

## **Technologie des Transrapids**

Hausarbeit für das Physiklabor SoSe 2020

Eingereicht am: 20.04.2020

**Robin Kreipe und Jan Wille**

---

## **Versicherung**

über selbstständiges Erarbeiten dieses Berichtes

Hiermit bestätigen wir, dass wir den folgenden Bericht unter Berücksichtigung der zur Verfügung gestellten Aufgabenstellung sowie dem Arbeitsmaterial unter Angabe aller verwendeten Quellen erarbeitet habe.

---

Robin Kreipe

Jan Wille

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Geschichte</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Das Antriebssystem</b>	<b>3</b>
3.1	Grundlagen des magnetischen Feldes . . . . .	4
3.2	Der Antrieb . . . . .	7
3.3	Das Schweben . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Die Testanlage im Emsland</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>11</b>
	<b>Literatur</b>	<b>12</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>13</b>



# 1 Einleitung

Aufgrund der aktuellen umwelttechnischen Situation werden effizientere und nachhaltigere Verkehrssysteme immer wichtiger. Diese sollen eine Alternative zu bestehenden Verkehrssystemen mit geringem Wirkungsgrad und angetrieben mit fossilen Brennstoffen bieten. Eine solche Alternative stellt die Magnetschwebetechnik dar, die von der Siemens AG und der ThyssenKrupp Transrapid GmbH entwickelt wurde. Diese wurde bis 2011 auf der Transrapid-Versuchsanlage Emsland bei Lathen entwickelt und optimiert. Die dabei entstandene Technik ist heutzutage als „Transrapid“ bekannt.

Diese Hausarbeit soll einen Überblick sowohl über die allgemeine Funktionsweise der Technik, die im Transrapid verwendet wird als auch eine kurze Zusammenfassung des geschichtlichen Hintergrundes der Technologie und vor allem der Transrapid Versuchsanlage Emsland geben. Der geschichtliche Hintergrund und die aufgetretenen Probleme bei der Entwicklung der Technologie, die schlussendlich auch das Ende der Entwicklung bedeutet haben, werden im ersten Teil behandelt. Darauf wird im zweiten Teil das Antriebssystem zusammen mit grundlegenden physikalische Eigenschaften des Transrapids beschrieben. Dabei werden Vergleiche zwischen dem aktuell vorherrschenden Rad-Schienen-System und des Transrapidsystems beschrieben und erläutert. Abschließend wird eine kurze Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse gegeben und ein Fazit, bezogen auf die Möglichkeit dieser Technologie eine Alternative zur bestehenden Rad-Schienen-Technologie zu sein, gezogen.

## 2 Geschichte

1934 reichte der deutsche Ingenieur Hermann Kemper ein Patent, in dem er eine Magnetschnellbahn beschreibt, die in einer evakuierten Röhre mit bis zu  $1000 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  zwischen Basel und Berlin fährt, ein. Dabei würde die Reisezeit zwischen den Städten nur 41 Minuten betragen. 1962 begannen die Japaner, 1965 die deutsche Firma MBB, mit der Forschung und Entwicklung erster Fahrzeuge und Streckensysteme. Die erste Förderung der Forschung in Deutschland begann erst 1971 durch die BMBF. Das Ziel dieser Forschung war, neben der Erforschung der technischen und wirtschaftlichen Grenzen des Rad-Schienen-Systems, Alternativen zu diesem System zu entwickeln mit besonderem Schwerpunkt auf der berührungsfreien Trag-, Führ- und Antriebstechnik. [SJN06]

1980 begann der Bau der Transrapid Versuchsanlage Emsland, wobei der erste von zwei Bauabschnitten, die Nordschleife, 1984 in Betrieb genommen wurde. Der zweite Bauabschnitt, die Südschleife, wurde 1987 fertiggestellt. Die TVE galt mit 31,8 km als die größte Versuchsstrecke dieser Art in der Welt. Das Ziel der TVE war es den bisher entwickelten Transrapid 06 im Dauerbetrieb zu testen und daraus Hinweise auf offene Potentiale der Technologie zu gewinnen. Fehler und offene Potentiale wurde 1989 mit dem Transrapid 07 ausgearbeitet. Dieser stellte 1993 mit  $450 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  einen neuen Geschwindigkeitsrekord für personenbesetzte Magnetbahnen auf. [stx06]

1999 wurde die Serie Transrapid 08 an die TVE geliefert, die für einen Einsatz außerhalb der Versuchsanlage vorgesehen war. Ein großer Schritt zur Integration der Technologie in den öffentlichen Personenverkehr war die Zulassung des Transrapids für den automatischen Betrieb 2005. Dies ermöglichte es, dass der Transrapid auf der Versuchsanlage führerlos und voll automatisch gesteuert fahren durfte. [stx06]

Am 22. September 2006 kollidierte der Transrapid mit einer Geschwindigkeit von  $170 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  mit einem Werkstattwagen, der kurz zuvor die Strecke gereinigt hatte und anschließend vergessen wurde von dieser zu fahren. Bei diesem Unfall kamen 23 Menschen ums Leben und weitere 8 Menschen wurden zum Teil schwer verletzt. Aufgrund dieses schwerwiegenden Unfalls wurde zunächst ein Nachfolgemodell des Transrapids 08, der Transrapid 09, auf der Versuchsanlage getestet, der einen solchen Unfall ausschließen sollte. Doch Ende 2011 wurde die staatliche Förderung der Entwicklung eingestellt und anschließend den Rückbau der Versuchsanlage angekündigt. [NDR20]

Bis heute wurden nur Teile der Anlage zurückgebaut, doch die Betonfundamente des Fahrweges auf der gesamten Strecke stehen immer noch, da niemand die Kosten des Rückbaus tragen möchte. Das Forschungszentrum, welches der Strecke direkt angegliedert ist, wurde für die Entwicklung eines induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge umgebaut. Dabei wird das Wissen der Transrapid-Technologie eingesetzt und für den Anwendungsfall des induktiven Ladens spezialisiert. [HS16]

### 3 Das Antriebssystem

Grundsätzlich muss jedes Fahrwerk drei grundlegende Aufgaben erfüllen: Tragen, Antreiben und Führen. Dies ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Beim Rad-Schienen System trägt die Schiene das Gewicht des Fahrzeuges und die Form der Räder sorgt für die Führung. Das Fahrzeug wird durch einen internen Motor angetrieben und die Rotationsenergie über eine Welle auf das Rad übertragen.

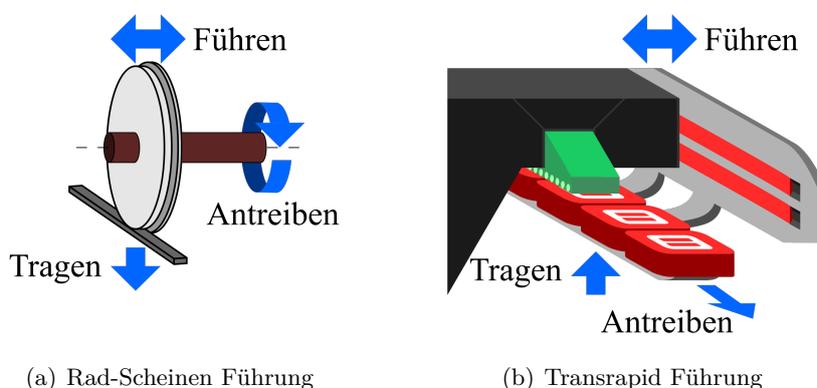


Abb. 3.1: Vergleich der Führungssysteme, (nach [UNS98, Abb. 3])

Bei all diesen Schritten geht durch Reibung und Haftung Energie verloren und dies soll beim Transrapid optimiert werden. Dort soll das Tragen und Führen durch magnetische Kräfte realisiert werden (siehe Abbildung 3.1) sodass es keine Berührung zwischen Schiene und Fahrzeug mehr gibt und damit auch keine Reibung. Dazu verfügt der Transrapid über einen speziellen Aufbau der Schiene und des Fahrwerks. Dieses umschließt die Schiene mit Magneten und kann das gesamte Fahrzeug von unten heranziehen. Dadurch wird das gesamte Fahrzeug angehoben. Durch präzises Steuern der Magneten kann so ein schwebende Zustand erreicht werden. Der Aufbau ist in Abbildung 3.2 bildlich dargestellt. [UNS98]

Als Antrieb einer Magnetschnellbahn sind grundlegend drei unterschiedliche Techniken zu unterscheiden:

- **EMS** - elektromagnetisches Schweben, beim Transrapid eingesetzt
- **EDS** - elektrodynamisches Schweben, beim japanischen eisenlosen System angewandt
- **PMS** - permanentmagnetisches Schweben

Im Folgenden wird das für den Transrapid verwendete System EMS betrachtet und erläutert. Bevor jedoch auf das Antriebssystem weiter eingegangen und die physikalischen Zusammenhänge aufgeschlüsselt wird, werden zunächst einige grundlegende Gesetzmäßigkeiten und Abhängigkeiten in Magnetfeldern erläutert.

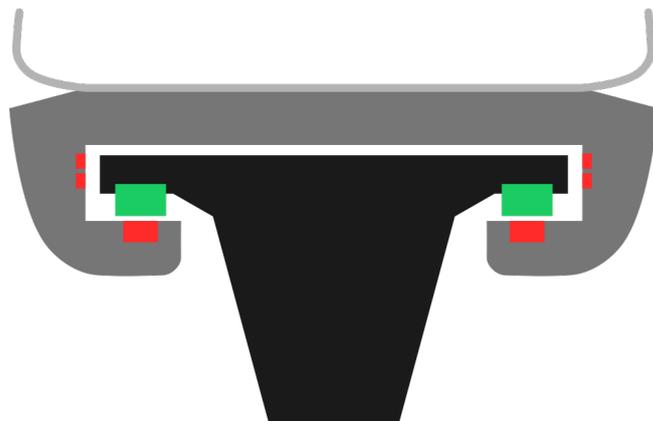


Abb. 3.2: Querschnitt durch Fahrzeug und Schiene,  
(nach [UNS98, Abb. 4])

### 3.1 Grundlagen des magnetischen Feldes

Bei der Transrapidtechnologie werden die zum Schweben und Führen benötigten Magnetfelder durch starke elektrische Ströme im Fahrweg erzeugt. Dabei bestimmen die Flussrichtung und die Stromstärke die magnetischen Kräfte in Betrag und Richtung. Innerhalb eines Permanentmagneten sind die Magnetfeldlinien von Süd nach Nord und außerhalb von Nord nach Süd gerichtet. Dabei hat jedes Magnetfeld einen Nord- und einen Südpol. Im Gegensatz zum Magnetfeld eines Permanentmagneten sind die Magnetfeldlinien eines stromdurchflossenen Leiters konzentrisch kreisförmig um den Leiter angeordnet (Abbildung 3.3). [SJN06]

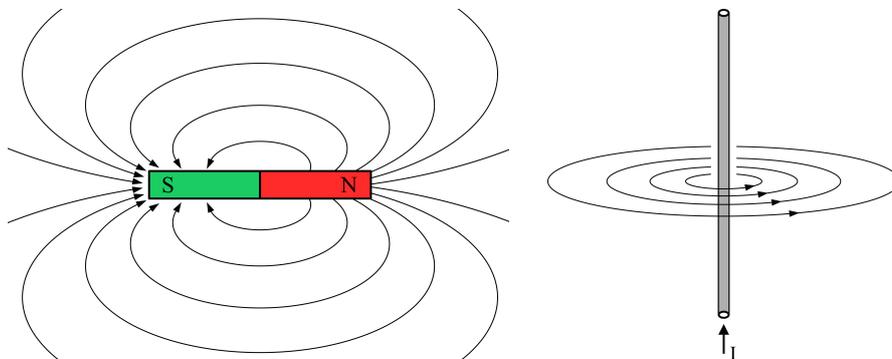


Abb. 3.3: Magnetfeldlinien eines Stabmagnets und eines stromdurchflossenen Leiters,  
(nach [SJN06, Abb. 3.2])

Die Ausrichtung der Magnetfeldlinien folgt einem Rechtssystem, das durch die „Regel der rechten Hand“ vereinfacht dargestellt werden kann. Wenn der Daumen in Richtung der technischen Stromrichtung ausgerichtet ist, so zeigen die restlichen gekrümmten Finger den Verlauf der Magnetfeldlinien. In einem geraden Leiter gilt für die magnetische Feldstärke  $H$  Folgendes:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \quad (3.1)$$

$H$  | magnetische Feldstärke  $[\frac{A}{m}]$   
 $I$  | elektrische Stromstärke  $[A]$

$r_0$  | Abstand zum Leiter  $[m]$

Aus der Gleichung 3.1 folgt: je größer der Abstand der Magnete zueinander ist, wird das Tragen und Führen durch das magnetische Feld immer schwerer und kraftaufwändiger. Die Gleichung 3.1 gilt nur für gerade Leiter. Da die Fahrwegsleiter des Transrapids nicht gerade sind, muss die Gleichung 3.1 nach dem Biot-Savartschen-Gesetz für beliebige Leitergeometrien erweitert werden:

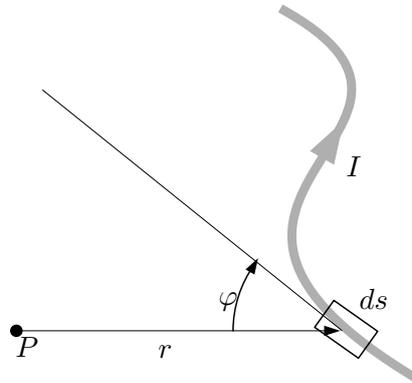


Abb. 3.4: test,  
(nach [SJN06, Abb. 3.3])

$$dH = \frac{I \cdot ds}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sin(\varphi) \quad (3.2)$$

$I$  | elektrische Stromstärke [A]  
 $r$  | Abstand zum Leiter [m]  
 $\varphi$  | Winkel zwischen Abstandsvektor zu P und stromdurchflossenem Leiter

Aus der Gesetzmäßigkeit der elektrischen Felder, dass sich Magnetfeldlinien nicht schneiden können, ergibt sich die tragende Wirkung dieser. Dies wird in Abbildung 3.5 mittels zweier paralleler Leiter, bei denen der Strom in gleicher Teilabbildung 3.5(a) und entgegengesetzter Teilabbildung 3.5(b) fließen, dargestellt.

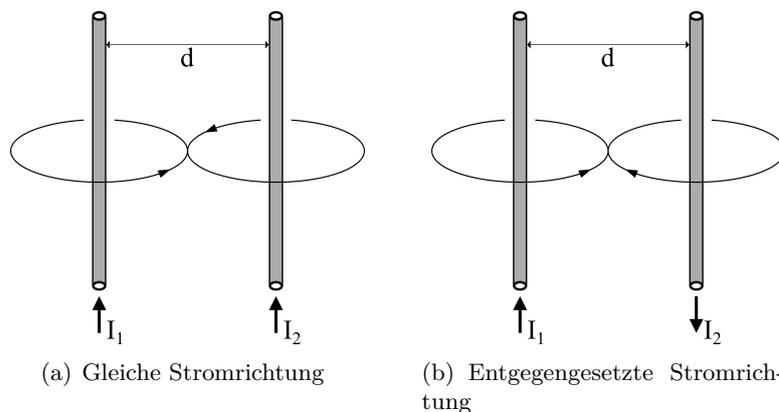


Abb. 3.5: Wechselwirkung der Magnetfelder von stromdurchflossenen Leitern

Die dabei entstehenden Wechselwirkungen zwischen der magnetischen Feldern der Leiter wird

in Abbildung 3.6 veranschaulicht. Wenn der Strom in den Leitern in die gleiche Richtung fließt ([Teilabbildung 3.6(a)] ) heben sich die dabei entstehenden Magnetfeldlinien zwischen den Leitern gegenseitig auf. Dagegen verstärken sich die Magnetfelder, sobald der Strom in unterschiedliche Richtungen fließt [Teilabbildung 3.6(b)].

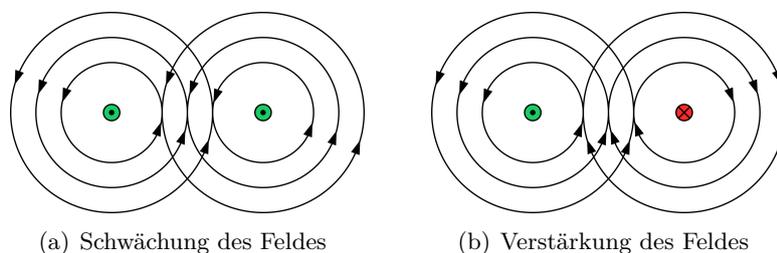


Abb. 3.6: Verstärkung und Schwächung des magnetischen Feldes

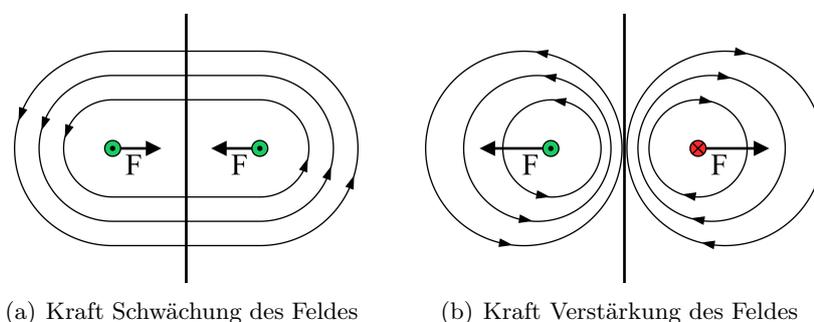


Abb. 3.7: Kraft bei Verstärkung und Schwächung des magnetischen Feldes

Aufgrund der Gesetzmäßigkeit, dass sich die Feldlinien nicht schneiden können, beeinflussen und überlagern sich die Feldlinien. Dies ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Bei gleicher Stromflussrichtung stimmen die Drehrichtungen der magnetischen Felder überein, wodurch sich die Anteile der Magnetfeldlinien zwischen den Leitern aufheben. Dies hat zur Folge, dass sich die Leiter gegenseitig anziehen [Teilabbildung 3.7(a)]. Dagegen sind die Drehrichtungen der Magnetfelder bei entgegengesetzter Stromflussrichtung gegenläufig, wodurch die Magnetfeldlinien verdichtet werden. Dadurch stoßen sich die Leiter gegenseitig ab [Teilabbildung 3.7(b)]. Die auf die Leiter wirkende Kräfte werden mithilfe der Feldstärke und der magnetischen Induktion  $B_0$  [ $\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$ ] berechnet:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad (3.3)$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

Aus Gleichung 3.2 und Gleichung 3.3 folgt die Beziehung für die Kraft zwischen zwei Leitern in Abhängigkeit der jeweiligen Stromstärke  $I_1$  und  $I_2$ :

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (3.4)$$

$I_1, I_2$	Stromstärke in den Leitern 1 und 2 [A]	$d$	Abstand der Leiter [m]
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante im Vakuum	$l$	Länge des Leiters [m]

Auf Basis der Gleichung 3.4 wird ersichtlich, dass sich die Kraft umgekehrt proportional zur Änderung des Abstandes  $d$  zwischen Leitern verhält. Die bisher betrachteten Gleichungen verändern sich, sobald die Leiter Luft oder anderen Materialien umgeben sind. Zum Beispiel verändert sich die magnetische Induktion von  $B_0$  zu  $B$  in Abhängigkeit des umgebenden Materials des Leiters. Durch Hinzufügen einer materialabhängigen Konstante zur Gleichung 3.3, Permeabilitätszahl  $\mu_r$  genannt, wird das materialabhängige Verhalten der magnetische Induktion beschrieben.

$$B = \mu \cdot H = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (3.5)$$

$H$  | magnetische Feldstärke [ $\frac{A}{m}$ ]       $B$  | magnetische Induktion [ $\frac{Vs}{m^2}$ ]  
 Ferromagnetische Materialien verstärken die Induktion stark und zeichnen sich durch ein  $\mu_r > 1$  aus. Paramagnetische Materialien verstärken die magnetische Induktion gar nicht oder sehr gering und zeichnen durch ein  $\mu_r \approx 1$  aus. Diamagnetische Materialien schwächen das Magnetfeld und zeichnen sich durch ein  $\mu_r < 1$  aus.

## 3.2 Der Antrieb

Grundsätzlich kann der Antrieb einer Magnetschwebbahn entweder im Fahrzeug selber, wie bei einem herkömmlichen Schienenfahrzeug, oder aber im Fahrweg integriert werden. Beim EMS System des Transrapid wurde ein Langstator im gesamten Fahrweg verbaut, sodass ein einziger großer Linearmotor entsteht, welcher den Transrapid antreibt und bremst. Die Alternative, einen Kurzstator im Fahrzeug zu verbauen, wäre zwar wirtschaftlicher, stößt technisch jedoch schnell an seine Grenzen. Außerdem wird zurzeit ausschließlich an Drehstrom Systemen geforscht, da in einem Gleichstrom-Linearmoter hohe Ströme notwendig wären und dadurch die Verlustleistung überproportional zunimmt. [SJN06]

Dies hat den Vorteil, dass die für den Vortrieb notwendige Energie nicht erst aufwändig in das Fahrzeug übertragen werden muss. Außerdem kann der Fahrweg abschnittsweise nur betrieben werden, wenn tatsächlich ein Fahrzeug auf dem Abschnitt fährt. Dies hat außerdem den Vorteil, dass nach typischerem Leistungsbedarf dimensioniert werden kann, eine Beharrungsstrecke benötigt beispielsweise weniger Leistung als eine Beschleunigungsstrecke. [UNS98] Daraus resultiert ein leichteres Fahrzeug, welches kombiniert mit den Vorteilen des berührungslosen Fahrens, welches in Abschnitt 3.3 erläutert wird, viele Leistungsverluste des herkömmlichen Rad-Schienen Systems ausmerzen kann.

Ein Langstator ist im Prinzip ein längst aufgerollter Stator eines konventionellen Motors. Die resultierenden Leiterwege sind in Abbildung 3.8 schematisch dargestellt. Fließen nun Sinus-Ströme mit einer Phasenverschiebung von  $120^\circ$ , allgemein als Drehstrom bekannt, durch die Leiter, entstehen wechselnde Magnetfelder, die entlang der Längsachse zu wandern scheinen. Der selbe Effekt erzeugt auch das Drehfeld in einem konventionellen Motor, da in diesem Fall aber keine Drehung erzeugt wird, spricht man von einem Wanderfeld.

Durch das Wanderfeld wird jeder magnetische Werkstoff entlang der Längsachse beschleunigt. Die Frequenz des Drehfeldes legt dabei die Geschwindigkeit fest und die Richtung des Drehfeldes die Richtung der Beschleunigung. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ist also proportional zur synchronen Wanderfrequenz  $v_{syn}$  und kann wie die Winkelgeschwindigkeit einer Drehstrommaschine berechnet werden (Gleichung 3.6). [SJN06]

$$v_{syn} = 2 \cdot \tau_p \cdot f_s \quad (3.6)$$

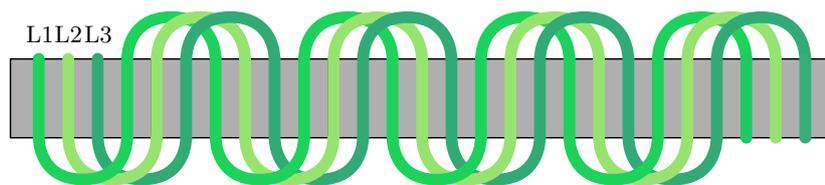


Abb. 3.8: Schemazeichnung eines Drehstrom Lang-Stators,  
(nach [Sut05, Abb. 2])

„Die Polteilung  $\tau_p$  wird bestimmt durch den Abstand zwischen Nord- und Süd-Pol des Wandlerfeldes im Statorpaket und entspricht bei einer einphasigen Wicklung dem Abstand der in den Stator eingelegten Leiterschleifen. Bei der dreiphasigen Wicklung (Drehstrom) werden drei Leiter  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  im Wechsel hintereinander in den Stator eingeklemmt [...] was einer Polteilung von  $1/3 \tau_p$  entspricht. Beim Stator des Transrapid-Fahrweges, die Statorwicklung ist in Abbildung 3.9 dargestellt, wurde ein Abstand zwischen den einzelnen Leiterschleifen von im Mittel 86 mm realisiert, das heißt die Polteilung ergibt sich zu  $\tau_p = 3 \cdot 86 \text{ mm} = 258 \text{ mm}$ .“ [SJN06]

Die Ständerfrequenz  $f_s$  entspricht, wie beim konventionellen Drehstrommotor, der Frequenz des anliegenden Drehstromes. Diese kann beim Transrapid von 0 – 270 Hz geregelt werden. [SJN06]

Damit ergibt sich durch Einsetzen in Gleichung 3.6 eine maximale Geschwindigkeit von  $\approx 140 \text{ m/s} \approx 500 \text{ km/h}$



Abb. 3.9: Reale Umsetzung des Langstators  
[SJN06, Abb. 3.8]

### 3.3 Das Schweben

Das Schweben realisiert das Tragen des Transrapid. Im Gegensatz zum Antrieb muss die hierfür nötige Energie allerdings im Fahrzeug mitgeführt oder zumindest zwischengespeichert werden, um auch bei einem Ausfall der Versorgung das Fahrzeug noch sicher zum Stehen zu bekommen. Im Falle des Prototypen im Emsland wurde dies durch Batterien im Fahrzeug umgesetzt, deren Kapazität ausreichte, um noch bis zur nächsten Haltestelle weiter zu „rollen“.

Technisch wird das Schweben durch magnetische Kräfte realisiert. Dazu sind große Elektromagneten im Fahrgestell der Transrapids eingebaut, die unterhalb des Stators ausgerichtet sind. Diese wechselwirken, wenn sie eingeschaltet sind, mit dem Eisenkern des Stators und dem Wanderfeld und heben das Fahrzeug um bis zu 150 mm an. Die Magneten bestehen aus, wie in Abbildung 3.10 erkennbar, Polwicklungen und einem Polkern, in den zusätzlich Lineargenerator-Wicklungen eingebaut sind. [SJN06]

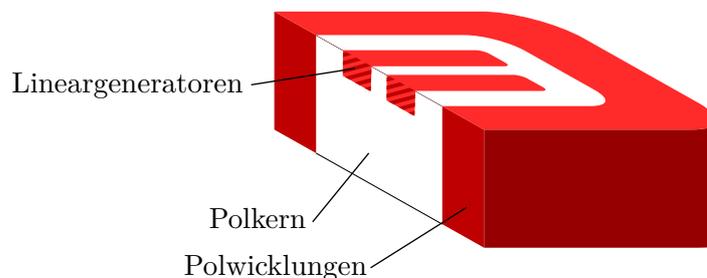


Abb. 3.10: Querschnitt eines einzelnen Haltemagneten,  
(nach [SJN06, Abb. 3.9])

Insgesamt zwölf solcher Haltemagneten werden mit vier Messeinheiten und seitlichen Führungsmagneten auf einen Trägerrahmen gebaut und bilden zusammen ein sogenanntes Magnetmodul. Innerhalb des Moduls sind jeweils drei Haltemagneten mit einer Messeinheit in einem Regelkreis verschaltet, der den Spaltabstand zwischen Haltemagneten und Schienen auf weniger als 10 mm regelt. [SJN06]

Dadurch ist in allen Betriebszuständen die Berührungsfreiheit zwischen Fahrzeug und Fahrweg sichergestellt. Dies funktioniert, vereinfacht dargestellt, durch sehr schnelles Ein- und wieder Ausschalten. Frequenzen von 1 GHz sind hier bei den Schaltvorgängen möglich, was ein Schweben ohne für Menschen spürbare Vibrationen ermöglicht. [SJN06]

Um die für das Schweben sowie Beleuchtung, Klimaanlage und Steuerung benötigte Energie in das Fahrzeug zu übertragen, wird das Prinzip der magnetischen Induktion genutzt. Wie bereits erwähnt, sind in jedem Haltemagneten Lineargenerator-Wicklungen eingebaut. Bewegen sich diese durch ein Magnetfeld, wird durch Induktion ein Stromfluss in ihnen erzeugt. Dieser wird ins Boardnetz des Fahrzeuges eingespeist und kann genutzt werden.

Möglich ist dies allerdings nur, solange sich der Transrapid fortbewegt und der Langstator in der Fahrbahn tatsächlich ein Wanderfeld erzeugt. Deshalb verfügt der Transrapid Shanghai über zusätzliche Stromabnehmer, die ausgefahren werden können, wenn sich das Fahrzeug auf langsamen Teilstrecken oder in einem Bahnhof befindet. Üblicherweise reichen Geschwindigkeiten von 20 km/h aus, um Energie ins Boardnetz einzuspeisen. [SJN06]

## 4 Die Testanlage im Emsland

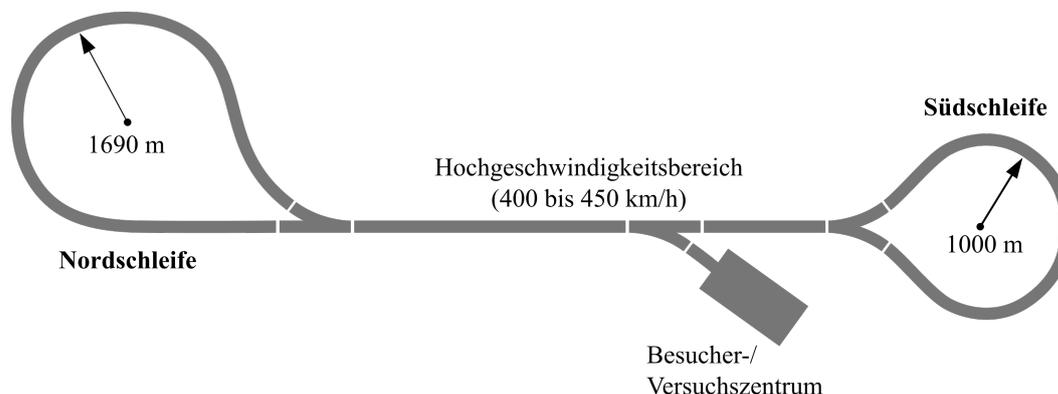


Abb. 4.1: Die Versuchsanlage im Emsland,  
(nach [SJV06, Abb. 4.1])

Die Testanlage im Emsland, kurz TVE für „Transrapid Versuchsanlage Emsland“, wurde zwischen 1980 und 1987 errichtet. Seit 1989 wurden Prototypen des Transrapid 05 bis 08 auf der Strecke getestet und weiterentwickelt. Im Jahre 2000 erfolgte die Zulassung für den Personenverkehr durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Seit Mai 2005 war die Anlage sogar für den automatischen Betrieb zugelassen, was bedeutet dass ein Fahrplan einprogrammiert werden konnte und danach kein Eingreifen durch Personal während der Fahrt mehr nötig war. Damals ein großer Fortschritt für den Personennahverkehr. [SJV06]

Die Anlage hat eine gesamte Streckenlänge von 31,5 km und besteht aus zwei unterschiedlich großen Wendeschleifen, die durch ein langes, gerades Mittelstück verbunden sind, wie in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Auf diesem Mittelstück konnte die Maximalgeschwindigkeit des Transrapid von 400 bis 450 km/h getestet werden. Die Südschleife ist außerdem mit einem kleineren Radius und einer deutlichen Neigung nach Innen versehen, um das Verhalten in engen Kurven testen zu können. Die Nordschleife ist dagegen deutlich größer und weitläufiger ausgeführt. [SJV06]

Auf der Strecke ereignete sich am 22.09.2006 ein schwerer Unfall, der in Kapitel 2 bereits beschrieben wurde. Danach ging die Forschung noch einige Jahre weiter, jedoch musste die Anlage im Jahre 2011 endgültig geschlossen werden, da keine weiteren industrielle oder staatliche Förderungen eingerichtet wurden. Seitdem wird die Strecke zurückgebaut, was jedoch aufgrund der Größe der Anlage und der Fundamente mit bis zu 15 m Tiefe, die jeder der im Abstand von 25 m aufgestellten Stützpfiler hat, ein langwieriger und teurer Prozess ist. [NDR20]

## 5 Fazit

Die Entwicklung von Magnetschwebbahnen begannen bereits sehr früh im 20. Jahrhundert. Die sich daraus entwickelte Technik hat in der heutigen Zeit einen immer weiter steigenden Stellenwert bei der Personenbeförderung im asiatischen Raum. Dagegen ist im europäischen Raum diese Technologie seit dem schweren Unfall auf der Transrapid-Versuchsanlage Emsland nicht mehr vertreten. Bereits geplante und genehmigte Projekte wurden nach dem Unfall zurückgezogen und nicht gebaut.

Aufgrund der geringen Reibungsverluste des Antriebes, sowie der geringen Betriebskosten und des geringen Platzbedarfs der Trassierung ergeben sich erhebliche Vorteile im Vergleich zum bestehenden Rad-Schienen-System. Dazu kommt die variable Trassenführung um bestehende Strukturen und umweltgeschützte Bereiche ohne größere Einflüsse zu überspannen. Weiterhin ist der Transrapid aufgrund der fehlenden mechanischen Verbindungen zwischen Fahrzeug und Fahrweg viel leiser im Vergleich zum Rad-Schienen-System. Die Sicherheit, im Vergleich zum bestehenden Rad-Schienen-System, ist viel größer, da die Gefahr des Entgleisens vollkommen, durch ein umgreifen des Fahrweges, ausgeschlossen ist. Des Weiteren können viel größere Bremsbeschleunigungen erzeugt werden, wodurch der Transrapid bei höheren Geschwindigkeiten auf einer kürzeren Strecke zum stehen kommen könnte.

Um einen gesamtheitlichen Überblick über die Transrapidtechnologie zu bekommen und einen vollständigen Vergleich zwischen dem bestehenden Rad-Schienen System und dem Transrapid System zu ziehen müssen noch weitere und deutlich ausgeweitete Nachforschungen angestellt werden.

Abschließend wird trotz des kurzen Überblickes über die Technologie, dass mit dem Transrapid eine innovative und effiziente Technologie zur Personenbeförderung existiert. Dieser ist dem bestehenden Rad-Schienen-System in vieler Hinsicht überlegen und würde die Sicherheit der Personenbeförderung signifikant steigern. Durch eine vielseitige Trassierungsmöglichkeit kann der Transrapid in bereits bestehenden Strukturen integriert werden, ohne einen größeren Einfluss auf diese zu nehmen.

## Literatur

- [HS16] Richard Heister und Elmar Stephan. *Zehn Jahre nach dem Unglück: Was ist aus dem Transrapid geworden?* GER. 2016. URL: <https://www.augsburger-allgemeine.de/panorama/Zehn-Jahre-nach-dem-Unglueck-Was-ist-aus-dem-Transrapid-geworden-id39124972.html> (besucht am 15.04.2020).
- [NDR20] NDR. *Transrapid-Unglück in Lathen: Bei Testfahrt sterben 23 Menschen*. GER. 2020. URL: <https://www.ndr.de/geschichte/chronologie/Transrapid-Unglueck-Lathen-Testfahrt-mit-23-Toten,transrapidunglueck2.html> (besucht am 15.04.2020).
- [SJN06] Rainer Schach, Peter Jehle und René Naumann. *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn*. GER. 1. Aufl. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. URL: <https://books.google.de/books?id=SYouBAAAQBAJ>.
- [stx06] stx. *In sieben Jahrzehnten zur Schwebebahn*. GER. 2006. URL: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/transrapid-geschichte-in-sieben-jahrzehnten-zur-schwebebahn-a-438642.html> (besucht am 15.04.2020).
- [Sut05] Manuel Sutter. „Die Magnetschwebbahn Transrapid - Bau eines Modells“. GER. In: (28. Jan. 2005), S. 28. URL: <https://manuelsutter.com/cms/wp-content/uploads/2015/02/ManuelSutter-Facharbeit-Transrapid.pdf> (besucht am 17.04.2020).
- [UNS98] Markus Uhlenbrock, Volkhard Nordmeier und H. Joachim Schlichting. *Die Magnetschnellbahn Transrapid im Experiment*. GER. report. Uni Münster, 1998. URL: [https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich\\_physik/didaktik\\_physik/publikationen/magnetschnellbahn\\_transrapid.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/magnetschnellbahn_transrapid.pdf) (besucht am 17.04.2020).

## Abbildungsverzeichnis

3.1	Vergleich der Führungssysteme, (nach [UNS98, Abb. 3]) . . . . .	3
	(a) Rad-Scheinen Führung . . . . .	3
	(b) Transrapid Führung . . . . .	3
3.2	Querschnitt durch Fahrzeug und Schiene, (nach [UNS98, Abb. 4]) . . . . .	4
3.3	Magnetfeldlinien eines Stabmagnets und eines stromdurchflossenen Leiters, (nach [SJM06, Abb. 3.2]) . . . . .	4
3.4	test, (nach [SJM06, Abb. 3.3]) . . . . .	5
3.5	Wechselwirkung der Magnetfelder von stromdurchflossenen Leitern . . . . .	5
	(a) Gleiche Stromrichtung . . . . .	5
	(b) Entgegengesetzte Stromrichtung . . . . .	5
3.6	Verstärkung und Schwächung des magnetischen Feldes . . . . .	6
	(a) Schwächung des Feldes . . . . .	6
	(b) Verstärkung des Feldes . . . . .	6
3.7	Kraft bei Verstärkung und Schwächung des magnetischen Feldes . . . . .	6
	(a) Kraft Schwächung des Feldes . . . . .	6
	(b) Kraft Verstärkung des Feldes . . . . .	6
3.8	Schemazeichnung eines Drehstrom Lang-Stators, (nach [Sut05, Abb. 2]) . . . . .	8
3.9	Reale Umsetzung des Langstators [SJM06, Abb. 3.8] . . . . .	8
3.10	Querschnitt eines einzelnen Haltemagneten, (nach [SJM06, Abb. 3.9]) . . . . .	9
4.1	Die Versuchsanlage im Emsland, (nach [SJM06, Abb. 4.1]) . . . . .	10