Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 9

Artikel: Magnetische Schwebetechnik für Schnellbahnen

Autor: Weh, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915547

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Magnetische Schwebetechnik für Schnellbahnen

Von *H. Weh*

625.39:62-219.527

Die Überlagerung eines Schnellbahnsystems über die bestehenden Verkehrseinrichtungen ist Gegenstand von Studien und Planungen in vielen Ländern der Welt. Eine hohe Ausnutzbarkeit der Trasse und der Wunsch, die grosse Sicherheit und Witterungsunabhängigkeit der spurgeführten Fahrzeuge mit dem Trend zu höheren Reisegeschwindigkeiten in Einklang zu bringen, haben zu Modellvorstellungen geführt, denen Geschwindigkeiten zwischen 250 bis hinauf zu 500 km/h zugrunde liegen.

Abhängig von der den neuen Verkehrsadern zugedachten Aufgaben, d. h. je nach dem, ob sie für kombinierten Transport von Personen, Gütern und evtl. Fahrzeugen dienen, oder ob sie überwiegend auf den Personen-Schnelltransport ausgerichtet sind, werden unterschiedliche Geschwindigkeiten angestrebt.

In die besonders den Verkehrsplaner interessierende Diskussion sind frühzeitig Anregungen aus dem Bereich der technischen Entwicklung eingeflossen; Luftkissen- und Tragsysteme aus dem Bereich der Elektrotechnik konkurrieren mit dem Rad-Schiene-System. Berührungsfreie Spurführungstechniken weisen gegenüber dem Rad potentielle Vorzüge auf, die besonders bei Geschwindigkeiten über 250 km/h (auf Grund fahrdynamischer Gegebenheiten beim Rad) zum Tragen kommen. Dabei ist allerdings zu sagen, dass eine absolute Grenze für die Anwendung des Rades bisher noch nicht ausgelotet wurde und damit ein breiter Bereich der Überlappung für die mögliche Anwendung beider Verfahren gegeben ist.

Bei der Behandlung der magnetischen und elektrodynamischen Trag- und Führungseinrichtungen entsteht die Frage nach einer geeigneten Bewertung. Zur Beurteilung stehen Kriterien wie Leistungsaufwand, Gewicht, Materialanforderungen für die Spurführungselemente der Trasse, Aufwand an elektronischen Stellgliedern, Störanfälligkeit usw. im Vordergrund. Dabei ist allen hier zu beschreibenden Tragsystemen des Bereiches Elektrotechnik gemeinsam, dass sie die Voraussetzung einer minimalen Umweltbeeinflussung erfüllen.

Ähnlich wie beim Luftkissen, dessen Druck je nach Art des verwendeten Strahlers zwischen etwa 0,5 und 1 kp/cm² liegt, sind auch bei den magnetischen Tragverfahren vergleichsweise niedrige Anpressdrücke für die Tragschiene gegeben. Der hohen, nahezu punktförmigen Schienenbeanspruchung beim Rad steht also bei den neuen Verfahren eine mehr grossflächige Kraftübertragung gegenüber. In allen Fällen sind damit auch die Spurführungselemente für einen grösseren Eingriffsquerschnitt gegenüber dem Fahrzeug zu bemessen. Je nach Wirkungsweise des Verfahrens werden unterschiedliche Materialanforderungen gestellt, die in Einzelfällen auch die Kosten einer Trasse nennenswert beeinflussen können.

Darüber hinaus ist allen berührungsfreien Tragverfahren auch gemeinsam, dass sie dazu beitragen, die mit steigender Geschwindigkeit sehr störenden Verschleissprobleme in nahezu vollendeter Form zu lösen. Gleichzeitig setzen sie die Übertragung der notwendigen Vortriebskräfte ebenfalls in berührungsfreier Weise voraus. Es müssen also entweder elektrische Linearmotoren oder Luftfahrttriebwerke die Schuberzeugung übernehmen. Die Anwendung adhäsionsloser Antriebsverfahren ist bei Geschwindigkeiten über 250 km/h nach bisherigen Erfahrungen eine wünschenswerte Massnahme, weil der Haftbeiwert zwischen Rad und Schiene mit zunehmender Geschwindigkeit auf niedrigere Werte absinkt, wodurch die Schubübertragung durch das Rad problematisch wird.

Permanentmagnete

Seit längerer Zeit sind Permanentmagnete bekannt, deren abstossende Kräfte grösser sind als ihr Eigengewicht. Der Zusammenhang zwischen Kraft und Abstand führt – wenn sich gleichnamige Pole gegenüberstehen – zu einem in einer Richtung stabilen Verhalten; einem kleineren Abstand entspricht eine grössere Kraft und umgekehrt. Die ersten Vorschläge zur Anwendung von Permanentmagneten in Fahrzeugen mit berührungsfreier Spurführung gehen auf *G. B. Polgreen* zurück [1][1]), der bereits auf die Bedeutung der Materialentwicklung auf dem Gebiet dieser Magnete hinwies (Fig. 1). Mit Barium-Ferrit-Magneten, deren Entwicklung in den 50er Jahren eingesetzt hat und heute als abgeschlossen anzusehen ist, lassen sich recht brauchbare Ergebnisse für die magnetische Schwebeführung erzielen.

Mit einer Induktion von 0,35 T ergeben sich Magnetanordnungen, bei denen der Anteil des Magnetgewichtes im Fahrzeug etwa 13 % beträgt, wobei ein Spalt von 15 mm zwischen Fahrzeug und Schiene vorausgesetzt wurde. Unter der Annahme, dass die Magnetbelegung im Fahrzeug und längs

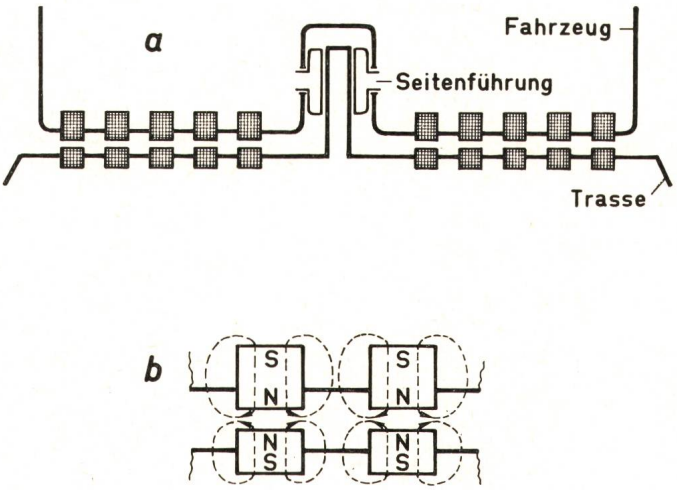

Fig. 1
Magnetische Stützung durch Permanentmagnete
a Anordnung der Permanentmagnete
b Feldlinien der Magnete

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

der Fahrbahn gleich ist, erreichen die Fahrbahnkosten für ein 1,5 Mp/m schweres Fahrzeug 0,75 MDM/km. Hierbei wurde angenommen, dass die Hartferritmagnete bei grosstechnischer Herstellung 3 DM/kg kosten. Zu erheblich niedrigeren Fahrbahnkosten führt die Verwendung von Magneten mit noch höheren Energiewerten wie etwa die Seltenerd-Kobaltlegierung $SmCO_5$ im Fahrzeug. Ihre magnetische Induktion wird mit 0,9 T angegeben, allerdings ist ihre Dichte mit 8 g/cm³ nahezu doppelt so gross wie diejenige der Barium-Ferritmagnete [2]. Gegenwärtige Preisschätzungen der noch in Entwicklung befindlichen Magnete mögen noch nicht endgültig sein, deuten jedoch auf erheblich höhere Endpreise, auch bei grosstechnischer Herstellung. Die Materialentwicklung auf dem Gebiet der Permanentmagnete ist bestimmt durch die Forderung nach einer möglichst hohen magnetischen Induktion, die das Feld im Aussenraum bestimmt und einer grossen Koerzitiv-Feldstärke, als Mass für eine Verhinderung der Entmagnetisierung durch die Gegenpole.

Zu den Besonderheiten der Schwebetechnik mit Hilfe von Permanentmagneten gehört, dass die Relativbewegung zwischen den sich entgegenwirkenden magnetischen Feldern nur zu verschwindenden Verlusten im Magnetmaterial führt. Es ist ebenfalls eine Besonderheit, dass seitliche Auslenkungen des Fahrzeugs aus der Mittellage zu rasch ansteigenden destabilisierenden Kräften führen. Das zusätzlich zum Tragsystem notwendige Seitenführungssystem hat bei unvermeidlichen Auslenkungen die durch das Tragsystem verursachten Seitenkräfte mit aufzunehmen. Diese Erkenntnis ist im Einklang mit dem auf Grund von Energiebetrachtungen aufgestellten Postulat von *Earnshaw,* wonach bei Permanentmagneten eine stabile Abstützung in einer Koordinatenrichtung zu einer vergrösserten Instabilität in dazu orthogonalen Richtungen führt. Zu den vermutlich leichter behebbaren Nachteilen der Permanentmagnete zählt das Problem der ohne Anwendung besonderer

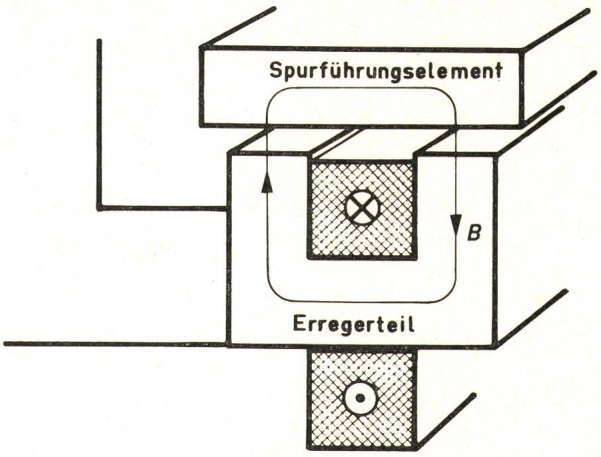

Fig. 2
Zugmagnet als Tragelement
B Feldlinie

Hilfsmittel verhältnismässig kleinen Dämpfung gegenüber Fahrzeugschwingungen. Die Steilheit der Federkennlinie lässt Fahrzeugeigenfrequenzen im Bereich von 3 Hz erwarten.

Gleichstrom-Elektromagnet

Historisch noch weiter zurück datieren die ersten Vorschläge für die Heranziehung des Gleichstrom-Elektromagneten zur Schwebeführung von Fahrzeugen. In den 30er Jahren verdichteten sich die Ideen von *H. Kemper* zu Patentanmeldungen und ersten Funktionsmodellen. Hier ging es in erster Linie um die Stabilisierung der Kräfte zwischen zwei Teilen eines ferromagnetischen Eisenkreises, wobei ein Teil dem Spurführungselement (Schiene), der andere Teil dem im Fahrzeug zu installierenden Magnet entspricht. (Fig. 2). Die Stabilisierung des an sich instabilen Zusammenhanges zwischen Anziehungskraft

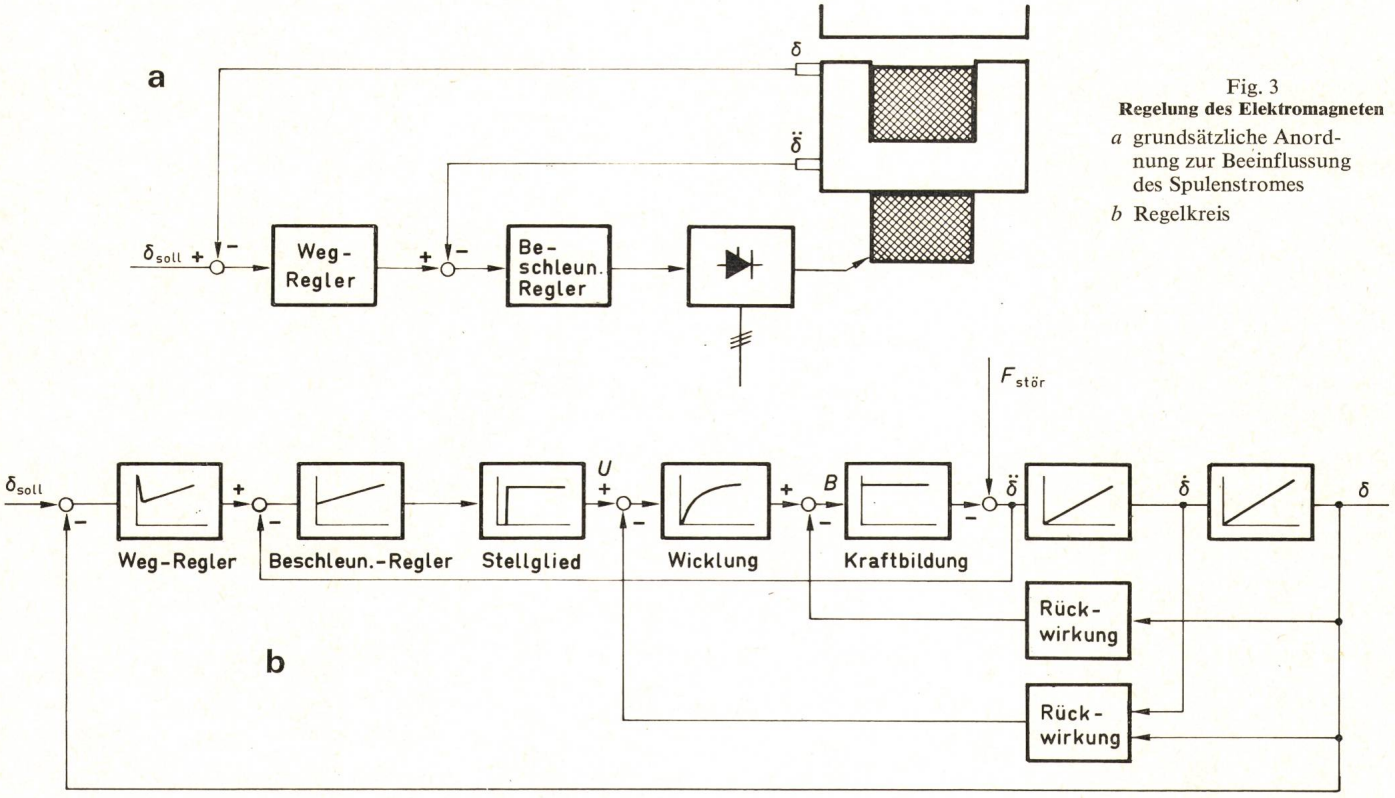

Fig. 3
Regelung des Elektromagneten
a grundsätzliche Anordnung zur Beeinflussung des Spulenstromes
b Regelkreis

und Abstand erfolgt durch lageabhängige Beeinflussung des das magnetische Feld bestimmenden elektrischen Stromes. Während *H. Kemper* gezwungen war, hierbei noch Elektronenröhren als Verstärker zu verwenden, stehen heute in Transistoren und Thyristoren wesentlich besser geeignete Schaltelemente zur Verfügung. Sie werden zur weitgehend verlustlosen Beeinflussung der Spulenspannung herangezogen. Fig. 3 zeigt ein denkbares Schema für die Regelung, bei dem ausser dem Abstandssignal auch die Beschleunigung zur besseren Stabilisierung mit in die Regelung eingeführt wird. Bei Abweichungen von der Sollage erfolgt eine Aussteuerung des Spulenstromes und damit der die anziehende Kraft bestimmenden magnetischen Induktion. Es zeigte sich bei den zahlreichen inzwischen durchgeführten Experimenten, dass im Grenzfall eine Verdoppelung des Sollwertes der Kraft nach oben bzw. eine Absenkung auf Null durch Entregung der Spule zur Lösung dieser Aufgabe ausreichen. Die Geschwindigkeit, mit der die Auferregung und die Entregung erfolgen, ist ein Mass für die erzielbare Steifigkeit der Kennlinie und bestimmt die Eigenfrequenz der Fahrzeugschwingungen, für die bei harter Ankoppelung 5...6 Hz

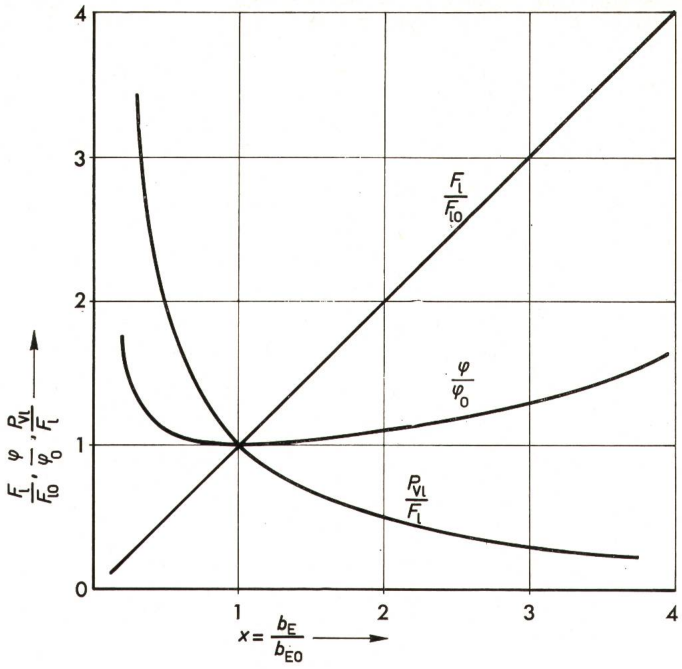

Fig. 5
Tragkraft, Magnetgewicht und Verluste bezogen auf den optimalen Entwurf
Bezeichnungen siehe Fig. 4

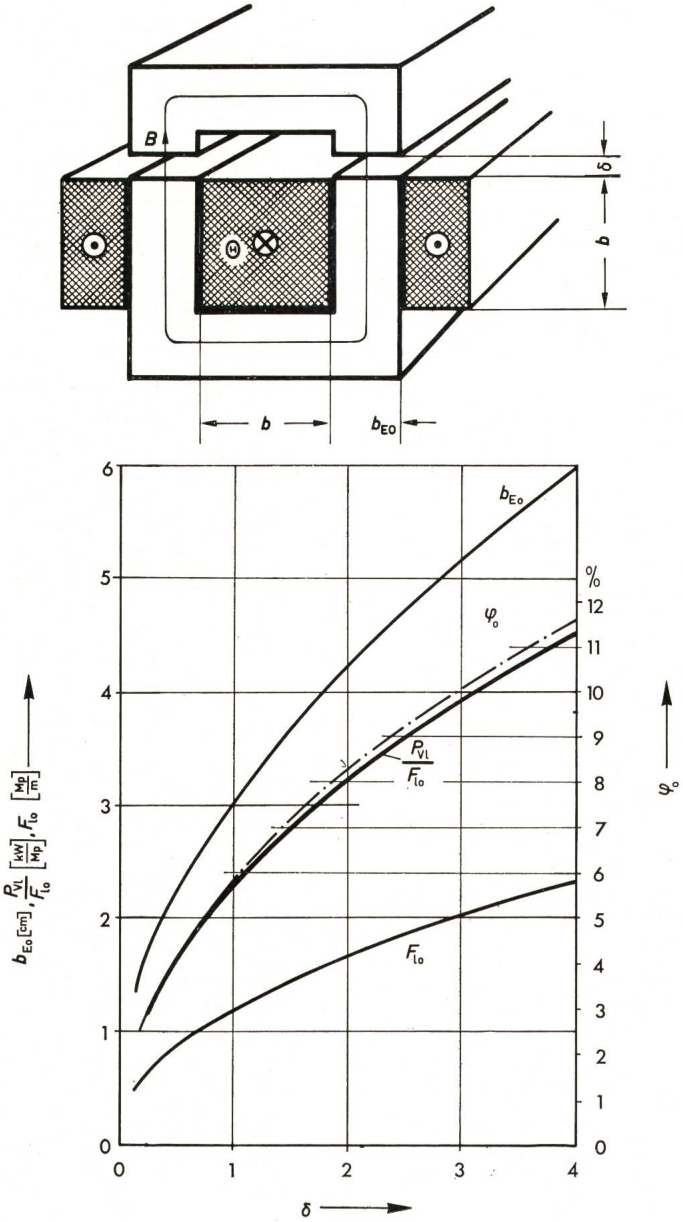

Fig. 4
Optimierte Tragmagnete
Bezeichnungen siehe im Text

erreichbar sind. Hohe Ansprechgeschwindigkeit der Regelung erfordert bei gegebener Zeitkonstante des Magneten eine entsprechende Spannungsbeeinflussung. Um zunächst eine Übersicht über das durch die Magneten beanspruchte Teilgewicht des Fahrzeuges, über den Leistungsbedarf in Abhängigkeit von Tragkraft und Luftspalt zu geben, sei ein Beispiel eines Tragmagneten unter etwas vereinfachten Annahmen durchgerechnet.

Ein Magnet mit quadratischem Wicklungsquerschnitt erzeugt bei einer Stromdichte von 4 A/mm² (verstärkte Kühlung) eine magnetische Induktion im Spalt von 0,7 T. Legt man Al als Wicklungsmaterial zugrunde, dann lässt sich bei Vernachlässigung der magnetischen Spannung im Eisen in Abhängigkeit vom Luftspalt δ die Eisenbreite b_{E0} ausrechnen, bei der das im Fahrzeug anzuordnende Magnetgewicht ein Minimum hat (Fig. 4). Bei einem Luftspalt von 1,5 cm ist $b_{E0} = 3{,}65$ cm, das Verhältnis von Magnetgewicht zu Tragkraft $\varphi_0 = 7{,}15\,\%$ und die Tragkraft F_{l0} selbst etwa 1,4 Mp/m (2 Schienen 2,8 Mp/m). Durch den Strom in der Al-Wicklung entstehen Verluste, die auf die Tragkraft bezogen bei etwa 2,8 kW/Mp liegen. Eine Vergrösserung des Spaltes führt auf schwerere Magneten mit erhöhten Verlusten. Um eine grössere Tragkraft, z. B. 3 Mp/m pro Seite zu erzielen, ist mit Fig. 5 eine Abweichung vom Optimum und die Wahl von $b_E/b_{E0} = 2{,}15$ geboten. Dies hat eine geringfügige Erhöhung des bezogenen Gewichtes auf etwa 8 % und eine Absenkung der bezogenen Verluste auf 1,25 kW/Mp zur Folge. Nimmt man an, dass etwa 50 % der Fahrzeuglänge mit Tragmagneten bestückt ist, so wäre bei einem solchen Fahrzeug mit zwei Magnetreihen ein Gewicht von 3 Mp/m anzusetzen. Fig. 5 zeigt, dass auch bei einer weiteren Verbreiterung des Eisens zur Steigerung der magnetischen Tragkraft das bezogene Magnetgewicht nur langsam ansteigt und die bezogenen Verluste umgekehrt proportional zur Tragkraft fallen. Mit zunehmender Magnetbreite wachsen die Kosten etwa proportional für die Spurführungseinrichtung längs der Trasse.

Das beschriebene Beispiel, bei dem die Zugkraft ungefähr 2 kp/cm² beträgt, erhebt keinen Anspruch, die bestmögliche Magnetauslegung zu sein. Wie Fig. 6 zeigt, das mit den Mitteln der Feldtheorie gerechnet wurde, ist der Streufluss eines Magneten mit grossem Spalt nicht vernachlässigbar, ebenso sind für die endgültige Auslegung die magnetische Spannung im Eisen und der tatsächliche Verlauf der Feldlinien im Bereich des Luftspaltes zu berücksichtigen. Bei Anwendung von Polschuhen (Verbreiterung des Eisens im Polbereich) können bei nicht zu grossem Streufluss Gewichtseinsparungen erwartet werden.

Die Bewegung des Fahrzeuges verursacht ein Wandern des magnetischen Feldes in der Schiene und damit einen Ummagnetisierungsvorgang; ausserdem werden Wirbelströme im ferromagnetischen Material induziert. Letztere sind – ausser von der Geschwindigkeit – von der Formgebung des Magneten und den Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit) des Schienenmaterials abhängig [3].

Der Wirkung der Wirbelströme entspricht ein geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand und eine Schwächung des magnetischen Feldes, dem durch Vergrösserung des Spulenstromes begegnet werden muss. Durch Lamellierung der Schiene können diese Erscheinungen auf einen nahezu bedeutungslosen Umfang herabgesetzt werden. Da die Blechung einen Einfluss auf die Kosten der Spurführungselemente besitzt, wird ein Kompromiss zwischen Wirbelstromeinfluss und dem zusätzlichen Aufwand zu schliessen sein.

Als Stellglied für den Strom des Magneten kommt entweder ein gesteuerter Gleichrichter, z. B. mit Thyristoren als Schaltelementen, die in Phasenanschnittssteuerung betrieben werden, in Frage, oder es wird ein ungesteuerter Gleichrichter mit nachgeschaltetem Gleichstromsteller verwendet. Geht man von einer 50-Hz-Versorgungsspannung aus, dann erweist sich die zweite Schaltungsvariante wegen ihrer kleineren Totzeiten als günstiger.

Wird für die elektronischen Stellglieder nach heutigem Stand ein Gewicht von etwa 15...20 kp/kW vorgesehen, so sind in Anbetracht der oben erwähnten elektrischen Leistung dem Magnetgewicht weitere 1,5...2 % hinzuzuschlagen, so dass insgesamt etwa 10 % für Magnete mit Stromversorgung anzusetzen sind. Bei dieser etwas überschlägigen Betrachtung sind die zur Seitenführung notwendigen Massnahmen noch nicht berücksichtigt, und es ist vorausgesetzt, dass der Luftspalt 15 mm beträgt.

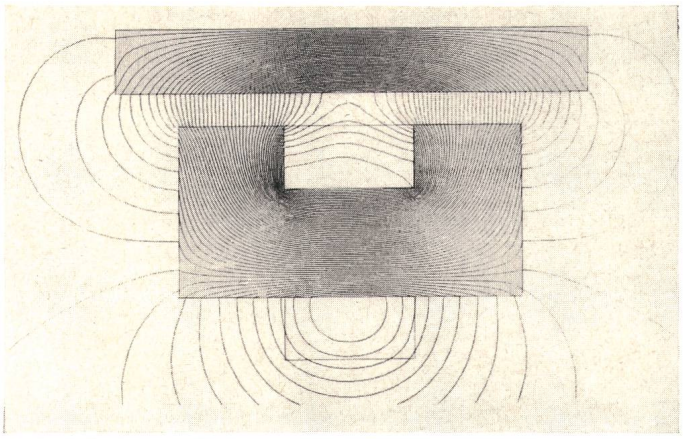

Fig. 6
Feldliniendarstellung für einen Zugmagneten

Fig. 7
MBB-Prinzipfahrzeug

Die in Deutschland zunächst von der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) und kurz danach auch von Krauss-Maffei (KM) mit Unterstützung des Bundes aufgenommene Entwicklung der magnetischen Schwebetechnik hat zu zwei grösseren Versuchsfahrzeugen (5 und 11 Mp-Gewicht) geführt, die 1971 vorgestellt wurden (Fig. 7 und 8) [4]. Beide Fahrzeuge sind durch asynchrone Linearmotoren angetrieben und haben

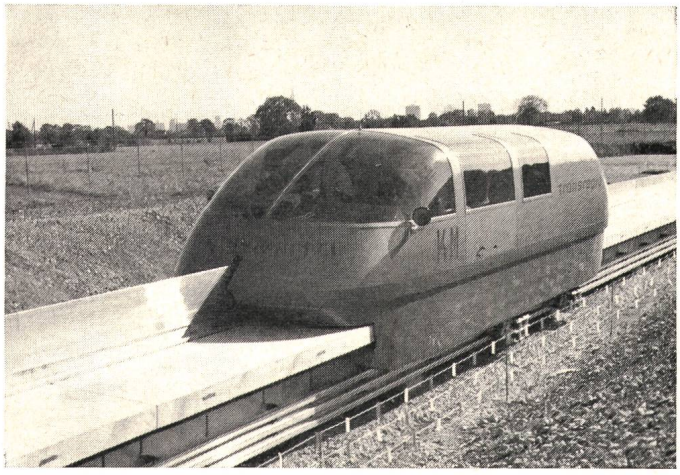

Fig. 8
Krauss-Maffei-Prinzipfahrzeug

Geschwindigkeiten von 70 bzw. 150 km/h erreicht. Die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit der elektromagnetischen Spurführung wurde bestätigt. In bezug auf die verwendeten Seitenführungseinrichtungen wurden ebenso wie hinsichtlich des verwendeten Federungskonzeptes unterschiedliche Wege beschritten. Das MBB-Fahrzeug ist mit einer elektrisch und magnetisch völlig entkoppelten, d. h. vom Tragmagneten unabhängigen Seitenführungseinrichtung ausgestattet. Sie entspricht einer um 90° gedrehten Trageinrichtung (Fig. 9). Bei Auslenkungen aus der Mittellage wird durch Aussteuerung der entsprechenden Führungsmagnete eine Rückstellwirkung erzeugt. Die beim KM-Fahrzeug angewendete Lösung kommt ohne zusätzliche Führungsmagnete aus. Das Spurführungselement ist als U-Schiene ausgebildet, so dass bei Auslenkungen des Magneten aus der Mittellage Rückstellwirkungen, etwa proportional der Auslenkung, auftreten. Zwei gegenüber der Schiene versetzte Magnete sind entsprechend Fig. 10 jeweils als Steuereinheit zu betrachten. Sie ermöglichen sowohl die Einhaltung einer konstanten Tragkraft als auch das Aufbrin-

gen seitlicher Führungskräfte durch Aussteuerung der Wicklungen. Ein grosser Stromhub der Magneten ist hierfür Voraussetzung.

Zur Erzielung ausreichend niedriger Beschleunigungskräfte auf den Fahrgast werden unterschiedliche Lösungen verfolgt. Es wird einerseits der Weg beschritten, durch entsprechende Gestaltung des Frequenzganges der Regelung, deren Ansprechen auf grosse und kleine Störfrequenzen unterschiedlich zu gestalten und so zu beeinflussen, dass das Fahrzeug annähernd einer idealen Spur folgt, wobei die durch Ungenauigkeiten verursachten (höherfrequenten) Störungen nicht zur Aussteuerung der Magnetwicklung führen. Im anderen Fall wird mit Hilfe einer verhältnismässig harten nicht selektiven Regelung der Magneten gearbeitet und ein aktives Federungssystem zwischen Magnete und Fahrgastzelle geschaltet.

Eine andere Möglichkeit zur Erzeugung von Seitenführungskräften, den magnetischen Kreis des Tragmagneten auszunutzen, besteht z. B. darin, dass – wie Fig. 11 zeigt – im Tragmagnet eine zweite Wicklung untergebracht und diese unabhängig vom Strom des Tragmagneten gespeist wird. Steht eine U-Schiene als Anker zur Verfügung, so kann durch Aussteuerung der Führungswicklung in jeder Lage, also auch ohne seitliche Auslenkung, eine Stellkraft aufgebracht werden. Die Messergebnisse eines kleineren Modells sind in Fig. 12 aufgetragen, das einen annähernd linearen Zusammenhang für das Verhältnis Seitenkraft zu Tragkraft in Abhängigkeit von der seitlichen Versetzung bei unterschiedlichen Steuerdurchflutungen erkennen lässt. Die Untersuchungen wurden im Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TU Braunschweig durchgeführt. Der für die Seitenführung erforderliche zusätzliche Materialaufwand ist verhältnismässig klein, ebenso die Zeitkonstante der Zusatzwicklung.

Elektrodynamische Trag- und Führungssysteme

Funktionsprinzip

Betrachtet man ein Spulenpaar 1 und 2, wobei die Spule 1 vom Wechselstrom durchflossen wird, dessen magnetisches Feld die Spule 2 durchsetzt, so wird dort ein Strom induziert. Diese Anordnung entspricht damit zumindest grundsätzlich derjenigen eines sekundärseitig kurzgeschlossenen Transformators. Der Strom i_2 weist gegenüber dem Primärstrom i_1 eine Phasenverschiebung auf, die verhältnismässig gross ist und im Grenzfall einer sehr guten Kopplung gegen 180° geht. Mit der Komponente B_x der magnetischen Induktion bildet der Strom eine nach oben gerichtete Kraft (je Längeneinheit der Spule $B_x\, i_2$), so dass, wie vom Transformator her bekannt ist, zwischen den Spulen abstossende Kräfte wirken. Diese sind wegen der Proportionalität zwischen B_x und i_1 der Grösse des Strom- bzw. Durchflutungsproduktes der Spulen proportional). Der Induktionsvorgang bewirkt bei kleinerem Abstand durch die engere Koppelung einen grösseren Strom und damit eine grössere Kraft, so dass eine stabile Kennlinie für den Zusammenhang zwischen Kraft und Weg entsteht. Dieses Grundprinzip der elektrodynamischen Trageinrichtung kommt nun in zahlreichen Vorschlägen in vielfach variierter Form vor. Es mag interessieren, dass die ersten Versuche auf dem Gebiet der magnetischen Schwebetechnik auf der Anordnung der Fig. 13 beruhen, wobei für die feststehenden Primärspulen eine Speisung mit 50 Hz vorgesehen war und der Sekundärteil aus einer homogenen Schiene ausreichender elektrischer Leitfähigkeit bestand (die als unendliche Folge von Einzelspulen betrachtet werden kann und die im Fahrzeug untergebracht war, *Emile Bachelet* 1912).

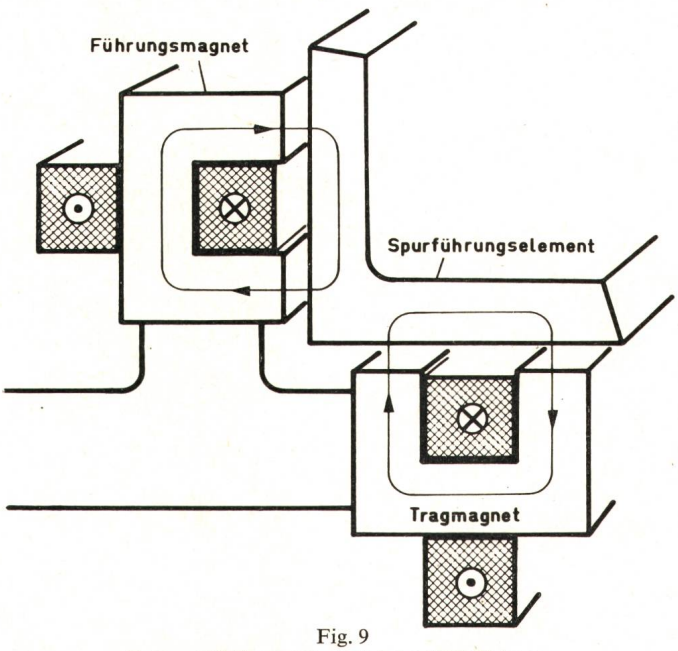

Fig. 9
Trag- und Führungsmagnete beim MBB-Fahrzeug

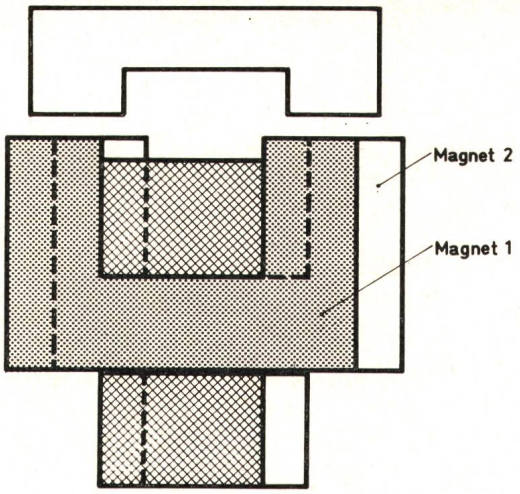

Fig. 10
Versetzte Magneten als Trag- und Führungselemente wirkend
(System Krauss-Maffei)

Auch im Demonstrationsmodell Fig. 14 wird der Sekundärstrom i_2 in einer Al-Scheibe, also einem homogenen Leiter, erzeugt. Mit dieser Versuchseinrichtung kann auch gezeigt werden, dass Tragkräfte auf die Scheibe ausgeübt werden, wenn die Spule 1 durch Gleichstrom erregt wird. Allerdings ist hierzu eine genügend grosse Relativgeschwindigkeit der Scheibe gegenüber dem Magneten 1 erforderlich (Antrieb durch Elektromotor). Die für den Strom i_2 massgebende induzierte Spannung wird in diesem Fall durch eine Feldänderung hervorgerufen, die durch die Relativgeschwindigkeit bestimmt ist. Damit ist zu erkennen, dass im Stillstand keine Tragkräfte erzeugt werden können. Ein grosser Vorteil der Gleichstromerregung besteht darin, dass die im Falle eines eisenarmen magnetischen Kreises besonders grosse Blindleistung entfällt.

Supraleitung

Die Anwendung der Supraleitung zur elektrisch verlustlosen Führung des Stromes i_1 bietet sich deshalb an, weil sehr grosse Produkte der Durchflutung und damit sehr grosse Primär-

durchflutungen zur Erzeugung der Tragkräfte von einigen Mp/m bereitgestellt werden müssen. Die Spulendurchflutung der eisenlosen magnetischen Kreise liegt über den Durchflutungswerten der geregelten Zugmagnete. Als Vorteil kommt hinzu, dass bei widerstandslosen Primärspulen auch stationär eine Flusskonstanz erzwungen wird, die zu einer Erhöhung der Steifigkeit der Tragkennlinie gegenüber stromgespeisten Spulen führt.

Ein systembedingter Nachteil aller elektrodynamischen Trageinrichtungen besteht darin, dass im Sekundärteil Ströme endlicher Grösse vorhanden sein müssen, die dort (für normal leitenden Sekundärleiter) zu entsprechenden Verlusten führen. Diese Verlustleistung muss mechanisch, also durch die Vortriebskraft des Antriebs, gedeckt werden. Mit entsprechend grossen Leiterquerschnitten gelingt eine Verkleinerung der Verluste.

In Fig. 15 ist für ein Rechenbeispiel das Verhältnis von elektrisch bedingter Bremskraft F_x zur Tragkraft F_y (Fahrzeuggewicht) über der Geschwindigkeit v_x aufgetragen.

Als Vergleichswert sei auf den Luftwiderstand längerer Fahrzeuge hingewiesen, der bei 500 km/h etwa 4% des Fahrzeuggewichtes erreicht, wenn strömungsgünstige Gestaltung vorausgesetzt wird. Im oberen Geschwindigkeitsbereich ist annähernd bei von v unabhängigen Strömen $F_y = \text{const}$, $F_x \approx 1/v$ zu erwarten, so dass die Verlustleistung P_v ebenfalls nur wenig von v abhängt. Die den verschiedenen Schienendicken entsprechenden Verluste sind auf die Tragkraft bezogen angegeben.

Sehr stimulierend wirkten die Vorschläge von Powell und Danby [5], die zum Ziel haben, die Verlustleistung durch ein besonderes Erregersystem, die sog. Null-Fluss-Anordnung weiter zu senken. Fig. 16 zeigt den Vorschlag im Prinzip. In der Mittellage (Fahrzeuggewicht Null) wird vom Fluss der Primärspule in der feststehenden Leiteranordnung auch bei Bewegung kein Strom induziert, da die induzierten Spannungen sich aufheben. Bei Auslenkungen aus der Mittellage überwiegt die Induktionswirkung der jeweils engeren Kopplung (kleinerer Abstand) und führt zu abstossenden Kräften auf der einen, zu anziehenden auf der anderen Seite. Der hauptsächliche Vorzug dieses Differenzflussverfahrens beruht darin, dass einer bestimmten Primärdurchflutung eine im Vergleich zum Normalverfahren kleinere Sekundärdurchflutung zugeordnet wird. Bestimmte Tragkräfte, die vom Produkt Primär- mal Sekundärdurchflutung abhängen, lassen sich mit kleineren Verlusten

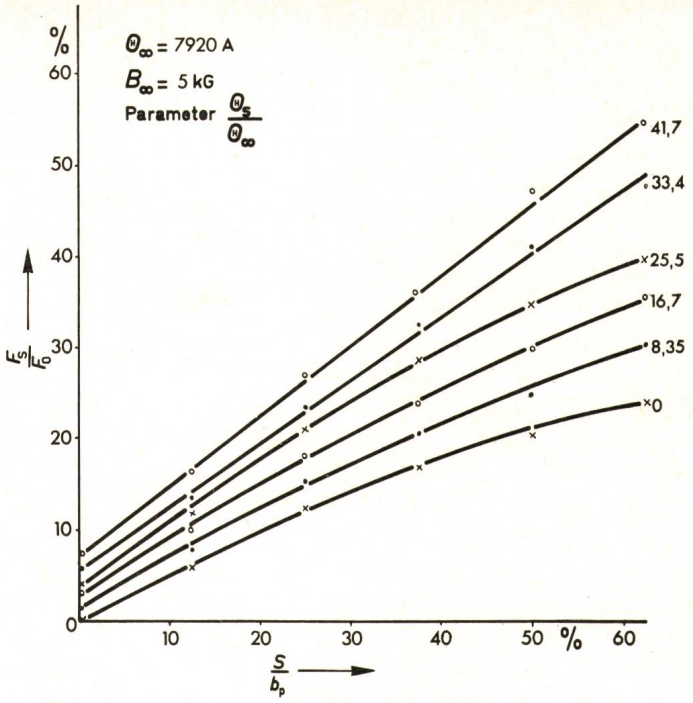

Fig. 12
Verhältnis von Seitenkraft zu Tragkraft in Abhängigkeit von der Verschiebung S bezogen auf die Polbreite

Parameter ist das Verhältnis der elektrischen Durchflutung Θ_s der Führungswicklung zur Durchflutung Θ_s der Hauptwicklung

F_s Seitenkraft
F_0 Tragkraft bei Auslenkung 0
B_∞ magn. Induktion bei $\Theta_s = 0$
S seitliche Verschiebung
b_p Polbreite

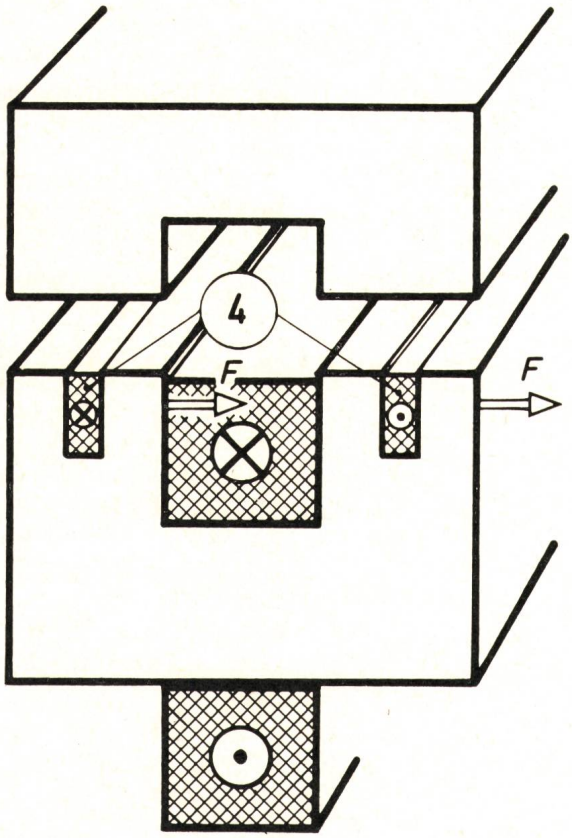

Fig. 11
Magnet mit zusätzlicher Wicklung als Trag- und Führungselement

F Seitenkraft
4 Steuerspule

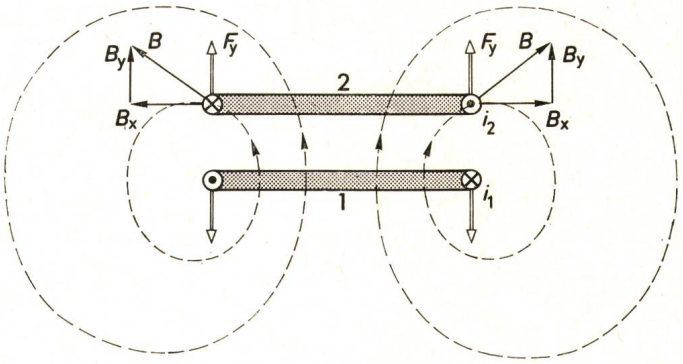

Fig. 13
Grundprinzip eines elektrodynamisch wirkenden Tragsystems

B magnetische Induktion (erregt von i_1)
B_x, B_y Induktionskomponenten
F_y Tragkraft
i_1 Strom (Durchflutung) der Erregerwicklung 1
i_2 Strom (Durchflutung) der Sekundärwicklung 2

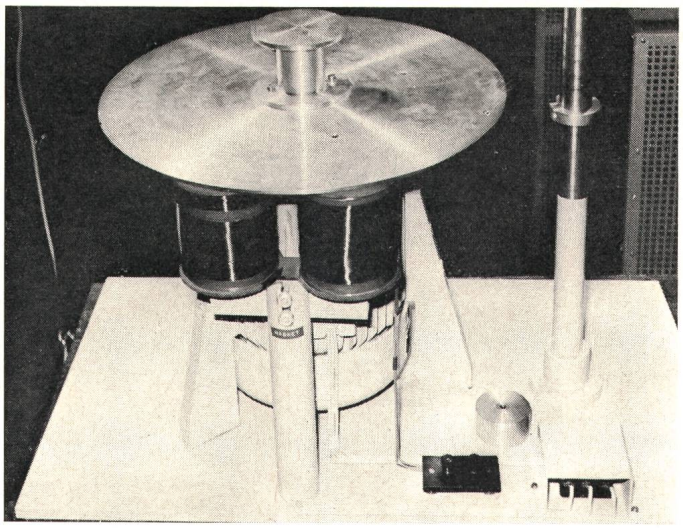

Fig. 14
Demonstrationsmodell für eine elektrodynamisch wirkende Traganordnung

im Schienensystem erreichen. Die vergrösserte Primärdurchflutung bedingt allerdings eine Verteuerung der Erregeranordnung und der notwendigen Kühlungseinrichtung. Die Null-Fluss-Anordnung kann vorteilhafterweise invertiert werden, indem mit zwei sich entgegen wirkenden Primärflüssen ein Einfach-Leitersystem induziert wird. Letzteres lässt sich dann wieder als homogene Flachleiteranordnung ausführen.

Ein abschliessendes Urteil über den Gesamtaufwand technisch realisierbarer Traganordnungen auf elektrodynamischer Grundlage steht zurzeit noch aus. Versuche, die bei der Siemens AG in Erlangen durchgeführt wurden, bestätigen die grundsätzliche Richtigkeit theoretischer Vorarbeiten. Für die Entwicklung elektrodynamischer Trageinrichtungen stehen nun Fragen der Tiefkühltechnologie, des Aufwandes für die Spurführungselemente der Trasse, die Verlustminimierung sowie das Problem eines Tragsystems für kleine Fahrgeschwindigkeiten zur Klärung an.

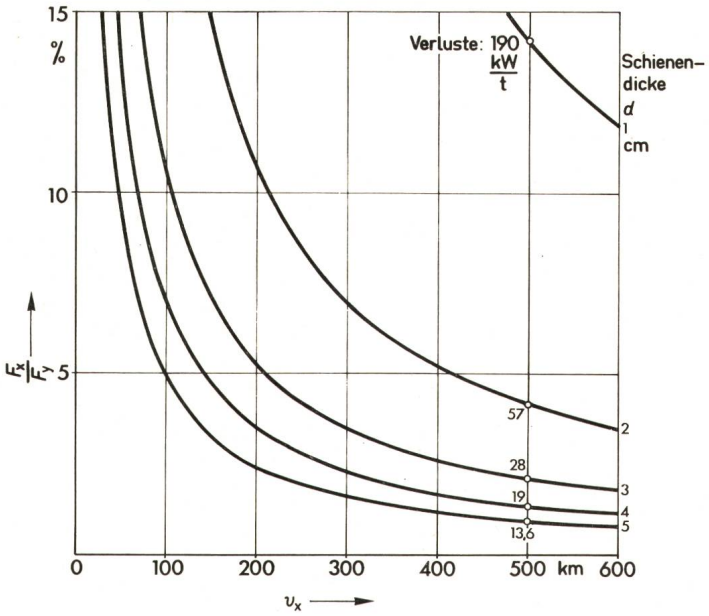

Fig. 15
Verhältnis von Fahrwiderstand zu Tragkraft bei elektrodynamischer Abstützung (Normalflussverfahren) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit
Parameter ist die Dicke *d* der Sekundärschiene

Zusammenfassung

Obgleich die ersten Ideen der Abstützung von Fahrzeugen durch magnetische Felder schon viele Jahre zurückliegen, haben neue technologische Voraussetzungen und der verstärkte Anreiz für Planung und Bau spurgeführter Schnellbahnen der technischen Entwicklung auf diesem Gebiet starken Auftrieb gegeben. Es werden drei vom System her unterschiedliche Verfahren beschrieben.

Die Anwendung von Permanentmagneten ist durch die Entwicklung von Werkstoffen mit hohen Werten für Induktion und Koerzitivfeldstärke heute aussichtsreicher als noch vor 10 Jahren. Problematisch ist dabei vor allem der hohe Aufwand für die Belegung der Fahrbahn mit Magnetmaterial, der nur bei grosstechnischer Herstellung auf wirtschaftlich tragbare Relationen führt. Als besonders positiv ist der verschwindend kleine Leistungsanteil für die Bewegung des Fahrzeuges, verursacht durch die magnetische Abstützung, zu nennen. Nachteilig ist hingegen, dass eine zusätzliche Führungsanordnung gegen destabilisierende Seitenkräfte benötigt wird.

Regelungstechnisch stabilisierte gleichstromerregte Zugmagnete haben ebenfalls ihre grundsätzliche Brauchbarkeit als

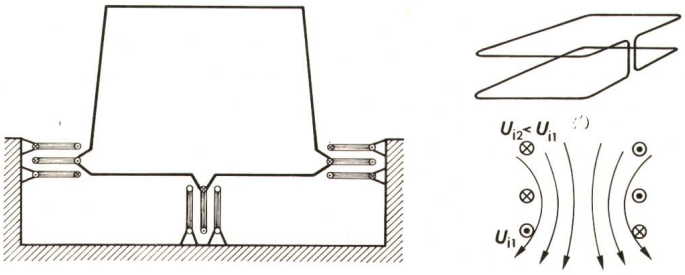

Fig. 16
Magnetische Schwebetechnik nach dem Nullflussverfahren

Trag- und Führungselemente für adhäsionslose Bahnfahrzeuge erwiesen. Bei geeigneter Ausführung der Spurführungselemente kann auch bei ihnen der für die Bewegung notwendige Leistungsanteil (Ummagnetisierung und Wirbelstromverluste) sehr klein gegenüber dem Luftwiderstandsanteil gehalten werden. Die notwendige Erregerleistung für die magnetischen Felder ist im Mittel ebenfalls sehr gering; sie muss allerdings zur Aussteuerung des Stromes um ein Vielfaches erhöht werden können. Wenn die zurzeit vorliegenden Erfahrungen mit Fahrzeugen im Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h und einem Spalt von 15 mm auf 300...500 km/h übertragen werden können, dürften die stabilisierten Zugmagnete eine durchaus interessante Lösung darstellen. Verglichen mit dem Permanentmagneten ist der Trassenaufwand gering, nachteilig hingegen der hohe Aufwand an elektronischen Bauelementen. Er erfordert besondere Massnahmen gegen die Störanfälligkeit.

Eine Art abstossendes Magnetsystem ist wirksam, wenn durch bewegte magnetische Felder, die vom Fahrzeug aus erregt werden, in einem feststehenden Leitersystem Ströme induziert werden. Die Anwendung der Supraleitertechnik eröffnet Möglichkeiten, auch bei eisenlosen oder eisenarmen magnetischen Kreisen genügend starke Felder und damit Kräfte zu erregen. Der Spalt kann dabei grösser als 15 mm sein. Arbeitet man mit Gleichströmen, so muss bei kleinen Geschwindigkeiten allerdings ein anderes Abstützverfahren herangezogen werden. Bei der Normalanordnung von Feld und Flachleiter treten entweder grosse Verluste (verursacht durch

die Ströme im sekundären Leitersystem) auf, oder es muss mit grossem Materialaufwand längs der Strecke gerechnet werden. Weitere Verbesserungen z. B. durch das Null-Fluss-Verfahren erscheinen möglich. Die Untersuchungen technologischer Art sind noch nicht abgeschlossen.

Literatur

[1] *G. R. Polgreen:* New applications of modern magnets. London, MacDonald, 1966.

[2] *W. Baran:* Optimierung eines permanentmagnetischen Abstützsystems für spurgebundene Schnellverkehrsmittel. Zeitschrift für angewandte Physik 32(1971)3, S. 216...218.

[3] *P. Appun* und *H. Weh:* Wirbelströme im feststehenden Teil von Zugmagneten zur magnetischen Aufhängung von Fahrzeugen. ETZ-A 92(1971)11, S. 623...627.

[4] *S. Hedrich:* Übersicht über unkonventionelle Fernschnellbahnsysteme. In: Internationaler Congress Elektrische Bahnen 1971. Technik heute und morgen. München 11...15. Oktober 1971. Vortragssammelband. Berlin, VDE-Verlag, 1971; Themengruppe 7: Unkonventionelle Bahnsysteme. S. 7.1.1...7.1.22.

[5] *J. R. Powell* and *G. R. Danby:* Magnetically suspended trains: The application of superconductors to high speed transport. Cryogenics and Industrial Gases 4(1969)10, p. 19...24.

Adresse des Autors:

Prof. Dr.-Ing. *H. Weh,* Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der Technischen Universität Braunschweig, Pockelstrasse 4, D-33 Braunschweig.

Literatur — Bibliographie

628.972(083.95)

IES Code for interior lighting. By the *Illuminating Engineering Society*. London, IES, 1973; 4⁰, 100 p. fig. tab. – Price: stiched L 2.00

Die ersten englischen Leitsätze für Beleuchtung sind 1936 von der Illuminating Engineering Society (IES) unter dem Titel: «Recommended values of illumination» herausgekommen. Hernach wurden sie revidiert und erschienen 1941 als «The IES Code». Mehrere Auflagen waren erforderlich; die letzte kam 1968 heraus. Die vorliegenden Leitsätze sind neu bearbeitet und berücksichtigen die wichtigsten Entwicklungen im Lampen- und Leuchtenbau, der Beleuchtungstechnik und des Bauwesens. Sie wenden sich an jene, welche die Beleuchtung von Innenräumen mit natürlichem und künstlichem Licht planen und an solche, die sich in irgendeiner Art mit der Verwirklichung der Anlagen befassen. Darum ist der Code 1973 als Anleitung für die Praxis aufgestellt und berücksichtigt damit das Ergebnis einer Umfrage, welche vor der Bearbeitung an etwa 150 industrielle und berufliche Organisationen gerichtet wurde.

Der erste Teil befasst sich mit den *Entwurfsgrundsätzen* der Beleuchtungstechnik. Knapp formuliert und unterstützt mit anschaulichen Kurvendarstellungen, zeichnerischen und photographischen Bildern – wo nötig, mehrfarbig – werden die massgeblichen Aspekte der Planung behandelt, natürlich auch die neuesten Erkenntnisse, wie die Bedeutung der Farbwiedergabe und die sich daraus ergebenden Folgerungen bei der Lampenwahl, die immer mehr an Wichtigkeit gewinnende Not- und Sicherheitsbeleuchtung und der besonders für grosse Anlagen bedeutsame Zusammenhang zwischen Licht, Heizung, Klimatisation und Lärm.

Der zweite Teil behandelt die *Entwurfsgrundlagen,* also die Lampen für Allgemeinbeleuchtung, ihre Arten, die lichttechnischen, wirtschaftlichen und farblichen Eigenschaften, ferner die Anforderungen an die Beleuchtung mit Tageslicht. Dieser Teil enthält auch ein tabellarisches Verzeichnis mit Angaben über die erforderliche Beleuchtungsstärke, die Messebene, den Grenzwert des Blendungsindexes, die Lichtfarbe, die Farbwiedergabe und besondere Hinweise für Innenräume sowie Sehaufgaben oder andere Tätigkeiten in 7 verschiedenen Arten von Gebäulichkeiten. Die Beleuchtungsstärken sind Betriebswerte für normale Bedingungen; eine anschauliche Darstellung ermöglicht das schnelle Auffinden der höheren Werte bei erschwerten Verhältnissen. Die verwendeten Zahlen für die Beleuchtungsstärken von 2...3000 lx halten sich an eine von der Commission Internationale de l'Eclairage vorgesehene Zahlenreihe der kommenden internationalen Leitsätze für Innenbeleuchtung. Jeder Schritt von einer Beleuchtungsstärkestufe zur nächsten bewirkt eine bedeutsame subjektive Empfindungssteigerung.

Von den 7 Anhängen zum Code sind die drei ersten kurzgefasste Anleitungen zur Berechnung der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte sowie zur Beleuchtungsberechnung für Innenräume nach drei Methoden, ferner für die Messung der Beleuchtungsstärken in Innenräumen. Die weiteren Anhänge erläutern etwas weniger geläufige Themen, wie den Kontrastwiedergabefaktor und den Farbwiedergabeindex, welche bei der Projektierung von Anlagen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Eine Zusammenstellung der häufigsten lichttechnischen Ausdrücke mit ihren Definitionen und ein Verzeichnis ausgewählter Literaturquellen, vornehmlich englischer Autoren, beschliessen das Werk, das übrigens graphisch bemerkenswert gut ist und dadurch die Benützung erleichtert.

Den Beleuchtungsspezialisten, Architekten, Beratungsingenieuren sowie Elektro-, Heizungs- und Klimafachleuten ist der Code 1973 eine wertvolle Hilfe; wer detaillierte Projektierungsarbeit zu leisten hat, bedarf allerdings weiterer Informationen; sie sind in 14 Technischen Berichten und 7 Monographien der IES enthalten, auf die der Code laufend hinweist.

Zum Schluss noch eine Bemerkung: Wann werden endlich die seit Jahren in Aussicht stehenden internationalen Empfehlungen für Innenbeleuchtung zur Verfügung stehen, und wie lange noch müssen die verschiedenen nationalen Gremien Leitsätze, die alle einander ähnlich sind, selber herausgeben? Wann wird die internationale Zusammenarbeit in diesem Bereich fruchtbar sein?

J. Guanter

Berichtigung: In einigen Legenden des Artikels «Erzeugung winkelmodulierter Signale in einer Phasenregelschleife» von S. Manour und Ch. Masur [Bull. SEV 64(1973)3, S. 286 ff.] haben sich sinnstörende Druckfehler eingeschlichen. Wir geben daher diese Legenden neu wieder:

Fig. 1
Herstellung desselben winkelmodulierten Signals mit Frequenz (*a*) **oder Phasenmodulator** (*b*)

In Fig. 10 sollte der Startpunkt der Wurzelortskurve (auf der negativen reellen Achse) mit –1 statt mit $-N$ angeschrieben sein.

Fig. 11
Mögliche Verläufe von $l(F)$

a l hat kein Maximum im Intervall $[0, F_{gr}]$ oder höchstens eines bei $F = 0$

b l hat ein Maximum im Intervall $[0, F_{gr}]$

c l hat ein Maximum bei $F \geqq F_{gr}$

Fig. 12
Der gewählte Verlauf von $l(F)$