

Entwicklung eines berührungslosen Antriebs für Förderbänder

Development of a non-contact drive for conveyor belts

Ivo Maximow
Markus Helbig
Jörg Hübler

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

Bandförderer sind aufgrund ihrer geringen Komplexität und hohen Flexibilität sehr verbreitet. Bei dem klassischen Antriebskonzept bei der die Antriebsleistung über eine Umlenkrolle kraftschlüssig eingeleitet wird muss der Bandförderer vorgespannt werden. Durch diese Art des Antriebs wird die Länge, die Lebensdauer oder die Förderleistung des Bandförderers begrenzt. Durch die Entwicklung eines direkten Antriebskonzepts sollen die Nachteile des klassischen Antriebs vermieden werden.

[Schlüsselwörter: Linearmotor, Asynchronmotor, berührungsloser Antrieb, Direktantrieb, Bandförderer]

Belt conveyor are very popular due to their low complexity and high flexibility. In the classical drive concept the power of the drive is transmitted via force contact between the belt and the roll. Therefore the belt has to be under tension between the two rolls. By this way of drive the length, the life or the transportation power of the conveyor belt is limited. By developing a direct drive the disadvantages of the classical drive should be avoided.

[Keywords: linear engine, induction engine, non-contact drive, direct drive, belt conveyor]

1 PROBLEMSTELLUNG BANDFÖRDERER

Bandförderer gehören zu den Stetigförderern und stellen eine weit verbreitete „klassische“ Förderanlage dar. Die große Beliebtheit ist zum einen auf den einfachen Aufbau zurückzuführen. Im Wesentlichen beschränkt sich dieser auf eine Antriebs- und eine Umlenktrummel, ein Gestell an dem diese befestigt sind und der Fördergurt selbst nebst Abstützung, Abbildung 1. Des Weiteren bieten Bandförderer eine hohe Flexibilität bezüglich der Fördergüter. Feines Schüttgut bis hin zu schwerem Stückgut kann je nach Dimensionierung der Anlage gefördert werden. Zudem sind die Anforderungen an den Aufstellort

und der Installationsaufwand im Vergleich zu anderen Anlagen gering.

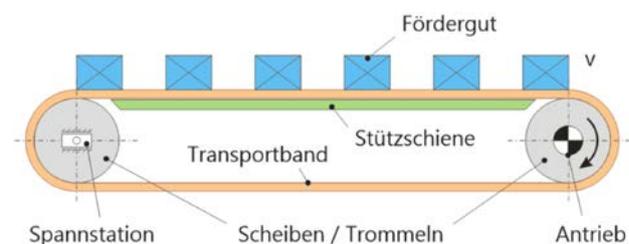


Abbildung 1. Bestandteile eines Bandförderers [Sum16]

Der Antrieb eines solchen Bandförderers ist einfach aufgebaut. Eine der Trommeln wird von einem Motor angetrieben. Je nach Anforderung an die Fördergeschwindigkeit und Leistung kommen verschiedene Antriebskonzepte zum Einsatz. Bei industriellen Anwendungen sind allerdings dreiphasige Asynchronmotoren mit Getriebe weit verbreitet. Dabei treibt der Getriebeausgang direkt die Antriebstrummel an. Je nachdem wie die Anforderungen an die Fördergeschwindigkeit sind unterscheidet sich die Speisung der Motoren. Soll die Fördergeschwindigkeit immer konstant sein und sind geringe Geschwindigkeitsunterschiede vernachlässigbar, reicht es aus, den Motor starr an das Netz zu schalten. Soll die Geschwindigkeit variabel bzw. regelbar sein, wird der Motor von einem Frequenzumrichter gespeist. Selbstverständlich sind weitere Motortypen mit verschiedenen Arten der Speisung denkbar und verbreite.

Unabhängig von dem Prinzip wie die Trommel angetrieben wird ist der weitere Weg des Kraftflusses gleich. Die Antriebsleistung wird kraftschlüssig von der Trommel auf den Fördergurt übertragen. Um den Kraftschluss zu gewährleisten muss der Fördergurt gespannt werden. Das heißt schon im Stillstand wirkt auf den Fördergurt in jedem Punkt eine gleichverteilte Zugkraft. Im Betrieb kommt eine last- und ortsabhängige Zugkraftkomponente hinzu. Ihr Maximum liegt im Obertrum beim Einlauf auf die Antriebstrummel. Mit zunehmender Beladung des Fördergurts sowie mit Länge der Förderstrecke steigt die

benötigte Förderleistung an. Je nachdem wie groß die zu übertragende Förderkraft ist, muss die Gurtvorspannung entsprechend angepasst werden. Ausschlaggebend dafür sind der Umschlingungswinkel α der Trommel sowie der Reibwert μ_{Tr} zwischen Gurt und Trommel. Beschrieben wird dieses Verhalten mit der Euler-Eytelwein'schen Grenzbedingung [Sum16].

$$\text{Euler - Eytelwein: } \frac{F_{ziehen}}{F_{halten}} \leq e^{(\mu_{Tr} \cdot \alpha)};$$

$$\text{Untertrum: } F_{Untertrum} = F_2 = F_{halten} = F_{Vorspannung};$$

$$\text{Obertrum: } F_{Obertrum} = F_1 = F_{ziehen} = F_{halten} + F_{Antrieb} = F_{Vorspannung} + F_{Antrieb};$$

$$\rightarrow F_{Untertrum} \geq \frac{F_{Antrieb}}{(e^{\mu_{Tr} \cdot \alpha} - 1)}$$

Es wird ersichtlich, dass die Vorspannkraft ausschließlich von der Antriebskraft und der Beschaffenheit der Paarung Trommel-Gurt abhängt. Die Kraft F_1 die auf den Obertrum wirkt ergibt sich hingegen aus der Summe der Vorspannkraft F_v und der Antriebskraft F_u , siehe Abbildung 2.

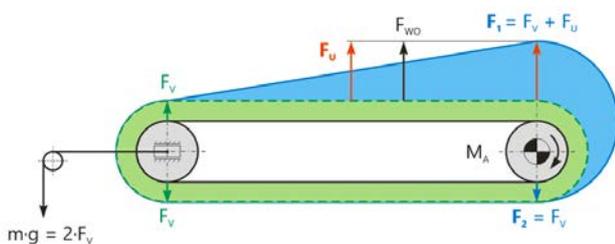


Abbildung 2. Spannungen im Gurt [Sum16]

Je nach Trommel-Gurt Kontakt kann die benötigte Vorspannung einen erheblichen Anteil im Vergleich zur Antriebskraft betragen. Hinzu kommen noch zu berücksichtigende Sicherheiten. Des Weiteren muss der Fördergurt für die maximal auftretende Antriebskraft gespannt werden. Das heißt, besonders für Anlagen mit unterschiedlichen Fördermassen, wird hier der Gurt für einen Großteil der Arbeitszeit unnötig gespannt und damit belastet. Dieser Sachverhalt gilt auch für den Stillstand.

Der kritische Punkt des Fördergurts ist der Einlauf auf die Antriebstrommel in zweierlei Hinsicht. Es tritt nicht nur wie bereits erwähnt die höchste Zugkraft auf, der Fördergurt wird auch unter maximaler Belastung umgelenkt und gebogen. Dadurch treten zusätzliche Normalspannungen im Fördergurt auf welche sich besonders schädlich auswirken. Je höher Fördergutmasse und Länge ist, desto höher ist die Fördergurtbelastung. Die dadurch höhere zu übertragende Antriebsleistung wiederum bedingt eine höhere Vorspannung die weiter den Gurt belasten. Daher stoßen insbesondere Förderbänder in langen

Förderanlagen mit hohen Fördermassen wegen der starken wechselnden Zug- und Biegebelastung an Grenzen und haben eine geringe Lebensdauer.

Könnte die Antriebskraft direkt in den Fördergurt eingeleitet werden, wäre eine Vorspannung zur Übertragung der Förderleistung nicht mehr nötig. Damit sinkt die Beanspruchung und steigt die Lebensdauer des Fördergurts. Demzufolge kann es mit höheren Fördermassen belastet oder es können längere Förderstrecken realisiert werden. Wenn es möglich wäre die Antriebsleistung entlang der Förderstrecke im Obertrum einzuleiten gibt es theoretisch keine Begrenzung für die Länge von Förderbänder mehr bzw. die Fördermassen können weiter erhöht werden.

2 ANSATZ ZUR UMSETZUNG EINES LINEAREN DIREKTANTRIEBS

Laut Definition wird bei einem Direktantrieb die Antriebsmaschine ohne Übertragungselemente mit der Arbeitsmaschine verbunden [Kle09]. Bei der klassischen Förderstrecke mit einer Antriebstrommel sind hingegen meist ein Getriebe und immer die kraftschlüssige Verbindung Trommel-Gurt zwischen der Antriebsmaschine und dem Fördergurt verbaut. Um einen Direktantrieb zu realisieren muss der Fördergurt selbst oder Teile davon Bestandteil des Antriebsmotors sein. Es gibt verschiedene Motorprinzipien die betrachtet werden können. Zum einen kann ein Antrieb basierend auf der (1) Reluktanzkraft, (2) Wechselwirkung zwischen statischen und dynamischen Magnetfeldern und (3) aufgrund der Wechselwirkung zwischen induzierten Wirbelströmen und dynamischen Magnetfeldern entwickelt werden. Zu (1) gehören jegliche Vertreter der Reluktanzmotoren, also alle Geschalteten- oder Synchronreluktanzmotoren. Zu (2) gehören elektrisch oder permanent erregte Synchronmaschinen. Zu (3) gehören Induktionsmotoren, auch als Asynchronmotoren bezeichnet.

Um einen Direktantrieb umzusetzen, muss wie bereits erwähnt der Fördergurt selbst oder Teile davon Element des Motors sein. Da sich der Fördergurt bewegen soll ist auch folglich klar, dass damit der klassisch bezeichnete „Rotor“ im Fördergurt integriert werden muss, während der „Stator“ ins Gestell integriert wird. Dabei war das Ziel der Forschung einen möglichst technologisch einfachen Fördergurt zu erhalten, der der Form eines herkömmlichen Gurts entspricht. Demzufolge ist die Gurtkomplexität das Hauptentscheidungskriterium. Weitere Kriterien sind die mechanischen Eigenschaften des Fördergurts, schließlich sollen diese verbessert werden. Die Wechselwirkung mit dem Fördergut ist, besonders in Hinblick auf das permanentmagnetische Prinzip, ein Kriterium. Ebenso unterscheiden sich die Prinzipien im Hinblick auf die Entstehung von Querkräften entlang der Förderachse. Des Weiteren sind Bewertungskriterien die

Antriebskraft, die Leistungsdichte, Wirkungsgrad, die Herstellungs- und Betriebskosten, etc.

Die Motorprinzipien (1) mit der Reluktanzkraft lassen sich schlecht im Gurt realisieren. Es müsste segmentweise ferromagnetisches Material integriert werden. Dabei ist die Teilungsgenauigkeit von großer Bedeutung um eine konstante Antriebskraft zu erhalten. Bei Belastung dehnt sich der Fördergurt, was zwangsläufig zur Vergrößerung der Teilung führt und damit den Antrieb beeinträchtigt. Des Weiteren muss die Lage des Fördergurts erfasst werden, dafür wäre ein zusätzlicher Sensor nötig und eine komplexere Regelung erforderlich. Letztendlich ist dann das ausschlaggebende Kriterium diese Variante zu verwerfen die Tatsache, dass bei dem Reluktanzprinzip immer neben der Antriebskraft in Förderrichtung auch senkrecht dazu Anziehungskräfte in Richtung Stator entstehen. Je nachdem ob ein Stator oder mehrere in Doppelanordnung gewählt werden kann der Einfluss vermindert werden. Allerdings kann diese Anziehungskraft nicht komplett unterdrückt werden. Aufgrund der natürlichen Instabilität der entstehenden Reluktanzkräfte wird der Fördergurt immer an einen Stator gezogen. Die dadurch auftretenden Reibungskräfte wirken gegen die Antriebskraft. Daher müssten Einrichtungen vorgesehen werden, um diese Effekte zu vermindern. Jede zusätzliche Beschichtung auf dem Band macht dieses komplexer. Eine Beschichtung auf dem Stator vergrößert den Luftspalt, was wiederum die Antriebskraft herab setzt. Zudem würde der Fördergurt durch das zusätzliche ferromagnetische Material eine deutlich höhere Masse aufweisen. Dadurch würde sich der Vorteil des Antriebs, die Entlastung des Gurts, eben durch die Mehrbelastung durch Eigenmasse teilweise aufheben. Aufgrund dieses Punkts sowie der hohen Komplexität des zu entwickelnden Fördergurts in Kombination mit der Erscheinung der Anziehungskräfte in Richtung Stator wird dieses Motorprinzip nicht umgesetzt.

Für die Motorprinzipien (2) muss zwischen zwei verschiedenen Typen unterschieden werden. Das dynamische Magnetfeld wird vom Stator erzeugt, welches in Wechselwirkung mit dem statischen Magnetfeld des Rotors tritt. Die unterschiedlichen Varianten rühren von der Umsetzung des statischen Rotormagnetfelds her. Eine Möglichkeit besteht darin, elektrisch erregte Magnetfelder zu erzeugen. Dazu müssen in den Fördergurt Spulen integriert und mit Strom versorgt werden. Unter der Prämisse dass der Gurt technologisch einfach gestaltet werden soll, wird klar dass diese Variante ungeeignet ist. Neben der Integration der Spulen stellt vor allem auch ihre Kontaktierung und Stromversorgung ein komplexes Problem dar und daher wird diese Variante verworfen.

Eine zweite Variante dieses Prinzip umzusetzen besteht darin, Dauermagnete in den Fördergurt zu integrieren. Damit wäre eine Kontaktierung des Fördergurts nicht mehr notwendig. Bei der Integration der Dauermagneten

gibt es aus Gründen des Verschleißes Einschränkungen. Es könnten Festkörpermagnete in der Gurt verarbeitet werden, besonders Seltenerd magnete zeichnen sich durch eine hohe Feldstärke aus. Allerdings sind Festkörper im Gurt in Hinblick auf Verschleiß problematisch. An den Umlenkungen wird der weiche Gurt je nach Lage zur neutralen Faser gedehnt oder gestaucht. Die Festkörper allerdings behalten ihre Form und arbeiten gegen das Gurtmaterial. Daher kommt es zu Verschleißerscheinungen die nur durch sehr große Umlenkungen abgeschwächt werden können. Aus diesem Grund wäre es sinnvoll elastomergebundene Magnete einzusetzen. Bei diesen Permanentmagneten kann die Flexibilität abhängig vom Füllgrad der magnetischen Partikel gewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass zwar mit sinkendem Anteil magnetischer Partikel die Verschleiß Eigenschaften für den Gurt verbessert werden, aber die magnetischen Eigenschaften verschlechtert werden und damit auch die erzeugbare Antriebskraft sinkt. Kritisch ist hier, wie auch bei dem Reluktanzprinzip, dass die Teilungsgenauigkeit sich auf die Antriebskraft auswirkt. Zudem müssen die elastomergebundenen Magnete im Fördergurt magnetisiert werden, was einen hohen Aufwand darstellt. Des Weiteren muss für das Anfahren die Lage des Gurts überwacht und verarbeitet werden, wofür mindestens ein Sensor und entsprechende Regeleinrichtung notwendig ist. Nicht zu unterschätzen ist auch der Nachteil, dass dauermagnetische Werkstoffe im Vergleich zu herkömmlichen Fördergurten sehr schwer sind. Das heißt ein solcher Fördergurt würde eine deutlich höhere Masse aufweisen als ein herkömmlicher. Ein Vorteil des Direktantriebs ist die Einsparung der Vorspannung und damit verbunden die Entlastung des Gurtes. Damit hebt sich, wie bei dem Reluktanzprinzip, der Vorteil dieses Antriebs teilweise auf. Wenn Permanentmagnete in einer Förderanlage eingebracht werden, muss auch immer die Verschmutzung in der Umgebung betrachtet werden. Ein permanentmagnetischer Fördergurt würde alle ferromagnetischen Verschmutzungen anziehen und weiter transportieren. Für manche Anwendung ist das problematisch, das heißt in diesem Fall müsste der Gurt durch eine zusätzliche Anlage gereinigt werden. Aus den genannten Gründen wird die Umsetzung dieser Variante nicht verfolgt. Ebenso wäre zu beachten, dass der Fördergurt eine Reluktanzkraft auf ferromagnetische Fördergüter ausübt. Das kann zu einem positiven Nebeneffekt führen, beispielsweise als Fixierungshilfe von Fördergütern. Allerdings kann es auch für beispielsweise empfindliche Elektronik ein negativer Aspekt sein.

Die Motorprinzipien (3) erweisen sich bei der Vorbeurteilung als die sinnvollste Variante unter den genannten Anforderungen. Um eine magnetische Wechselwirkung zwischen Fördergurt und Stator zu erreichen, muss elektrisch leitendes Material in den Gurt integriert werden. Durch die dynamischen Magnetfelder, welche den Gurt durchsetzen, wird in dem elektrischen Leiter eine Spannung induziert. Diese bewirkt, dass nach dem ohm-

schen Gesetz ein Strom im Leiter fließt, der sogenannte Wirbelstrom. Ein Wirbelstrom wirkt immer seiner Ursache entgegen. Diese ist das dynamische Magnetfeld des Stators, welches entlang des Motors wandert. Durch die magnetische Wechselwirkung zwischen Stator und Wirbelstrom wirkt eine Kraft auf den wirbelstromführenden elektrischen Leiter. Diese Kraft wirkt dann durch die Integration des Motorelements auch auf den Fördergurt. Im folgenden Kapitel 3 wird dieser Sachverhalt genauer erläutert. Um dieses Prinzip umzusetzen reicht es aus, in den Fördergurt eine elektrisch leitende Folie in Förderebene zu integrieren. Vorteilhaft ist, dass hier keine Teilung rotorseitig beachtet werden muss. Ebenfalls funktioniert dieses Prinzip ohne jegliche Sensorik, womit ein einfacher zuverlässiger Antrieb gewährleistet wird. Des Weiteren treten keine Rastkräfte oder Reluktanzkräfte in Richtung des Stators auf. Zusammenfassend werden mit diesem Motorprinzip am besten die Anforderungen an einen technologisch einfachen Fördergurt erfüllt. Aus regelungstechnischer Sicht kann eine weniger komplexe Elektronik, als im Vergleich zu den anderen Motorprinzipien, verwendet werden. Es reicht, den elektrischen Leiter mit einem magnetischen Wanderfeld zu durchsetzen, um eine Kraft in Förderrichtung zu generieren.

3 ASYNCHRONES WIRKPRINZIP

Die Asynchronmaschine, auch Asynchronmotor genannt, mit Käfigläufer wurde vor mehr als 100 Jahren von AEG entwickelt [Nei04] und 1889 patentiert [Pat1889]. Sie zeichnet sich durch einen sehr einfachen Aufbau aus.

Wie in der Abbildung 3 zu sehen wird der Stator mit Spulen für Dreiphasendrehstrom bewickelt. Es gibt eine Vielzahl an Wicklungsarten. In der Abbildung ist eine ungesehnte Zahnspulenwicklung mit einem Polpaar dargestellt. Die Wicklungen wechseln von Zahn zu Zahn den Wicklein, die jeweils gegenüberliegenden Wicklungen sind zusammengeschlossen und ergeben eine Phase (U/V/W). Es gibt eine Vielzahl an Wickelarten, zum Verständnis soll dieses einfache Beispiel genügen. Die Phasen können in Stern- oder Dreieckschaltung am Drehstrom betrieben werden, das hat einen Einfluss auf die Leistungsaufnahme aber nicht auf das Wirkprinzip. Die bestromten Spulen erzeugen einen magnetischen Fluss welcher in der Abbildung als Linien dargestellt wird. Dieser Fluss schließt sich über den Luftspalt, Zähne und Statorrücken in geschlossenen Linien. Wird der Rotor betrachtet so ist zu erkennen, dass dieser von parallelem Fluss durchflutet wird. Der aus dem dreiphasig bestromten Spulensystem im Rotor erzeugte Fluss kann zusammengefasst als Zeiger ausgelegt werden. Aufgrund der Verschaltung der Spulen, der Wickelart und des speisenden Drehstroms ergibt sich zu jedem Zeitpunkt ein ortsfester Flusszeiger gleicher Länge der sich mit der Frequenz des Drehstroms dreht. Dies bedeutet, dass der Rotor einem wechselnden Magnetfeld ausgesetzt ist. Wie in der

Abbildung angedeutet besteht dieser aus Material mit hoher Permeabilität und elektrisch leitfähigem Material. Das hochpermeable Material ist notwendig um eine hohe magnetische Flussdichte im Rotor zu erzeugen. Das elektrisch leitfähige Material wird in Form eines Käfigs in den Rotor integriert. Hierbei gibt es eine Vielzahl an Käfigformen und Käfigstabformen die sich unter anderem auf Arbeitspunkt, Anlaufmoment und Drehmomentwelligkeit auswirken. Hier ist ein einfacher Käfig mit Rundstäben dargestellt. Die Kreise stellen die Käfigstäbe dar welche beidseitig mit einem Ring verbunden sind. Elektrisch gesehen ergeben zwei nebeneinanderliegende Stäbe verbunden über die Ringe eine Leiterschleife mit einer Windung. Da die Ringe alle Stäbe verbinden kann der Käfig als ein Gebilde kurzgeschlossener Leiterschleifen angesehen werden.

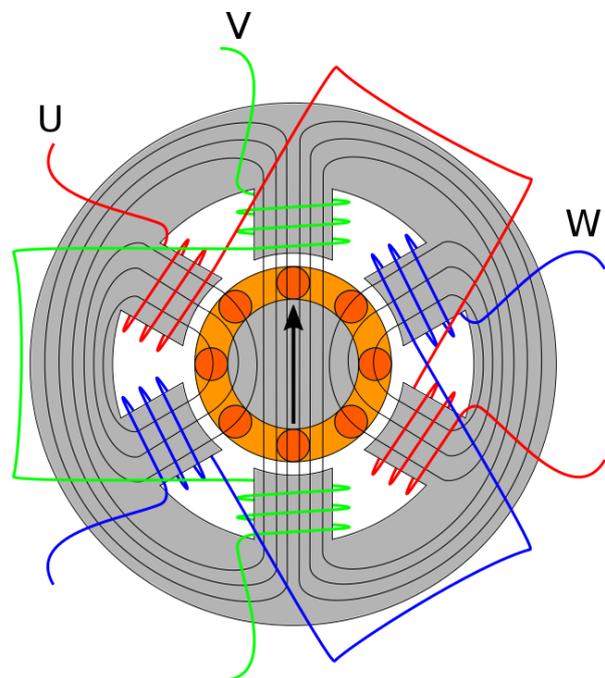


Abbildung 3. Prinzipieller Aufbau der Asynchronmaschine

Für die folgende Betrachtung soll sich der Rotor in Ruhe befinden. Demnach wird er, sobald der Stator bestromt wird, von einem Fluss durchsetzt der als drehender Zeiger aufgefasst werden kann. Demnach werden die Leiterschleifen von einem wechselnden magnetischen Fluss durchsetzt. Nach der elektromagnetischen Induktion [Φ_{00}] werden bei jeder Änderung des magnetischen Flusses, der eine Leiterschleife durchsetzt, Ströme in dem Leiter induziert. Diese können im Käfig frei fließen. Die Flüsse, die durch die induzierten Ströme hervorgerufen werden, sind bestrebt die durchsetzende Flussänderung wiederum aufzuheben. Dabei greifen an der Leiterschleife mechanische Kräfte an, die sogenannten Lorentzkräfte [Sch07], welche bestrebt sind der Flussänderung entgegen zu wirken. Da die Leiterschleifen um die Rotationsachse angeordnet sind, wirkt die Kraft über einen Hebelarm auf die Rotorwelle und es ergibt sich ein Drehmoment auf

dem Rotor was zur Verrichtung von Arbeit genutzt wird. Allgemein berechnet sich die Lorentzkraft aus [Phi00]:

$$F_L = Q * (v \times B)$$

Wobei sich Q aus folgenden Zusammenhängen ergibt. Die Induzierte Spannung berechnet sich aus [Phi00]:

$$u_q = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} dA + \oint_l (v \times B) dl$$

Je nachdem in welchem Bezugssystem die Leiterschleife betrachtet wird hängt die induzierte Spannung von der Änderung der Flussdichte, welche die Leiterschleife durchsetzt, ab und von der Geschwindigkeit mit der Teile des Leiters sich senkrecht durch ein Magnetfeld bewegen. Daraus kann für den betrachteten Rotor geschlossen werden, dass die induzierte Spannung von der Stärke des Magnetfelds und von dessen Änderungsgeschwindigkeit abhängt.

Der durch die induzierte Spannung hervorgerufene fließende Strom ergibt sich nach dem Ohm'schen Gesetz aus:

$$I = \frac{U}{R}$$

Die Ladung ergibt sich aus der Integration des Stroms über die Zeit:

$$Q = \int Idt$$

Wird zusammenfassend die Entstehung der Lorentzkraft betrachtet wird ersichtlich, dass für hohe Kräfte möglichst hohe Rotorströme anzustreben sind die von einem starken und schnell wechselnden Magnetfeld senkrecht durchsetzt werden.

Da das Magnetfeld von den Statorspulen erzeugt wird hängt demnach die Kraft von deren Stromstärke und Frequenz ab. Des Weiteren spielt der Widerstand des Käfigs für die Ausprägung der notwendigen Rotorströme eine Rolle. Hierbei ist offensichtlich, dass ein möglichst niedriger Widerstand für einen hohen Stromfluss anzustreben ist. Allerdings ist hier ein Optimum aus elektrischem Widerstand im Käfig und magnetischem Fluss im Rotor zu beachten. Der Käfig selbst besteht aus niedrig permeablen Material, das heißt er hat einen hohen magnetischen Widerstand und wirkt einer hohen magnetischen Flussdichte entgegen. Auf die weiteren Effekte wie beispielsweise Stromverdrängung und Sättigung soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Aus den vorangegangenen Betrachtungen geht hervor, dass nur ein Drehmoment entstehen kann, wenn sich

das Magnetfeld relativ zum Rotor dreht. Das heißt ein Rotor der sich exakt mit dem Magnetfeld des Stators dreht erzeugt kein Drehmoment. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Statorfeld und Rotorgeschwindigkeit wird durch den Schlupf s definiert.

$$s = \frac{\text{Drehzahl}_{\text{Statorfeld}} - \text{Drehzahl}_{\text{Rotor}}}{\text{Drehzahl}_{\text{Statorfeld}}}$$

Es liegt nach den vorangegangenen Betrachtungen nah viel Schlupf anzustreben um ein hohes Drehmoment zu erzielen. Allerdings sinkt der Wirkungsgrad von Asynchronmaschinen mit wachsendem Schlupf. Im Rotor steigen die Hystereseverluste proportional mit dem Schlupf und die Wirbelstromverluste steigen quadratisch mit dem Schlupf [Mue14]. Des Weiteren wirkt sich bei erhöhtem Schlupf der induktive Widerstands des Käfigs negativ auf das Drehmoment aus. Denn dieser verursacht eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Rotor [Sch07]. Dadurch fließt der maximale Strom örtlich versetzt zum maximalen Feld und die Lorentzkraft wird verringert.

4 UMSETZUNG DES DIREKTANTRIEBS

Aus den Erkenntnissen der rotierenden Asynchronmaschine soll entsprechend ein Linearmotor nach gleichem Prinzip abgeleitet werden. Hierzu wurde ein Linearmotor entworfen der schematisch in Abbildung 4 dargestellt ist. Der Aufbau entspricht prinzipiell der in Abbildung 3 dargestellten rotierenden Maschine. Allerdings besteht hier der Motor aus zwei Hälften mit jeweils eigenem Statorrücken. Jeder Zahn und der jeweils gegenüberliegende wird mit einer Spule bewickelt. Der Rotor in diesem Modell besteht ausschließlich aus elektrisch leitendem Material. Prinzipiell kann der Linearmotor als zwei aufgeklappte Asynchronmaschinen die sich gegenüberliegen vorgestellt werden. Wie im Vorangegangenen erläutert soll der Rotor in den Fördergurt integriert werden. Wobei der Gurt selbst möglichst einem herkömmlichen Gurt ähneln soll. Da die Dicke des Fördergurts im Vergleich zum Luftspalt relativ gering ausfällt sind die Effekte für die Erhöhung des magnetischen Flusses sehr gering bzw. es ist nicht sinnvoll den Gurt mit magnetisch leitendem Material auf Kosten der Dicke zu füllen. Zudem stellt es eine große Herausforderung dar ein solches Material in einen Gurt zu integrieren ohne die mechanischen Eigenschaften stark zu verändern. Daher besteht der Rotor des Linearmotors aus einer elektrisch leitenden Folie. Im Vergleich zum Käfigläufer, welcher als eine Reihe kurzgeschlossener Leiterschleifen aufgefasst werden kann, ist der Folienrotor als Reihe unendlich vieler kurzgeschlossener Leiterschleifen zu verstehen. Im Vergleich zur rotierenden Maschine schließen sich hier die magnetischen Feldlinien, bei der gleichen Spulenschaltung und Bestromung, über zwei Spulenpaare und auch zweimal über den Folienrotor.

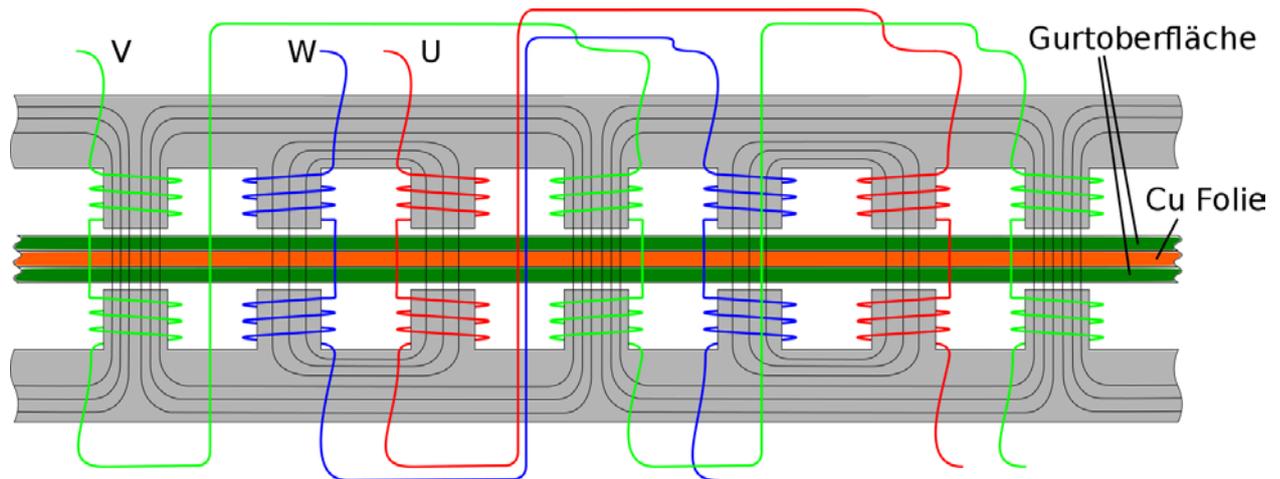


Abbildung 4. Prinzipieller Aufbau des linearen Direktantriebs

Bei der Umsetzung des Prinzips sind folgende Punkte zu beachten:

4.1 GESCHWINDIGKEIT VON LINEAREN ASYNCHRONMASCHINEN

Es soll ein Direktantrieb umgesetzt werden, bei dem der Fördergurt selbst Teil des Rotors ist. Dabei lässt sich zwischen Gurt und Antriebmaschine kein Getriebe zur Geschwindigkeitsanpassung installieren. Demnach hängt die Fördergeschwindigkeit von der Geometrie des Rotors, der Frequenz des speisenden dreiphasigen Stroms, des Schlupfs und der Verschaltung der Statorspulen ab. Geht man von der in Abbildung 4 dargestellten Spulenschaltung aus, so ergibt sich die Synchrongeschwindigkeit aus:

$$v = 2 * \text{Polteilung} * f$$

In diesem Fall beträgt die Polteilung die Summe aus der Länge von drei Zähnen und drei Nuten in Förderrichtung. Konkret wurden Motormodule umgesetzt, bei welchen die Polteilung 60mm beträgt, siehe Abbildung 5. Dabei ist anzumerken, dass eine solche geringe Polteilung bereits einen technologisch hohen Aufwand beim bewickeln der Zähne darstellt. Bei einer Speisefrequenz von 12,5 Hz ergibt sich daraus eine Synchrongeschwindigkeit von 1,5 m/s. Durch Umrichtertechnologie ist die Speisung der Motoren mit geringen Frequenzen problemlos möglich. Allerdings wird deutlich, dass für geringe Fördergeschwindigkeiten solche Motoren nicht direkt am Netz des Energieversorgers betrieben werden können. Die Geschwindigkeit sinkt, wie bei der rotierenden Maschine, mit zunehmenden Schlupf. Daher liegt die Überlegung nahe den Motor für viel Schlupf auszulegen. Allerdings sinkt dadurch der Wirkungsgrad und die Verluste im Rotor nehmen zu. Demzufolge führt ein hoher Schlupf zu Erwärmung der Rotorfolie.

4.2 GESTALTUNG DES ROTORS

Der Rotor besteht nur aus einer elektrisch leitenden Folie. Nachteilig zur rotierenden Maschine ist hier der Widerstand der Leiterschleifen relativ hoch. Das wirkt sich direkt auf die Antriebskraft aus. Hierbei sind die Umlenkstrahlen das entscheidende Kriterium für die Dimensionierung der Dicke der Folie. Die Dehnung im äußeren Bereich der Folie muss bei der Umlenkung innerhalb des elastischen Bereichs des elektrisch leitenden Werkstoffes sein. Im konkreten Fall wird Kupferfolie mit einer Stärke von 0,2 mm verwendet. Aus elektrischer Sicht ist eine möglichst dicke Folie anzustreben, aus mechanischer Sicht eine möglichst dünne.

4.3 EINFLUSS DES LUFTSPALTS

Der Luftspalt ist im Vergleich so rotierenden Maschinen sehr groß, da die Förderguroberfläche zusätzlich zur Vergrößerung beiträgt. Zudem muss ausreichend Spiel für den Gurt eingeplant werden, damit sich der Gurt nicht in den Motormodulen verkantet. Da Luft für magnetische Kreise einen hohen Widerstand darstellt wird dadurch der magnetische Fluss, welcher die Folie durchsetzt, abgesenkt und somit auch die erreichbare Antriebskraft. Dem gegenüber steht, dass dafür die Motormodule beliebig lang gestaltet werden können um ausreichend Kraft zu erzeugen. Im konkreten Versuch wird ein Fördergurt gefertigt, der ca. 2,0 mm dick sein soll. Dieser soll bei jeweils 1mm Luftspalt pro Seite und 0,5 mm Luftspalt pro Seite betrieben werden.

4.4 ANFANGS- UND ENDEEFFEKTE

Bei rotierenden Maschinen läuft das Magnetische Feld quasi endlos um den Stator herum. Durch diese Anordnung wird ein harmonischer stationärer Zustand erreicht. Im Vergleich dazu wird bei dem Linearmotor an dessen Anfang das magnetische Feld aufgebaut, es läuft dann entlang der Statoren und baut sich am Ende des Motors wieder ab. Dadurch kommt es zu Anfangs- und End-

effekten die Oberwellen hervorrufen und sich negativ auf die Antriebskraft auswirken [Tim81]. Es ist eine technologische Herausforderung diese negativen Effekte zu un-

tersuchen und möglichst durch geeignete Wicklungen zu kompensieren.

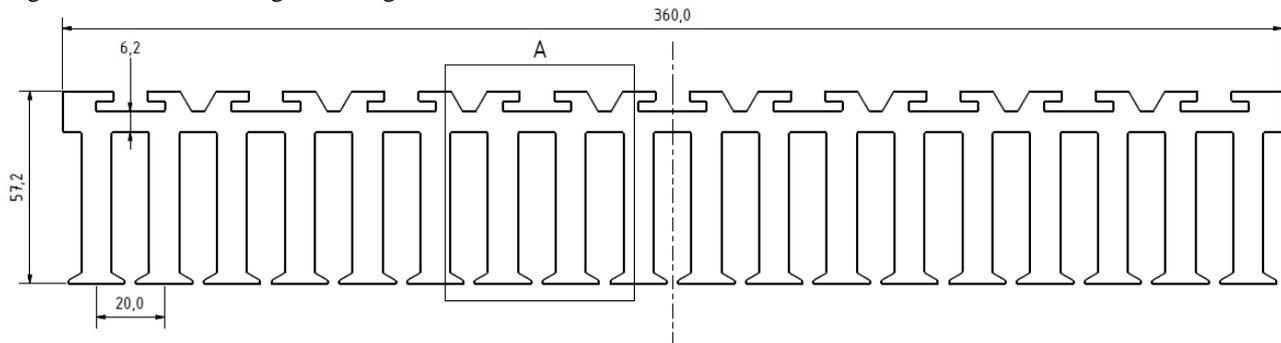


Abbildung 5. Blechschnitt des linearen Direktantriebs

In den Versuchen wird ein Förderband mit einer integrierten 0,2 mm dicken Kupferfolie verwendet. Verbunden wird der sandwichartige Aufbau durch Kleber. Hierbei ist zu beachten, dass durch die Verluste im Folienrotor sich dieser nicht zu stark erwärmt um die Klebeverbindung nicht zu beschädigen. In ersten Versuchen soll das Motorverhalten für verschiedene Speisefrequenzen und Arbeitspunkte charakterisiert werden. Dazu wird der Abstand der Motorhälften auf 4 mm eingestellt. Die Wicklungen sind wie in Abbildung 4 ausgeführt. Die Anfangs- und Endwicklungen werden vollbewickelt verschaltet. Danach soll der Einfluss des Luftspalts untersucht werden. Insbesondere der Wirkungsgrad bei verschiedenen Sättigungen im Eisenkreis soll untersucht werden. Im Anschluss sollen Versuche bei verschiedene Verschaltungen der Wicklungen durchgeführt werden. Der Versuchsstand ist so aufgebaut, dass jede Zahnspule zweidrahtig aus dem Motor herausgeführt wurde. Somit kann von außen die Verschaltung zwischen den Motormodulen und in den Motormodulen beliebig gestaltet werden. Zudem sind einige Spulen mit Mittelanzapfung ausgestattet. Dadurch können die Anfangs- und Endspulen halbbewickelt verschaltet werden. Mit den Schaltungsvarianten soll praktisch der Einfluss der Anfangs- und Endeffekte untersucht werden.

5 BERECHNUNGEN

Der im Berechnungsmodell entworfene Motor entspricht dem Blechschnitt aus Abbildung 5 und vom Wickelschema her der Abbildung 4. Bei den Berechnungen hat sich dieses Wickelschema als effektivstes in Bezug auf Synchrongeschwindigkeit und entwickelte Kraft herausgestellt. Die Tiefe wurde mit 25 cm dimensioniert. Jeder Zahnspule wurde mit 80 Windungen versehen. Die Spulen sind dreiphasig sinusförmig bestromt worden, die Amplitude beträgt 10 A und die Frequenz 25 Hz. In der Berechnung beträgt der Abstand der Module 4 mm. Die folgende Kurve in Abbildung 6 zeigt den Kraftverlauf am stillstehenden Rotor, somit ist der Schlupf $s=1$.

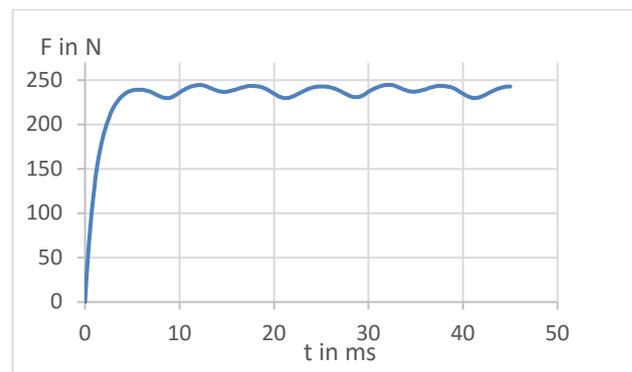


Abbildung 6. Kraftentwicklung über die Zeit beim Anfahren

Die Welligkeit der Kraft ist durch den dünnen Rücken zu erklären. Die in der Abbildung dargestellte Kurve bezieht sich auf die maximale Stromstärke. Bei Betrieb mit geringerer Stromstärke ist demzufolge zu erwarten, dass die Welligkeit abnimmt.

Ursprünglich war für den Stator eine Bewicklung vorgesehen, bei der alle Spulen den gleichen Wickelsinn aufweisen. Dadurch schließt sich der magnetische Fluss immer über die nebeneinanderliegenden Zähne. Demzufolge ist der maximale Fluss im Zahn höher als im Rücken und dementsprechend kann der Rücken dünner dimensioniert werden. Durch die alternative Wicklungsart verringert sich Polteilung im elektrischen Sinne zu der hier verwendeten Wicklung um die Hälfte. Dadurch ergibt sich auch eine halbierte Synchrongeschwindigkeit. Allerdings ist die berechnete Kraftentwicklung bei Stillstand deutlich schlechter, siehe Abbildung 7. Auch hier ist eine Welligkeit zu erkennen. Bei dieser Wickelart ist die Welligkeit nicht durch die Geometrie des Rückens zu erklären. Da auch die Kraftentwicklung geringer ist, muss angenommen werden dass sich hier kein harmonisches Wanderfeld ergibt. Dieser Sachverhalt soll rechnerisch und praktisch untersucht werden. Ebenso wurden weiter Verschaltung berechnet mit welchen die Anlage betrieben werden soll.

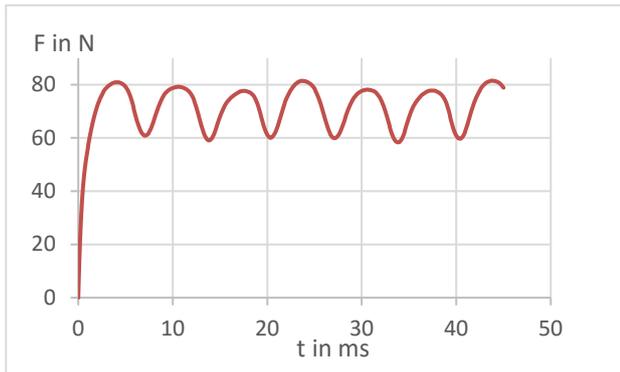


Abbildung 7. Kraftentwicklung über Zeit mit alternativer Bewicklung

6 AUSBLICK

Der Linearasynchronmotor kann Bauart bedingt nicht die gleichen Wirkungsgrade erzielen wie eine rotierende Maschine. Das liegt an der ungünstigen Gestaltung des Rotors und an den Anfang- und Endeffekten. In den Versuchen soll die Leistungsfähigkeit einer solchen Maschine für die Umsetzung eines Direktantriebs für Fördergurte betrachtet werden. Dabei soll das entwickelte Berechnungsmodell mit praktischen Messergebnissen verifiziert werden.

Ermöglicht wurde das Projekt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen eines ZIM-Projekts auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

LITERATUR

- [Kle09] Klement, Joachim: *Technologie der elektrischen Direktantriebe*, expert verlag, 2009, Seite 1. – ISBN: 978-3-8169-2822-5
- [Mue14] Müller, Germar und Ponick, Bernd: *Grundlagen elektrischer Maschinen*, 10. Auflage, WILEY-VCH Verlag, 2014, Seite 217. – ISBN: 978-3-527-41205-1
- [Nei04] Neidhöfer, Gerhard: *Michael von Dolivo-Dobrowolsky und der Drehstrom, Anfänge der modernen Antriebstechnik und Stromversorgung, Geschichte der Elektrotechnik Band 19*, VDE-Verlag, 2004, Seite 71. – ISBN 3-8007-2779-X
- [Pat1889] Kaiserliches Patentamt: Patentschrift 51083, DE000000051083A, *Anker für Wechselstrommotoren*, Patentiert: 08.03.1889, Ausgegeben: 19.04.1890, Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin

- [Phi00] Philippow, Eugen: *Grundlagen der Elektrotechnik*, 10. Auflage, Verlag Technik, 2000, Seite 270, Seite 262, Seite 272. – ISBN: 3-341-01241-9
- [Sch07] Schröder, Dierk: *Elektrische Antriebe – Grundlagen*, 3. erweiterte Auflage, Springer-Verlag, 2007, Seite 266, Seite 283ff. – ISBN: 978-3-540-72764-4
- [Sum16] Sumpf, Jens: *Vorlesung Grundlagen der Fördertechnik, Bandförderer*, TU Chemnitz, 2016, Folie 24, Folie 45ff
- [Tim81] Timmel, Heinz: *Dissertation: Verfahren zur Vorausbestimmung des Betriebsverhaltens von linearen Induktionsmaschinen mit nicht ferromagnetischem Läufer*, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1981, Seite 116

Dipl.-Ing. Ivo Maximov, Scientific Assistant at the professorship of materials handling and conveying engineering, Technische Universität Chemnitz. Ivo Maximov was born 1986 in Sofia, Bulgaria. He studied mechatronic at the Technische Universität Chemnitz and Czech Technical University in Prague.

Phone: +49 371 531-34354, Fax: +49 371 531-343548,
E-Mail: ivo.maximov@mb.tu-chemnitz.de.

Dr.-Ing. Markus Helbig, Scientific Assistant at the professorship of materials handling and conveying engineering, Technische Universität Chemnitz. Markus Helbig was born 1980 in Germany. He studied mechanical engineering at the Technische Universität Chemnitz.

Phone: +49 371 531-35854, Fax: +49 371 531-358548,
E-Mail: markus.helbig@mb.tu-chemnitz.de.

Dr.-Ing. Jörg Hübler, Senior Researcher at the professorship of materials handling and conveying engineering, Technische Universität Chemnitz. Jörg Hübler was born 1971 in Zschopau, Germany. Between 1992 and 1997 he studied mechanical engineering at the Technische Universität Chemnitz.

Phone: +49 371 531-36722, Fax: +49 371 531-367228,
E-Mail: joerg.huebler@mb.tu-chemnitz.de.

Address: Professur Fördertechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Germany