

# Entwicklungsstand und Anwendungsmöglichkeiten von Linearmotoren

Autor(en): **Rummich, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **63 (1972)**

Heft 19

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915738>

## **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.

# Entwicklungsstand und Anwendungsmöglichkeiten von Linearmotoren

Von E. Rummich

621.313.282

In der vorliegenden Arbeit werden die einzelnen Motortypen wie Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronlinearmotoren beschrieben, ihre Wirkungsweise erläutert sowie auf ihre Vor- und Nachteile hingewiesen. Vor allem den Anwendungsmöglichkeiten von Wanderfeldmotoren wird breiter Raum eingeräumt und auf heute auftretende aktuelle Probleme im Zusammenhang mit unkonventionellen Bahnsystemen eingegangen. Abschliessend werden einige Sonderformen von Linearmaschinen angegeben und ihre Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt.

Dans cet article, les différents types de moteurs linéaires, tels que moteurs à courant continu, moteurs asynchrones et moteurs synchrones, sont décrits, leur fonctionnement est expliqué et on indique leurs avantages et leurs inconvénients. Les possibilités d'emploi de moteurs à champ progressif, en particulier, et les problèmes qui se présentent actuellement en relation avec des systèmes de transport inhabituels sont traités en détail. Pour terminer, quelques formes spéciales de machines linéaires et leurs possibilités d'emploi sont indiquées.

## 1. Einleitung

In den letzten Jahren ist kaum eine Entwicklung einer Maschine so rasch vorangetrieben worden, wie dies bei den Linearmaschinen geschah. Obwohl ihre Erfindung schon in das Ende des vorigen Jahrhunderts zurückgreift, wurde sie doch erst wieder Ende der 50er Jahre aktuell.

Anfänglich lag ihre Verwendung hauptsächlich auf dem Gebiet der Linearpumpen im Zusammenhang mit der Forderung der Umwälzung von flüssigen Metallen für den Kühlkreislauf von Reaktoren. In späterer Folge wurde dieser Maschinentyp für die Energiedirektumwandlung interessant. Es wurden zahlreiche Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiete der Magnetohydrodynamik durchgeführt und eine Reihe von Maschinentypen untersucht.

Die Verwendung der Linearmaschine als Antriebsmittel war seit jeher bekannt, doch war der Bedarf für lineare Antriebsmotoren eher spärlich, bzw. wurde er durch rotierende Antriebssysteme ersetzt.

Erst in den letzten beiden Jahren wurde der Linearmotor als Antriebsmittel für Höchstgeschwindigkeitsfahrzeuge interessant und in fast unglaublich kurzer Zeit in vielen Ländern der Welt die Entwicklung auf diesem Gebiet geradezu wettbewerbsmässig betrieben. Es ist daher nicht verwunderlich, dass gerade in jüngster Zeit in der einschlägigen Literatur der Linearmotor einen der vordersten Plätze einnimmt.

Ähnlich den «konventionellen» rotierenden Maschinen kann auch hier eine Einteilung in Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronlinearmaschinen sowie in eine Gruppe von Sonderlinearmaschinen erfolgen.

## 2. Gleichstromlinearmaschine

Angesichts der heute viel aktuelleren Probleme in Zusammenhang mit unkonventionellen Transportsystemen für Höchstgeschwindigkeiten wird diesem Maschinentyp wenig Beachtung geschenkt, was auch in einer geringen Zahl von Veröffentlichungen [1; 2]<sup>1)</sup> seinen Ausdruck findet, wenn man von einem Anwendungsgebiet, nämlich dem der Konduktionspumpen für flüssige Metalle, absieht.

Denkt man sich eine normale zweipolige Gleichstrommaschine aufgeschnitten und aufgerollt, so ergibt sich eine

mögliche Grundform der Linearmaschine (Fig. 1). Diese besitzt im Stator ausgeprägte Pole, die entweder eine Erregerwicklung tragen oder mit Permanentmagneten ausgestattet sind. Der Sekundärteil trägt eine Kommutatorwicklung mit Kommutatorsteg, ähnlich einer normalen Gleichstrommaschine, nur dass hier die Wicklung im allgemeinen nicht in sich kurzgeschlossen, sondern offen ist, da hier Anfang und Ende der Wicklung nur in Sonderfällen — bei kreisförmigem Sekundärteil — zusammenfallen und meist örtlich getrennt sind. Die Länge des Sekundärteiles samt Wicklung und Kollektorsteg erstreckt sich über den gesamten Bewegungsraum der Linearmaschine. Daraus ergibt sich, dass man diesen Maschinentyp nur für räumlich begrenzte, geradlinige Bewegungen einsetzen wird (z. B. Öffnen und Schliessen von Türen und Schiebern).

Während bei üblichen Gleichstrommaschinen der Anker (Sekundärteil) der bewegliche Teil ist, kann hier, je nach Verwendungszweck auch der Stator der bewegliche Teil sein, dabei sind jedoch immer die Kommutatorbürsten mit dem Stator fix verbunden. Die Wirkungsweise ist analog jener von normalen Gleichstrommaschinen.

Hinsichtlich der Ausführungsformen kann gesagt werden, dass sowohl einseitige Anordnungen der Pole (siehe Fig. 1) oder auch beidseitige Anordnungen (Kommutatorwicklung entsprechend ausgebildet) ausgeführt werden sowie auch mehrpolige ( $2p > 2$ ) Ausführungsformen existieren. Als Wicklung kommt hier hauptsächlich die Schleifenwicklung oder die Grammesche Ringwicklung in Frage.

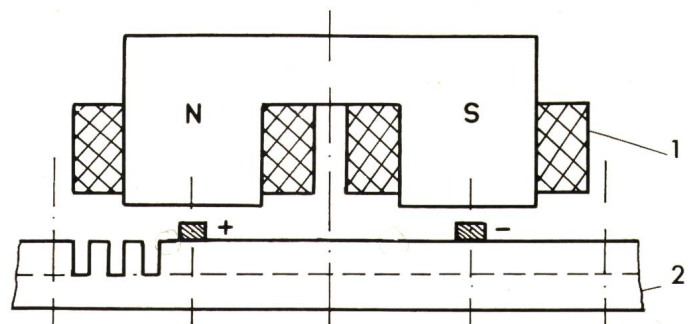


Fig. 1

Prinzipdarstellung eines Gleichstromlinearmotors

1 Stator mit Erregerwicklung

2 Anker mit Kommutatorwicklung

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



Die Schubkraft  $F$  ergibt sich ganz analog zur Kraft bei normalen Gleichstrommaschinen und es gilt:

$$F = 2pb \tau_p A \alpha_p B_L \quad (1)$$

mit  $2p$  Polzahl

$b$  Breite der Maschine

$\tau_p$  Polteilung

$A$  Ankerstrombelag

$\alpha_p$  Polbedeckungsfaktor

$B_L$  Luftspaltinduktion

Bezüglich der Wendepole wäre folgendes zu sagen: Die Kommutierung stellt bei dieser Maschinengruppe keine grossen Schwierigkeiten dar, da die Geschwindigkeiten um Grössenordnungen kleiner sind als bei den üblichen Gleichstrommaschinen. Dies schon deshalb, weil der Bewegungsraum — durch die Notwendigkeit der Anordnung einer Kommutatorwicklung entlang der ganzen Bewegungstrecke — von vornherein relativ klein ist, so dass es für die Maschine unmöglich ist, auf grosse Geschwindigkeiten zu kommen, was auch für die in Frage kommenden Anwendungsgebiete nicht notwendig ist. Auf Wendepole kann daher in den meisten Fällen verzichtet werden.

Wie bereits erwähnt, ist die Wirkungsweise identisch jener von normalen Gleichstrommaschinen. Es ist daher möglich, den Linearmotor in Serie-, Parallel- oder Verbundausführung

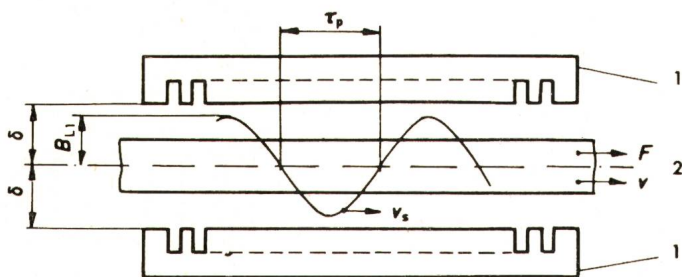


Fig. 2  
Doppelstatoranordnung eines asynchronen Linearmotors  
in Kurzstatorausführung  
1 Stator  
2 Sekundärteil

herzustellen und somit selbst bei niedrigen Arbeitsgeschwindigkeiten, grosse Schubkräfte zu erhalten.

Der konstruktive Aufbau ist einfach und robust, die Stromzufuhr zum Erregerteil mit den starr verbundenen Bürsten erfolgt entweder über flexible Zuleitungen oder über Schleifschienen.

Anwendungsmöglichkeiten stellen Textilschneidmaschinen, Antriebe für das Öffnen und Schliessen von Türen sowie das Verstellen von Schiebern und dergleichen dar. In Zusammenhang mit der Thyristortechnik ergeben sich Antriebe für periodisch hin- und hergehende Maschinen (z. B. in der Verpackungindustrie, Webereimaschinen), wobei die Umsteuerung elektronisch erfolgt. Hier ergeben sich Ansätze für einen verstärkten Einsatz dieses Maschinentyps auf dem Regelungs- und Steuerungssektor, wenn auch bei allem Optimismus gesagt werden muss, dass dieser Linearmaschinentyp nie an die Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten der Wanderfeldlinearmaschinen herankommen wird.

### 3. Wanderfeldlinearmotoren

Die physikalische Grundlage für den asynchronen und synchronen Linearmotor stellt das Wanderfeld dar. Es ist dies eine sinusförmig verteilte, mit der synchronen Wanderfeldgeschwindigkeit  $v_s$  laufende Induktionswelle, die ähnlich dem Drehfeld von Mehrphasenwicklungen, die im Stator der Maschinen angeordnet sind, erzeugt wird.

Für das Wanderfeld gilt

$$B(\xi, t) = B_1 \cos(\omega t - \xi) \quad (2)$$

wobei  $B_1$  Amplitude der Induktionswelle

$$\xi = \frac{\pi}{\tau_p} x \text{ bezogene Ortskoordinate}$$

$x$  Ortskoordinate

$$\omega = 2\pi f \text{ Kreisfrequenz der erregenden Ströme}$$

Die synchrone Wanderfeldgeschwindigkeit  $v_s$  ergibt sich aus Gl. (2):

$$v_s = \frac{dx}{dt} = \frac{\tau_p}{\pi} \cdot \frac{d\xi}{dt} = \frac{\tau_p}{\pi} \omega = f\lambda = 2f\tau_p \quad (3)$$

mit

$$a = \frac{\pi}{\tau_p} \text{ Wellenzahl}$$

$$\lambda \text{ Wellenlänge}$$

Aus Gl. (3) erkennt man sofort die Möglichkeiten der Änderung der synchronen Wanderfeldgeschwindigkeit, nämlich durch Änderung der speisenden Frequenz oder der Polteilung (polumschaltbare Wicklung).

#### 3.1 Asynchroner Linearmotor

Fig. 2 zeigt die prinzipielle Anordnung eines asynchronen Linearmotors in Doppelstatorausführung und als Kurzstator-typ. Ist der Sekundärteil in seiner Länge begrenzt, so spricht man von Kurzläufertyp. Die beiden Statoren tragen die Wanderfeldwicklungen, die sich hinsichtlich ihrer magnetischen Wirkung unterstützen. Das Feld durchsetzt den elektrisch gut leitenden, nicht ferromagnetischen Sekundärteil und induziert in diesem Spannungen und Ströme, die in Zusammenarbeit mit dem Primärfeld eine Kraftwirkung ergeben, die den Sekundärteil hinter dem Wanderfeld nachzieht; es tritt also ein asynchroner Lauf ein. Bei Verwendung als Fahrzeugantrieb ist vielfach der Stator am Fahrzeug befestigt, und der Sekundärteil — Reaktionsschiene aus Aluminium oder Kupfer — entlang der Fahrtrasse ortsfest verlegt.

Auf die Theorie der Maschine sowie auf die auftretenden Randeefekte in Längs- und Querrichtung soll hier nicht weiter eingegangen, sondern auf die reichhaltige Literatur verwiesen werden [3...8]. Grundsätzlich ist die erzielbare Schubkraft den Grundwellen des Ankerstrombelages  $A_1$ , der Luftspaltinduktion  $B_{L1}$  sowie der Polteilung direkt proportional und dem Luftspalt  $g$  indirekt proportional. Es gilt:

$$F = k B_{L1} A_1 \quad (4)$$

wobei

$$B_{L1} = k' A_1 \frac{\tau_p}{g} \quad (5)$$

Hiebei sind  $k, k'$  Grössen, die die Permeabilität, die Polzahl, die Materialeigenschaften und Abmessungen des Sekundärteiles sowie die Geometrie der Anordnung enthalten und die auftretenden Randeinflüsse berücksichtigen.



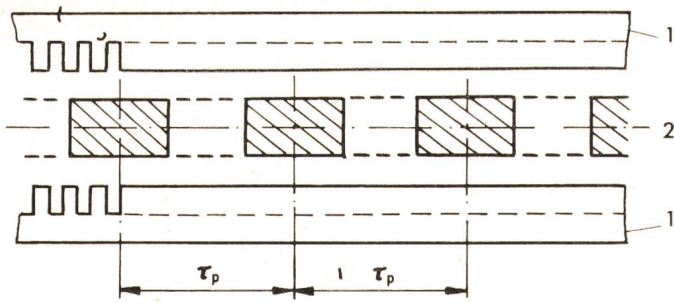


Fig. 3  
Synchroner Linearmotor auf Reluktanzprinzip beruhend  
1 Stator  
2 Reaktionsteil mit ferromagnetischen Abschnitten

Um grosse Schubkräfte zu erhalten, wird man trachten, den Ankerstrombelag zu erhöhen, was durch geeignete Isolationsmaterialien und gute Kühlung erzielt werden kann (kryogene Kühlung!). Heute erreicht man allerdings auch unter optimalen Bedingungen nur spezifische Schubkräfte von ca. 1 N/cm<sup>2</sup> (auf die erregende Statoroberfläche bezogen), also Werte, die nur ca. ein Drittel jener von normalen rotierenden Maschinen betragen.

Da der asynchrone Linearmotor die für die Magnetisierung notwendige Blindleistung dem Netz entnimmt, ergibt sich bei den naturgemäss grossen Luftspalten ein schlechter  $\cos \varphi$  und zufolge der hohen Ströme zusätzliche Verluste, die sich in einem niedrigeren Wirkungsgrad auswirken.

### 3.2 Synchrone Linearmaschinen

Bei der Synchronmaschine wird die zur Magnetisierung erforderliche Durchflutung durch eine Gleichstromwicklung, die im Rotor untergebracht ist, aufgebracht. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen sind jedoch nur jene Ausführungsformen für Linearmaschinen interessant, die einen unbewickelten Läufer aufweisen. Ausserdem muss der Reaktionsteil möglichst einfach aufgebaut und billig in der Herstellung und Verlegung sein. Dies vor allem deshalb, weil die synchrone Linearmaschine heute immer mehr als Antrieb von Höchstgeschwindigkeitsfahrzeugen — hier sind aus fahrdynamischen Gründen extrem hohe Luftspalte erforderlich — an Bedeutung gewinnt [9].

Neben den verschiedenen Klauenpolausführungen zeichnen sich drei Ausführungsformen durch besonders einfachen Aufbau des Sekundärteiles aus, nämlich eine auf dem Reluktanzprinzip beruhende Anordnung, dann die heteropolare und homopolare Bauart. Bei diesen Ausführungsformen besteht der Sekundärteil aus einzelnen ferromagnetischen Teilen, die entlang der Fahrtrasse in Beton verlegt werden.

Die auf dem Reluktanzprinzip beruhende Anordnung zeigt Fig. 3. Der Stator entspricht jenem einer asynchronen Linear-

maschine, der Magnetisierungsbedarf wird hier ebenfalls dem Netz entnommen, ist aber zufolge der ferromagnetischen Reaktionsteile wesentlich geringer. Da die entstehenden Zugkräfte relativ klein sind, wird diese Anordnung als Antrieb von Höchstgeschwindigkeitsfahrzeugen kaum in Frage kommen.

Die heteropolare Bauart zeigt Fig. 4. Die Gleichfelderregewicklungen liefern den Magnetisierungsbedarf und sind ebenso wie die Wanderfeldwicklungen in den Statorn untergebracht. Da diese relativ kompliziert aufgebaut sind, dürfte auch diese Variante kaum einer grosstechnischen Verwendung entgegen sehen.

Die homopolare Bauform (Fig. 5) weist die Vorteile der beiden vorigen Systeme auf, nämlich Deckung des Magnetisierungsbedarfes durch eine Gleichfelderregung (Homopolarerregung), wobei die erforderliche Erregerwicklung auf einem ferromagnetischen Verbindungsjoch zwischen beiden Statorhälften angeordnet ist, und einfachen Aufbau der Statorn — entsprechen jenen von asynchronen Linearmaschinen. Diese Ausführungsform stellt heute eine echte Alternative zum asynchronen Linearmotor dar, und es wird erst die Zukunft zeigen,

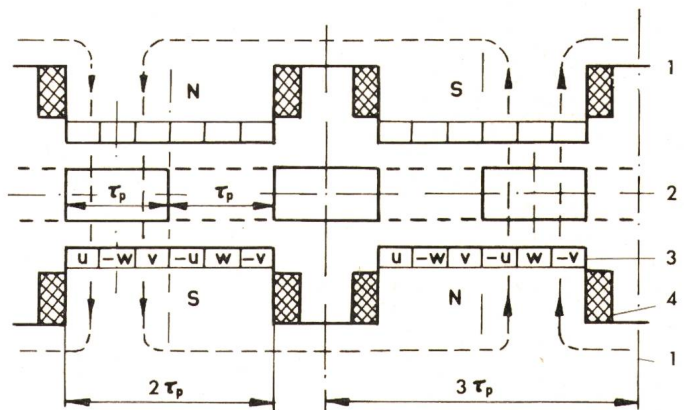


Fig. 4  
Heteropolarer synchroner Linearmotor  
1 Stator  
2 Reaktionsteil mit ferromagnetischen Abschnitten  
3 Wanderfeldwicklung  
4 Gleichfeldwicklung

welchem Typ der Vorzug der Verwendung als Antrieb von Höchstgeschwindigkeitsfahrzeugen gegeben wird.

Für die Schubkraft der homopolaren Ausführung ergibt sich mit den Bezeichnungen der Fig. 5:

$$F = k \Theta_1^2 \frac{1}{g_1} \left( \sin 2\chi \sin 2\alpha + k' \frac{\Theta_0}{\Theta_1} \sin \chi \sin \alpha \right) \quad (6)$$

wobei  $k, k'$  Faktoren, berücksichtigen Geometrie der Anordnung

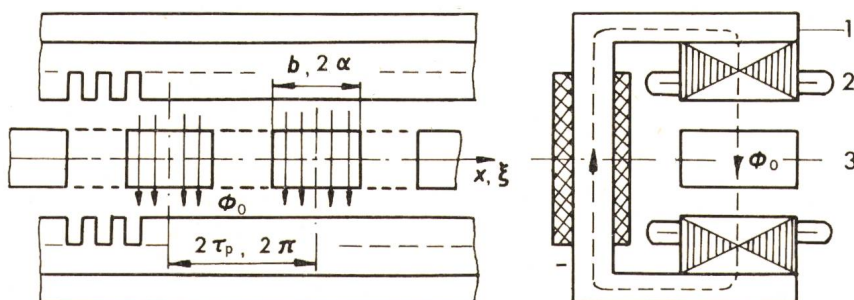


Fig. 5  
Homopolarer synchroner Linearmotor  
1 Verbindungsjoch mit Homopolarwicklung  
2 Wanderfeldwicklung  
3 Reaktionsteil



- $\theta_1$  Grundwelle der Durchflutung einer Statorwicklung  
 $\theta_0$  Gleichstromdurchflutung  
 $\xi = \frac{\pi}{\tau_p} x$  bezogene Ortskoordinate  
 $\chi$  Verschiebung des Reaktionsteiles aus der Leerlaufstellung ( $\chi = 0$ ) im bezogenen System

Der erste Ausdruck der Gl. (6) stellt den Kraftanteil auf Grund des Reluktanzverhaltens der Maschine dar, für  $\alpha = \pi/2$  verschwindet dieser Anteil. Im zweiten Term steckt die Durchflutung der Homopolarerregung und dieser Anteil wächst proportional dem Produkt aus Wechseldurchflutung  $\theta_1$  und Gleichdurchflutung  $\theta_0$ . Es soll hier erwähnt werden, dass zufolge des periodisch sich ändernden magnetischen Leitwertes des Sekundärteiles durch die Homopolarerregung selbst bei unerregten Wanderfeldwicklungen ein Wanderfeld mit überlagerten Gleichanteilen entsteht. Dieses Wanderfeld erzeugt zusammen mit dem Wanderfeld der Statorwicklungen bzw. dem Statorstrombelag eine Schubkraft. Da die Höhe des Homopolarfeldes nur durch die Zahnsättigung begrenzt wird, kann dieses entsprechend hoch gewählt werden und damit ergeben sich entsprechende Zugkräfte, obwohl nur ca. 40...50 % der im Luftspalt auftretenden Induktion zur Schubkraftbildung beiträgt. Dies ergibt sich aus der vorhin erwähnten Tatsache, dass der vorhandene Gleichanteil des Magnetfeldes nichts zur Schubkraftbildung beiträgt.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Asynchrone und synchrone Linearmaschinen zeichnen sich durch einfachen und robusten Aufbau aus. Die Kraftübertragung geschieht kontaktlos, d. h. unter Ausschaltung der Reibkräfte, was besonders für den Antrieb von Höchstgeschwindigkeitsfahrzeugen von grösster Bedeutung ist. Es sind dadurch grosse Beschleunigungs- und Verzögerungswerte erreichbar.

Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt bei beiden Typen durch Änderung der synchronen Wanderfeldgeschwindigkeit. Dies ist bei der asynchronen Bauart durch Frequenzänderung oder durch Änderung der Polteilung möglich, bei der synchronen Bauart nur durch erstere Massnahme. In der Praxis erfolgt fast ausschliesslich eine Frequenz-Spannungssteuerung, wodurch es auch möglich ist, die beim Einsatz im Bahnbetrieb erforderlichen Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinien zu erhalten. Die zur Steuerung verwendeten Stromrichterschaltungen weisen bei asynchronen Linearmotoren wegen des hohen Blindleistungsbedarfes Zwangskommutierungseinrichtungen auf, worauf bei synchronen Linearmaschinen verzichtet werden kann.

Auf eine Schwierigkeit bei synchronen Linearmotoren soll hier hingewiesen werden, nämlich auf das Anfahren. Dieses geschieht bei niedrigsten Frequenzen und Spannungen bei gleichzeitig hohen Strömen. Hier gilt es noch seitens der Stromrichtertechnik geeignete Schaltungen zu entwickeln. Dies dürfte auch der Hauptgrund sein, warum in den heute ausgeführten Prototypen von Fahrzeugen fast ausschliesslich asynchrone Linearmotoren vorgesehen sind.

Bezüglich des Bremsens darf gesagt werden, dass für die asynchronen Linearmotoren die üblichen Bremsmethoden wie Gleichstrom- und Gegenstrombremsung sowie übersynchrones Bremsen möglich sind, wobei hier von Vorteil ist, dass der Sekundärteil aus dem Statorbereich wandert, somit keine Erwärmungsprobleme auftreten. Für die synchrone Bauform

kommen Bremsung durch Frequenzführung sowie Widerstandsbremsung in Betracht.

#### 4. Anwendungsmöglichkeiten für Wanderfeld-Linearmotoren

Die heutigen Hauptanwendungsgebiete für asynchrone Linearmaschinen liegen bei relativ geringen Geschwindigkeiten von einigen m/s und Schubkräften bis einige kN. In diesen Bereich fallen Aufgaben der Förder- und Transporttechnik innerbetrieblicher Natur wie Fließbandstrecken oder der Gepäcktransport in Flughafenanlagen sowie Einsatzmöglichkeiten für Förderzwecke im Bergbau, Antriebe für Krane, Schiff- und Waggonschleppanlagen, der Antrieb von Schritten von Werkzeugmaschinen, Betätigung von Schiebern, Türen und Schaltern, um nur einige Anwendungsbeispiele aufzuzeigen [8; 10...15]. Es besteht auch die Möglichkeit, der Erzeugung von hin- und hergehenden Bewegungen [16].

In einigen Ländern (DDR, Frankreich) werden asynchrone Linearmotoren in Serienfertigung hergestellt, und es stehen bereits einige Typenreihen zur Verfügung.

Der synchrone Linearmotor konnte sich wegen der Schwierigkeiten des Anfahrens auf diesen Gebieten bisher wenig durchsetzen, zumal bei den relativ kleinen Geschwindigkeiten und Leistungen die Luftspalte klein gehalten werden können, wodurch der erhöhte Blindleistungsverbrauch und der schlechtere Wirkungsgrad nicht allzusehr ins Gewicht fallen und von den sonstigen Vorteilen des asynchronen Linearmotors aufgewogen werden.

Für vorige Anwendungsbeispiele stellt der Linearmotor eine günstige Lösung der Antriebsprobleme dar, doch wurde er vor allem durch die Verwendungsmöglichkeit als Antrieb von Höchstgeschwindigkeitsfahrzeugen in letzter Zeit von grösster Bedeutung.

##### 4.1 Linearmotoren als Antriebe von nichtkonventionellen Bahnen

«Nichtkonventionell» soll bedeuten, dass es sich hier um Bahnen handelt, bei denen der Antrieb nicht mit einem konventionellen (rotierenden) Motor erfolgt oder bei denen das Trag- und Führungssystem von jenem des Rad-Schiene-Systems abweicht. Es ist hier noch zwischen Antrieben für Fernbahnen und solchen für Nahverkehrsmittel zu unterscheiden [17; 18; 19].

4.1.1 *Antrieb von Fernbahnen.* Es besteht heute ein echter Bedarf an Verkehrsmitteln, deren Geschwindigkeitsbereich die Lücke, die zwischen konventionellen Bahnsystemen und den Inlandflugzeugen klafft, schliesst. Dieser Bereich liegt bei Geschwindigkeiten von 400...500 km/h. Neben der hohen Fahrgeschwindigkeit werden von einem neuen Verkehrsmittel hoher Fahrkomfort, grosse Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit, Integrationsmöglichkeiten mit anderen Verkehrsmitteln und nicht zuletzt der heute so wichtige Umwelt- und Landschaftsschutz gefordert. Bei Geschwindigkeiten von ca. 500 km/h zeigt sich, dass ein Antrieb über Rad und Schiene zufolge der Grenzen der Haftreibung und aus Gründen der Fahrdynamik und Fahrsicherheit nicht mehr möglich ist. Zieht man nun Antriebsmöglichkeiten wie Turbotriebwerke oder Propellerantriebe wie sie vielfach auch projektiert waren, wegen der ungünstigen Umwelteinflüsse (Lärm, Abgase) ausser Betracht, so ergibt sich, dass besonders der Linearmotor als Antrieb geeignet erscheint.



Die zahlreichen Systemvorschläge von Schnellbahnen mit Linearmotorantrieb lassen sich hinsichtlich ihrer Trag- und Führungssysteme in drei Gruppen einteilen:

In mechanische Systeme, bei denen das System Rad-Schiene die Trag- und Führungsfunktionen übernimmt. Zu dieser Fahrzeuggruppe gehört das Testfahrzeug der Garrett Corporation (USA), ein 18 m langes, mit einer Gasturbine und einem Generator für 3000 kVA ausgerüstetes Fahrzeug, das von einem Linearmotor entsprechender Leistung angetrieben wird. Die Reaktionsschiene ist in Gleismitte verlegt. Einen weiteren Entwurf stellt das Rail-Jet-Projekt (Frankreich) dar, bei dem die Fahrschiene als Sekundärteil des asynchronen Linearmotors verwendet werden soll. Es zeigt sich jedoch, dass aus fahrdynamischen Gründen bei ca. 400 km/h die obere Grenze der Verwendbarkeit des Systems Rad-Schiene liegen dürfte, so dass künftige Entwicklungstendenzen eher auf das Gebiet der Schwebetechnik hinzielen. Hier ist die Verwendung des Linearmotors durch seine berührungslose Kraftübertragung besonders vorteilhaft.

Zur zweiten Gruppe von linearmotorbetriebenen Verkehrsmitteln zählen die Luftkissenfahrzeuge. Hierher gehört vor allem das englische Hovertrain Projekt, dessen Entwurf einen Linearmotorantrieb von 3,5 MW Leistung vorsieht. Nachteilig bei Luftkissenfahrzeugen ist der relativ hohe Leistungsaufwand für die Bereitstellung des erforderlichen Überdruckes, ferner die mit der Erzeugung des Überdruckes bedingten Geräuschprobleme.

Die dritte Möglichkeit, Fahrzeuge zu tragen und zu führen, kann mittels Magnetfeldern erfolgen. Es ist dies auf drei Arten möglich, nämlich permanentmagnetisch, elektromagnetisch und elektrodynamisch [20].

Nach heutigen Forschungserkenntnissen scheint das elektromagnetische Trag- und Führungssystem das aussichtsreichste zu sein. Im Fahrzeug angeordnete Elektromagnete erzeugen gegenüber einer längs der Fahrtrasse stationär angeordneten ferromagnetischen Schienenkonstruktion Anziehungskräfte, die das Fahrzeug tragen und führen. Das schwierigste Problem in diesem Zusammenhang stellt die Steuerung und Regelung dieser Anordnung dar, soll doch bei allen Geschwindigkeiten ein Luftspalt zwischen zwei und drei Zentimetern sowohl für das Trag- als auch für das Führungssystem erhalten bleiben. Dies bedeutet für die Praxis, dass mit Stosserregung und damit mit einem Vielfachen der normal notwendigen Erregerleistung gearbeitet werden muss.

Ein weiteres Problem stellt bei hohen Geschwindigkeiten die Rückwirkung der Wirbelströme, die in der ferromagnetischen Schienenkonstruktion induziert werden, auf das Erregerfeld dar. Es treten dadurch Feldschwächungen auf [21], die die Trag- und Führungskräfte wesentlich verringern, wodurch ebenfalls ein höherer Erregungsbedarf erforderlich wird. Ein Ausweg wäre eine lamellierte Ausführung der Trag- und Führungsschienen.

Versuchsfahrzeuge existieren bereits (Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, Kraus-Maffei AG), allerdings werden diese derzeit noch bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten betrieben.

Ein weiteres Problem stellt nun die Versorgung des Linearmotors mit elektrischer Energie dar, so diese nicht im Fahrzeug selbst erzeugt wird [22]. Nach heutigem Stand scheint es aus Gründen der Gewichtsbilanz der Fahrzeuge fraglich, ob es möglich sein wird, Geschwindigkeiten von über 500...600 km/h

zu erreichen [20]. Ein möglicher Weg zur Erreichung höherer Geschwindigkeiten wäre der, den Sekundärteil des Linearmotors auf das Fahrzeug zu verlegen und die Fahrtrasse als Stator auszubilden (Kurzläufertyp). Aus wirtschaftlichen Überlegungen dürfte diese Variante jedoch kaum einer baldigen Realisierung entgegen sehen.

**4.1.2 Antrieb von Nahverkehrsmitteln.** Hierher gehört der Antrieb von Kabinenbahnen und rollenden Gehsteigen, die dazu dienen sollen, den dichten Verkehr in den Großstädten zu entlasten, und vor allem durch Lärm- und Abgasfreiheit die sich dauernd verschlechternden Lebensbedingungen in den Städten wieder etwas zu verbessern [19].

Es soll hier das von Prof. Barthalon entwickelte Unterdrucksystem Dynavac beim sog. Urba-Projekt erwähnt werden. Nach zahlreichen Versuchen, die seit 1965 auf einer kurzen Teststrecke in Lyon mit 4- und 8-Personen-Modellfahrzeugen durchgeführt wurden, läuft derzeit die Erprobung eines 30 Personen fassenden Prototypfahrzeuges (Urba 30) auf einer 1 km langen Teststrecke.

Der Leitgedanke aller Kabinenbahnprojekte besteht darin, die Hauptvorteile des Autos — individuelle Kabine, kurze Reisezeit durch zielreines Fahren mit den Hauptvorteilen der bestehenden öffentlichen Verkehrsmittel wie Sicherheit, ständige Verfügbarkeit usw. zu kombinieren, ohne deren jeweilige Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

Als Beispiel soll hier das Projekt Kabinentaxi (CAT) angeführt werden [19].

Als Fahrbahnträger dient ein Stahlkastenträger von 0,9 m Breite und 1,2 m Höhe, der je eine Fahrbahn für aufgesattelte und für hängende Kabinen sowie die zugehörigen Stromschienen und Linearmotorreaktionsschienen trägt. Die Trasse ist aufgeständert, der Stützenabstand beträgt ca. 40 m. Die Aussenabmessungen der Kabinen die für 2...3 Personen projektiert sind, betragen: Länge 2 m, Breite 1,5 m, Höhe 1,55 m. Das Fahrwerk besteht aus 4 geräuscharm laufenden Tragrollen und zwei seitlich angeordneten Linearmotoren in Doppelstatorausführung, die Reisegeschwindigkeit soll 10...30 km/h betragen.

Rollende Fahrsteige sind seit den 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts immer wieder gebaut worden, vor allem für Ausstellungen, Flughäfen und U-Bahn-Umsteigstationen. Ihre Geschwindigkeit liegt wie bei Fahrtreppen bei etwa 3...4 km/h. Man versuchte schon früher durch Parallelbänder die Geschwindigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen. Neuerdings sind zwei Lösungsansätze bekannt geworden, die den schnellen Fahrsteig (12...20 km/h) wegen seiner hohen Förderkapazität auch für den innerstädtischen Verkehr interessant erscheinen lassen. Die Schwierigkeiten bestehen darin, den Fahrgast in den Stationen auf die relativ hohe Bandgeschwindigkeit zu bringen. Die unter dem Namen Speedway (Dunlop) und Transurban (Kraus-Maffei AG) bekannt gewordenen Systeme scheinen geeignete Lösungen darzustellen. Der Antrieb der kurvengängigen Palettenfahrsteige, die auf Nylonrollen oder Luft- bzw. Magnetkissen laufen, soll durch Linearmotoren mit einer Leistung von 1,5 kW, die in Abständen von ca. 10 m angeordnet sind, erfolgen [19].

## 5. Sonderformen von Linearmotoren

Hierher gehört der ringförmige Linearmotor, der vor allem als Flüssigmetallpumpe und als Antrieb von Schaltern oder Schlagwerken Verwendung findet.



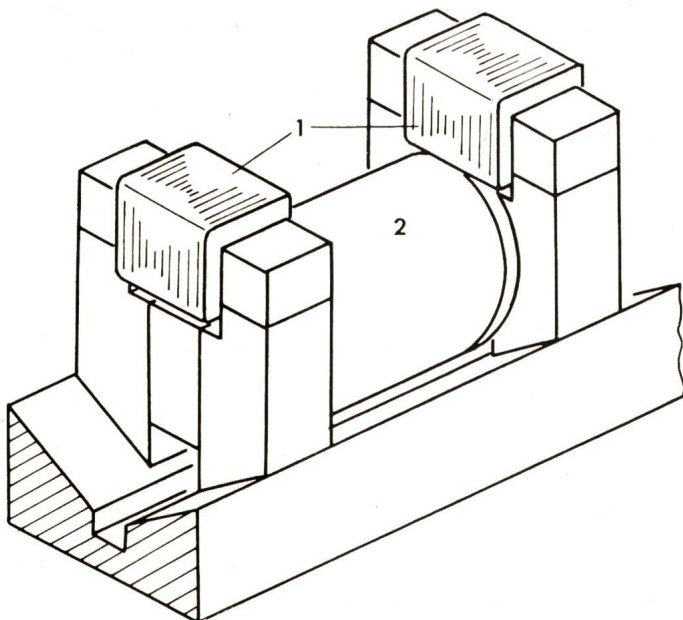


Fig. 6  
**Microstep-Linearmotor**  
 1 Erregerwicklungen  
 2 piezoelektrisches Keramikrohr

Eine weitere Sonderform stellt der sog. Sektormotor dar, der dem Prinzip nach ein Wanderfeldmotor ist, bei dem aber die elektrische Energie wie bei konventionellen Motoren in Rotationsenergie umgeformt wird. Vorteilhaft ist seine Verwendung als Antrieb von Schwungrädern.

Eine besondere Art des Linearmotors stellt der Microstep-Motor dar, der vom Royal Radar Establishment, Malvern, England, entwickelt wurde (Fig. 6). Er beruht auf der Längenänderung eines piezoelektrischen Keramikrohres bei Anlegen einer Spannung. Die Bewegung erfolgt schrittweise entlang einer präzis hergestellten V-förmigen Schiene. Hierbei wird ein Magnetpol erregt, der dadurch gegen die ferromagnetische Schiene gepresst wird, das andere unerregte Ende wird durch die Längenänderung des piezoelektrischen Rohres verschoben. Dann wird der verschobene Magnetschenkel erregt, der andere abgeschaltet und bei Längenänderung des Rohres erfolgt eine Verschiebung des ursprünglich erregten Schenkels usw. Die variablen Schritte betragen  $0,1 \dots 4 \mu\text{m}$ . Die Endposition kann durch Veränderung der angelegten Spannung am Piezorohr auf  $\pm 0,01 \mu\text{m}$  genau eingestellt werden. Der Linearmotor wird von einem Regelsystem angespeist und dient zum Bewegen von Proben in der Elektronenmikroskopie, in der Lasertechnik, in der optischen Industrie, zur Herstellung von integrierten Schaltungen usw.

Weiter existieren eine Reihe von Sonderausführungen von Linearmotoren als Stell- und Schrittmotoren für Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Es soll hier jedoch nur auf ein Prinzip näher eingegangen werden [23].

In Fig. 7 ist das Prinzip eines Stellmotors dargestellt. Ein Hauptpol und zwei Hilfspole 2,2', die mit Kurzschlussringen 3,3' versehen sind, werden von der Hauptwicklung 1, die ein Wechselfeld erzeugt, umschlossen. Die beiden Hilfspole tragen die Steuer- und Kompensationswicklungen 4,4' und 5,5', die von Gleichstrom durchflossen werden. Addieren sich die Gleichdurchflutungen (linker Hilfspol), so gelangt dieser Hilfspol in Sättigung, der Wechselfluss wird über den anderen Hilfspol, der nicht gesättigt ist (Durchflutungen arbeiten einander entgegen), treten. Durch die Phasenverschiebung des Haupt- und Hilfsfeldes entsteht eine Kraftwirkung nach rechts, im anderen Fall nach links. Es ist also mit geringer Gleichstromenergie möglich, mit dieser Anordnung einen trägheitsarmen Stellmotor für Linearbewegung mit hoher Verstärkung zu erhalten. Selbstverständlich werden in der Praxis mehrere Steuerwicklungen pro Hilfspol vorgesehen.

Ein weiterer interessanter Vertreter von Linearmotoren ist der «Zahnstangenmotor»: eine Hybridausführung von linearem und rotierendem Motor [24]. Der Prinzipaufbau ist einfach, einem Stator eines Linearmotors — ohne magnetischen Rückschluss — liegt in einer geringen Entfernung ein kleiner drehbar gelagerter Zylinder gegenüber. Durch die Einwirkung des Wanderfeldes beginnt sich der Zylinder zu drehen und stellt je nach Material einen Asynchronmotor (Zylinder aus Kupfer oder Aluminium), oder einen Synchronmotor (Dauermagnet als Zylinder) bzw. einen Hysteresemotor (Zylinder aus hartmagnetischem Stahl) dar. Kann der Zylinder gleichzeitig auf einer geeignet vorgesehenen Bahn rollen, so führt er eine lineare und rotierende Bewegung aus. Nach bisherigen Erfahrungen dürfte der Hysteresemotor die grösste Bedeutung erlangen, vor allem deshalb, weil hier auch Metall-Keramik-Zylinder Verwendung finden könnten. Das Drehmoment ist gering und nimmt mit der Entfernung Planstator-Zylinder ab. Erfolge verspricht man sich aus der Tatsache, dass der Motor auch noch in Entfernungen von 30 cm und mehr vom Stator betriebsfähig ist und unter extremen Bedingungen, z. B. in lebendem Gewebe und Organismus eingesetzt werden kann.

Abschliessend darf also gesagt werden, dass der Linearmotor durch seine vielfältigen Ausführungsformen und seine Anpassungsfähigkeit in den verschiedensten Bereichen der Technik und Wirtschaft verwendbar ist, das Spektrum reicht von kleinsten Geschwindigkeiten und Leistungen bis zum Antrieb von Höchstgeschwindigkeitsfahrzeugen.

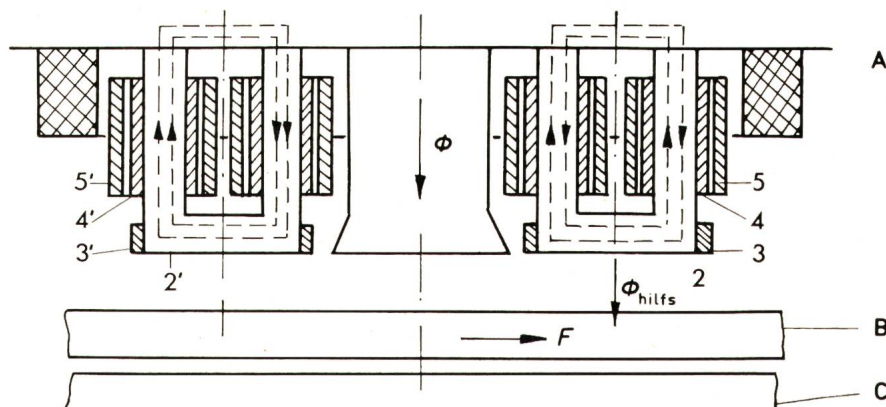


Fig. 7  
**Prinzipanordnung eines linearen Stellmotors**  
 A Stator  
 B Sekundärteil  
 C magnetischer Rückschluss  
 Weitere Bezeichnungen siehe im Text



## Literatur

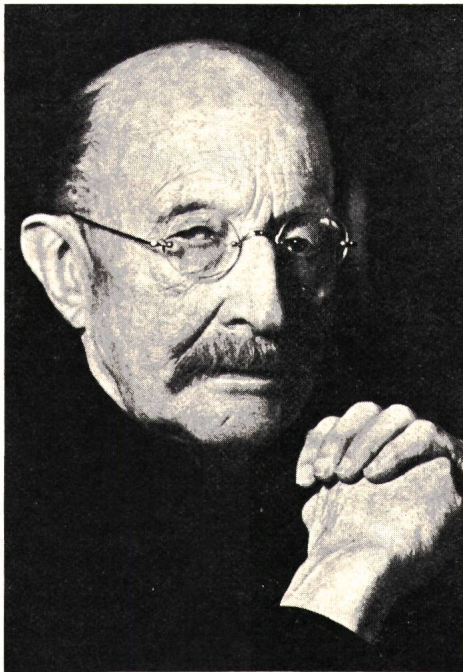
- [1] *Griffith and P. L. Jones*: The direct current linear motor and its applications. Capenhurst, The Electricity Council Research Center, 1969.
- [2] *P. L. Jones*: D. C. linear motors for industrial applications. Electrical Times 156(1969)2, p. 48...51.
- [3] *P.-K. Budig*: Aufbau, Wirkungsweise, Betriebsverhalten und Anwendungsmöglichkeiten von Linearmotoren. Elektrie 24(1970)10, S. 335...340.
- [4] *H. Timmel*: Beitrag zur Vorausbestimmung des stationären Betriebsverhaltens von Kurzständerlinearmotoren. Elektrie 24(1970)10, S. 341...343.
- [5] *E. R. Laithwaite and S. A. Nasar*: Linear-motion electrical machines. Proc. IEEE 58(1970)4, p. 531...542.
- [6] *M. Victorri*: Lineare Induktionsmotoren. ETZ-B 21(1969)23, S. 535...540.
- [7] *H. Weh*: Linearmotoren. VDE-Fachberichte 26(1970), S. 37...43.
- [8] *E. Rummich*: Linearmotoren und ihre Anwendung. E und M 89(1972) 2, S. 60...69.
- [9] *W. Leitgeb*: Linearmotoren für Fahrzeugantriebe. Siemens Z. 45(1971) Beiheft Bahntechnik, S. 177...180.
- [10] *P.-K. Budig*: Einsatzmöglichkeiten von Linearmotoren. Elektrie 25 (1971)6, S. 204...206.
- [11] *K. Erler*: Applikation von Linearmotoren im Transportwesen. Elektrie 25(1971)6, S. 211...212.
- [12] *E. Remy et M. Victorri*: Le moteur linéaire. Rev. Gén. Electr. 78 (1969)4, p. 357...370.
- [13] *W. Klocke*: Anwendung von Linearmotoren in der Schiffbau-Versuchsanstalt. Elektrie 24(1970)10, S. 354...356.
- [14] *E. Sfax*: Antrieb und Positionierung von Fahrzeugen für innerbetrieblichen Transport durch Linearmotoren. Elektrie 24(1970)10, S. 358...361.
- [15] *D. Stölzel*: Einsatz von Linearmotoren im Bergbau. Elektrie 24(1970) 10, S. 361...365.
- [16] *E. R. Laithwaite and G. F. Nix*: Further development of the self-oscillating induction motor. Proc. IEE 107 A(1960)35, p. 476...486.
- [17] *F. Marten*: Einsatzmöglichkeiten neuartiger Bahnsysteme für den Fernverkehr. Siemens Z. 45(1971) Beiheft Bahntechnik, S. 174...177.
- [18] Entwicklungslinien im zukünftigen Schnellverkehr. ETZ-B 23(1971)4, S. 69...71.
- [19] Internationaler Congress Elektrische Bahnen 1971. Technik heute und morgen. München 11...15. Oktober 1971. Vortragsammelband. Berlin, VDE-Verlag, 1971.
- [20] *A. Lichtenberg*: «Magnetisches Schweben» im spurgebundenen Landverkehr. Siemens Z. 45(1971) Beiheft Bahntechnik, S. 181...184.
- [21] *P. Appun und H. Weh*: Wirbelströme im feststehenden Teil von Zugmagneten zur magnetischen Aufhängung von Fahrzeugen. ETZ-A 92 (1971)11, S. 623...627.
- [22] *T. Wittenzellner*: Probleme der Energiezufuhr bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen. Siemens Z. 45(1971) Beiheft Bahntechnik, S. 184...186.
- [23] *D. Teodorescu*: Untersuchungen über einen Verstärker-Stellmotor. ETZ-A 88(1967)13, S. 322...326.
- [24] *E. R. Laithwaite and M. T. Hardy*: Rack-and-pinion motors: hybrid of linear and rotary machines. Proc. IEE 117(1970)6, S. 1105...1112.

### Adresse des Autors:

Dr. techn. *Erich Rummich*, Dipl.-Ing., Hochschulassistent am Institut für Elektrische Maschinen der Technischen Hochschule in Wien, Gusshausstr.25, A-1040 Wien.

## MAX PLANCK

1858—1947



Bibliothek ETHZ

Vor 25 Jahren starb am 4. Oktober in Göttingen der grosse Physiker Max Planck. Anlässlich der Newton-Gedenkfeier von 1946 hatte er noch eine letzte grosse Ehrung erfahren, aber was er in den vorangegangenen Jahren erleben musste, war grauenhaft. Bei einem Luftangriff im Februar 1944 wurde sein Haus samt allem Hausrat total zerstört. Im Januar darauf richteten die Nazi seinen jüngsten Sohn hin, der mit den Verschwörern gegen Hitler in Verbindung gestanden hatte. Im Mai brachten dann die Amerikaner den greisen Planck nach Göttingen in Sicherheit.

Max Planck wurde am 23. April 1858 in Kiel geboren. Wenig später hatte man seinen Vater, einen Jurist, als Professor nach München berufen. Der junge Planck fühlte sich zur Musik hingezogen, entschied sich dann aber für das Studium der Mathematik und der Naturwissenschaften; das Klavierspiel pflegte er aber bis ins hohe Alter. Nach einigen Münchner Semestern hörte er in Berlin Vorlesungen von *Kirchhoff* und *Helmholtz*, doch interessierte er sich mehr für die Theorie der Wärmelehre von *Clausius*. Das Thema seiner Doktorarbeit hatte er ohne Wissen seiner Professoren gewählt und die Arbeit auch ohne jede Beratung fertiggestellt.

Nach München zurückgekehrt, habilitierte er 1880 an der dortigen Universität als Privatdozent. Fünf Jahre später berief ihn Kiel als Nachfolger von *Hertz*. Nach dem Tode *Kirchhoff's* veranlasste *Helmholtz* seine Berufung nach Berlin, wo er bis zu seinem Rücktritt im Jahre 1928 wirkte.

Seine ersten Arbeiten betrafen die Thermodynamik, vorwiegend die Entropie. Bei Untersuchungen über die Strahlung fand Planck das nach ihm benannte Strahlungsgesetz. Darnach verschiebt sich das Maximum der von einem schwarzen Körper ausgestrahlten Energie mit zunehmender Temperatur nach kleinen Wellenlängen (am 19. Oktober 1900 vorgetragen). Bei der weiteren Bearbeitung stiess er auf die Tatsache, dass Energie nur als ganzes Vielfaches eines Elementarquants auftreten kann.

In einem Vortrag am 14. Dezember 1900 vor der Physikalischen Gesellschaft Berlin erfuhr die Fachwelt erstmals von seiner Entdeckung, die inzwischen uns allen unter dem Namen Plancksches Wirkungsquantum bekannt geworden ist.  $E = h\nu$ , wobei das Wirkungsquantum  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Js beträgt.

Während Planck selber sich der Bedeutung der Entdeckung durchaus bewusst war, doch aus Bescheidenheit nach aussen nichts davon merken liess, nahmen die Wissenschaftler anfänglich wenig Notiz davon. *Albert Einstein*, mit dem er befreundet war und dessen Violinspiel er während dessen Berlinaufenthalt auf dem Klavier begleitete, war einer der ersten, die daraus Nutzen zogen. 1905 wies er mit der Quantentheorie die Existenz des Lichtquants nach.

Tiefgreifende Folgen bekam die Entdeckung für die Vorstellungen über den Atombau. 1913 gelang es *Bohr* durch Berücksichtigung der Quantentheorie das Rutherford'sche Atommodell wesentlich zu verbessern. Im neuen Modell kreisen die Elektronen nur auf ganz bestimmten, eben durch die Vielfachen des Wirkungsquants festgelegten Bahnen – den sog. Schalen – um den Atomkern.

1919 wurde Planck der Nobelpreis zugesprochen und erhielt in der Folge zahlreiche Ehrendoktorate. Trotzdem blieb er stets der bescheidene, aufrechte Mensch. Neben seinen Verpflichtungen an der Hochschule versah er fast 25 Jahre lang den Posten eines Sekretärs an der Preussischen Akademie, ferner war er Präsident der Physikalischen Gesellschaft sowie der Kaiser Wilhelm-Gesellschaft.

Zu seinen Ehren wurde die Max Planck-Medaille geschaffen und als Erstem ihm selber verliehen. Die Kaiser Wilhelm-Gesellschaft nahm nach dem Krieg den Namen Max Planck-Gesellschaft an. Heute ziert sein Kopf ein Geldstück (2 Mark), eine Ehrung, die sonst nur gekrönten Häuptern oder Politikern vorbehalten ist.

H. Wüger