die Anlagenrealisierung exakte Aussagen über die tatsächliche Größe der Einzelwiderstände zu prognostizieren.

Im Anhang A der DIN 22 101 sind beispielhaft die Widerstandsanteile für zwei gleich lange Gurtförderer identischer Bauart, aber unterschiedlicher Steigung dargestellt. Die Angaben gelten für lange Gurtförderer (Achsabstand > 1 000 m (5, 9)), (Bild 2). Als Wichtigster, weil größter reibungsbedingter Bewegungswiderstand für lange sölhliche Gurtförderer, zeigt sich der Eindrückrollwiderstand U''_E . Bei diesem Beispiel beträgt sein Anteil mehr als 60 %. Der Anteil des Fördergutwalkwiderstands wird mit etwa 18 %, der des Schwingbiegewiderstands mit 5 %, der des Tragrollenlaufwiderstands mit 6 % und der Anteil der Neben- und Sonderwiderstände mit zusammen 10 % beziffert.

Im Folgenden werden einige bewährte Berechnungsmethoden für die einzelnen Anteile des Hauptwiderstands vorgestellt und die in diesem Zusammenhang entscheidenden Einflussgrößen

- ◊ Fördergeschwindigkeit v und
- ◊ Füllungsgrad ϕ (Beladungsabhängigkeit) aufgezeigt.

Einflussgrößen bei den Einzelwiderständen

Tragrollenlaufwiderstand U'

Der Tragrollenlaufwiderstand U' der den Gurt stützenden Tragrollen ist als diejenige Kraft am Rollenumfang definiert, welche die Reibmomente aus Lager- und Dichtungsreibung unter einer bestimmten Tragrollenbelastung F_{NR} bei einer bestimmten Fördergeschwindigkeit v überwinden muss (Bild 3). Sie wird durch Reibschluss vom Gurt auf die Tragrollen übertragen. Tragrollen sind auf der gesamten Förderstrecke in großer Anzahl installiert. Es gibt keine Formel zur allgemein gültigen einfachen Berechnung des Tragrollenlaufwiderstands. Es wurde jedoch festgestellt, dass der Tragrollenlaufwiderstand im Wesentlichen durch die verwendete Fettsorte sowie die Fettmenge in den Labyrinthen und Wälzlagern bestimmt ist. Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Temperatureinfluss erheblich sein kann

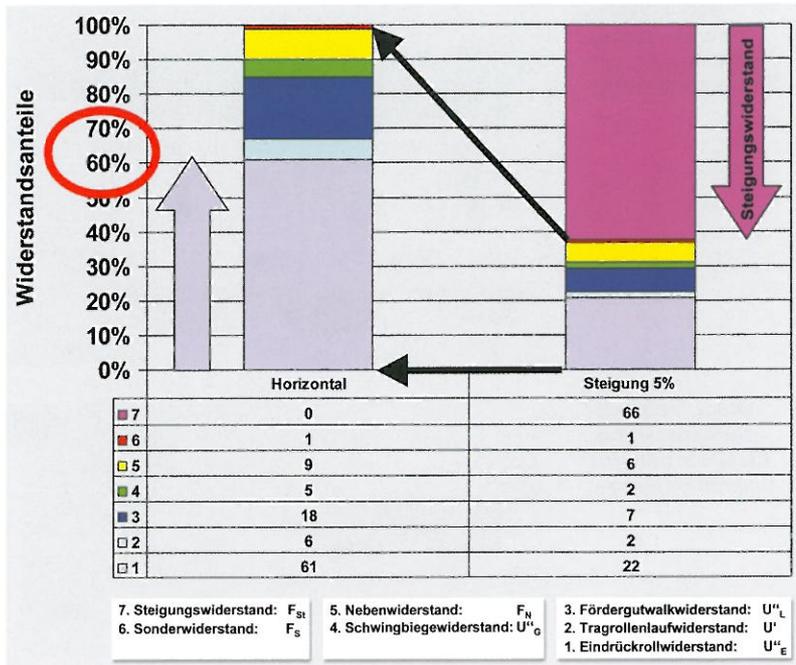


Bild 2. Vergleich der Widerstandsanteile zweier gleich langer Gurtförderer identischer Bauart, aber unterschiedlicher Steigung.

(14). Um mit großer Genauigkeit den Tragrollenlaufwiderstand zu prognostizieren, werden in der Literatur Messungen auf dem Prüfstand empfohlen.

Im Rahmen des Gutachtens wurde folgender Ansatz zu Grunde gelegt:

$$U' = a + b \cdot v + c \cdot F_{NR} \dots \dots \dots [6]$$

Bei allen Auswertungen wurden die Parameter a , b und c als konstant angenommen und entsprechend die Fördergeschwindigkeit v beziehungsweise die Tragrollenbelastung F_{NR} variiert.

Zur Ermittlung des Tragrollenlaufwiderstands einer ganzen Tragrollenstation müssen die Tragrollenbelastungen der Einzelrollen in Abhängigkeit vom Beladungszustand berücksichtigt werden.

Walkwiderstand U''

Der Walkwiderstand (mit seinen Einzelkomponenten U''_E , U''_L und U''_G) ist für lange sölhliche Gurtförderer von vorrangiger Bedeutung. Die von der Tragrolle auf den Gurt entgegen der Förderrichtung wirkende Kraft U'' – der Walkwiderstand – entspricht dabei dem Horizontalanteil der vom Gurt auf die Tragrolle ausgeübten Normalkraft F_{NR} . Das Anwachsen des Walkwider-

Bild 3. Tragrollenlaufwiderstand, Idealisierung der Zusammenhänge (9).

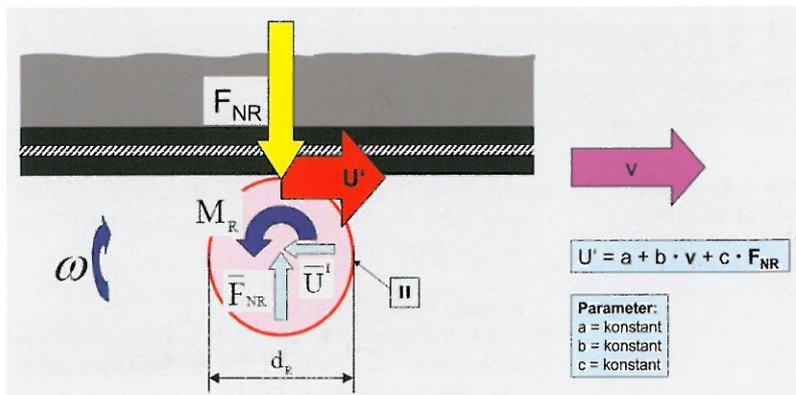


Bild 4. Walkwiderstand, Idealisierung der Zusammenhänge.

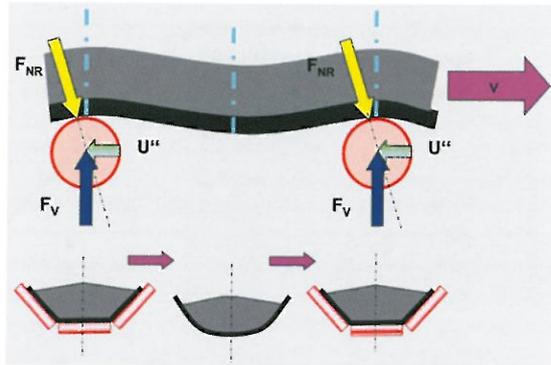


Bild 5. Eindrückrollwiderstand, Idealisierung der Zusammenhänge.

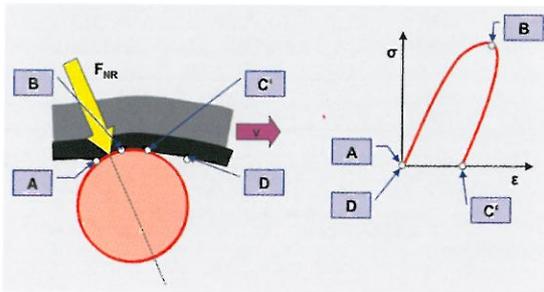


Bild 6. Eindrückrollwiderstand an verschiedenen Gurtdeckplatten (9).

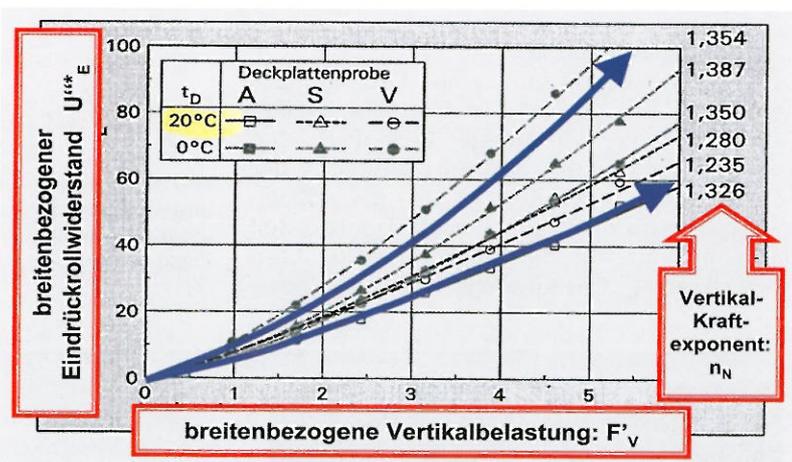
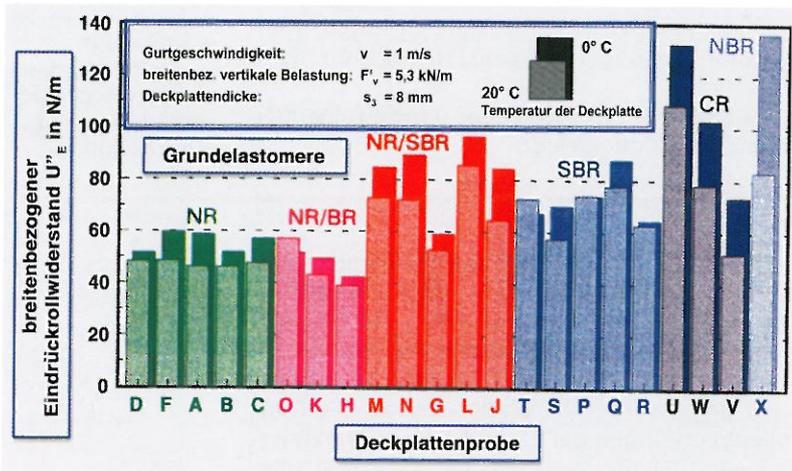


Bild 7. Eindrückrollwiderstand – abhängig von der Vertikalbelastung (9).

stands äußert sich in der Veränderung des Berührungsbogens in der Kontaktzone zwischen Tragrolle und Gurt (Bild 4).

Eindrückrollwiderstand U''_E
Der Eindrückrollwiderstand U''_E entsteht beim Abrollen der Tragrolle auf der lauffeitigen Deckplatte des Gurts (Bild 5, links).

Die aufgewendete Verformungsarbeit der Deckplatte kann nicht vollständig wiedergewonnen werden (Bild 5, rechts). Dieser Hystereseverlust ist in den viskoelastischen Eigenschaften des Gummis begründet. Bereits Greune (13) hat festgestellt, dass mit steigender Gurtgeschwindigkeit die auf 1 m Anlagenlänge bezogenen Normalkräfte auf die Tragrollen sowie die Berührängen zwischen Gurt und Tragrollen sinken und somit der Eindrückrollwiderstand überproportional stark abfällt. Weiterhin stellte er fest, dass bei konstantem Massenstrom mit steigender Geschwindigkeit lediglich ein degressiver Anstieg des Leistungsbedarfs des Produkts aus Eindrückrollwiderstand und Gurtgeschwindigkeit eintritt.

Bei Hintz (9) werden Berechnungsgrundlagen für den Eindrückrollwiderstand angegeben. Bei seinen Untersuchungen hat Hintz eine Vielzahl von unterschiedlichen Deckplattenwerkstoffen einbezogen (Bild 6).

Der Eindrückrollwiderstand U''_E an einer Tragrollenstation kann aus den Streckenlasten längs der einzelnen Tragrollen berechnet werden. Als Spezialfall ergibt sich für einen flachen, durch eine Tragrolle eingedrückten Gurt, ohne Gurtkrümmung an der Tragrolle und bei über der Gurtbreite konstanter Belastung für den Eindrückrollwiderstand:

$$U''_E = c_E \cdot d^{-\frac{2}{3}} \cdot F_V^{\frac{4}{3}} \cdot b_R^{-\frac{1}{3}} \dots \dots \dots [7]$$

Wobei:

- c_E = Deckplattenspezifische Konstante.
- d = Tragrollendurchmesser.
- F_V = Vertikale Tragrollenbelastung.
- b_R = Berührlänge zwischen Tragrolle und Gurt.

Das Bild 7 zeigt den Einfluss der breitenbezogenen Vertikalbelastung auf den breitenbezogenen Eindrückrollwiderstand.

Alle Kurven beginnen im Ursprung und steigen progressiv an. Eine von Hintz durchgeführte Regressionsanalyse für die insgesamt sechs Funktionen, unter Berücksichtigung eines Potenzialansatzes, ergab mit der Formel [8]:

$$U''_E^* = a \cdot (F'_V)^{n_N} \dots \dots \dots [8]$$

für a Werte von $0,76 \cdot 10^{-3}$ bis $1,80 \cdot 10^{-3}$ und für den Exponenten n_N Werte von 1,235 bis 1,387. Im Mittel kann hieraus der Vertikalkraftexponent mit $n_N = 1,322$ angegeben werden. In dem progressiven Ansteigen der Kurven bestätigt sich, dass die Auswirkungen der Eindrückrollwiderstandsreduzierung bei schweren Anlagen, das heißt mit hohen Strecken- und Tragrollenbelastungen, deutlicher sind als bei leichteren Anlagen (9). Bei den Untersuchungen hat Hintz bei einer Verdoppelung der Fördergeschwindigkeit eine Erhöhung des Eindrückrollwiderstands von lediglich 4 % ermittelt.

Für die Beispielrechnungen im Gutachten wurde mit diesen Feststellungen gearbeitet. Weiterhin wurde für die Beladungsaufteilung der Seiten- und Mittelrolle ein vereinfachter Ansatz zu Grunde gelegt. Als zulässige Vereinfachung kann über die Länge der mittleren Tragrolle die Last als

konstant und über den Seitenrollen als dreieckig angenommen werden (15). In Verbindung mit den Aussagen von Grimmer (16) sind die so bestimm- baren jeweiligen Tragrollennormalkräfte, die bisher insbesondere bei der Auslegung von hori- zontalkurvengängigen Gurtförderern erfolgreich angewandt wurden – siehe zum Beispiel Lauhoff (17, 18, 19) –, berücksichtigt worden.

Schwingbiegewiderstand U''_G

Der Schwingbiegewiderstand U''_G ist die Verrich- tung der Biegeverlustarbeit des Fördergurts, das heißt der inneren Reibung im Zugträger und den Gummideckplatten, bei jeder Gurtprofiländerung (Bild 4). Ebenso wie bei dem Fördergutwalkwider- stand wird in der Literatur übereinstimmend eine große Abhängigkeit des Schwingbiegewiderstands

- ◊ vom Tragrollenabstand und
- ◊ von der Gurtzugkraft

festgestellt.

Ein größerer Tragrollenabstand führt zu einem Anwachsen, eine größere Gurtzugkraft zu einer Verringerung des Schwingbiegewiderstands (14). Der Einfluss der Fördergeschwindigkeit wird als gering bewertet oder vernachlässigt. Deutliche Unterschiede gibt es zwischen der Verwendung von St-Gurt und Gewebegurten.

Fördergutwalkwiderstand U''_L

Beim Fördergutwalkwiderstand U''_L handelt es sich um innere Reibungsverluste im Fördergut und äußere Reibungsverluste zwischen Förder- gut und Gurt (Bild 4), die bei der Veränderung des Gurtprofils in Längs- und Querrichtung ent- stehen.

In der Literatur gibt es ähnliche rechnerische Ansätze zur Ermittlung des Fördergutwalkwider- stands (13, 14). Zusammenfassend lässt sich fest- stellen, dass der Fördergutwalkwiderstand von

- ◊ den Förderguteigenschaften,
- ◊ der Belastung auf den Tragrollen,
- ◊ dem Tragrollenabstand und
- ◊ von der Gurtzugkraft

abhängig ist.

Mit zunehmender Belastung steigt der Förder- gutwalkwiderstand stark an (14).

Die gutachterliche Auswertung für den Schwing- biege- und Fördergutwalkwiderstand erfolgte in der gemeinsamen Gleichung [9]:

$$U''_L + U''_G = k_{LG} \cdot [(m'_G + m'_L) \cdot g \cdot l]^2 \cdot T^{-1} \dots\dots\dots [9]$$

Die Konstante k_{LG} , die Gurtzugkraft T und die längenbezogene Gurtmasse m'_G wurden jeweils in gleicher Größe eingesetzt. Je nach rechnerischer Betrachtung wurde die längenbezogene Gurtbe- ladung m'_L beziehungsweise die Fördergeschwin- digkeit v, variiert.

Simulationsrechnungen – Auswertung mittels des spezifischen Energiebedarfs W_{spez}

Parameter der Simulationsrechnungen

Um die im Gutachten gestellten Fragen zu beant- worten, kam es nicht darauf an, exakte Aussagen zum tatsächlichen Hauptwiderstand zu prognos-

tizieren. Ausgehend von dem Nennmassenstrom eines fiktiven Gurtförderers mit einem Füllungs- grad von $\phi = 1$ und mit einer Fördergeschwindig- keit von $v = v_{nenn}$, wurde der Massenstrom fiktiv jeweils so reduziert und von gleicher Größe angenommen, dass folgende zwei Fälle zu simu- lieren waren:

- ◊ Fall A: den Füllungsgrad ϕ reduzieren und die Fördergeschwindigkeit $v = v_{nenn} =$ konstant beibehalten.
- ◊ Fall B: den Füllungsgrad $\phi =$ konstant = 1 beibehalten und die Fördergeschwindigkeit v reduzieren.

Hierdurch konnten die von der Gurtgeschwin- digkeit beziehungsweise vom Füllungsgrad unab- hängigen konstanten Kenngrößen beziehungs- weise Parameter aus der Literatur zweckmäßig gewählt und in allen Berechnungsdurchläufen gleichgesetzt werden.

Für die Simulationsrechnungen wurden die gemäß Tabelle 1 aufgelisteten Parameter ange- nommen. Es wurden weiterhin jeweils die Einzel- widerstände getrennt nach Ober- und Untertrum ermittelt. Hierzu mussten zum Teil die aus der Literatur gewonnenen rechnerischen Ansätze auf die angenommene dreiteilige Tragrollenstation für das Obertrum erweitert und auf die Einheits- länge normiert werden.

Spezifischer Energiebedarf W_{spez}

Bekanntlich errechnet sich der Leistungsbedarf P_w eines Gurtförderers aus dem Produkt der Bewe- gungswiderstände F_w und der Fördergeschwin- digkeit v zu:

$$P_w = F_w \cdot v \dots\dots\dots [10]$$

Tabelle 1. Parameter des fiktiven Gurtförderers für Simulationsrechnungen.

Lfd.-Nr.	Bedeutung	Symbol	Einheit	Wert
1	Füllungsgrad	ϕ_{nenn}		1
2	Gurtbreite	B	mm	1 000
3	Streckenlast infolge Gurt	m'_G	kg/m	28,4
4	Massenstrom	$I_{m,nenn}$	kg/s	776
5	Massenstrom pro Stunde		t/h	2 794
6	Schüttdichte des Förderguts	ρ	kg/m ³	1 600
7	Streckenlast infolge Fördergut	m'_L	kg/m	194,03
8	Fördergeschwindigkeit	v_{nenn}	m/s	4,00
9	Achsabstand/Förderlänge	L	m	1 000
10	Obertrum			
11	Muldungswinkel; dreiteilig	λ	°	40
12	Tragrollenabstand	l_o	mm	1 200
13	Durchmesser der Tragrollen	d_{RO}	mm	133
14	Streckenlast infolge Tragrollen	m'_{RO}	kg	15,17
15	Länge der Tragrollen	l	mm	380
16	Füllquerschnitt	A_{th}	m ²	0,1212
17	Untertrum			
18	Einteilig			
19	Tragrollenabstand	l_u	mm	3 000
20	Durchmesser der Tragrollen	d_{RU}	mm	133
21	Streckenlast infolge Tragrollen	m'_{RU}	kg	5,93

Die Dimensionsbetrachtung zeigt das Ergebnis in W beziehungsweise kW. Der Geldbetrag, der an den Energielieferanten zu zahlen ist, ist jedoch die über eine Zeitspanne abgenommene Leistung, also die Arbeit. Die Dimension ist kWh. Zum Vergleich und zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse bot es sich daher an, die aufgewendete Antriebsleistung P_w für den unterschiedlich beladenen Gurtförderer auf den zeitlichen Massenstrom und der Förderlänge L zu beziehen. Das Ergebnis ist als spezifischer Energiebedarf W_{spez} definiert (20).

$$W_{spez} = \frac{P_w}{\dot{m} \cdot L} = \frac{P_w}{m'_L \cdot v \cdot L} = \frac{F_w \cdot v}{m'_L \cdot v \cdot L} \dots\dots\dots [11]$$

Die Einheit lautet: $W/[(kg/s) \cdot m] = (W \cdot s)/(kg \cdot m)$.

Fall A: Fördergeschwindigkeit

v = konstant = v_{nenn}

Bei der Auswertung $v = \text{konstant} = v_{nenn}$ wurde die Fördergeschwindigkeit $v = v_{nenn} = \text{konstant}$ beibehalten. Zur Variation der Betriebsbedingungen wurde der Füllungsgrad φ , also die Belastung der Tragrollen, in gleichen Stufen von 1,0 bis 0,6 reduziert beziehungsweise auf 1,1 vergrößert.

Fall B: Füllungsgrad $\varphi = \text{konstant} = \varphi_{nenn}$

Bei der Auswertung $\varphi = \text{konstant}$ ist der Füllungsgrad φ , also die Belastung der Tragrollen, beibehalten worden. Zur Variation der Betriebsbedingungen wurde die Fördergeschwindigkeit v mit der Maßgabe, dass je Belastungsstufe der gleiche Massenstrom gefördert wird wie in der entsprechenden Simulationsstufe von Fall A, die Förder-

Tabelle 2. Auswertung Fall A: Geschwindigkeit v = konstant = v_{nenn}

Nr.			H.1	H.2	H.3	H.4	H.5	H.6
Berechnungssimulation mit: v = konstant = v_{nenn} ; Füllungsgrad φ wird reduziert								
1.1	Belastungsstufe:	φ_{fiktiv}	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
1.2	„Förderleistung“ bei obiger Belastungsstufe	t/h	1 676	1 956	2 235	2 515	2 794	3 073
1.3	Massenstrom bei obiger Belastungsstufe	I_m kg/s	466	543	621	699	776	854
1.4	Füllungsgrad der Stufe: $\varphi_{fiktiv} = \varphi_{sim}$	φ_{sim}	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
1.5	Streckenlast infolge Fördergut	m'_{Lsim} kg/m	116,42	135,82	155,22	174,63	194,03	213,43
1.6	Volumenstrom bei obigem Füllungsgrad	I_v m ³ /s	0,291	0,340	0,388	0,437	0,485	0,534
1.7	Fördergeschwindigkeit	v_{nenn} m/s	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
1.8	Leistungsbedarf nach DIN 22101: $P_w = F_w \cdot v$	(DIN) P_w kW	178	196	215	233	251	269
1.9	spezifischer Energiebedarf (DIN 22101-Verhältnisse)	(DIN) W_{spez} Ws/kg m	0,348	0,328	0,314	0,303	0,294	0,287
1.10	spezifischer Energiebedarf (Einzelwiderstandsverfahren)	W_{spez} Ws/kg m	0,285	0,283	0,284	0,289	0,294	0,298

Tabelle 3. Vergleich der Simulationsrechnungen.

Nr.			H.1	H.2	H.3	H.4	H.5	H.6
Berechnungssimulation mit: $\varphi = \text{konstant} = \varphi_{nenn}$; Fördergeschwindigkeit v wird reduziert								
2.1	Belastungsstufe:	φ_{fiktiv}	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
2.2	„Förderleistung“ bei obiger Belastungsstufe	t/h	1 676	1 956	2 235	2 515	2 794	3 073
2.3	Massenstrom bei obiger Belastungsstufe	I_m kg/s	466	543	621	699	776	854
2.4	Füllungsgrad der Berechnungsstufe	φ_{sim}	1	1	1	1	1	1
2.5	Streckenlast infolge Fördergut	m'_{Lsim} kg/m	194	194	194	194	194	194
2.6	Volumenstrom bei obigem Füllungsgrad	I_v m ³ /s	0,291	0,340	0,388	0,437	0,485	0,534
2.7	Fördergeschwindigkeit mit: $v = I_v \cdot \varphi_{fiktiv} / A$	v_{sim} m/s	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00	4,40
2.8	Leistungsbedarf nach DIN 22101: $P_w = F_w \cdot v$	(DIN) P_w kW	151	176	201	226	251	276
2.9	spezifischer Energiebedarf (DIN 22101-Verhältnisse)	(DIN) W_{spez} Ws/kg m	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294
2.10	spezifischer Energiebedarf (Einzelwiderstandsverfahren)	W_{spez} Ws/kg m	0,291	0,292	0,293	0,293	0,294	0,295

geschwindigkeit v in Stufen von 4,0 bis 2,4 m/s verringert beziehungsweise auf 4,4 m/s (Spalte H.1 bis H.6, Zeile 1.3 beziehungsweise 2.3 der Tabellen 2 und 3) vergrößert.

Vergleich Fall A mit Fall B

Der Vergleich bezüglich des spezifischen Energiebedarfs W_{spez} , ermittelt nach dem Einzelwiderstandsverfahren (Zeilen 1.10 mit 2.10 von Tabellen 2 und 3), zeigt, dass beim fiktiven Gurtförderer

- im Fall A, bei konstanter Fördergeschwindigkeit $v = v_{nenn}$ und gleichzeitig abnehmendem Füllungsgrad φ ($\varphi < 1,0$) der spezifische Energiebedarf W_{spez} kleiner ist
- als für den Fall B, dass durch Regeln der Fördergeschwindigkeit v ($v < v_{nenn}$) diese reduziert und gleichzeitig der Füllungsgrad $\varphi_{nenn} = 1$ beibehalten wird.

Bei der Belastungsstufe mit einem Füllungsgrad von $\varphi = 1,1$ (siehe Spalte H.6 von Tabellen 2 und 3) hingegen bewirkt eine Erhöhung der Fördergeschwindigkeit v ($v > v_{nenn}$) eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfs.

Zusammengefasst sind die durch Berechnungen simulierten Ergebnisse in Bild 8 dargestellt. Der Verlauf des Graphen mit $v = \text{konstant}$ zum spezifischen Energiebedarf ist dadurch gekennzeichnet, dass ausgehend vom Nennbetriebspunkt ($\varphi = \varphi_{nenn} = 1$) dieser überproportional bis zu einem Minimum abfällt. Bei den gewählten Simulationsparametern liegt dieses Minimum bei der Belastungsstufe $\varphi = 0,7$. Anschließend steigt der spezifische Energiebedarf wieder an. Der Graph

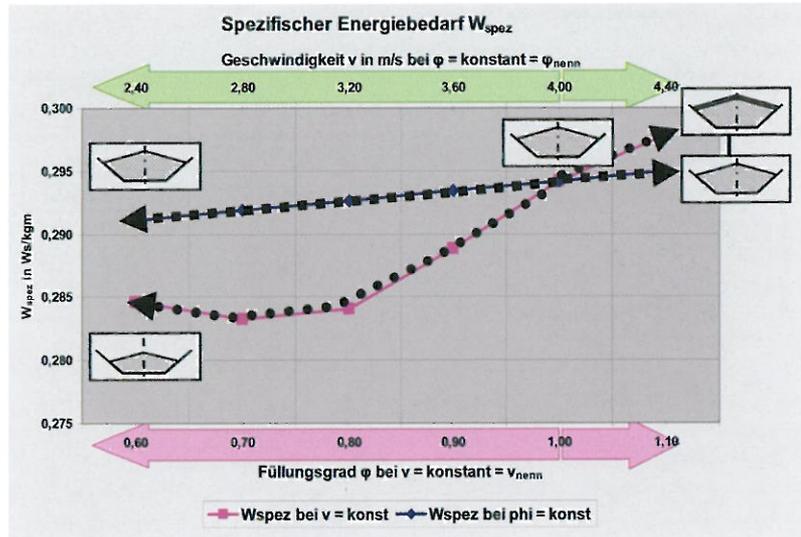
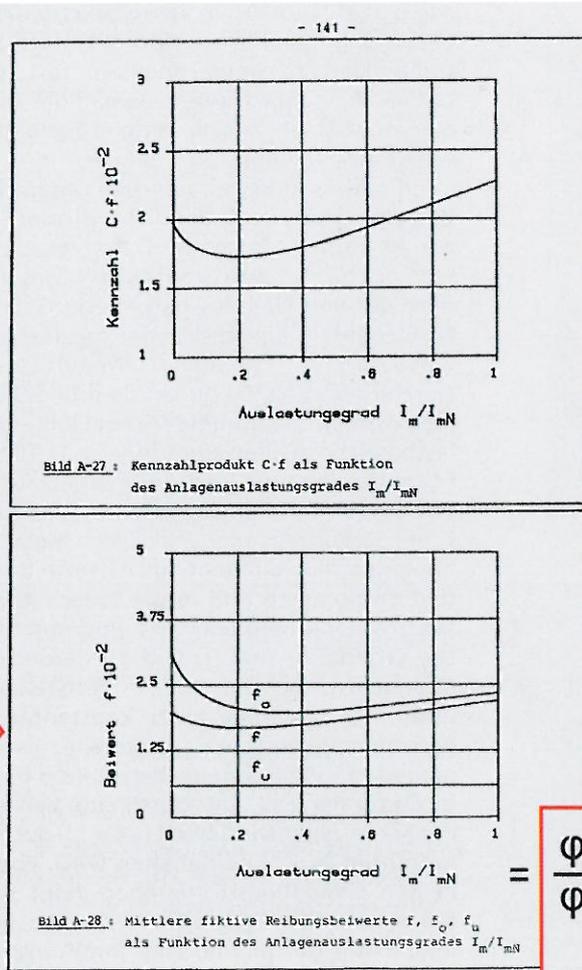
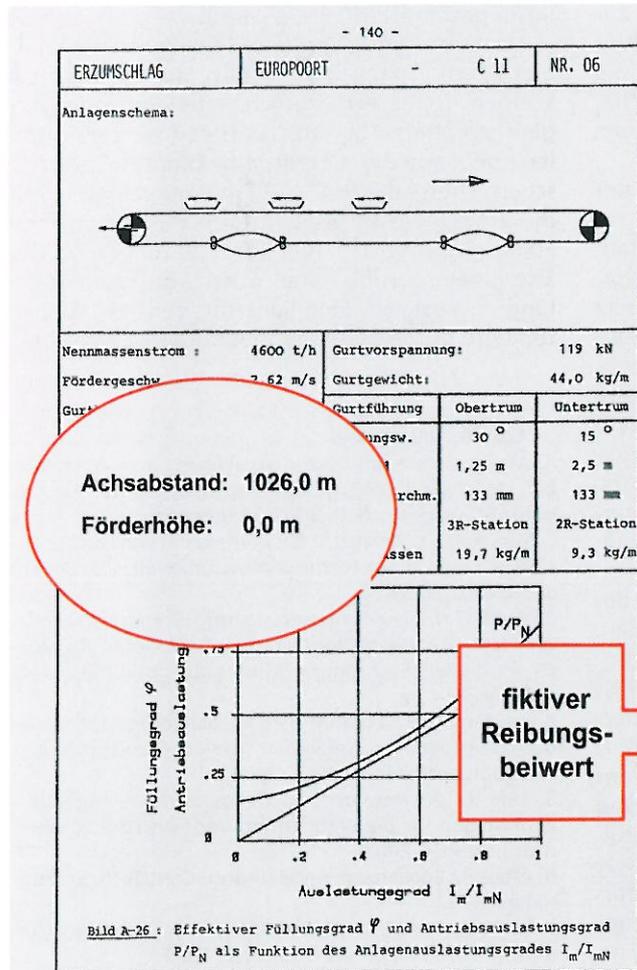


Bild 8. Vergleich der Simulationsrechnungen.

mit $\varphi = \text{konstant}$ fällt nicht so deutlich, im Wesentlichen proportional mit der (kleineren) Fördergeschwindigkeit, ab und liegt für Werte $\varphi \leq 1$ oberhalb der entsprechenden Werte mit konstanter Fördergeschwindigkeit v_{nenn} . Dieses Ergebnis liegt in dem Verhalten des Eindrückrollwiderstands begründet. Dieser hat, wie ausgeführt,

- bei sölhiger Streckenführung eines Gurtförderers einen überragenden Anteil an den Bewegungswiderständen,
- und einen, von der Tragrollenbelastung abhängigen, progressiven Anstieg.

Bild 9. Datenblatt des Gurtförderers Nr. 6 nach (21).



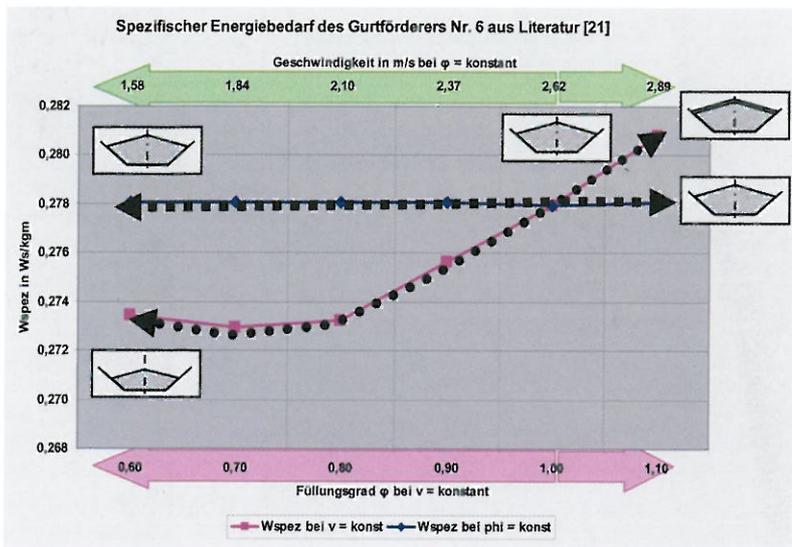


Bild 10. Spezifischer Energiebedarf des Gurtförderers Nr. 6.

Auswertung anderer Arbeiten

Das zuvor vorgestellte Ergebnis bestätigt sich hinsichtlich der qualitativen Aussage auch aus der Literatur. Limberg (21) beschreibt Untersuchungen und messtechnische Erfassungen zu Gurtförderern im stationären Betriebszustand unter real vor Ort herrschenden Betriebsbedingungen. Die Gesamtleistungsaufnahme und der lokale Hauptwiderstand im Ober- und Untertrum wurden gemessen. Gleichzeitig wurden auch durch Lastvariationen die abhängigen Einflussgrößen festgestellt. So sollten insbesondere auch für den Teillastbereich fiktive Reibungsbeiwerte mit Bezug zur DIN 22101 in Betriebskennfeldern zur Verfügung gestellt werden (21). Als Ergebnis stellte Limberg unter anderem fest, dass die fiktiven Reibungsbeiwerte gemäß der DIN 22101 eine zumeist sehr ausgeprägte Abhängigkeit vom effektiven Füllungsgrad φ zeigen.

Er schloss daraus, dass die Gesamtheit der Bewegungswiderstände nicht proportional zu den bewegten Massen ist. Daher wurde im Rahmen des hier vorgestellten Gutachtens insbesondere der von Limberg gemessene Gurtförderer Nr. 6 ebenfalls hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs W_{spez} analysiert. Weitere Daten des Gurtförderers Nr. 6 können dem Bild 9 entnommen werden. In Kennfeldern hat Limberg für Teillastbereiche (Füllungsgrade $\varphi \leq 1$) fiktive Reibungsbeiwerte mit Bezug zur DIN 22101 für diesen Gurtförderer angegeben. Für die gutachterliche Stellungnahme sind diese beladungsabhängigen fiktiven Reibungsbeiwerte dem Kennfeld entnommen und in die Berechnungen des spezifischen Energiebedarfs eingesetzt worden. Die Ergebnisse sind in Bild 10 dargestellt. Signifikant ist auch hierbei die Feststellung, dass unter der Annahme einer konstanten Fördergeschwindigkeit ($v = v_{nenn}$) der spezifische Energiebedarf in Teillastbereichen ($0,6 \leq \varphi < 1$) kleiner ist als für den Fall, dass durch eine Verringerung der Fördergeschwindigkeit ($v < v_{nenn}$) der Nennfüllungsgrad ($\varphi = 1$) beibehalten wird. Ebenso wie in den Simulationsrechnungen zeigt sich, dass bei einem Füllungsgrad $\varphi > 1$, also bei einer übervollen Gurtmulde, eine Erhöhung der För-

dergeschwindigkeit einen geringeren spezifischen Energiebedarf für den Gurtförderer liefert.

Schlussfolgerungen

Die DIN 22101 kann nicht ohne weiteres zur Bestimmung des Antriebsleistungsbedarfs von langen horizontalen Gurtförderern mit unterschiedlichen Füllungsgraden und Fördergeschwindigkeiten herangezogen werden. Entscheidende Parameter, wie insbesondere der fiktive Reibungsbeiwert f und die Streckenlast infolge Fördergut m'_L , werden in der DIN 22101 bei der Berechnung der Hauptwiderstände, die bei Achsabständen von über 1 000 m in der Regel über 90 % ausmachen, als konstante Werte angenommen.

Ausgehend vom Füllungsgrad $\varphi = 1$ wird offenbar in Teillastbereichen der fiktive Reibungsbeiwert gemäß DIN 22101 zunächst kleiner. Simulationsrechnungen, bei denen die Hauptwiderstände nach dem Einzelwiderstandsverfahren ermittelt wurden, zeigen einen überragenden Einfluss des Eindrückrollwiderstands an den Hauptwiderständen von über 60 %. Der Eindrückrollwiderstand steigt progressiv mit der Tragrollenbelastung an. Hingegen ist in der Regel der Einfluss der Fördergeschwindigkeit sowohl beim Eindrückrollwiderstand als auch bei den anderen Einzelwiderständen gering.

Demgemäß wirken sich Tragrollenentlastungen bei hohen Füllungsgraden ($0,6 < \varphi < 1,1$) stärker reduzierend auf die Hauptwiderstände aus als Reduzierungen der Fördergeschwindigkeit im Teillastbereich ($0,6 < \varphi < 1,0$).

Um zutreffende Vergleiche bezüglich des Energiebedarfs von Gurtförderern durchführen zu können, ist es erforderlich, eine sinnvolle Vergleichsgröße zu benutzen. Hierzu wird empfohlen, den aus der Literatur bekannten „spezifischen Energiebedarf“ (20) heranzuziehen. Mit dieser Vergleichsgröße zeigt sich, dass im üblichen Füllungsgradbereich ($0,6 < \varphi < 1,0$) zum Zweck der Energieeinsparung eine Geschwindigkeitsregelung abwegig ist. Eine Senkung der Betriebskosten wird durch diese Maßnahme nicht erreicht.

Quellennachweis

1. Marquardt, Hans-Georg: Auslegung von Antrieben bei geschwindigkeits geregelter Bandanlage. Fachtagung Schüttguttechnik 2003, Magdeburg.
2. Köhler, U.; Lehmann, L.-B.: Bemessung von Gurtförderern mit regelbarer Fördergeschwindigkeit. VDI Bericht 1676, 2002, S. 39-68.
3. Köhler, U.: Dimensionierung und Betriebserfahrungen bei Gurtbandförderern mit regelbarer Bandgeschwindigkeit. Fachtagung Schüttguttechnik 2003, Magdeburg.
4. v.d.Heuvel, B.: Erkenntnisse aus Schadensanalysen an drehzahlstellbaren Antrieben von Gurtbandförderern. In: Schüttgutfördertechnik, 2004.
5. DIN 22101 Entwurf, Gurtförderer für Schüttgut – Grundlagen für die Berechnung und Auslegung, Weißdruck, August 2002.
6. Alles, R.: Fördergurt-Berechnung. ContiTech, Erstaussage, 1979.
7. Lachmann, H.P.: Der Widerstand von Gummigurtförderern. Dissertation TH Hannover, 1954.

8. Vierling, A.: Untersuchungen über die Bewegungswiderstände von Bandförderanlagen. In: f+h – Fördern und Heben 6 (1956), Nr. 2, S. 131-142 und f+h – Fördern und Heben 6 (1956), Nr. 3, S. 249.
9. Hintz, A.: Einfluss des Gurtaufbaus auf den Energieverbrauch von Gurtförderanlagen. Dissertation Universität Hannover, 1993.
10. Schwarz, F.: Untersuchungen zum Eindrückrollwiderstand zwischen Fördergurt und Tragrolle. Dissertation TH Hannover, 1966.
11. Thormann, D.: Vergleichende Betrachtung der Verfahren zur Berechnung der Antriebsleistung von Gummigurtförderern. Dissertation TH Hannover, 1966.
12. Behrens, U.: Untersuchungen zum Walkwiderstand schwerer Förderbandanlagen. Dissertation TH Hannover, 1966.
13. Greune, A.: Energie sparende Auslegung von Gurtförderanlagen. Dissertation Universität Hannover, 1989.
14. Geesmann, F.-O.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Bewegungswiderstände von Gurtförderanlagen. Dissertation TU Hannover, 2001.
15. Grabner, K.: Untersuchungen zum Normalkraftverlauf zwischen Gurt und Tragrollen. Dissertation Montanuniversität Leoben, 1990.
16. Grimmer, Klaus-Jürgen: Auslegung von Gurtförderern mit Horizontalkurven. Seminar Montanuniversität Leoben.
17. Lauhoff, H.: Horizontalkurvengängige Gurtförderer – Ein Schlüssel zur Kostensenkung beim Materialtransport. In: ZKG International 40 (1987), Nr. 4, S. 190-195.
18. Lauhoff, H.: Design of belt conveyors with horizontal curves in special consideration of the belt speed. Beltcon 5, Johannesburg (Südafrika), 1989.
19. Funke, H. ; Hartmann, K. ; Lauhoff, H.: Design and Operating Performance of a Long-Distance Belt Conveyor System with Horizontal Curves and Simultaneous Material Transport in Upper and Lower Strands. In: bulk solids handling 20 (2000), Nr. 1, S. 45-55.
20. VDI 3602 Blatt 2 Entwurf: Gurtförderer für Schüttgut – Antriebe. Betriebsweise, 2001.
21. Limberg, H.: Untersuchung der trumbezogenen Bewegungswiderstände von Gurtförderern. Dissertation TU Hannover, 1988.

Voith Turbo GmbH & Co. KG
Anfahrkomponenten
Voithstraße 1
74564 Crailsheim, Germany
Tel. +49 79 51 32-409
Fax +49 79 51 32-213
anfahrkompnenten@voith.com
voith.de/turbokupplung

VOITH
Engineered Reliability