

Leitfaden

Dimensionierung von Linearmotoren

Version: 1.1
Datum: 01.03.2016

BECKHOFF

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
1.1	Hinweise zur Dokumentation	4
1.2	Ausgabestände der Dokumentation	5
2	Einleitung	6
3	Systemvoraussetzungen	7
3.1	Versorgungsspannung.....	7
3.2	Schutzerde PE.....	7
3.3	Wärmeableitung.....	7
3.4	Tragrahmen	8
3.5	Positionierung	8
3.6	Messeinheit.....	8
3.7	Servoregler	9
3.8	Genauigkeit.....	9
3.9	Bremmung	10
3.10	Kabel.....	10
3.11	Lager.....	11
3.12	Senkrechte Anwendungen.....	11
3.13	Verbinden von Spuleneinheiten.....	12
4	Dimensionierung von Linearmotoren	13
4.1	Einführung	13
4.2	Physikalischer Hintergrund	14
4.3	Verwendete Symbole	15
4.4	Eingesetzte Formeln.....	16
4.5	Fallbeispiel.....	18
4.5.1	Schritt 1: Worst-Case-Zyklus	18
4.5.2	Schritt 2: Kinematikanalyse.....	20
4.5.3	Schritt 3: Kraftanalyse.....	21
4.5.4	Schritt 4: Motorbemessung	22
4.5.5	Schritt 5: Verstärkerbemessung.....	23
5	Anhang	24
5.1	Wärmeübergang und Temperatur	24
5.2	Einfluss auf die Genauigkeit	26
5.3	Gleichstrom Verbindungsschaltplan	27
6	Technische Daten einiger optischer Geber	28
7	Support und Service	29

1 Vorwort

1.1 Hinweise zur Dokumentation

Diese Beschreibung wendet sich ausschließlich an ausgebildetes Fachpersonal der Steuerungs- und Automatisierungstechnik, das mit den geltenden nationalen Normen vertraut ist.
Zur Installation und Inbetriebnahme der Komponenten ist die Beachtung der nachfolgenden Hinweise und Erklärungen unbedingt notwendig.

Das Fachpersonal hat sicherzustellen, dass die Anwendung bzw. der Einsatz der beschriebenen Produkte alle Sicherheitsanforderungen, einschließlich sämtlicher anwendbaren Gesetze, Vorschriften, Bestimmungen und Normen erfüllt.

Disclaimer

Diese Dokumentation wurde sorgfältig erstellt. Die beschriebenen Produkte werden jedoch ständig weiter entwickelt.

Deshalb ist die Dokumentation nicht in jedem Fall vollständig auf die Übereinstimmung mit den beschriebenen Leistungsdaten, Normen oder sonstigen Merkmalen geprüft.

Falls sie technische oder redaktionelle Fehler enthält, behalten wir uns das Recht vor, Änderungen jederzeit und ohne Ankündigung vorzunehmen.

Aus den Angaben, Abbildungen und Beschreibungen in dieser Dokumentation können keine Ansprüche auf Änderung bereits gelieferter Produkte geltend gemacht werden.

Marken

Beckhoff®, TwinCAT®, EtherCAT®, Safety over EtherCAT®, TwinSAFE®, XFC® und XTS® sind eingetragene und lizenzierte Marken der Beckhoff Automation GmbH.

Die Verwendung anderer in dieser Dokumentation enthaltenen Marken oder Kennzeichen durch Dritte kann zu einer Verletzung von Rechten der Inhaber der entsprechenden Bezeichnungen führen.

Patente

Die EtherCAT Technologie ist patentrechtlich geschützt, insbesondere durch folgende Anmeldungen und Patente:

EP1590927, EP1789857, DE102004044764, DE102007017835

mit den entsprechenden Anmeldungen und Eintragungen in verschiedenen anderen Ländern.

Die TwinCAT Technologie ist patentrechtlich geschützt, insbesondere durch folgende Anmeldungen und Patente:

EP0851348, US6167425 mit den entsprechenden Anmeldungen und Eintragungen in verschiedenen anderen Ländern.

EtherCAT 

EtherCAT® ist eine eingetragene Marke und patentierte Technologie lizenziert durch die Beckhoff Automation GmbH, Deutschland

Copyright

© Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Deutschland.

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet.

Zu widerhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

1.2 Ausgabestände der Dokumentation

Ausgabe	Bemerkung
1.1	Komplette Überarbeitung
1.0	Erstversion vom Oktober 2001

2 Einleitung

Mit der Baureihe AL2000 führte Beckhoff Automation GmbH & Co. KG einen weitreichenden Standard für hoch qualitative Linearmotoren ein. Dank einer weitgehenden Standardisierung haben die Anwender die Möglichkeit, die Linearmotoren selber auszulegen. Allerdings ist ein spezialisiertes Wissen erforderlich, um die richtigen Designentscheidungen zu treffen. Dieses Wissen wird hier, ausgehend von einem praktischen Fallbeispiel, Schritt für Schritt vermittelt.

Ein Linearmotor der Beckhoff Automation GmbH & Co. KG ist kein in sich geschlossenes System. Normalerweise wird ein Linearmotor in ein gesamtes Maschinenkonzept oder einer gesamten Arbeitseinheit eingebaut. In Abhängigkeit der Anwendung muss eine Auswahl hinsichtlich der Spezifikationen und der Größe des Motorsystems getroffen werden. Um einen fehlerfreien Betrieb zu ermöglichen, müssen alle Komponenten des Motorsystems den strikten Anforderungen genügen.

In diesem Leitfaden werden verschiedene Themen behandelt. Zunächst müssen einige Systembetrachtungen angestellt werden. Diese Untersuchungen liefern wichtige Informationen zu:

- Art der Stromversorgung
- Wärmeableitung
- Stabilität
- Genauigkeit und Bremsung

3 Systemvoraussetzungen

3.1 Versorgungsspannung

Die Leistungseigenschaften eines Linearmotors hängen von der Stromversorgung ab. Deswegen ist ein Linearmotor für eine geeignete Spannung spezifiziert. Der Servoverstärker des Motors kann an verschiedene Spannungsversorgungen (230V – 480V, ein- oder dreiphasig) angeschlossen werden. Mit Hilfe von Kondensatoren und Gleichrichterbrücken wird die Versorgung in eine Gleichspannungsversorgung umgewandelt. Für hohe Kräfte und Geschwindigkeiten ist eine Gleichspannungsversorgung von mindestens 560V erforderlich. Für begrenzte Kräfte und Geschwindigkeiten reicht eine geringere Spannung aus.

3.2 Schutzerde PE

Zur Vermeidung gefährlicher Situationen im Falle elektrischer Fehler, müssen alle metallischen Komponenten geerdet sein. Das Gehäuse und der Eisenkern der Wicklung sind über die Schutzerde des Starkstromkabels am Motor gesichert. Die Kabelabschirmung ist mit dem Gehäuse verbunden (keine Schutzerde!). Erden Sie den Kabelschirm auf dem Servoverstärker. Die verschraubten Magnetplatten müssen elektrisch mit dem Rahmen (über die Schrauben) verbunden sein. Die Erdung muss gemäß den Anforderungen an die Sicherheit elektrischer Maschinen überprüft werden. Befolgen Sie die Dokumentation des Servoverstärkers.

3.3 Wärmeableitung

Jeder Linearmotor erzeugt Wärme. Die Wärme wird größtenteils über die Spuleneinheit abgeleitet. Es sind zwei Aspekte zu betrachten:

- Die Wärme muss an die Umgebung abgeführt werden. Falls möglich, sollte der Weg der Wärmeableitung aufgezeichnet werden.
- Wärmeerzeugung verursacht Temperaturunterschiede. Der zulässige Temperaturanstieg für Ihr System, insbesondere in der Spuleneinheit, muss bestimmt werden.

Die Spuleneinheit ist mit einem Temperaturfühler ausgestattet. Bei manchen Konstruktionen ist die Spuleneinheit nicht in der Lage, die Wärme an die umgebende Luft abzuführen. Dies gilt insbesondere für schwer belastete Motoren. Ebenfalls, wenn der Motor wärmeisoliert ist oder die Ventilation durch das Gehäuse verhindert wird. In diesen Fällen ist eine aktive Kühlung, bspw. eine Wasserkühlung erforderlich.

Ohne Kühlung kann eine nicht zulässige Erhitzung der Spuleneinheit auftreten. Dies kann zu einem Leistungsverlust, thermischem Sicherheitsstopp und sogar zu Schäden am Motorsystem führen. Die Wasserkühlung des Motors ist sehr effizient hinsichtlich der Verringerung des Wärmeflusses und des Erreichens einer konstanten Temperatur des Gehäuses. Bitte achten Sie darauf, das Kühlsystem fachgerecht abzudichten. Der Temperaturfühler kann dazu dienen, Fehler im Kühlsystem zu entdecken. Ein zusätzlicher Durchflusssensor für die Überwachung der Kühlung ist nicht unbedingt erforderlich, bietet jedoch zusätzliche Sicherheit.

Ist die Erhitzung bestimmter Systemkomponenten kritisch, kann eine Wärmeisolierung zwischen der Spuleneinheit und den kritischen Komponenten in Betracht gezogen werden. Dies kann den Temperaturanstieg zwar verringern, jedoch nicht verhindern. Es kommt vor, dass auch in den Magnetplatten leichte Erwärmung stattfindet.

3.4 Tragrahmen

Festigkeit und Stabilität

Je nach Konfiguration und Anwendungsfall, kann ein Linearmotor eine hohe Beschleunigung und einen hohen Schub/Ruck erzeugen. Deswegen muss der Rahmen über eine ausreichend dynamische Steifigkeit verfügen. Im Hinblick auf die erforderliche Genauigkeit muss der Rahmen unempfindlich gegenüber Stößen und Schwingungen sein.

Ein Linearmotor erzielt seine Genauigkeit mit Hilfe eines Weggebers über den der Regelkreis geschlossen wird. In dieser Schleife sind alle mechanischen Komponenten wie Last, Rahmen und Befestigungen einbezogen. Die Eigenschaften des Servoreglers und des linearen Weggebers werden ebenfalls eingezogen. Die Schleife kann durch die Eigenschaften der Konstruktion beeinträchtigt werden. Eine schlechte Konstruktion kann sogar den vollständigen Verlust der Regelbarkeit des Linearmotorsystems verursachen.

Den Eigenfrequenzen der Maschine sollte besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Insbesondere Schwingungen zwischen 50 Hz und 500 Hz in Fahrtrichtung können die Genauigkeit beeinträchtigen. Eine Faustregel zur Vermeidung größerer Probleme lautet:

- Das Motorsystem muss fest mit einem massiven und starren Körper, der mindestens die dreifache Masse der beschleunigten Last hat, verbunden werden.

3.5 Positionierung

Linearmotor Anwendungen erfordern ein aufwendiges Positions- und Geschwindigkeits-Feedback. Die Position des Schlittens wird mittels einer Messeinheit (Kombination aus Messstab und Lesekopf) ermittelt. Der lineare Geber der Einheit meldet die Information an den Servoverstärker zurück. Die Genauigkeit des Motorsystems ist stark abhängig von seinem Feedbacksystem. Die meisten Messeinheiten geben ein inkrementelles Feedback. Also muss der Servoverstärker ohne die absolute Position des Schlittens auskommen. Dies kann insbesondere beim Start des Motorbetriebs problematisch sein. Zur Bestimmung der Position muss eine Referenzfahrt durchgeführt werden.

3.6 Messeinheit

Die Leistungseigenschaften des Linearmotors hängen von den Eigenschaften des eingesetzten Gebers ab. Die Einheit muss sorgfältig angeschlossen und abgeschirmt werden. Jegliche Störung des Positionssignals kann zu Positionierfehlern und Systemschwingungen führen. Die Genauigkeit muss mindestens die vom Motorsystem geforderte Genauigkeit aufweisen. Je nach Dynamik der Anwendung muss sie um den Faktor 2 bis 10 besser sein. Die Position eines sich bewegenden Körpers wird in Bezug auf den Rahmen gemessen. In Abhängigkeit seiner Steifigkeit verhält sich der Rahmen wie ein der Reaktionskraft unterworfenen Körper. Die in der Messung auftauchenden Drehungen und Vibrationen müssen vernachlässigt werden. Aus diesem Grund ist der Einbau der Messeinheit kritisch. Der Fühler muss so nahe wie möglich an den Schwerpunkt der gesamten beweglichen Einheit (Schlitten + Last) angebracht werden. Der Messstab muss in der Nähe des Schwerpunkts des Rahmens montiert werden. Das Auftreten von Drehungen oder Vibrationen kann überwunden werden, jedoch sollte deren Messung und Rückmeldung vermieden werden.

3.7 Servoregler

Die Positionsinformation, so wie der Strom in den Spulen wird dem Servoverstärker zurückgemeldet. Hier werden Informationen verarbeitet und in ein geeignetes Eingangssignal für den Linearmotor umgesetzt. Weil Linearmotoren in der Regel hoch dynamisch betrieben werden, wird dieses Signal von einem Servoverstärker zur Verfügung gestellt.

Die Bewegung des Schlittens wird durch einen dreiphasigen Spannungsimpuls an der Spuleneinheit gesteuert. Die Phase hängt von der aktuellen und der gewünschten Position des Schlittens ab. Hierbei ist die Bewegungssteuergröße die Breite des Impulses. Tatsächlich ist der Servoverstärker ein Verstärker mit Impulsbreitenmodulation, fester Spannung und fester Schalzhäufigkeit.

3.8 Genauigkeit

Im Allgemeinen hängt die Genauigkeit eines Linearmotorsystems ab von

- der Genauigkeit des Positioniersystems,
- der statischen Steifigkeit des Systems,
- der dynamischen Steifigkeit des Systems.

Die hauptsächliche Einschränkung der Genauigkeit wird durch einen Mangel an der Stabilität des Tragrahmens verursacht.

Der Linearmotor selber ist ein elektromagnetischer Motor. Er hat mit Widerstand und Eigeninduktivität zu kämpfen. Dies führt dazu, dass der Strom in den Spulen immer dem bereitgestellten Spannungssignal nacheilt. Da die magnetische Kraft in direktem Zusammenhang mit dem Strom steht, bedeutet dies, dass auch die Motorkraft nacheilt.

Bei statischer Nutzlast (konstanter Geschwindigkeit) wird der Positionierfehler gering sein. Statische Störungen werden z.B. durch Reibung verursacht. Die konstante Kraft muss kompensiert werden. Das System muss mit einer angemessenen konstanten Kraft auf die Störgröße reagieren. Im Allgemeinen wird dieses mit Hilfe einer Integrator Aktion des Positionsreglers bewerkstelligt. Diese Aktion erfordert eine gewisse Ausregelzeit. Umso genauer die Positionierung sein muss, umso größer ist die Ausregelzeit. Eine genaue Positionierung erfordert normalerweise eine Ausregelzeit von 5 ms bis 25 ms.

Bei dynamischer Belastung (Beschleunigung oder Verzögerung) muss das System nicht nur genau sondern auch schnell reagieren. Nun ist die Störung dynamisch. Sie kann vom Cogging während der Fahrt, von Beschleunigungskräften oder von Vibrationen und Kontaktkräften (z.B. beim Fräsen) verursacht werden. Je nach Steifigkeit des gesamten Systems kann die Genauigkeit dadurch beeinträchtigt werden. Da ein Motorsystem wie ein Masse-Feder-System betrachtet werden kann, ist es offensichtlich, dass die Genauigkeit am stärksten bei der Eigenfrequenz des Systems beeinträchtigt wird.

Der Servoverstärker verarbeitet die zurückgeführten Informationen bezüglich der Position, der Geschwindigkeit und der Stromstärke. Er überträgt diese in ein geeignetes Spannungssignal an den Linearmotor. Der Verstärker wird mit gewissen Verzögerungen konfrontiert (eine schematische Übersicht ist im Anhang "Einflüsse auf die Genauigkeit" enthalten).

Das Spannungssignal wird dem Linearmotor in Form von Impulsen mit fester Schalzhäufigkeit übergeben. Die Impulsdauer ist demzufolge der zu regelnde Parameter. Die Genauigkeit wird durch die festgelegte Schalzhäufigkeit und die festgelegte Impulsspannung eingeschränkt.

Es muss nicht ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die Genauigkeit des Positioniersystems ebenfalls von der Genauigkeit des Lineargebers und der thermischen Stabilität der Systemkomponenten abhängt.

3.9 Bremsung

Eine vom Servoverstärker kontrollierte Bremsung wird bzgl. des kurzen Auslaufs empfohlen. Der Servoverstärker bremst den Motor so schnell wie möglich unter Einsatz der Maximalkraft des Motors ab. Somit darf kein Fehlerstatus im Servoverstärker vorhanden sein.

Das Bremsverhalten eines Linearmotors hängt von der Stromversorgung und der Positionsinformation ab. Ohne zusätzliche Maßnahmen kann dieses zu einem unkontrollierten Auslauf bis zum Streckenende, im Falle von Stromausfall oder Mess- und Steuerungsfehlern, führen. Gegebenenfalls kann es notwendig sein, dass Vorkehrungen, wie eine mechanische Bremse, vorzusehen sind. Der Einsatz von Relais bietet sich an. Alle aktiven Vorkehrungen müssen bei Strom- oder Steuerungsausfall aktiviert werden. Dies bedeutet, dass eine normale freie Bewegung des Schlittens nur dann möglich ist, wenn ein oder mehrere Bremssysteme entriegelt oder nicht verschraubt sind.

Gefährliche Situationen durch unkontrollierten Auslauf können verschiedenartig verhindert werden:

- Die Verwendung von (pneumatischen) Schienenführungsbremsen. Diese gewährleisten einen kurzen Auslauf. Einige Lieferanten von Schienenführungen bieten Bremsen an, die durch Luftdruck geöffnet werden. Sehr nützlich für senkrechte Anwendungen.
- Kurzschließen der Motorspulen. Dieses führt zu einem moderaten Auslauf. Es wird eine Bremskraft erzeugt, wenn die Spulen kurzgeschlossen werden und der Spulenteil in Bewegung ist. Die Bremsenergie wird in die Spuleneinheit abgeleitet.
- Der Einsatz von mechanischen Endanschlägen. Mechanische Endanschläge limitieren den Verfahrbereich. Demzufolge gibt es einen maximalen Auslauf. Starre Endanschläge sind nicht geeignet. Hydraulische oder pneumatische Dämpfer absorbieren die Bewegungsenergie und stoppen den Schlitten. Federn führen dazu, dass der Schlitten zurückspringt, können aber mit der Kurzschlussdämpfung kombiniert werden.
- Eine Kombination der erwähnten Maßnahmen.

Welche Methode sinnvoll ist, hängt von der Anwendung ab. Betrachten Sie bei der Auslegung folgende Worst-Case-Situationen:

- Durch Sensoren erfasste Schutzverletzung (Linearmotor muss sofort stoppen).
- Programmierungsfehler (unkontrollierte Bewegung bei Höchstgeschwindigkeit).
- Überhitzung des Motors (Linearmotor muss innerhalb von Sekunden angehalten werden).
- Fehler im Servoverstärker (unkontrollierte Bewegung).
- Hauptstromversorgungsausfall (Ausfall der Motorregelung und –kraft).
- Ausfall des Streckenendsensors (Aufprall auf Streckenende).
- Luftdruckausfall.

3.10 Kabel

Linearmotoren verfügen über bewegliche Kabel. Wird eine Wasserkühlung verwendet, bewegen sich die Kühlleitungen ebenfalls mit. Stellen Sie eine ausreichende Zugentlastung der Kabel sicher. Sorgen Sie dafür, dass bewegliche Teile ausgewechselt werden können.

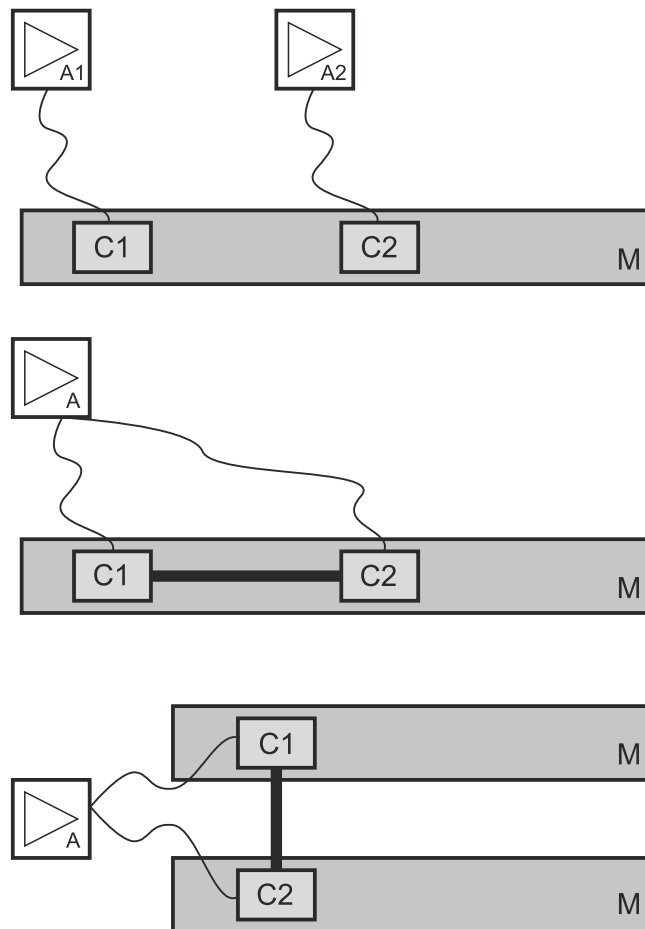
3.11 Lager

Um die freie Bewegung des Schlittens zu gewährleisten, muss dieser mit Lagern ausgestattet sein, die sanft auf den Schienen gleiten und eine robuste Bauform aufweisen. Die Schienen sind seitlich an der Magnetplatte montiert. Diese Konstruktion gewährleistet den korrekten Luftspalt zwischen der Spuleneinheit und der Magnetplatte. Für die seitliche Positionierung der Spuleneinheit zu den Magnetplatten ist eine kleine Toleranz zulässig. Die Spuleneinheit umfasst Eisenteile, die von den Dauermagneten der Magnetplatte stark angezogen werden. Diese Anziehungskraft muss ständig von den Linearlagern getragen werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Anziehungskraft bei der Bemessung der Lager zu berücksichtigen.

3.12 Senkrechte Anwendungen

Linearmotoren in senkrechten Anwendungen können mit Ausgleichsmechanismen versehen werden. Dies dient dazu, das Herunterfallen der Last bei Stromausfall zu verhindern. Die Gegenhaltung neutralisiert die Schwerkraft, wodurch eine stetige Kraft des Linearmotors überflüssig wird. Die Trägheit des Motorsystems kann dadurch allerdings ansteigen. Bei Ausgleichsmechanismen kommen Federn, pneumatische Zylinder oder Gegengewichte in Frage.

3.13 Verbinden von Spuleneinheiten



Eine Magnetbahn kann von mehreren Schlitten gemeinsam verwendet werden. Mehrere Schlitten können sich ebenfalls einen Servoverstärker teilen.

Folgenden Kombinationen können unterschieden werden (siehe Abbildung).

- Zwei (oder mehrere) Spuleneinheiten teilen sich eine Magnetbahn, jede von ihnen durch den eigenen Verstärker betrieben.
- Zwei Spuleneinheiten sind gekoppelt (fest verdrahtet) und teilen sich einen Verstärker und eine Magnetbahn.
- Zwei Spuleneinheiten sind gekoppelt und teilen sich einen Verstärker. Sie laufen auf verschiedenen parallel Bahnen.

Wenn zwei Linearmotoren denselben Leistungsteil in Anspruch nehmen, sind sie parallel geschaltet. Für die Bemessung der Verstärkergröße müssen die Stromstärken der beiden Motoren addiert werden. Es ist nicht möglich, Motoren in Serie zu schalten. Es muss ein Temperaturfühler verwendet werden. Ebenfalls sollte der Fühler der Spuleneinheit verwendet werden, der die erwartungsgemäß schlechteste Kühlung hat und die höchsten Temperaturen erreichen wird.

4 Dimensionierung von Linearmotoren

4.1 Einführung

Die Auswahl der korrekten Linearmotorgröße hängt von den Anforderungen an die Positionieranwendung ab. Diese Anforderungen können in Form von einigen charakteristischen Parametern, wie Bewegungszyklus, Höchstgeschwindigkeit, Nutzlast und Reibung spezifiziert werden. Diese Parameter können über eine Analyse von Kinematik und Kraft mit den typischen Motorparametern, wie Spitzenkraft und stetiger Kraft in Verbindung gebracht werden. Aufgrund der errechneten Werte kann eine geeignete Linearmotorgröße ausgewählt werden. Zudem kann ein angemessener Servoverstärker ausgewählt werden.

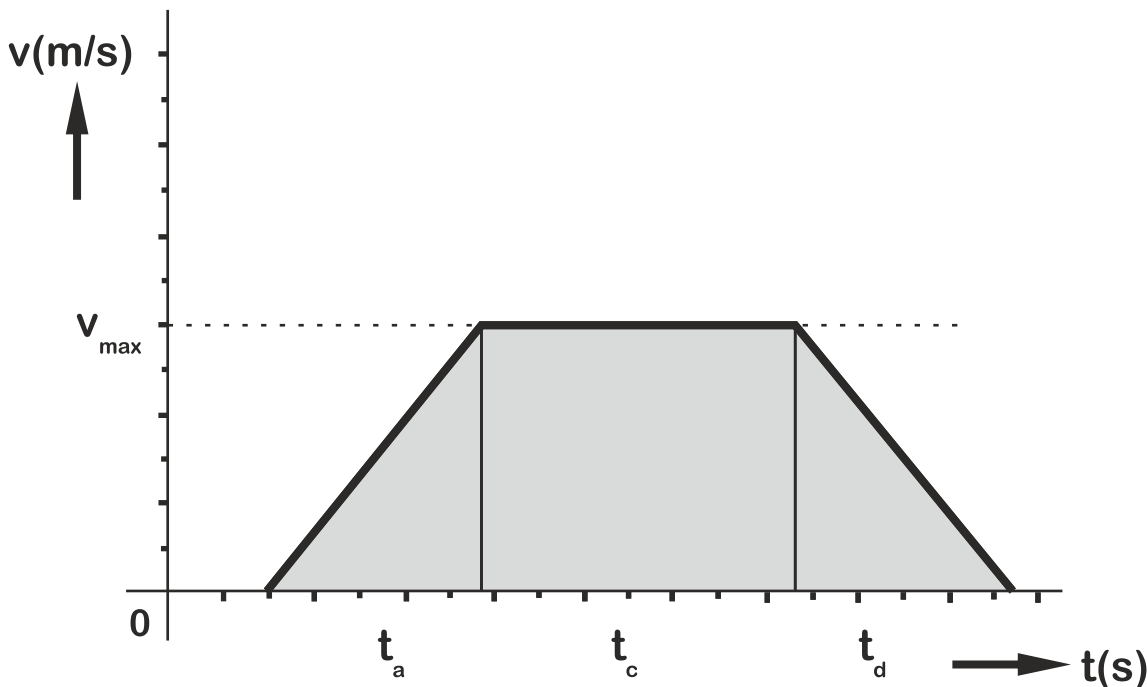
Im Folgenden wird ein Fallbeispiel ausgearbeitet. Das Verständnis dieses Fallbeispiels erfordert die Kenntnis von einigen physikalischen Gesetzen und Prinzipien, insbesondere der Kinematik und Dynamik.

4.2 Physikalischer Hintergrund

Die Bewegung eines Linearmotors wird wie folgt unterteilt:

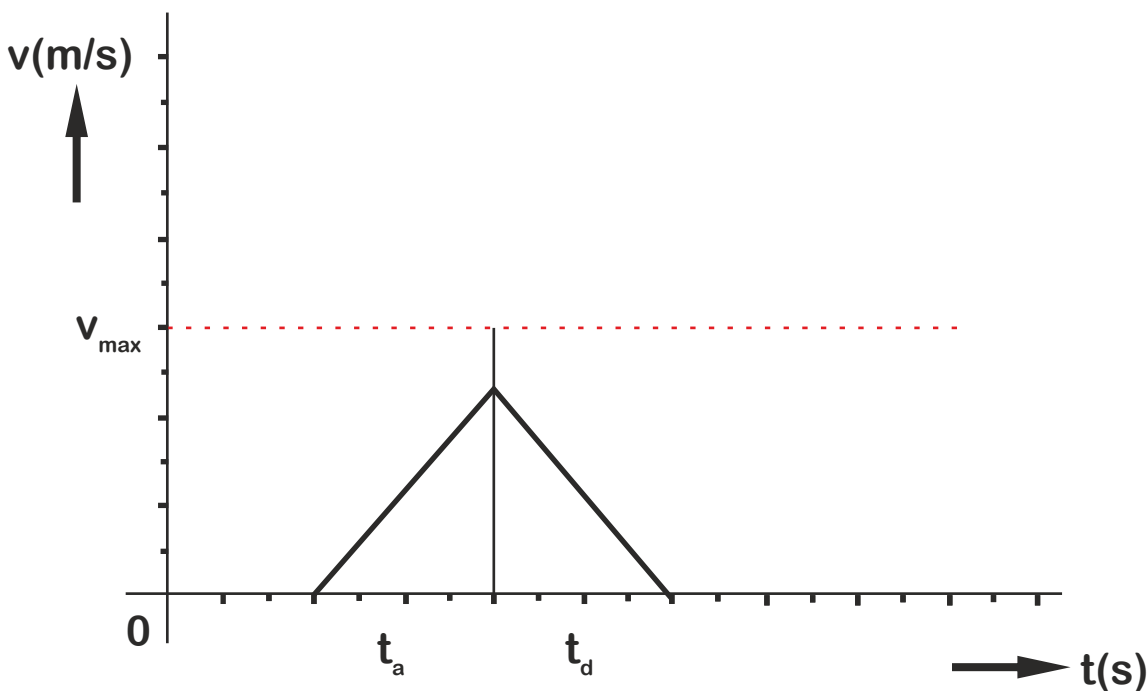
1. Beschleunigung, 2. Konstante (oder maximale) Geschwindigkeit und 3. Verzögerung

Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für eine kombinierte oder "lange Bewegung"



Während t_a findet eine Beschleunigung statt, welche während t_c bei konstanter Geschwindigkeit ihren Spitzenwert hat. Die Verzögerung bis zum Stillstand findet während t_d statt. Die gesamte (im Verlauf der Bewegung) zurückgelegte Strecke entspricht der Fläche unter der grafischen Darstellung. Während der Beschleunigung und der Verzögerung treten die größten Kräfte auf. Die Bewegung bei konstanter Geschwindigkeit ist lediglich die Kraft zur Überwindung der Reibung. Ein Linearmotor, der sich ständig bewegt, ohne seine Höchstgeschwindigkeit zu erreichen, ist am belastbarsten.

Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für eine kombinierte oder "kurze Bewegung"



4.3 Verwendete Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
t	s	Zeit
t_a, t_d, t_{ad}	s	Benötigte Zeit für Beschleunigung, Verzögerung oder für beide Komponenten
t_c	s	Benötigte Zeit für die Zurücklegung einer Distanz bei konstanter Geschwindigkeit
Dt	s	Kleine Zeitdifferenz
T	s	Gesamtzeit
v	m/s	Geschwindigkeit
v_a	m/s	Geschwindigkeit nach Beschleunigung aus dem Stand
v_{max}	m/s	Höchstgeschwindigkeit
a	m/s ²	Beschleunigung
x	m	Distanz
x_a, x_d, x_c	m	Während Beschleunigung, Verzögerung und bei konstanter Geschwindigkeit zurückgelegte Distanz
X	m	Gesamtdistanz bei kombinierter Bewegung ($t_a + t_c + t_d$)
F	N	Kraft
F_a, F_d, F_{ad}	N	Benötigte Kraft für Beschleunigung und/oder Verzögerung
F_l	N	Durch Last wirkende Kraft (wie Arbeitskontaktkräfte)
F_{peak}	N	Spitzenkraft des Motors
F_{cont}	N	Stetige Kraft des Motors
F_f	N	Reibkraft
F_{eff}	N	Mittlere Kraft über längeren Zeitraum (quadratischer Mittelwert)
M	kg	Masse der Last
Q	W	Wärmeleistung
S ₂₅	N ² /W	Motorkonstante bei 25°C
S _{TW}	N ² /W	Motorkonstante bei Betriebstemperatur
K	N/A	Kraftkonstante des Motors
K_{eff}	N/A	Mittlere Kraftkonstante des Motors (hängt von der Stromstärke ab)
I	A	Strom
I_{peak}	A	Spitzenstrom des Motors
I_{cont}	A	Stetiger Strom des Motors
R_{th}	°C/W	Thermischer Widerstand
T_w	°C	Betriebstemperatur

4.4 Eingesetzte Formeln

Kinematik

$$v_a = a \cdot t_a$$

$$x_{a,d} = \frac{1}{2} a \cdot t_{a,d}^2$$

$$x_c = v_{\max} \cdot t_c \quad \Rightarrow t_c = \frac{x_c}{v_{\max}} = \frac{X - x_a - x_d}{v_{\max}}$$

Anhand dieser Formeln können zwei praktische Schätzungen vorgenommen werden.

- Geschätzte Zeitdauer für eine „kurze Bewegung“, wenn v_{\max} nicht erreicht wird (siehe „Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für eine „kurze Bewegung““)

$$t_{ad} = \sqrt{\left(4 \cdot \frac{x_{ad}}{a}\right)}$$

- Geschätzte Zeitdauer für eine „lange Bewegung“, wenn v_{\max} erreicht wird (siehe „Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für eine „lange Bewegung““)

$$t_{acd} = \frac{X}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{a}$$

Dynamik

$$F_{a,d} = M \cdot a$$

$$\overline{F}_l = \overline{F}_{a,d} + \overline{F}_f$$

$$F_{a,d} = 0 \quad \Rightarrow (F_l = F_f)$$

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta t_i \cdot F_{fi}^2)}{T}} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta t_1 \cdot F_{f1}^2 + \Delta t_2 \cdot F_{f2}^2 + \Delta t_3 \cdot F_{f3}^2 + \dots)}{T}}$$

- Nachdem Sie die Masse der Last kennen und einen Linearmotortyp ausgewählt haben, kann die Beschleunigung abgeschätzt werden anhand von:

$$a \approx \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{peak}}{M}$$

Andere Formeln

Die vom Linearmotor abgeführte Wärmeleistung:

$$Q = 1,3 \cdot \frac{F_{rms}^2}{S_{25}}$$

Die mittlere Motorkraftkonstante:

$$K_{rms} = \frac{F_{rms}}{I_{cont}}$$

Geschätzte erforderliche Maximalstromstärke:

$$I_{peak} = 1,1 \cdot \frac{\max[F_{tot}]}{K_{rms}}$$

4.5 Fallbeispiel

Ein Greifer legt Teile ab und bewegt sich ständig hin und her: $X = 0,8$ m. Die Dauer einer Einzelbewegung über die 0,8 m darf höchstens 0,4 Sekunden in Anspruch nehmen. Auf beiden Seiten der Bewegung werden 0,5 s für das Ausregeln und die Greifertätigkeit benötigt. Andere Parameter sind:

- Die Masse der Nutzlast: $M = 20$ kg.
- Reibung: $F_r = 30$ N.
- Luftgekühlter Schlitten, große Kühlfläche.
- Genauigkeit in etwa 0,02 mm.
- Höchstgeschwindigkeit: $v_{max} = 3$ m/s

4.5.1 Schritt 1: Worst-Case-Zyklus

Analysieren Sie den schlimmsten anzunehmenden Arbeitszyklus Ihrer Anwendung. Der Worst-Case tritt im Allgemeinen in zwei Situationen auf. Erstens, wenn der Motor eine hohe Haltekraft erzeugt und zweitens, wenn der Motor ständig beschleunigt und abbremst (kurze Bewegungen).

Bestimmen Sie nun die Größen während dieses Arbeitszyklus. Im Fallbeispiel gibt es nur einen Arbeitszyklus. Zunächst wird der Motortyp AL2006 ausgewählt.

Berechnung der Beschleunigung des Motors:

$$a = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{peak}}{M} = \frac{3}{4} \cdot \frac{400}{20} = 15 \text{ m/s}^2$$

Hinweis: Der Wert F_{peak} ist im technischen Datenblatt AL2000 Motoren dokumentiert.

Die Formel zur Ermittlung der benötigten Zeit für die Zurücklegung der Distanz hängt davon ab, ob der Linearmotor während der Fahrt seine Höchstgeschwindigkeit v_{max} erreicht oder nicht.

Im Falle von kurzen Bewegungen (Höchstgeschwindigkeit v_{max} nicht erreicht):

$$t_{ad} = \sqrt{\left(\frac{4x_{ad}}{a}\right)} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,8}{15}} = 0,462s$$

In diesem Falle beträgt die Geschwindigkeit nach t_a :

$$v_a = \frac{a \cdot t_{ad}}{2} = \frac{15 \cdot 0,46}{2} = 3,45 \text{ m/s}$$

Die errechnete Geschwindigkeit v_a übertrifft die für diese Anwendung erforderliche Höchstgeschwindigkeit ($v_{max} = 3$ m/s). Es ist klar, dass der ausgewählte Linearmotor im Verlauf der Bewegung seine Höchstgeschwindigkeit erreicht. In diesem Fall muss die erforderliche Zeit mit Hilfe der Formel für lange Bewegungen ermittelt werden.

$$t_{acd} = \frac{X}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} = \frac{0,8}{3} + \frac{3}{15} = 0,467s$$

Es ist zu beachten, dass diese errechnete Zeit die geforderte Fahrzeit für diese Anwendung (0,4 s) überschreitet. Also muss ein stärkerer Motortyp, (bspw. AL2012), ausgewählt werden.

Anhand des AL2012 wird die Berechnung wiederholt.

Beschleunigung:

$$a = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{peak}}{M} = \frac{3}{4} \cdot \frac{800}{20} = 30 \text{ m/s}^2$$

Erforderliche Zeit unter Verwendung der Formel für kurze Bewegungen (v_{max} nicht erreicht):

$$t_{ad} = \sqrt{\left(\frac{4x_{ad}}{a}\right)} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,8}{30}} = 0,327 \text{ s}$$

Höchstgeschwindigkeit während Beschleunigung:

$$v_a = \frac{a \cdot t_{ad}}{2} = \frac{30 \cdot 0,327}{2} = 4,899 \text{ m/s}$$

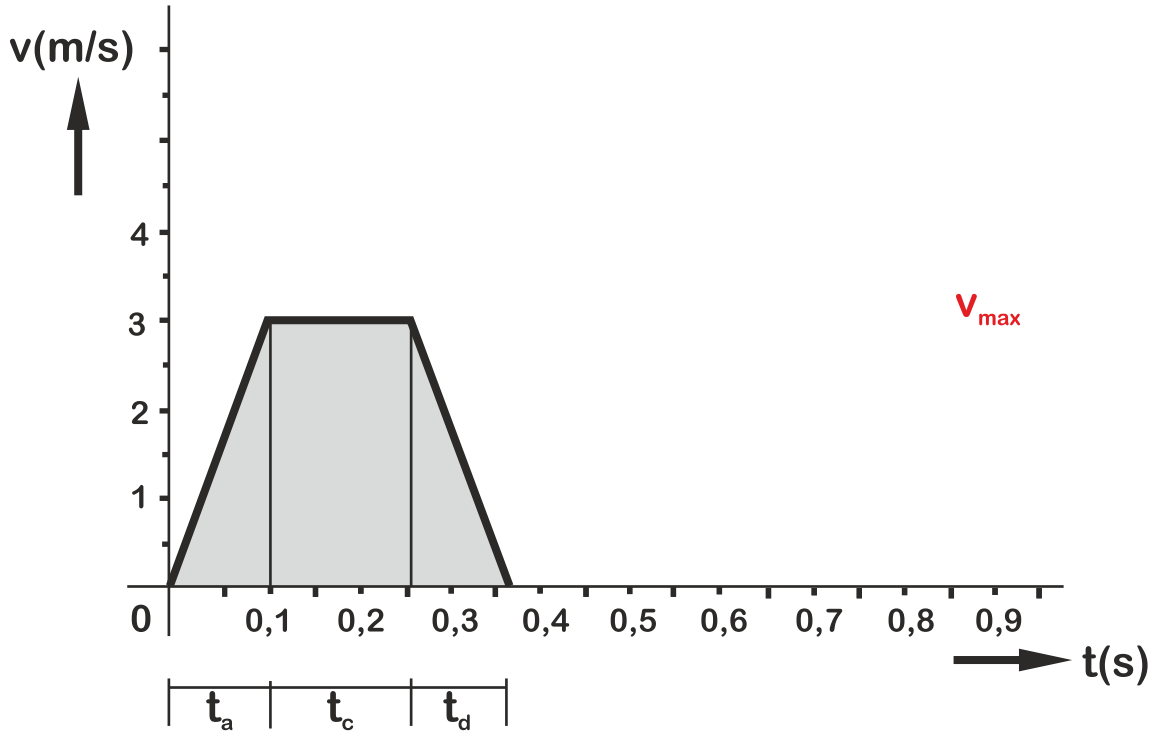
Wiederum wird die Geschwindigkeit v_{max} überschritten. Demzufolge muss die tatsächliche Geschwindigkeit unter Verwendung der Formel für lange Bewegungen (v_{max} erreicht) ermittelt werden:

$$t_{acd} = \frac{X}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} = \frac{0,8}{3} + \frac{3}{30} = 0,367 \text{ s}$$

4.5.2 Schritt 2: Kinematikanalyse

Zeichnen Sie ein Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für den Worst-Case-Zyklus Ihrer Anwendung. Markieren Sie die Beschleunigungs- und Verzögerungszeit sowie die Höchstgeschwindigkeit. Fügen Sie 20-40 ms zusätzliche Ausregelzeit hinzu.

Kinematikanalyse im Fallbeispiel:



Beschleunigungs- und Verzögerungszeit und Distanz:

$$t_{a,d} = \frac{v_{\max}}{a} = \frac{3}{30} = 0,1 \text{ s}$$

$$x_{ad} = \frac{1}{2} a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 30 \cdot 0,1^2 = 0,15 \text{ m}$$

In diesem Fall werden für die Beschleunigung und Bremsung die gleichen Zeiten und Distanzen benötigt. Die benötigte Zeit für das Zurücklegen der Distanz mit konstanter Bewegung ($t_c = 0,167 \text{ s}$) wird direkt aus der zuvor gerechneten Gesamtzeit t_{acd} ermittelt.

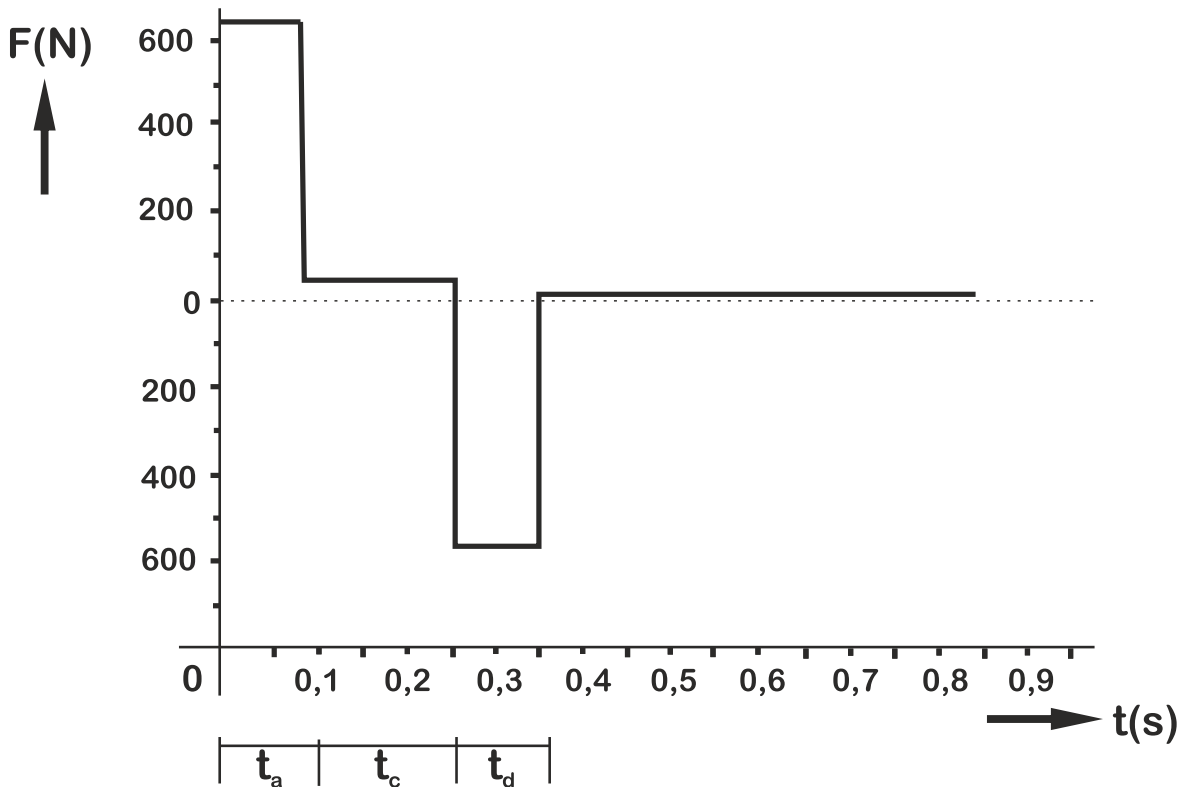
4.5.3 Schritt 3: Kraftanalyse

Erstellen Sie ein Motorkraft-Zeit-Diagramm. Die Motorkraft hängt ab von:

- Erforderlichen Beschleunigungs- und Verzögerungskräften.
- Reibungskräften.
- Arbeitskontaktkräften (wenn z.B. Schneidplatten oder Fräser eingesetzt werden).
- Im Falle von senkrechten Anwendungen: die Schwerkraft.

Die Maximalkraft F_{max} ist die insgesamt maximale Kraft, Antrieb oder Bremsung. Die Spitzenkraft des Motors muss dieser angepasst sein. Betrachten Sie den quadratischen Mittelwert der Kraft F_{eff} über die Zeit. Diese Kraft muss unterhalb der stetigen Kraft des Motors liegen.

Kraftanalyse im Fallbeispiel: Motorkraft-Zeit-Diagramm:



Im Fallbeispiel erhalten wir folgende Ergebnisse.

Parameter	Beschleunigungsphase (ta)	Phase bei Höchstgeschwindigkeit (tc)	Verzögerungsphase (td)	Ausregelung und Greiferaktionsphase
Dt (s)	0,1	0,167	0,1	0,5
a (m/s ²)	30	0	-30	0
F _{a,c,d} (N)	600	0	-600	0
F _f (N)	30	30	30	0
F _{lot} (N)	630	30	-570	0

Die mittlere Kraft im Verlauf des Zyklus:

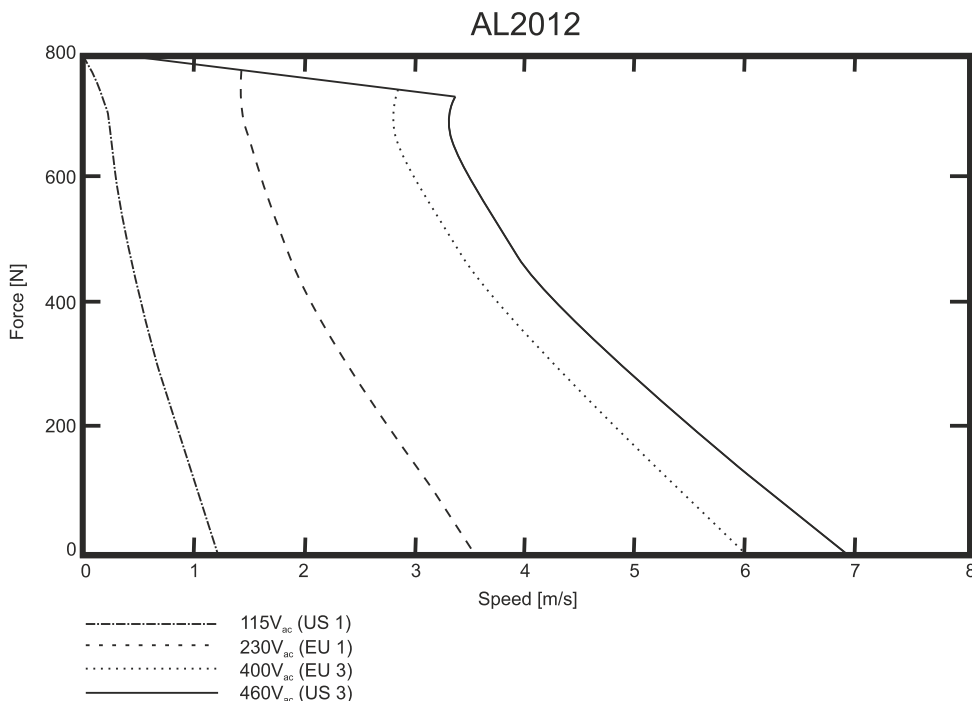
$$F_{rms} = \sqrt{\left(\frac{0,1 \cdot 630^2 + 0,167 \cdot 30^2 + 0,1 \cdot 570^2 + 0,5 \cdot 0}{0,867} \right)} = 289 \text{ N}$$

4.5.4 Schritt 4: Motorbemessung

Zwei Hauptkriterien für die Schubkraft des Motors:

1. Die Spitzenkraft eines Linearmotors hängt von der Geschwindigkeit der Spuleneinheit ab. Dies ist ersichtlich in den Spezifikationsdiagrammen des Linearmotors.

Spitzenkraft in Abhängigkeit der Geschwindigkeit (Geschwindigkeit und Kraft in gleiche Richtung)



Wie im Diagramm dargestellt hängt die Wirkung von der Stromversorgung ab. Die Geschwindigkeit bei $F = 0$ ist der Grenzwert.

1. F_{eff} muss unterhalb der für den Motor spezifizierten stetigen Kraft F_{cont} bleiben. Die stetige Kraft ist ein Maß für die thermische Belastung des Linearmotors. Sie hängt unter anderem von den Kühlbedingungen ab. Im Fall einer Wasserkühlung wird F_{cont} angegeben. Ohne Kühlung muss F_{cont} geschätzt werden.

Wählen Sie einen Linearmotor aus, der beiden Kriterien genügt. Anhand der berechneten mittleren Kraft und der angegebenen Motorkonstanten kann die abgeleitete Leistung ermittelt werden.

$$Q = 1,3 \cdot \frac{F_{\text{rms}}^2}{S_{25}} = 103 \cdot \frac{289^2}{740} = 147 \text{ W}$$

Diese Leistung entspricht der Wärmeentwicklung in der Spuleneinheit. Sie muss an die Umgebung abgeführt werden.

4.5.5 Schritt 5: Verstärkerbemessung

Für die meisten Servoverstärker ist die Zeitdauer des Spitzenstroms auf einen Wert von 0,25 bis zu mehreren Sekunden beschränkt. Übersteigt die Stromstärke den stetigen Strom während eines Zeitraums, der länger als der spezifizierte ist, dann muss der erforderliche stetige Strom auf eine höhere Ebene angehoben werden. Überprüfen Sie also, ob der für längere Zeiträume erforderliche Strom oberhalb der stetigen Stromstärke liegt. Wählen Sie einen Servoverstärker aus, der die erforderlichen I_{cont} und I_{peak} abgeben kann.

In diesem Fall ergeben die spezifizierten K_{eff} und die berechnete F_{eff} folgenden Werte:

$$I_{cont} = \frac{289}{93} = 3,1 \text{ A}$$

Die Maximalkraft im Verlauf des Zyklus ist 630N, also muss der Servoverstärker einen Maximalstrom generieren von:

$$I_{peak} = 1,1 \cdot \frac{630}{93} = 7,5 \text{ A}$$

Da die Zeiträume in denen $I > I_{cont}$ nicht mehr als 7 Sekunden in Anspruch nehmen, genügt der AX5x06 den Anforderungen. Zum Abbremsen schwerer Lasten von hohen Geschwindigkeiten (z.B. 100 kg bei 4 m/s) führt der Motor die elektrische Leistung an den Servoverstärker zurück. Der Großteil der elektrischen Leistung wird in den Bremswiderständen abgeführt. Die Leistung dieser Widerstände muss ausreichend ausgelegt sein.

5 Anhang

5.1 Wärmeübergang und Temperatur

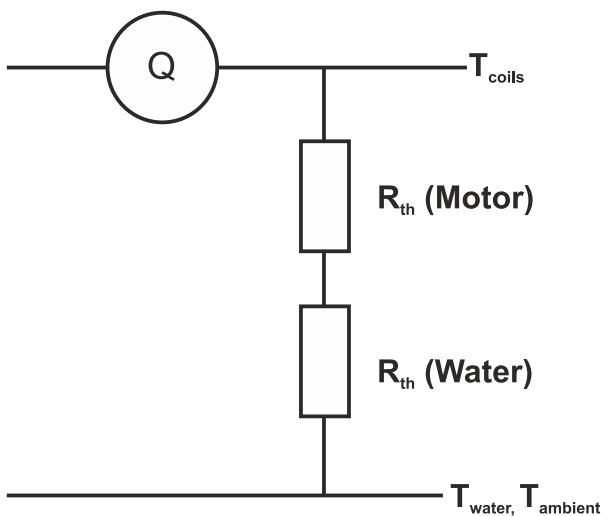
Die abgeleitete Wärmeleistung in der Spule führt zu einem Wärmestrom. Der daraus resultierende Temperaturanstieg der Spulen hängt von dem Wärmewiderstand der Strecke ab. Die Spule ist mit einem Temperaturfühler vom Typ PTC 1 ausgestattet. Der Servoverstärker überwacht die Überhitzung bei einem Widerstand von 1000 Ohm.

Die Wasserkühlung kann sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet werden. Die parallele Schaltung erfordert einen guten Durchfluss. Die Leitungen der Wasserkühlung werden mit Hilfe von standardmäßigen M5-Anschlüssen mit der Spuleneinheit verbunden. Haake oder Julabo Kühlsysteme sind für Beckhoff Linearmotoren ausgelegt.

Die stetige Kraft des Linearmotors ist ein Maß für die thermische Belastung. F_{cont} hängt von der Motorkonstanten des Motors ab. Sie ist durch die zulässige Betriebstemperatur begrenzt. Im Falle einer Wasserkühlung wird F_{cont} angegeben. In diesem Fall kann der Wärmewiderstand vom Motor und dem Wasser, ermittelt werden. Der Wärmestrom führt zu einem begrenzten Temperaturanstieg. T_{coils} kann kontrolliert unterhalb der zulässigen Betriebstemperatur gehalten werden.

$$\Delta T = Q \cdot R_{\text{th}}$$

Wärmefluss und Wasserkühlung

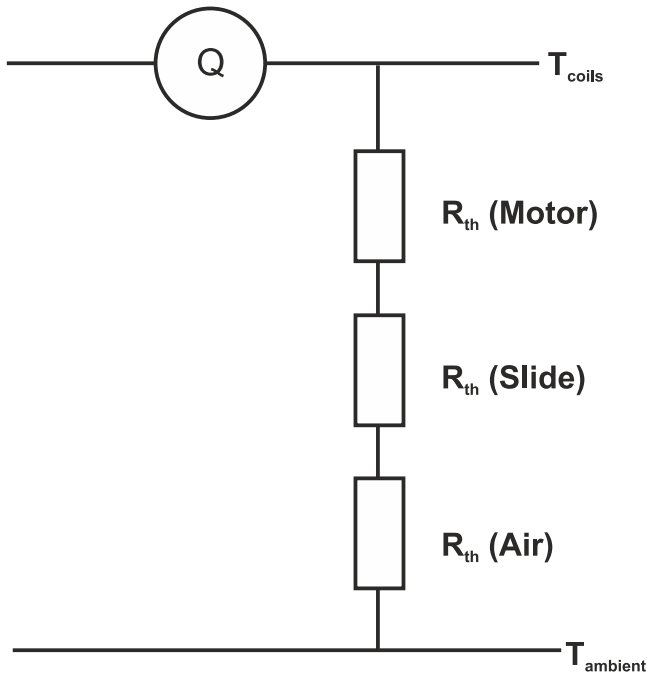


Die Motorkonstante hängt von der Temperatur ab.

$$S_{TW} = \frac{S_{25}}{1 + 0,004(T_W - 25)} \Rightarrow S_{100} = 0,77 \cdot S_{25}$$

Dies bedeutet, dass die stetige Kraft des Motors bei hoher Temperatur abfällt. Wird keine Wasserkühlung eingesetzt, führt der Wärmefluss zu einem erheblichen Temperaturanstieg. Der Betrag hängt von der Situation ab.

Wärmefluss ohne Wasserkühlung

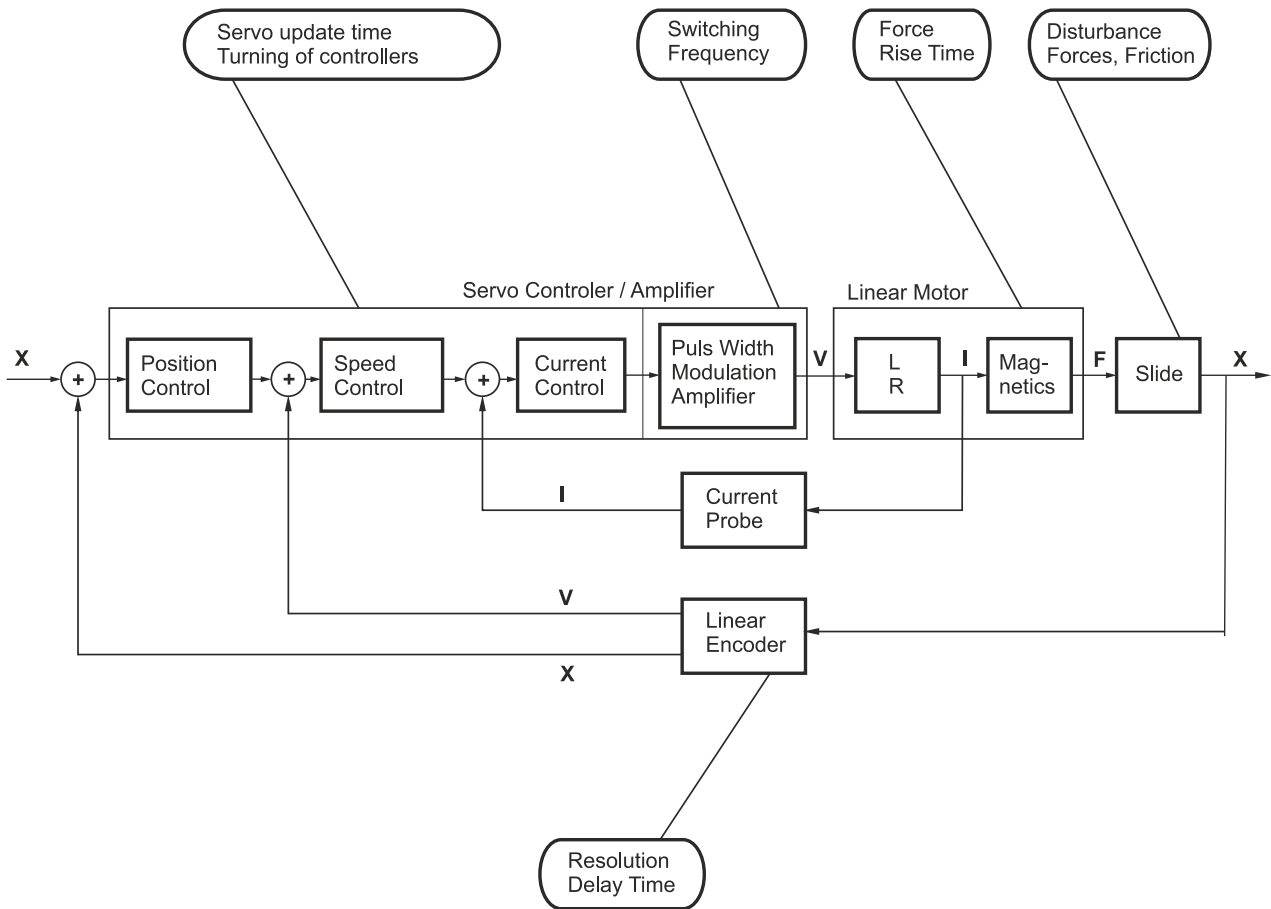


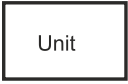

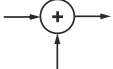

In diesem Fall sind die wärmeleitende Strecke und der thermische Widerstand weitaus schwieriger zu bestimmen. Die stetige Kraft muss geschätzt werden. Der untere Wert wird für den folgenden Fall angegeben:

- Eine Aufnahmefläche mit etwa zweifacher Abmessung des Motors.
- Lufttemperatur bis zu 45°C unter geschlossener Abdeckung.
- Stationäre oder kurze Bewegungen.

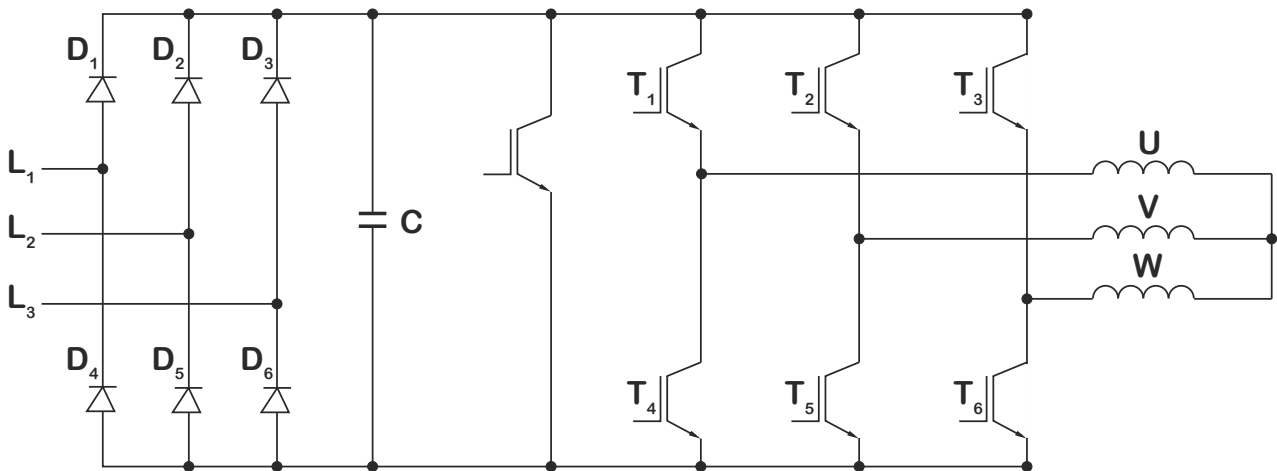
Der obere Wert kann bei großen Flächen (mit Kühlrippen ausgestattet), erzwungener Konvektion und geregelter Lufttemperatur unterhalb von 30°C angenommen werden.

5.2 Einfluss auf die Genauigkeit



Index:	X - position
	v - velocity
Flow, Information 	I - electric current
Addition 	F - force
	L - electric self inductance
	R - electric resistance

5.3 Gleichstrom Verbindungsschaltplan



L1, L2 und L3: die drei Phasen der Wechselstromversorgung.

- D1 ... D6: diese Dioden sind Teil der Dreiphasendiodenbrücke.
- C: der Gleichstrom-Verbindungskondensator.
- Tb: der Aktivierungstransistor des Bremswiderstands.
- Rb: der Bremswiderstand.
- T1 ... T6: Transistoren der Pulsweitenmodulation-Verstärkerstufe.
- U, V und W: Die Wicklungen des Motors.

6 Technische Daten einiger optischer Geber

In der nachfolgenden Tabelle erhalten Sie Informationen über eine kleine Auswahl optischer Geber.

Herstellertyp	Geberperiode	Stabilität	Reproduzierbarkeit	Genauigkeit	Höchstgeschwindigkeit	Schnittstelle
Heidenhain LIP481	2 µm	< 2 nm	< 10 nm	± 0.1, 0.2, 0.5 oder 1 µm/m	5 m/s	
Heidenhain LIF181 (C)	4 µm	< 10 nm	< 25 nm	± 3 oder 5 µm/m	1 m/s	1Vpp
Heidenhain LI-DA181 (C)	40 µm	< 80 nm	< 80 nm	± 5 µm/m	8 m/s	1Vpp
Heidenhain LI-DA185 (C)	40 µm	< 80 nm	< 80 nm	± 3 oder 5 µm/m	8 m/s	1Vpp
Heidenhain LS485	20 µm	< 40 nm	< 40 nm	± 5 µm/m	8 m/s	1Vpp
Heidenhain LS486 (C)	20 µm	< 100 nm	< 100 nm	± 3 oder 5 µm/m	1 m/s	
Litton/Zeiss LIE-1PC-FA	20 µm	< 50 nm	< 50 nm	± 5 µm/m	8 m/s	
Renishaw RGH-2XR	20 µm	< 50 nm	< 50 nm	± 3 µm/m	4 m/s	1Vpp TTL

7 Support und Service

Beckhoff und seine weltweiten Partnerfirmen bieten einen umfassenden Support und Service, der eine schnelle und kompetente Unterstützung bei allen Fragen zu Beckhoff Produkten und Systemlösungen zur Verfügung stellt.

Beckhoff Support

Der Support bietet Ihnen einen umfangreichen technischen Support, der Sie nicht nur bei dem Einsatz einzelner Beckhoff Produkte, sondern auch bei weiteren umfassenden Dienstleistungen unterstützt:

- Support
- Planung, Programmierung und Inbetriebnahme komplexer Automatisierungssysteme
- umfangreiches Schulungsprogramm für Beckhoff Systemkomponenten

Hotline: +49(0)5246/963-157
Fax: +49(0)5246/963-9157
E-Mail: support@beckhoff.com

Beckhoff Service

Das Beckhoff Service-Center unterstützt Sie rund um den After-Sales-Service:

- Vor-Ort-Service
- Reparaturservice
- Ersatzteilservice
- Hotline-Service

Hotline: +49(0)5246/963-460
Fax: +49(0)5246/963-479
E-Mail: service@beckhoff.com

Weitere Support- und Serviceadressen finden Sie auf unseren Internetseiten unter <http://www.beckhoff.de>.

Beckhoff Firmenzentrale

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG

Hülshorstweg 20
33415 Verl
Deutschland

Telefon: +49(0)5246/963-0
Fax: +49(0)5246/963-198
E-Mail: info@beckhoff.com

Die Adressen der weltweiten Beckhoff Niederlassungen und Vertretungen entnehmen Sie bitte unseren Internetseiten:

<http://www.beckhoff.de>

Dort finden Sie auch weitere Dokumentationen zu Beckhoff Komponenten.