

8. Linearmotoren

8.1 Übersicht

Eine Vielzahl der zu realisierenden technischen Bewegungen sind **lineare Bewegungen** in einer oder mehreren Achsen. Demzufolge wäre zu erwarten, dass Antriebe zur direkten Erzeugung linearer Bewegungen ebenso weit verbreitet sind wie rotatorische Antriebe. Dies trifft jedoch nur auf **Elektromagnete** mit Bewegungsbereichen von **einigen Millimetern bis hin zu wenigen Zentimetern** zu. Zum Erzeugen größerer linearer Bewegungen überwiegen rotatorische Motoren mit nachgeschalteten Getrieben (Rotations-Rotations-Umformern) zum Anpassen von Drehmoment und Drehzahl und anschließend Rotations-Translations-Umformer zum Umformen der rotatorischen in eine lineare Bewegung. Dies erlaubt den Einsatz problemneutraler, in hohen Stückzahlen produzierter, kostengünstiger rotatorischer Motoren, die erst über problemspezifische Getriebe an die Bewegungsaufgabe angepasst werden.

Allerdings bringen gerade diese Bewegungsumformer auch **erhebliche Nachteile** für das Gesamtsystem. **Große zu bewegendende Massen, Reibung, Spiel sowie Elastizitäten** begrenzen die erzielbare Positioniergenauigkeit und Dynamik. Auch die Kosten der Folgemechanik, deren **Geräuschentwicklung** oder auch eine **Partikelemission** durch Verschleiß sind nicht zu vernachlässigen. Bei **Linearantrieben** fehlen dagegen mechanische Bewegungsumformer. Daraus ergeben sich **mechanische Vorteile** hinsichtlich eines geräuscharmen Betriebes, geringen Verschleißes sowie einer hohen Lebensdauer. Unter regelungstechnischem Aspekt zeichnen sich diese Antriebe durch geringe Elastizitäten und Reibung aus; Spiel in der Bewegungsübertragung tritt nicht auf. Linearantriebe besitzen somit die Voraussetzung für **höchste Dynamik** und **Positioniergenauigkeit**. Deshalb führen beispielsweise hohe Anforderungen an Positioniergenauigkeit (positioning accuracy) und Dynamik (dynamic), manchmal auch Kostenfragen oder gar die Einsatzbedingungen (Reinraumbedingungen) dazu, speziell angepasste Linearantriebe (linear direct drive) einzusetzen.

Linear- und Mehrkoordinaten-Antriebe stellen wegen der notwendigen Anpassung an den Bewegungsbereich **problemspezifische Antriebe** dar, die häufig auch konstruktiv stark in den Gesamtaufbau eines Gerätes integriert sind. Dadurch können einerseits hochdynamische Antriebe mit sehr hoher Positioniergenauigkeit realisiert werden, problemneutrale Baureihen und damit eine effektive Fertigung in **großen Stückzahlen** sind jedoch andererseits noch *selten*. Nachteilig wirkt sich das **schlechte Masse-Leistungs-Verhältnis** aus, da derartige Motoren im allgemeinen so lang wie der Bewegungsbereich gebaut werden müssen. Eine Integration des Direktantriebes in den Gesamtaufbau kann dies in bestimmtem Maße kompensieren.

Antriebsmittel für kontinuierliche Linearbewegung (Linearmotoren) dienen also zur direkten Erzeugung einer translatorischen Bewegung. Die aufwendige mechanische Umsetzung einer rotatorischen Bewegung in eine lineare Bewegung entfällt. Diese Motoren können wie rotierende Elektromotoren eingeteilt werden in

- Gleichstrom-Linearmotoren/ Linearaktoren
- Asynchron-Linearmotoren
- Synchron-Linearmotoren

Gleichstrom-Linearmotoren werden wegen ihrem begrenzten Bewegungsbereich häufig auch als **Linearaktoren** (Linearaktuatoren) bezeichnet. Es sind vor allem Antriebe kleiner Leistung mit begrenzten Wegstrecken, die aber in der Gerätetechnik massenhaft Anwendungen findet. Bei größeren Leistungen und Wegen sind bei diesen Motoren Stromzuführung und Stromwendung problematisch.

Literatur: **Elektrische Maschinen und Antriebe**
Hans-Dieter Stölting/Eberhard Kallenbach
Hanser Verlag 2011, 4. Auflage
ISBN 3-446-42392-3

Asynchron-Linearmotoren haben bisher infolge ihres verhältnismäßig einfachen Aufbaus, wie die rotierende Asynchronmaschine, vielfältigen Einsatz gefunden.

Synchron-Linearmotoren haben vor allem in Verbindung mit der Magnet-Schwebetechnik (TRANSRAPID) bei Antrieben von Hochgeschwindigkeitsbahnen Bedeutung erlangt. Sie finden aber auch im Maschinenbau bei Positionierantrieben und Handlingssystemen vermehrt Einsatz.

Literatur Drehstromlinearmotoren:

Elektrische Maschinen
Rolf Fischer
Hanser Verlag 2013, 16. Auflage
ISBN-10: 3-446-43813-0

Anwendungen von Linearmotoren

Linearmotoren werden in **Werkzeugmaschinen**, **Positioniersystemen** und **Handlingssystemen** in **Bearbeitungszentren** verwendet. Herkömmlich werden Vorschubkräfte von einem sich drehenden Elektromotor erzeugt und in einem Getriebe in eine translatorische Bewegung umgesetzt. Die Bewegung wird also indirekt herbeigeführt. Linearmotoren ermöglichen es hingegen, direkt eine translatorische Bewegung darzustellen, man nennt sie deswegen auch **Direktantriebe**.

Linearmotoren werden auch häufig in **Positioniergeräten** oder verschiedenen anderen Maschinenarten, etwa bei **Ultraschallmikroskopen**, **Plasmaschneidanlagen**, **Laserschneidanlagen** und **Wasserstrahlschneidanlagen**, eingesetzt. Linearmotoren eignen sich auch als **Pumpen für flüssige Metalle** (zum Beispiel Natriumkreislauf in Atomkraftwerken), wobei die Spulen fest montiert sind und das flüssige Metall als Läufer im Durchlaufrohr in Bewegung bringen.

Linearmotoren werden auch für **Bahnantriebe** (Transrapid) oder auch **Achterbahnen** eingesetzt.

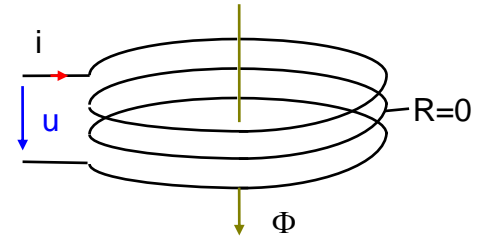
Verstärkt werden Linearmotoren (Linearaktoren) wegen der vielen konstruktiven Vorteile mittlerweile in **Haushalts-Elektro-Kleingeräten** wie elektrischen **Zahnbürsten**, **elektrischen Rasierern**, **Mundduschen** eingebaut. Als Stator kommen hierbei Magnete aus Neodym-Eisen-Bor zum Einsatz.

8.2 Gleichstrom-Linearmotoren /Linearaktoren

a) Elektromagnete:

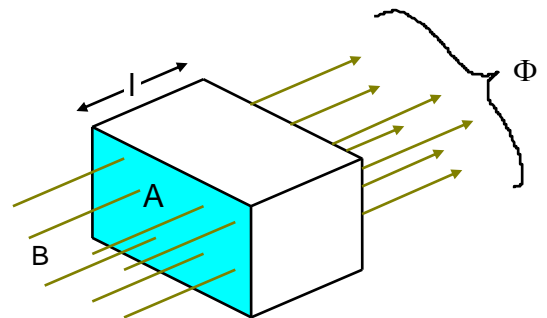
Energie des Magnetfeldes einer Spule

Ermittlung der in der Spule gespeicherten Energie:



Energie des Magnetfelds in einem Raumvolumen

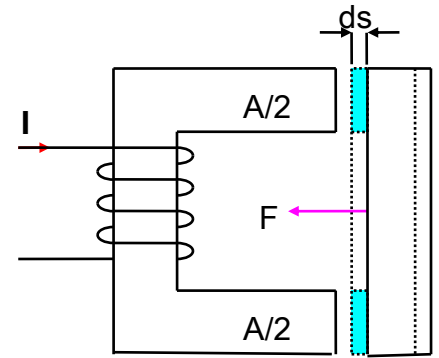
Für den vom Fluß Φ durchsetzten Raum gilt:



Kraft auf das Joch eines Zugmagneten

Zugrunde gelegte Näherungen:

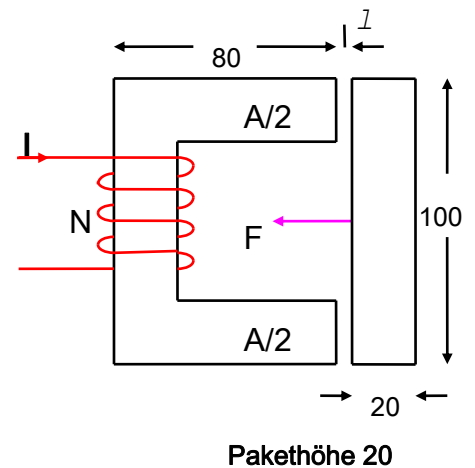
- keine Streuung der Feldlinien am Luftspalt also $A_{Lu} = A$
- Flußdichte im Luftspalt konstant
- Bei Stromfluß wird das Joch mit der Kraft F zum U-Kern gezogen
- Bei Bewegung des Jochs um ds wird das Luftspaltvolumen um $A \cdot ds$ verkleinert
- Nimmt man $ds \rightarrow 0$ an, ändert sich die Flußdichte B im Luftspalt dabei nicht



Beispiel: Zugmagnet mit Eisenblechpaket

Gegeben: $F = 100 \text{ N}$
 $\mu_r = 2000 \text{ (Eisen)}$
 $l_{Lu} = 1 \text{ mm}$
 $N = 1000$

Gesucht: Strom I



Anwendungen von Elektromagneten

Spule mit ferromagnetischem Kern (meist aus Eisen)

- Betätigungsmagnete von Relais und Schützen
- Türöffner-Magnet, Magnete in Summern und Türgongs
- Magnetkupplungen (z B in Vakuumpumpen oder Klimakompressoren im Kfz) und Bremsen (z B mit Rückstellfeder in Rasenmähern und an Kranen)
- Zugmagnete, Schubmagnete
- Hubmagnete (Magnetkran in Stahlwerken)
- Magnete, um Weichen von Schienenfahrzeugen zu stellen
- Wechselstrom-Magnete in Membranpumpen oder Dosierpumpen (z. B. Luftpumpe für Aquarien, Additive oder Kraftstoffe) und Schwingförderern
- Separatoren zur Stofftrennung „ferromagnetisch“ / „nicht ferromagnetisch“ (Magnetscheider, z. B. zur Müllsortierung)
- Ablenkmagnete in Teilchenbeschleunigern für geladene Teilchenstrahlen
- Ablenkspulen- und Fokussiermagnete (Elektronenmikroskop, Elektronenstrahlschweißen, Bildröhren)
- Elektromagnetisch betätigte Einspritzinjektoren bei Dieselmotoren mit dem Einspritzverfahren

b) Tauchspulenaktoren (Voice-Coil-Motor)

Wirkprinzip

Elektrodynamische Stelltechnik nutzt die Kraftwirkung auf bewegte Ladungen im magnetischen Feld. Neben der elektrodynamischen Kraftwirkung entstehen in einigen Bauformen zusätzlich Reluktanzkräfte.

Elektrodynamische Kraftwirkung (electrodynamic force of action) tritt nur wenn stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld angeordnet sind. Aus der dann vorhandenen Kraftwirkung (**Lorentz-Kraft**) auf bewegte Ladungen im quasistationären Magnetfeld folgt für die Kraft auf einen vom Strom i durchflossenen Leiter der kraftwirksamen Leiterlänge l im Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte B bei senkrecht aufeinander stehender Strom- und Feldrichtung:

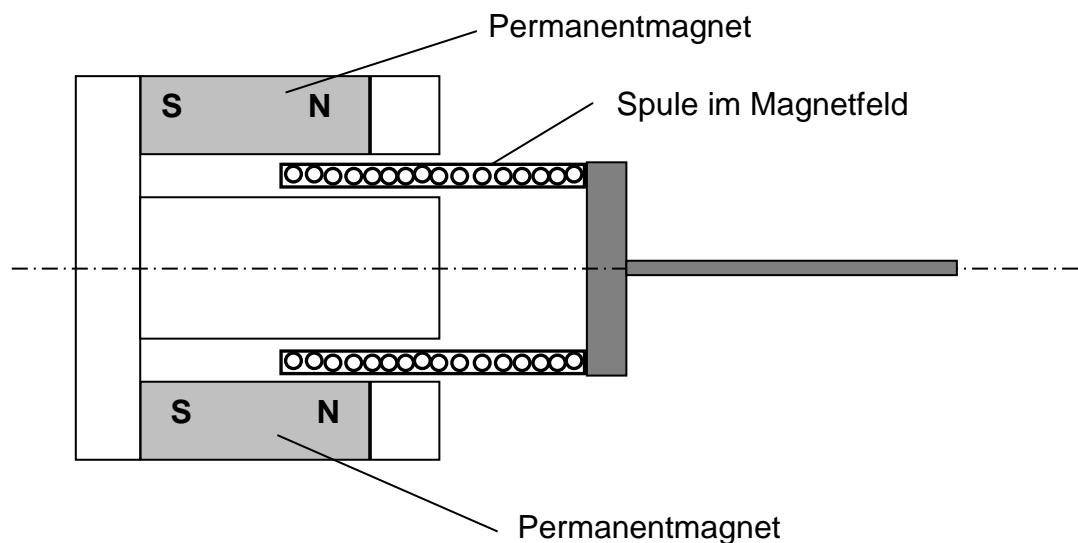
$$F = B \cdot l \cdot i = k_F \cdot i$$

Für lineare Antriebe wird $B \cdot l$ bzw. k_F auch als Kraft-oder Motorkonstante (force resp. torque constant) bezeichnet. Bei rotatorischen Motoren definiert man dagegen eine Motor- bzw. Drehmomentenkonstante k_M aus der Drehmomentengleichung.

$$M = F \cdot r = k_M \cdot i$$

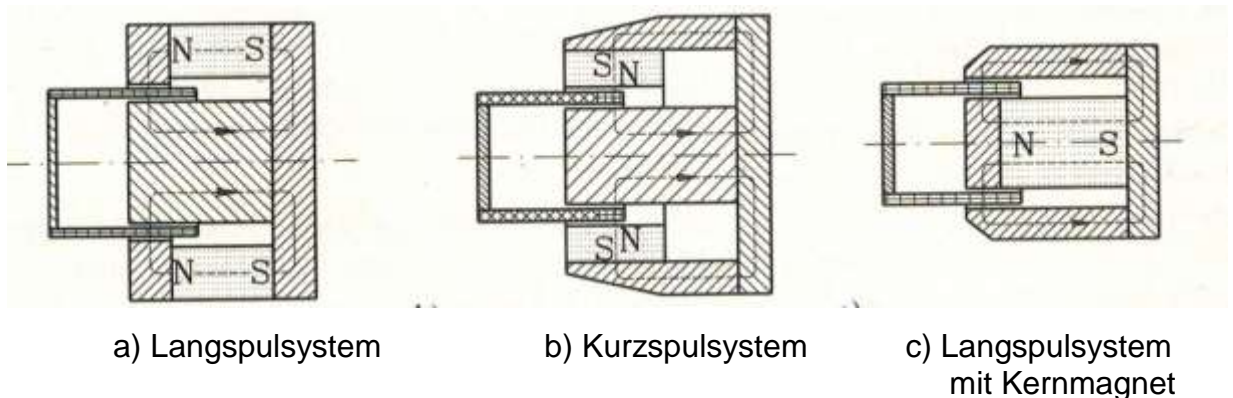
Prinzip eines Tauchspulmotors

Das Arbeitsprinzip soll, beispielhaft an einem Tauchspulmotor (voice-coil motor) verdeutlicht werden. Der Arbeitsluftspalt nimmt die bewegliche Luftspaltwicklung (Tauchspule) auf, die den Abtrieb bildet. Teile der Spule mit der Windungszahl w^* (die Windungszahl des Spulenabschnittes innerhalb des magnetischen Kreises) können dabei den magnetischen Kreis umfassen und als zusätzliche elektrische Erregung i_w^* wirken, wobei sich die Zahl der wirksamen Windungen für diese sogenannte Ankerrückwirkung bei Bewegung in diesem Beispiel ständig ändert. Bei Kleinmotoren wird das Magnetfeld allgemein durch permanentmagnetische Erregung erzeugt. Dies vermeidet Wärmeverluste die sonst in der Erregerwicklung zusätzlich zur Erwärmung der bewegten Spule auftreten und abzuführen wären.



Beispiele von rotationssymmetrischen Zylinderspulen

Rotationssymmetrische Anordnungen mit Zylinderspulen (cylindrical coil) besitzen meist nur einen zylinderförmigen Luftspalt mit einer Spule darin. Axial (a) und radial (b) magnetisierte Ringmagnete oder auch mehrere Magnet-Segmente anstelle von radial magnetisierten Ringmagneten. Dabei treten deutliche äußere Streufelder auf. Kernmagnetsysteme (c) vermeiden dies.



Typische Parameter: Weg $s \leq 100$ mm, Kraft $F \leq 100$ N

Einsatzgebiete: Lautsprecher, kurzhubige Positionierantriebe

Beispiel Kastenspulen

Kastenspulen werden bei prismatischem Grundaufbau benötigt, führen aber sonst zu ähnlichen Antriebslösungen. Aus konstruktive und montage-technischen Gründen nutzt man in prismatischen Systemen die Kastenspulen jedoch häufig nicht allseitig aus, sondern ordnet sie nur in einer oder zwei parallelen Ebenen in Luftspalte an. Nicht alle Spulenabschnitte können dann zur Krafterzeugung beitragen.

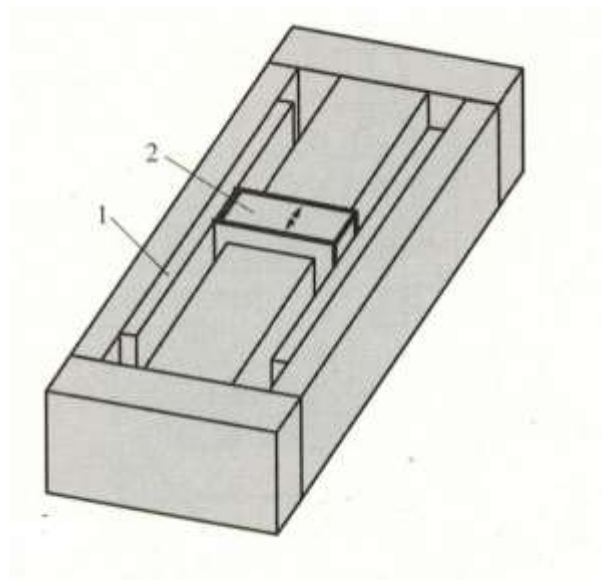
Typische Parameter:

Weg $s \leq 200 \text{ mm}$, Kraft $F \leq 50 \text{ N}$

Einsatzgebiete:

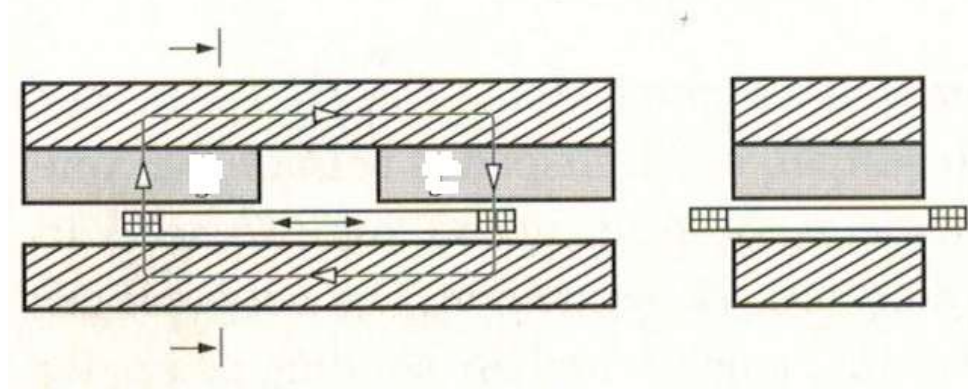
Positionierantriebe
schreibende Messgeräte

1..Magnet
2 bewegte Spule



Beispiel Flachspulen

Bauformen mit ebenen Flachspulen (flat coil) erfordern wegen der verschiedenen Stromrichtungen zwischen Hin- und Rückleitern eine Polaritätswechsel des magnetischen Feldes innerhalb der Luftspaltausdehnung. Auch hier entstehen ungenutzte Spulenabschnitte, vergleichbar mit Wickelköpfen rotierender Motoren.

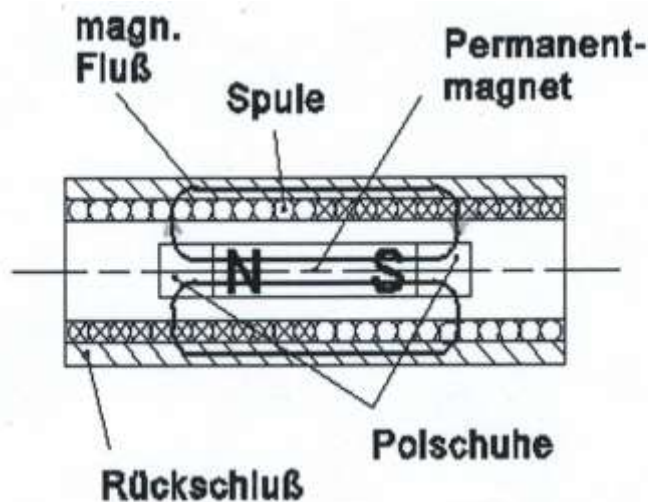


Typische Parameter: Weg $s \leq 50 \text{ mm}$, Kraft $F \leq 100 \text{ N}$

Einsatzgebiete: kurzhubige Positionierantriebe

Beispiel für bewegten Permanentmagnet

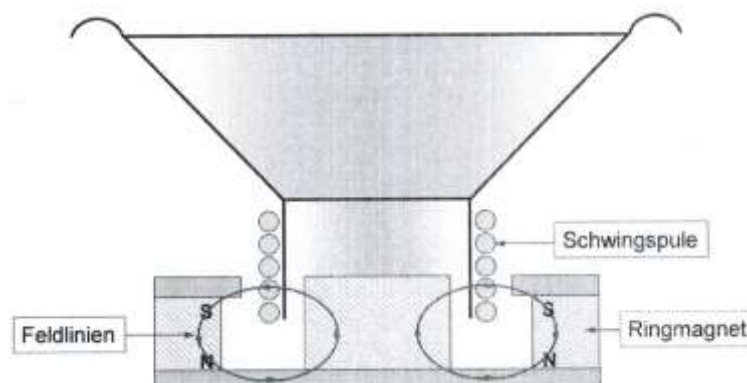
Magnet und Polschuhe sind im beweglichen Läufer angeordnet. Über den Rückschluss (Eisen) wird der magnetische Kreis geschlossen, so dass die feststehend angeordnete Spule vom magnetischen Fluss durchsetzt wird. Auch hier tritt die Lorentzkraft als Kraft zwischen Spule und Magnetkreis auf; da jedoch die Spule ortsfest ist, muss sich der Magnet als Läufer bewegen. Damit sich die Kräfte nicht aufheben, muss die Wicklungsrichtung in der Mitte der Spule geändert werden.



Beispiel Tauchspulenlautsprecher (Tauchspule)

Eine Schwingspule ist bei **Schallwandlern** eine elektrische Spule, die als Antriebssystem des Wandler dient. Anwendung sind unter anderem elektrodynamische Lautsprecher oder Basslautsprecher. Bei dynamischen Mikrofonen ist, bei identischem Funktionsprinzip, die alternative Bezeichnung **Tauchspule** üblich.

Die **Schwingspule** besteht aus einem dünnen Draht, der auf dem sogenannten Schwingspulenträger aufgewickelt ist. Diese Spule taucht in den Luftspalt des Permanentmagneten ein, in dem sich ein starkes Magnetfeld befindet. Der Spulenträger ist mit der eingespannten Membraneinheit des Lautsprechers verbunden. Das sich durch Stromdurchfluss aufbauende magnetische Wechselfeld bewegt die Schwingspule mit der Membran nach vorne und nach hinten und ermöglicht es so, die Spannungs- bzw. Stromschwingungen in Luftschwingungen umzusetzen.



Anwendungen für Tauchspulaktoren

Konstrukteure stehen bei der Konzeption neuer Maschinen und Anlagen regelmäßig vor der Entscheidung für einen passenden Antrieb. Die Auswahl ist abhängig von der benötigten Kraft, dem zurückzulegenden Weg und der notwendigen Positioniergenauigkeit. Für viele Anwendungen kommen sowohl **pneumatische** als auch **elektrische lineare Direktantriebe** in Frage. Beide Varianten eignen sich für kurze Wege, die in kurzen Taktzeiten zurückgelegt werden müssen. Doch bestehen **große Unterschiede** bezüglich der **Positioniergenauigkeit**, sowie bezüglich des **Wartungsaufwandes**, des **Platzbedarfs** und anfallender **Kosten**.

Wie die englische Bezeichnung **Voice Coil** - auf deutsch **Schwingspule** - andeutet, sind mit einem Tauchspulenaktor **hochdynamische, hysteresefreie Bewegungen** möglich. Solche Linearantriebe benötigen **lediglich eine Stromquelle**, keine aufwändige Infrastruktur in Form eines Druckluftnetzes. Sie arbeiten **wartungsarm, energieeffizient** und **nahezu geräuschlos**. In **Kombination** mit einem **Wegmesssystem und einem Servoregler** kommen Tauchspulenaktoren heute bereits überall dort zum Einsatz, wo hohe **Positionier- und Wiederholgenauigkeiten**, ein konstanter Kraftverlauf, sowie **hohe Taktzahlen** und **geringe Anlaufverzögerungen** zu realisieren sind. Die beschriebenen Eigenschaften der Voice Coils machen die Linearantriebe allerdings auch für Einsatzfälle attraktiv, bei denen Konstrukteure **bis jetzt** vermehrt pneumatische lineare Direktantriebe bevorzugen.

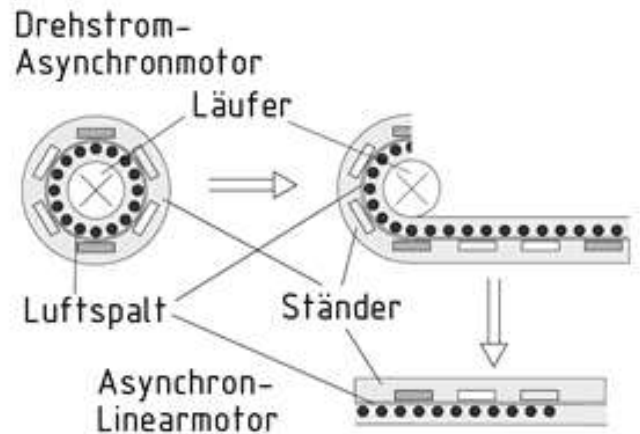
Anwendungen:

- Sortierer
- Verpacken & Etikettieren
- Pick & Place
- Mikro-Montage
- Ventilsteuerung
- Laserfokussierung bzw. Laserstrahlführung
- Wirebonding
- Vibrations- und Schwingantriebe
- Schweißkanten- bzw. Linsenschleifen
- Einpressen und Fügen
- Greiferantrieb
- Dosiersysteme

8.3 Asynchron-Linearmotoren

Aufbau

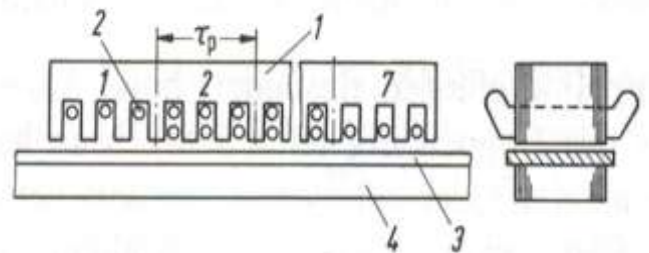
Wird der Ständer einer Drehstrom-Asynchronmaschine an einer Stelle radial aufgeschnitten und der Umfang in eine Ebene gestreckt, so entsteht ein kammartiges Blechpaket mit Drehstromwicklung. Die Rolle des Käfigläufers kann entsprechend eine Schiene aus leitendem Material wie Kupfer, Aluminium oder Eisen übernehmen.



Für den praktischen Aufbau dieser asynchronen Linearmotoren wird meist ein Schnitt nach untenstehendem Bild gelegt, so dass eine ungerade Anzahl von Polteilungen entsteht. Die Ständerwicklung besitzt dadurch in der Anfangs- und der Endzone nur die halbe Leiterzahl/Nut, während sie im Mittelbereich aus einer normalen Drehstrom-Zweischichtwicklung besteht. In der einseitigen Ausführung benötigt der Linearmotor hinter der Läufer-Schiene einen magnetischen Rückschluss, der dem Rotorblechpaket entspricht. Günstiger ist daher die doppelseitige Bauform, die aus zwei spiegelbildlich angeordneten Ständern besteht.



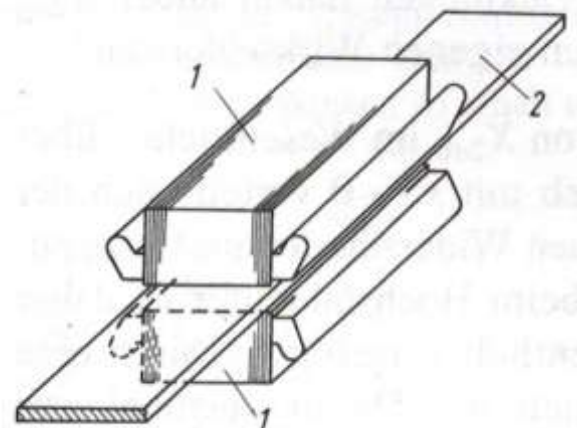
- 1 Ständer mit Drehstromwicklung
 $p = 3, Z_p = 6$
- 2 Käfigläufer



- 1 Ständerblechpaket
- 2 abgestufte Drehstromwicklung
- 3 Läufer-schiene
- 4 magnetischer Rückschluss

Aufbau eines doppelseitigen Linearmotors

- 1 Ständerblechpaket mit Drehstromwicklung
- 2 Läufer-schiene



Wirkungsweise und Betriebsverhalten

Anstelle des Drehfeldes der üblichen Asynchronmaschine bildet die Drehstromwicklung im Mittelbereich des Linearmotors ein reines Wanderfeld aus. Entsprechend der Umfangsgeschwindigkeit des Drehfeldes entlang der Ständerbohrung bewegt sich das Wanderfeld geradlinig mit:

entlang des Ständerblechpakets. Je nach Schlupfgeschwindigkeit

zur Schiene werden dort wie in der Käfigwicklung eines rotierenden Läufers Sekundärströme I_2 induziert, die nach

eine Vorschubkraft im Sinne der Lenz'schen Regel bewirken. Bei fixiertem Ständer (Stator) bewegt sich die Schiene mit der Geschwindigkeit

in Richtung des Drehfeldes. Wird die Schiene festgehalten, so bewegt sich der Ständer (Kurzstator) durch die Schubkraft entgegen der Wanderfeldrichtung.

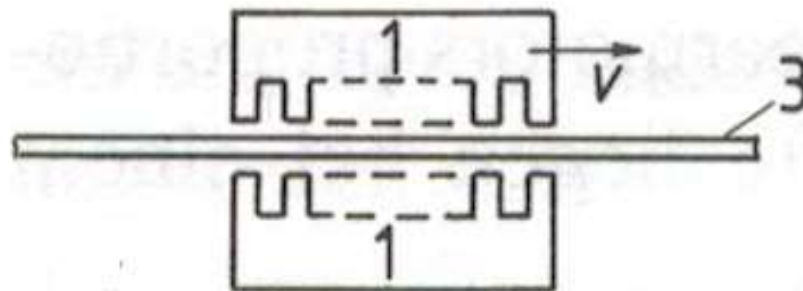
Die Berechnung der möglichen Schubkraft F eines Linearmotors kann vereinfacht - ohne Berücksichtigung der beidseitigen Randzonen - aus der Gleichung für das Drehmoment M des rotierenden Motors erfolgen.

Eine Besonderheit des einseitigen Linearmotors gemäß sind die hohen magnetischen Feldkräfte zwischen Ständer und dem Rücken der Läuferschiene, die dem Quadrat der Luftspaltflussdichte proportional sind. Diese Anziehungskräfte, die beim **TRANSRAPID** nutzbringend zum Schweben der Fahrgastkabine eingesetzt werden, liegen in der Regel beim Mehrfachen der Vorschubkraft.

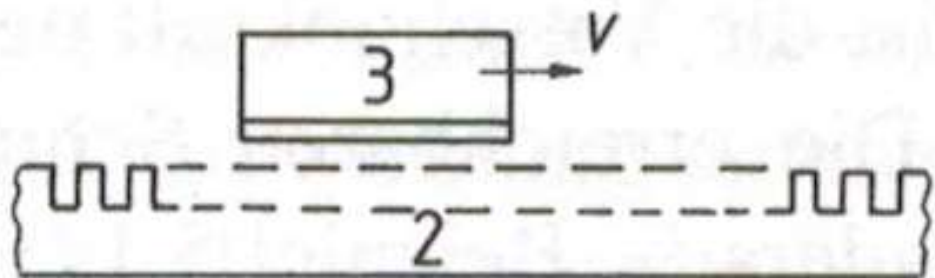
Kurz- und Langstatormotor

Infolge seiner fortlaufenden geradlinigen Bewegung muss bei einem Linearmotor ein Maschinenteil die Länge des zurückzulegenden Weges erhalten. Ob hierzu der Ständer oder die Läufer-schiene gewählt wird, hängt von der Antriebsaufgabe ab und führt zu folgenden Ausführungen:

Beim **Kurzstator-Linearmotor** besitzt der Sekundärteil, d.h. die **Schiene 3** die Gesamtlänge der Bewegung. Steht sie fest, so wird der Motor 1 entlang der Schiene hin- und herlaufen. Wird der **Ständer 1** fixiert, so bewegt sich die Schiene, um z. B. in der Bauform des so genannten Polysolenoid mit einer runden Stange eine Schubaufgabe ausführen zu können.



Beim **Langstator-Linearmotor** wird das kammartige **Ständerblechpaket 2** mit der Drehstromwicklung über die ganze Wegstrecke verlegt. Der **induzierte Teil 3** läuft dann entlang der Ständerstrecke. Im Vergleich zum bewegten Kurzstatormotor liegt der Vorteil darin, dass die Antriebsleistung nicht auf den laufenden Teil übertragen werden muss. Alle drei Betriebsvarianten werden in der Praxis ausgeführt. In der Ausführung mit Kurzstator ist der Linearmotor ein Serienprodukt, das für viele Stellaufgaben eingesetzt werden kann.



Anwendungen

Die Betriebskennlinien des Linearmotors können prinzipiell aus dem bekannten Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine bestimmt werden. Für den praktischen Fall ist allerdings der nicht unerhebliche Einfluss der Randzonen zu beachten, die das Ergebnis verschlechtern. Das Kraft-Geschwindigkeits-Diagramm ist stark von dem wirksamen "**Läuferwiderstand**" R' und damit von dem **Material** der Schiene abhängig. Besonders bei Aluminium und Eisen ähnelt die Kurve $F = f(v)$ auf Grund des geringeren elektrischen Leitwertes der Momentenkennlinie $M = f(n)$ eines Motors mit Läuferzusatzwiderständen.

Zur Steuerung der Geschwindigkeit des Linearmotors eignen sich alle bereits vom Käfigläufer her bekannten Verfahren. Es sind eine Polumschaltung, die Herabsetzung der Klemmenspannung und vor allem die **Frequenzsteuerung** möglich.

In der industriellen Antriebstechnik kann der Linearmotor prinzipiell überall dort eingesetzt werden, wo geradlinige Bewegungen auszuführen sind. Als Beispiele seien **Stapelgeräte**, **Torantriebe**, **Laufkatzen** und **Förderanlagen** genannt. Auf den Einsatz der synchronen Bauart als Positionierantrieb in Werkzeugmaschinen sei verwiesen.

Eine spezielle Anwendung hat der Linearmotor in der Verkehrstechnik gefunden. Gegenüber der klassischen Lösung mit dem Antrieb der Räder auf Schienen bestehen verschiedene Vorteile. So wird die Zugkraft nicht mehr durch die Reibung zwischen Rad und Schiene übertragen und ist damit unabhängig von Achslasten und Reibungsbeiwerten. In der **Variante des Kurzstatormotors** liegt die Schiene entlang des Fahrweges, ihr jeweils aktiver Teil wandert also mit der Bewegung und muss so nicht gekühlt werden. Zur Energieversorgung des bewegten Ständers muss wie im klassischen Bahnbetrieb ein meist **seitlicher Stromabnehmer** vorgesehen werden. In dieser Technik wurden verschiedentlich Bahnen für **Förderanlagen** und zum **Personentransport in Parks** eingesetzt.

Für die **Technik des Langstatormotors** mit über der Wegstrecke verlegter Drehstromwicklung hat sich die synchrone Bauart durchgesetzt. Stichwort ist hier das Verkehrssystem **TRANSRAPID**, dessen Technik bei der Behandlung der Synchronmaschine behandelt werden wird.

Beispiel:

Ein vierpoliger Drehstrom-Käfigläufermotor für $P_N = 5,5 \text{ kW}$, $n_N = 1455 \text{ min}^{-1}$, habe einen Bohrungsdurchmesser $d_1 = 125 \text{ mm}$. Die Masse des Gehäuses mit aktivem Teil betrage $m = 27 \text{ kg}$. Es sei angenommen, dass es gelingt, mit dieser Masse einen Kurzstator-Linearmotor gleicher Leistung zu fertigen.

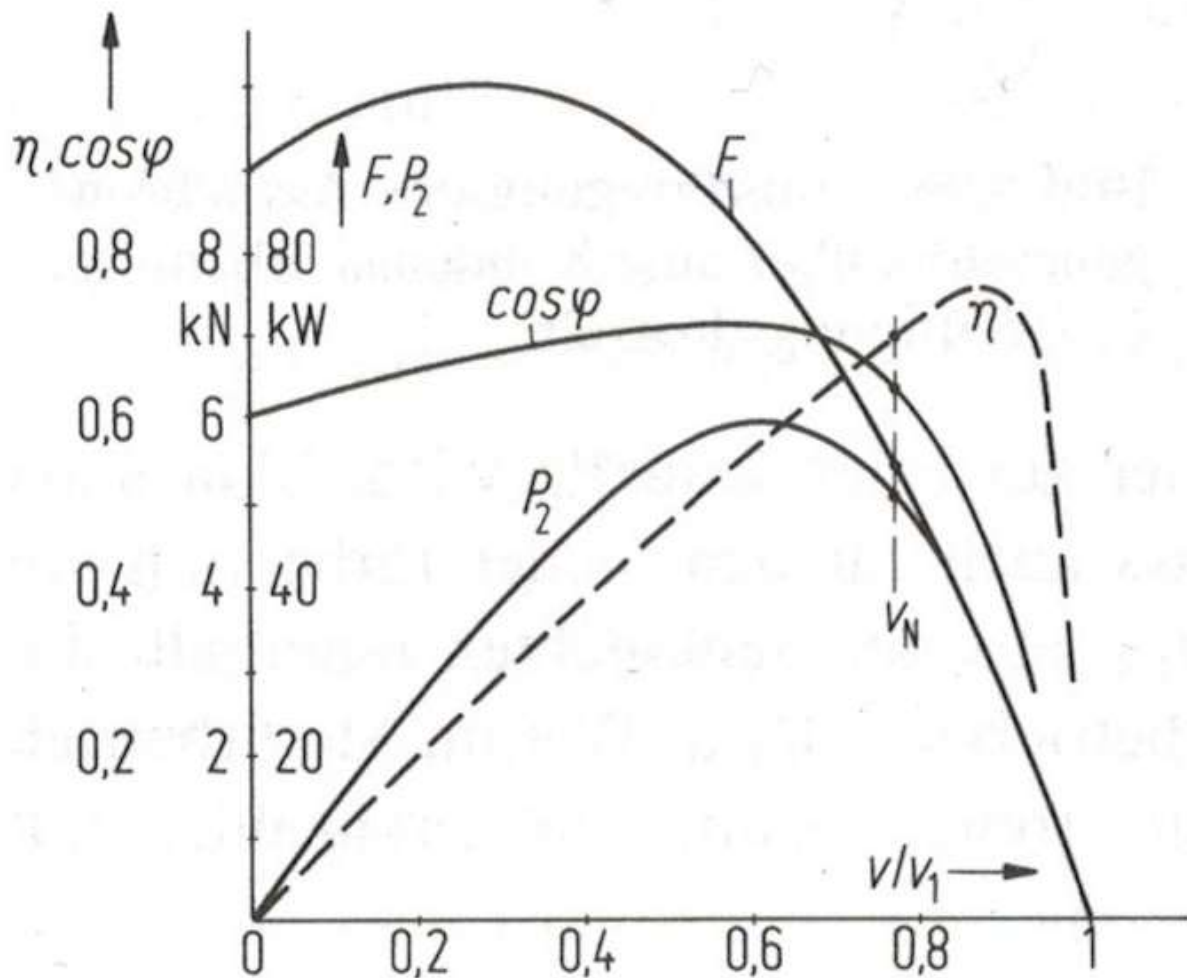
Welche Anzugskraft F_N erreicht der Linearmotor etwa?

Betriebskennlinien eines Linearmotors

Das Bild zeigt die Kennlinien eines doppelseitigen Linearmotors mit zwischenliegender Kupferschiene von ca. 5 mm Stärke. Der Motor wird mit Rücksicht auf die Erwärmung im Aussetzbetrieb S3 und 40 % relativer Einschaltdauer betrieben.

Er erreicht hier bei einem Schlupf $s_N = 0,23$ eine Schubkraft $F_N = 5400 \text{ N}$

Die Geschwindigkeit beträgt bei $v_1 = v_s = 12 \text{ m/s}$; $v = v_s (1 - s) = 9,24 \text{ m/s} = 33,26 \text{ km/Std.}$



8.4 Synchrone Langstator-Linearmotoren

Unter dem Namen TRANSRAPID (Magnetschwebebahn) wurde in Deutschland bereits seit Ende der 70er-Jahre ein Schnellverkehrssystem entwickelt, das als Antriebs- und Trageinheit einen synchronen Langstator-Linearmotor besitzt. Der TRANSRAPID fährt inzwischen schon ca. 15 Jahre auf einer 31 km langen Versuchsstrecke im Emsland (Niedersachsen) und befördert dort Interessenten aus aller Welt mit Fahrgeschwindigkeiten bis etwa 500 km/h. Der bislang fehlende Einsatz im öffentlichen Verkehrswesen in Europa ist nicht technisch bedingt, sondern hat seine Ursache in der kritischen Bewertung der Wirtschaftlichkeit und damit der Finanzierbarkeit dieses Systems im Vergleich zur bestehenden Bahntechnik. Ein erster Exporterfolg ist der im Jahre 2002 erfolgte Bau einer Zubringerstrecke zwischen Shanghai und seinem 33 km entfernten Flughafen in China.

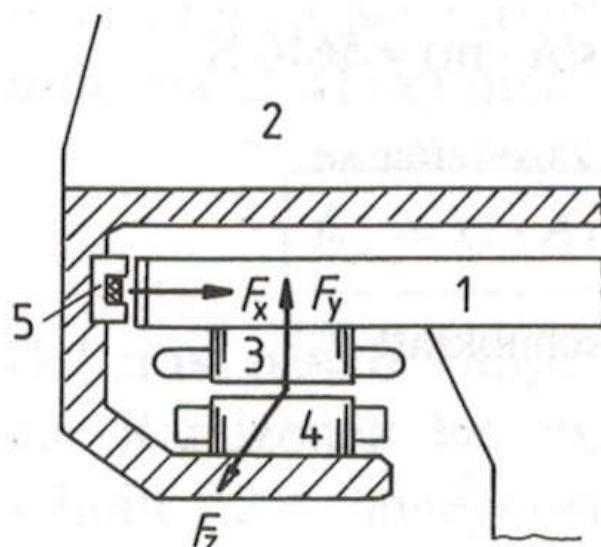
Das Besondere der Schwebebahntechnik ist die Vereinigung von Tragen der Fahrgastkabine und ihr Antrieb in einer Einheit, nämlich einem eisenbehafteten synchronen Langstator-Linearmotor. Das System ist in mit Fahrweg 1, Fahrzeug 2 und Linearmotor 3, 4, 5 skizziert. Der eisenbehaftete Langstator 3 liegt an der Unterseite der Tragkonstruktion 1, während die beidseitigen Arme des Fahrzeugs den Läufer 4 mit seinen Elektromagneten enthalten. Beidseitige Führungsmagnete 5 sichern durch ihre Feldkräfte den horizontalen Abstand zwischen Fahrzeug und Tragkonstruktion.

Der Linearmotor übernimmt zunächst durch die magnetischen Anziehungskräfte zwischen Stator und Läufer die Gewichtskraft des Fahrzeugs und ermöglicht damit den berührungsfreien Lauf der Schnellbahn. Ferner liefert er mit F_z , die Antriebskraft für das Fahrzeug. Damit entfallen alle sonst im Bahnbetrieb durch die kraftschlüssige Verbindung zwischen Rad und Laufschiene sowie den Stromabnehmern und Fahrdrähten auftretenden Probleme wie

- Begrenzung der Zugkraft durch die rollende Reibung und das Achsgewicht
- Schwingungen und Geräusche durch Stoßstellen
- Kontaktprobleme durch Schwingungen des Stromabnehmers

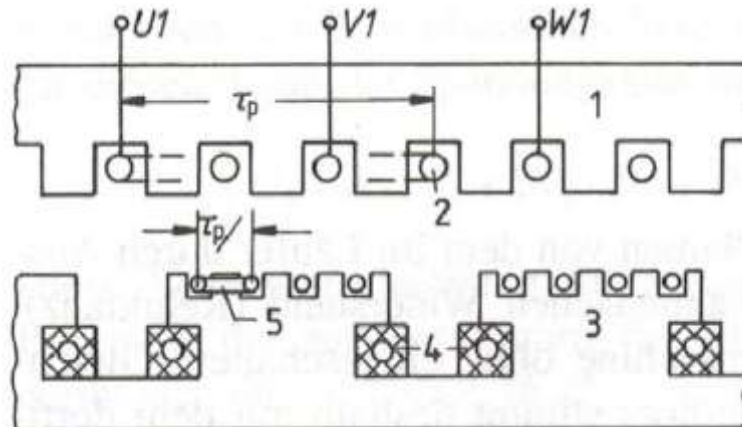
und erlauben somit Fahrgeschwindigkeiten von über 500 km/h.

- 1 Fahrweg
- 2 Fahrzeug
- 3, 4 Linearmotor
- 5 Führungsmagnet



Motoraufbau

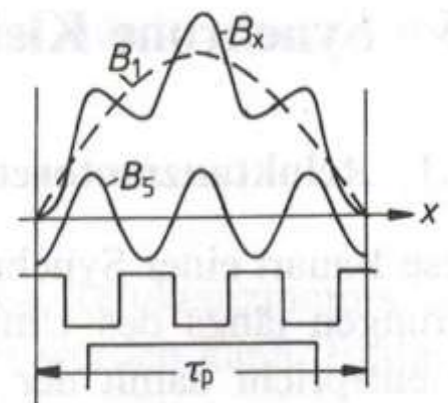
Das Bild zeigt das Prinzip des Langstator-Linearmotors. Das Primärteil (1) trägt in offenen Nuten eine Drehstromwicklung (2), die längs des gesamten Fahrwegs verlegt ist. Der "Läufer" (3) besitzt ausgeprägte Pole mit einer konzentrischen Erregerwicklung (4). Eine Energiezufuhr über einen Stromabnehmer ist nicht erforderlich, da die Versorgung der Magnete und aller sonstigen Bordsysteme ein Lineargenerator (5) übernimmt. Seine Wicklung liegt an der Oberfläche der Polschuhe und liefert eine von der Fahrgeschwindigkeit abhängige Spannung U , die aus den Nutungsharmonischen der Feldkurve B_x gewonnen wird.



Energieversorgung des Bordnetzes

Im Bild ist der Feldverlauf für eine angenommene Lage der beidseitigen Blechpakete gezeigt. Es entstehen hierbei Oberschwingungen in den Feldwellen.

Die Drehstromwicklung liefert vor allem die Feldwellen B_5 und B_7 .



Eine Harmonische der Ordnungszahl γ hat die Wandergeschwindigkeit:

womit zwischen ihr und dem mit v_1 bewegten Lineargenerator des Läufers die Schlupfgeschwindigkeit

im Mittel ca. 83 % der Fahrgeschwindigkeit auftritt. Die Wicklung des Lineargenerators ist an eine fiktive mittlere Feldwelle B_6 angepasst und erzeugt nach der Gleichung

eine mittelfrequente Spannung und damit die Energie für das Bordnetz.

Kräfte

Für die Kraftwirkungen in den drei Achsen nach gelten grundsätzlich folgende Kräfte:

Schubkraft:

Hubkraft:

Aus obigen Gleichungen ergeben sich für den Betrieb des Langstator-Linearmotors folgende Grundsätze:

- Bei der Verknüpfung von Tragen und Antreiben in einem Motor bestimmt allein die Tragaufgabe, also das gesamte Fahrzeuggewicht, die erforderliche Flussdichte **B_L** .
- Der durch die Regelung für den Schwebezustand einzustellende Erregerstrom im Läufer ergibt sich aus dem Fahrzeuggewicht und der Luftspaltweite.
- Die Vorschubkraft (Antriebskraft) kann damit nur noch über die Höhe des Strombelags **A_1** , d.h. des Ständerstromes **I_1** und seines Phasenwinkels beeinflusst werden.
- Die längs des Fahrwegs verlegte Drehstromwicklung wird in Abschnitte unterteilt und vor Eintreffen des Fahrzeugs in einen Bereich über Frequenzumrichter versorgt.