

Semi-analytischer Ansatz zur Berechnung der Reibtemperaturen in Gleitkettenförderern

Semi-analytical approach for calculating friction temperatures in slide chain conveyors

Ralf Bartsch
Jens Sumpf
Klaus Nendel

*Professur Fördertechnik
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz*

Mit höheren Geschwindigkeiten oder Flächenpressungen erhöht sich die thermische Beanspruchung im Reibkontakt von Gleitketten und Gleitschienen, welche ab einer bestimmten Temperatur zu Erweichung und Aufschmelzen führt. Um dies zu vermeiden, wird ein semi-analytisches Modell zu Berechnung der Reibtemperatur hergeleitet und anhand experimenteller Untersuchungen validiert.

[Gleitkette, Kettenförderer, Kunststoff-Kunststoff-Reibung, Reibtemperatur, Dimensionierung]

At higher speeds or contact pressures, thermal stress in frictional contacts of sliding chains and slide rails increases, which leads to softening and melting at a certain temperature. To avoid this, a semi-analytical model for calculating the friction temperature is derived and validated by means of experimental studies.

[Slide Chain, Chain Conveyor, Thermoplastic Friction, Friction Temperature, Dimensioning]

1 EINLEITUNG

Im Zuge der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Verarbeitungs- und Verpackungsmaschinen werden immer höhere Anforderungen an die eingesetzte Fördertechnik gestellt, mit der der Transfer der Güter zwischen den einzelnen Anlagen realisiert wird. Neben der erhöhten Förderleistung sind zudem ein schmiermittelfreier Betrieb sowie eine hundertprozentige Verfügbarkeit gefordert. Insbesondere für den schmiermittelfreien Betrieb werden in den Förderanlagen vermehrt Ketten und Gleitschienen aus Kunststoff eingesetzt.

Durch die zunehmende Leistungssteigerung entstehen hohe Anforderungen, die bei falscher Auslegung zu mecha-

nischen oder thermischen Versagen der Kunststoff-Bauteile im Fördersystem führen können [Aue06, Mit08, Ras12]. Das mechanische Versagen äußert sich meist als Bruch der Kette, während das thermische Versagen überwiegend als ein Aufschmelzen der Gleitschiene sichtbar wird. Beiden Versagensarten kann das Phänomen Verschleiß vorausgehen. Während das mechanische Versagen auf hohe Kräfte im Kettenstrang zurückzuführen ist, ist das thermische Versagen durch die reibungsbedingte Erwärmung des Gleitkontaktes zwischen Kette und Gleitschiene begründet. Die Erwärmung führt zu einer Änderung der Materialeigenschaften, wodurch Kunststoffe erweichen und sich die mechanischen Eigenschaften verschlechtern. So hat die Reibtemperatur auch einen indirekten Einfluss auf das mechanische Versagen.

Die Reibtemperatur zwischen der Kette und der Gleitschiene kann als geeignetes Maß zur thermischen Dimensionierung gesehen werden. Ähnlich der zulässigen Kettenzugkraft kann ein thermischer Materialkennwert, zum Beispiel die Erweichungstemperatur, als Grenzwert bzw. Auslegungskriterium bestimmt werden.

Mit einer Methode zur Berechnung der Reibtemperatur kann eine Lücke in der Dimensionierung von Gleitkettenfördersystem geschlossen werden. Zum einen lässt sich dadurch Verschleiß sowie Versagen reduzieren bzw. vermeiden, was zu einer längeren Betriebsdauer und besserer Wirtschaftlichkeit von Förderanlagen führt. Zum anderen können die Systeme bis an die Grenztemperaturen ausgelegt werden, um so die maximale Förderleistung zu erzielen.

In der Literatur sind viele Betrachtungen und Ansätze zur Berechnung der Kontakttemperatur einer trockenlaufenden Reibpaarung zu finden [Blo37, CaJ59, Ash91, Ken01]. Der überwiegende Teil der Modelle wird an Berechnungen evaluiert und verglichen, bei denen das Mate-

rial der zwei Körper aus Metall besteht. Es gibt einige wenige Arbeiten, die eine Metall-Kunststoff-Paarung behandeln. Modelle für Kunststoffe bzw. deren Nachweis an Kunststoffpaarungen können im derzeitigen Stand der Technik nicht gefunden werden. Mit fortschreitenden computergestützten Rechenmöglichkeiten werden die Modelle aufwändiger [Hou00, Lar04, Osm09, Cou14] und erfordern Software zum numerischen Lösen mathematischer Probleme bzw. Computeralgebrasysteme. Anbieter von Fördersystemen stellen zwar zunehmend Software zur Auslegung der Systeme bereit, die solch komplexen Berechnungen ermöglichen, jedoch sind in der ingenieurtechnischen Praxis eingängige und schnelle Rechnungen üblich. Erfolgt eine thermische Auslegung in einer Software, dann erfolgt diese meist nach dem ungenügenden PV-Wert.

Das Ziel ist es, einen Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Temperaturentwicklung im Reibkontakt einer Kunststoff-Kunststoff-Gleitpaarung zu erlangen, um damit eine eingängige analytische Abschätzung der auftretenden Temperatur im Reibkontakt zu ermöglichen und folglich ein neues Auslegungskriterium für Gleitketten-Fördersysteme zu schaffen.

2 ANALYSE DER BELASTUNGEN

Für die Analyse und die späteren Untersuchungen wird ein Gleitketten-Fördersystem mit Multiflex-Ketten unter Beachtung einer praxisrelevanten Materialpaarung ausgewählt und der Fokus auf den horizontalen Kurvenabschnitt gelegt (siehe Abbildung 1). An diesem System werden der Aufbau, dessen Reibkontakte, die mechanische Dimensionierung und die Temperaturen untersucht.

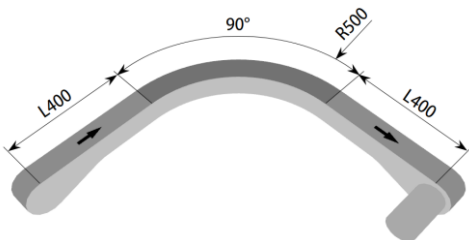


Abbildung 1. Layout des Multiflex-Gleitketten-Förderers

2.1 MECHANISCHE ANALYSE

Die Reibkontakte unterteilen sich in Normal- und Radialkontakt, die bei gleicher Position in der Gleitkurve je nach Kettenzugkraft sowie Gutgewicht unterschiedliche Belastungen erfahren [Aue06, Sum14]. Bei der Analyse der Kräfte und der auftretenden Flächenpressungen in den Kontakten wird deutlich, dass in der Kurve die größte Zugkraftsteigerung auftritt und die Radialpressung ein Vielfaches der Normalflächenpressung entspricht (vergleiche Abbildung 2). Die Radialkraft kann bis zu 100 N annehmen und die radiale Flächenpressung bis zu 2,5 MPa erreichen.

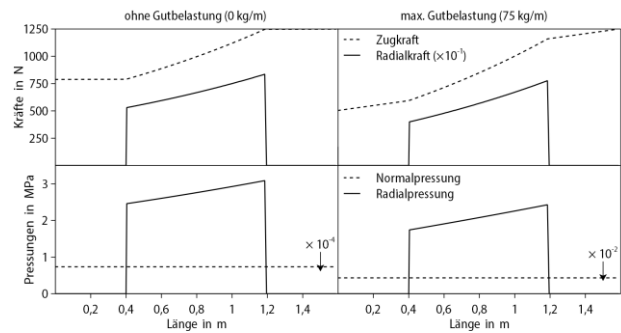


Abbildung 2. Verlauf der Zug- und Radialkraft (oben) sowie der Flächenpressungen (unten) in einem Multiflex-L-Layout ohne Gutbelastung (links) sowie mit maximaler Gutbelastung (75 kg/m, rechts)

2.2 THERMISCHE ANALYSE

Aufgrund der Reibung zwischen Kette und Gleitschiene entsteht in den Reibungskontakten Wärme, die je nach Belastungskollektiv unterschiedliche Temperaturen hervorruft. Die quantitative Wärmeentwicklung in dem Kurvenabschnitt wird in Abbildung 2 dargestellt, wobei die Reibkontakte als Ursprung der Wärme deutlich werden. Dass der innere Gleitkontakt eine höhere Temperatur als der äußere Gleitkontakt aufweist, verdeutlicht den großen Einfluss der Radialkraft auf die Temperatur in der Gleitkurve.

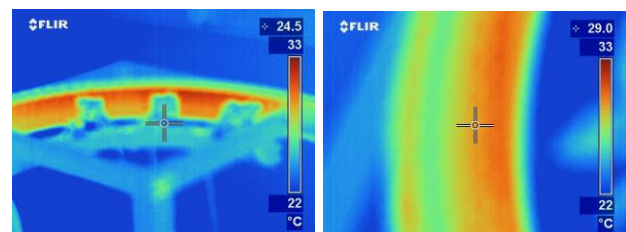


Abbildung 3. Thermographische Aufnahme eines Kurvensegmentes eines Multiflex-Förderers (links: Innenseite der Kurve, rechts: Draufsicht auf die Kette im Obertrum)

Hohe Temperaturen in den Kunststoffbauteilen führen zu einer Schwächung der mechanischen Eigenschaften, so auch zu einer Erweichung des Materials. Dies kann neben einer Senkung des Reibwertes auch das Auftreten von Verschleiß begünstigen. Überschreitet die Temperatur im Gleitkontakt den Schmelzpunkt eines der beiden Gleitpartner tritt in jedem Fall Verschleiß auf. Das Verschleißbild kann ein Materialabtrag oder eine Materialverschleppung in Form von Schlieren sein.

3 REIBTEMPERATUR-MODELL

Die Gleitkontakte in Gleitketten-Fördersystemen sind gleichbleibender Geschwindigkeit periodisch wiederkehrend. Laut der wissenschaftlichen Literatur erreicht die Kontakttemperatur zwischen zwei gleitenden Körpern ihre maximale Temperatur im stationären Zustand [Jae42, GeW85]. Unter diesen Annahmen erfolgt die Aufstellung eines abstrakten Kette-Gleitschiene-Systems, an dem das semi-analytische Modell zur Berechnung der Kontakttemperatur

$$T_K = T_U + C_K \dot{q}_R$$

mit der Umgebungstemperatur T_U , dem Kontaktkoeffizienten C_K und der Reibleistungsdichte \dot{q}_R hergeleitet wird. Diese Gleichung wurde bereits ohne Herleitung postuliert [Lan73], wobei C_K als Konstante für die thermischen Eigenschaften der Materialien sowie für die geometrische Konfiguration gesehen wurde. In der Herleitung setzt sich der Kontaktkoeffizient

$$C_K = \frac{\psi}{k_1 \psi + k_2 + \alpha_U (1 - \psi)}$$

aus einem Kontaktanteil ψ , den zwei Wärmedurchgangswerten k_1 für die Kette und k_2 für die Gleitschiene sowie dem geschwindigkeitsabhängigen Wärmeübergangswert zur Umgebung α_U zusammen. Die Wärmedurchgangswerte, die von der Geometrie und der Wärmeleitfähigkeit der Reibpartner sowie ihrer Anbauten (u. a. das Gestell) abhängig sind, müssen mit numerischen Verfahren wie zum Beispiel mit einer FEM bestimmt werden. Die Reibleistungsdichte

$$\dot{q}_R = \mu p v,$$

die im Kontakt durch Reibung entsteht, ist wiederum vom Reibwert μ , der Flächenpressung p und der Gleitgeschwindigkeit v abhängig.

In einer Empfindlichkeitsanalyse wird ermittelt, dass die Gleitschiene und das Führungsprofil einen maßgeblichen Einfluss auf die Wärmeentwicklung im Reibkontakt ausüben. Durch Verbesserung des Wärmedurchgangs dieser stationären Körper kann die Reibtemperatur gesenkt werden.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Mit dem neuen Modell wird die Abhängigkeit der Reibtemperatur von der Gleitgeschwindigkeit, der Flächenpressung, des Reibwertes sowie der Gleitkörperkonfiguration deutlich. Daher werden diese Abhängigkeiten in experimentellen Untersuchungen auf einem Tribo-Prüfstand [Sum11] und in einer Testförderstrecke systematisch untersucht. Beide Versuchsaufbauten sind in Abbildung 4 dargestellt. Als Gleitkörperkonfiguration lassen sich die

Dicke sowie die Wärmeleitfähigkeit von Proben variieren, die auf dem Prüfstand getestet werden. Das Versuchsprogramm auf dem Prüfstand gliedert sich in drei Hauptuntersuchungen, den Stufentests, den 24h-Tests und den 24h-Parametertests. Dabei werden die Reibwerte, die Reibtemperaturen sowie der Verschleiß in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit und der Flächenpressung untersucht. Als Reibpartner kommen die zwei in Förderanlagen am häufigsten eingesetzten Werkstoffe Polyoxymethylen (POM) und hochmolekulares Polyethylen (PE-UHMW) zum Einsatz. Beide Materialien liegen in reiner Form vor. Zusätzlich wird ein gleitadditiviertes PE-UHMW, hier PE-Compound genannt, in die Untersuchungen einbezogen.

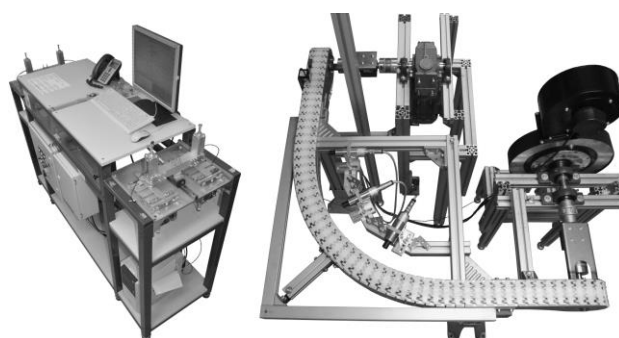


Abbildung 4. Prüfstand Triboboxer (links) und Testförderstrecke (rechts)

Während beim Stufentest ein Parameter während eines Versuchs schrittweise erhöht wird, stellt bei den 24h-Tests jede Parameteränderung einen eigenständigen Versuch dar. Für die 24h-Parametertest werden innerhalb der in den 24h-Test ermittelten Grenzen einzelne Belastungskombinationen ausgewählt. In den 24h-Parametertests wird nur das reine PE-UHMW mit unterschiedlichen Dicken und Wärmeleitfähigkeiten analysiert. In der Testförderstrecke wird die Reibtemperatur in Abhängigkeit von der Kettengeschwindigkeit und der Kettenzugkraft ermittelt. Über die Kettenzugkraft können die Flächenpressung und der Reibwert näherungsweise bestimmt werden.

In den Versuchen auf dem Prüfstand kann ein grundsätzlich ähnliches Kennwertverhalten von Reibwert, Temperatur und Verschleiß mit veränderlicher Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung zwischen den Stufentests und den 24h-Tests festgestellt werden. Die Reibwerte und Reibtemperaturen der 24-Tests sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Für die zwei Reibpaarungen POM gegen PE-UHMW und PE-Compound stellt sich eine Temperaturgrenze von ca. 80 °C heraus, die mit der Verschleißgrenze korreliert. Die Verschleißgrenze ist dabei der Übergang von akzeptablen zu übermäßigen Verschleißwerten, welche in einer festgelegten Verschleißbeurteilung definiert werden. Der übermäßige Verschleiß äußert sich im Aufschmelzen des Polyethylen. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit sowie Flächenpressung steigt die Reibtemperatur und fällt nach Erreichen der Temperaturgrenze wieder. Für das PE-UHMW ist eine Reibwertabnahme zu

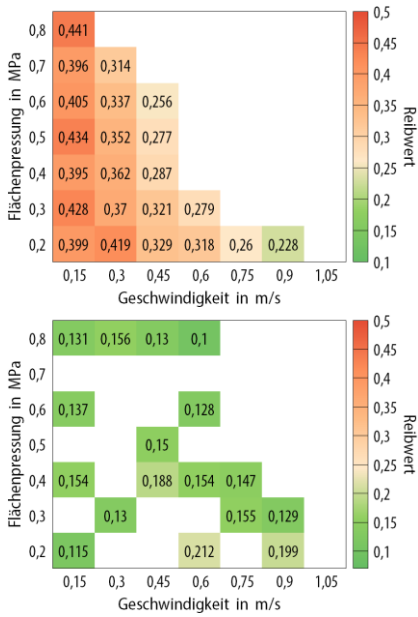


Abbildung 5. Gemessene Reibwerte im 24h-Test
 oben: POM gegen PE UHMW
 unten: POM gegen PE-Compound

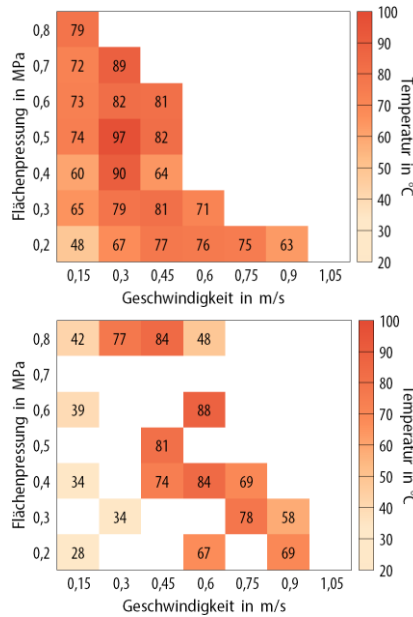


Abbildung 6. Gemessene Reibtemperaturen im 24h-Test
 oben: POM gegen PE UHMW
 unten: POM gegen PE-Compound

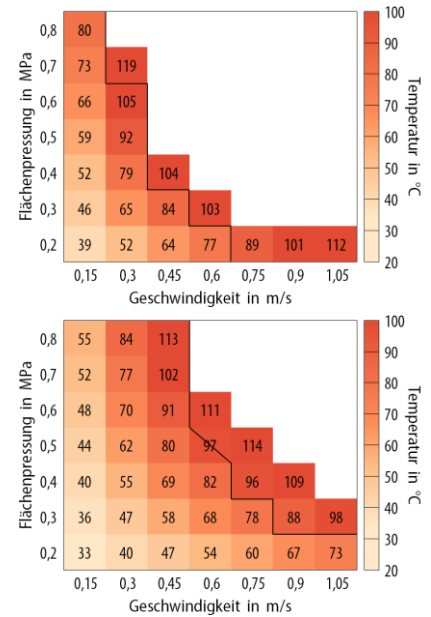


Abbildung 7. Berechnete Reibtemperaturen. Die durchgehende Linie stellt die ermittelte Verschleißgrenze dar.
 oben: POM gegen PE UHMW
 unten: POM gegen PE-Compound

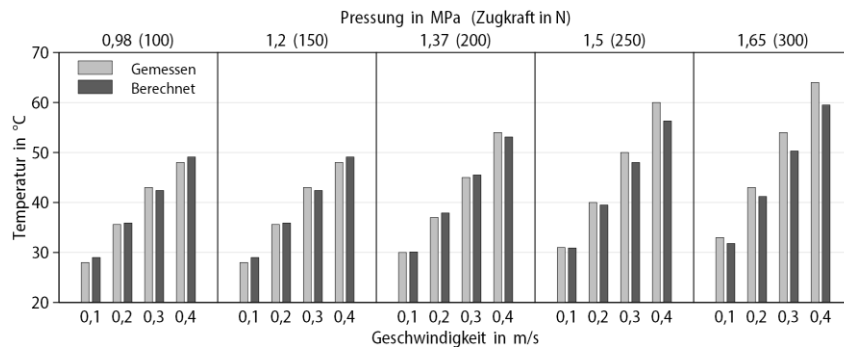


Abbildung 8. Gemessene und berechnete Reibtemperaturen in Abhängigkeit von der Flächenpressung und Geschwindigkeit im Testförderer

beobachten, während der Reibwert für das PE-Compound nur geringfügig abfällt und teilweise als konstant gesehen werden kann. Der Reibwert von PE-UHMW ist deutlich höher als der von PE-Compound. Mit zunehmender Probenstärke steigen die Reibtemperatur und geringfügig der Reibwert. Mit Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sinkt die Reibtemperatur. Allgemein lässt sich feststellen, dass der Verschleiß von PE-UHMW von der Temperatur abhängig ist.

5 VALIDIERUNG DES MODELLS

Mit den experimentell gewonnen Reibtemperaturen wird das Modell abgeglichen. Nachteilig erweist sich dabei

das Reibwertverhalten, welches von der Temperatur indirekt beeinflusst wird. Aufgrund des sinkenden Reibwertes werden in höheren Belastungskombinationen meist geringere Temperaturen berechnet. Jedoch wird herausgefunden, dass mit einem konstanten Reibwert gute Modellergebnisse erzielt werden und sich so eine definierte Temperaturgrenze mit der Verschleißgrenze überdeckt. Als geeigneter konstanter Reibwert wird der maximal auftretende Reibwert der Gleitpaarung ermittelt. Als Temperaturgrenze dient die niedrigere der zwei Erweichungstemperaturen der Gleitpartner. Beispielhaft sind die gemessenen und berechneten Reibtemperaturen in Abbildungen 6 und 7 für den Prüfstand und in Abbildung 8 für die Testförderstrecke dargestellt.

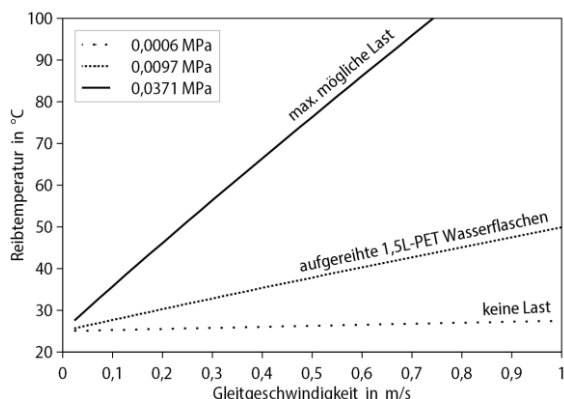


Abbildung 9. Berechnete Reibtemperaturen im Normalkontakt (gerader Streckenabschnitt) des Multiflex-Fördersystems in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit und der Kontakt-
 druckung

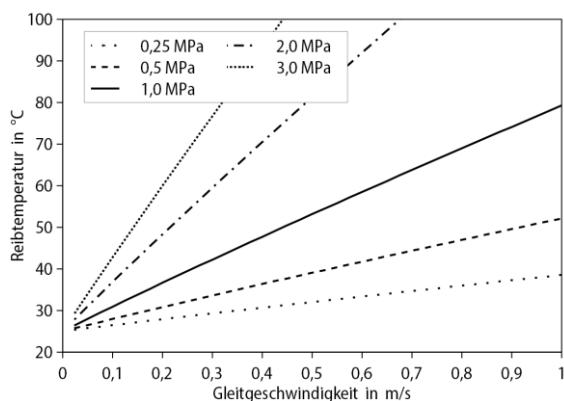


Abbildung 10. Berechnete Reibtemperaturen im Radialkontakt (rechts, Kurvenabschnitt) des Multiflex-Fördersystems in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit und der Kontakt-
 druckung

6 ANWENDUNG DES MODELLS

Bei der Dimensionierung eines Gleitketten-Fördersystems müssen die Wärmedurchgangswerte und der Reibwert vorgeben werden. Diese Werte ermittelt zum Beispiel ein Systemanbieter und stellt sie dem Anwender zur Verfügung. Der als konstant angenommene Reibwert der Gleitpaarung kann auch als Modellkennwert der Reibpaarung gesehen werden. Es wird vorgeschlagen, den maximal bekannten Reibwert der Materialpaarung zu verwenden. Während sich die Flächenpressung in geraden Streckenabschnitten mittels der Gewichtskraft des Fördergutes und der Kontaktfläche berechnen lässt, muss die Flächenpressung in Kurvenabschnitten mit Hilfe der Hertzschen Pressung, in die unter anderem die aus der vorausgehenden mechanischen Dimensionierung ermittelte Radialkraft einfließt, berechnet werden. Der Kontaktanteil wird über das Verhältnis von Kontaktlänge zu Kettenteilung bestimmt. Für Multiflex-Ketten im Kurvenabschnitt stellte sich der dimensionslose Kehrwert der Kettenteilung als geeignet heraus. Die berechneten Reibtemperaturen in einem Multiflex-Fördersystem sind in Abbildungen 9 und 10 in

Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit und der Kontakt-
 druckung dargestellt.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden die Gleitkontakte und die mechanischen sowie thermischen Belastungen in Gleitketten-Fördersystemen analysiert. Darauf aufbauend wurde ein Berechnungsmodell zur Abschätzung der maximal auftretenden Reibtemperatur hergeleitet und Einflüsse auf das Modell untersucht. Über umfangreiche tribologische Versuche auf einem Prüfstand sowie Temperaturmessungen in einer Testförderstrecke wurde das Modell abgeglichen. Weitere Validierungen an einem Fördersystem mit unterschiedlichen Förderlasten oder anderen Geometrien der Ketten und Gleitschienen müssen noch durchgeführt werden.

Mit dem neuen Ansatz können Gleitketten-Fördersysteme in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Flächenpressung unter Vorgabe der Wärmedurchgänge, des Kontaktanteils und des Reibwertes der Gleitpaarung thermisch dimensioniert werden. Dazu wird die berechnete Temperatur mit einer maximal zulässigen Temperatur verglichen. Als Temperaturgrenzwert kann zum Beispiel die niedrigste Erweichungstemperatur beider Gleitpartner angewendet werden. Diese Methode wird als thermisches Auslegungskriterium vorgeschlagen.

Der neue Ansatz lässt sich für alle Systeme mit einem periodisch wiederkehrenden gleitenden Reibkontakt hypothetisch nutzen. Neben der Anwendung auf tribologischen Prüfständen oder Gleitketten-Förderern sind auch Mattenketten-Förderer oder das System Zahnriemen-Abstützung vorstellbar. Mit der vorgeschlagenen Methode ist die Optimierung oder Neuentwicklung von Gleitketten-Fördersystemen möglich.

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt wurde von der Röchling Stiftung GmbH gefördert.



LITERATUR

- [Ash91] ASHBY, M. F.; ABULAWI, J.; KONG, H. S.: Temperature Maps for Frictional Heating in Dry Sliding. In: Tribology Transactions Bd. 34 (1991), Nr. 4, S. 577–587
- [Aue06] AUERBACH, P.: Zur Beanspruchung und Lebensdauer raumgängiger Gleitketten aus Kunststoffen. Chemnitz, TU Chemnitz, 2006
- [Blo37] BLOK, H.: Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions. In: Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers - General Discussion of Lubrication: London Bd. 2 (1937), S. 222–235
- [CaJ59] CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C.: Conduction of heat in solids. Oxford: Clarendon Press, Oxford University Press, 1959
- [Cou14] COULIBALY, M.; CHASSAING, G.; PHILIPPON, S.: Thermomechanical coupling of rough contact asperities sliding at very high velocity. In: Tribology International Bd. 77 (2014), S. 86–96
- [GeW85] GECIM, B.; WINER, W. O.: Transient Temperatures in the Vicinity of an Asperity Contact. In: Journal of Tribology Bd. 107 (1985), Nr. 3, S. 333
- [Hou00] HOU, Z.B.; KOMANDURI, R.: General solutions for stationary/moving plane heat source problems in manufacturing and tribology. In: International Journal of Heat and Mass Transfer Bd. 43 (2000), Nr. 10, S. 1679–1698
- [Jae42] JAEGER, J. C.: Moving sources of heat and the temperature at sliding contact. In: Proceedings of the Royal Society of New South Wales Bd. 76 (1942), S. 203–224
- [Ken01] KENNEDY, FRANCIS E.: Frictional Heating and Contact Temperatures. In: BHUSHAN, B. (Hrsg.): Modern tribology handbook, Mechanics and materials science series. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001 – ISBN 978-0-8493-8403-5
- [Lar04] LARAQI, N.; BAIRI, A.; SÉGUI, L.: Temperature and thermal resistance in frictional devices. In: Applied Thermal Engineering Bd. 24 (2004), Nr. 17–18, S. 2567–2581
- [Lan73] LANCASTER, J. K.: Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance. In: Tribology (1973), S. 219–251
- [Mit08] MITZSCHKE, F.: Eigenschaftsprofile neuartiger faserverstärkter Kunststoffgleitketten für den Stückguttransport. Chemnitz, TU Chemnitz, 2008
- [Osm09] OSMAN, T.; BOUCHEFFA, A.: Analytical solution for the 3D steady state conduction in a solid subjected to a moving rectangular heat source and surface cooling. In: Comptes Rendus Mécanique Bd. 337 (2009), Nr. 2, S. 107–111
- [Ras12] RASCH, F.: Reibungsminderung an Stütz- und Führungselementen für Kunststoffketten. Chemnitz, TU Chemnitz, 2012
- [Sum11] SUMPF, J.; SCHUMANN, A.; WEISE, S.; NENDEL, K.: Neues Prüfverfahren zur Reibungs- und Verschleißbewertung von Kunststoff-Gleitpaarungen. In: Tribologie und Schmierungstechnik Bd. 58 (2011), Nr. 4, S. 47–50
- [Sum14] SUMPF, J.; BANKWITZ, H.; NENDEL, K.; RASCH, F.: Novel calculation method for chain conveyor systems (2014)