So funktioniert ein tubulärer Linearmotor

Einleitung

Ein tubulärer Linearmotor ist ein **Direktantriebs-Aktuator**: Er erzeugt lineare Bewegung ohne mechanische Übertragung. Ein herkömmlicher Servomotor benötigt ein Getriebe, einen Kugelgewindetrieb oder einen Riemen, um Rotation in Translation umzuwandeln. Ein tubulärer Linearmotor erzeugt die Kraft dagegen direkt entlang der Bewegungsachse. Das Ergebnis ist ein System mit **Null Spielraum**, hoher dynamischer Reaktion und praktisch keinem mechanischen Verschleiß.

NILAB-tubuläre Linearmotoren werden in einer Vielzahl industrieller Anwendungen eingesetzt: Pick-and-Place-Systeme, Press- und Umformmaschinen, Dosierung, medizinische Geräte, Halbleiterhandhabung und als direkter Ersatz für Pneumatikzylinder.



Kernkomponenten

Ein tubulärer Linearmotor besteht aus zwei Hauptteilen — einem feststehenden Stator und einer beweglichen Magnetstange — sowie einem integrierten Encoder.

Der Stator (Spulenanordnung)

Der Stator ist das feststehende äußere Gehäuse. Er enthält eine Reihe von Kupferwicklungen, die in drei Phasen (U, V, W) angeordnet sind. Diese Wicklungen sind entlang der Achse in einem räumlichen

Muster verteilt, dessen Polteilung der Magnetanordnung der beweglichen Stange entspricht. Der Stator ist im Wesentlichen die Wicklungsanordnung eines rotierenden Motors, “abgewickelt” und um einen Zylinder gewickelt.

Das Statorgehäuse besteht normalerweise aus einer Aluminiumlegierung für effektive Wärmeableitung. Ein **PTC-Sensor (Positive Temperature Coefficient)** ist in die Wicklungen eingebettet und wird vom Servoregler überwacht, um Überhitzung zu verhindern.

Der Forcer / Läufer (Magnetstange)

Das bewegliche Teil ist eine zylindrische Stange mit einer Reihe von Permanentmagneten in abwechselnder Polarität entlang ihrer Länge. Energiereiche **NdFeB**-Magnete (Neodym-Eisen-Bor) werden typischerweise verwendet, um eine hohe Kraftdichte in einem kompakten Durchmesser zu erreichen.

Die Magnetstange gleitet axial im Statorinnenraum mit einem sehr kleinen Luftspalt. Sie ist das **einzige** bewegliche mechanische Element — keine Kugelgewindetriebe, keine Riemen, keine Getriebe. Endkappen und Stangendichtungen schützen das Innere vor Verunreinigung in industriellen Umgebungen.

Der integrierte Encoder

Positionsfeedback kommt von einem direkt in den Motorkörper integrierten Encoder. Bei NILAB-Motoren ist dies ein hochauflösender **SIN/COS-Inkrementalencoder** (1-Vpp-Signal), der in Kombination mit einem Servoregler-Interpolator Submikron-Auflösung liefert.

Die Encoderplatine ist im Stator befestigt und erkennt das Magnetfeld der Stange. Diese Anordnung liefert Positionsinformationen innerhalb eines Motorhubs, ohne externe Linearmaßstäbe. Einige Modelle (BISS-C-Option) unterstützen absolute mehrumdrehungsfähige serielle Encoder, die eine sofortige Positionsanzeige nach dem Einschalten ohne Referenzfahrt ermöglichen.

Der Anti-Rotations-Mechanismus

Da der Stator eine rein axiale Kraft erzeugt, ist die Magnetstange frei, sich zu drehen, sofern sie nicht eingeschränkt wird. Für Anwendungen, bei denen die Stange sich nicht drehen darf — zum Beispiel beim Tragen einer geführten Last — bieten NILAB-Motoren ein **Anti-Rotations-Zubehör**: typischerweise eine Keilwellen-Hülse oder eine externe Linearführung, die die Rotation verhindert, während freie axiale Bewegung ermöglicht wird.

Funktionsprinzip

Lorentzkraft — vom Strom zur linearen Bewegung

Das Funktionsprinzip ist das **Lorentzkraftgesetz**: Ein stromführender Leiter in einem Magnetfeld erfährt eine Kraft senkrecht sowohl zur Stromrichtung als auch zum Magnetfeldvektor.

In einem Röhrenmotor fließt der Strom umlaufend durch jede Spulenwicklung, und die Permanentmagnete auf der Stange erzeugen ein radiales Magnetfeld. Die Wechselwirkung erzeugt eine axiale (Schub-)Kraft. Durch Steuerung der Größe und Richtung des Stroms in jeder Phase steuert der Servoregler sowohl die Amplitude als auch die Richtung der linearen Kraft.

Die theoretische Spitzenkraft F [N] für eine einzelne Spule beträgt:

F = B · I · L · N

wobei **B** die magnetische Flussdichte [T], **I** der Phasenstrom [A], **L** die effektive Leiterlänge [m] und **N** die Anzahl der Windungen pro Spule ist. In einem realen Motor ist die Gesamtkraft die Summe der Beiträge aller aktiven Spulen, die gleichzeitig Strom führen.

Dreiphasen-Kommutierung

Wie ein bürstenloser rotierender Servomotor verwendet ein tubulärer Linearmotor **Dreiphasen-Wechselstromkommutierung** (sinusförmige feldorientierte Regelung, oder FOC). Der Servoregler erzeugt drei sinusförmige Stromwellenformen, um 120° phasenverschoben, angelegt an die drei Wicklungsphasen U, V, W.

Wenn sich die Magnetstange bewegt, meldet der Encoder kontinuierlich die Position an den Antrieb. Der Antrieb verwendet diese Position, um den augenblicklichen **elektrischen Winkel** (Kommutierungswinkel) zu berechnen, der bestimmt, wie viel Strom in jeder Phase zu jedem Zeitpunkt fließt. Dies hält den Statorstromvektor um 90° zum Rotorfluss — die Bedingung, die die Kraft pro Ampere maximiert.

Die **Motorpolteilung** (τ) definiert die räumliche Periode des Kommutierungszyklus. Bei einem Motor mit Polteilung τ = 60 mm tritt eine vollständige elektrische Periode alle 60 mm linearem Weg auf.

Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie

Die Kraft-Geschwindigkeits-Kurve des tubulären Linearmotors hat zwei Bereiche:

Element
Dauerkraft (F_cont): das Kraftniveau, das unbegrenzt aufrechterhalten werden kann, begrenzt durch die thermische Bewertung der Wicklungen.
Spitzenkraft (F_peak): typischerweise das 2–4-fache von F_cont, verfügbar für kurze Arbeitszyklen (Beschleunigungsstöße), begrenzt durch die Stromfähigkeit des Antriebs.

Bei höheren Geschwindigkeiten reduziert die Gegen-EMK (die von den beweglichen Magneten erzeugte Spannung) den verfügbaren Strom für die Krafterzeugung und erzeugt eine charakteristische Kraftabfall-Region. Die Geschwindigkeit, bei der der Abfall beginnt, hängt von der Versorgungsspannung und der Gegen-EMK-Konstante (Ke) des Motors ab.

Die Beziehung zwischen Spitzengeschwindigkeit, Versorgungsspannung und Motorparametern ist:

V_max ≈ (V_dc − I·R) / Ke

Deshalb ist die Auswahl der richtigen Busspannung wichtig, wenn Hochgeschwindigkeitsbetrieb

erforderlich ist.

Positionsfeedback und Regelung mit geschlossenem Regelkreis

Der Servoregler implementiert eine kaskadierte Regelungsstruktur:

Element
Stromregelung (innerste): regelt die Dreiphasenströme, um dem Kraftbefehl zu folgen. Bandbreite: typischerweise 5–10 kHz.
Drehzahlregelung: regelt die Stangengeschwindigkeit basierend auf der Encoder-abgeleiteten Geschwindigkeit. Bandbreite: typischerweise 100–500 Hz.
Positionsregelung (äußerste): regelt die absolute Position der Stange zum Ziel-Sollwert. Bandbreite: typischerweise 20–100 Hz.

Die SIN/COS-Encodersignale werden vom Antrieb interpoliert, um Auflösungen im Bereich von **0,1 µm bis 1 µm** zu erreichen, abhängig vom Interpolationsfaktor. Dies macht tubuläre Linearmotoren geeignet für Präzisionspositionierungsaufgaben, die mit pneumatischen oder offenen elektrischen Aktuatoren unmöglich wären.

Thermische Verwaltung

Die Hauptwärmequelle in einem tubulären Linearmotor ist **Joule'sche Wärme** ($I^2 \cdot R$-Verluste) in den Kupferwicklungen. Bei Dauerbetrieb muss das Statorgehäuse diese Wärme an die Umgebung oder an einen Kühlkreislauf abgeben.

NILAB-Motoren sind für Dauerbetrieb bis zu einer Wicklungstemperatur von **130°C** (Isolationsklasse F) ausgelegt. Das Aluminiumgehäuse leitet Wärme nach außen, und konvektive Kühlung ist für moderate Arbeitszyklen in der Regel ausreichend.

Für Anwendungen mit hohem Arbeitszyklus oder hoher Kraft ist **erzwungene Luftkühlung** (ein Axiallüfter, der über die Statorrippen bläst) oder **Flüssigkeitskühlung** (ein Wassermantel um den Stator) verfügbar. Flüssigkeitskühlung kann die Dauerkraft-Bewertung um den Faktor **2–3×** gegenüber natürlicher Konvektion erhöhen.

Der PTC-Sensor in den Wicklungen liefert ein direktes Wicklungstemperatursignal an den Servoregler, der vor Erreichen der thermischen Grenze eine Warnung oder einen Fehler auslösen kann.

Vorteile gegenüber herkömmlichen Aktuatoren

Parameter	Tubulärer Linearmotor	Pneumatikzylinder	Kugelgewinde-Aktuator
Kraftwelligkeit	Sehr gering (< 1 %)	Mäßig	Gering
Positioniergenauigkeit	±0,1 mm	Keine Positionsregelung	±10 µm oder weniger
Geschwindigkeit	Bis 5 m/s	Bis 2–3 m/s	Bis 1 m/s
Mechanischer Spielraum	Null	Nicht anwendbar	0,02–0,1 mm

Wartung	Keine (keine Verschleißteile)	Dichtungen, Filter, Schmierung	Schmierung, Mutterverschleiß
Energieeffizienz	Hoch	Niedrig (15–20 %)	Hoch
Programmierbares Kraftprofil	Ja (vollständig)	Nein	Indirekt (über Strombegrenzung)
Geräuschpegel	Sehr gering	Hoch (Abluft)	Mäßig

Zusammenfassung

Ein tubulärer Linearmotor ist im Wesentlichen ein **dreiphasiger bürstenloser Servomotor, der zu einer geraden Linie abgewickelt wurde**. Permanentmagnete auf einer Stange bewegen sich axial in einem gewickelten Stator, angetrieben durch Lorentzkräfte, die durch feldorientierte Stromregelung erzeugt werden. Ein integrierter Encoder schließt den Regelkreis zum Servoregler und ermöglicht präzise Positions-, Geschwindigkeits- und Kraftregelung ohne mechanische Übertragungsverluste. Das Ergebnis ist eine hochdynamische, wartungsfreie und energieeffiziente Alternative zu Pneumatikzylindern und elektromechanischen Schrauben.

From:
https://www.nilab.at/dokuwiki/ - **NiLAB GmbH Knowledgebase**

Permanent link:
https://www.nilab.at/dokuwiki/doku.php?id=de:engineersguide:how_it_works

Last update: **2026/10/22 12:49**