

So funktioniert ein Ironcore-Flachlinearmotor

Einleitung

Ein **Ironcore-Flachlinearmotor** ist ein elektrischer Direktantrieb mit zwei flachen Komponenten: einem **Primärteil** (Spuleneinheit) und einem **Sekundärteil** (Magnetschiene). Wie sein tubuläres Gegenstück erzeugt er lineare Bewegung ohne mechanische Übertragung — aber seine genutete, gelochte Blechpaket-Architektur verleiht ihm die **höchste Kraftdichte aller Linearmotor-Typen**, was ihn zur ersten Wahl für Maschinentische, Portale und jede Anwendung macht, bei der hohe Kraft in einen kompakten Querschnitt passen muss.

Das definierende Merkmal des Ironcore-Designs ist die **normale Anziehungskraft** zwischen Primär- und Sekundärteil — eine direkte Folge des magnetischen Kreises, der durch Eisen verläuft. Richtig in der mechanischen Konstruktion behandelt, ist dies der Preis für Kraftdichte und Kosteneffizienz, die kein anderer Linearmotor-Aufbau erreichen kann.

Die NILAB [L/LK/L1S Ironcore-Serie](#) liefert Dauerkräfte von **150 N bis 7500 N** und Spitzenkräfte von **440 N bis 15750 N**, in sieben Primärteil-Rahmengrößen mit bis zu fünf Primärteillängen pro Rahmen.

Hauptkomponenten

Das Primärteil (Spuleneinheit)

Das Primärteil ist die aktive Komponente. Es besteht aus einem **gelochten Blechpaket aus Silizium-Stahl**, dessen Nuten die **Drehstromwicklung** (U, V, W) aufnehmen. Die Blechlamellen konzentrieren den magnetischen Fluss über den Luftspalt — genau das verleiht dem Ironcore-Motor seine hohe Kraftdichte.

Das komplette Primärteil ist in einem **schützenden Epoxidharz** verkapselt, das gegen Stöße und aggressive Substanzen beständig ist, sodass es in rauen Industrieumgebungen arbeiten kann. Ein **Thermosensor** ist in die Wicklung eingebettet (Thermoschalter, PTC, KTY oder NTC, je nach Bestellcode) und wird vom Servoregler überwacht. Die Versorgung erfolgt über ein Kabel mit offenen Enden oder einen Rundsteckverbinder, mit verschiedenen Kabelaustrittsrichtungen (X, Y und Z).



Das Sekundärteil (Magnetschiene)

Das Sekundärteil ist eine flache **Magnetschiene**: Hochenergetische **NdFeB**-Dauermagnete sind auf einem massiven **Rückeisen** (Back Iron) befestigt, das den magnetischen Kreis schließt. Die Magnete sind mit wechselnder Polarität im **Polteilung**-Abstand τ des Motors angeordnet, passend zum Nutmuster des Primärteils.

Die Schiene wird aus modularen Segmenten aufgebaut, die Stoß an Stoß verschraubt werden, sodass der Hub durch Hinzufügen weiterer Segmente nahezu beliebig verlängert werden kann. Wie das Primärteil ist auch das Sekundärteil vom schützenden Epoxidharz bedeckt.

Der Linearencoder

Anders als bei tubulären Motoren hat ein Ironcore-Flachmotor **keinen integrierten Encoder**. Die Positionsückmeldung kommt von einem externen **Lineargeber**: einem Messaufnehmer entlang der Maschinenhubachse, gelesen von einem Abtastkopf am Primärteil. Je nach Feedback-System (z. B. das NILAB [HSB-Feedback](#)) sind inkrementelle 1-Vpp-SIN/COS-Signale oder absolute Schnittstellen verfügbar; mit Interpolation im Servoregler werden Auflösungen im Submikron-Bereich erreicht.

Die Maschinenführung und der Luftspalt

Ein Ironcore-Motor hat **keine eingebaute Lagerung**. Die Last wird von der eigenen **Linearführung** der Maschine getragen, die auch die normale Anziehungskraft aufnehmen muss (siehe unten). Das Primärteil wird mit einem kleinen, präzise definierten **Nennluftspalt** über dem Sekundärteil montiert — die [Installationstoleranzen](#) müssen eingehalten werden, damit sich der Luftspalt weder unter der Anziehungskraft schließt noch durch Maschinenverformung übermäßig öffnet.

Funktionsprinzip

Lorentzkraft im genuteten Blechpaket

Die Krafterzeugung folgt dem **Lorentzkraftgesetz** wie bei jedem synchronen Linearmotor:

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot N$$

wobei **B** die magnetische Flussdichte [T], **I** der Phasenstrom [A], **L** die wirksame Leiterlänge [m] und **N** die Windungszahl ist. Der Unterschied zu einem ironlosen Design ist der **magnetische Kreis**: Die Blehzähne des Primärteils konzentrieren den Magnetfluss des Sekundärteils über den Luftspalt, sodass die wirksame Flussdichte in den Nuten viel höher ist als bei einem hohlkupferten Motor. Deshalb liefert ein Ironcore-Motor mehr Kraft pro Rahmengröße und pro Magnetmaterial.

Die genutete Architektur führt auch zu **Cogging** (Rastkraft): Die Zähne richten sich auch ohne Strom an den Magneten aus. Bei einem gut ausgelegten Motor wird dieser Effekt durch die Nut/Pol-Geometrie und die elektronische Kompensation des Servoreglers minimiert, sodass die resultierende Kraftwelligkeit klein bleibt — sie ist aber inhärent höher als bei einem slotlosen (tubulären) Motor.

Die normale Anziehungskraft

Da der magnetische Kreis durch Eisen verläuft, **ziehen sich** Primär- und Sekundärteil **gegenseitig an** — mit einer Kraft, die typischerweise **mehrfach höher als die Nennkraft** ist, und zwar **auch bei ausgeschaltetem Motor**. Diese [Anziehungskraft](#) ist eine dauerhafte Last für die Linearführungen und die Maschinenstruktur und muss in jeder mechanischen Konstruktion berücksichtigt werden.

Praktische Gegenmaßnahmen sind auf der [eigenen Seite](#) und unter [Motoranordnung](#) beschrieben: Linearführungen so nah wie möglich am Motor, ausreichende Steifigkeit der Struktur und — wo die Anziehungskraft zum Vorteil wird — die **Double-Comb-Parallelanordnung** zweier einander zugewandter Primärteile. Der exakte Wert für jede Motorengröße ist im **Technische Daten-**Datenblatt beim Nennluftspalt angegeben.

Dreiphasen-Kommutierung

Wie jeder bürstenlose synchrone Linearmotor verwendet der Ironcore-Motor die **Dreiphasen-Wechselstrom-Kommutierung** (sinusförmige feldorientierte Regelung, FOC). Der Servoregler erzeugt drei sinusförmige Stromwellenformen mit 120°-Verschiebung, angelegt an die Wicklungsphasen U, V und W.

Während sich das Primärteil entlang der Schiene bewegt, meldet der Lineargeber kontinuierlich die Position an den Regler. Der Regler berechnet aus dieser Position den momentanen **elektrischen Winkel** (Kommutierungswinkel) und verteilt den Strom auf die drei Phasen so, dass der Stromvektor 90° zum Magnetfluss bleibt — die Bedingung für maximale Kraft pro Ampere.

Die **Polteilung** τ definiert die räumliche Periode des Kommutierungszyklus: eine vollständige elektrische Periode tritt alle $2 \cdot \tau$ Hubweg auf (z. B. 60 mm bei einem Motor mit $\tau = 30$ mm).

Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie

Die Kraft-Geschwindigkeits-Kurve eines Ironcore-Motors hat zwei Bereiche:

Posten
Dauerkraft (F_{cont}): die dauerhaft ertragbare Kraft, begrenzt durch das thermische Verhalten der Wicklung.
Spitzenkraft (F_{peak}): typischerweise $2\text{--}4 \times F_{\text{cont}}$, für kurze Einschaltdauer (Beschleunigungsspitzen) verfügbar, begrenzt durch die Stromfähigkeit des Reglers.

Bei höheren Geschwindigkeiten reduziert die **Gegen-EMK** (die von den bewegten Magneten erzeugte Spannung) den für die Krafterzeugung verfügbaren Strom, was die charakteristische Kraft-Roll-off-Region erzeugt. Die Geschwindigkeit, bei der das Roll-off beginnt, hängt von der Versorgungsspannung und der Gegen-EMK-Konstante (K_e) des Motors ab:

$$V_{\text{max}} \approx (V_{\text{dc}} - I \cdot R) / K_e$$

Deshalb ist die korrekte Zwischenkreisspannung wichtig, wenn hohe Geschwindigkeiten gefordert sind.

Wärmemanagement

Die primäre Wärmequelle ist die **Joulesche Erwärmung** ($I^2 \cdot R$ -Verluste) in den Kupferwicklungen. Da das Primärteil direkt an die Maschinenstruktur verschraubt ist, fließt ein großer Teil dieser Wärme **direkt in den Maschinenkörper** — ein hervorragender Wärmesenk und einer der praktischen Vorteile der flachen Architektur. Für höhere Einschaltdauern fügt die **LK-Serie** einen integrierten **Wasserkühlungskreis** hinzu, der die verfügbare Dauerkraft deutlich erhöht.

Der eingebettete Thermosensor (Thermoschalter, PTC, KTY oder NTC) liefert dem Servoregler ein direktes Wicklungstemperatur-Signal, das eine Warnung oder einen Fehler auslösen kann, bevor die thermische Grenze erreicht ist.

Positionsückmeldung und geschlossener Regelkreis

Der Servoregler implementiert eine kaskadierte Regelschleife:

Posten

Stromkreis (innerste): reguliert die Drehströme, um dem Kraftbefehl zu folgen. Bandbreite: typisch 5–10 kHz.
Geschwindigkeitskreis : reguliert die Primärteilgeschwindigkeit basierend auf der gebersynchronen Geschwindigkeit. Bandbreite: typisch 100–500 Hz.
Positionskreis (äußerste): reguliert die absolute Position auf den Sollwert. Bandbreite: typisch 20–100 Hz.

Die Signale des Lineargebers werden vom Regler interpoliert, um Auflösungen bis in den Submikron-Bereich zu erreichen, was Ironcore-Flachmotoren für Präzisionspositionierungsaufgaben geeignet macht, die mit pneumatischen oder offenen Aktuatoren unmöglich wären.

Ironcore vs. tubulär: wann wählt man was

Parameter	Ironcore flach (L/LK/L1S)	Tubulär (ironlos)
Kraftdichte	Höchste (Fluss konzentriert durch Blechpaket)	Hoch
Kraftwelligkeit	Niedrig, aber vorhanden (genutete Bauform → Cogging)	Sehr niedrig (< 1%, slotlos)
Normale Anziehungskraft	Vorhanden — mehrfach × Kraft, dauerhaft	Keine (achsensymmetrisch)
Wärmeableitung	Großer Teil fließt in die Maschinenstruktur	Über das Statorgehäuse
Encoder	Externer Linearmaßstab + Abtastkopf	Im Motorkörper integriert
Typische Anwendungen	Maschinentische, Portale, lange Hübe mit hoher Kraft	Zylindersatz, versiegelte/vertikale Achsen, Reinräume

Als Faustregel: Wählen Sie den **Ironcore-Flachmotor**, wenn maximale Kraftdichte und kosteneffiziente lange Hübe Priorität haben und die Maschinenstruktur die Anziehungskraft aufnehmen kann. Wählen Sie den **tubulären Motor**, wenn null Cogging, keine Anziehungskraft oder ein vollständig integrierter, versiegelter Aktuator Priorität hat.

Zusammenfassung

Ein Ironcore-Flachlinearmotor ist ein **dreiphasiger bürstenloser Servomotor, der zu einem linearen Primärteil abgeflacht wurde**. Eine genutete, gelochte Spuleneinheit läuft über einer Magnetschiene mit Rückeisen; die Blechlamellen konzentrieren den Fluss und verleihen die höchste Kraftdichte aller Linearmotor-Typen — zum Preis einer permanenten normalen Anziehungskraft, die die Maschinenkonstruktion aufnehmen muss. Feldorientierte Dreiphasen-Kommutierung aus einem Lineargeber schließt den Regelkreis bis zur submikronen Positionauflösung. Das Ergebnis ist ein extrem kraftdichter, wartungsfreier und energieeffizienter Aktuator für Maschinentische, Portale und kraftvolle Linearachsen.

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

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

Last update: **2026/10/11 16:45**

