

Lineardirektantrieb für biegeschlaffe Transportbänder zur Reduzierung der Gurtzugkraft

Linear direct drive for light conveyor belts to reduce tensile forces

Malte Kanus^{a)}
Alexander Hoffmann^{b)}
Ludger Overmeyer^{a)}
Bernd Ponick^{b)}

^{a)} Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Leibniz Universität Hannover

^{b)} Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover

Kurzbeschreibung: Aufgrund von steigenden Anforderungen bezüglich des Massenstroms und der Transportlängen nimmt der Einsatz von Zwischenantrieben bei Stetigförderern sowohl von Stück- als auch von Schüttgut fortlaufend zu. Zwischenantriebe ermöglichen die Einleitung von Antriebskräften entlang der Strecke und führen somit zu einer Reduzierung der maximalen Gurtzugkraft. In diesem Beitrag wird ein neuartiges Antriebskonzept für biegeschlaffe Transportbänder vorgestellt. Zur Reduzierung der Gurtzugkraft werden Zwischenantriebe in Form von Lineardirektantrieben über die Transportstrecke verteilt eingesetzt. Im ersten Abschnitt wird ein neuartiger Gurtaufbau vorgestellt, der eine Implementierung der Läuferelemente des Lineardirektantriebes ermöglicht. Dieser zeichnet sich zum einen durch das nur geringe zusätzliche Gewicht der Läuferelemente aus. Zum anderen weist das Transportband im Vergleich zu konventionellen Transportbändern nur eine geringfügig höhere Biegesteifigkeit auf, wodurch kleine Umlenktrommeldurchmesser realisiert werden können. Im zweiten Abschnitt wird das Antriebskonzept in Form eines Linearhybridmotors näher erläutert. Abschließend wird ein Demonstrator vorgestellt. Dieser wird durch zwei verteilte Linearmotoren angetrieben und weist den zuvor beschriebenen Gurtaufbau auf. Hierbei wird auf die experimentelle Validierung der Funktion des Demonstrators eingegangen.

[Schlüsselwörter: Lineardirektantrieb, biegeschlaffe Transportbänder, Linearhybridmotor, Flussmodulationsprinzip, Reduzierung der Gurtzugkraft]

Abstract: Due to increasing demands of the mass flow and transport lengths, the use of intermediate drives for continuous conveyors for both packaged and bulk materials is constantly growing. Intermediate drives allow the transmission of drive forces along the conveyor and thus lead to a reduction in the maximum belt tensile force.

This paper presents a new drive concept for light conveyor belts. To reduce the belt tensile force, intermediate drives in form of electric linear direct motors are allocated along the transport distance. In the first part, a new belt design is presented which enables the implementation of the linear motor's runner elements. The conveyor belt is characterized by low additional weights of the runner elements and has only a slightly higher bending stiffness compared to conventional conveyor belts, whereby small pulley diameters can be achieved. The second part explains the drive concept in the form of an Integrated Linear Flux Modulating Motor in more details. Finally, a demonstrator is presented. The demonstrator is driven by two distributed linear motors and has the belt structure mentioned before. Finally, the functional testing of the demonstrator is described.

[Keywords: Linear Direct Drive, Light Conveyor Belts, Integrated Linear Motor, Flux modulating motor, Linear switched-flux motor, Reducing tensile forces]

1 AUSGANGSSITUATION

Die Fördermenge in Logistikzentren, Flughäfen oder Paketzentren weist einen weiter zunehmenden Trend an Massenströmen auf. Konventionelle Gurtförderer in diesen Bereichen bestehen aus mindestens zwei Umlenktrommeln, wobei eine angetrieben wird, einem Gleittisch zur Abstützung des Stückguts, einem Rahmen und einem Fördergurt. Der Fördergurt dient hierbei als endlos umlaufendes Transportmittel. Die Kraft zur Bewegung des Fördergurts wird hierbei durch eine reibschlüssige Verbindung der angetriebenen Umlenktrommel und des Fördergurts übertragen, was eine hohe Anpresskraft zwischen den Elementen voraussetzt. Diese wird durch eine hohe Vorspannung des Gurts erreicht, was bereits im statisch unbelasteten Zustand einer großen Festigkeit des Gurts bedarf. Die

Gurtzugkraft nimmt zusätzlich durch auftretende Widerstände aufgrund des Transports von Stückgütern entlang des Umlaufs zu. Die größte Gurtzugkraft (F_O) wirkt hierbei beim Auflauf auf die Antriebstrommel. Dies ist schematisch in der Abbildung 1 oben für den konventionellen Kopfantrieb dargestellt. Die Gurtzugkraft wird entlang des Umfangs der Antriebstrommel auf das Niveau der Vorspannkraft (F_U) reduziert. Der Kraftverlauf zwischen F_O und F_U ist abhängig vom Reibungskoeffizienten μ_H und dem Umschlingungswinkel α und kann nach der Euler-Eytelwein-Formel bestimmt werden [Gro12]:

$$F_O = F_U \cdot e^{\mu_H \alpha} \quad (1)$$

Abbildung 1 verdeutlicht, dass die maximale Gurtzugkraft mit jeder Art von Zwischenantriebslösung reduziert werden kann. Dies kann genutzt werden, um bei gleichbleibender Gurtauslegung einen vergleichsweise höheren Massenstrom oder eine größere Transportlänge zu realisieren.

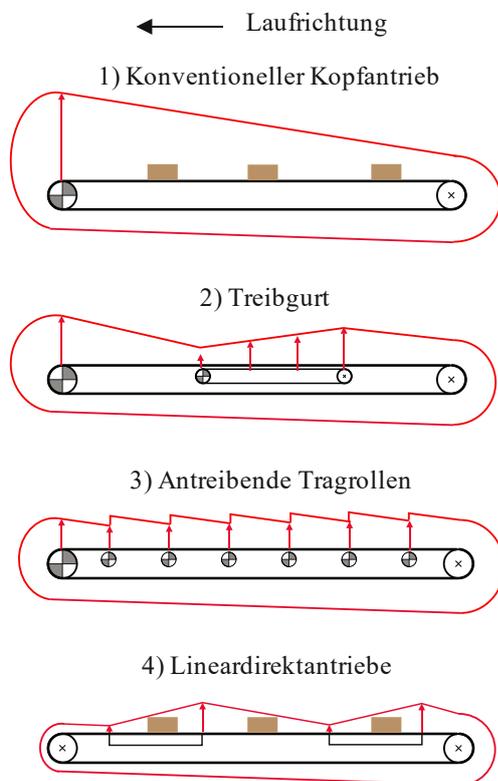


Abbildung 1: Schematischer Vergleich des Gurtzugkraftverlaufs zwischen konventionellem Kopfantrieb und unterschiedlichen Zwischenantriebslösungen nach [All76]

Beim Treibgurt wird ein zweiter kleinerer Gurtförderer zur Unterstützung eingesetzt. Hierbei wird die Antriebskraft über den Reibschluss zwischen den Gurten übertragen. Die antreibenden Tragrollen können alternativ dazu punktuell über die Förderlänge verteilt werden. Ähnlich wie beim Kopfantrieb ist die Antriebskraft vom Reibkoeffizienten zwischen Trommel und Gurt sowie dem hier sehr

geringen Umschlingungswinkel anhängig. Beide Zwischenantriebslösungen setzen für eine kontinuierliche Krafteinleitung eine hohe und stetige Anpresskraft voraus. Aus diesem Grund eignen sich diese Zwischenantriebe nur für einen kontinuierlichen Transport von Schüttgütern. Des Weiteren werden sie unterstützend zum Kopfantrieb eingesetzt, weshalb eine hohe Vorspannung weiterhin notwendig ist. Der Antrieb mit Hilfe von Lineardirektantrieben vermeiden diese Nachteile. Sie lassen sich ebenfalls entlang der Förderstrecke verteilt in das System einbinden, benötigen jedoch keine Auflast, um eine hohe Antriebskraft einbringen zu können. Dies ermöglicht den Transport von diskontinuierlichen Gütern wie zum Beispiel Paketen. Lineardirektantriebe für den Antrieb von Gurtförderern zu nutzen wurde bereits mehrfach versucht, was durch verschiedene Forschungsansätze aber vor allem durch eine Vielzahl an Patenten belegt werden kann. In [All76] wurden bereits zwei verschiedene Zwischenantriebslösungen erforscht. Neben den angetriebenen Tragrollen wurde hier der Einsatz von Linearmotoren an Gurtförderern im Schüttgutbereich untersucht. In [Geb74], [Noa83], [Jou70], [Keu73], [Woo81], [Klet97] und [Lee09] werden unterschiedlichste Läuferelemente beschrieben und wie diese in den Gurt implementiert werden können. Die meisten sehen hierbei Kurzschlussläufer von linearen Induktionsmotoren vor, die einvulkanisiert werden. Diese bestehen zum Teil aus Blechen oder metallischen Gewebepplatten. [Lee09] zeigt eine kostenintensive Lösung mit Seltenerd magneten, die als Läuferelemente integriert werden. Für ein Modulband zeigt [Luc17] eine Ausführung mit integrierten Sekundärteilen des Motors.

Der Einsatz von Lineardirektantrieben ermöglicht es, den Gurt verteilt über die Transportstrecke anzutreiben. Durch den Wegfall des Kopfantriebs, der einen hohen Anpressdruck an der Trommel benötigt, kann die Vorspannung des Systems deutlich verringert werden. Dies ist in Abbildung 1 unten dargestellt. Das Gurtzugkraftniveau ist an der linken Umlenkrolle deutlich geringer als bei der konventionellen Antriebslösung.

2 GURTAUFBAU ZUR IMPLEMENTIERUNG DER LÄUFERELEMENTE

Zum Antrieb des Gurts mittels Linearmotoren ist eine Einleitung der Antriebskraft in den Gurt notwendig. Hierfür muss das Sekundärteil des Motors, im Folgendem als Läuferelement bezeichnet, mit dem Gurt kraftschlüssig gekoppelt werden. Wie im Abschnitt 1 bereits erläutert, gibt es hierzu umfangreiche Forschungsansätze, die die prinzipielle Funktion eines solchen Aufbaus nachweisen. Hierzu ist [Rad18] besonders hervorzuheben, auf dessen grundlegenden Ergebnissen dieses Projekt aufbaut. Die Patentschriften beschreiben meist Lösungen, die sich negativ auf die Laufeigenschaften des Gurts auswirken, in dem zum Beispiel der Laufwiderstand durch die Umlenkung der Läuferelemente signifikant erhöht wird. Ein Teilziel des

Gurtaufbau ist die Vermeidung einer solchen signifikanten Erhöhung der Biegesteifigkeit. Die zweite Problemstellung liegt in der Art der Kopplung zwischen Gurt und Läuferelementen. Abbildung 2 oben zeigt einen Teil des Aufbaus aus [Rad18]. Hierbei sind die an der Laufseite des Gurts befestigten Läuferelemente zu erkennen, welche mit Hilfe eines Polyurethanprofils (siehe Abbildung 2 unten) an den Gurt gekoppelt wurden.



Abbildung 2: Blick zwischen Ober- und Untertrum eines Demonstrators mit auf der Laufseite befestigten Sekundärteilen der Motors (oben); Zoomansicht der Sekundärteile im Untertrum (unten)

Weitere Ausführungen hierzu sind in [Rad18] zu finden. Die Befestigung der Läuferelemente auf der Laufseite zieht eine geometrische Zwangsbedingung bei der Umlenkung nach sich, da ein Kontakt zwischen den einzelnen Läuferelementen vermieden werden muss. Hieraus resultieren die vergleichsweise großen Umlenktrommeln. Die Reduzierung dieser Durchmesser unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Gurts war ein Aspekt in der konstruktiven Entwicklung des Gurtaufbaus. Zu berücksichtigen ist hierbei die notwendige Kopplung der Läuferelemente zueinander, um eine kontinuierliche Antriebskraft erzeugen zu können. Des Weiteren muss eine gleichmäßige Teilung der Läuferelemente gewährleistet werden.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen wurden Konzepte zur Implementierung der Läuferelemente entwickelt, die den Einsatz eines konventionellen Transportgurtes ermöglichen. In experimentellen Vergleichsversuchen hat sich die direkte Einbindung in den Gurt als vielverspre-

chende Lösung herauskristallisiert. Hierzu wurden Ausschnitte in den Gurt eingebracht, in die später die Läuferelemente passend eingelegt werden konnten. Abbildung 3 zeigt diesen Aufbau des Gurts. Hierbei ist im Bereich des Motors bereits auf der Laufseite eine Deckschicht mit geringem Reibbeiwert aufgebracht, um die Läuferelemente zu fixieren. Nach der Bestückung der Läuferelemente wird eine zweite reibungsarme Schicht auf der Oberseite aufgetragen, welche die Läuferelemente im Gurtaufbau einschließt.

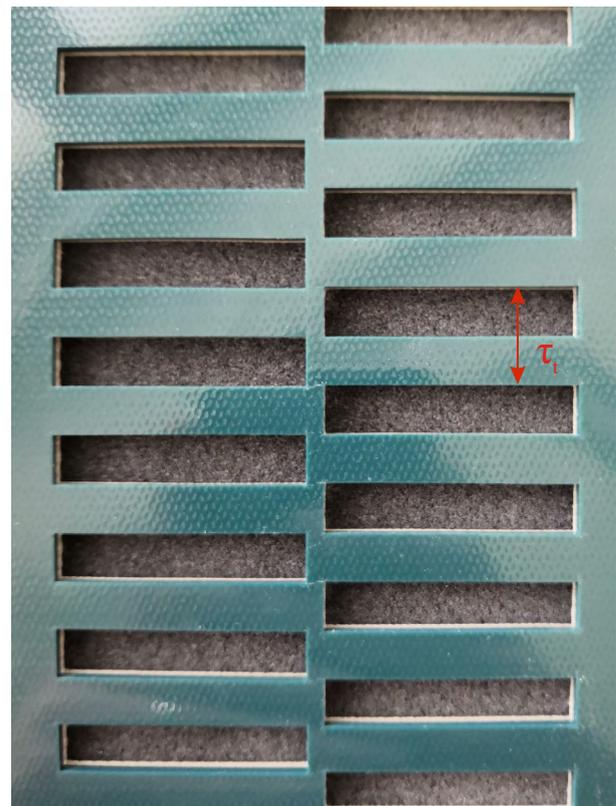


Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Gurtaufbau zur Aufnahme der Läuferelemente

Mit diesem Aufbau ist es ebenfalls möglich, die geforderte gleichmäßige Teilung der Läuferelemente τ_t konstant über die gesamte Länge des Motorsegments zu halten. Die Entfernung eines Statorzahnes zum nächsten wird als Polteilung τ_p bezeichnet und kann aus der Teilung der Läuferelemente berechnet werden [Hof19] mit

$$\tau_p = g\tau_t + \frac{1}{2}\tau_t \text{ mit } g \in \mathbb{N} \quad (2)$$

In diesem Fall ist die Länge eines Läuferelementes gegeben durch [Hof19]

$$\tau_{LE} = \frac{1}{2}\tau_t \quad (3)$$

Durch die Verschiebung der beiden Ausschnittsreihen um τ_{LE} wird die Antriebskraft eines Motorsegmentes um τ_p

verschoben im nächsten Statorzahn eines Segments eingeleitet. Dies sorgt für eine homogenere Verteilung der Kraft und somit für eine Verringerung der Verschiebung.

Um die Verschiebung innerhalb des Gurts genauer klassifizieren zu können, wurde der Gurtaufbau mit Hilfe der FEM nachgebildet und simuliert. Abbildung 4 unten zeigt die Verschiebung des Gurtaufbaus aufgrund der eingeleiteten Antriebskraft an vier Läuferelementen. Dies entspricht der Krafteinleitung eines Motorsegmentes im späteren Antrieb. Die resultierende relative Verschiebung im Bereich eines Motorsegmentes liegt mit $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ in einem für den Motor unkritischen Bereich.

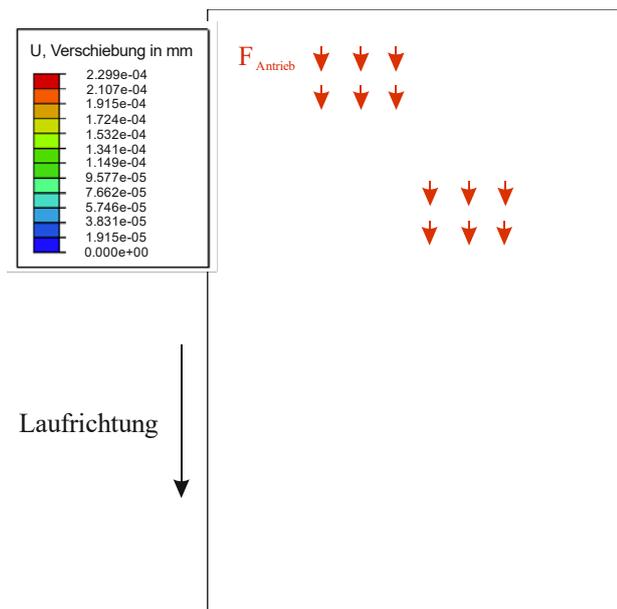


Abbildung 4: Relative Verschiebung innerhalb des Gurtaufbaus aufgrund der Antriebskraft

3 ANTRIEBSEINHEIT – LINEARHYBRIDMOTOR

Die Wahl Funktionsprinzips des Antriebs fiel aufgrund seiner Vorteile für diesen Anwendungsfall auf einen modular aufgebauten Linearhybridmotor. Dieser vereint die Vorteile einer permanenterrregten Synchronmaschine mit denen eines Reluktanzmotors. Der Vorteil für insbesondere lange Transportstrecken ist, dass über die Länge verteilt weichmagnetische Läuferelemente, aus zum Beispiel DC01, eingesetzt werden können. Dies ist ein erheblicher Preisvorteil gegenüber dem Einsatz von Permanentmagnetmaterial als Läuferelement, wie es bei einer reinen Synchronmaschine der Fall ist. Die Permanentmagneten sind stattdessen in den relativ kurzen Statorn des Antriebs untergebracht, wodurch auch beim Linearhybridmotor ein vergleichsweise guter Wirkungsgrad erreicht werden kann. Im Folgenden wird kurz auf den geometrischen Aufbau eines Statorsegmentes und dessen Parametrierung eingegangen. Anschließend wird das Funktionsprinzip des Motors anhand eines zwei phasigen Motors erläutert.

3.1 GEOMETRISCHER AUFBAU

Der geometrische Aufbau des Linearhybridmotors wurde mittels eines parametrischen Modells eines Motorsegmentes schrittweise optimiert. Hierzu wurde die 3D-Geometrie zur Vereinfachung durch ein repräsentatives 2D-Modell abgebildet. Dieses ist in Abbildung 5 mit den variablen Parametern aufgezeigt. Um die Geometrie zu optimieren, wurden 500 Iterationen durchgeführt, die im Optimum zu einer 1,9 Mal größeren Antriebskraft gegenüber der nicht optimierten Ausgangsgeometrie führen. Weiterführendes hierzu ist in [Hof19b] nachzulesen.

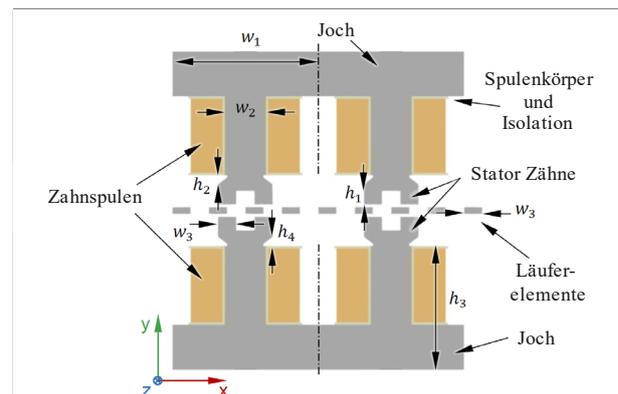


Abbildung 5: Parametrisches 2D-Modell eines Statorsegmentes (Seitenansicht) [Hof19]

Die Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang des geometrischen Aufbaus des Motors und der Ausschnitte für den Gurt. Der Parameter w_3 geht als Zahnbreite in die Geometrie der Läuferelemente ein. Somit ergibt sich für diesen Parameter bereits eine Begrenzung, da sich in Laufrichtung zu große Läuferelemente negativ auf die Biegesteifigkeit des Gurts auswirken. Dies ist ein Grund für die Teilung der Statorzähne in sogenannte Feinzähne. Die Gesamthöhe, welche sich aus den Parameter h_1, h_2 und h_3 zusammensetzt, ist aus der Restriktion der Umlenktrommeldurchmesser ebenfalls beschränkt. Die weiteren Parameter haben keinen direkten Einfluss auf die Geometrie des Demonstrators, weisen aber empfindliche Abhängigkeiten für die Ausprägung der magnetischen Felder auf, welche hiermit optimiert werden können.

3.2 FUNKTIONSPRINZIP

Das Funktionsprinzip wird im Folgenden durch den Schrittbetrieb eines zweisträngigen, modular aufgebauten Linearhybridmotors erläutert. Dieses basiert auf den Ausführungen in [Jas14]. Abbildung 6 zeigt den Ablauf eines Halbschrittes. Das durch den Permanentmagneten erzeugte Feld wird durch das elektrisch erzeugte Magnetfeld überlagert. Zunächst wird Strang A mit einer Spannung beaufschlagt, sodass sich ein magnetisches Feld im ersten Statorteil ausbildet, welches im ersten Statorzahn zu einer Erhöhung des Flusses führt und im zweiten Statorzahn zu einer Verringerung. Die auftretende Kraft am Statorzahn

zwei wirkt der in Zahn eins entgegen. Durch die Feldschwächung weist die Kraft in Statorzahn eins einen größeren Wert auf als in Zahn zwei. Dies führt zu einer Kraft auf die gekoppelten Läuferelemente in positiver x-Richtung, wodurch diese in die Position b) gezogen werden. Folgend wird in Strang zwei der Strom eingepreßt, sodass in Zahn drei der magnetische Fluss erhöht und in Zahn vier reduziert wird. Dies führt zur Vorschubkraft auf das entsprechende Läuferelement. Der zweite Halbschritt wird durch eine Umkehr der Stromrichtung realisiert. Durch Wiederholung dieses Zyklus findet eine kontinuierliche Bewegung der Läuferelemente statt.

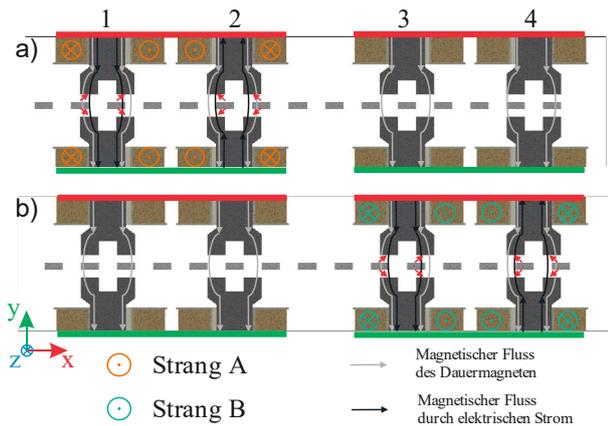


Abbildung 6: Funktionsprinzip eines modular aufgebauten Linearhybridmotors mit magnetischen Feldern und Kräften, die zur Bewegungserzeugung beitragen

Zur Bewertung des Motoraufbaus wurde die Antriebskraft für unterschiedliche Ströme ermittelt. Der Messaufbau hierfür ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Die Motorsegmente sind hierfür über einen Rahmen miteinander verbunden und ausgerichtet. Für die Messung wurde ein Gurtstück in der Größe des Motors verwendet, um die Einflüsse der Reibung außerhalb des Motors zu vermeiden. Die Läuferelemente wiesen hierbei eine Höhe von 3 mm auf. Im Bemessungsbetrieb konnte somit eine Antriebskraft von 130 N erreicht werden. In [Hof19] wird die real gemessene Antriebskraft für verschiedene Ströme mit den simulierten theoretischen Antriebskräften verglichen. Hierzu wurde der Simulation ein Reibungsmodell hinzugefügt, um die Verluste berücksichtigen zu können.

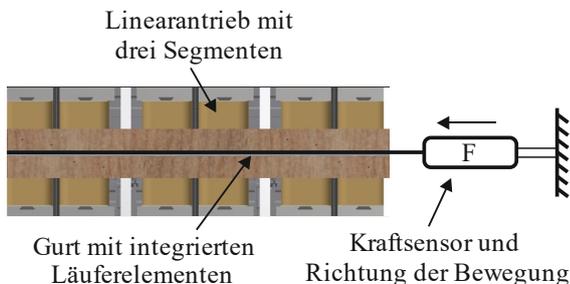


Abbildung 7: Schematischer Messaufbau zur Ermittlung der Antriebskraft.

4 DEMONSTRATOR

Der Aufbau des Demonstrators wurde auf der Basis eines Standardförderers durchgeführt. Hierzu wurde ein Gurt entlang der Ränder, wie in Abbildung 3 gezeigt, mit Läuferelementen aus weichmagnetischem Material bestückt. Über eine Führung können die Motoren ausgerichtet werden. Die modular aufgebauten, integrierten Linearhybridmotoren sind als drei-phasige Systeme ausgeführt. Durch den zusätzlichen Strang wird, im Vergleich zum vorher erläuterten Funktionsprinzip, die Welligkeit des Krafteintrags reduziert, wodurch einem Ruckeln des Gurts vorgebeugt werden kann. Die Abbildung 9 zeigt den Demonstrator mit einer einseitigen Anordnung der Linearmotoren. Dies wird durch die hohe Quersteifigkeit (quer zur Laufrichtung) des Gurts ermöglicht, die durch maxwellische Grenzflächenkräfte gewährleistet wird, welche die Läuferelemente in der sogenannten magnetischen Mitte halten. Ebenfalls denkbar ist ein beidseitiger Antrieb. Dieses Konzept weist jedoch Nachteile auf. Ein beidseitiger Antrieb benötigt zusätzlichen Platz, welcher in der Breite zur Beförderung verloren geht. Zusätzlich hierzu wird eine zweite Bahn an Läuferelementen benötigt, was die Herstellung des Gurts aufwendiger und kostenintensiver gestaltet. Des Weiteren wird das Eigengewicht des Gurts weiter erhöht, wodurch die Nutzlast des Förderers bei gleichbleibender Motorenanzahl verringert wird. Jedoch birgt der einseitige Antrieb des Gurtes auch die Gefahr, dass der Gurt zur Seite wegläuft. Um dies zu vermeiden, wird im Standardförderer eine seitliche Führung genutzt. Versuche haben jedoch gezeigt, dass trotz der einseitigen Belastung die zentrierende Kraft des Motors ausreicht, damit der Gurt keine seitliche Bewegung erfährt.

Die Lineardirektantriebe wurden im unregelmäßigen Betrieb auf ihre Leistungsfähigkeit im Verbund getestet. Der Einsatz von zwei Motoren im Schrittmotorbetrieb war dahingehend erfolgreich, dass hiermit eine Geschwindigkeit von 0,7 m/s erreicht werden konnte. Weiterhin ist es möglich, ein Transportgewicht von 10 kg zu befördern. Dies ist auch bei einer Beschleunigung des Gurts gegeben. Versuche zur Ermittlung der Antriebskraft der beiden Linearmotoren wurden durchgeführt. Hierzu wurde eine Umlenktrummel über einen Kraftsensor festgesetzt, sodass hierüber das Drehmoment des anschiebenden Gurts auf die Umlenktrummel ermittelt werden konnte. Somit konnte für den einseitigen Antrieb mit zwei Motoren ein Drehmoment von 11,2 Nm ermittelt werden. Dies bedeutet umgerechnet für den Gurt eine Antriebskraft von 172 N. Weiterführend wurde im Dauerbetrieb die Temperatur der Spulenkörper ermittelt. Die Geschwindigkeit wurde hierbei zu 0,5 m/s gewählt. Die Erwärmung in Abbildung 8 wurde unter Bemessungsstrom in der Wicklung gemessen. Hierbei wurde keine aktive Kühlung eingesetzt. Der Motor wurde lediglich durch natürliche Konvektion gekühlt. Der Startpunkt liegt bei 24°C (Raumtemperatur). Innerhalb der ersten Stunde wurde die Temperatur alle 5 Minuten gemessen, danach halbstündlich. Die Temperatur nach einer halben

Stunde betrug 46,7°C. In den nächsten 1,5 Stunden stieg die Temperatur weiter auf 58°C.

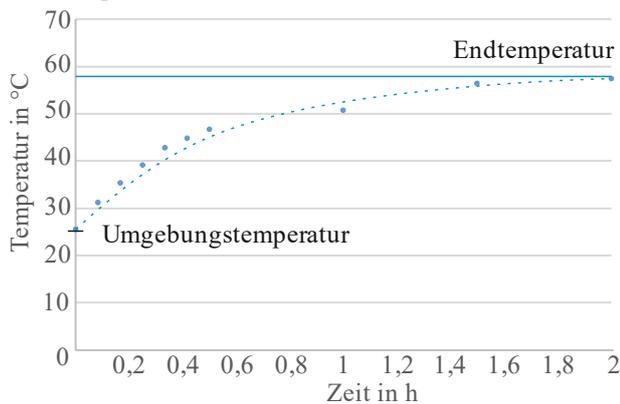


Abbildung 8: Erwärmung der Spulenkörper bei passiver Luftkühlung (Selbstkühlung), einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s und Bemessungsstrom

Darüber hinaus gab es keine signifikante Temperaturerhöhung mehr. Mit einer Betriebstemperatur von ca. 60°C weisen die Motoren und der Gurt keinerlei Probleme in Bezug auf die Hitzebeständigkeit der Einzelkomponenten auf.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Der vom IAL und ITA aufgebaute Demonstrator bestätigt die Funktionsweise von Lineardirektantrieben als Zwischenantriebslösung. Der entlang der Förderstrecke verteilte Einbau erlaubt es, die Gurtzugkraft entlang des Motors abzubauen und somit auf einen konventionellen Antrieb verzichten zu können, wodurch die Vorspannung des Gurts verringert werden kann. Der Dauertest bei einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s und Betrieb mit Bemessungsstrom hat die magnetische, mechanische und thermische Beständigkeit des Linearhybridantriebs bestätigt.



Abbildung 9: Demonstrator eines linear angetriebenen Förderbands mit im Gurt integrierten Läufer-elementen

LITERATUR

- | | |
|--|--|
| [Gro12] Grote, K.-H., Feldhusen, J.: <i>Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau</i> . 23. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. ISBN 978-3642-17305-9. | [Noa83] Noack, A.; VEB Braunkohlewerk Oberlausitz, Sekundaerteil eines Drehstromlinearmotors fuer Bandantriebe, Patentschrift 201 133, 1983. ISSN 0433-6461 |
| [All76] Alles, R.: <i>Zum Zwischenantrieb von Gurtförderern mittels angetriebener Tragrollen und Linearmotoren</i> , Dissertation, Universität Hannover, 1976. | [Jou70] Joug, R., Ragout, B.; <i>Pneumatiques, Caoutchouc Manufacture et Plastic Kleber Colombes S.A., Fördervorrichtung</i> , Offenlegungsschrift 2032856, 1970. |
| [Geb74] Gebhardt, R., Heidolf, W.; <i>Fördergurt für den Antrieb von Bandanlagen durch Linearmotoren</i> , Patentschrift 107 882, 1974. | [Keu73] Keuth, H., Traupe, W.; <i>Siemens AG, Fördereinrichtung mit elektrisch durch Wanderfeld angetriebenem endlosen Förderband</i> , Offenlegungsschrift 2134055, 1973. |

- [Woo81] Woodridge, C., Lawson, C.; Brockway Engineering Co. Ltd., Band, insbesondere Förderband, zum Antrieb durch einen Linearmotor, DE 3214811 A1, 1981
- [Klet97] Kletterer, H.; Kletterer, K., Lewin, H.-U., Gurtbandförderer mit Linearantrieb, DE 37 41 054 C2, 1997
- [Lee09] Lee, R.; Belt Including Flexible Rare Earth Magnetic Strip and Conveyor Utilizing a Belt Including a Flexible Rare Earth Magnetic Strip, US 7597190 B2, 2009.
- [Luc17] Lucchi, M., Simmendinger, S. Elsner, D.; Habasit AG, Hybrid Modular Belt, US2017/0088356 A1, 2017.
- [Rad18] Radosavac, M.; Untersuchungen zum Antrieb von Gurtförderern mittels Linearantrieb; Berichte aus dem ITA 05/2018; ISBN 978-3-95900-238-7
- [Jas14] Jastrzembski, J.-P.: Synchrone Linear-Direktantriebe für Förderbänder. Fortschritt-Berichte VDI Düsseldorf, 2014. ISBN 978-3-18-341221-1.
- [Hof19] Hoffmann, A., Kanus, M., Overmeyer, L., Ponick, B.; Design of an Integrated Linear Flux Modulating Motor for a Direct-drive Belt Conveyor, IKMT 2019, Würzburg, Deutschland.
- [Hof19b] Hoffmann, A., Kanus, M., Overmeyer, L., Ponick, B.; Operation Analysis of an Integrated Linear Flux Modulating Motor for a Direct-driven Belt Conveyor, EEMODS 2019, Tokyo, Japan.

Malte Kanus, M.Sc., Research Assistant at the Institute of Transport and Automation Technology, Leibniz Universität Hannover.

Malte Kanus was born 1990 in Hannover, Germany. Between 2010 and 2016, he studied Mechatronics at Leibniz Universität Hannover.

Address: Institute of Transport and Automation Technology, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

Phone: +49 511 762 - 18286, Fax: +49 511 762 - 4007, E-Mail: malte.kanus@ita.uni-hannover.de

Alexander Hoffmann, M.Sc., Research Assistant at the Institute for Drive Systems and Power Electronics, Leibniz Universität Hannover.

Alexander Hoffmann was born in Hannover, Germany in September 1991. He received his M.Sc. degree in Electrical Engineering and Information Technology from Leibniz Universität Hannover in March 2017.

Address: Institute for Drive Systems and Power Electronics, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany

Phone: +49 511 762 -3765 Fax: +49 511 762 – 3040, E-Mail: alexander.hoffmann@ial.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Head of the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz Universität Hannover.

Ludger Overmeyer was born 1964 in Recke, Germany. Between 1984 and 1991, he studied electrical engineering at the University of Hannover. In 1996 he finished his doctorate in mechanical engineering at the University of Hannover. From 1997 to 2001 he worked as project manager, division manager and head of research and development at Mühlbauer AG in Roding. Since 2001 Ludger Overmeyer is Professor at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz Universität Hannover.

Address: Leibniz Universität Hannover, Institute of Transport and Automation Technology, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

Phone: +49 511 762-3524, Fax. +49 511 762-4007, E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick, Head of the the Institute for Drive Systems and Power Electronics, Leibniz Universität Hannover.

Bernd Ponick was born in Großburgwedel, Germany, in 1964. He received the Dipl.-Ing. degree in electrical power engineering and the Dr.-Ing. degree in electrical machines both from Leibniz Universität Hannover, Hanover, in 1990 and 1994, respectively. After nine years with the Large Drives Division of Siemens as a Design Engineer for large variable speed motors, the Head of Electrical Design, and the Technical Director of Siemens Dynamowerk Berlin, since 2003, he is a Full Professor of electrical machines and drive systems at Leibniz Universität Hannover. His main research interests include prediction and simulation methods for electrical machines, prediction of and measures against important parasitic effects such as magnetic noise, additional losses, or bearing currents, and new applications for electric machines, e.g., for electric and hybrid vehicles.

Address: Institute for Drive Systems and Power Electronics, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany

Phone: +49 511 762 - 2571, Fax: +49 511 762 - 3040,
E-Mail: ponick@ial.uni-hannover.de