

Lineare Direktantriebe

Historie, Grundlagen und technischer Stand

Revision: 07.01.2020

Autor: Dipl.-Physiker W. Jung

© JUNG ANTRIEBSTECHNIK U. AUTOMATION GMBH

Die Weitergabe dieses Dokumentes in Papierform oder als Datei,
auch auszugsweise, ist ohne unsere ausdrückliche Genehmigung
nicht gestattet!

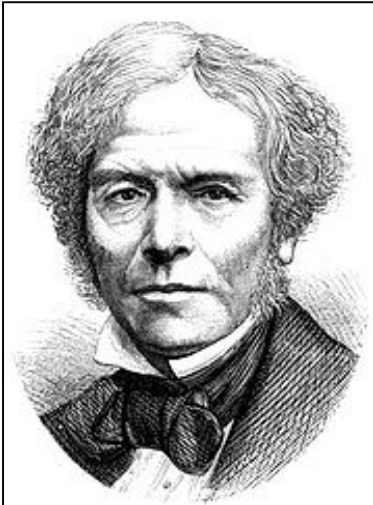
Alle nicht angegebenen Bild- u. Grafikquellen: www.wikipedia.org

Inhaltsangabe

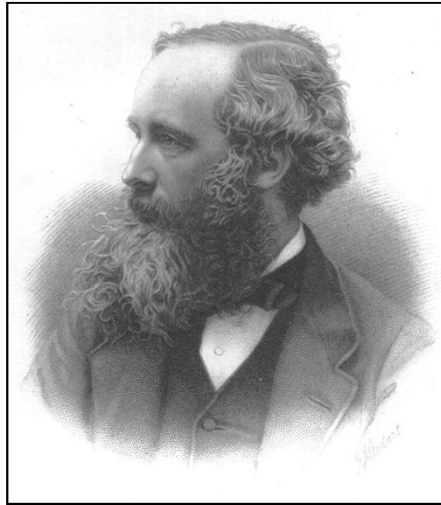
- Historie des Linearmotors
- rotative Antriebe Basiswissen
- Linearmotorbauformen
- Vom rotativen Motor zum Linearmotor
- Gebräuchliche Wirkprinzipien, technischer Aufbau, industrielle Umsetzung und typische Anwendungen von Linearmotoren
- Vor- und Nachteile der Linearmotortechnik

Historie des Linearmotors

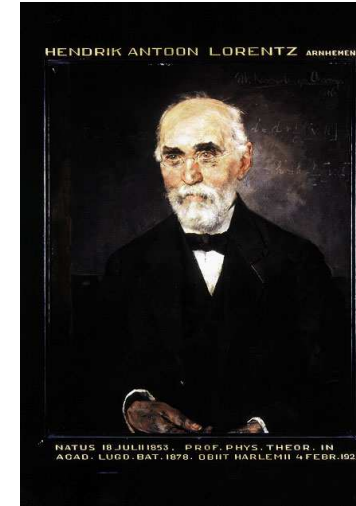
Grundlagen



Michael Faraday
1791 – 1867
Physiker u. Chemiker
England
Entdeckung der
magnetischen Induktion



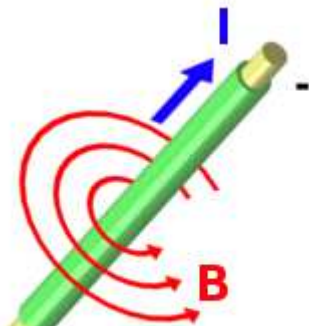
James Clerk Maxwell
1831 – 1879
Physiker
England
Maxwellsche Gleichungen
als Grundlage der
Elektrizitätslehre und
des Magnetismus



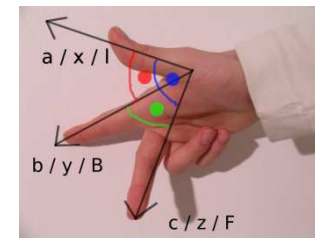
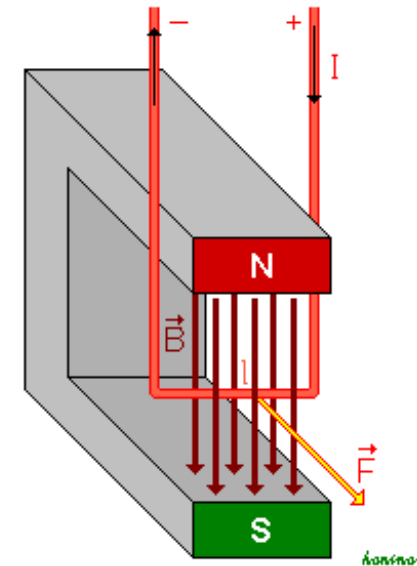
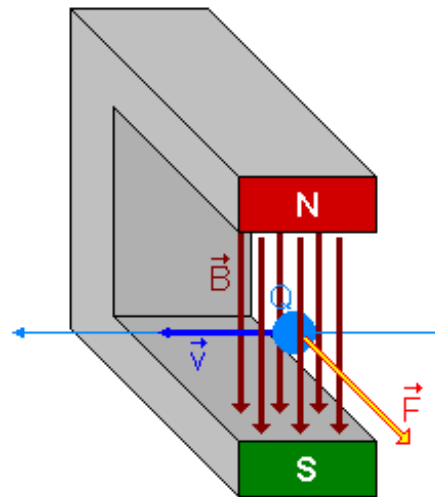
Hendrik Antoon Lorentz
1853 – 1928
Mathematiker u. Physiker
Holland
u. a. math.
Beschreibung
der Lorentz-Kraft

Grundlagen

Diesen Herren verdanken wir die Grundlagen unserer modernen elektrischen Antriebstechnik!



Korkenzieher Regel



rechte Hand Regel für die Lorentz Kraft

Historie

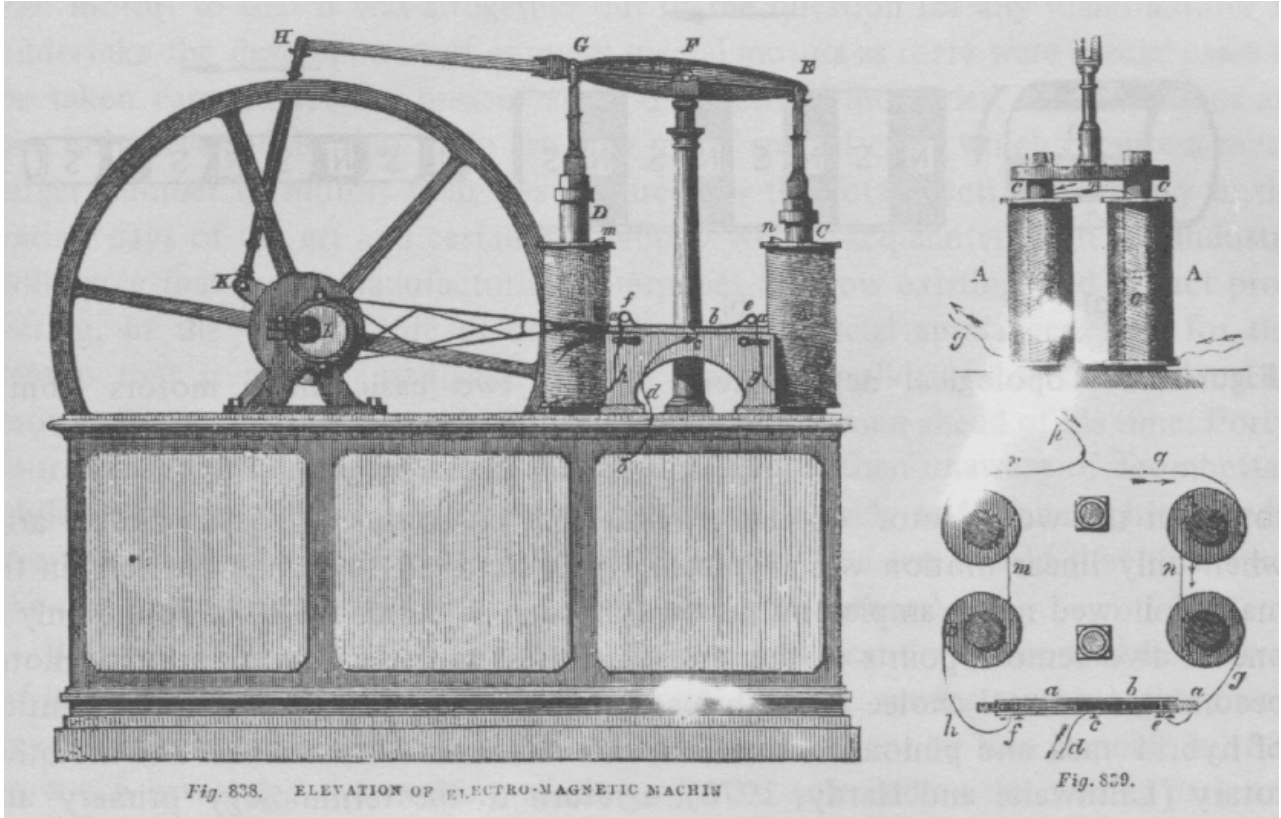
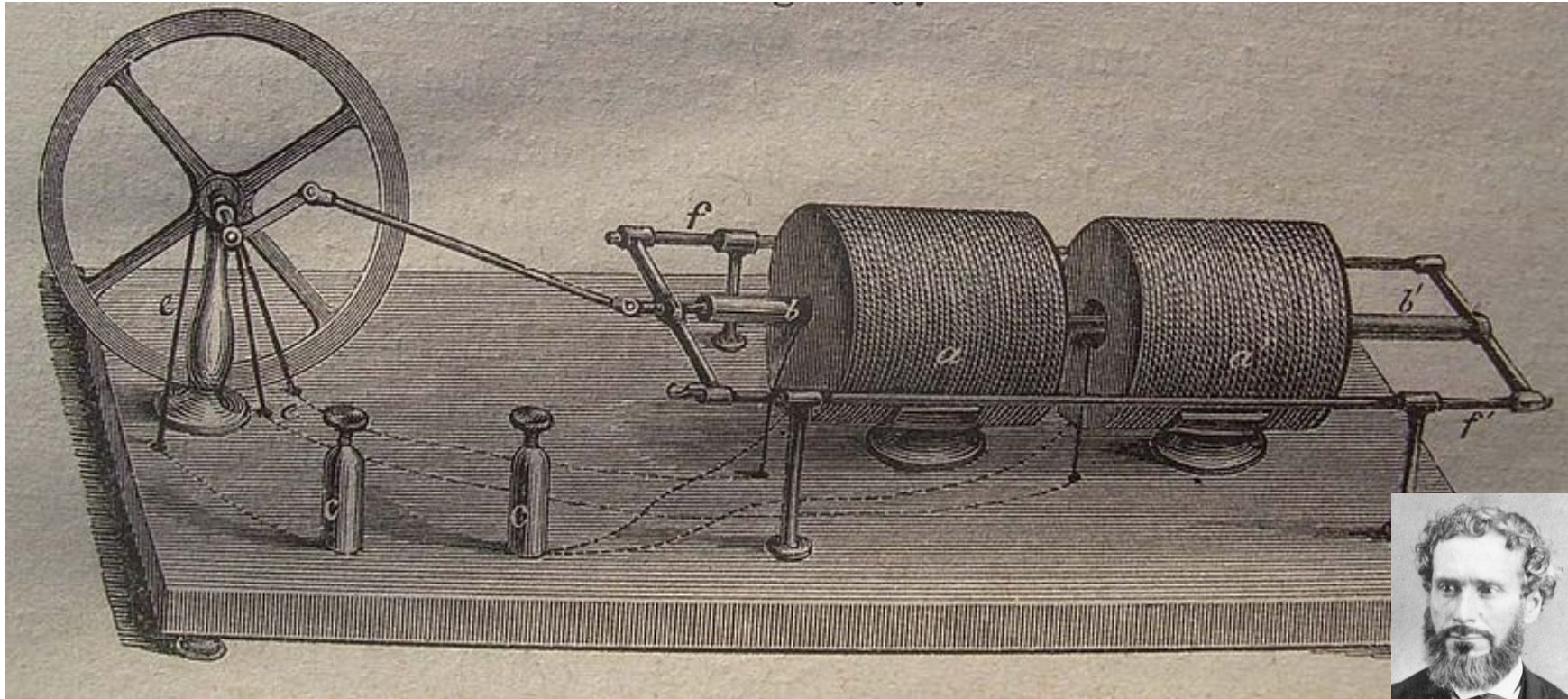


Bild: E.R. Laithwaite

**Historisches Ziel für die Erfinder und Entwickler von Linearmotoren war es, für den Ersatz von Dampfmaschinen ein elektrisches Schubsystem zu realisieren!
(Auszug aus der Patentschrift von Moritz Hermann v. Jacobi St. Petersburg 1801 - 1874)**



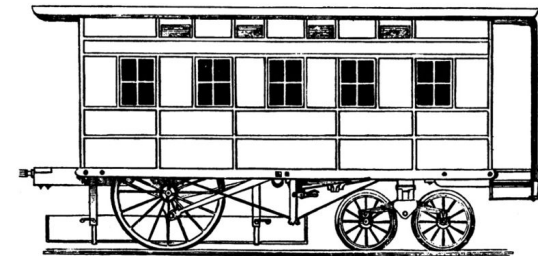
1838 konstruierte Charles Crafton Page USA (1812 - 1868) einen elektromagnetischen 'Kolbenmotor', der bereits mit einem Kommutator ausgestattet war und eine lineare oszillierende Bewegung zum Antrieb eines Kurbeltriebes erzeugte!

1842 baute der Schotte Robert Davidson (1804 - 1894) eine Lokomotive mit Namen 'Galvani', die mit einem ebensolchen elektrischen 'Kolbenmotor' angetrieben wurde. Die Energieversorgung erfolgte durch Batterien. Sie war die erste Elektrolok, die unter freiem Himmel auf einer realen Bahnstrecke erprobt wurde!

Unabhängig hiervon baute 1850 Charles Crafton Page USA (1812 - 1868) eine vergleichbare Elektrolokomotive mit elektrischem 'Kolbenmotor'. Bei einer Probefahrt 1851 konnte eine Geschwindigkeit von 31 km/h erreicht werden. Die Energieversorgung erfolgte ebenfalls durch Batterien.

Beide Erfinder arbeiteten völlig unabhängig voneinander, ohne dass sie voneinander wussten.

Ein Erfolg war ihnen nicht beschieden, da die verwendete Batterietechnik zur damaligen Zeit zu leistungsschwach und zu teuer war.



THE FIRST LOCOMOTIVE THAT EVER MADE A SUCCESSFUL TRIP WITH GALVANIC POWER.

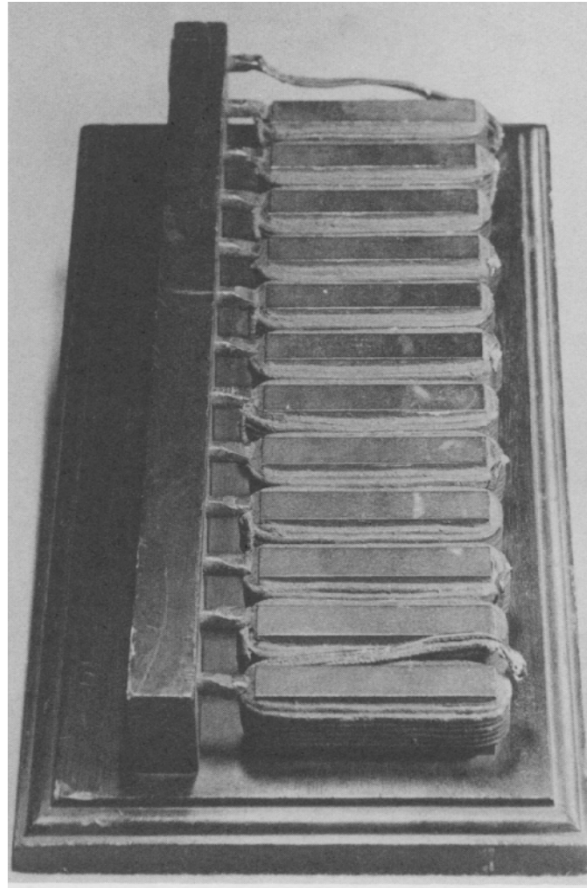
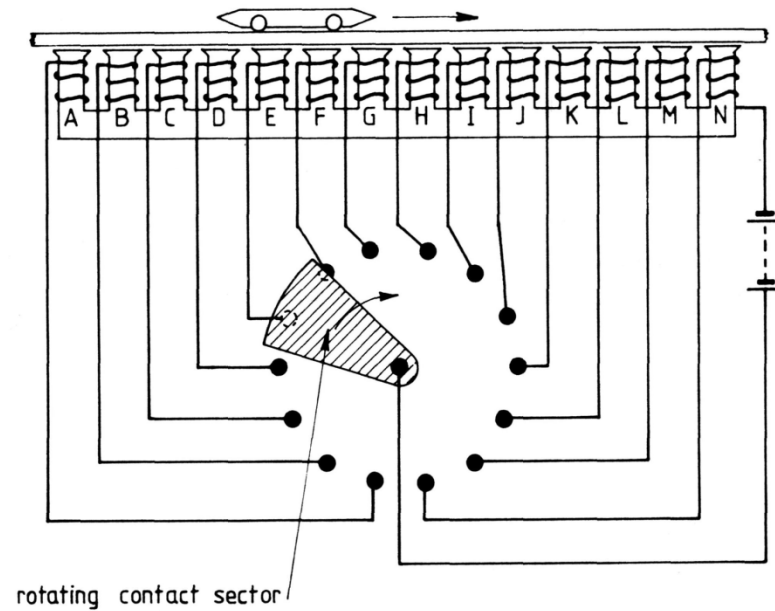


Bild: E.R. Laithwaite

**Erstes bekanntes Foto eines flachen Linearmotors von 1845
(Charles Wheatstone England 1802 - 1875)!**

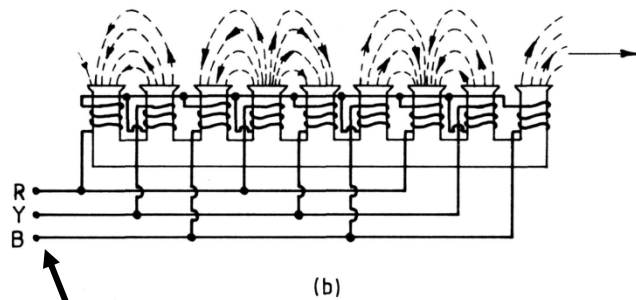
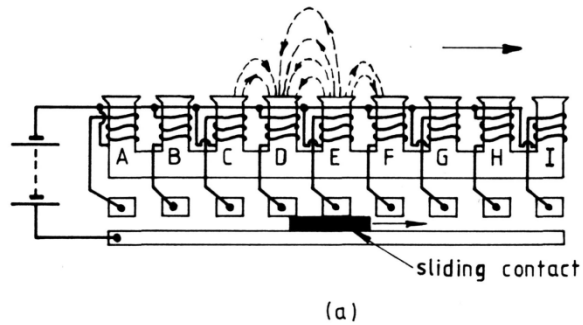


The first reluctance motor shuttle propulsion, 1895

Bild: E.R. Laithwaite

Erste Patentanmeldung für einen Schiffchen-Antrieb eines Webstuhles (1895)!

Historie



Drehstromanschluss!!!

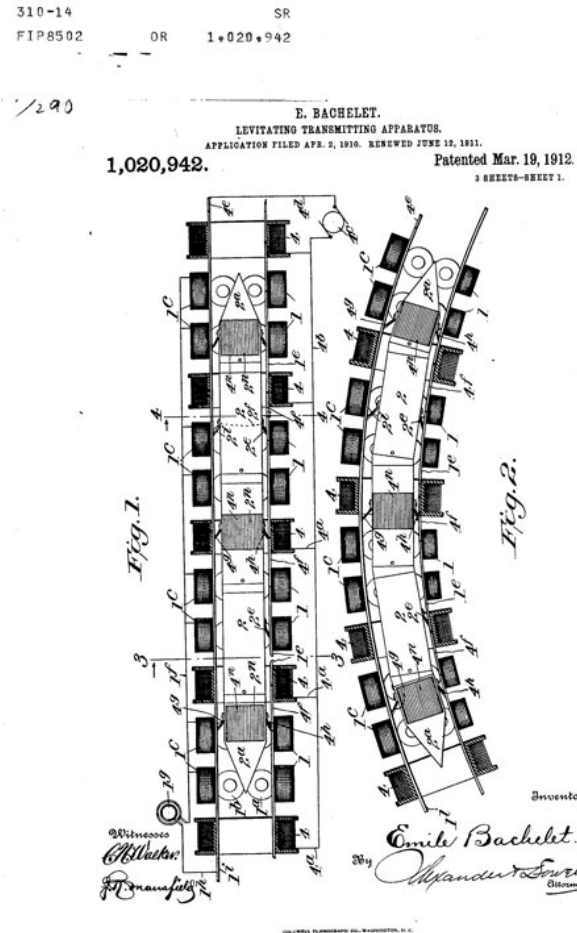
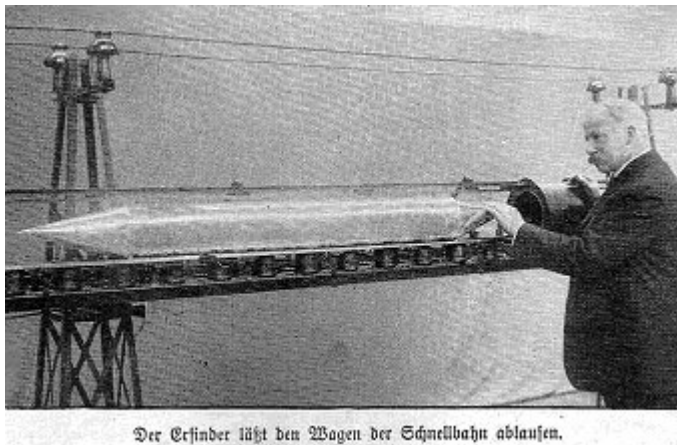
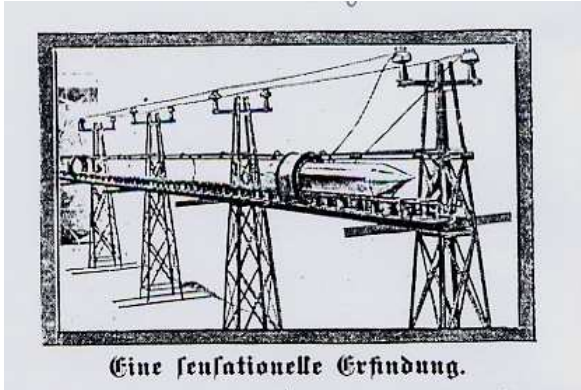
Im Jahre 1914 erregte in London der Franzose Emile Bachelet mit einer 'sensationellen Erfindung' ungeheures Aufsehen. In seinem Labor wurde erstmals ein Linearmotor als Labormuster vorgestellt, der für den Antrieb von Schnellbahnen und Schiffchen in Webstühlen geeignet sein sollte. Bereits zu dieser Zeit wurde von Bachelet postuliert, dass der Antrieb auch zum magnetischen Schweben benutzt werden könne.

Bei der Vorstellung dieses neuen Antriebes wurden bereits für die Anwendung als Schnellbahn eine Geschwindigkeit von 300 Meilen in der Stunde angegeben. Eine zeppelinähnliche Gondel sollte magnetisch schweben und mit Linearmotor vorangetrieben werden.

Bilder: E.R. Laithwaite

Historie

JUNG ANTRIEBSTECHNIK U.
AUTOMATION GMBH



Bilder: The
International Maglev
Board e.V.

Emile Bachelet mit seinem Versuchsmuster und sein US-Patent von 1912!

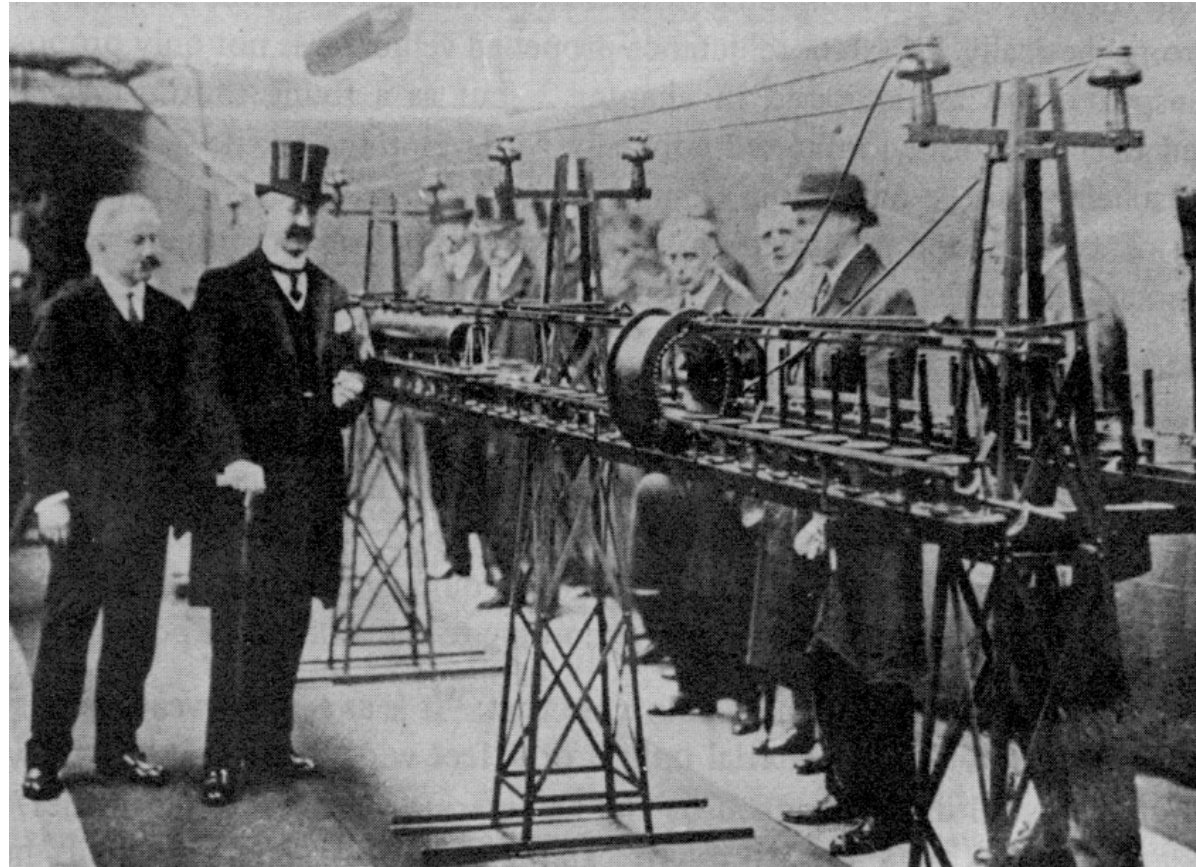


Bild: E.R. Laithwaite

Hochgestellte Personen aus Adel und Presse inspizieren den Versuchsträger 1914!

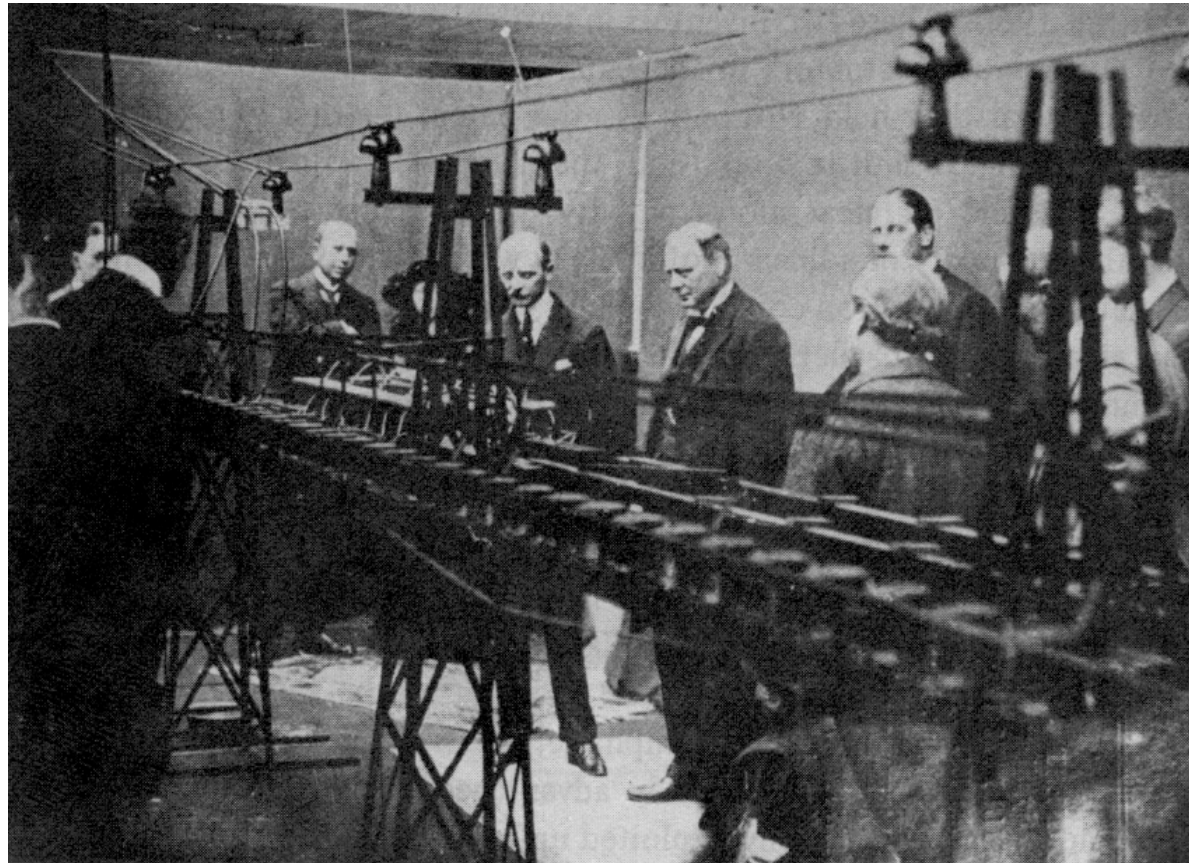


Bild: E.R. Laithwaite

Auch W. Churchill wirft einen Blick auf den Versuchsträger 1914!

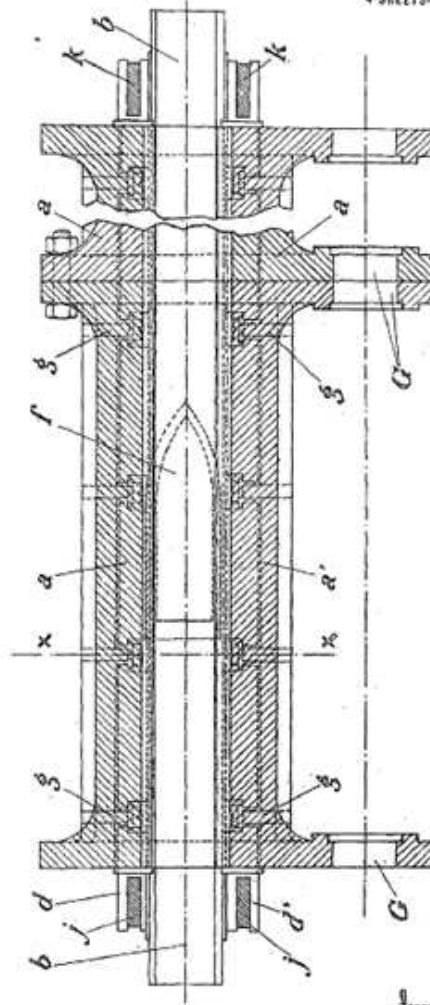
Historie

1,421,435.

A. L. O. FAUCHON-VILLEPLEE.
ELECTRIC APPARATUS FOR PROPELLING PROJECTILES.
APPLICATION FILED APR. 1, 1919.

Patented July 4, 1922.
4 SHEETS—SHEET 2.

Fig. 2

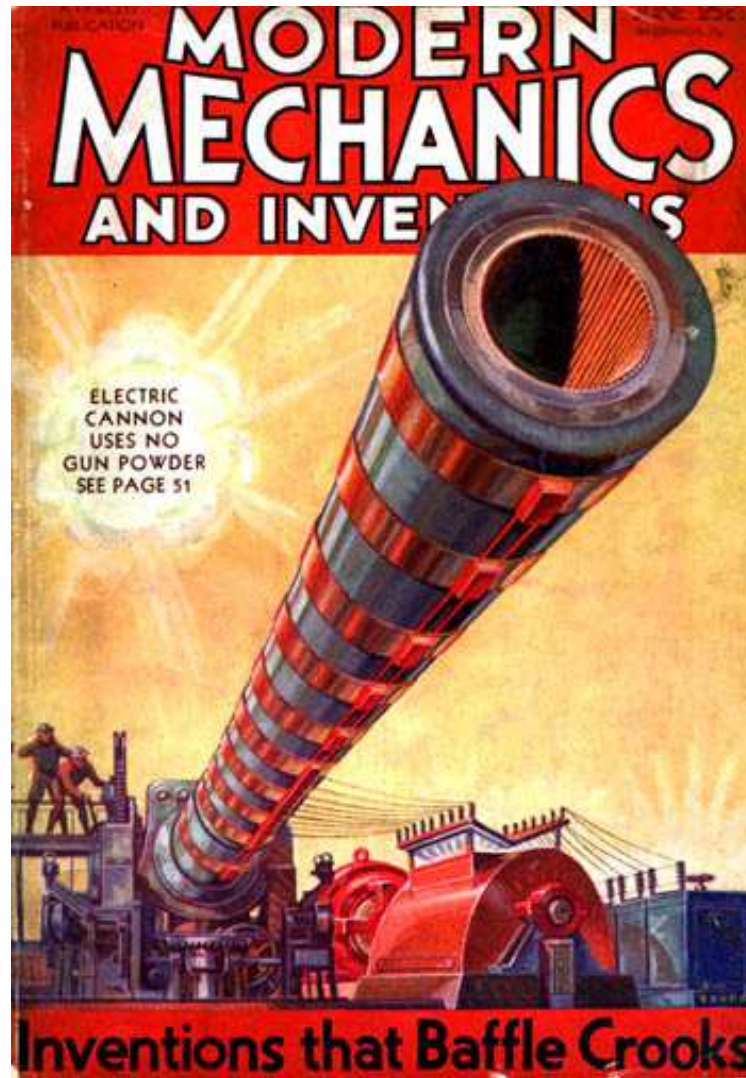


André Louis Octave Fauchon-Villeplee

JUNG ANTRIEBSTECHNIK U.
AUTOMATION GMBH



**Patentanmeldung von 1918 vom
französischen Erfinder
Louis Octave Fauchon-Villeplee
für einen 'elektrischen Apparat
zum Antreiben von Projektilen'!**



Im Juni 1932 erscheint in dem Magazin 'Modern Mechanics and Inventions' von Dr. Kapitza, damals Dozent an der Cambridge University GB, dieser Artikel! Aus heutiger Sicht technischer Unsinn!

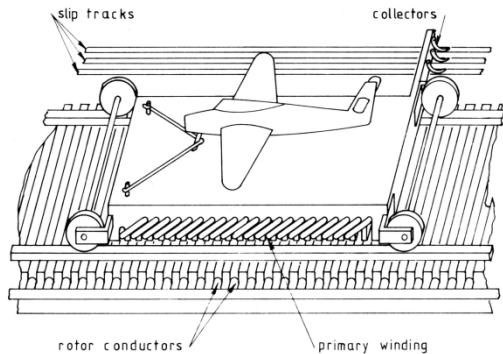
Historie



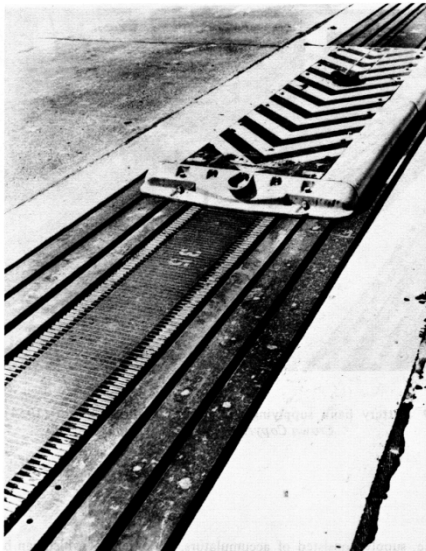
Bilder: The
International Maglev
Board e.V.

Erste Entwicklungen zu linearmotorgetriebenen Magnetschwebbahnen wurden 1922 von Hermann Kemper (1892 - 1977) im Deutschen Reich begonnen, jedoch kriegsbedingt wieder eingestellt. Ein Deutsches Reichspatent wurde erteilt.

Historie



Schematic layout of the Westinghouse aircraft launcher



The Westinghouse 'Electropult' primary on its track (courtesy of Westinghouse Engineer)

**Erster kommerziell eingesetzter Linearmotor der Welt!
Damals wohl auch der schnellste Linearmotor der Welt!**

**1946 stellte Westinghouse (USA) den 'Electropult' als Katapultantrieb mit einer Bahnlänge von 450 m und einer Vortriebskraft von 500 kN vor! Die max. Spitzengeschwindigkeit betrug ca. 200 km/h!
Die Technik kam aber über 2 Erprobungsträger nicht hinaus, da Dampfkatapulte sich als ökonomischere Lösung für die Anwendung auf Flugzeugträgern erwiesen!**

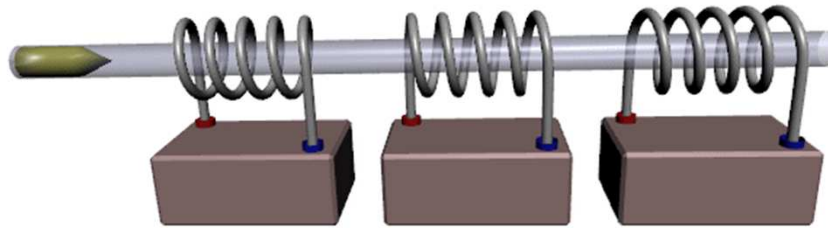
Bilder: E.R. Laithwaite

Nahe Historie

Erst 1967 wurde in der Bundesrepublik die Weiterentwicklung der Magnetschwebebahn von dem Physiker Götz Heidelberg und von Prof. Herbert Weh wieder aufgenommen. Mit staatlicher Förderung entstanden zwischen 1971 u. 1979 erste Versuchsträger von den Firmen MBB (heute EADS), Krauss-Maffei (Transrapid) und Siemens. 1984 wurde die Transrapid-Versuchsanlage im Emsland in Betrieb genommen. 2004 ging der erste Transrapid in Shanghai in Betrieb. Der Unfall im Emsland und die Flugpreisentwicklung führte ab 2006 zur Stagnation der weiteren Entwicklung!



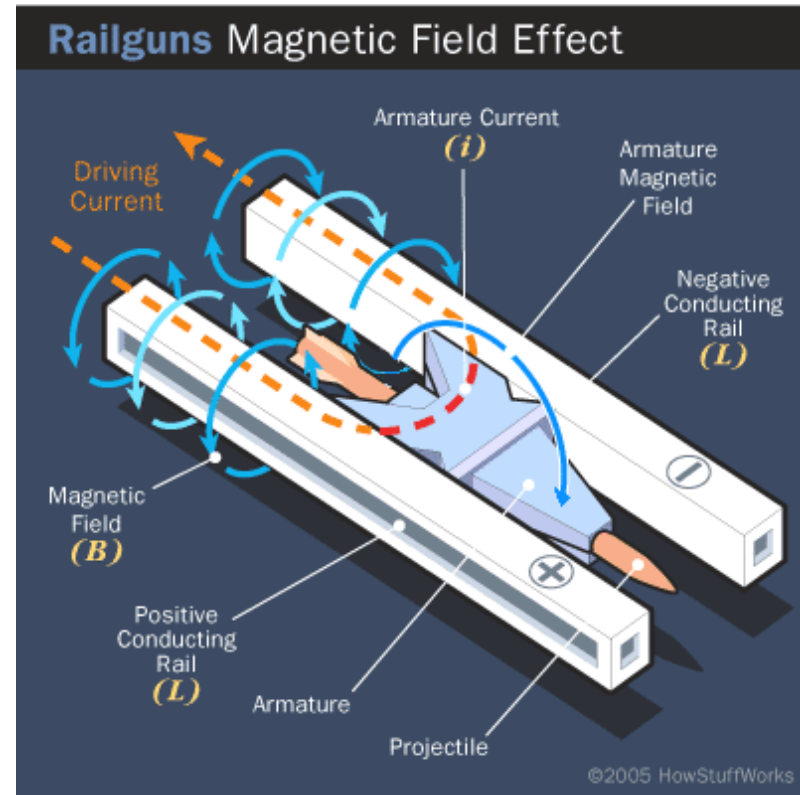
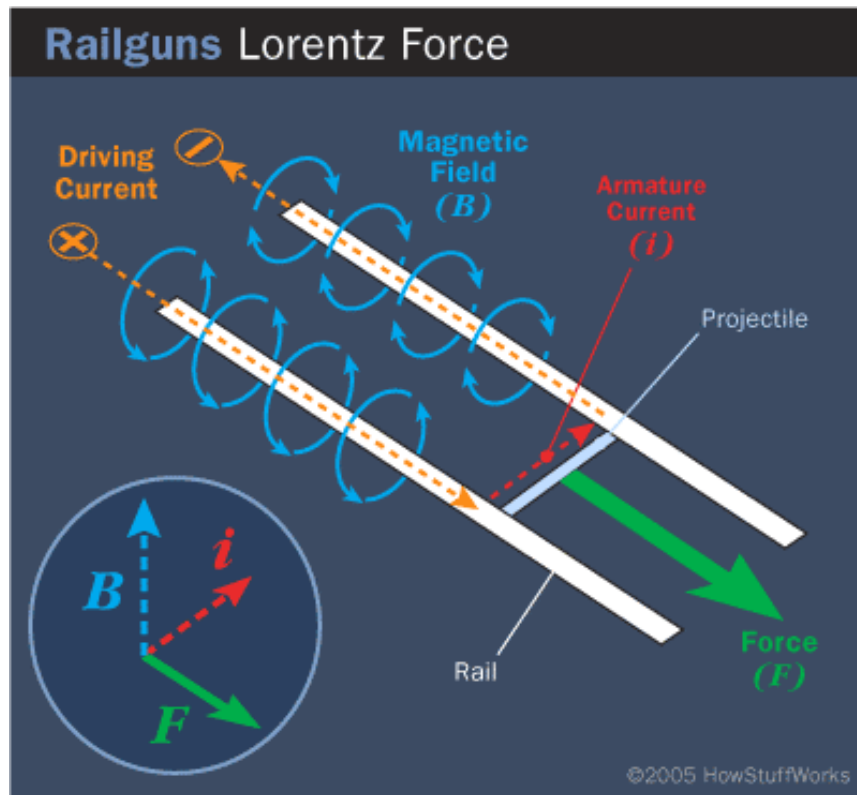
Aktuelles und Verwandtes - das Gaussgewehr



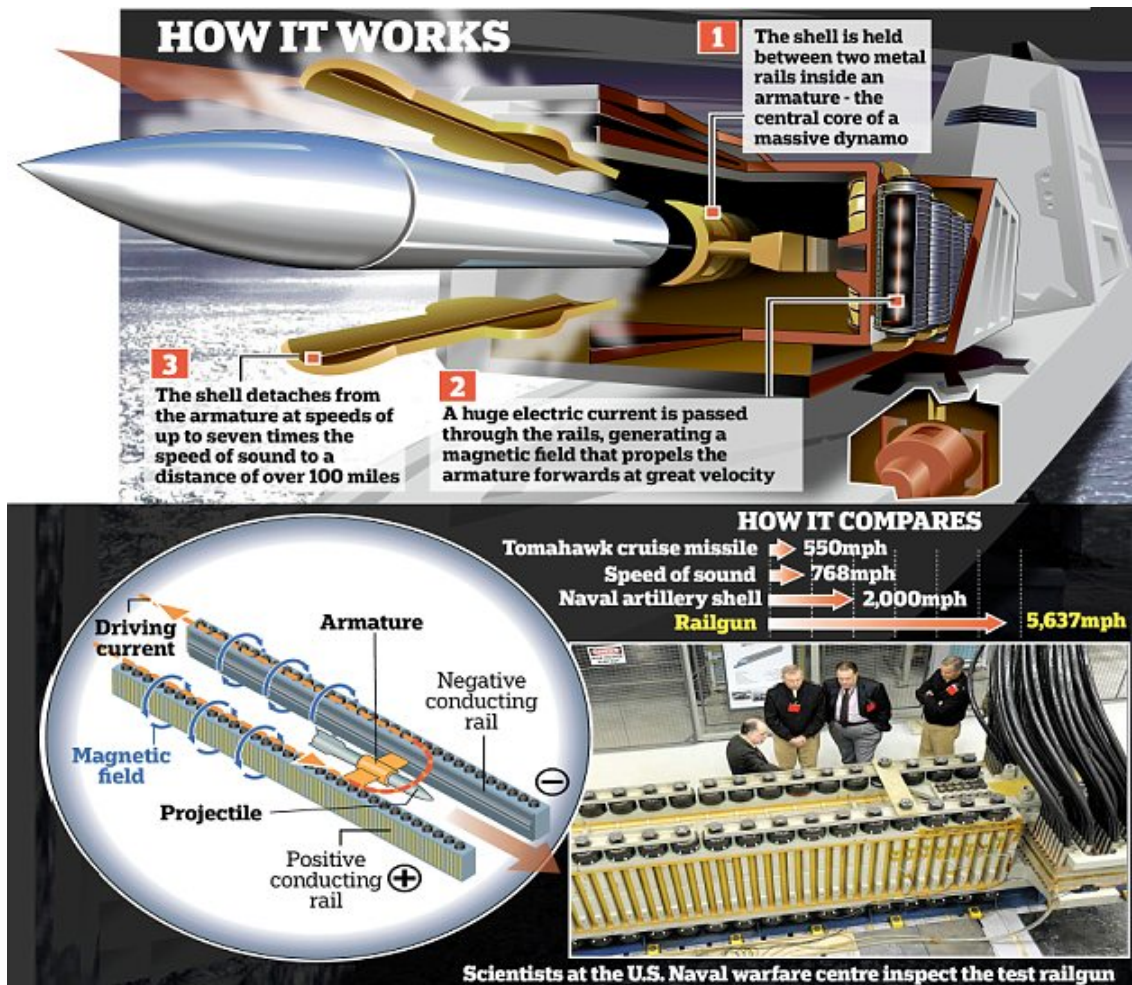
Technischer Stand Gaussgewehr 2008:
Geschossmasse sehr klein
Austrittsgeschwindigkeit ca. 5 km/s
derzeit keine konkrete militärische
Umsetzung,
private Projekte



Aktuelles und Verwandtes - die Railgun



Aktuelles und Verwandtes - die Railgun



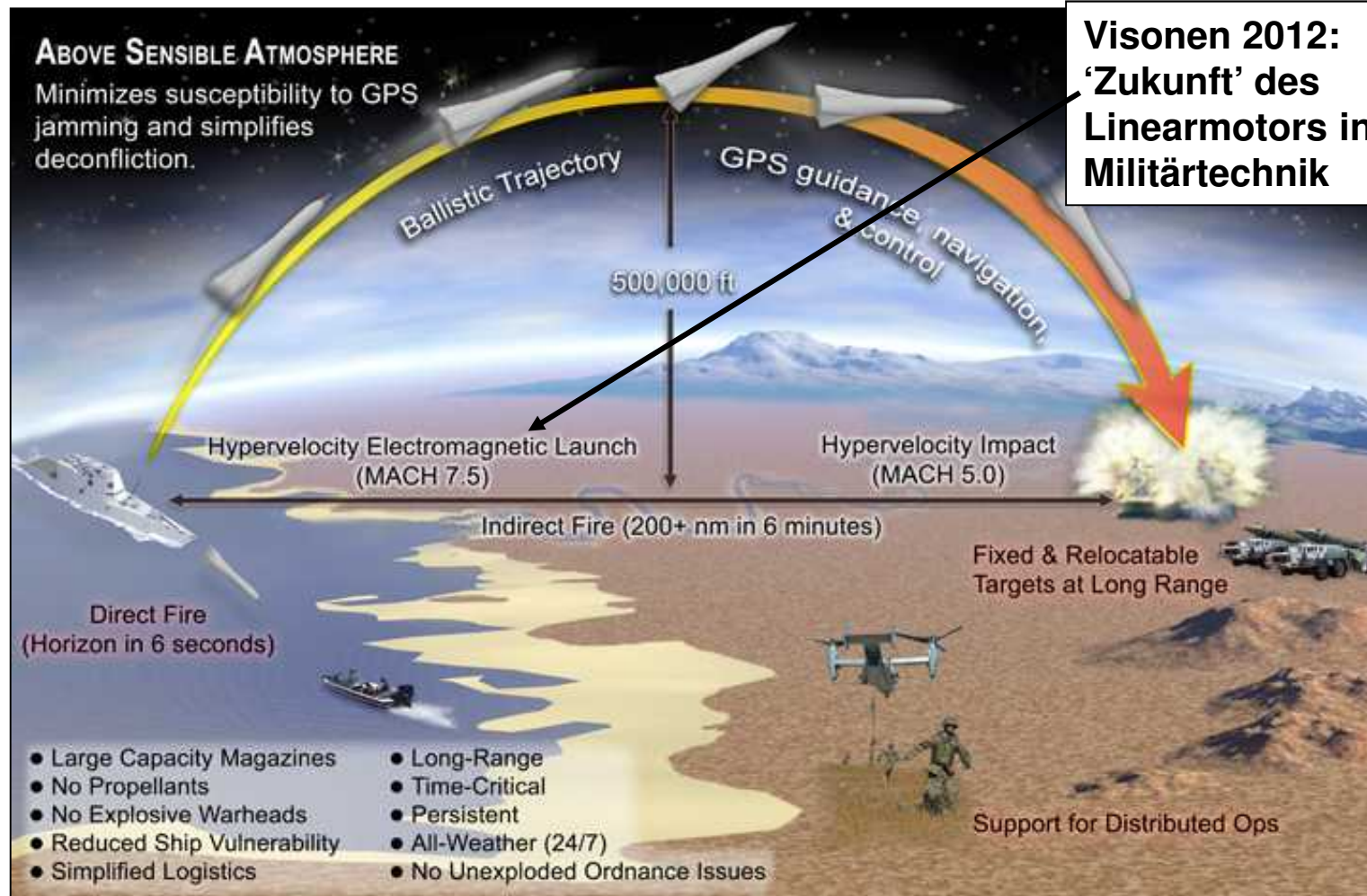
Aktuelles und Verwandtes - die Railgun



Technischer Stand Railgun 2011:
Geschossmasse 3 kg
Austrittsgeschwindigkeit 7,8 km/s
militärische Forschungsprojekte



Aktuelles und Verwandtes - Visionen



Visionen 2012:
'Zukunft' des
Linearmotors in der
Militärtechnik

Aktuelles und Verwandtes - Visionen



**Visionen 2008:
'Zukunft' des
Linearmotors in der
Raumfahrt**



Wieder zurück zur Realität!

Rotative Antriebe Basiswissen

Prinzip permanent erregter Gleichstrommotor

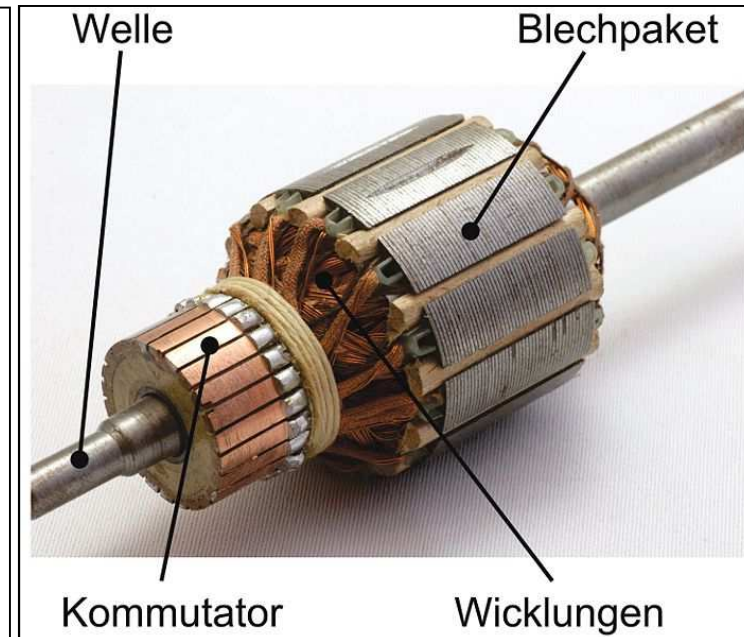
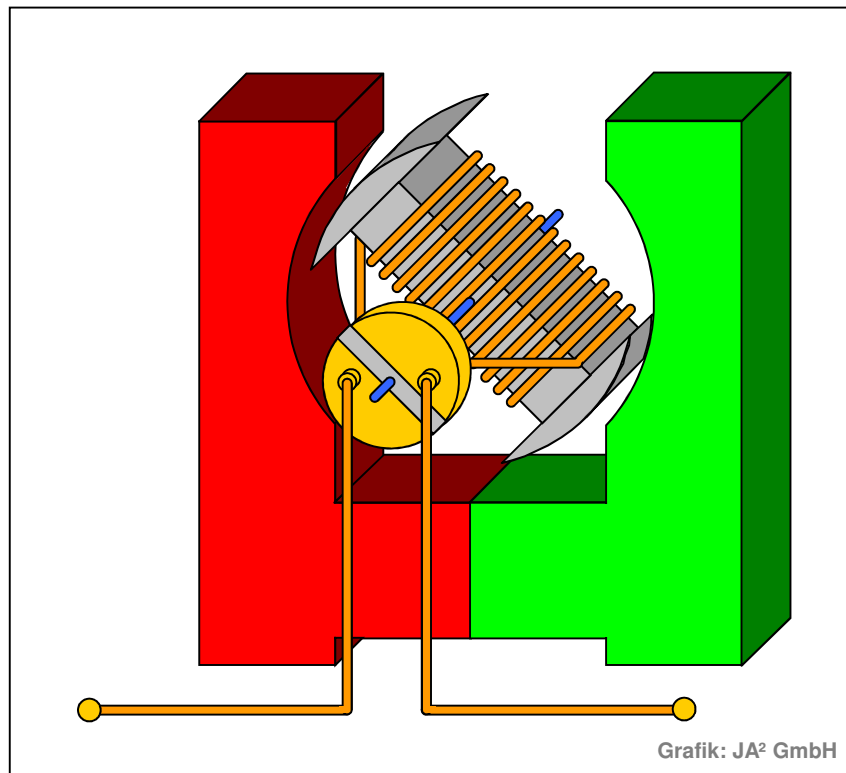
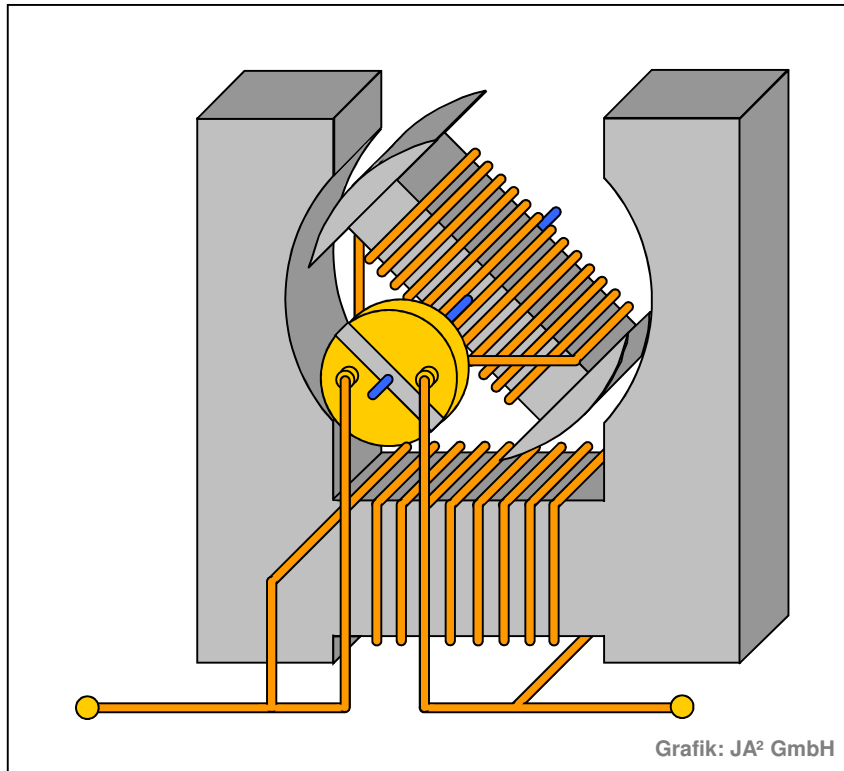


Bild: Bosch GmbH

Prinzip Elektromotor mit Nebenschlusserregung



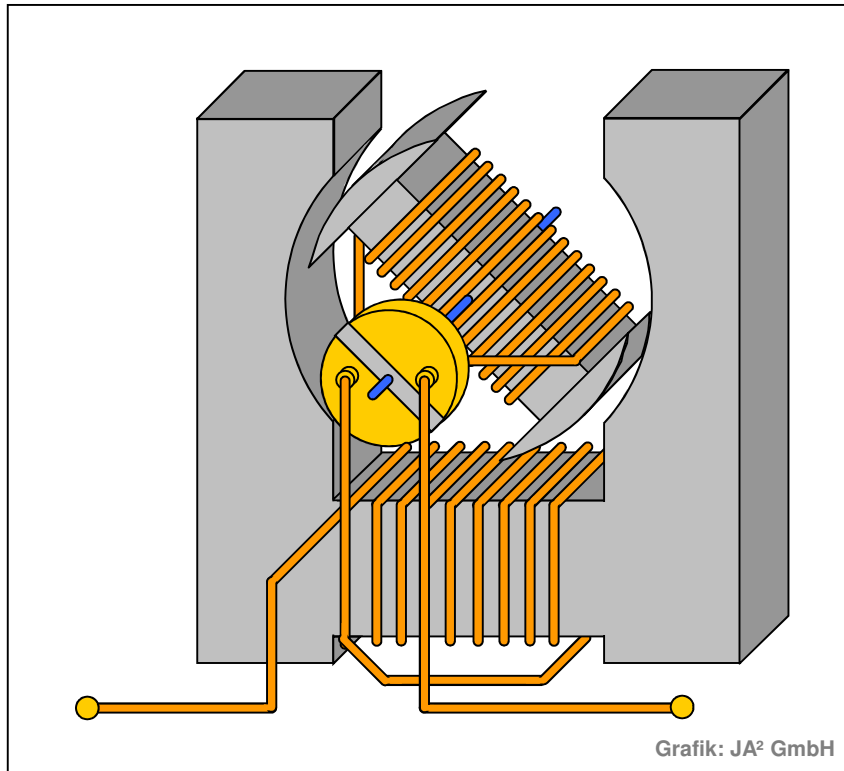
Gebräuchlicher Name:

- Gleichstrommotor
- Nebenschlussmotor



Bild: ABB GmbH

Prinzip Elektromotor mit Reihenschlusserregung



Verschiedene gebräuchliche Namen
für das gleiche Prinzip:

- Universalmotor (Gleich- u. Wechselstrom)
- Allstrommotor
- Reihenschlussmotor
- Einphasenreihenschlussmotor

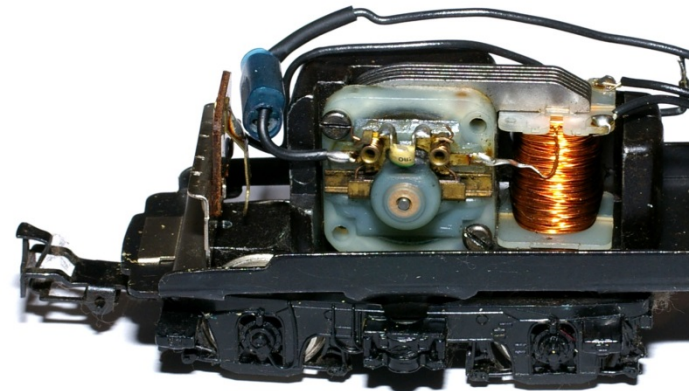
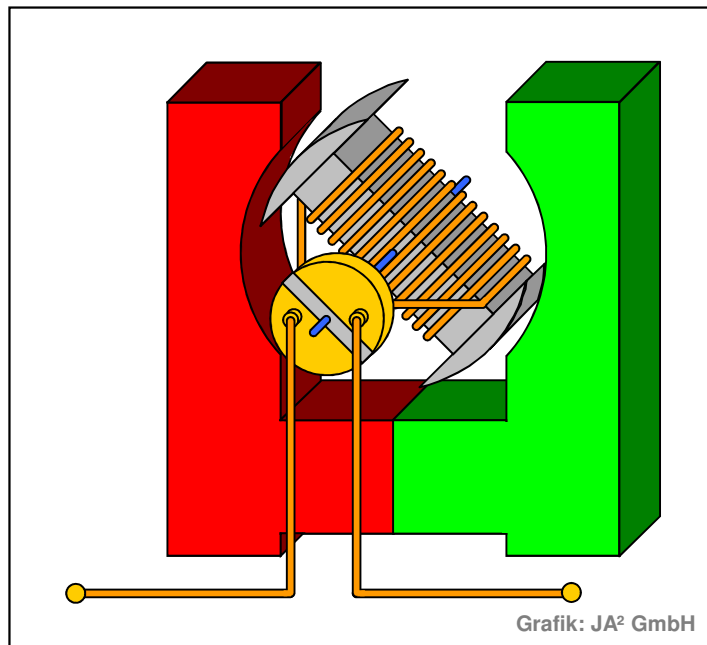


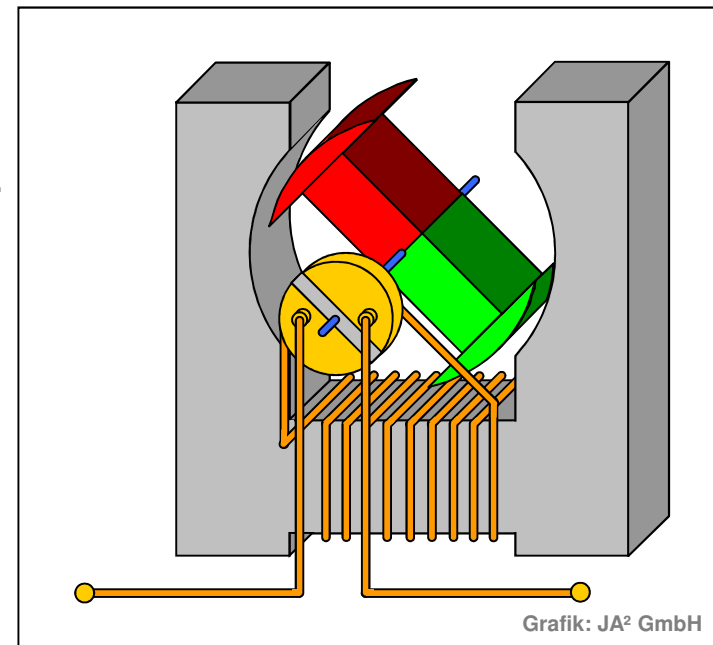
Bild: JA² GmbH

Prinzip permanent erregter Gleichstrommotor



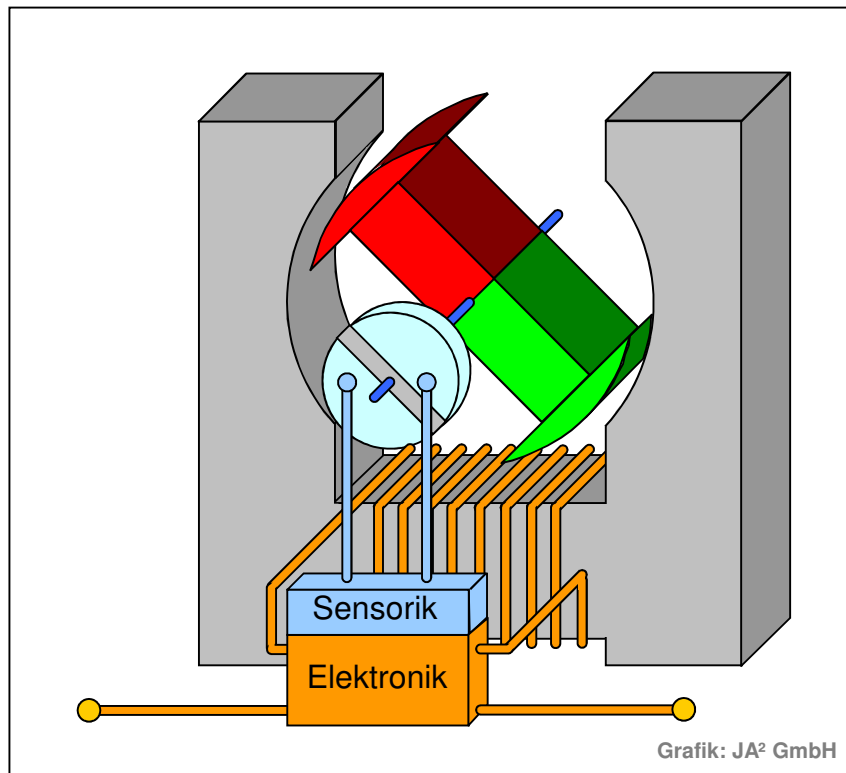
Anker fremderregt

Tausch
von Anker- u.
Ständer-
erregung



Anker permanenterregt

Prinzip permanent erregter Gleichstrommotor elektronisch kommutiert



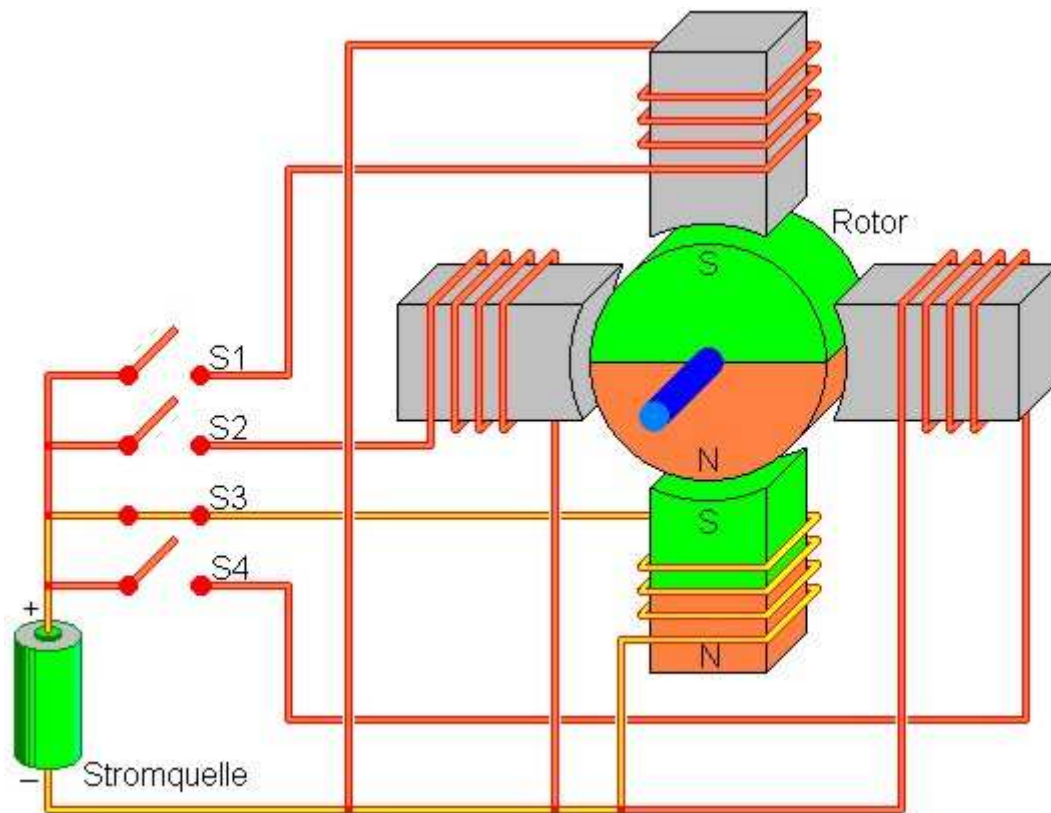
Verschiedene gebräuchliche Namen
für das gleiche Prinzip:

- elektronisch kommutierter Motor
- bürstenloser Motor
- Elektronikmotor
- EC-Motor (electronical commutated)
- brushless DC motor



Bild: Faulhaber GmbH

Prinzip permanent erregter Schrittmotor



Verschiedene gebräuchliche Namen
für das gleiche Prinzip:

- Schrittmotor
- Stepper
- Stepper Motor
- Hybrid Schrittmotor

Verschiedene Ansteuerverfahren:

- Vollschritt
- Halbschritt
- Microstep

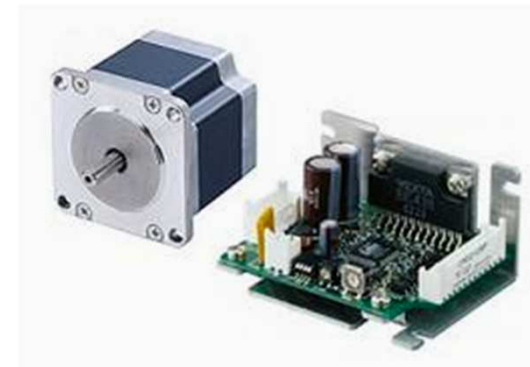
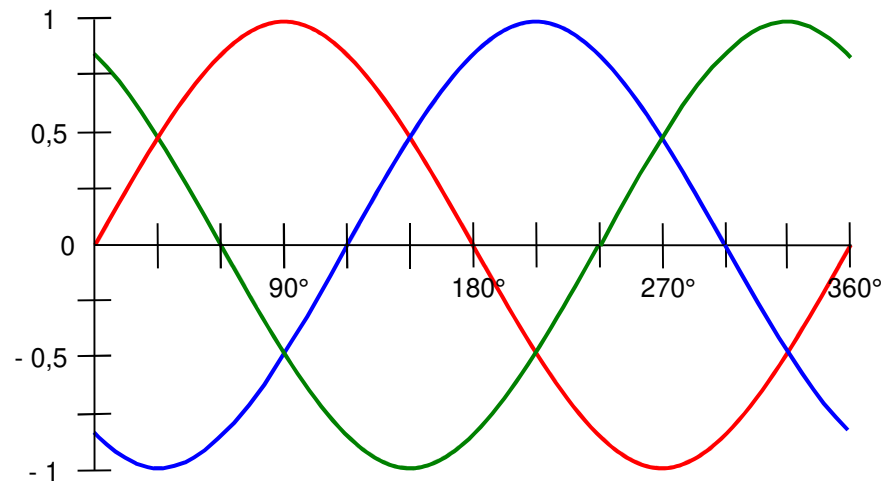


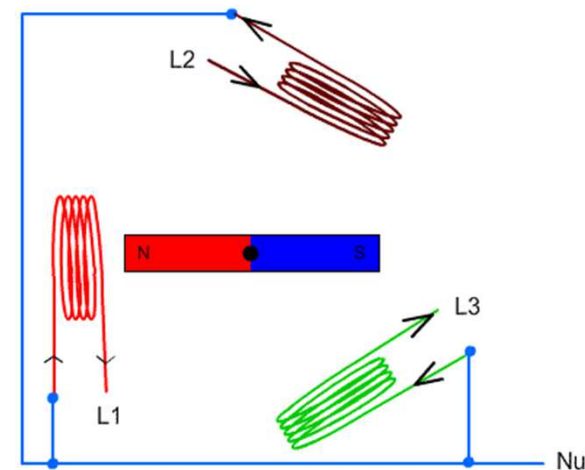
Bild: Orientalmotor GmbH

Prinzip Drehstromerzeugung

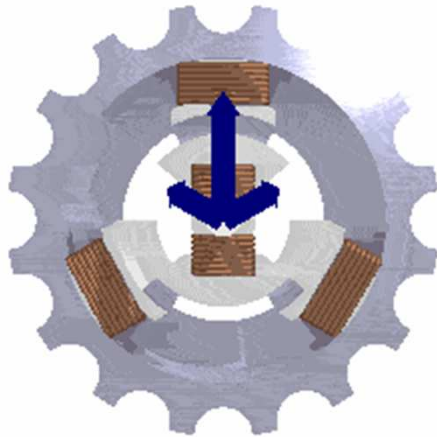
Phasen-Spannungen U_p über Phasenwinkel φ



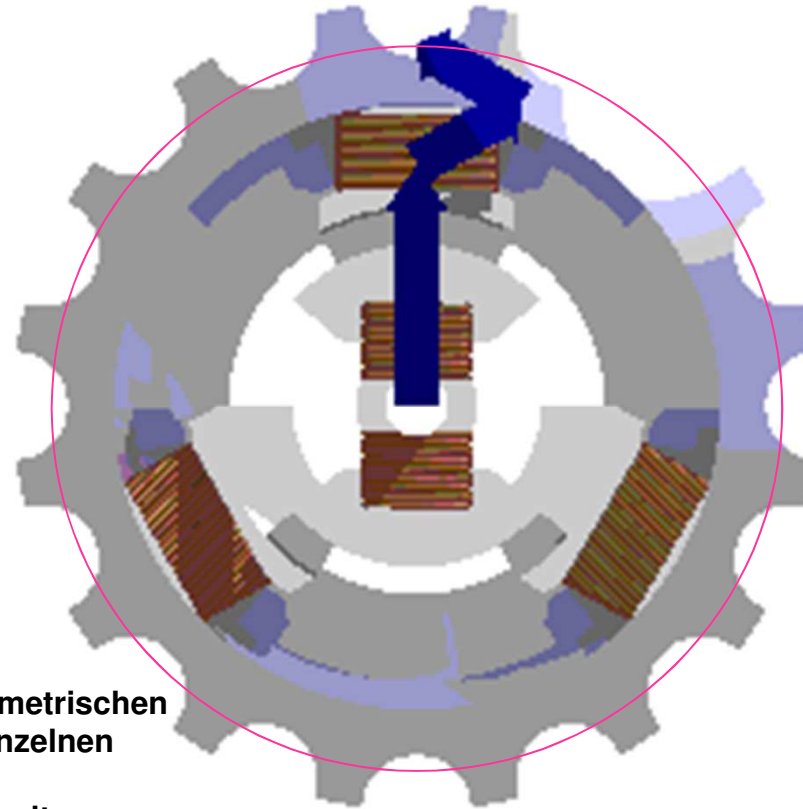
Grafik: JA² GmbH



Prinzip Elektromotor mit Drehstromwicklung Drehfelderzeugung



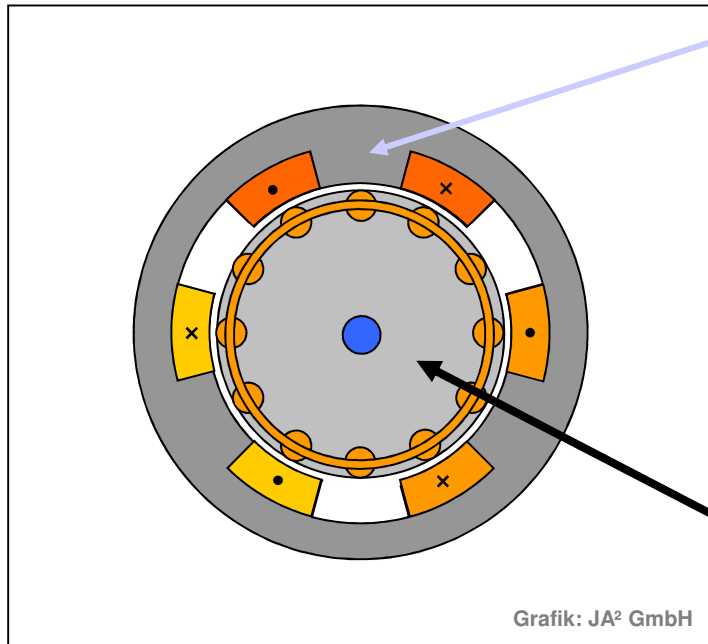
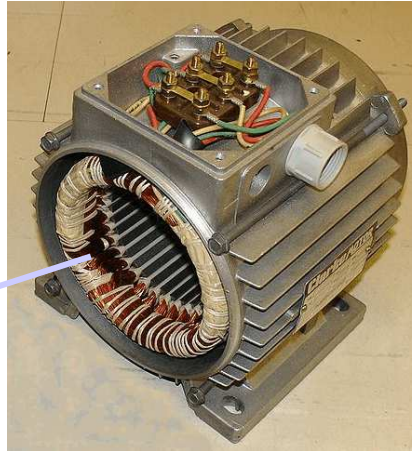
Abfolge und Größenänderung
der phasenversetzten
Magnetfelder der Einzelspulen



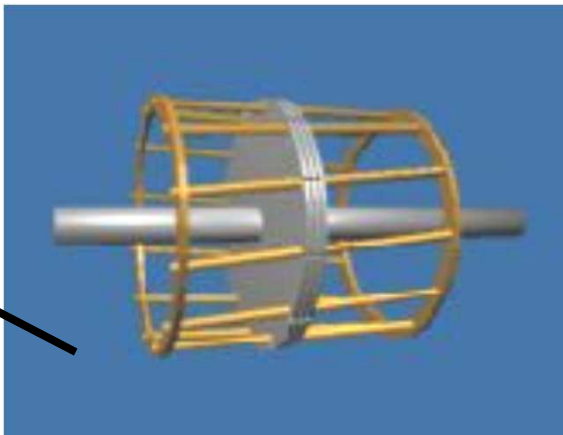
Darstellung der geometrischen
Addition von den einzelnen
Magnetfeldern.
Die äußerste Zeigerspitze
beschreibt eine umlaufende
exakte Kreisbahn.

Prinzip Drehstrom-Asynchronmaschine

Stator mit Wicklungen



Rotor als Käfigläufer ausgebildet (Kurzschlussläufer)



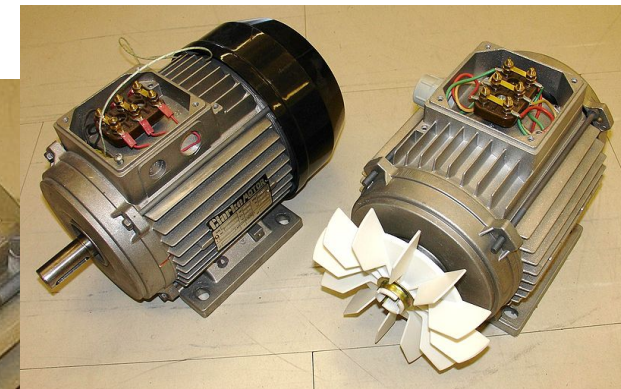
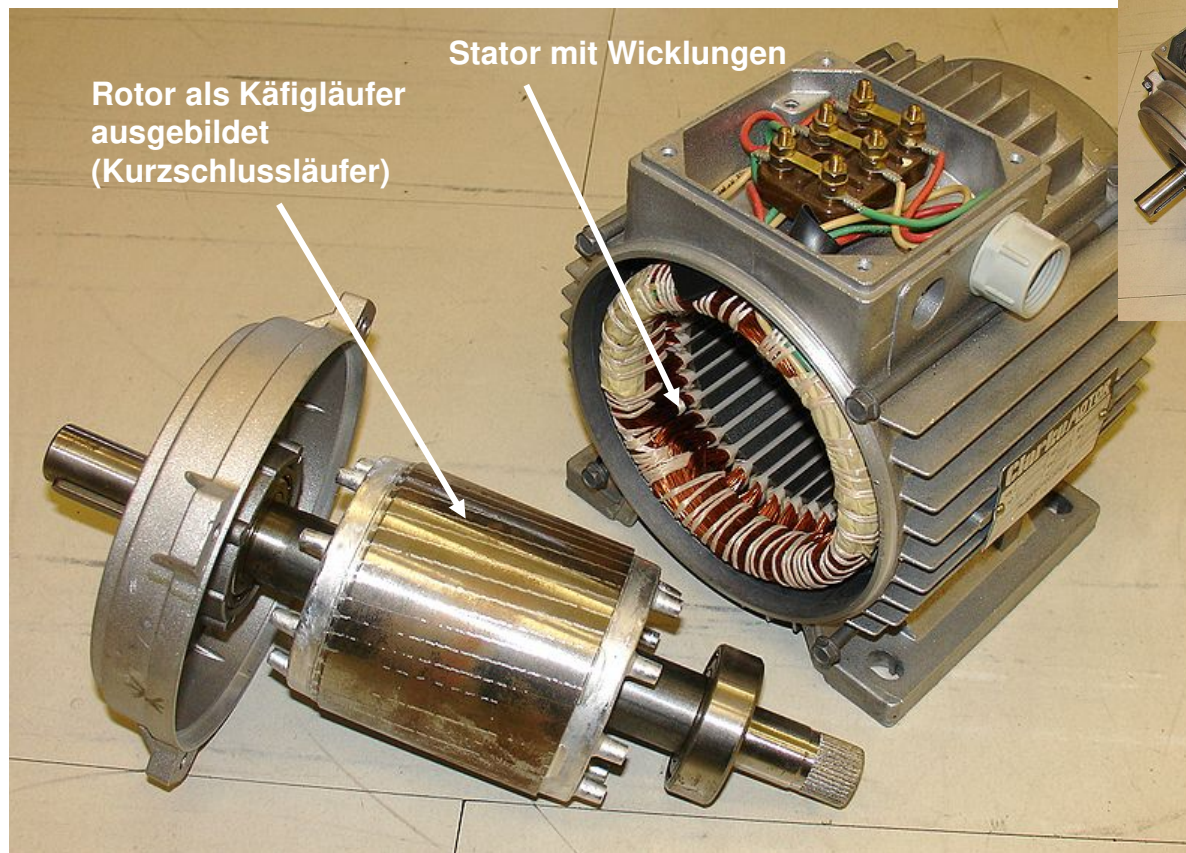
Verschiedene
gebräuchliche Namen für
das gleiche Prinzip:

- Drehstrommotor
- Asynchronmotor
- Normmotor
- IEC-Normmotor
- Induktionsmaschine
- Käfigläufermotor
- Kurzschlussläufer Motor

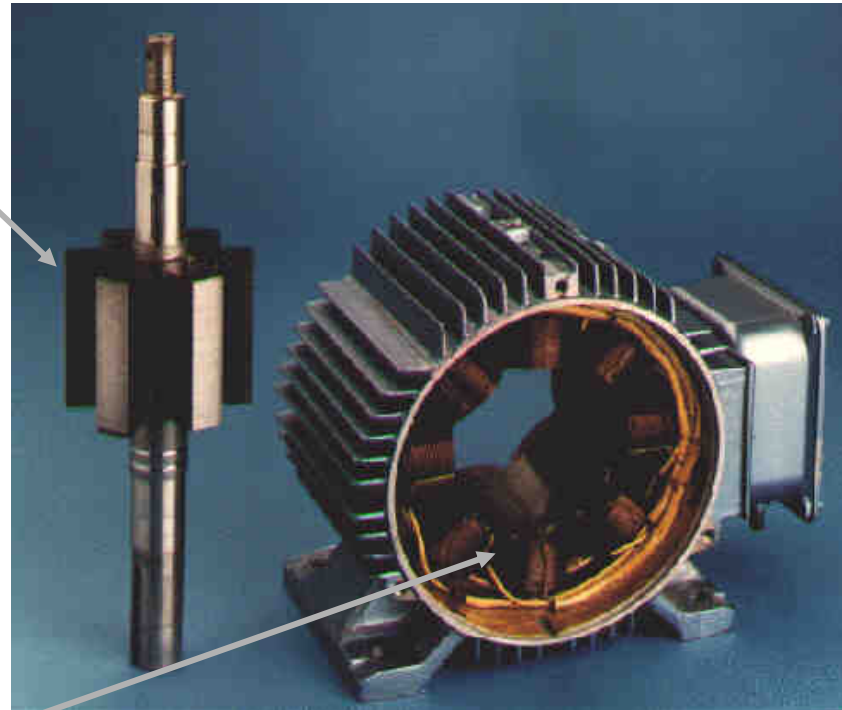
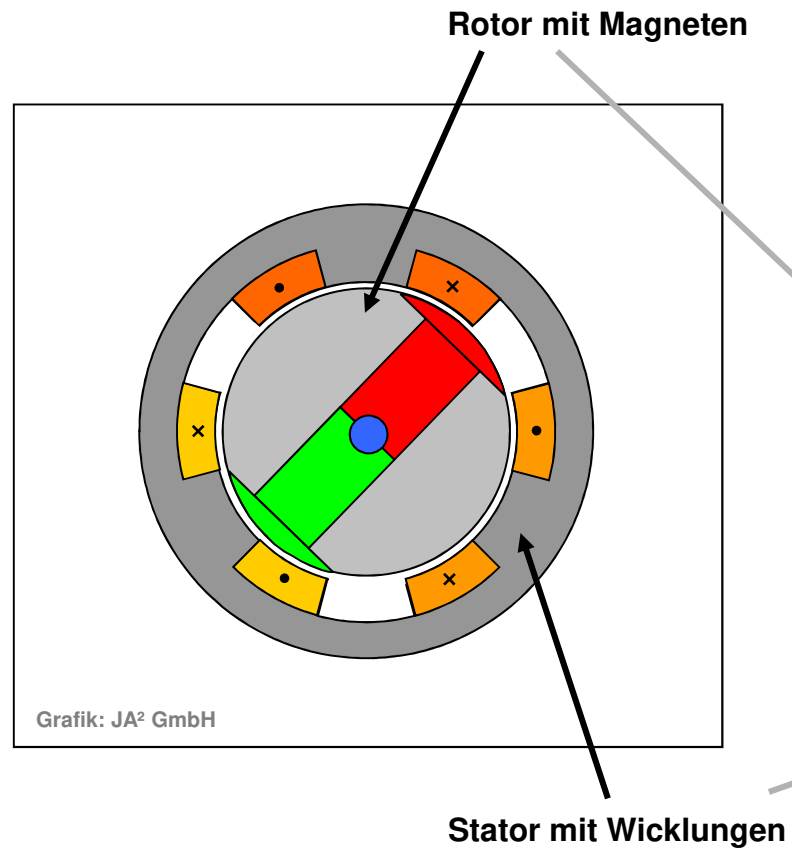


Bild: Nord GmbH

Technische Ausführung Drehstrom-Asynchronmaschine



Prinzip Drehstrom-Synchronmaschine



Prinzip und technische Ausführung AC-Servoantrieb

Verschiedene gebräuchliche
Namen für das gleiche Prinzip:

- AC-Servomotor
- bürstenloser Servomotor
- Synchron Servomotor

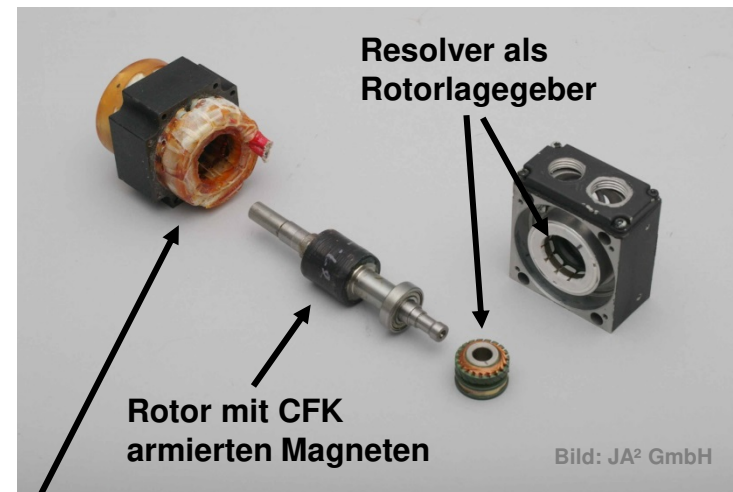
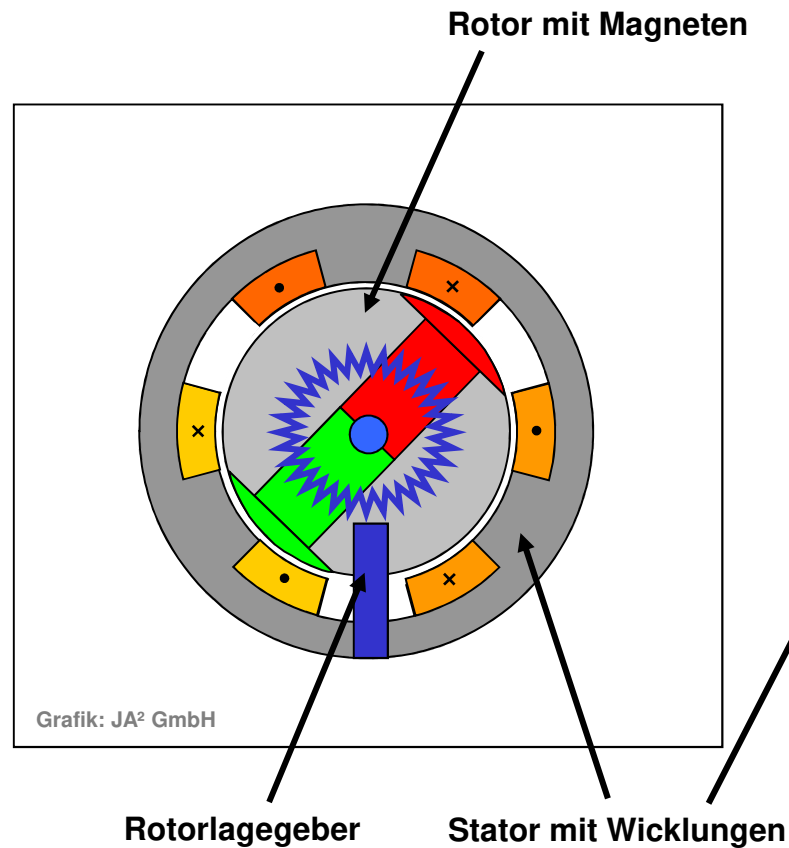
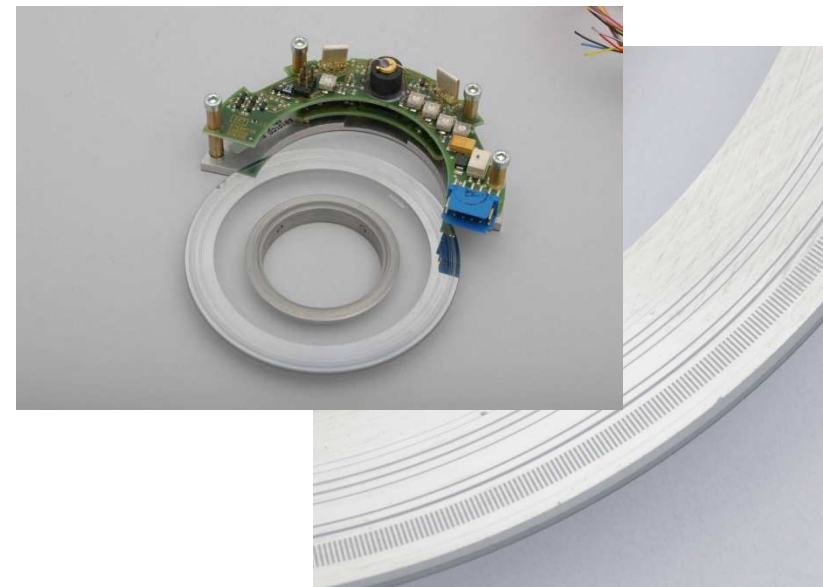
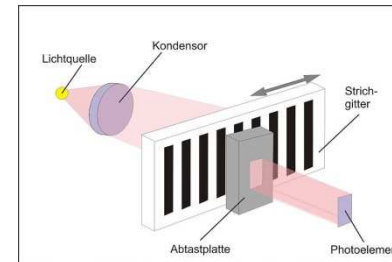


Bild: Baldor GmbH

Gebräuchliche inkrementelle Rotorlagegeber



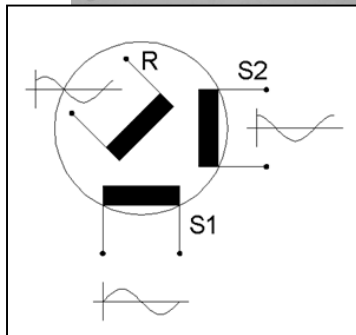
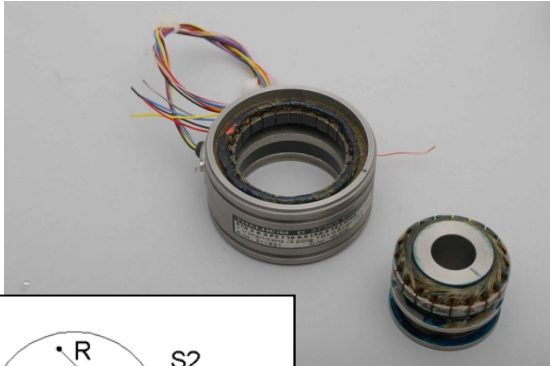
Codierscheibe eines optischen Inkrementalgebers mit Kommutierungs-, Inkrementalgeber- und Nullpunktspur (von innen nach außen)



optischer Inkrementalgeber hochauflösend

Bilder: JA² GmbH

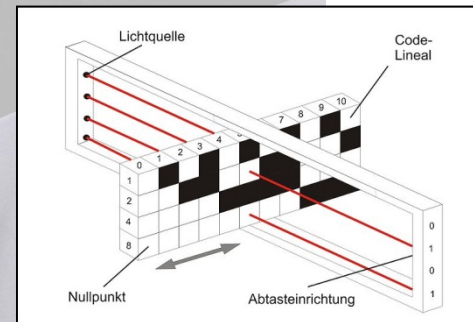
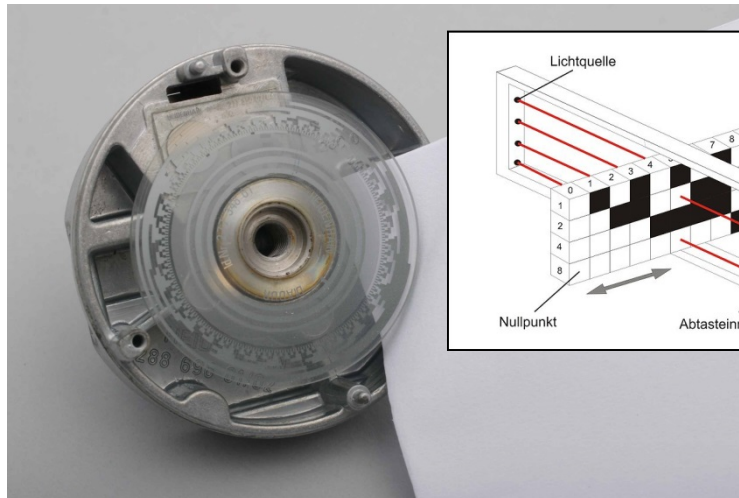
Gebräuchliche absolute Rotorlagegeber



Resolver singleturn



**magnetischer
Absolutgeber
multiturn**



**optischer
Absolutgeber
singleturn**

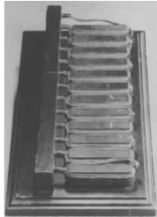
Bilder: JA² GmbH

Nun zum Linearmotor!

Meilensteine der industriellen Markteinführung von Linearmotoren und deren Stammbaum

Meilensteine der industriellen Markteinführung von Linearmotoren

Erstes veröffentlichtes Foto eines Linearmotors!



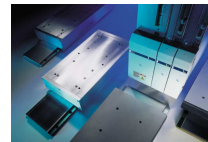
1845

Mannesmann-DEMAG-Fördertechnik stellt eine Baureihe von tubularen u. flachen Asynchronelektromotoren vor!
Anwendung: Fördertechnik



1980

Siemens u. Indramat stellen Linearmotor-Baureihen mit flachen Synchron- und Asynchronmotorsystemen vor!
Anwendung: Werkzeugmaschinen



1992

Die ersten tubularen linearen Synchronmotoren werden von Oswald und Indramat vorgestellt!
Anwendung: Textilmaschinen



1993

LinMot (CH) und LinearDrives (GB) stellen Linearmotor-Baureihen mit kleinen tubularen Synchronmotoren und integrierter Wegmessensorik vor!
Anwendung: Handhabungstechnik



1997

heute



Erste Wechselrichter in Thyristortechnik!

1968

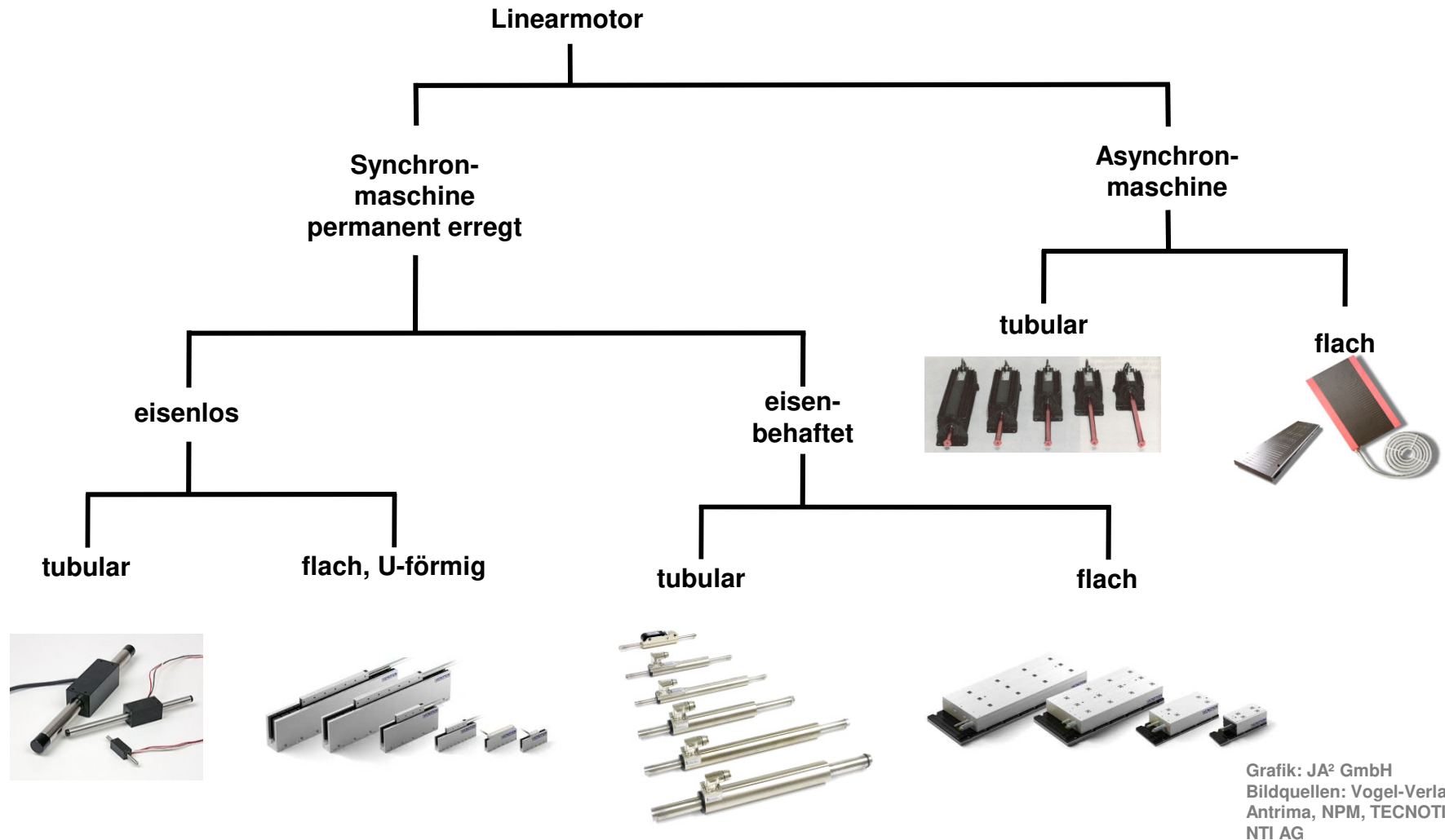


Kostengünstige Hochleistungs-Magnetwerkstoffe aus NbFeB!

1985

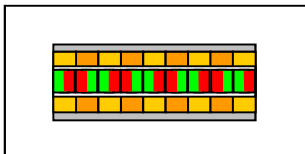
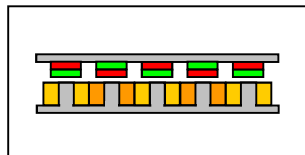
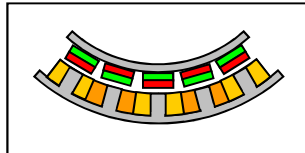
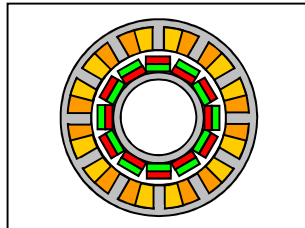
Grafik: JA² GmbH
Bildquellen: Vogel-Verlag, Danfoss, Copley, NTI AG, Oswald, Indramat

Stammbaum der Linearmotoren

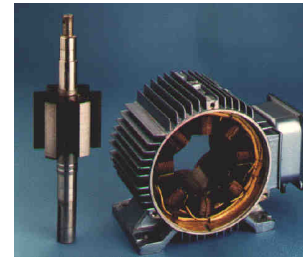


Vom rotativen Motor zum Linearmotor

Von der Drehstrom-Synchronmaschine zum flachen und runden Linearmotor



Grafiken: JA² GmbH



rotativer
Synchronmotor



- aufschneiden
- in die Fläche legen



flacher Linearmotor



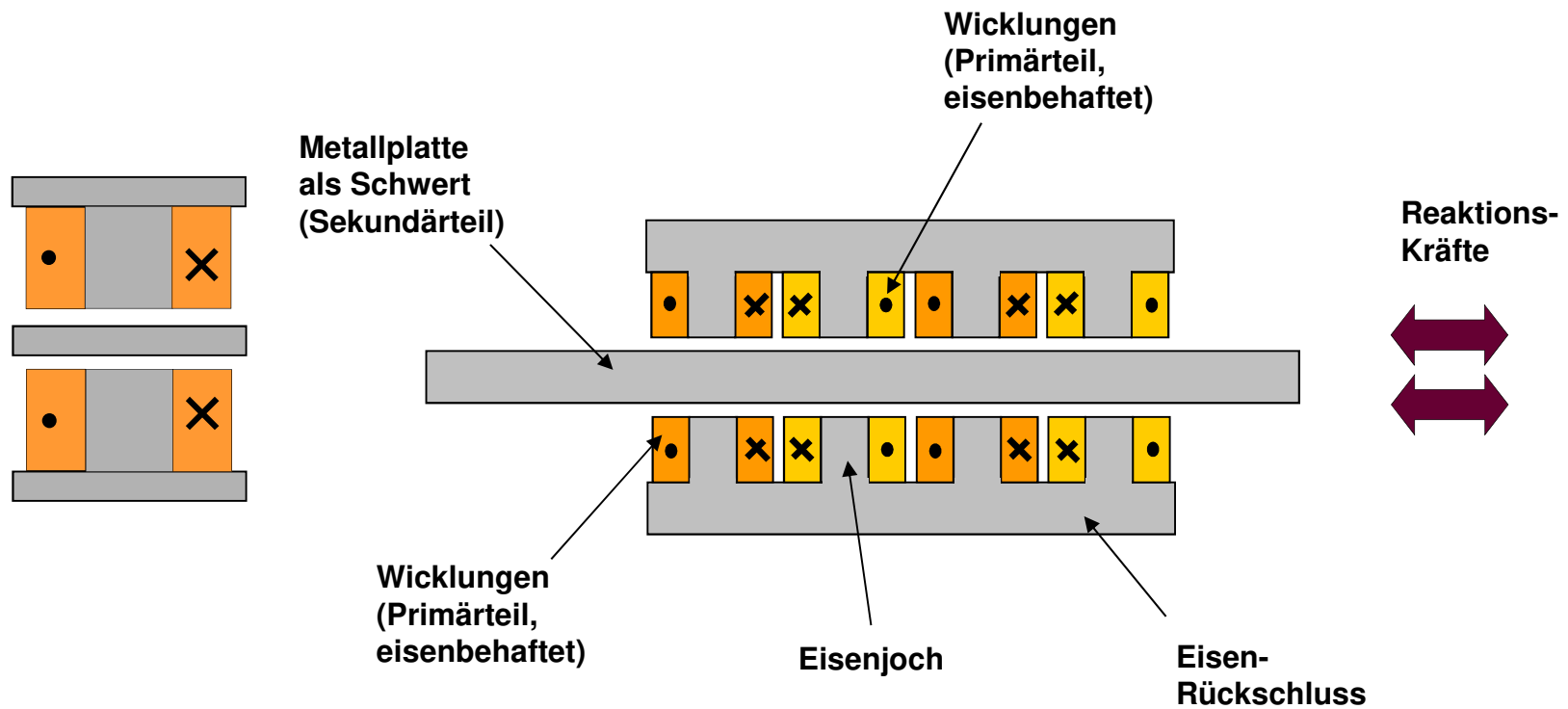
- kippen
- ineinander schieben



tubularer
Linearmotor

**Gebräuchliche Wirkprinzipien,
technischer Aufbau,
industrielle Umsetzung
und
typische Anwendungen von
Linearmotoren**

Prinzip Linearmotor Bauform Asynchronmaschine flach, Doppelkamm



Grafik: JA² GmbH

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Asynchronmaschine flach, Doppelkamm

Positiv:

- sehr hohe Vorschubkräfte
- sehr robust
- kleiner Luftspalt

Negativ:

- große magnetische Anziehungskräfte
- schlechter Wirkungsgrad
- offene Bauform



Wicklungen
(Primärteil)

pass. Sekundärteil
mit 3 Schwerter



Bausatzmotor

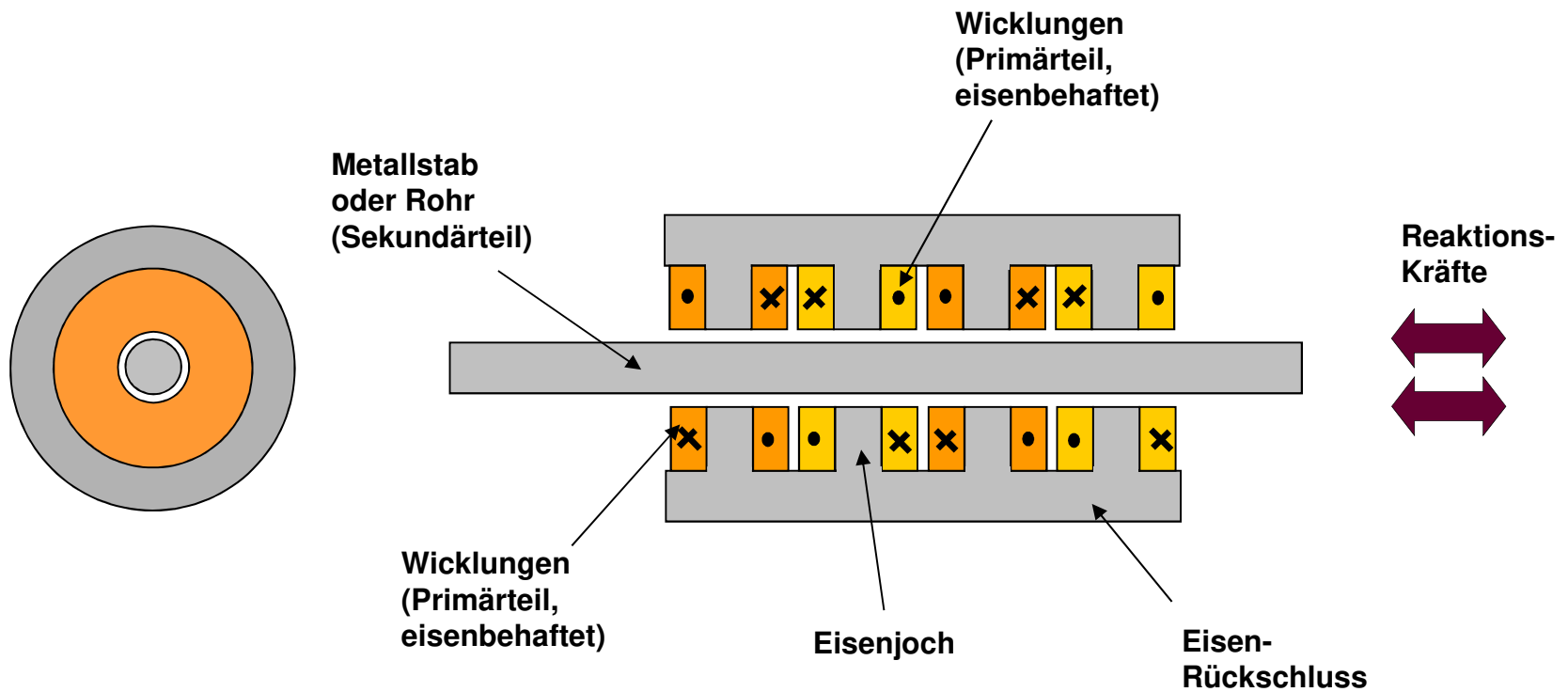
Bilder: ANTRIMA GmbH
u. coastersandmore.de

Typ. Anwendung Linearmotor Bauform Asynchronmaschine flach, Doppelkamm



Bilder: coastersandmore.de

Prinzip Linearmotor Bauform Asynchronmaschine tubular



Grafik: JA² GmbH

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Asynchronmaschine tubular

Positiv:

- sehr hohe Vorschubkräfte
- sehr robust
- kleiner Luftspalt

Negativ:

- große magnetische Anziehungskräfte
- schlechter Wirkungsgrad
- offene Bauform

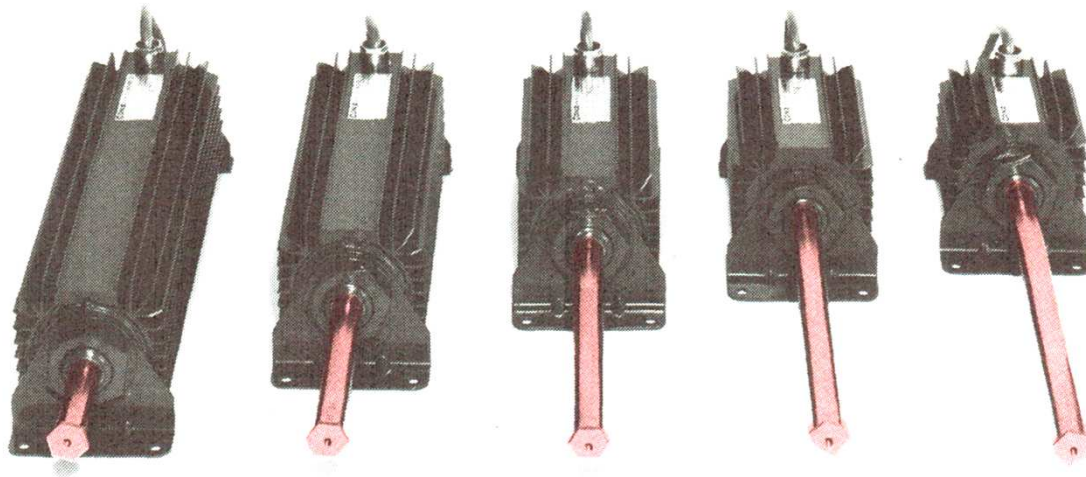
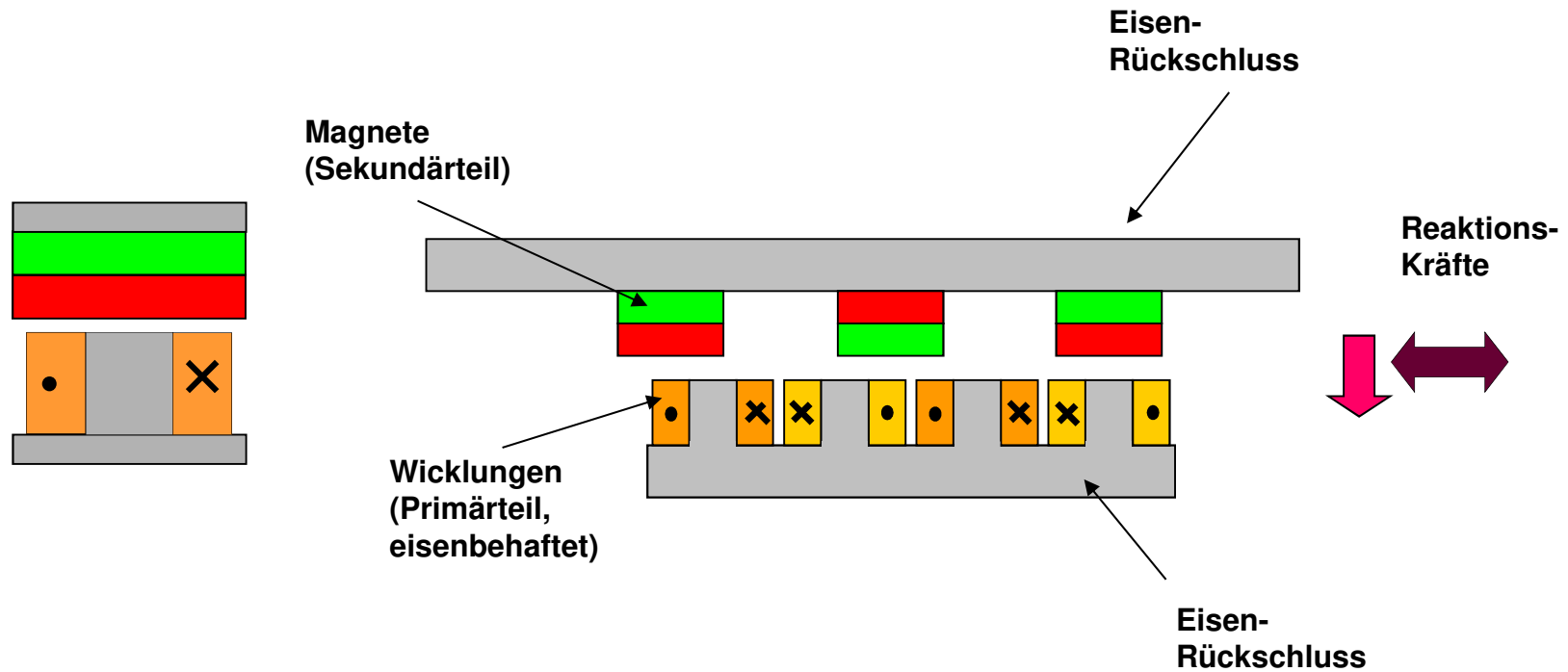


Bild: Vogel Verlag

**Typ. Anwendung Linearmotor
Bauform Asynchronmaschine
tubular, eisenlos**

**Es liegen keine Daten und Fotos von
technischen Ausführungen vor!**

Prinzip Linearmotor Bauform Synchronmaschine flach, eisenbehaftet



Grafik: JA² GmbH

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Synchronmaschine flach, eisenbehaftet

Wegmesssensorik
(Inkrementalgeber)

Wicklungen
(Primärteil)

Lagerung

Kabelschlepp

Bild: Parker GmbH

Magnete
(Sekundärteil)

Positiv:

- sehr hohe Vorschubkräfte
- guter Wirkungsgrad
- kleiner Luftspalt
- gute thermische Kapazität
- hohe Kraftdichte

Negativ:

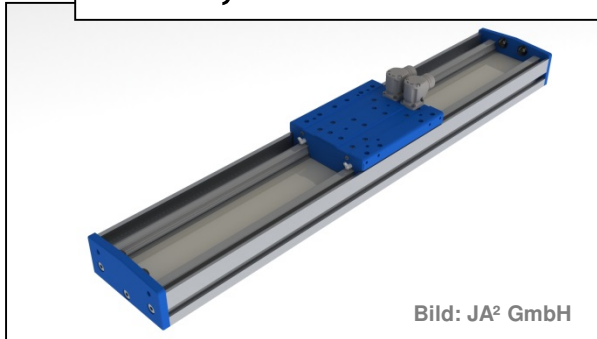
- große magnetische Anziehungskräfte
(bis 5fach der Nutzkraft)
- starkes Cogging (Polfähigkeit)
- offene Bauform



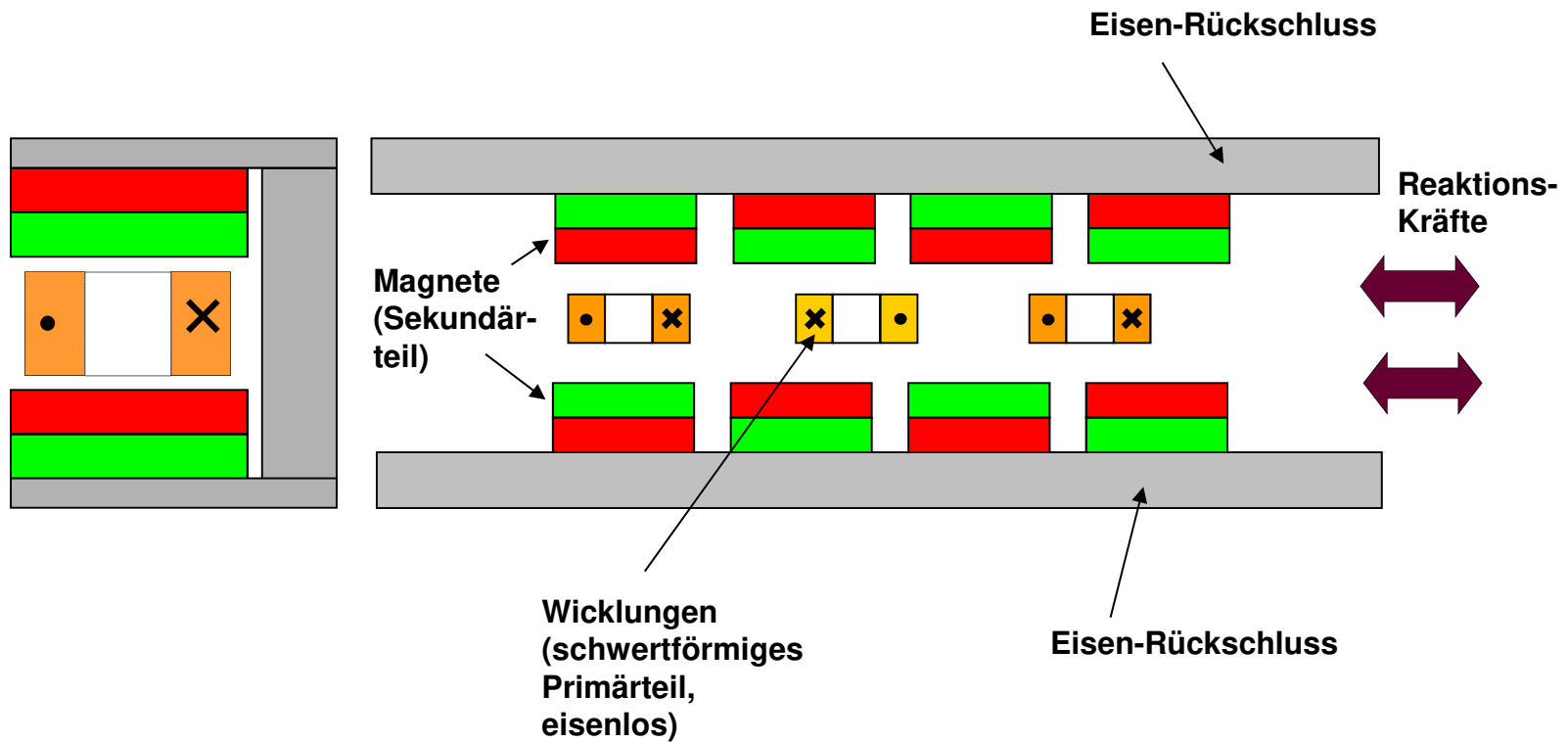
Bausatzmotor

Bild: TECNOTION B.V.

Typ. Anwendung Linearmotor Bauform Synchronmaschine flach, eisenbehaftet



Prinzip Linearmotor Bauform Synchronmaschine U-förmig, eisenlos



Grafik: JA² GmbH

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Synchronmaschine U-förmig, eisenlos

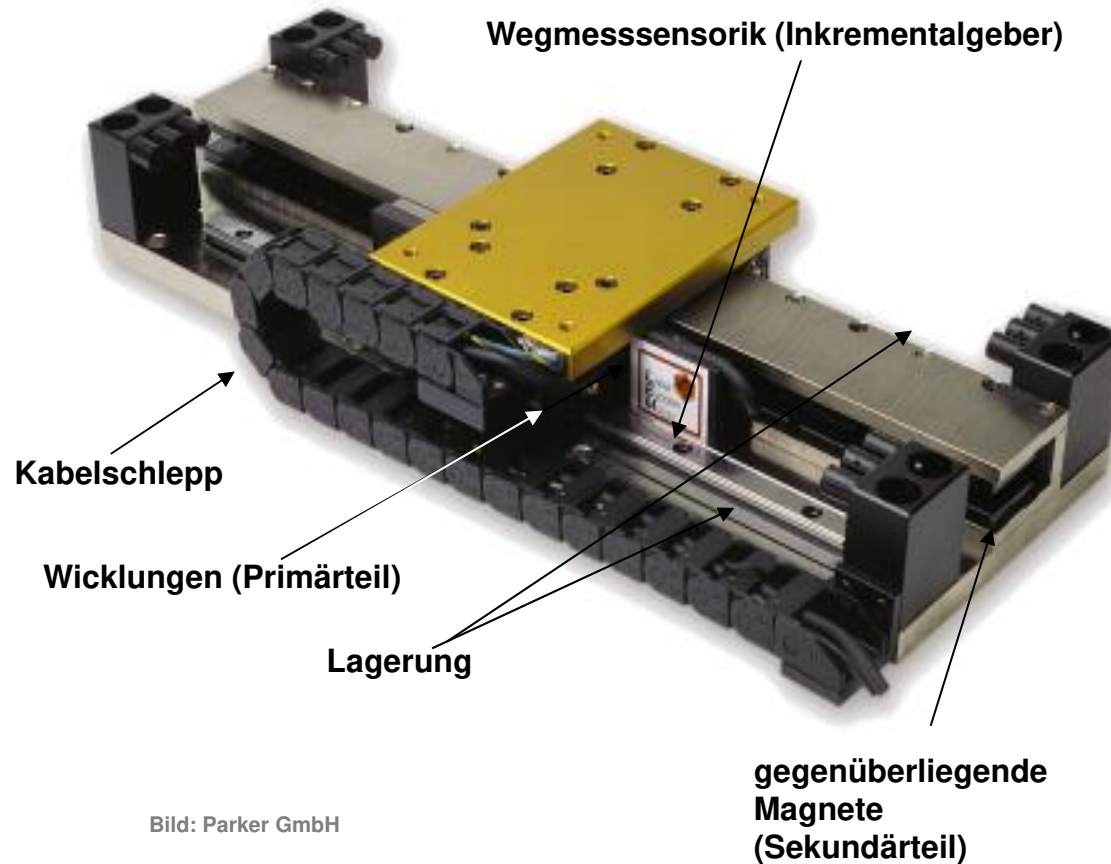


Bild: Parker GmbH

Positiv:

- keine Anziehungskräfte
- geringe bewegte Massen
- sehr hohe Beschleunigungen
- kein Cogging (Polfähigkeit)
- extrem guter Gleichlauf

Negativ:

- geringe thermische Kapazität
- hohe Kosten für Magnete
- offene Bauform
- mittlerer Wirkungsgrad



Bausatzmotor

Bild: TECNOTION B.V.

Typische Anwendung Linearmotor Bauform Synchronmaschine U-förmig, eisenlos

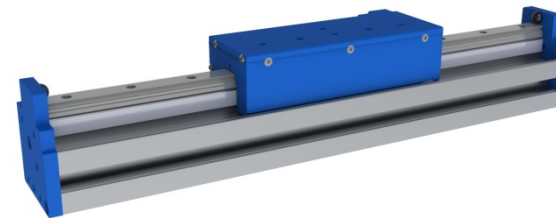
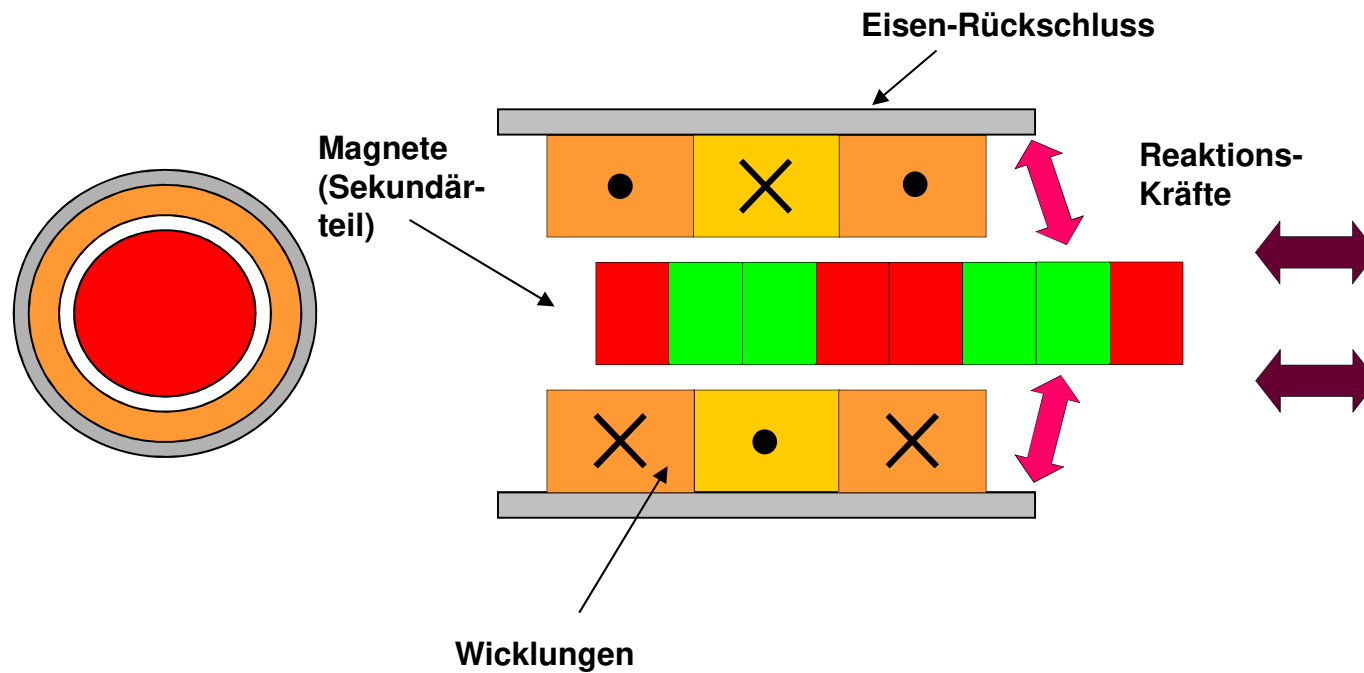


Bild: JA² GmbH

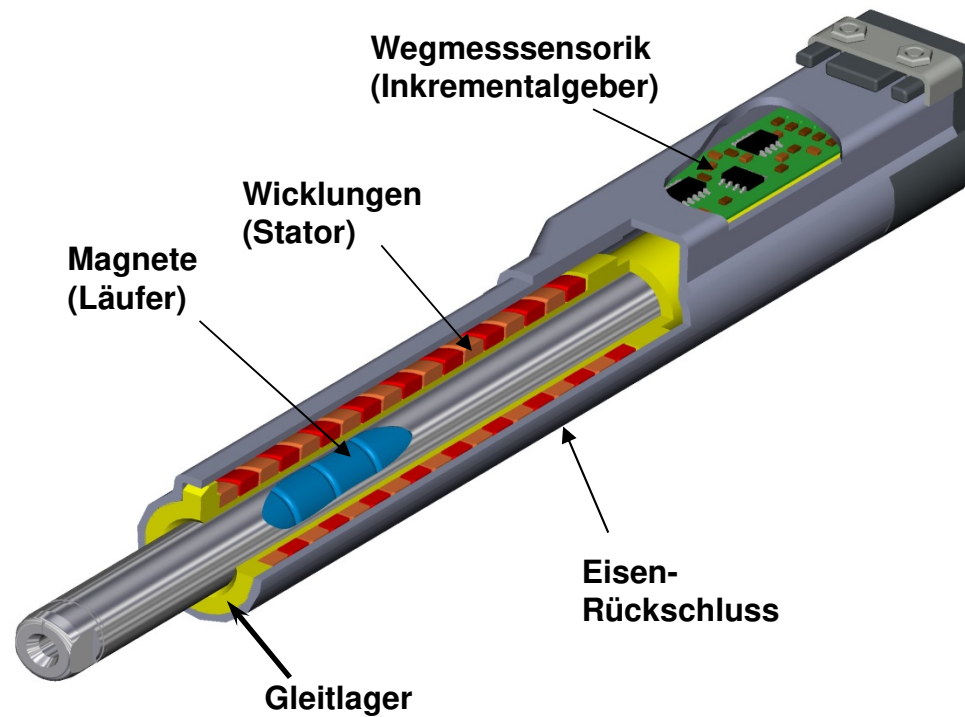


Prinzip Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenbehaftet



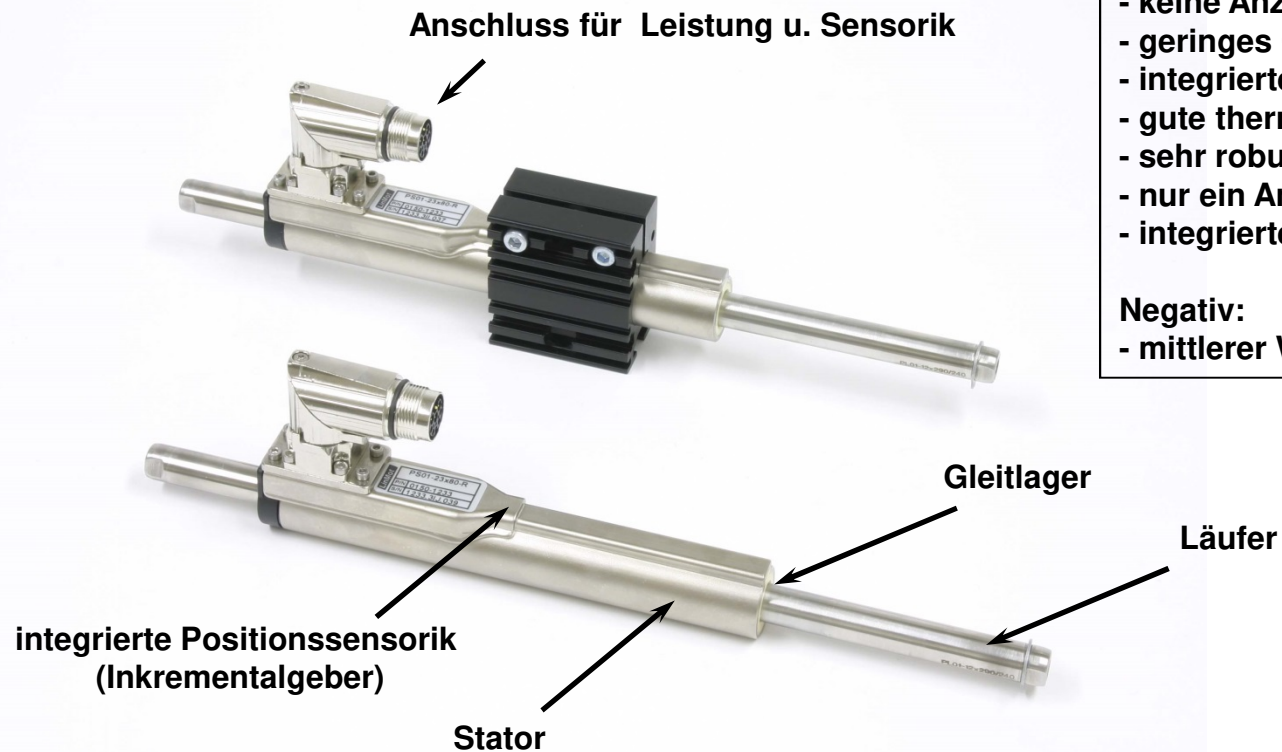
Grafik: JA² GmbH

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenbehaftet



Grafik: NTI AG LinMot

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenbehafte



Positiv:

- keine Anziehungskräfte
- geringes Cogging (Polfähigkeit)
- integrierte Sensorik
- gute thermische Kapazität
- sehr robuste gekapselte Bauform
- nur ein Anschluss
- integriertes Lager

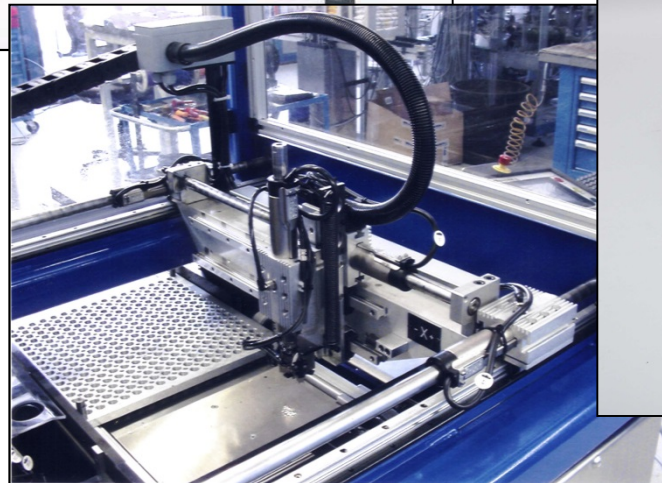
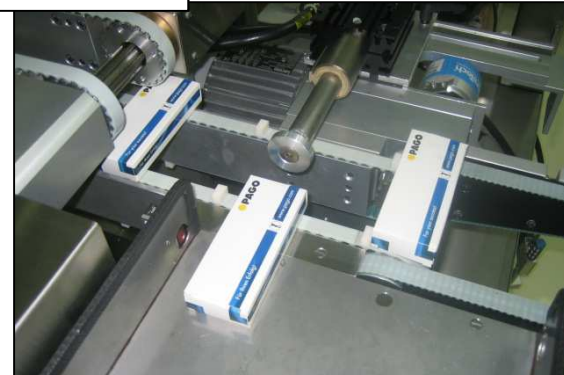
Negativ:

- mittlerer Wirkungsgrad

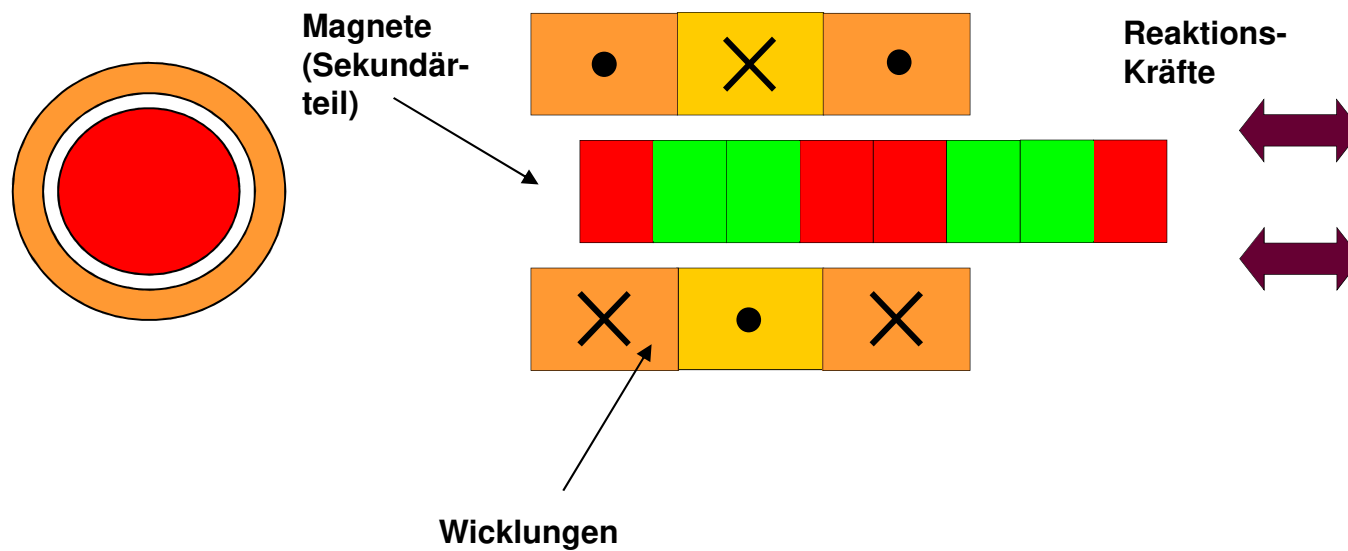
Bild: NTI AG LinMot

Typische Anwendung Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenbehaftet

Bilder: JA² GmbH u. NTI AG LinMot

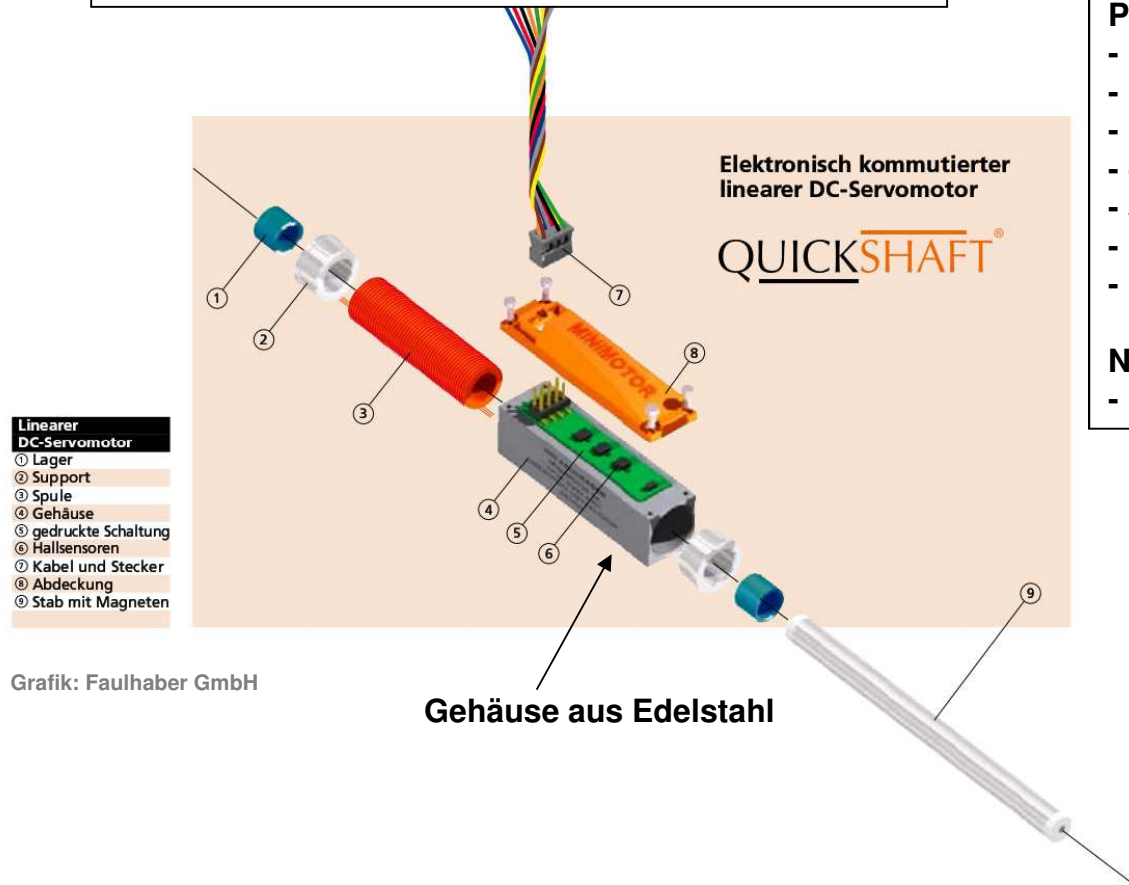


Prinzip Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenlos



Grafik: JA² GmbH

Techn. Ausführung Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenlos



Grafik: Faulhaber GmbH

Positiv:

- keine Anziehungskräfte
- kein Cogging
- integrierte Sensorik
- gute thermische Kapazität
- sehr robuste gekapselte Bauform
- nur ein Anschluss
- integriertes Lager

Negativ:

- niedriger Wirkungsgrad

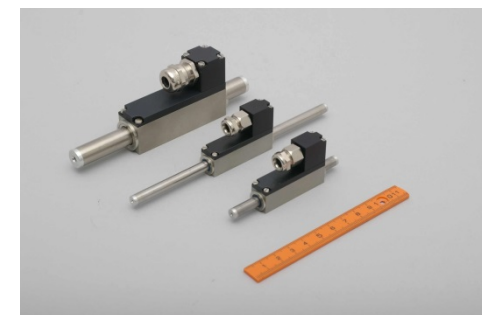


Bild: JA² GmbH

Typische Anwendung Linearmotor Bauform Synchronmaschine tubular, eisenlos

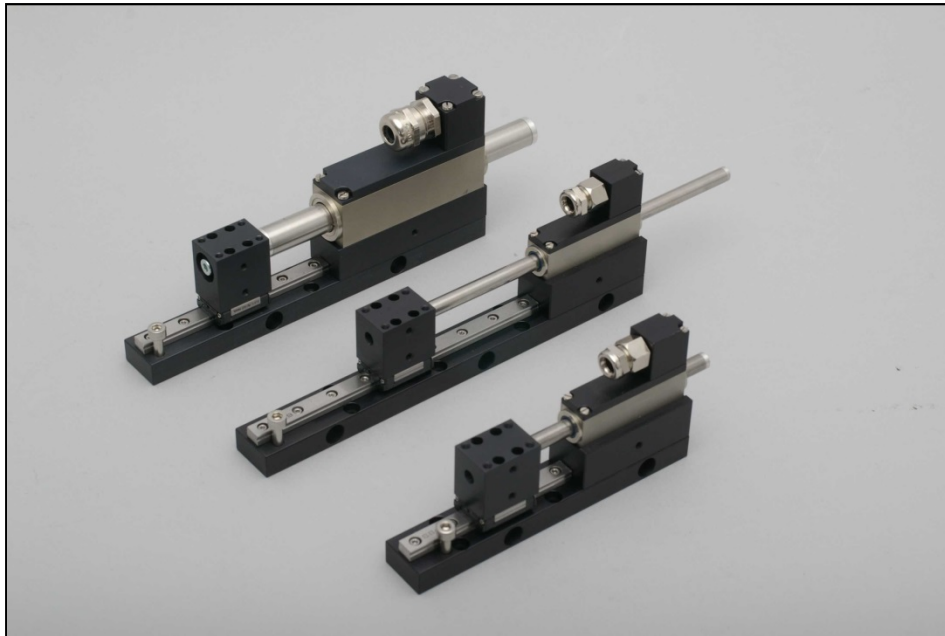
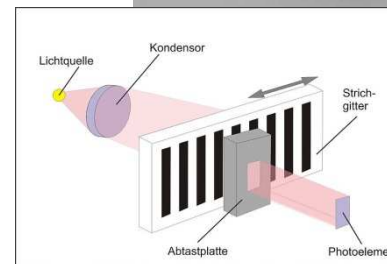
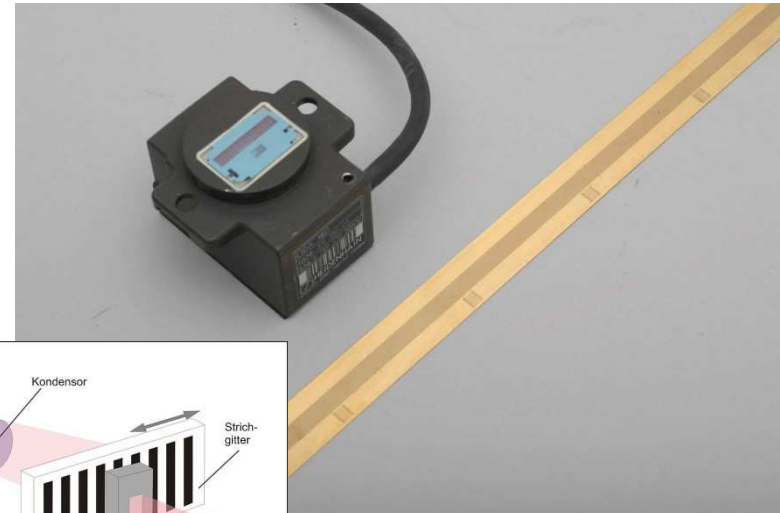


Bild: JA² GmbH

Gebräuchliche Wegsensoren für Linearantriebe



**Hallsensoren zur Abtastung
der Antriebsmagnete**



**optischer Inkrementalgeber
reflexiv hochauflösend**



Bild: Siko GmbH



**magnetischer
Inkrementalgeber**

Bilder: JA² GmbH

Vor- und Nachteile der Linearmotortechnik

Substitutionspotential der Linearmotortechnik

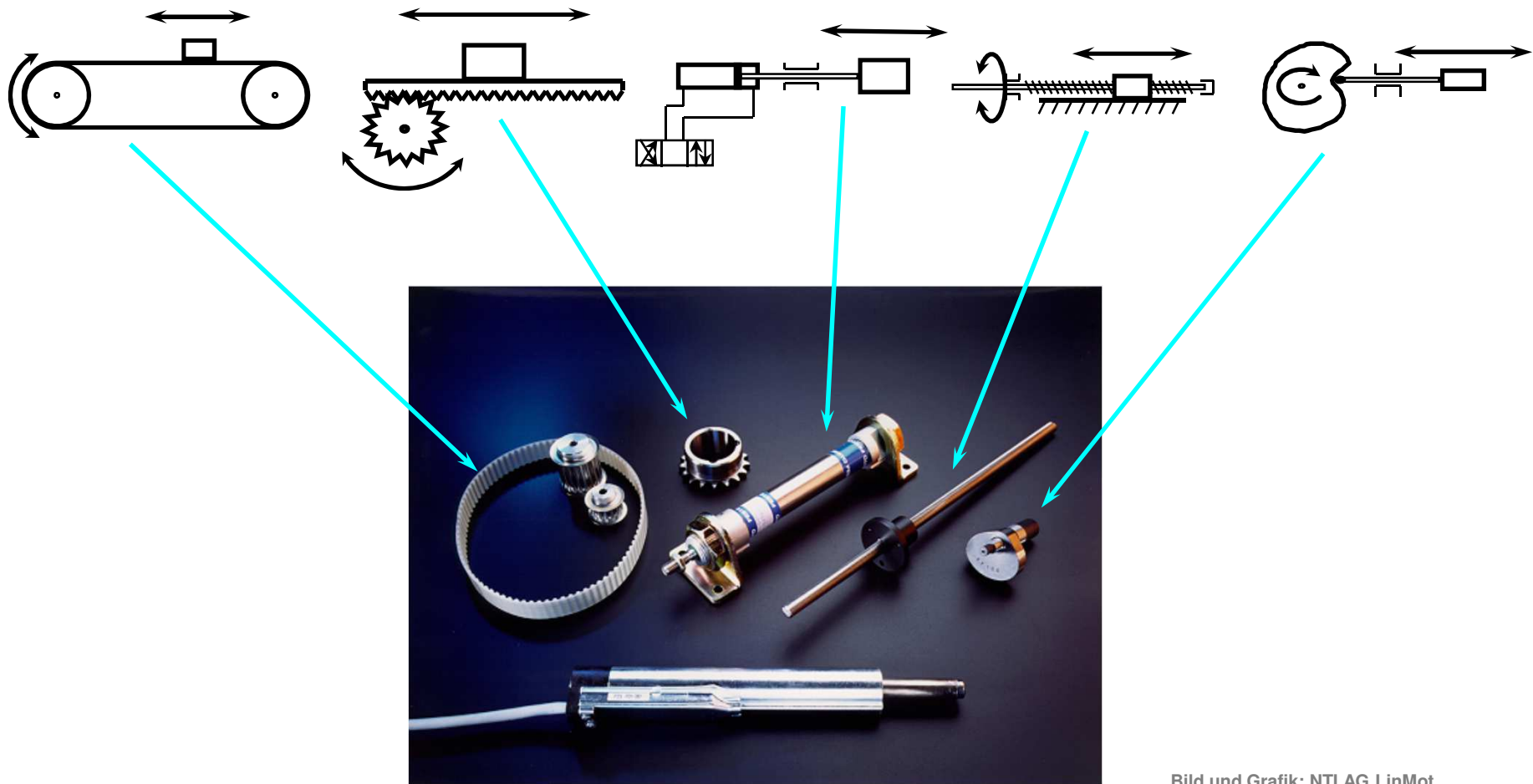


Bild und Grafik: NTI AG LinMot

Vor- und Nachteile der Linearmotortechnik

Positiv:

- Direktantrieb ohne Spiel und Torsion
- teilweise extrem guter Gleichlauf
- höchste Dynamik bei sehr guter Positioniergenauigkeit
- steife Regelung
- teilweise robuste Bauform
- teilweise einfaches Konstruktionselement
- geringere mechanische Komponenten
- guter Wirkungsgrad
- Verschleißfreiheit

Negativ:

- Kosten steigen mit der Hublänge proportional an
- sehr steife Mechanikanbindungen erforderlich
- teilweise nicht robuste offene Bauform
- empfindlich gegen Verschmutzung durch Fe-Staub



© JUNG ANTRIEBSTECHNIK U. AUTOMATION GMBH

Die Weitergabe oder Kopie ist ohne unsere ausdrückliche Genehmigung
nicht gestattet!

Alle nicht angegebenen Bild- u. Grafikquellen: www.wikipedia.org