Linearmotoren, Magnetschwebetechnik und deren Anwendungen

Autor(en): **Dutoit, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **66 (1975)**

Heft 10

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915291

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Linearmotoren, Magnetschwebetechnik und deren Anwendungen [1])

621.313.282 : 621.313.333; 62-219.527

1. Der asynchrone Linearmotor (M. Jufer, Lausanne)

Zur Betrachtung der asynchronen Bauart wird das Prinzip des Linearmotors als Abwicklung eines in einer Meridianebene aufgeschnittenen konventionellen Asynchronmotors kurz geschildert. Der induzierte Wicklungsteil wird bei den Anwendungen meistens beträchtlich länger als der mit Energie gespiesene induzierende Teil. Jeder der beiden Wicklungsteile kann einseitig oder beidseitig gegenüber dem anderen Teil ausgeführt werden. Dazu gibt es noch (nur für kurze Bewegungsstrecken) eine rohrartige Konstruktion, die in bezug auf die anderen Bauarten eine grössere spezifische Leistung aufweist. Zwischen beiden Teilen entstehen magnetische Zugkräfte, sofern der induzierte Teil Eisenteile trägt. Diese Zugkräfte müssen durch eine mechanische Führung aufgenommen werden. Eisenlose induzierte Teile werden häufig als Aluminiumprofile ausgebildet, so dass diese Zugkräfte nicht auftreten. Bei einseitigen Ausführungen treten dagegen Abstosskräfte auf, die von der Vortriebsgeschwindigkeit abhängig sind. Induzierte Teile mit Aluminium und Eisenrückschluss für den magnetischen Fluss stehen unter gleichzeitiger Wirkung der Anzugs- und Abstosskräfte, die sich nur bei einem bestimmten Schlupfwert genau aufheben. Im Stillstand überwiegen die Abstosskräfte, hingegen sind die Anzugskräfte in der Nähe der synchronen Geschwindigkeit vorherrschend. Wird der induzierte Teil aus massivem Eisen hergestellt, dann entsteht über den ganzen Schlupfbereich eine überwiegende Anzugskraft.

Die Ausführung des induzierten Teiles aus Eisen mit Käfigwicklung ergibt hohe Anzugskräfte. Aus mechanischen Gründen weist ein Linearmotor praktisch immer einen ungewöhnlich grossen Luftspalt auf, der den Leistungsfaktor schwächt. Deshalb kann der Wirkungsgrad gleiche Werte wie bei den konventionellen Motoren nicht erreichen.

Allgemein betrachtet weist der Linearmotor ähnliche Eigenschaften auf wie diejenigen der rotierenden Maschinen. Er kann bei positivem Schlupf zwischen 0 und 1 als Motor, zwischen 1 und ∞ (Lauf gegen das Wanderfeld) als Bremse, und bei negativem Schlupf als asynchroner Generator betrieben werden.

Das unterschiedlichste Merkmal zwischen linearen und rotierenden Motoren (auch bei Synchron- und Gleichstrom-Bauarten) liegt in der Verzerrung der Luftspalt-Feldstärke an den Enden des kurzen Teiles. In bezug auf die Fortbewegungsrichtung wird an der Schlitteneinlaufkante das Feld geschwächt und bei der Schlittenablaufkante verstärkt. Dies erklärt sich dadurch, dass beim Einlauf des induzierten Teiles in den Schlitten der Fluss aufgebaut und beim Ablauf abgebaut werden muss. Der Flussaufbau vermindert in erster Linie die Energieübertragung der Primär- auf die Sekundärseite; der Flussabbau beim Ablauf dagegen verursacht einen ständigen Energieverlust. Eine Verlangsamung dieser Vorgänge mittels Verlängerung des primärseitigen Eisens, sowie auch mit Hilfe von Kompensationswicklungen, kann die sonst entstehenden Bremskräfte, wenn auch nicht die Verluste, einigermassen vermindern. Die Feldverzerrungen bei den Schlittenenden wurden durch einen während des Vortrags projizierten Film eindrucksvoll veranschaulicht.

Die Berechnung des Linearmotors bietet wegen seiner komplexen Magnetfeldgestaltung relativ grosse Schwierigkeiten. Aus der Literatur zitierte der Vortragende zwei grundsätzliche Behandlungsmethoden. Bei der Teilungsmethode werden nur die primären Polteilungen in Zonen eingeteilt, die je durch eigene Gleichungen gekennzeichnet werden (Schlitten-, Einlauf-, Auslauf- und Stirnraum-Zonen). Randbedingungen ermöglichen, die Zonen-Gleichungen untereinander zu verknüpfen. Gegenwärtig ist eine Lösung der Gleichungen nur unter Vernachlässigung der Stromverdrängung des sekundären Teiles und der tangentialen Feldkomponenten möglich. Beide Annahmen gelten nur für kleine Motoren.

Bei der Modulations-Methode wird das physikalische System durch einen unendlich langen Schlitten ersetzt, in dessen Luftspalt das magnetische Skalarpotential bei den wirklichen Schlittenabgrenzungen moduliert wird. Der somit in Axial- und Breitenrichtung der Sekundärteilebene künstlich ausgebildete Luftspalt verändert den Verlauf der Ankerrückwirkung.

Bei vielen Anwendungen ist eine Regulierung der Vortriebsgeschwindigkeit erwünscht. Dazu kann die Speisespannung allein oder die Frequenz mit simultaner proportionaler Spannungsänderung gesteuert bzw. geregelt werden.

Eine Dahlander-Schaltung des Primärteiles oder ein streckenweise wechselnder, spezifischer Widerstand des Sekundärteiles ermöglicht, eine diskrete Anzahl Geschwindigkeiten zu erhalten. Verwirklicht wurde auch ein als Wirbelstrombremse dienender, mit dem Schlitten mechanisch gekuppelter, gleichstromgespeister Elektromagnet. Schliesslich kann auch eine Impulsspeisung verwendet werden.

Der Linearmotor findet ein sehr breites Anwendungsgebiet, obschon er für jeden Einzelfall spezifisch konzipiert werden muss.

2. Der synchrone Linearmotor
(H. W. Lorenzen und W. Wild, München)

Synchrone Linearmotoren bieten gegenüber den asynchronen den Vorteil, einen höheren Leistungsfaktor erreichen zu können. Dagegen wird wegen den Feldverzerrungen an den Enden der Schlitten befürchtet, dass massive Sekundärteile d. h. massive Erregerpole mit hohen Wirbelstromverlusten behaftet sind. Lamellierte Pole werden von vorneherein als zu kostspielig betrachtet, sofern man die Anwendung des Motors als Vortriebswerk für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge in Aussicht stellt. Das Problem der Ein- und Auslauf-Wirbelstromverluste im Polteil wurde in Ermangelung bisheriger Forschungen vom Institut für elektrische Maschinen an der Technischen Universität München anhand einer Modellmaschine messtechnisch untersucht. Nachstehend seien die ersten Ergebnisse bekanntgegeben.

Wie bei der rotierenden Synchronmaschine gibt es je nach Gestaltung des Polteiles homo- und heteropolare Varianten. Die für die Untersuchung gewählte Variante ist vom Homopolartyp, weil der bewegliche Teil, hier in Form eines Polrades, keine Wicklung trägt. Der Primärteil ist doppelseitig zum Polrad angeordnet und hat die Form eines Kreissegmentes. Obwohl diese Maschine dreht, nähert sie sich mit ihrem grossen Polraddurchmesser von 2100 mm dem Lineartyp. Bei 36 Polen, einer Polteilung von 171 mm und der gewählten Betriebsfrequenz von 303 Hz ergibt sich eine Polrad-Umfangsgeschwindigkeit gegen 400 km/h. Zuerst absorbierte die Luftreibung 35 kW, und der Lärmpegel betrug 130 dB. Durch Aufschäumen der Zahnlücken mit Schaumstoff sanken die Luftreibungsverluste auf etwas mehr als 10 kW. Die Stromversorgung erforderte mehrere Umformungen, so dass die Auslegungsleistung des Versuchsmotors von 100 kW noch nicht erreicht werden konnte.

Zwecks Messung der Luftspaltfeldstärke trägt das Polrad Hall-Sonden. Ferner wird der zeitliche Verlauf des Luftspaltfeldes anhand von Meßspulen ermittelt. Bisher konnten nur die Messungen der Hall-Sonden ausgewertet werden. Aus den aufgenommenen Feldstärke-Werten (ohne Primärstrom) ist zu schliessen, dass der Einfluss der Endfelder bis ca. 10 % der Nenndrehzahl vernachlässigbar klein ist. Bei Nenndrehzahl wird das Feld an der Schlitten-Einlaufkante deutlich gedämpft. Immerhin wird der Gesamterregerfluss nur um ca. 1/3 reduziert. Der «Magnetschweif» an der Schlitten-Ablaufkante ist auch bei Nenndrehzahl kaum feststellbar.

Es wurden einige Kennlinien der Maschine aufgenommen, so die Wirbelstromverluste in Abhängigkeit der Drehzahl und bei verschiedenen Erregerströmen, die synchrone Längsreaktanz in Funktion der Drehzahl sowie die V-Kurven. Alle diese Messergebnisse haben nur vorläufigen Charakter. Eine endgültige Beurteilung der Maschine wird erst nach Umbau der Versuchsanlage möglich sein. Die Versuche zeigten ferner, dass der Wirkungsgrad der Maschine bei ca. 1/3 ihrer Nennleistung und bei Nenndrehzahl etwa 57 % beträgt.

[1]) Zusammenfassung der Vorträge und Diskussionsbeiträge an der Informationstagung des SEV vom 13. März 1975 in Bern.

Relativ gute Wirkungsgradwerte sind bei Vollast zu erwarten, insbesondere wenn die Pole nicht mehr massiv, sondern lamelliert sind. Um einen Vergleich der Wirkungsgrade zwischen synchronen und asynchronen Linearmotoren zu machen, müssen nach Umbau der Anlage weitere Messergebnisse gesammelt werden.

3. Elektromagnetische Schwebetechnik
(P. M. W. Navé, München)

Magnetische Schwebeeinrichtungen werden gegenwärtig untersucht hinsichtlich ihrer Anwendung bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen, die berührungsfrei einige Zentimeter unter der Fahrbahn «hängend» gehalten werden. Die Schwebekraft wird durch Anziehungskräfte von geregelten Elektromagneten erzeugt. Eine deutsche Arbeitsgemeinschaft ist mit der Weiterentwicklung von zwei vorgeschlagenen Magnetanordnungen beschäftigt.

a) Lotrechtes Trag- und getrennt reguliertes Seiten-Führungssystem der Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, München.
b) Kombiniertes Trag-Führungssystem der Krauss-Maffei AG, München.

Beim System a) ist der horizontalen Kraft und der vertikalen Kraft je ein Magnetband pro Fahrzeugseite zugeordnet. Beide Freiheitsgrade sind magnetisch und regelungstechnisch vollständig entkoppelt. Beim System b) sind alle Magnete in einer Ebene angeordnet, jedoch abwechselnd gegeneinander versetzt. Die Anziehungskräfte zur Schiene von zwei aufeinanderfolgenden Magneten bilden ein Parallelogramm. Durch unterschiedliche Steuerung der beiden Magnete kann eine wahlweise nach links oder rechts weisende Seitenkraftkomponente erzeugt werden. Beide Systeme sind derzeit Gegenstand eingehender systematischer Vergleichsuntersuchungen.

Um das Gewicht der Anlage, die auf dem Fahrzeug aufgebaut werden muss, möglichst klein zu halten, müssen die freien Kenngrössen sorgfältig gewählt werden. Bei vorgegebener Kraft steigt das Magnetspulengewicht mit der Quadratwurzel aus der Polbreite, während der magnetische Fluss und damit das Eisengewicht mit dem Kehrwert der Wurzel aus der Polbreite sinkt. In ähnlich approximativer Weise bekommt man den Zusammenhang zwischen der Zeitkonstante eines Magneten, die seine Regelbarkeit beeinflusst, und seiner Geometrie. Eine grosse Zeitkonstante bedeutet grosse Spannungsüberhöhungen zur Erreichung einer hohen Kraftänderungsgeschwindigkeit. Die Scheinleistung des Stromstellers sowie dessen Gewicht werden dabei beträchtlich.

Als Beispiel seien die wichtigsten Daten eines Magneten wiedergegeben, der anhand eines iterativen Optimierungsprozesses berechnet wurde:

Nominale Magnetkraft	40,3 kN
Nominaler Luftspalt	15 mm
Kraftanstieg	238 kN/s
Spannungsüberhöhung	3,7
Wirkleistung	11,4 kW
Masse des Magneten	228 kg
Masse der Hilfseinrichtungen	206 kg

Zwischen gerechneten und gemessenen Werten betrugen die Unterschiede kaum 10 %. Mittels zwei- und dreidimensionaler Feldberechnungsmethoden, die allerdings längere Rechenzeiten erfordern, werden die Ergebnisse wesentlich genauer. Die errechneten Gewichte der ganzen Einrichtung ergeben wenig verschiedene Werte für Polbreiten zwischen 40 und 50 mm. Die Leistung nimmt bei grösserer Polbreite ab.

Die Berechnung der Wirbelströme stösst auf beträchtliche Schwierigkeiten, da die Permeabilität massiver Schienen nicht konstant ist. Das wurde umgangen, und trotzdem konnten die Tendenzen der Einflüsse von einzelnen geometrischen Grössen ermittelt werden, indem Vergleiche zwischen Berechnungen bei konstanter Permeabilität und Messungen im Rotationsprüfstand gezogen werden konnten. Der Verlust an Anziehungskraft ist bei langen Magneten relativ kleiner als bei kurzen. Die im Magnetkern selbst entstehenden Wirbelstromverluste sind frequenzabhängig. Dadurch wird das Systemgewicht beeinflusst.

Bei Thyristor-Stromstellern mit Phasenanschnittsteuerung ist der Leistungsfaktor niedrig. Ferner erlaubt eine solche Anlage kein Notschweben bei Stromausfall. Bei Verwendung von Transistor- und Thyristor-Gleichstromstellern kann als Notstromquelle eine Akkumulatorbatterie benützt werden. Das Gewicht der Einrichtung wird dadurch verringert und ein Notschweben gewährleistet.

Die Regelung muss den Primärluftspalt auf einen mittleren Wert halten und den Fahrkomfort gewährleisten. Als Fahrkomfort-Kriterium wird eine seitliche oder vertikale Beschleunigung von 0,5 *g* zugrunde gelegt. Die Magnetregelung lässt das Fahrgestell den Trassestörungen über 5 mm Amplitude folgen. Die Eingangssignale (Magnetstrom, Magnetfluss, Beschleunigungsmesser-Signale) werden von einem Bordrechner zwecks gezielter Steuerung der Stromsteller aufgenommen. Der Regler ist nach dem Stützkreisprinzip aufgebaut, demzufolge die Ausgänge der Beschleunigungsmesser Eingänge des Reglers sind. Durch zweimalige Integration wird der Spalt errechnet. Die Drift der Integratoren wird durch die Spaltmessung kompensiert. Verschiedene Reglerkonzepte wurden gebaut und in drei Fahrzeugen getestet.

Zur Erprobung der Magnetschwebetechnik im Grossversuch sind derzeit zwei Anlagen in Betrieb:

Eine 2,5 km lange Versuchsstrecke für das 18 t schwere Fahrzeug «Transrapid 04», das kürzlich 204 km/h erreichte. Die Schwebeeinrichtung ist ein kombiniertes Trag- und Führungssystem.

Eine 1,3 km lange Versuchsanlage von Messerschmitt-Bölkow-Blohm fährt das Schwebefahrzeug «Komet». Für seinen Vortrieb dient eine Heisswasserrakete, die 400 km/h zu erreichen vermag. Die Meßstrecke beträgt 300 m. Unter dem Fahrzeug können verschiedene Messobjekte angehängt werden. Damit wird erstrebt, Komponenten für Hochgeschwindigkeitsfahrtechnik zu entwickeln.

4. Elektrodynamische Schwebesysteme (K. Oberretl, Zürich)

Im Gegensatz zu den elektromagnetischen Schwebe-Systemen, die magnetische Anzugskräfte ausnützen, beruhen die elektrodynamischen Systeme auf der Abstossung zwischen stromführenden Leitern oder zwischen stromführenden Leitern und Platten. Zwei Systeme sind bekannt: Das Normalfluss- und das Nullfluss-System. Beide verwenden als Felderzeuger supraleitende Spulen, die am Fahrzeug angebaut werden.

Die Schwebekräfte müssen vertikal sein, so dass unter den Spulen des Fahrzeugs entlang der Fahrbahn Aluminiumplatten oder kurzgeschlossene Spulen angeordnet werden müssen. Da die Spulen mit Gleichstrom durchflossen sind, entsteht eine Schwebekraft nur bei Bewegung des Fahrzeugs. Die Schwebehöhe stellt sich ohne Regulierung automatisch auf einen stabilen Wert ein, der vom Fahrzeuggewicht, vom Spulenstrom und von der Geschwindigkeit abhängt. Eine seitliche Führung ist erforderlich; die elektrodynamische seitliche Führung erbringt jedoch keine eindeutige Stabilität. In den Bodenspulen bzw. -platten entstehen Wirbelstromverluste. Ferner ist die Schwingungsdämpfung gering und die notwendige kryotechnische Einrichtung umfangreich.

Das Nullfluss-System ermöglicht eine Verringerung der Wirbelstromverluste. Dieses System ist ausser durch die beschriebenen Fahrzeugspulen dadurch gekennzeichnet, dass am Boden, oberhalb und unterhalb der Fahrzeugspulen andere, miteinander in bezug auf die induzierten Spannungen in Opposition geschaltete Spulen angeordnet sind. Schweben die Fahrzeugspulen genau in der Mitte zwischen den Bodenspulen, so ist die Schwebekraft gleich Null. Für eine Lage unterhalb dieser Mitte tritt eine nach oben gerichtete Schwebekraft auf. Oberhalb der Mitte ist die Kraft nach unten gerichtet. Das Gewicht und alle auf das Fahrzeug wirkenden Vertikalkräfte ergeben eine mittlere Lage der Fahrzeugspulen, die unterhalb der Mitte liegt. Ströme fliessen nun in den Bodenspulen und verursachen Verluste. Diese ergeben eine Bremskraft, die vom Vortriebsmotor kompensiert werden muss.

Das Verhältnis Schwebekraft zu Bremskraft nimmt beim Normalfluss-System mit Bodenplatten bei steigender Geschwindigkeit zu. Es beträgt beispielsweise 42, wenn die Fahrzeugspulen 1 × 2 m gross sind, eine Durchflutung von 324 000 AW erzeugen und 0,3 m über die Bodenplatten schweben, ferner die Bodenplatten 1,6 m breit, 15 mm dick und unendlich lang sind. Bei kleineren Geschwindigkeiten nimmt die Bremskraft stark zu

und kann die Motorschubkraft unter Umständen überschreiten. In diesem Falle wäre zum Anfahren ein konventionelles Antriebssystem zu verwenden. Oberhalb 100 km/h sinkt die Bremskraft stark ab. Die Bodenplattenverluste betragen 363 kW bei 500 km/h.

Beim Normalfluss-System mit Bodenspulen kann der Skineffekt der Spulen durch Unterteilung des Wicklungsdrahtes auf einen vernachlässigbaren Betrag reduziert werden. Mit 1,5 × 1 m grossen Spulen, die gleiches Aluminium-Volumen wie die vorherigen Bodenplatten aufweisen, ergeben sich nur 145 kW Verluste mit einem Verhältnis Schwebekraft/Schubkraft von 45. Die Schwebekraft ist aber 2,3mal kleiner mit Bodenspulen als mit Bodenplatten. Bei gleichbleibender Schwebekraft scheint das Bodenplatten-System trotz höheren Verlusten vorteilhafter als das Bodenspulen-System zu sein, da weniger Durchflutung von den Fahrzeugspulen zu erzeugen ist.

Beim Nullfluss-System ist das obenerwähnte Kraftverhältnis merklich höher als beim Normalfluss-System mit Bodenspulen. Ferner könnte die gleiche Schwebekraft mit nur 82 kW statt 145 kW erzielt werden. Dafür müsste die Fahrzeugspulendurchflutung beträchtlich gesteigert werden, und demzufolge wäre das Fahrzeug schwerer. Das Nullfluss-System bietet also für den untersuchten Fall keinen wesentlichen Vorteil im Vergleich zu den anderen Systemen.

Beim Auftreten von Ausgleichsvorgängen können sich beträchtliche und schnelle Stromschwankungen in den Bodenschleifen ergeben (etwa 0...12 kA in 0,01 s). Die Schwebekraft schwingt mit einer Amplitude von ca. 40 % ihres Ruhewertes und die Bremskraft mit ca. 2 % der ruhenden Schwebekraft. Ein senkrechter Windstoss nach unten, mit 25 % des Fahrzeuggewichtes wirkend, würde die Schwebehöhe um wenige Millimeter verringern. Dabei entstehen Schwingungen, die nur langsam gedämpft werden. Bei steigender Geschwindigkeit nimmt die Dämpfung sogar ab.

Zur Illustration der elektrodynamischen Schwebetechnik ist ein Film vorgeführt worden, in dem ein Modellfahrzeug auf einer Versuchsstrecke im Massachusetts Institute of Technology auf voller Fahrt gezeigt wird. Schwingungen waren darauf sehr gut zu erkennen und haben bestätigt, dass in Zukunft neben Stabilitätsproblemen auch Schwingungsdämpfungsprobleme zu lösen sind.

5. Anwendungen der Linearmotoren
(N. Wavre und M. Jufer, Lausanne)

Linearmotoren finden wegen folgenden Eigenschaften immer mehr Einsatz in der Technik:

- Keine Adhäsionsprobleme (bei Fahrzeugen);
- Keine mechanische Energie-Übertragungseinrichtungen;
- Einfachheit und Betriebssicherheit.

Demgegenüber stehen folgende Nachteile:

- Niederer Leistungsfaktor;
- Für niedere Fahrgeschwindigkeiten ungeeignet;
- Schwierigkeit, kleine Luftspalte zu erhalten;
- Keine Massenherstellung, da die Motoren für jeden Fall neu ausgelegt werden müssen.

Hier seien folgende zwei Hauptanwendungsgebiete betrachtet:

- Hilfseinrichtungen für die Fördertechnik bei niedriger Geschwindigkeit und Hochgeschwindigkeitsbremseinrichtungen;
- Industrielle Vorschub- und Verlade-Einrichtungen.

Zur ersten Anwendungsgattung gehören etwa Bergbahnen, städtische Verkehrsmittel auf steilen Rampen sowie der Gütertransport. Dabei kommen vollkommen selbständige oder mit konventionellen Mitteln kombinierte Linearmotoren in Frage. Aus wirtschaftlichen und finanziellen Gründen werden gegenwärtig eher gemischte Antriebssysteme vorgezogen.

Bei rollenden Fahrzeugen müssen die Räder die magnetischen Anziehungskräfte aufnehmen. Der Luftspalt muss möglichst konstant bleiben. Manchmal wird die Primärwicklung am Boden befestigt, so dass keine Schleifkontakte für die Stromversorgung nötig sind. In Bergwerken und über beschränkte Strecken, die abwechslungsweise steile Hänge und leichte Deklivitäten aufweisen (Sägezahnprofil), werden nur an den steilen Hängen Primärwicklungen im Boden zwischen den Schienen verankert. Die Wagen tragen als Sekundärteil eine Aluminiumplatte. Die Förderung erfolgt die Hänge hinauf elektromechanisch, in den Deklivitäten durch Gravitation. Diese Lösung hat sich als sehr wirtschaftlich erwiesen.

Bei Bergbahnen werden die Primärwicklungen auf den Triebwagen montiert. Sie können vom einfachen oder doppelten Typ sein. Bei der zweiten Anordnung gibt es keine magnetische Anziehungskraft. Dieses System bietet bei kurzen, steilen Strecken gegenüber der klassischen Zahnstange gewisse Vorteile, da keine Abnutzung der Aluminiumschiene auftritt und diese als Backenbremsschiene bei Notbremsungen verwendet werden kann. Bei Talfahrten kann eine Energierückgewinnungsbremsung in Frage kommen. Bei Gleichstromerregung der Primärwicklung kann die Talfahrtgeschwindigkeit sogar auf ca. 1 km/h gesenkt werden. Das gleiche Prinzip findet auch Anwendung bei Hochgeschwindigkeitsbremsung. Die Fahrschienen dienen als Sekundärkreis. Dabei soll der Bremsschlitten ungefedert sein, damit die Anziehungskraft den Luftspalt nicht verringert. Die Kraft wirkt sich wie eine Erhöhung des Fahrzeuggewichtes vorteilig aus, so dass die Wirkung der klassischen Radbremsen gesteigert wird. Die Temperaturerhöhung der Schienen beträgt beim Bremsen nur 2 bis 3 °C.

Für kurze Bewegungsstrecken, wie die Betätigung von grossen Schiebetüren, eignet sich der asynchrone Linearmotor sehr gut. Die Primärwicklung ist fest, und die Sekundärschiene (aus Aluminium) wird an der Türe angebaut. Von der Etel S. A. ist eine Niederfrequenzvariante entwickelt worden für 6 kp Zugkraft (in Gegenstromrichtung 12 kp) bei einer Frequenz von 8 und 2 Hz. Der elektronische Teil ist mit Leistungstransistoren versehen und liefert zweiphasige Rechteckspannungen. Die Motorleistungsaufnahme beträgt 500 VA. Für dieses Anwendungsbeispiel ist eine Serienherstellung durchaus möglich.

Für eine Vorschubeinrichtung für Glasscheiben besteht eine Ausführung mit asynchronem Linearmotor auf einer geschlitzten Hängeschiene. Da verschiedene Geschwindigkeiten eingehalten und die Haltestellen mit einer Genauigkeit von ±0,5 mm angefahren werden müssen, übernimmt eine mit dem Linearmotor gekuppelte Gleichstrombremse die Steuerung der Geschwindigkeit. Für eine Transportfähigkeit von 300 kp bei 2,7 m/s beträgt die Schubkraft beim Anfahren 20 kp. Die Leistungsaufnahme bei 1 m/s und 4 mm Luftspalt beträgt 128 W bei Cos φ = 0,4, der Wirkungsgrad 20 %. Diese spielt hier eine untergeordnete Rolle. Eine elektronische Steuerung würde ihn erhöhen und gleichzeitig eine Vergrösserung des Luftspaltes ermöglichen. Mit diesem Motortyp können die Kurvenradien bis ca. 50 cm herabgesetzt werden.

Eine doppelwirkende Primärwicklung zwischen zwei Sekundärschienen ist als Prototyp an der ETH Lausanne ausgeführt worden, wobei diese besondere Variante die Verwirklichung eines Monorail mit Weichen ohne bewegliche Teile gestattet. Beiderseits ausserhalb der Doppelschiene und kurz vor der Abzweigung ist je ein Gleichstromelektromagnet angeordnet. Beim Erregen eines der Magnete wird eine seitlich gerichtete Anziehungskraft erzeugt, die den Schlitten in die vorgewählte Abzweigung lenkt.

Seit längerer Zeit ist der rotierende Schrittmotor bekannt. Eine lineare Variante ist ebenfalls realisierbar. Dabei kommen alle erwähnten Anordnungen in Frage. Sie können als Treibmotoren oder als Positionierungsmotoren verwendet werden. Die Einzelschritte können bis auf 0,25 mm heruntergesetzt werden. Anwendungsvorschläge für die Positionierung der Schreibermatrix in Rechnerterminals liegen vor. Auf dem Schrittmotorprinzip können auch Schwingmotoren konzipiert werden, die dort Anwendung finden, wo Wechselbewegungen kleiner Amplitude gefordert werden (Schüttelsiebe, Haarschneider usw.).

6. Industrielle Anwendungen der Linearmotoren
(A. Bourmault, Lyon)

Es werden ausschliesslich Anwendungen von asynchronen Linearmotoren behandelt. Die besprochenen Anordnungen sind ähnlich wie die in den vorherigen Vorträgen behandelten Varianten. Die zur Anwendung kommenden Reguliermöglichkeiten mit Stromimpulsen, variabler Speisespannung sowie variabler Frequenz und Spannung haben für alle Anwendungen Gültigkeit. Typisch ist auch, mit einigen Nuancen, die Realisierung von

Toröffnern für Fabrikareale und Vorschubeinrichtungen für Fertigprodukte. Eine interessante Möglichkeit besteht im Einsatz von Linearmotoren bei Rollbahnen in Flughäfen oder in Bahnhöfen. Die zurückzulegenden Strecken sind oft lang und die Bewegung langsam. Eine Beschleunigung auf 4 bis 10 m/s erfordert aus Sicherheitsgründen kleine Kabinen für eine oder mehrere Personen. Die Hochgeschwindigkeitsstrecke besteht aus einer Reihe von Sekundärschienenstücken, die an einer Lang-Elementenkette befestigt sind. Die Primärschlitten liegen unterhalb der Kette, dicht an den Schienenstücken. An beiden Endstationen führt die Kette über Umlenkrollen, so dass für die Kabinen beide Fahrtrichtungen gewährleistet sind. Die Beschleunigung und Verzögerung der Kabinen an den Endstationen wird von klassischen mechanischen Einrichtungen übernommen. Gegenüber der üblichen Rollbahn wird mit dem beschriebenen System nicht nur eine höhere Geschwindigkeit erhalten, sondern die Kettenbelastung wird dank der gleichmässigen Verteilung der Primärschlitten über die beiden Strecken (Hin- und Rückweg) beträchtlich vermindert. Dieses sog. VEC-System der Compagnie Electromécanique ermöglicht Kurvenführungen, die bei Rollbahnen ausgeschlossen wären.

Schiffsmodellprüfstände sind für den Einsatz von Linearmotoren prädestiniert. Dank den ausgezeichneten Beschleunigungs- und Bremseigenschaften können bei nicht ausbaubaren Prüfkanälen höhere Modellgeschwindigkeiten und längere Meßstrecken zugelassen werden. Ausserdem fallen fast alle sonstigen umfangreichen mechanischen Einrichtungen weg. Durch geeignete elektronische Motorsteuerung und Regulierung können die Abweichungen der Beschleunigung in bezug auf den Sollwert unter 0,005 *g* gehalten werden. Mit mechanischen Antrieben ist diese äusserst geringe Schwankung kaum erreichbar.

Schlussfolgerungen des Berichterstatters

Die wegen der Feldverzerrungen an den Schlittenenden entstehenden Wirbelstromverluste bilden das wichtigste Problem der Linearmotoren. Schwierige und zeitraubende Forschungsarbeiten müssen noch bis zur Lösung dieser Probleme für Hochgeschwindigkeitsmotoren ausgeführt werden. Für kleinere Leistungen und Geschwindigkeiten scheint dagegen ein Stadium erreicht zu sein, in dem wirtschaftliche und rationelle Auslegungen möglich sind. Dafür ist seitens der Hersteller sowie der Benützer eine gewisse Anpassung an die neuen Konzeptionen erforderlich. Der Linearmotor allein stellt aber keine Universallösung für manche industrielle Anwendungen dar. Er wird nur dann seine besonderen Eigenschaften in vollem Umfange bieten, wenn er mit einer auch ihrerseits wirtschaftlichen elektronischen Steuerung bzw. Regelung gekoppelt wird. Anstelle der bisherigen Ausführungen, bei denen die gewünschte mechanische Bewegung aus einer rotierenden Bewegung gewonnen wird, sollte danach getrachtet werden, neue Konzeptionen zu schaffen, wo Vereinfachungen der beweglichen Teile zu einer Senkung der Wartungs- und Reparaturkosten führen. *Prof. A. Dutoit*

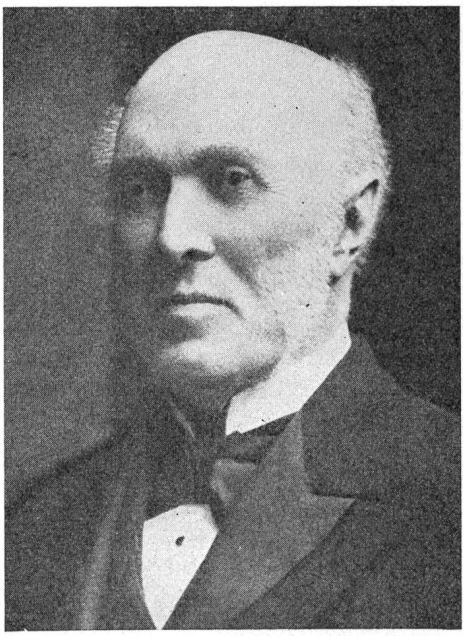
John Kerr 1824–1907

John Kerr, am 17. Dezember 1824 in Ardrossan (Ayrshire) geboren, studierte in Glasgow Theologie. 1849 schloss er sein Studium mit dem Doktorexamen ab. Seit er aber Gelegenheit gehabt hatte, Vorlesungen bei Prof. William Thomson (Lord Kelvin) zu hören, interessierte ihn die Mathematik und die Physik mehr als die Theologie. Aus dieser eher unerfreulichen Situation fand er aber einen eleganten Ausweg, indem er am Priesterseminar in Glasgow Lehrer für Mathematik und Physik wurde, ein Posten, den er 44 Jahre bekleidete.

1867 brachte er ein Lehrbuch über Mechanik heraus, das sehr gute Aufnahme fand. Und obwohl ihm nur einfache Geräte zur Verfügung standen, betrieb er auch ernsthafte Forschungen, wobei ihm seine Seminaristen halfen. Er sprach aber wenig über diese Arbeiten und publizierte auch lange Zeit nichts. 1875 erschien sein erster Bericht, betitelt «Über eine neue Beziehung zwischen Elektrizität und Licht». 1876 führte er die Versuche vor der British-Association in Glasgow vor. Das Neue – es ist seither unter dem Namen «Kerr-Effekt» bekannt – bestand darin, dass in einer mit Nitrobenzol gefüllten Kondensatoranordnung durch das Ein- und Ausschalten eines Magnetfeldes der Strahlendurchgang von polarisiertem Licht unterbrochen bzw. eingeleitet werden konnte. Zwei Jahre später konnte Kerr den gleichen Effekt erzielen durch Reflexion von polarisiertem Licht auf den polierten Flächen von Magnetpolen.

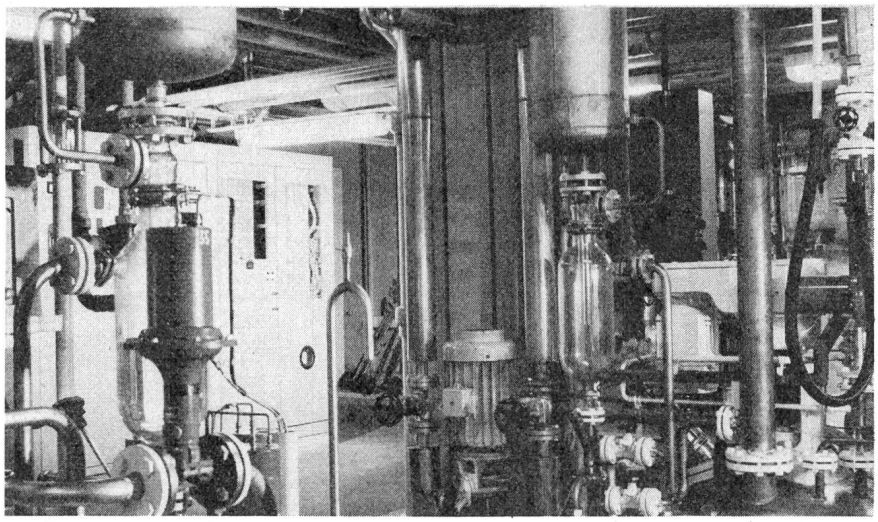
Als man um 1924 noch mit der Nipkowschen Scheibe arbeitete, brauchte man die Kerr-Zelle in der Fernsehtechnik. Aber Kerr erlebte das nicht mehr. Und wie die Radioröhre durch die Transistoren abgelöst wurde, ist auch die Kerr-Zelle wieder verschwunden.

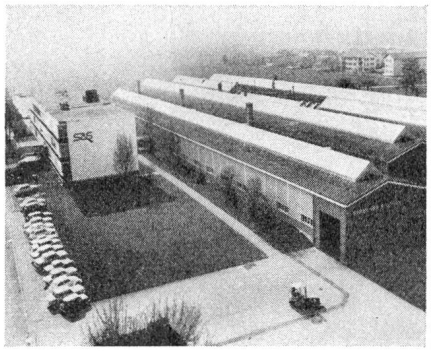
Kerr betrieb noch lange Zeit Forschungen über Doppelbrechung und Elektrooptik. Für seine Entdeckung wurde er 1890 zum Fellow der Royal Society ernannt und ein paar Jahre später mit der Royal-Medaille ausgezeichnet. Erst um die Jahrhundertwende gab er die Lehrtätigkeit auf. Er starb am 18. August 1907 in Glasgow. *H. Wüger*

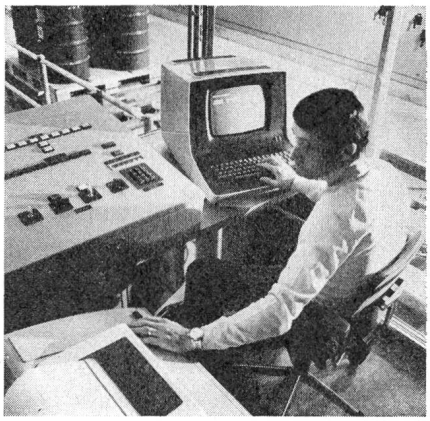


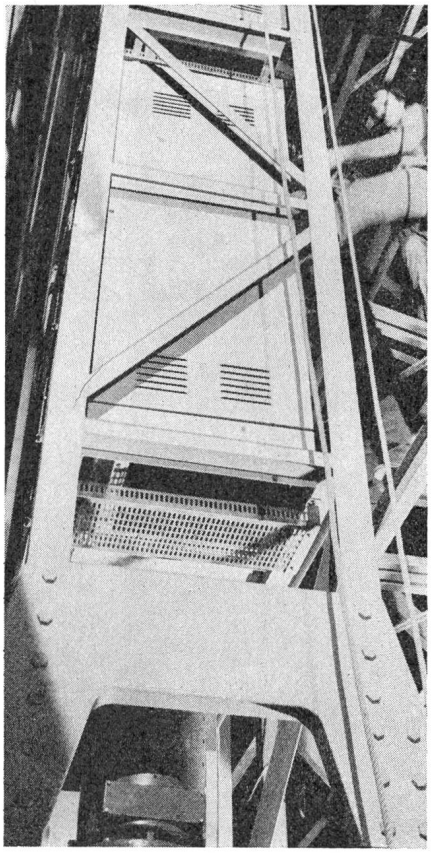
Science Museum, London

Wenn Sie mit uns **steuern,** fahren Sie **gut...**









... in der industriellen Steuerungstechnik!
Einige Schwerpunkte aus unserer langjährigen Erfahrung:

- Steuerungen und Regelungen in der Verfahrenstechnik
- Steuerungen für Förderanlagen und automatische Lagerhäuser
- Maschinensteuerungen
- Steuerungen für die Energieversorgung

Unser Programm umfasst den gesamten Bereich vom einfachen Schützkasten bis zur rechnergesteuerten Anlage für die Automatisierung ganzer Fabrikationsprozesse.

Sprecher+Schuh als Hersteller von Hoch- und Niederspannungsapparaten verfügt über ein Sortiment von Bausteinen elektromechanischer und elektronischer Schaltgeräte für den Einsatz in Steuerungen und Schaltanlagen. Sorgfältig ausgewählte Fremdfabrikate wie Computer gewährleisten ein ausgewogenes und allen Anforderungen angepasstes Produkteangebot.

Dieses Spektrum technischer Mittel erlaubt optimale Anwendungen von

- fest verdrahteten Steuerungen
- programmierbaren Steuergeräten
- Prozessrechnern.

Anwendungsorientierte Fachleute mit besonderem Verständnis für die Probleme des Kunden stehen für die Lösung anspruchsvollster Aufgaben zur Verfügung.
Lassen Sie uns beweisen, dass Sie mit Sprecher+Schuh gut fahren.

Bitte richten Sie Ihre Anfragen an:

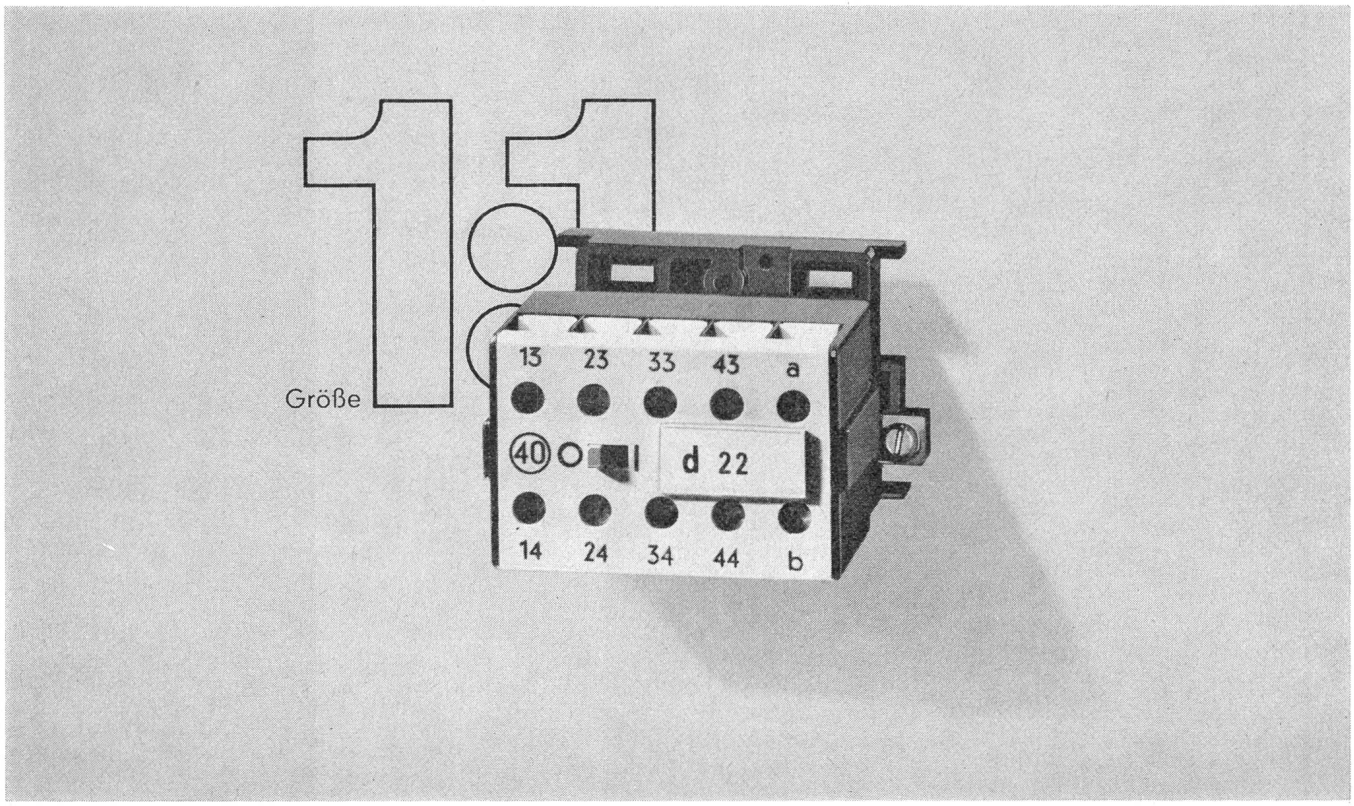
sprecher+ schuh

Sprecher+Schuh AG
5001 Aarau/Schweiz
Telefon 064 25 21 21

S 41.665.1.74

SIEMENS-ALBIS
AKTIENGESELLSCHAFT

Für industrielle Steuerungen – ein Schütz so klein wie ein Relais?



Relaisklein und leistungsstark – das neue Hilfsschütz 3TJ von Siemens. Hier sind seine wesentlichen Vorteile:

Es ist klein gebaut

Nur 50 x 38 mm groß. Lückenlos aneinander zu reihen. In 60 mm Zeilenabstand übereinander zu montieren. Das Aufbausystem aus Schütz, senkrechten und waagerechten Leitungshaltern bringt die größtmögliche Flächenausnutzung. Auf 1 qm können über 1.250 Schaltfunktionen untergebracht werden.

Es ist bequem einzusetzen

Einfach auf die Tragschiene zu schnappen. (Tragschiene nach DIN 46277) Nur eine Verdrahtungsebene. Und beim Verdrahten helfen Einführtrichter, offene Anschlußklemmen und die Führung für den Schraubendreher.

Es ist besonders betriebssicher

Entspricht allen Forderungen nach VDE 0660, Teil 2. Parallele Schaltbrücken mit Spitzschneidekontakten bringen höchstmögliche Kontaktsicherheit. Die völlig geschlossenen Schaltkammern gewährleisten größte Funktionssicherheit.

Und außerdem machen genormte Klemmenbezeichnungen und Gerätekennzeichnungen das neue Hilfsschütz übersichtlich und unverkennbar.

Das Hilfsschütz 3TJ, ein Beispiel der neuen Schaltgerätegeneration von Siemens.

Neue Generation bedeutet für Sie:

Praxisgerecht in der Konzeption
Kompakt in der Form
Einfach in der Handhabung
Sicher im Betrieb

Siemens-Albis AG
Energie/Industrie:
01 25 36 00, 8021 Zürich
021 34 96 31, 1020 Renens-Lausanne

Das neue Hilfsschütz 3TJ von Siemens