

Nils Ole Glück

Magnetschwebetechnik am Beispiel des Transrapid



Facharbeit
Grundkurs Physik (12.2)
28.02.2006

Facharbeit: Magnetschwebetechnik am Beispiel des Transrapid

1.	Einleitung	1
2.	Hauptteil: Der Transrapid	2
2.1	Entwicklung der Magnetschwebebahn	2
2.2	Die Magnetschwebetechnik des Transrapid	3
2.2.1	Prinzipieller Aufbau	3
2.2.2	Das Trag- und Führsystem (Schwebesystem)	4
2.2.3	Das Antriebssystem	9
2.2.3.1	Der Linearmotor	9
2.2.3.2	Die Linearbewegung	12
2.3	Technische Vor- und Nachteile des Systems	15
3.	Fazit / Ausblick	17
4.	Anhang	18
4.1	Quellenverzeichnis	18
4.2	Bildnachweis	20

1. Einleitung

Das Projekt der Magnetschwebebahn „Transrapid“, entwickelt in Deutschland, besteht seit nunmehr über 30 Jahren. Von ihren Anfängen in den 70er Jahren bis heute hat sich der Transrapid zu einem einsatzfähigen Personenbeförderungsmittel entwickelt, welches vor allem durch Geschwindigkeit, Sicherheit und Reisekomfort besticht.

Anhaltende Diskussionen über den Einsatz des Transrapid in Deutschland haben die Magnetschwebebahn ins Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt und werfen vor allem die Frage nach der Wirtschaftlichkeit dieses neuartigen Verkehrsmittels auf. Ob sich der Transrapid trotz all seiner technischen Vorteile langfristig durchsetzen kann, wird sich erst in Zukunft zeigen.

Fest steht jedoch: Der Transrapid darf heute im Bereich der Personenbeförderung insbesondere auf Langstrecken als erste ernstzunehmende Alternative zur klassischen Eisenbahn betrachtet werden.

Das moderne Prinzip der Magnetschwebetechnik bietet eine Reihe von bemerkenswerten Vorteilen gegenüber bisherigen Transportmitteln; denn die Magnetschwebetechnik, welche beim Transrapid zum Einsatz kommt und auf dem Wirken elektromagnetischer Kräfte basiert, ermöglicht einen reibungslosen Schwebезustand ohne Bodenkontakt, sodass selbst Reisegeschwindigkeiten von mehr als 500 km/h für den Transrapid kein Problem darstellen. Die zuverlässige Einsatzfähigkeit seines Systems stellt der Transrapid seit 2003 im chinesischen Shanghai unter Beweis, wo sich die Magnetschwebebahn seither im täglichen Dauerbetrieb bewährt hat.

Diese Facharbeit soll nun die faszinierende Magnetschwebetechnik unter besonderer Beachtung physikalischer Zusammenhänge erläutern. Schwerpunktmäßige Fragestellung der Arbeit soll die eigentliche Funktionsweise der Magnetschwebebahn sein: Wie funktioniert der Transrapid, durch welche grundlegenden physikalischen Zusammenhänge wird ein Schwebе- und Bewegungszustand der Bahn erreicht?

Hierzu werde ich im Hauptteil meiner Facharbeit zunächst einen kurzen Überblick über die Entwicklung des Transrapid geben, um einen ersten Eindruck vom Projekt der Magnetbahn zu vermitteln (Kapitel 2.1).

Nachdem ich im Kapitel 2.2 auf den o.g. Schwerpunkt meiner Arbeit eingegangen bin, möchte ich abschließend im Abschnitt 2.3 die technischen Vor- und Nachteile der Magnetschwebebahn erläutern.

2. Hauptteil: Der Transrapid

2.1 Entwicklung der Magnetschwebbahn

Obwohl die Magnetfahrtechnik als eine moderne Errungenschaft betrachtet wird, geht die Grundidee für eine Magnetbahn auf den Ingenieur Hermann Kemper zurück, der bereits 1934 ein erstes Patent für ein entsprechendes System anmeldete.

Erst in den 60er Jahren wurde diese Idee wieder aufgegriffen – man wollte brauchbare Alternativen zu bestehenden Verkehrssystemen entwickeln, um den Automobilverkehr einzudämmen. Anfang der 70er Jahre begann die Arbeit an verschiedenen Magnetbahn-Prototypen, an der mehrere deutsche Firmen, u.a. Siemens und ThyssenKrupp, beteiligt waren. Zu dieser Zeit arbeitete man noch an drei verschiedenen Schwebepinzipien, die sich hauptsächlich durch die Integration des Antriebsmotors unterschieden: So gab es auf der einen Seite die Verwendung eines Langstator-Antriebs (Antriebsmotor fahwegseitig) andererseits den Kurzstator-Antrieb (Antriebsmotor im Fahrzeug integriert). Unbemannte Versuchsfahrzeuge erreichten bereits damals Geschwindigkeiten von über 300 km/h¹.

Ein Systementscheid der Bundesregierung fiel 1977 zugunsten des EMS (Elektromagnetisches Schwebens) aus, sodass nur noch die Weiterentwicklung dieser Technik verfolgt wurde. Nachdem in den Folgejahren weitere Transrapid-Fahrzeuge entwickelt worden waren, entschied man sich für den Bau einer Teststrecke im Emsland, wo man die Magnetbahn unter realistischen Bedingungen bis zur Einsatzreife optimierte. Es handelt sich hierbei um die mit einer ca. 30 km langen, einspurigen Teststrecke ausgestatteten „Transrapid Versuchsanlage Emsland“, kurz TVE. Nach mehreren Ausbauphasen verfügt sie über eine Nord- und eine Südschleife sowie eine Gerade, auf der Geschwindigkeiten von über 400 km/h erreicht werden können. 1983 stellte man den „Transrapid 06“ (TR 06) vor, fünf Jahre später folgte der „TR 07“. Dieses Fahrzeug war bereits für den dauerhaften Personentransportbetrieb geeignet. 1999 wurde dieses Fahrzeug vom „TR 08“ abgelöst. All diese Fahrzeuge unterscheiden sich im wesentlichen durch ihr immer weiter entwickeltes Leistungsvermögen. Seit 2003 wird nun ein weiterentwickelter Transrapid „SMT“ (Shanghai Maglev Transportation) im Personenverkehr von Shanghai eingesetzt. Das Transrapid-

Abb. 2.1: Versuchsfahrzeug, 70er Jahre



Abb. 2.2: TR 06

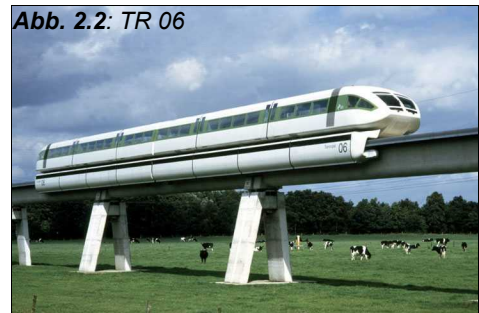


Abb. 2.3: TR 08



Abb. 2.4: SMT

¹ Quelle [1] (s. Quellenverzeichnis)

Projekt wird heute von der „Transrapid International“, einer Gesellschaft von Siemens und ThyssenKrupp, geleitet.

2.2 Die Magnetschwebetechnik des Transrapid

Dieses Kapitel bildet den Schwerpunkt meiner Facharbeit. Mit Verweis auf den Titel meiner Arbeit möchte ich betonen, dass ich mich hierbei im Wesentlichen auf die grundlegenden Schwebetechnik und Antriebsvorgänge beschränken werde, welche den Transrapid in der Spur halten bzw. antreiben. Dabei beziehe ich mich, sofern nicht anders angegeben, auf das Magnetschwebefahrzeug „TR 08“ sowie auf das Fahrwegsystem, welches auf der TVE in Lathen zum Einsatz kommt.

2.2.1 Prinzipieller Aufbau

Abb. 3.1: Trasse der TVE



Zwar ist der Transrapid ein spurgebundenes Verkehrsmittel, das sich auf einer eigenen Fahrwegtrasse bewegt, jedoch erfolgt diese Fortbewegung gänzlich ohne Kontakt zur Trasse, was den entscheidenden Unterschied zu herkömmlichen Schienenfahrzeugen ausmacht.

Im folgenden soll kurz erklärt werden, aus welchen Hauptkomponenten sich das Magnetschwebesystem des Transrapid zusammensetzt. Auf genaue Beschreibungen

und Funktionsweisen dieser Komponenten wird in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen.

Bei der Trasse der Transrapidstrecke handelt es sich um eine Konstruktion, die üblicherweise aus Beton oder Stahl besteht. Die eigentliche „Schiene“, welche von massiven Stützträgern getragen wird, lässt sich als „Fahrwegtisch“ bezeichnen, über den das Fahrzeug berührungslos hinweggleitet.

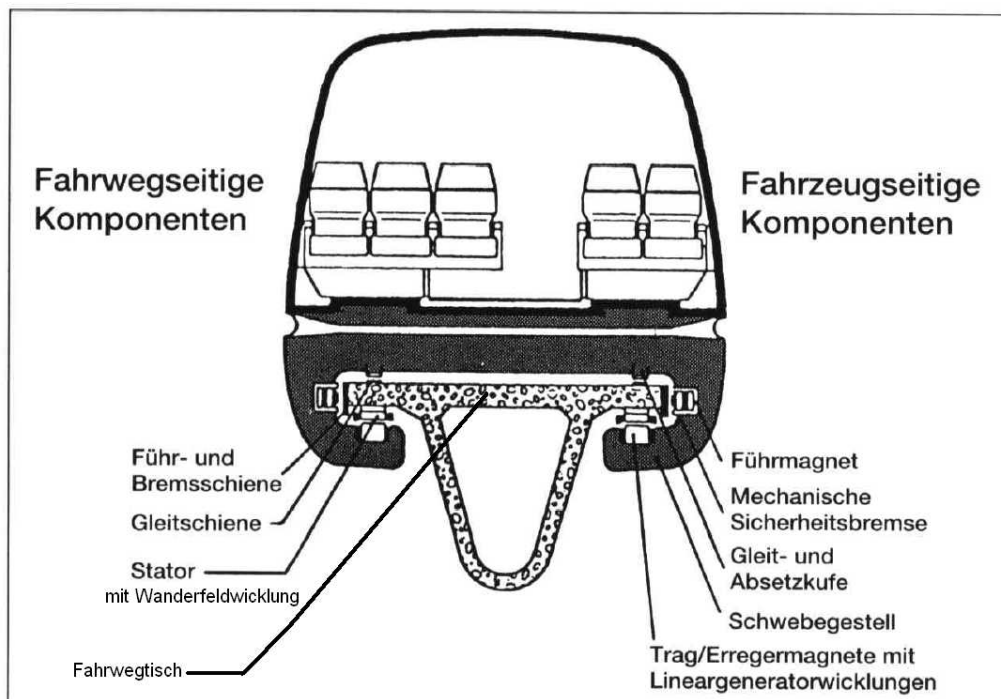
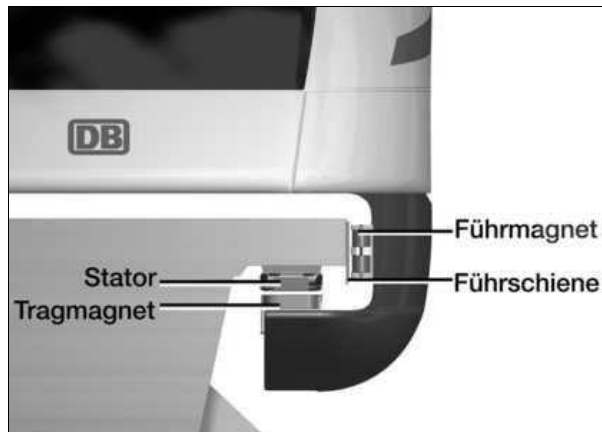


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten anhand des „TR 07“.

Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf die Trag- und Führmagnete sowie auf den Stator mit der zugehörigen Wanderfeldwicklung gelegt.



Auf der gesamten Länge der Strecke sind unterhalb des Fahrweges beidseitig so genannte Statorpakete fest montiert, welche in ihrer Gesamtheit den so genannten Langstator bilden (siehe u.a. Kap. 2.2.2). Hierbei handelt es sich um lückenlos aneinander gesetzte, ferromagnetische (magnetisierbare) Blechpakete, die Teil des Trag- und Antriebsystems sind.

Abb. 4.1: Anordnung der Trag-, Führ- und Antriebskomponenten.

In diese Statorpakete ist der Motor, der für den Antrieb des Zuges sorgt, integriert. Wichtig zum Verständnis ist hierbei: Der eigentliche Motor des Systems befindet sich nicht im Zug, sondern fest montiert im Fahrweg! Auch dies ist ein entscheidender Unterschied zu bisherigen Schienensystemen: Der Transrapid treibt sich nicht aus eigener Kraft an, sondern er wird von einem statischen Antriebssystem angetrieben, welches Teil des Fahrwegs ist (fahrwegseitiger Antrieb).

Bei dem Motor handelt es sich um einen Linearmotor, bestehend aus einer elektromagnetischen dreiphasigen Wanderfeldwicklung (Details siehe Kap. 2.2.3).

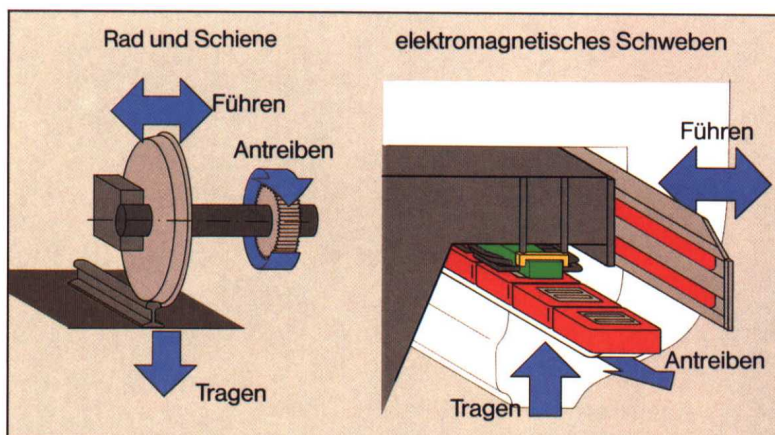


Abb. 4.2: gegenübergestellte Aufgabenverteilung; rechts Transrapid mit seitlichem Führmagnet (rot), unterem Tragmagnet (rot) und fahrwegseitigem Langstator (grün) mit integrierter Wanderfeldwicklung.

Kommen wir nun zu den magnetischen Komponenten des Fahrzeugs. Der Transrapid umgreift beidseitig den Fahrweg, wo sich der o.g. Langstator-Linearmotor befindet. An den beiden „Greifarmen“ des Transrapid sind jeweils zwei verschiedene Elektromagnetgruppen über die gesamte Länge des Zuges angebracht: An der unteren Innenseite der Greifarme befinden sich so genannte Tragmagnete, während seitlich Führmagnete montiert sind, welche in Wechselwirkung mit am Fahrweg angebrachten „Führschiene“ stehen. Trag- und Führsystem sorgen für einen stabilen Schwebeszustand des Fahrzeugs (siehe Kap. 2.2.2).

2.2.2 Das Trag- und Führsystem (Schwebesystem)

Die Schwebetechnik der Transrapid-Magnetbahn beruht auf dem Prinzip des Elektromagnetischen Schwebens (siehe Abb. 4.2), kurz EMS. Hierbei wird durch die anziehenden Kräfte elektromagnetischer Felder ein Schwebeszustand erreicht.

Die prinzipielle Anordnung von Statorpaketen und Tragmagneten ist bereits aus dem vorherigen Kapitel bekannt. Wie aber erreicht der Transrapid den Schwebeszustand?

Im Grunde geschieht das auf simple Art und Weise: Der Zug zieht sich mittels seiner Tragsmagnete aus eigener Kraft von unten an den Eisenstator heran, welcher an der Strecke montiert ist. Die Tragkraft, die das Fahrzeug schweben lässt, geht also ausschließlich vom Zug aus. Dementsprechend bezeichnete ein Mitarbeiter der TVE den Transrapid als „Hängezug“², welcher die eisernen Statorpakete „zur Orientierung“ nutze. Der Stator wird in diesem Zusammenhang auch oft als Reaktionsschiene für die Tragsmagnete des Zuges bezeichnet.

Die Tragsmagnete ziehen den Transrapid also in vertikaler Richtung bis zu einem festgelegten Abstand an den Fahrweg heran. Der Zweck des Tragsystems ist, das Fahrzeug in einem stabilen Schwebezustand zu halten und in jedem Fall eine Berührung zwischen Fahrzeug und Fahrweg zu vermeiden.

Per Definition besteht ein so genannter Tragsmagnet aus mehreren „Magnetpolen“, welche als separate Elektromagnete zu betrachten sind. Dies wird später beim Antrieb der Magnetbahn eine Rolle spielen; bei der Betrachtung des Tragsystems ist zunächst nur zu beachten, dass die Tragsmagnete Elektromagnete (starke Spulen mit Weicheisenkernen) sind, die entweder eingeschaltet oder ausgeschaltet sein können und ihre Polung nicht ändern. Die Tragsmagnete werden über die Bordbatterien des Transrapids mit Strom versorgt.

Jeder Tragsmagnet verfügt über Sensoren, die permanent den Abstand zwischen Tragsmagnet und Stator überprüfen. Jeder der Tragsmagnete lässt sich autark steuern, d.h. ein Abstandsregler gewährleistet für jeden Magneten einen möglichst konstanten Tragschwebeabstand zum Fahrweg. Sind die Tragsmagnete eingeschaltet, wird 100.000mal pro Sekunde³ der Abstand zum Stator kontrolliert.

Sind die Tragsmagnete abgeschaltet, ist der Schwebezustand außer Kraft gesetzt und der Zug liegt mit seinen „Gleitkufen“, die unten am Fahrzeug angebracht sind, auf einer schmalen Metallschiene auf dem Fahrwegtisch. Dies ist normalerweise nur für den Stillstand eingeplant.

Sollten während der Fahrt einzelne Tragsmagnete ausfallen, lässt sich die fehlende Tragkraft durch eine Verstärkung der noch funktionierenden Magnete ausgleichen. Auch dies geschieht automatisch über das o.g. komplexe Regelsystem, das die Magnetfeldstärke der einzelnen Tragsmagnete durch eine Veränderung der Magnetstromstärke regulieren kann.

Der optimale Tragschwebeabstand beim „TR 08“ beträgt 10 mm⁴ mit einer vorgesehenen Abweichung von 2 mm nach oben und unten. Die Tragsmagnete werden mit Gleichstrom betrieben⁵, wobei dieser Strom nicht dauerhaft fließt, sondern mit einer sehr hohen Frequenz⁶ ein- und ausgeschaltet wird. Diese Frequenz wird von dem Abstandsregelungssystem gesteuert: Kommt der Tragsmagnet dem Stator zu nahe, wird der Strom abgeschaltet, sodass der Zug fällt, und wird der Abstand zu groß, wird der Strom wieder eingeschaltet. So wird das Fahrzeug in einem ständigen minimalen Vibrationszustand gehalten, welcher für die Fahrgäste kaum wahrnehmbar ist. Diese Vibration spielt auch eine wichtige Rolle bei der Federung des Zuges, weil so durch Streckenunebenheiten bedingte

² Detlev Schubsky von der TVE-Betreibergesellschaft IABG auf telefonische Nachfrage

³ Quelle [2]

⁴ Quelle [2]

⁵ Quelle [3], S. 34

⁶ Quelle [4], S. 28

Stöße leichter abgefangen werden können. So variiert der Tragschwebeabstand des Zuges während der Fahrt um bis zu 4 mm⁷.

Wie lässt sich nun die Gesamttragkraft berechnen, die von dem Tragsystem letztlich aufgebracht werden muss, um einen Schwebezustand zu erreichen? Es muss ein Kräftegleichgewicht zwischen der nach unten gerichteten Gewichtskraft des Zuges (F_{Gges}) und der nach oben gerichteten Tragkraft (F_{Tges}) herrschen:

$$m = 149,5 \text{ t} \quad (\text{Leergewicht des TR 08 inkl. Tragsmagnete}) \quad ^8$$

$$g \approx 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$$

$$F_{Gges} = F_{Tges} = m \cdot g = 149500 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 1466 \text{ kN}$$

Der „TR 08“ besitzt insgesamt 46 Tragsmagnete. Geht man nun davon aus, dass F_{Gges} gleichmäßig auf die Magnete verteilt wird, lässt sich F_T pro Tragsmagnet ermitteln:

$$F_{TTragsmagnet} = F_{GTragsmagnet} = \frac{F_{Gges}}{46} = \frac{1466 \text{ kN}}{46} \approx 31,87 \text{ kN}$$

Bei o.g. Bedingungen müsste jeder Tragsmagnet also ein Gewicht von umgerechnet 3,2 t kompensieren, was beachtlich ist.

Ein permanentes vertikales Kräftegleichgewicht ist während der Fahrt jedoch nie wirklich möglich, da der Tragschwebeabstand – wie oben erwähnt – nicht konstant ist. Folglich muss sich auch ständig die Magnetfeldstärke der Magneten ändern, was zu den Hauptproblemen bei der Entwicklung des Transrapid zählte:

Je näher der Tragsmagnet dem magnetisierten Stator kommt, desto größer wird die Anziehungskraft der Magneten auf den Stator, was zu einer Berührung zwischen Stator und Tragsmagnet führen würde. In diesem Fall muss die Tragsmagnetfeldstärke sofort verringert werden, um das Kräftegleichgewicht aufrechtzuerhalten. Ist der Abstand jedoch größer als vorgesehen, wirkt eine kleinere Anziehungskraft und es ist sofort eine größere Magnetfeldstärke nötig, damit der Zug nicht auf den Fahrwegtisch fällt (bei aktiviertem Tragsystem gleitet der Zugkörper mit einem Abstand von ca. 15 cm über den Fahrwegtisch). Folglich muss ständig das Tragsmagnetfeld angeglichen werden, was von der Bordelektronik übernommen wird.

⁷ Quelle [5]

⁸ Quelle [6]

Dieser problematische Zusammenhang zwischen **Anziehungskraft F** der Tragsmagneten, die auf den Stator wirkt, und dem **Tragschwebeabstand d** lässt sich wie folgt darstellen:

$$F \sim \frac{1}{d^2} \quad ^9$$

$$\Rightarrow \frac{F}{1} = konst. = F \cdot d^2 = k$$

Fassen wir an dieser Stelle zusammen; im theoretischen Ideal-Schwebezustand gelten beim „TR 08“ folgende Werte:

$$d = \text{Tragschwebeabstand} = 10 \text{ mm}$$

$$F_{T\text{Tragsmagnet}} = \text{Anziehungskraft pro Tragsmagnet} = 31,87 \text{ kN} = F_{G\text{Tragsmagnet}}$$

$$\Delta F = F_{T\text{Tragsmagnet}} - F_{G\text{Tragsmagnet}} = 0 \quad (\text{Kräftegleichgewicht})$$

Ist ΔF größer als 0, nähert sich der Tragsmagnet dem Stator. Ist ΔF dagegen kleiner als 0, entfernt sich der Tragsmagnet vom Stator, was jeweils durch Regulierung der Magnetfeldstärke verhindert werden muss.

Nun lässt sich k für den „TR 08“ (bei Leergewicht) berechnen:

$$k = F \cdot d^2 = F_{T\text{Tragsmagnet}} \cdot d^2 = 31,87 \text{ kN} \cdot (10 \text{ mm})^2 = 3187 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

Jetzt soll herausgefunden werden, welche Kraft $F_{T\text{Tragsmagnet}}$ bei einem variablen Tragschwebeabstand d wirkt:

$$F = \frac{k}{d^2}$$

Folgende Wertetabelle ergibt sich also theoretisch für den „TR 08“¹⁰:

d (mm)	F (kN)	ΔF (kN)	Zustand
7	65,04	33,17	nähernd
8	49,80	17,93	nähernd
9	39,35	7,48	nähernd
10	31,87	0	stabil
11	26,34	-5,54	entfernend
12	22,13	-9,74	entfernend
13	18,86	-13,01	entfernend
160	0,12	-31,75	entfernend

⁹ Quelle [9] sowie mündl. Mitteilung des Fachlehrers

¹⁰ Struktur übernommen von Quelle [9]



Abb. 7.1: Schwebegestell, bestehend aus Trag- und Führmagnet.

Aus obiger Tabelle kann man beispielsweise ablesen, dass bei einem Abstand von 11 mm die Kraft des Tragemagnets, die auf den Stator wirkt, ca. 26 kN beträgt und der Zug mit einer Kraft von ca. 5,5 kN pro Tragemagnet nach unten fällt. Dies müsste also vom Regelsystem entsprechend korrigiert werden.

Liegt der Zug auf dem Fahrwegtisch auf (Tragemagnete abgeschaltet), ist der Abstand zwischen Stator und Tragemagnet ca. 16 cm groß; dies entspricht der letzten Zeile. Damit sich der Tragemagnet aber aus dieser Lage dem Stator nähern kann, muss bekanntlich auf den Stator eine Kraft wirken, die größer ist als 31,87 kN. DeltaF besagt, dass hierzu mindestens eine zusätzliche Kraft von ca. 31,75 kN gegenüber der Kraft im Normalabstand von 1 cm nötig ist.

Hieraus ergibt sich, dass die Tragkraft, die der Tragemagnet aus dem Stand aufbringen muss um den Zug anzuheben, mehr als 250mal größer ist als die Tragkraft im normalen Schwebезustand:

$$\frac{31,87 \text{ kN}}{0,12 \text{ kN}} \approx 255,9$$

Zur eigentlichen Feldstärke des Tragemagnetfeldes habe ich kaum Angaben finden können, außer den Hinweis, dass die Magnetfeldstärke zwischen Zug und Fahrweg relativ klein und daher für Umwelt und Fahrgäste unbedenklich sei. Dies scheint verständlich: Das Tragsystem muss zwar eine Gesamtlast von mindestens 150 t anheben, doch wird diese Traglast nahezu gleichmäßig auf die gesamte Länge des Zuges verteilt, sodass die Feldstärke der einzelnen Magnete entsprechend klein ist. In einer Literaturquelle heißt es zur Tragemagnetflussdichte: „Das Magnetfeld zwischen Tragemagneten und Eisenschiene beträgt ein halbes Tesla.“¹¹ Gemeint ist hier wohl die Flussdichte im normalen Tragschwebезustand.

Nach dem gleichen Prinzip wie das Tragsystem arbeitet auch das Führsystem, welches die Magnetbahn seitlich in der Spur hält. Dies spielt insbesondere bei Seitenwind und Kurvenlage eine Rolle. Dabei ziehen sich Elektromagneten seitlich an die Führschiene heran und werden ebenfalls von einem Regelsystem zur Abstandseinhaltung gesteuert.

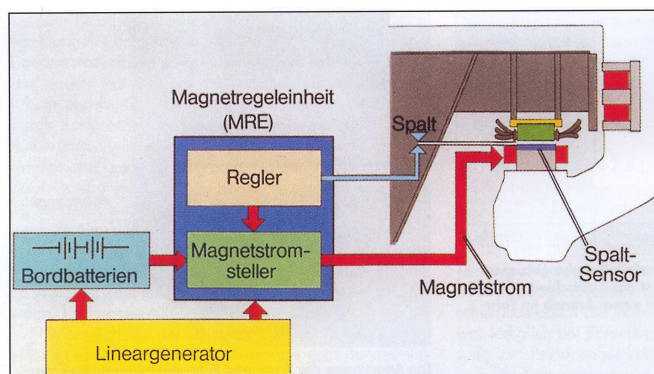


Abb. 8.1: Ein fahrzeugseitiges elektronisches Regelsystem ermöglicht einen ununterbrochenen Schwebезustand und wird über Lineargeneratoren mit Energie versorgt.

An dieser Stelle seien auch noch kurz Lineargeneratoren angesprochen, die durch berührungslose Induktion Energie für die Bordelektronik der Magnetschwebезahn liefern. Diese Generatoren sind in die Tragemagnete integriert. Dabei wird durch die Stator-Antriebswicklungen (siehe Kap. 2.2.3) eine elektrische Spannung induziert. Die übertragene Energie wird für die Versorgung der Tragemagnete sowie für das Aufladen bordeigener Batterien benötigt.

¹¹ Quelle [7], S. 80

2.2.3 Das Antriebssystem

Das Antriebssystem der Transrapid-Magnetschwebebahn arbeitet völlig berührungslos, da es, wie auch das Trag- und Führsystem, auf dem Wirken magnetischer Kräfte beruht.

2.2.3.1 Der Linearmotor

Zum Antrieb des Transrapid wird ein Linearmotor verwendet. Oft wird dieser Motor mit einem in die Ebene übertragenen Elektromotor verglichen.

Stellen wir uns also zunächst einen einfachen Elektromotor vor, bestehend aus einem äußeren Stator und einem inneren Rotor (Läufer). Bei einem Elektromotor wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt; der Stator bewegt mit Hilfe von Magnetfeldern den Rotor, der ebenfalls magnetisch ist. Mit Hilfe der Rotorbewegung ließe sich z.B. ein Fahrzeug antreiben.

In unserem konkreten Fall soll der kreisförmige Stator mit drei um jeweils 120 Grad versetzten, durch Weicheisenkerne verstärkte Spulen ausgestattet sein. Auch bei dem Rotor handelt es sich um einen Elektromagnet. Nun soll der Rotor in Bewegung gebracht werden.

Hierfür versorgen wir die Spulen mit einem so genannten Drehstrom: Das ist ein Wechselstrom, der aus drei zeitlich versetzten Phasen besteht (siehe Drehstromdiagramm in Abb. 9.1). Dementsprechend bezeichnet man diesen Drehstrom auch als „Dreiphasenwechselstrom“. Jede Spule wird an einen der drei Wechselstromleiter angeschlossen. Den Drehstrom liefert z.B. ein Drehstromgenerator.

Aufgrund des Wechselstroms ändern die Statormagnete im Elektromotor nun regelmäßig ihre Polung. Der Rotormagnet ist so austariert, dass er in jeder Lage in Bewegung bleibt und aufgrund der wechselnden Anziehungs- und Abstoßungskräfte, die er von den präzise angeordneten Statormagneten erfährt, seine regelmäßige Rotation beibehält. Das magnetische Feld, das durch die wechselnde Polung der Statormagneten entsteht, wird als „Drehfeld“ bezeichnet.

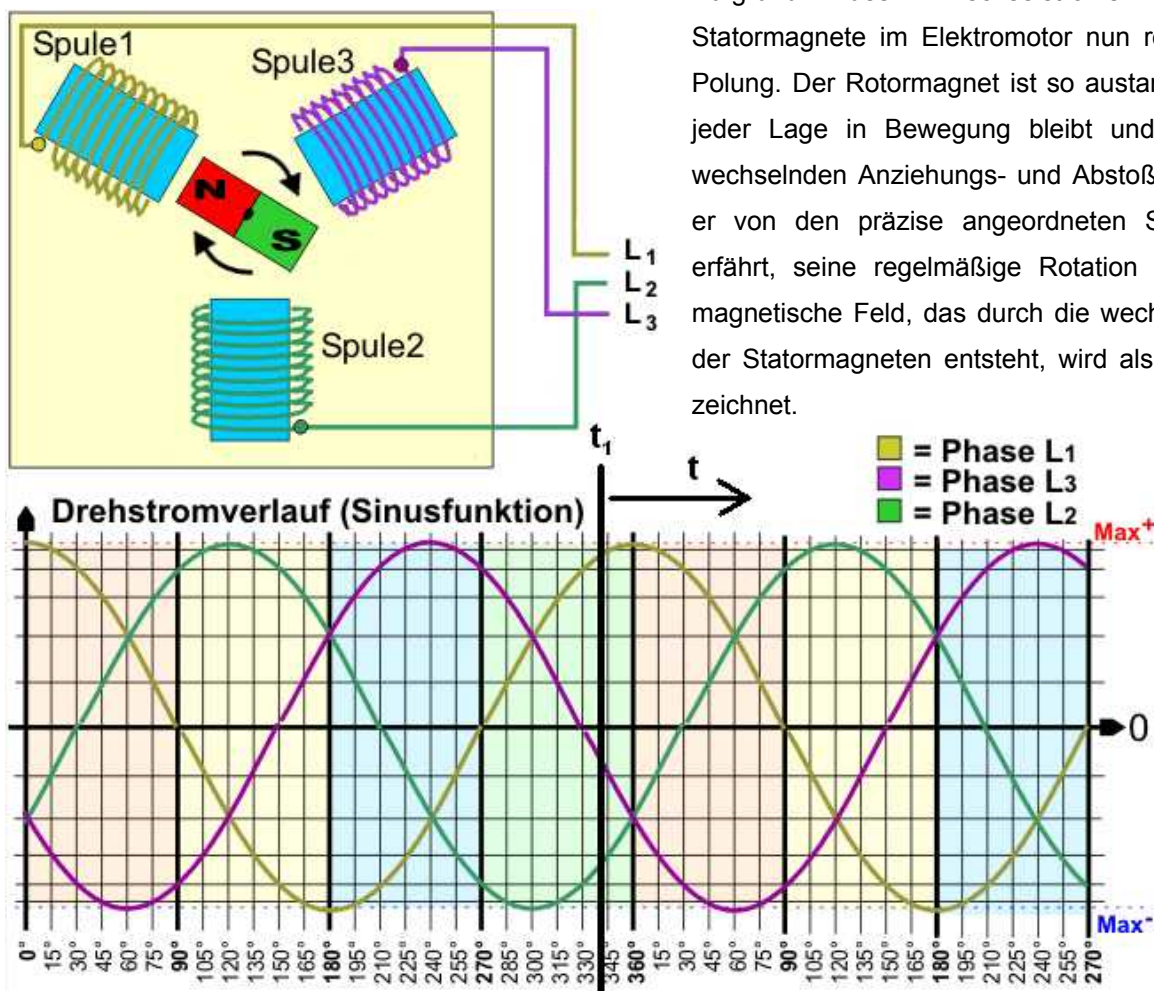


Abb. 9.1: Ein einfacher Drehstrommotor. Die Grafik zeigt die Position des Rotors zum Zeitpunkt t_1 .

Schaltet man den Drehstrom ab, verlangsamt sich der Rotor bis zum Stillstand und er beginnt wieder mit der Rotation, sobald man den Strom wieder einschaltet.

Will man die Drehrichtung des Rotors umkehren und dadurch z.B. eine Verlangsamung des Rotors erreichen, muss die Drehstromspannung an der Spannungsquelle „umgepolt“ werden, sodass sich Anziehungs- und Abstoßungskräfte entsprechend umkehren und sich die Richtung des Drehfeldes ändert.

Die Rotationsgeschwindigkeit lässt sich mit Hilfe der Drehstromfrequenz regeln, da es sich bei dem hier verwendeten Motor um einen synchronen Drehstrommotor handelt (d.h. der Rotor wird separat mit Strom versorgt)¹². Über Frequenz und Amplitude des Drehstromes lässt sich die Rotation des Läufers regulieren.

Wie wird aus diesem Drehstrommotor nun der Linearmotor, der für den Antrieb der Magnetschwebbahn sorgt? Veranschaulichend kann man sich vorstellen, dass der oben beschriebene Elektromotor an einer Stelle zur Mitte hin aufgeschnitten und unterhalb des Fahrweges gerade „ausgerollt“ wird; der kreisförmige Stator und der Rotor werden „linearisiert“.

Statt einer Rotationsbewegung wird nun eine lineare Bewegung erreicht: Der Läufer orientiert sich nun nicht mehr an einem Drehfeld, sondern an einem Wanderfeld.

Dieses Wanderfeld wird durch eine so genannte Wanderfeldwicklung aufgebaut, welche in Aussparungen (Nuten) in den Statorblechpaketen eingefügt wird. Im Gegensatz zum Elektromotor handelt es sich bei dieser Wicklung nicht um Spulen, sondern um dicke ummantelte Leiter, die ein starkes Feld erzeugen können. Die Wicklung besteht aus drei solchen separaten Leitern, die parallel in den Nuten der Blechpakete angeordnet sind.

So erklärt sich auch der Begriff „Langstator“: Die Wanderfeldwicklung, die parallel an zwei Statorschienen unter dem Fahrweg angebracht ist, verläuft auf der gesamten Länge der Strecke (Streckenlänge TVE: ca. 31,5 km).



Abb. 10.1: Der Linearmotor als aufgeschnittener Elektromotor (Rotormagnet rot, Stator mit Wicklung grün).



Abb. 10.2: Blick von schräg unten auf den Stator, in dessen Nuten die Wanderfeldwicklung befestigt ist.

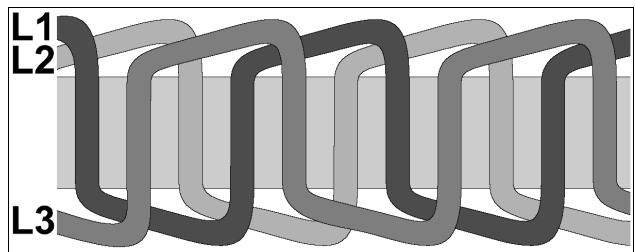
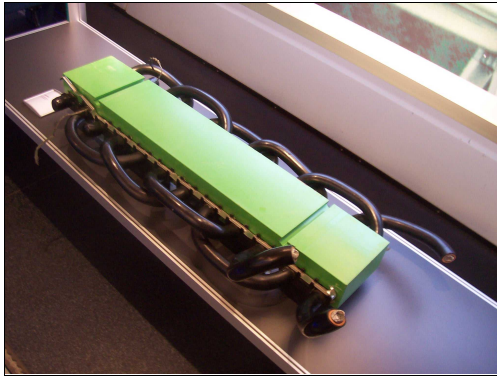


Abb. 10.3: Blick von unten auf das längliche Statorblech mit den drei Leitern der Wanderfeldwicklung (Skizze).

¹² Quelle [8], S. 3

Abb. 11.1: Blick von oben auf ein Statorpaket mit Wicklung.



Die Wanderfeldwicklung wird bei eingeschaltetem Motor mit einem Drehstrom versorgt, d.h. durch die drei Wicklungsleiter fließt ein um jeweils 120 Grad versetzter Wechselstrom.

Um aber nicht immer die gesamte Streckenlänge mit Energie versorgen zu müssen, ist die TVE in 58 einzeln steuerbare Motorabschnitte eingeteilt, deren Länge zwischen 300 und 2080 m Länge variiert¹³. Gleichzeitig kann die Leistung des Motors so für jeden Abschnitt den

jeweiligen Streckenverhältnissen angepasst werden (z.B. stärkere Leistung in Beschleunigungs- und Steigungsabschnitten).

Der Zug bleibt im Antriebssystem passiv: Die Rolle der Rotormagneten übernehmen beim Linearmotor die Tragmagnete des Zuges, auf die bereits in Kap. 2.2.2 eingegangen wurde. Deshalb werden die Tragmagnete zugleich als „Erregermagnete“ bezeichnet, die von dem Magnetfeld der Wanderfeldwicklung „mitgezogen“ werden. Durch sie fließt Gleichstrom.

Prinzip des eisenbehafteten synchronen Langstatormotors

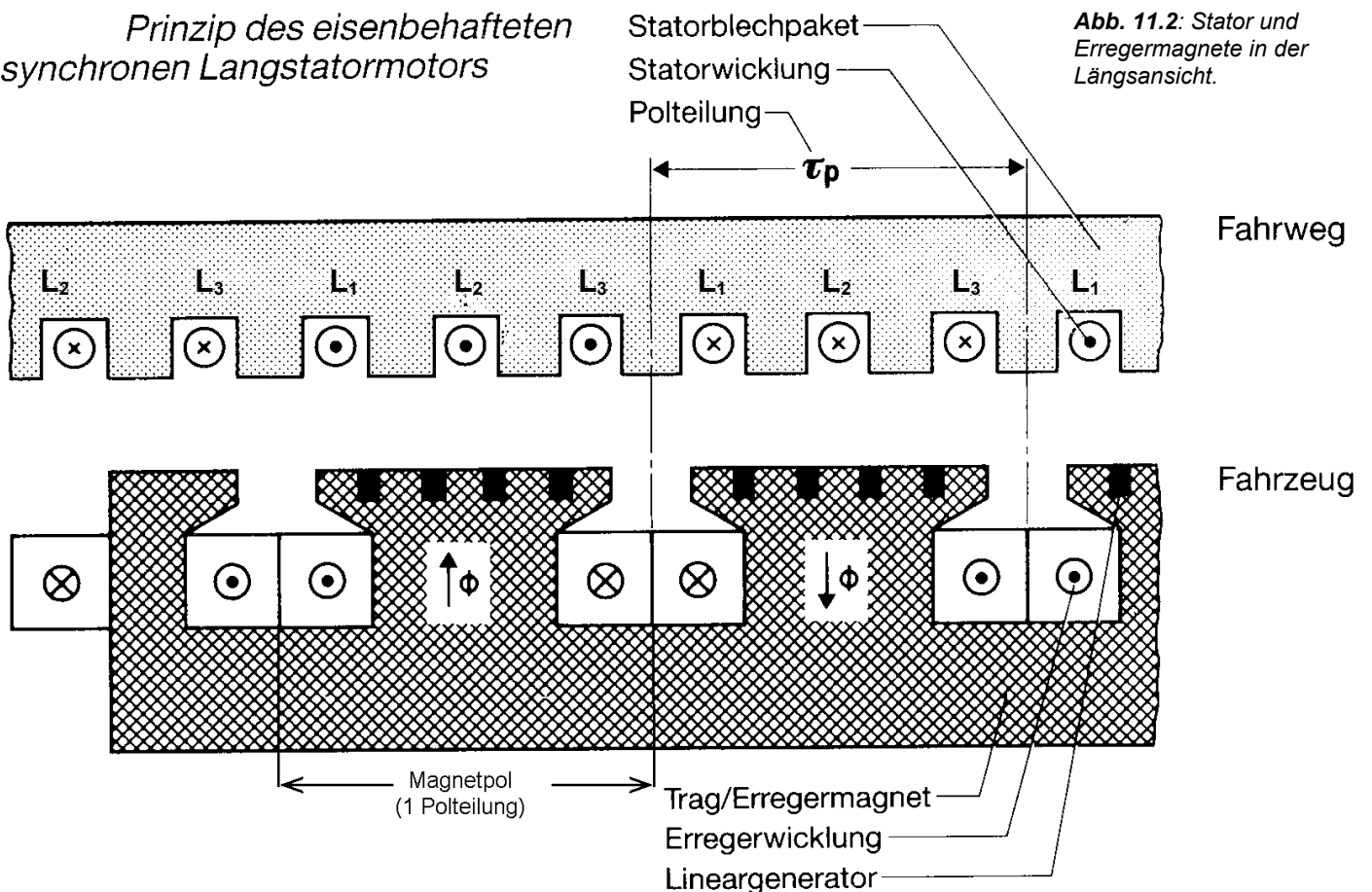
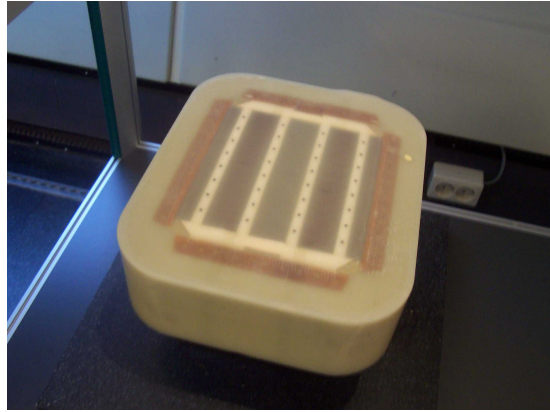
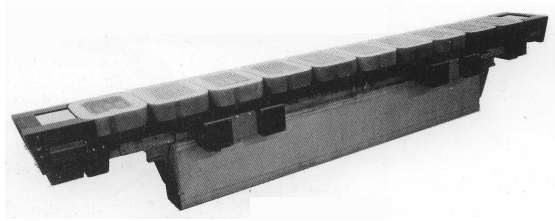


Abb. 11.2: Stator und Erregermagnete in der Längsansicht.

¹³ Quelle [6]

Abb. 12.1 (unten): Tragmagnet des „TR 07“, ausgestattet mit zehn Magnetpolen.

Abb. 12.2 (rechts): Tragmagnetpol des „TR 07“.



Genauer gesagt sind es die Magnetpole der Tragmagnete, die „erregt“ werden. Dabei handelt es sich um einzelne quadratische Elektromagneten. Diese Magneten bestehen jeweils aus einem eigenen Weicheisenkern und einer „Erregerwicklung“ (entspricht einer starken Spule, siehe Abb. 12.3). Ein Trag- bzw. Erregermagnet besteht also aus einer Gruppe mehrerer solcher Magnetpole¹⁴, die nebeneinander angeordnet sind (siehe Abb. 12.1).

Abb. 12.3: Tragmagnetpole des „TR 06“.



Die Fließrichtung des Stromes der einzelnen Erregerwicklungen ist anhand der Abb. 11.2 zu erkennen. Senkrecht zu diesen Wicklungen wird ein verstärkender Eisenkern eingeführt. Benachbarte Magnetpole haben dabei aufgrund ihrer gegensätzlichen Fließrichtung unterschiedliche Polungen, d.h. die Magnetpole „sind abwechselnd in Nord-Süd-, Süd-Nord-Richtung gepolt (vertikal).“¹⁵

Als **Polteilung** wird hierbei die Breite eines solchen Magnetpols bezeichnet. Gleichzeitig ist die Polteilung exakt der Abstand, der von drei nebeneinander im Stator liegenden Leitern der Wanderfeldwicklung beansprucht wird. Dies wird im nächsten Kapitel eine zentrale Rolle spielen.

2.2.3.2 Die Linearbewegung

Die Stärke des Wanderfeldes ist erheblich geringer als die des Tragmagnetfeldes, da jegliche Reibung entfällt und der Zug somit wie auf einer Luftkissenbahn horizontal in Bewegung gebracht wird.

Betrachten wir das Wanderfeld nun etwas genauer. Es funktioniert nach dem Prinzip „Gleiche Pole stoßen sich ab – ungleiche Pole ziehen sich an“.

¹⁴ Die Anzahl der Magnetpole pro Tragmagnet konnte ich für den „TR 08“ nicht ermitteln; beim „TR 07“ verfügte ein Tragmagnet jedoch über zehn Magnetpole.

¹⁵ Quelle [7], S. 81

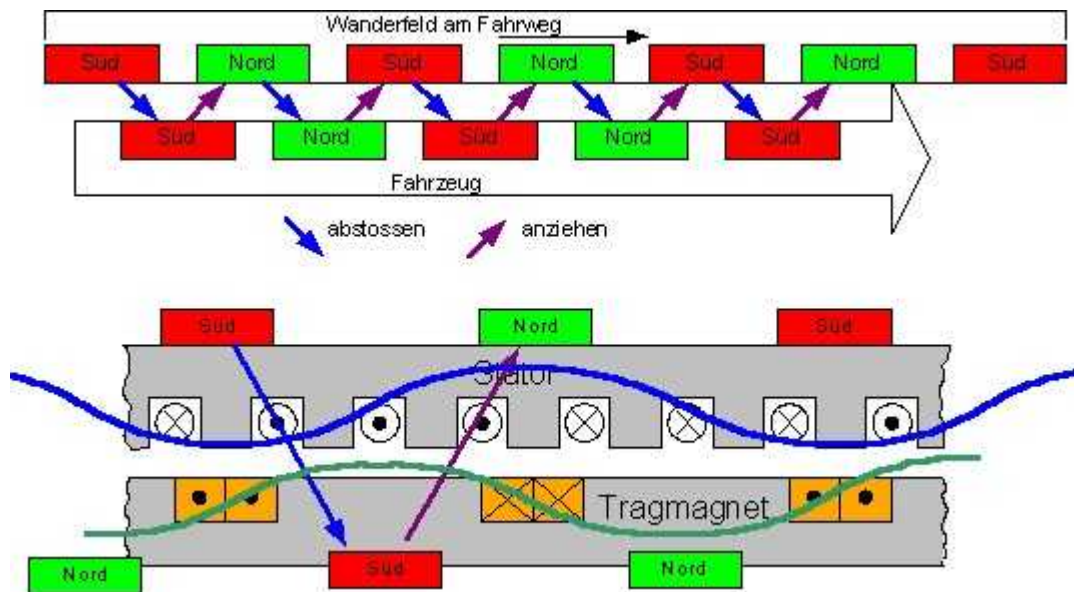


Abb. 13.1: Vereinfachte Skizze zur Funktionsweise des Linearantriebs; der Drehstrom erzeugt magnetische Felder, deren Kräfte die fahrzeugseitigen Tragmagnetpole kontinuierlich in eine Richtung in Bewegung bringen.

Die nebeneinander liegenden Magnetpole des Tragmagneten sind mit den Polen des Rotormagneten eines Elektromotors zu vergleichen: Sie erfahren bei eingeschaltetem Drehstrom jeweils eine anziehende und eine abstoßende Kraft, sodass eine kontinuierliche Bewegung der Magnetpole in eine Richtung entsteht. Denn genau wie die drei Spulen eines Elektromotors ändern auch die drei Wicklungsleiter im Stator ganz regelmäßig ihre Polung, während die Magnetpole als Erregermagnete ihre Polung immer beibehalten. Dieser Vorgang vollzieht sich beim Linearmotor jedoch mit einer erheblich höheren Zahl von Stator- und Erregerpolen.

Aus der fließenden Überlagerung der unterschiedlich gepolten Wanderwicklungsfelder entsteht eine resultierende Kraft, die räumlich „wandert“ und so den Zug mitzieht.

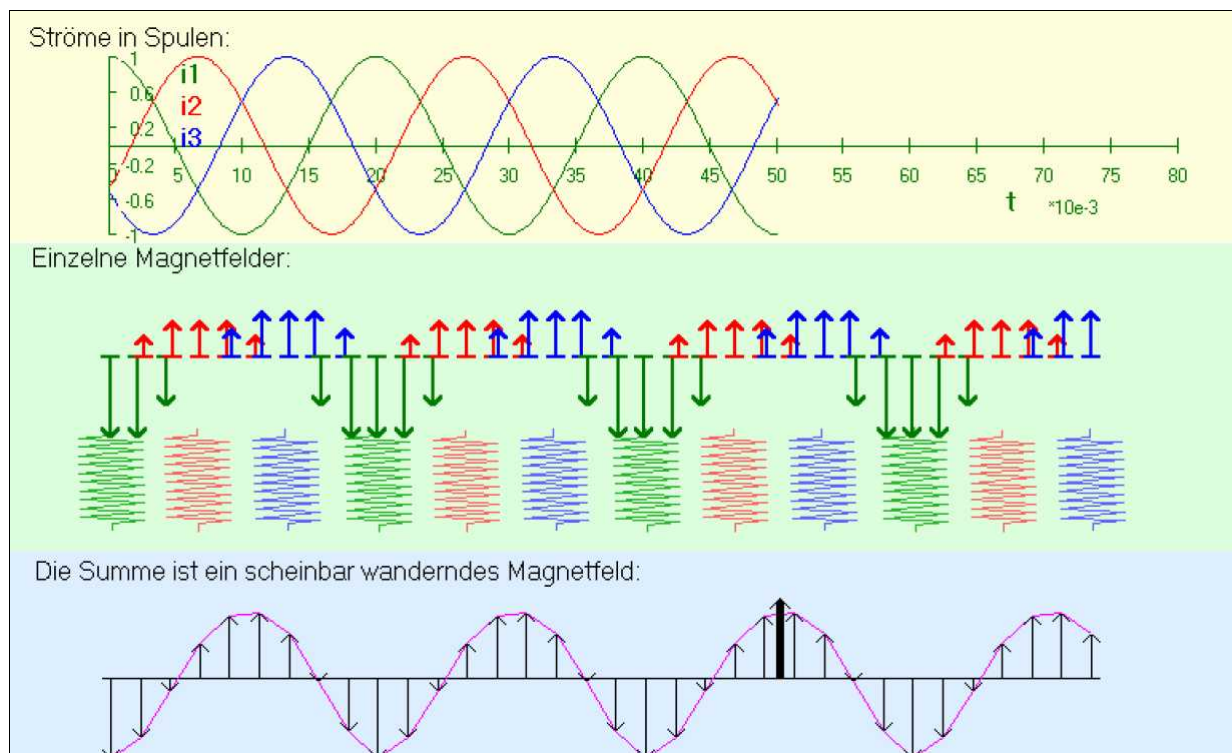


Abb. 13.2: Resultierende Kräfte in einem linearen Drehstrommotor, die durch die gleichmäßige Überlagerung dreier durch Wechselstromfluss hervorgerufenen Felder entstehen; das Wanderfeld lässt sich am besten anhand einer solchen zeitlichen Darstellung veranschaulichen.

Stellt man sich nun die drei zeitlich versetzten Wechselstromkurven im Stator zu einem feststehenden Zeitpunkt vor, wird deutlich, dass die Polung der Wicklung im Abstand von je drei Leitern (einer Polteilung) wechselt; demnach entspricht eine Wellenlänge im Drehstromdiagramm einem räumlichen Abstand von zwei Polteilungen im Stator, also sechs Leitern.

Zugleich wird deutlich, dass sich die Polung der Tragmagnetpole im Abstand von genau einer Polteilung ändern muss, damit der Zug synchron zum Wanderfeld mitgezogen werden kann.

Über eine Veränderung der Frequenz und Amplitude (Stromstärke) des verwendeten Drehstroms lässt sich Geschwindigkeit und Feldstärke des Wanderfeldes ändern. Je höher die Drehstromfrequenz, desto höher die Geschwindigkeit des Zuges. Der Zug bewegt sich stets synchron zum Wanderfeld, daher ist auch die Beschleunigung des Zuges direkt abhängig von der Frequenzänderung pro Zeit. Theoretisch ließe sich daher der Zug beliebig schnell beschleunigen, was aber den Fahrkomfort negativ beeinträchtigen würde. „Theoretisch könnte der Transrapid sogar senkrecht die Wand hochfahren“, berichtete ein TVE-Mitarbeiter¹⁶, was natürlich eine sehr hohe Stromstärke seitens des Linearmotors erfordern würde.

Die Geschwindigkeit v in Abhängigkeit der Frequenz f und der baulich bedingt konstanten Wellenlänge λ des verwendeten Drehstroms lässt sich wie folgt darstellen:

$$v = f \cdot \lambda \quad 17$$

Für den Antrieb auf der TVE gilt:

f: 0 – 270 Hz

Polteilung: 25,8 cm

$$\Rightarrow \lambda = 2 \cdot \text{Polteilung} = 51,6 \text{ cm}$$

Welche Motorfrequenz ist nun z.B. für eine Geschwindigkeit von 430 km/h notwendig?

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{430 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{51,6 \text{ cm}} = \frac{430000}{3600 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,516 \text{ m}} \approx \frac{119 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,516 \text{ m}} = 231,48 \frac{1}{\text{s}} = 231,58 \text{ Hz}$$

Der Maximalschub des Wanderfeldes auf der TVE wird mit 150 kN angegeben, die Maximalbeschleunigung des Zuges mit knapp 1 m/s^2 ¹⁸.

Abgebremst wird der Transrapid über eine Umpolung des Wanderfeldes, sodass sich die wirkenden Abstoßungs- und Anziehungskräfte umkehren. Der Linearmotor wird also zugleich als Bremse verwendet und erfüllt dadurch auch die Aufgabe eines Generators. Zusätzlich wirken beim Abbremsen Wirbelstrombremsen, die sich auf Höhe der Führungsmagnete am Zug befinden.

¹⁶ Dettlev Schubsky von der TVE-Betreibergesellschaft IABG am 20. Januar 2006 während einer Testfahrt

¹⁷ Quelle [8], S. 3

¹⁸ Quelle [6]

2.3 Technische Vor- und Nachteile des Systems

Die größten Vorteile des Schweb- und Antriebssystems der Transrapid-Magnetschwebbahn ergeben sich aus der Tatsache, dass jegliche Reibung mit der Strecke entfällt. Vorteile des Schwebesystems sind:

- Höherer Wirkungsgrad der benötigten Energie:
Im Gegensatz zu herkömmlichen Schienensystemen geht keinerlei Energie durch Reibung verloren. Deshalb kann die zugeführte Energie während der Fahrt maximal ausgenutzt werden. Der Transrapid ist so besonders energiesparend.
- Weniger Fahrzeuggewicht:
Da es sich beim Antriebssystem des Transrapid um einen fahrwegseitigen Motor handelt, braucht die Magnetbahn ihren Motor nicht selbst mitzuführen, was das Gewicht des Zuges ganz erheblich verringert. Dies gestattet z.B. eine sehr hohe Beschleunigung des Fahrzeugs und sorgt für weniger Energiebedarf.
- Hohe Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit:
Aus der hohen Geschwindigkeit des Fahrzeugs resultieren besonders auf Langstrecken kürzere Fahrtzeiten. Durch die Präzision und Zuverlässigkeit des Transrapid-Systems werden im Personenverkehr Verspätungen vermieden.
- Geringer Materialverschleiß:
Weil die Magnetbahn keinen Kontakt zur Strecke hat, ist der Materialverschleiß minimal. Das verringert den Wartungsaufwand für Strecke und Zug enorm.
- Mehr Fahrkomfort:
Durch den Schwebезustand der Magnetbahn sind Erschütterungen oder Nebengeräusche während der Fahrt minimal. Davon konnte ich mich während einer Fahrt mit dem Transrapid auf der TVE überzeugen.
- Flexible Streckenführung:
Die Transrapid-Trasse kann sowohl aufgeständert als auch ebenerdig errichtet werden. Auch sind kürzere Kurvenradien als bei herkömmlichen Schienensystemen möglich. Wegen des fahrwegseitigen Antriebs kann die Schubkraft von den individuellen Landschaftsgegebenheiten abhängig gemacht werden, sodass auch größere Steigungen und Gefälle für den Transrapid kein Problem darstellen.
- Geringeres Unfallrisiko:
Viele Bahnunfälle werden durch Kollisionen mit der Strecke oder durch Materialverschleiß verursacht. All dies entfällt beim Transrapid; ein Entgleisen ist aufgrund der Umschließung des Fahrweges quasi unmöglich. Nur gezielte Sabotage oder eine Zerstörung des Fahrweges können einen Unfall hervorrufen. Ein Frontalzusammenstoß zweier Magnetbahnen ist ebenso ausgeschlossen, da sich das Wanderfeld des Motors immer nur in eine Richtung bewegen kann und somit alle Züge auf einer Strecke immer in eine Richtung fahren. Menschliches Versagen entfällt ebenfalls, denn die Magnetbahn benötigt de facto keinen Zugführer, da sie sich vollautomatisch per Software steuern lässt.

- Witterungsunabhängigkeit:

Der Transrapid kann im Prinzip bei jedem Wetter fahren, denn die Energieversorgungsanlagen befinden sich geschützt unterhalb des Fahrwegs. Der Transrapid benötigt keine Oberleitungen. Auch wenn Schnee die Trasse bedeckt, ist ein reibungsloser Betrieb bis zu einer Schneedecke von 15 cm gewährleistet.

- Schwache Magnetfelder:

Die entstehenden Magnetfelder sind für die Passagiere ungefährlich, da sie nur auf den Bereich zwischen Tragnagnet und Stator konzentriert sind. Herzschrittmacher oder magnetische Datenträger werden davon nicht beeinflusst.

- Umweltfreundlichkeit:

Durch den geringen Energieverbrauch und die aufgeständerte Fahrwegbauweise wird die Umwelt weniger belastet und landwirtschaftliche Flächen und Fahrbahnen unterhalb der Strecke können weiterhin genutzt werden.

Neben diesen überzeugenden Vorteilen bringt das Schwebbahnsystem aber auch einige entscheidende Nachteile mit sich:

- Kein zuverlässiger Gütertransport möglich:

Dadurch, dass das Fahrzeuggewicht des Transrapid möglichst gering sein muss, ist ein Gütertransport mit der Magnetbahn nicht empfehlenswert. Zwar besteht die theoretische Möglichkeit des Gütertransports, doch wären entsprechend stärkere Tragnagnetfelder erforderlich, was aufgrund des höheren Energiebedarfs unwirtschaftlich wäre.

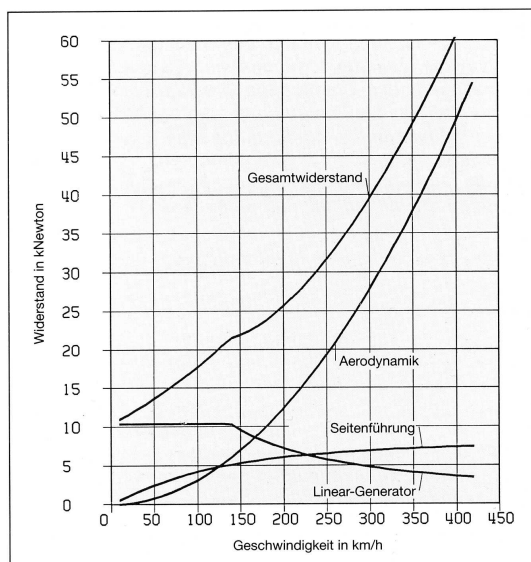


Abb. 16.1: Fahrwiderstände beim „TR 06“, den Großteil des Widerstandes macht die Aerodynamik aus.

- Hoher Luftwiderstand:

Bei hohen Geschwindigkeiten ist der Luftwiderstand, den das Fahrzeug frontal erfährt, ganz erheblich (siehe Abb. 16.1). Zwar ist die Front des Zuges aerodynamisch geformt, doch ließe sich dieser nachteilige Nebeneffekt nur durch ein Vakuum verhindern. Durch den Luftwiderstand entsteht ein Großteil des Energiebedarfs.

- Hohe Investitionskosten:

Die Baukosten für den Transrapid-Fahrweg sind extrem hoch und machen so ca. 80 % der Gesamtkosten aus¹⁹. Das liegt zum einen an der aufwendigen Beton- bzw. Stahlbauweise, zum anderen aber auch an der erforderlichen

Präzision der Systemkomponenten. So müssen z.B. die Wanderfeldwicklung und der Stator millimetergenau gefertigt und montiert werden; so lässt es sich auch erklären, weshalb für den Bau der TVE eigene Fertigungsmaschinen und Montierfahrzeuge konzipiert und gebaut wurden.

¹⁹ Quelle [9]

Der Kostenfaktor ist somit eines der Hauptargumente gegen die Errichtung von Magnetbahnstrecken.

3. Fazit / Ausblick

Spätestens seit dem „TR 08“ ist das deutsche Transrapidsystem fraglos bereit für den Einsatz im Personenverkehr, denn die Magnetschwebetechnik ist nach Jahrzehnten der intensiven Entwicklung und Erprobung sehr zuverlässig, komfortabel und sicher. Die Liste der Argumente für die Magnetschwebebahn ist lang. Die bloße Frage nach der Machbarkeit einer Transrapid-Strecke stellt sich also schon lange nicht mehr.

Dennoch wartet man auf der TVE seit nunmehr über 20 Jahren auf eine Möglichkeit, die Magnetbahn endlich auch in Deutschland schweben zu lassen. In einem Land, dessen Bahnnetz dicht geknüpft ist und wo es bereits ICE-Züge mit Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h gibt, tut man sich mit einer derartigen Hightech-Errungenschaft schwer und fragt sich: Lohnt es sich, Milliarden in ein Verkehrssystem zu investieren, dessen Rentabilität immer noch sehr umstritten ist?

Bisher sind alle Pläne für eine deutsche Transrapid-Langstrecke an politischen Entscheidungen gescheitert, da das Risiko zu groß schien. Nun ist neue Bewegung in die Diskussion gekommen, nachdem China kürzlich ankündigte, eine eigene Magnetschwebebahn entwickeln zu wollen (allerdings müssen sich die Chinesen in diesem Zusammenhang schwerwiegende Vorwürfe der Industriespionage gefallen lassen); in Deutschland möchte man Innovationsfähigkeit demonstrieren. So regte Bayerns Ministerpräsident Edmund Stoiber an, den Bau der Transrapid-Strecke „Flughafen München“ zu beschleunigen. Ob den Worten Taten folgen werden, bleibt abzuwarten.

Meiner Meinung nach ist der Transrapid zwar ein hochentwickeltes und prinzipiell sinnvolles Verkehrssystem, doch die o.g. Gründe stimmen mich wenig zuversichtlich, dass die Magnetschwebebahn sich jemals wirklich hierzulande durchsetzen wird.

4. Anhang

4.1 Quellenverzeichnis

Um die Fußnoten im Text möglichst knapp zu halten, habe ich den Quellen, auf die im Hauptteil der Arbeit Bezug genommen bzw. aus denen zitiert wird, jeweils in eckigen Klammern eine Nummer zugewiesen (chronologisch zum Text).

Literatur

- [6] Besucherzentrum TVE:
Datenblatt zu TVE und Transrapid, Lathen 2005
- [4] Dr.-Ing. Götzke, Horst:
Transrapid - Technik und Einsatz von Magnetschwebbahnen, transpress Verlag, Stuttgart 2002
- [7] Dr. Kilian, Ulrich:
Der Transrapid in: Physikalische Blätter 57 (2001) Nr. 6, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2001

MVP (Versuchs- und Planungsgesellschaft für Magnetbahnsysteme) und Transrapid International (Gesellschaft für Magnetbahnsysteme) (Hrsgb.):
Magnetbahn Transrapid – Die neue Dimension des Reisens, Hestra-Verlag, Darmstadt 1989

Siemens AG: Dipl.-Ing. Blank, Karsten,
Dipl.-Ing. Engel, Markus,
Dr.-Ing. Hellinger, Rolf,
Dipl.-Ing. Hoke, Dirk,
Dipl.-Ing. Nothhaft, Jürgen,
Antrieb und Energieversorgung des Transrapid (Sonderdruck aus ZEV Glasers Annalen, Sonderheft „Transrapid 2003“), Erlangen 2003

ThyssenKrupp Transrapid GmbH:
Magnetschwebbahn. Vom HMB 2 zum Transrapid. Geschichte und Entwicklung, München

ThyssenKrupp Transrapid GmbH:
Magnetschwebbahn. Das Fahrzeug Transrapid 08, München

ThyssenKrupp Transrapid GmbH:
Magnetschwebbahn. Das Fahrzeug Shanghai Transrapid, München

Transrapid International GmbH & Co. KG:
Einstieg in Richtung Zukunft – Die Magnetschwebbahn in München, Berlin 2004

Transrapid International GmbH & Co. KG:
A Train without Wheels – A Plane without Wings, Berlin 2005

Transrapid International GmbH & Co. KG:
Hochtechnologie für den „Flug in Höhe 0“ – Die Magnetschwebbahn Transrapid, Berlin 2003

Werning, J.,
Schmoll, Volker:
Sicher in der Spur – Niederspannungsschalttechnik im Transrapid in:
Siemens advance 3 / 2004, Publicis KommunikationsAgentur GmbH, Erlangen 2004

Internet

- [1] Der Transrapid - Referat von Stefan Gerth
<http://www.krapfen.org/transrapid/>
Letzter Zugriff: 04.02.2006

- [2] Magnetschwebbahn Bayern
<http://www.bmg-bayern.de/>
Letzter Zugriff: 24.02.2006
- [3] Prof. Dr.-Ing. Mnich, P.:
Betriebssysteme elektrischer Bahnen: 3. Magnetbahnspezifische Begriffe und Definitionen, 2004
http://www.bahnsysteme.tu-berlin.de/pdf/NwB_300.pdf
Letzter Zugriff: 19.02.2006
- [8] Markus Uhlenbrock, Vlkhard Nordmeier, H. Joachim Schlichting:
Die Magnetschnellbahn im Experiment
http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/magnetschnellbahn_transrapid.pdf
Letzter Zugriff: 04.02.2006
- [9] Facharbeit im Leistungskurs Physik – Magnetische Schwebeprinzipien am Beispiel von Magnetschwebbahnen
<http://www.referate10.com/referate/Physik/8/Im-Leistungskurs-Physik---Magnetische-Schwebeprinzipien-am-Beispiel-von-Magnetschwebbahnen-reon.php>
Letzter Zugriff: 04.02.2006
- Die Technik des Transrapid
<http://fipsgold.physik.uni-kl.de/fips/teilnehmer/newsticker/history/01-02-06.html>
Letzter Zugriff: 04.02.2006
- Transrapid: Der Antrieb des Fahrzeuges
http://www.iabg.de/transrapid/technik/antrieb/index_de.php
Letzter Zugriff: 04.02.2006
- Wikipedia: Transrapid
<http://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid>
Letzter Zugriff: 24.02.2006
- Wikipedia: Elektromotor
<http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
Letzter Zugriff: 23.02.2006
- Wikipedia: Linearmotor
<http://de.wikipedia.org/wiki/Linearmotor>
Letzter Zugriff: 03.02.2006
- Wikipedia: Dreiphasenwechselstrom
<http://de.wikipedia.org/wiki/Dreiphasenwechselstrom>
Letzter Zugriff: 21.02.2006
- dwu-Unterrichtsmaterialien: Animation zum Drehstrom-Verlauf
<http://www.zum.de/dwu/depotan/apem112.htm>
Letzter Zugriff: 19.02.2006
- Wilhelm, T.: Der asynchrone Linearmotor – einfachst nachgebaut
http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/Asynchroner_Linearmotor.pdf
Letzter Zugriff: 18.02.2006
- Brockhaus | Der Transrapid: Technik, Funktionsweise und Entwicklung
http://www.brockhaus.de/aktuell/thema.php?t_id=84&jahr=2002&printable=1
Letzter Zugriff: 05.02.2006
- Körner, Jürgen: Transrapid System Eigenschaften
http://www.juergen-koerner.de/tr_eigen.htm
Letzter Zugriff: 04.02.2006

Medien

[5] DVD: Transrapid - Der Flug in Höhe Null, Transrapid International, Berlin 2004

VHS: Hochtechnologie für den „Flug in Höhe 0“, Transrapid International, Berlin

4.2 Bildnachweis

Titel: http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/germany/transrapid_08_gr.jpg
Letzter Zugriff: 26.02.2006

2.1 http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/magnetschnellbahn_transrapid.pdf
S. 2
Letzter Zugriff: 04.02.2006

2.2: http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/germany/transrapid_06_gr.jpg
Letzter Zugriff: 26.02.2006

2.3: s. Titel

2.4: http://www.rpasia.com/uploads/Rohacell_Chinese_Maglev_Shanghai_Transrapid_LR.jpg
Letzter Zugriff: 26.02.2006

3.1: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Tr_noerdliche_kurve02.jpg
Letzter Zugriff: 26.02.2006

3.2: s. Abb. 2.1
(geringfügig modifiziert)

4.1: <http://krapfen.org/transrapid/images/schwebesystem.jpg>
Letzter Zugriff: 26.02.2006

4.2: s. Abb. 2.1

7.1: http://www.bmg-bayern.de/tech_2_xl.php?im=2
Letzter Zugriff: 26.02.2006

8.1: Dr.-Ing. Götzke, Horst:
Transrapid - Technik und Einsatz von Magnetschwebbahnen, transpress Verlag, Stuttgart
2002, S. 34

9.1: <http://www.zum.de/dwu/depot/pem112f.gif>
(geringfügig modifiziert)
Letzter Zugriff: 26.02.2006

10.1: http://www.bmg-bayern.de/tech_2_xl.php?im=1
Letzter Zugriff: 26.02.2006

10.2: s. Abb. 2.1
S. 3

10.3: http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/Asynchroner_Linearmotor.pdf
S. 1
Letzter Zugriff: 18.02.2006

11.1: Eigene Fotografie vom Besuch der TVE am 20. Januar 2006

11.2: MVP (Versuchs- und Planungsgesellschaft für Magnetbahnsysteme) und Transrapid International (Gesellschaft für Magnetbahnsysteme) (Hrsg.):
Magnetbahn Transrapid – Die neue Dimension des Reisens, Hestra-Verlag, Darmstadt 1989,
S. 50

12.1: s. Abb. 11.2
S. 79

12.2: s. Abb. 11.1

12.3: s. Abb. 11.1

13.1: http://www.iabg.de/transrapid/technik/antrieb/images/antrieb_04.jpg
Letzter Zugriff: 26.02.2006

13.2: s. Abb. 10.3
S. 8

16.1: s. Abb. 11.2,
S. 100