



Seminararbeit

Thema: Magnetic Train
 Verfasser/in: Leonard Prentl
 Leitfach: Physik
 Seminarkürzel: 2W_ph
 Lehrkraft: Herr Dr. Grillenbeck

Abgabe der schriftlichen Arbeit am: [Datumsstempel Sekretariat]

Präsentation mit Prüfungsgespräch am: ____ . ____ . 20 ____

Bewertung	Note	in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x3	
Abschlusspräsentation				x1	
Summe					
Gesamtleistung nach § 29 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

Unterschrift der Lehrkraft

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Zielsetzung	3
3	Physikalische Grundlagen	4
3.1	Permanentmagnete und ihre Felder	4
3.1.1	Neodym Magnete	4
3.1.2	Magnetfelder von Permanentmagneten.....	4
3.1.3	Lorentzkraft	5
3.2	Elektromagnetische Felder	6
3.2.1	Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter.....	6
3.2.2	Magnetfeld einer stromdurchflossenen, zylindrischen Spule.....	7
3.3	Elektromagnetische Induktion.....	8
3.3.1	Faradaysches Induktionsgesetz.....	8
3.3.2	Lenzsche Regel.....	8
4	Erklärung des Funktionsprinzips des Zuges.....	9
5	Versuchsaufbau	10
6	Versuchsdurchführung.....	11
6.1	Variation der Batteriespannung.....	11
6.2	Variation der Spulenwindungszahl	12
6.3	Variation des Drahtdurchmessers	13
6.4	Variation der Feldstärke der Permanentmagnete	15
7	Ergebnisse und Schlussfolgerung.....	17
8	Verbindung zu realer Technologie	18
9	Fazit.....	20
10	Literaturverzeichnis.....	21
11	Abbildungsverzeichnis	24

1 Einleitung

Spricht man heutzutage von Magnetschwebebahnen für den Personenverkehr, die völlig lautlos und schnell dahingleiten, klingt das alles doch noch eher nach Zukunftsmusik. Tatsächlich kann sich jedoch jeder mit einfachen Mitteln eine Miniaturmagnetbahn daheim konstruieren. Eine Batterie, zwei Neodym Magnete, ein Kupferdraht, mehr ist nicht nötig, um sich eine rudimentäre Magnetbahn zuhause nachzubauen. Werden die Magnete an die Pole der Batterie geheftet und das Ganze in eine Kupferdrahtspule eingesetzt, so bewegt sich der Zug ganz von allein, ohne jegliche Beeinflussung von außerhalb. Jedoch notierte schon der Entdecker der elektromagnetischen Induktion, Micheal Faraday in seinem Labortagebuch am 19.03.1849: „Nothing is too wonderful to be true, if it be consistent with the laws of nature; [...]“ (Jones 1870: 248), was übersetzt so viel bedeutet wie: „Nichts ist zu schön um wahr zu sein, wenn es mit den Gesetzen der Natur übereinstimmt; [...]“. Faraday entdeckte mit der elektromagnetischen Induktion das Grundprinzip elektrischer Generatoren und legte damit den Grundstein unserer digitalisierten Welt (vgl. Elektromagnetische Induktion 2023), in welcher Elektrizität nicht mehr wegzudenken ist. Das obige Zitat trifft auch auf den genannten Batterie-Zug zu, dessen Bewegung natürlich durch die Gesetze der Elektrik und des Elektromagnetismus zu erklären ist.

2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist es zuerst einmal die physikalischen Grundlagen des Versuchs zu erarbeiten und darzustellen, wobei vor allem die zugrundeliegenden Prinzipien der Elektrik und des (Elektro-)Magnetismus geklärt werden sollen. Auf Basis dieses Fundaments wird dann die Frage nach dem Grund der Bewegung des “Magnet-Zuges” aufgezeigt. Als nächstes soll der Versuch in der Realität durchgeführt werden. Dabei soll durch Messungen mit unterschiedlichen Parametern (Batteriespannung, Wicklungszahl der Spule, Durchmesser des Spulendrahts und der Magnetfeldstärke der Dauermagnete) die Beschleunigung und Endgeschwindigkeit des Zuges in Abhängigkeit von diesen Parametern analysiert werden. Abschließend soll erläutert werden, wie die dargestellten physikalischen Grundlagen auch bei einer real existierenden Magnetschwebebahn zur Anwendung kommen.

3 Physikalische Grundlagen

Der Versuch basiert auf mehreren wichtigen Prinzipien des (Elektro-)Magnetismus. Um das Phänomen der Bewegung des Batterie-Zuges innerhalb der Drahtspule also nachvollziehen zu können, müssen zuerst ein paar essenzielle physikalische Grundlagen erläutert werden.

3.1 Permanentmagnete und ihre Felder

3.1.1 Neodym Magnete

Neodym Magnete sind sog. Dauermagnete, hergestellt aus einer Neodym-Eisen-Bor-Legierung mit der chemischen Zusammensetzung $Nd_2Fe_{14}B$. Neodym ist ein ferromagnetisches Lanthanoid, welches in der Natur nur vermischt mit weiteren Elementen vorzufinden ist, dafür jedoch relativ zu anderen Lanthanoiden in hohen Konzentrationen vorkommt. Neodym Magnete sind die stärksten herstellbaren Permanentmagnete (vgl. Why Is Neodymium So Magnetic? o. D.), denn $Nd_2Fe_{14}B$ weist auf Molekularebene eine tetragonale Kristallstruktur auf, was der Legierung sehr gute magnetische Eigenschaften verleiht (vgl. Anderson 2010).

3.1.2 Magnetfelder von Permanentmagneten

Neodym Magnete, welche zu den Dauermagneten zählen, weisen bestimmte, für das Funktionsprinzip des Versuchs wesentliche, charakteristische Eigenschaften wie beispielsweise einen magnetischen Nordpol sowie Südpol auf. Zerbricht man einen solchen Magneten entsteht automatisch ein neuer Nord- sowie Südpol. Somit gibt es keine magnetischen Monopole. Es gilt immer, dass sich gleiche Pole abstoßen und unterschiedliche anziehen. Das Magnetfeld ist direkt an den Polen immer am stärksten (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.). Das in Abb.1 zu sehende Feldlinienbild ist die gängige Methode, Magnetfelder zweidimensional darzustellen. Die Feldlinien beschreiben die wirkende Kraft auf einen magnetischen Nordpol im Magnetfeld und verlaufen somit vom Nord- zum Südpol. Die Dichte der Linien beschreibt die lokale Intensität des Kräfteinflusses innerhalb des Magnetfeldes.

Außerdem schneiden sich magnetische Feldlinien nie (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.). Die magnetische Feldstärke trägt den Formelbuchstaben H und die Einheit $\frac{A}{m}$ (vgl. Wikipedia 2023a).

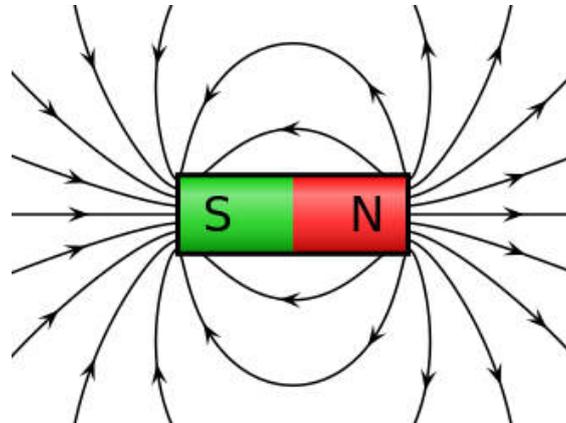


Abb. 1

3.1.3 Lorentzkraft

Die Lorentzkraft ist eine Kraft, welche auf bewegte Ladung innerhalb eines Magnetfeldes wirkt. Dabei wirkt sie immer orthogonal zur Bewegungsrichtung und den magnetischen Feldlinien. Bewegt sich ein geladenes Teilchen also parallel zu den Feldlinien, tritt keine Lorentzkraft auf. Bei einer negativen Ladung wirkt die Kraft immer entgegengesetzt der Kraft, die auf eine positive Ladung wirken würde. Wird ein ionisiertes Teilchen also in ein homogenes Magnetfeld, innerhalb eines Vakuums ohne andere Krafteinflüsse von außen, senkrecht zu den Feldlinien eingeschossen, wird es auf einer Kreisbahn verweilen. Die Lorentzkraft wirkt hier als die für eine Kreisbewegung notwendige Zentripetalkraft.

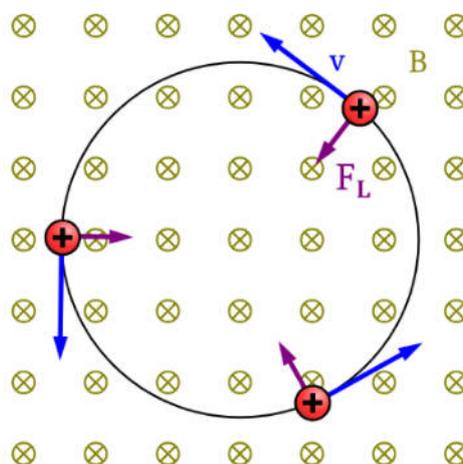


Abb. 2

Die Stärke der Lorentzkraft F_L kann abhängig von der Ladung des Teilchens Q , der magnetischen Flussdichte B , der Geschwindigkeit der Ladung v und des Winkels α der Bewegungsrichtung des Teilchens zu den Feldlinien bestimmt werden. Die Formel dazu lautet wie folgt (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.):

$$F_L = Q \cdot B \cdot v \cdot \sin(\alpha)$$

3.2 Elektromagnetische Felder

3.2.1 Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter

So wie ein Magnetfeld geladene Teilchen in ihrer Bewegung beeinflussen kann, erzeugt bewegte Ladung ein Magnetfeld. Wird ein Leiter wie z.B. ein Kupferdraht unter Spannung gesetzt und ein Stromfluss entsteht, bildet sich um den Leiter ein kreisförmiges Magnetfeld. Der Leiter steht hierbei senkrecht zu den Feldlinien. Mit der Polung der Spannung und somit der Bewegungsrichtung der Ladung kann der Nord- und Südpol des Magnetfeldes bestimmt werden und die „Richtung“ des Feldes umgekehrt werden (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.).

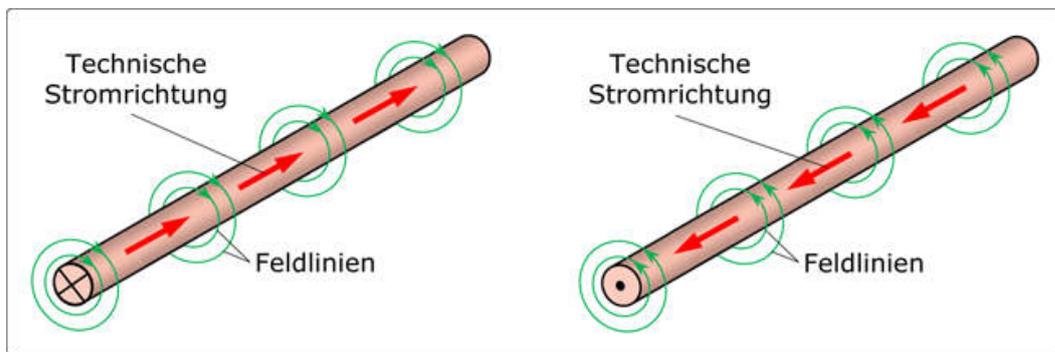


Abb. 3

Die magnetische Feldstärke H des kreisförmigen Feldes kann ebenfalls in Abhängigkeit des Abstandes vom Leitermittelpunkt ermittelt werden. Wenn I die Stromstärke innerhalb des Leiters ist und r der Abstand zum Mittelpunkt des Leiters ist, kann die Feldstärke mit folgender Formel ermittelt werden (vgl. Klähn 2011):

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

3.2.2 Magnetfeld einer stromdurchflossenen, zylindrischen Spule

Formt man aus einem elektrischen Leiter (z.B. Kupfer) eine lange zylindrische Spule und verbindet diese mit einer Spannungsquelle, woraus ein Stromfluss durch den Leiter resultiert, entsteht im Inneren der Spule ein nahezu homogenes Magnetfeld. Dieses Feld kann mithilfe ferromagnetischer Materialien innerhalb der Spule um den materialabhängigen Faktor μ_r verstärkt werden. Der Faktor μ_r ist die sogenannte „relative Permeabilität“.

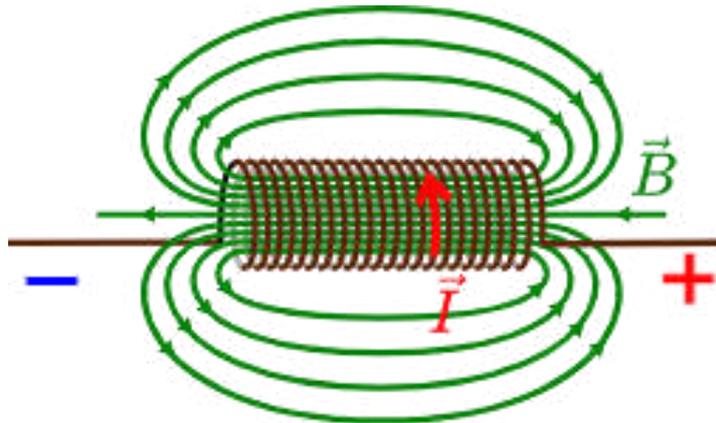


Abb. 4

Das in Abb.4 dargestellte Feldlinienbild zeigt das nahezu homogene Magnetfeld im Inneren und die Feldlinien auf der Außenseite der Spule. Der magnetische Nord- und Südpol liegt jeweils am Ende der Zylinderspule, wobei der Nordpol in Richtung des elektrischen Pluspols und der Südpol in Richtung des elektrischen Minuspols liegt. Die magnetische Flussdichte B im Inneren der langgestreckten Spule kann zudem berechnet werden. Ist μ_0 die sog. „magnetische Feldkonstante“, μ_r die relative Permeabilität des Materials in der Spule, N die Windungszahl der Spule, l die Länge der Spule und I die Stromstärke im Leiter, so gilt die folgende Formel zur Bestimmung von B in Tesla (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.):

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{l} \cdot I$$

3.3 Elektromagnetische Induktion

3.3.1 Faradaysches Induktionsgesetz

Michael Faraday führte 1831 die ersten quantitativen Versuche im Zusammenhang zwischenzeitlich sich ändernden magnetischen und elektrischen Feldern durch. Dabei entdeckte er, dass die dauerhafte Änderung des magnetischen Flusses Φ durch eine Leiterschleife zu einer induzierten Spannung führt (vgl. Faradaysches Induktionsgesetz o. D.). Ist B die magnetische Feldstärke, A die durchsetzte Fläche und φ der „Einfallswinkel“ des Feldes, so heißt die Formel zur Bestimmung des magnetischen Flusses in Vs (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.):

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\varphi)$$

Ändert sich der magnetische Fluss, der eine Spule durchsetzt, so erzeugt dies einen Induktionsstrom. Die Intensität dieses Stroms ist auch abhängig davon, in welcher Zeit Δt eine bestimmte Änderung des magnetischen Flusses $\Delta\Phi$ passiert. Verläuft die Änderung des Flusses also schnell, ist die Induktionsspannung U_i höher, als wenn dies langsam geschieht. Somit gilt folgende Formel für die induzierte Spannung bei einer Spule mit der Windungszahl N (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.):

$$U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

3.3.2 Lenzsche Regel

Die Lenzsche Regel ist ein maßgebliches Prinzip der elektromagnetischen Induktion und lautet wie folgt: „Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt“. Das bedeutet Folgendes für das Funktionsprinzip der Magnetbahn: Wird ein Magnet in eine zylindrische Leiterspule eingeführt, macht sich ein mechanischer Widerstand gegen die Bewegung bemerkbar. Zu erklären ist dies dadurch, dass durch die in der Spule induzierte Spannung ein Stromfluss entsteht, welcher ein Magnetfeld innerhalb der Spule erzeugt, dass mit dem der Neodym Magnete am Zug in Wechselwirkung tritt. Dieses induzierte Feld ist mit seinen Polen stets so ausgerichtet, dass es den Batterie-Zug an seiner Bewegung hindert (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.).

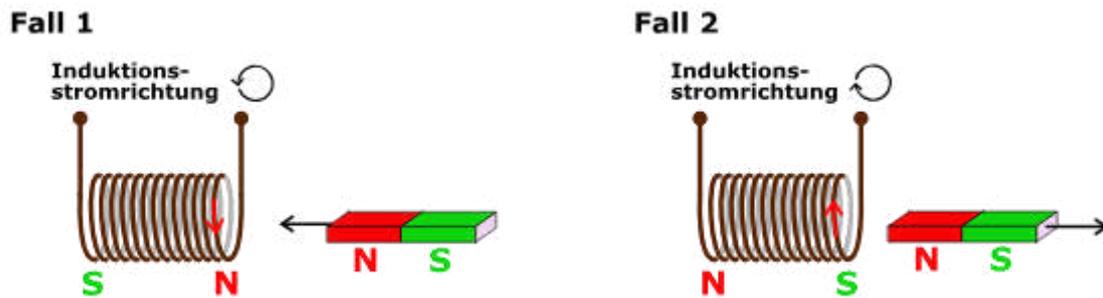


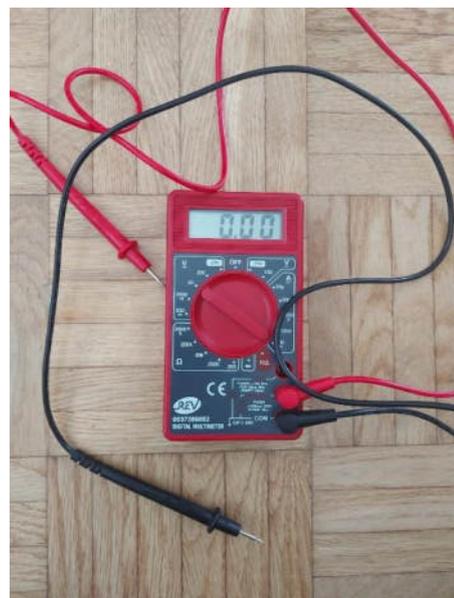
Abb. 5

4 Erklärung des Funktionsprinzips des Zuges

Da nun alle physikalischen Grundlagen erläutert wurden, soll nun die Funktionsweise des Versuchs ausgeführt werden. Zuerst wird eine vollgeladene, handelsübliche AA-Batterie mit leitfähigen zylindrischen Dauermagneten an den Polen in einer Kupferspule platziert. Sobald beide Magnete mit dem Kupferdraht in Kontakt sind, entsteht ein Stromfluss zwischen den Batteriepolen durch die Magnete und den Draht. Dadurch tritt ein Magnetfeld innerhalb des stromdurchflossenen Teils der Spule auf, in welchem sich die Batterie befindet. Das entstandene magnetische Feld innerhalb der Spule tritt in Wechselwirkung mit dem Feld der Permanentmagnete. Damit eine beschleunigende Kraft in eine Richtung auftritt, ist es wichtig, dass gleiche Pole der Neodym Magnete entweder zu denen der Batterie oder weg von diesen zeigen. Die Elektronen suchen sich von der Batterie den schnellsten Weg zum Draht, was dazu führt, dass der Pol des Dauermagneten, welcher der Batterie abgewandt ist, einem schwächeren Magnetfeld ausgesetzt ist als der, der innerhalb des stromdurchflossenen Teils der Spule liegt. Dadurch überwiegt die Kraft, die auf die beiden gleichen inneren Pole wirkt und die Batterie wird in eine Richtung beschleunigt. Zuletzt ist es wichtig zu erwähnen, dass die Batterie nicht endlos schneller wird, sondern bei einer bestimmten Geschwindigkeit v_{\max} aufhört zu beschleunigen. Die Begründung dafür ist, dass die Magnete in Bewegung eine Spannung und damit magnetische Felder in der Spule induzieren, welche nach der Lenzschen Regel gegen die Bewegung des Zuges gerichtet sind. Somit wird zusätzlich zu den entgegengerichteten Magnetfeldern vor und hinter dem Zug, der Stromfluss der Batterie durch eine induzierte Gegenspannung gebremst. Die Geschwindigkeit v_{\max} ist dann erreicht, sobald ein Kräftegleichgewicht zwischen der beschleunigenden und den bremsenden Kräften herrscht (vgl. IOP Institute of Physics o. D.).

5 Versuchsaufbau

Für den Aufbau des Versuchs wurden folgende Teile verwendet: NiMH-Akkus (1.2V), Batterien (1.5V), zylindrische Neodym Magnete, unisolierter Kupferdraht, ein Holzstab, eine Holzschiene, eine Waage und ein Voltmeter. Die Magnete werden an den Polen des Akkus/der Batterie befestigt. Der Holzstab, welcher vom Durchmesser etwas dicker als der Batterie-Zug sein soll, wird verwendet, um den Draht unter Spannung zu einer bündigen Spule zu wickeln. Damit die Spule dann gerade und fixiert ist und sich beim Durchfahren des Zuges nicht krümmt, wird sie in eine Holzschiene eingesetzt. Die Holzschiene besteht aus einem Brett auf welches zwei Leisten geleimt wurden.



6 Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung soll der Magnet-Zug nun wiederholt eine Spule durchfahren, wobei immer wieder ein bestimmter Parameter verändert wird, um daraufhin eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Batterie-Zuges von diesem Parameter zu untersuchen. Die Strecke, welche die Batterie beim Durchqueren der Spule zurücklegt, ist bekannt, wobei die dafür benötigte Zeit erst ermittelt werden muss. Dies geschieht, indem die Fahrt des Zuges per Video aufgezeichnet wird, was es im Nachhinein am Computer ermöglicht, die Zeit genau zu erfassen. Es handelt sich bei der Bewegung des Zuges um eine Beschleunigung, welche jedoch im Laufe der Durchfahrt bei ausreichender Länge der Spule bei einer Endgeschwindigkeit v_{\max} endet und sich mit dieser konstanten Geschwindigkeit fortsetzt. Da die Trennung von Beschleunigung und konstanter Geschwindigkeit per Video im vorliegenden Versuch nicht genau möglich ist und die rechnerische Ermittlung von wirkenden Kräften auf den Zug sehr kompliziert wäre und den Rahmen der Arbeit sprengen würde, wird vereinfachend mit einer insgesamten Durchschnittsgeschwindigkeit des Zuges während der Durchfahrt gerechnet.

6.1 Variation der Batteriespannung

Nun werden jeweils 10 Messungen mit einem 1.2V NiHM-Akku und einer 1.5V Batterie durchgeführt (beide bei max. Ladung). Die zu durchfahrene Spule hat 342 Wicklungen N auf der Länge l von 1m. Der Drahtdurchmesser beträgt 1mm. Die Masse beider Batterien ist nahezu gleich. Ist der elektrische Innenwiderstand R beider Batterien gleich, so müsste nach dem Ohmschen Gesetz ($R = \frac{U}{I}$) eine um 25% erhöhte Spannung zu einer 25% erhöhten Stromstärke I in der Drahtspule führen (vgl. Ohmsches Gesetz o. D.). Dies führt zudem zu einem um 25% verstärktem Magnetfeld B innerhalb der Drahtspule, da $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{l} \cdot I$.

Die Wechselwirkungen der Magnetfelder wären also verstärkt, was eine höhere beschleunigende Kraft F auf den Zug zur Folge hat. Die Batterie sollte bei erhöhter Spannung U die Spule schneller durchqueren. Diese höhere Beschleunigung sollte zudem auch, entsprechend dem Induktionsgesetz ($U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$), zu verstärkten entgegenwirkenden Einflüssen resultieren, da jetzt Δt geringer ist.

Spannung in V	Zeit in s										Ø
	1.2V	0.8	0.76	0.77	1.28	0.96	0.89	0.76	0.86	0.88	
Ø Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										Ø	
1.25		1.32	1.30	0.78	1.04	1.12	1.32	1.16	1.14	1.37	1.18m/s
1.5V	Zeit in s										Ø
	1.04	1.05	1.01	1.02	0.99	0.89	0.98	0.91	1.11	1.08	
	Ø Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										Ø
	0.96	0.95	0.99	0.98	1.01	1.12	1.02	1.10	0.90	0.93	1.00m/s

Abb. 6 (alle Werte sind auf Hundertstel gerundet)

Das Versuchsergebnis zeigt jedoch ein anderes Bild, wie in Abb. 6 zu sehen ist. Die 1.5V starke Batterie ist im Mittel ca. 20% langsamer als der 1.2V starke Akku. Die obigen Messwerte zeigen genau das Gegenteil der Erwartung, und zwar dass eine höhere Spannung zu einer geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit führt. Im Nachhinein hat eine Messung mit einem Spannungsmessgerät ergeben, dass der mit 1.2V angegebene Akku ca. 1.44V Spannung liefert, während die 1.5V Batterie ca. 1.45V bereitstellt. Somit ist der Unterschied in der Spannung beider Batterien nahezu nicht vorhanden, was jedoch immer noch nicht den Unterschied in den Messergebnissen erklärt. Die Begründung dafür ist vermutlich, dass der elektrische Innenwiderstand der 1.5V Batterie einfach höher ist als derjenige des 1.2V Akku, was wieder in einer durch das Ohmsche Gesetz begründeten schwächeren Stromstärke I resultiert. Der Innenwiderstand kann je nach Bauart der Batterie/des Akku variieren (vgl. Kapazität, Ladespannung, Innenwiderstand? 2012).

6.2 Variation der Spulenwindungszahl

Erneut sollen jeweils 10 Messwerte gesammelt werden. In beiden Fällen wird ein mit 1.2V angegebener NiMH-Akku verwendet. Es werden zwei verschiedene, 1m lange Spulen verwendet. Dabei zählt die erste Spule 342 Wicklungen auf einem Meter und die Zweite 177 Wicklungen. Die zweite Spule besitzt also nur etwa 52% der Wicklungen der ersten. Wenn n das Verhältnis von den Wicklungen N zur Spulenlänge l ist, also $n = \frac{N}{l}$, so lautet die Formel zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte B in einer luftgefüllten Spule: $B = \mu_0 \cdot n \cdot I$ (vgl. Joachim Herz Stiftung). In der Theorie bedeutet dies also, dass bei gleicher Stromstärke I ein doppelt so hohes n zu einem doppelten B führt, damit also auch zu einer erhöhten beschleunigenden Kraft auf den Zug gegenüber einer geringeren Windungsdichte der Spule. Es bedeutet jedoch auch, dass eine erhöhte

Windungszahl wegen dem Induktionsgesetz ($U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$) wieder zu verstärken, der Zugbewegung entgegengesetzten, Einflüssen führt.

Wicklungszahl pro m	Zeit in s										Ø
	342	0.8	0.76	0.77	1.28	0.96	0.89	0.76	0.86	0.88	
Ø Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										Ø	
1.25		1.32	1.30	0.78	1.04	1.12	1.32	1.16	1.14	1.37	1.18m/s
177	Zeit in s										Ø
	1.37	1.43	1.61	1.32	1.46	1.17	1.20	1.39	1.36	1.31	1.36s
	Ø Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										Ø
	0.73	0.7	0.62	0.76	0.68	0.85	0.83	0.72	0.74	0.76	0.74m/s

Abb. 7 (alle Werte sind auf Hundertstel gerundet)

Abb. 7 zeigt die Messwerte und deren Mittelwerte. Hier ist zu erkennen, dass die durchschnittliche von der Batterie benötigte Zeit für das Durchqueren der Spule bei 342 Wicklungen pro Meter nur etwa 64% der Zeit bei 177 Wicklungen pro Meter beträgt. Berücksichtigt man Messungenauigkeiten sowie die Tatsache, dass es etwas mehr als 50% der Wicklungen der ersten Spule sind und bei geringerer Wicklungsdichte es auch zu weniger Verhakungen zwischen Magneten und Draht kommt und damit die bremsende Kraft hier geringer ist, kann man sagen, dass bei halber Wicklungszahl, der Batterie-Zug annähernd doppelt so viel Zeit zum Durchfahren der Spule benötigt. Daraus folgt auch, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit des Zuges in der Spule bei halber Wicklungszahl pro Meter auch nur die Hälfte der Vorherigen beträgt. Die Werte zeigen bei $n = 177$ ebenfalls nur ca. 63% der Geschwindigkeit von der bei $n = 342$. Somit kann man insgesamt sagen, dass aus der halben Windungsdichte n auch nur ca. die Hälfte der durchschnittlichen Geschwindigkeit auf 1m Spule erreicht wird. Die Messergebnisse entsprechen somit also in etwa der theoretischen Erwartung einer höheren beschleunigenden Kraft bei höhere Wicklungsdichte.

6.3 Variation des Drahtdurchmessers

Diesmal soll der Drahtdurchmesser, aus welchem die Spule gewickelt ist, variiert werden. Beide Versuche werden erneut mit einem NiMH-Akku mit der angegebenen Spannung 1.2V durchgeführt. Der erste Draht hat 1mm Durchmesser, der Zweite 2mm Durchmesser. Es gilt für den 1mm dicken Draht $n = 177$, für den 2mm dicken ist $n = 166$. Die Wicklungszahl N auf der Länge l von 1m ist also beim zweiten Draht 94% des ersten. Der wesentliche Unterschied beider Spulen

wäre, dass der elektrische Widerstand R des dickeren Drahtes kleiner ist als der des dünneren. Jedoch ist selbst der Widerstand des dünneren Drahts so gering, dass er im Vergleich zum Innenwiderstand der Batterie unerheblich sein wird. Ist der spezifische Widerstand ρ mit der Einheit $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ (für Kupfer $0.017 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$), l die Länge des Drahtes in Metern und A die Querschnittsfläche des Drahtes in mm^2 dann gilt zur Berechnung des Widerstands R des Drahtes die Formel $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.). Der elektrische Widerstand R eines 1mm dicken und 1m langen Kupferdrahtes beträgt somit ca. 0.022Ω (bei 2mm Dicke und 1m Länge wären es sogar nur ca. 0.005Ω). Die Länge des stromdurchflossenen Drahtteils der ersten Spule (Durchmesser: 1mm) beträgt bei einer 5cm langen Batterie etwa 55,6cm. Auf diesem Stück hat der Draht also ungefähr den elektrischen Widerstand $R = 0,012\Omega$. Bei einer Batteriespannung von 1.2V (ohne Innenwiderstand) müssten nach dem Ohm'schen Gesetz ($R = \frac{U}{I}$) also ca. 100 Ampere fließen. Der Innenwiderstand des NiMH-Akkus, welcher je nach Lagerung der Akkus 200 m Ω aufwärts beträgt, verhindert jedoch dies und reguliert die Stromstärke auf max. etwa 6 Ampere (vgl. Kapazität, Ladespannung, Innenwiderstand? 2012).

Drahtdurchmesser in mm	Zeit in s										Ø
	2	1.59	1.69	2.09	1.76	1.70	1.87	2.28	1.65	1.89	
	Ø Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										Ø
	0.63	0.59	0.48	0.57	0.59	0.53	0.44	0.61	0.53	0.56	0.55m/s
1	Zeit in s										Ø
	1.37	1.43	1.61	1.32	1.46	1.17	1.20	1.39	1.36	1.31	1.36s
	Ø Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										Ø
	0.73	0.7	0.62	0.76	0.68	0.85	0.83	0.72	0.74	0.76	0.74m/s

Abb. 8 (alle Werte sind auf Hundertstel gerundet)

In Abb. 8 ist zusehen, dass der Zug bei halbem Drahtdurchmesser nur ca. 74% der Zeit benötigt, im Vergleich zu einem Durchmesser von 2mm. Entsprechend gilt für die Geschwindigkeit, welche bei 1mm Drahtdurchmesser 135% der Geschwindigkeit bei 2mm Durchmesser beträgt. In der Theorie dürfte es jedoch keinen Unterschied machen, ob 1mm oder 2mm Durchmesser da der Widerstand des Kupferdrahtes wie oben erläutert so gering ist, dass er im Vergleich zum Innenwiderstand der Batterie so gut wie unbedeutend ist. Die Stromstärke I ist also bei beiden Drähten nahezu gleich.

Somit ist das Magnetfeld in der Spule nach der Formel $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot n \cdot I$ (vgl. Joachim Herz Stiftung) für beide Fälle annähernd identisch. Der Unterschied in den Messwerten lässt sich hier vermutlich darin begründen, dass zum einen die Wicklungszahl des dickeren Drahtes etwas geringer ist. Hauptsächlich liegt es aber wahrscheinlich daran, dass dadurch, dass die Spule nicht perfekt glatt an der Innenseite ist, es bei einem dickeren Draht zu gravierenderen Verhakungen zwischen den Magneten und der Spule kommt, durch welche der Zug etwas stärker ausgebremst wird.

6.4 Variation der Feldstärke der Permanentmagnete

Zuletzt soll das Magnetfeld der Neodym Magnete geändert werden. Die Batterie ist erneut ein NiMH-Akku mit der angegebenen Spannung 1.2V. Die Spule hat 342 Wicklungen N und eine Länge l von einem Meter. Die magnetische Flussdichte des Feldes eines zylindrischen Neodym Magnets an einem Punkt im Abstand z auf dessen Symmetrieachse von einer Polfläche kann dabei folgendermaßen bestimmt werden: Ist B_r das von der Geometrie des Magneten unabhängige Remanenzfeld, z der Abstand des Punktes auf einer Symmetrieachse über einer Polfläche, D die Höhe des Zylinders und R der Radius der Grundfläche, so gilt folgende Formel zur Berechnung der magnetischen Flussdichte B am genannten Punkt in Tesla (vgl. Schroeter o. D.), (vgl. Wie berechnet man die magnetische Flussdichte? o. D.):

$$B = \frac{B_r}{2} \cdot \left(\frac{D + z}{\sqrt{R^2 + (D + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right)$$

Bei diesem Versuch werden Neodym Magnete der Güteklasse N42 verwendet, was bedeutet, dass das Remanenzfeld B_r in diesem Fall 1.29 – 1.31 Tesla beträgt (vgl. Physikalische Magnetdaten o. D.). Da das Magnetfeld nicht homogen ist wird ein Punkt P im Abstand z beispielhaft zum Vergleich der Feldstärken gewählt. Für diesen Versuch gilt $z = 1\text{cm}$. Die Magnete messen außerdem 15mm Durchmesser der Grundfläche und 5mm in der Zylinderhöhe. Der Versuch wird mit $D = 10\text{mm}$ und $D = 5\text{mm}$ durchgeführt und die Ergebnisse verglichen.

Für die magnetische Flussdichte B im Punkt P gilt also nach obiger Formel für $D = 10\text{mm}$, dass $B \approx 0,09\text{T}$. Für $D = 5\text{mm}$ gilt $B \approx 0,06\text{T}$.

Die magnetische Flussdichte im Punkt P ist also bei halbem D etwa 30% schwächer. Bevor der Versuch durchgeführt wird, ist zu erwähnen, dass der Zug mit dem kleineren Magneten etwa 39g wiegt, während der andere 53g wiegt. Der leichtere Zug besitzt nur etwa $\frac{3}{4}$ der Masse des 54g Zuges. Ist also a die Beschleunigung des Zuges, m seine Masse und F die beschleunigende Kraft, so gilt nach der Formel $a = \frac{F}{m}$ (vgl. Meyer 2014: 3), dass für den leichteren Zug nur ca. 75% der Kraft nötig ist, um die gleiche Beschleunigung zu erreichen.

Magnetische Flussdichte im Abstand z	Zeit in s										ϕ
	0.09T	0.8	0.76	0.77	1.28	0.96	0.89	0.76	0.86	0.88	
	ϕ Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										ϕ
	1.25	1.32	1.30	0.78	1.04	1.12	1.32	1.16	1.14	1.37	1.18m/s
0.06T	Zeit in s										ϕ
	1.41	0.96	1.07	0.96	0.98	1.01	1.49	0.89	1.03	0.89	1.07s
	ϕ Geschwindigkeit des Zuges beim Durchqueren der Spule (m/s)										ϕ
	0.71	1.04	0.93	1.04	1.02	0.99	0.67	1.12	0.97	1.12	0.97m/s

Abb. 9 (alle Werte sind auf Hundertstel gerundet)

Sieht man sich die Messwerte nun an, erkennt man, dass bei einer um 30% verringerten magnetischen Flussdichte im Punkt P ca. 19% mehr Zeit für die Durchfahrt der 1m langen Spule von Nöten ist. Für den Wert 0.06T beträgt der Mittelwert der durchschnittlichen Geschwindigkeit ebenfalls nur noch ungefähr 82% des Wertes bei 0.09T . Die magnetische Flussdichte innerhalb der Spule ist bei beiden Versuchen gleich, jedoch ist das Feld der Permanentmagnete verändert. Somit ist also die Wechselwirkung beider Felder einmal schwächer bzw. stärker. Auf den schwereren Zug sollte also eine höhere Kraft wirken als auf den Leichtereren. Letzterer benötigt jedoch auch nur etwa 75% der Kraft, im Vergleich zum schwereren, um die gleiche Beschleunigung zu erreichen ($a = \frac{F}{m}$). Zudem ist die bremsende Kraft durch das induzierte, entgegengesetzte Feld schwächer da $\Delta\Phi$ in der gesamten Spule bei 0.06T kleiner. Insgesamt kann man sagen, dass durch ein schwächeres Magnetfeld der Permanentmagnete eine geringere Durchschnittsgeschwindigkeit auf 1m Spule zustande kommt.

Der Zug mit der im Punkt P um 30% höheren magnetischen Flussdichte des Permanentmagnetfeldes ist sogar trotz seines Gewichtsnachteils, um etwa. 20% schneller. Auch hier entsprechen die Messergebnisse den theoretischen Erwartungen.

7 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Da nun alle Messungen und Versuchsdurchführungen abgeschlossen sind, sollen die Ergebnisse nochmals zusammengetragen werden. Die Beschleunigung des Zuges resultiert bei diesem Versuch aus der magnetischen Wechselwirkung zwischen Permanentmagnetfeld und Induziertem Feld innerhalb der Spule. Die Experimente konnten größtenteils bestätigen, dass so bald eines der beiden Felder verstärkt wird, sich die Durchschnittsgeschwindigkeit des Zuges erhöht. Zuerst wurde die Auswirkung einer Variation der Batteriespannung untersucht, was jedoch leider nicht aussagekräftig war, da die Batterie sowie der Akku nicht die gewünschte Spannung zur Verfügung stellten. Außerdem verhinderte der unbekannte sowie unterschiedliche Innenwiderstand der Zellen eine genaue Bestimmung der Stromstärke durch die Spule. Bei der Untersuchung der Spulenwindungsdichte zeigte sich dafür eindeutig, dass eine geringere Dichte der Windungen zu einer geringeren Geschwindigkeit führt. Die Variation des Drahtdurchmessers brachte ein einigermaßen erwartbares Ergebnis, da die Unterschiede in den Messwerten für den Draht mit einem Durchmesser von 1mm und die für den 2mm dicken Draht (nach Berücksichtigung aller Messungenauigkeiten) erwartungsgemäß gering ausfielen. Zuletzt lieferte auch die Veränderung des Permanentmagnetfeldes Werte, die sich in die Ergebnisse der vorherigen Untersuchungen gut einfügten, da eine Verstärkung von einem der beschleunigenden Magnetfelder auch hier zu einer Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit führte.

8 Verbindung zu realer Technologie

Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen dem Versuch und realen Technologien dargestellt werden. Dafür sollen die Funktionsprinzipien einer bereits existenten Magnetschwebbahn, nämlich dem deutschen Transrapid System, erläutert werden. Die Magnetschwebbahn Transrapid ist ein in Deutschland entwickeltes System für den Hochgeschwindigkeitsverkehr. Der Transrapid kann Geschwindigkeiten von 400 – 500 km/h erreichen. Das Besondere an dieser Bahn ist, dass sie nicht wie herkömmliche Züge auf Rädern rollt, sondern dank eines Führungs- und Tragesystems im Gleis schwebt. Die wesentlichen Teile dieses Systems sind die Tragemagnete, welche die Bahn von unten tragen und die Führungsmagnete, welche sicherstellen, dass der Zug in der Spur gehalten wird. Die Bahn muss dabei das Gleis von fast allen Seiten umschließen, um ein möglichst stabiles Fahrverhalten an den Tag zu legen. Bei den Trage- sowie Führungsmagneten handelt es sich um Elektromagneten, welche ihr magnetisches Feld den Gegebenheiten anpassen können. Dies ist notwendig, um Krümmungen des Fahrwegs sowie Schwingungen der Bahn auszugleichen und einen Kontakt mit der Schiene zu verhindern. Um rechtzeitig auf solche Umstände zu reagieren, muss die Bahn einen Mindestabstand von 10mm von der Schiene halten (vgl. Joachim Herz Stiftung o. D.), (vgl. Transrapid 2023).

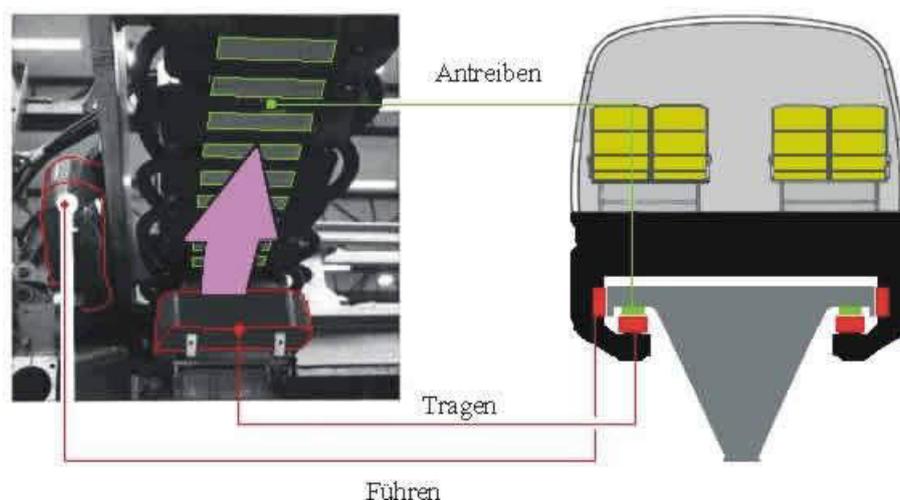


Abb. 10

Das Antriebssystem des Transrapid basiert, wie der behandelte Versuch mit dem Batterie-Zug, auch auf den Wechselwirkungen zwischen magnetischen- und elektromagnetischen Feldern. Es bildet ein sogenannter Linearmotor, bei welchem das Gleis den Stator und die Bahn den Rotor des Elektromotors darstellt. Dabei liegt im Fahrweg ein magnetisches Wanderfeld, welches den Zug vorantreibt. Der Wirkungsgrad des Transrapid-Antriebs ist durch den luftleeren Abstand von 10mm zum Gleis zwar schlechter als bei herkömmlichen Elektromotoren, gleicht sich jedoch durch fehlende Reibung zwischen Gleis und Rädern wieder aus (vgl. Transrapid 2023).

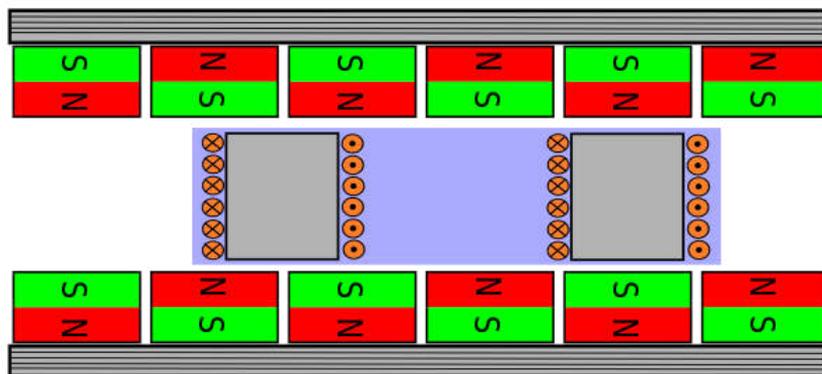


Abb. 11

Abb.8 zeigt die Schnittdarstellung eines solchen Antriebssystems, wobei die Permanentmagnete sich in der Bahn und die Spulen im blauen Teil sich im Gleis befinden. Die Magnetfelder beider Teile werden immer so kombiniert, dass die Bahn vom nächsten vorausliegenden Magneten gezogen bzw. vom nächsten hinteren Magneten geschoben wird. Sobald die gewünschte Position erreicht ist, müssen die Spulen im Gleis umpolen, um den Vorgang zu wiederholen (vgl. Linearmotor 2023). Je schneller der Zug also fährt, desto höher muss die Umpolungsfrequenz sein. Die hierfür benötigten Spannungen und Frequenzen stellen sogenannte Umrichterstationen die alle 0,3 – 5 km am Gleis anzutreffen wären. Die Stromversorgung innerhalb des Fahrzeugs wird hauptsächlich mit einem Lineargenerator sichergestellt, welcher sich die variierenden Magnetfeldstärken während der Fahrt zu Nutze macht und damit nach Faradays Induktionsgesetz eine Spannung induzieren kann (vgl. Transrapid 2023).

9 Fazit

Ich finde es erstaunlich wie maßgeblich wichtig die Prinzipien des (Elektro-)Magnetismus und allen voran die elektromagnetische Induktion für unsere heutige Welt sind. Ohne Elektrizität würde die Welt vermutlich immer noch in Zeiten der Industrialisierung festsitzen. Auf genau diesen Phänomenen der Elektrizitätslehre basiert auch der behandelte Versuch, dessen physikalische Grundprinzipien und Funktion durch diese Arbeit erläutert werden konnte. Vor allem die Geschwindigkeit des Zuges konnte in Abhängigkeit verschiedenster Parameter gesetzt werden. Diese Abhängigkeit konnte größtenteils durch die gemessenen Werte bestätigt werden. Berechnungen bezüglich der wirkenden Kräfte sowie der Beschleunigung und der Endgeschwindigkeit des Batterie-Zuges mussten aufgrund der Komplexität des Zusammenspiels der auftretenden Kräfte, Spannungen und Felder vereinfacht werden, da sonst der Rahmen dieser Arbeit gesprengt worden wäre. Zuletzt wurde versucht Parallelen zwischen dem Versuch und realen Technologien wie dem Transrapid zu ziehen.

10 Literaturverzeichnis

Jones, Henry Bence (1870): *Life and Letters of Faraday*, 2. Aufl., London, Longmans, Green, [Buch], [online] <https://archive.org/details/lifeletter-soffa02jone/page/248/mode/2up> [abgerufen am 02.11.2023].

Elektromagnetische Induktion (2023): [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Induktion#:~:text=Die%20elektromagnetische%20Induktion%20wurde%201831,eine%20der%20vier%20Maxwellschen%20Gleichungen. [abgerufen am 05.11.2023].

Why Is Neodymium So Magnetic? (o. D.): magnetpartner.com, [online] <https://magnetpartner.com/why-neodymium-magnetic> [abgerufen am 01.11.2023].

Anderson, Jeremy (2010): Structural and Magnetic Properties of Neodymium - Iron - Boron Clusters, University of Nebraska.

Joachim Herz Stiftung (o. D.): Permanentmagnetismus, leifiphysik.de, [online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/permanentmagnetismus/grundwissen/eigenschaften-von-permanentmagneten> [abgerufen am 01.11.2023].

Joachim Herz Stiftung (o. D.): Permanentmagnetismus, leifiphysik.de, [online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/permanentmagnetismus/grundwissen/magnetfeld-und-feldlinien> [abgerufen am 01.11.2023].

Magnetische Feldstärke (2023): [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Feldst%C3%A4rke [abgerufen am 04.11.2023].

Joachim Herz Stiftung (o. D.): LORENTZ-Kraft, leifiphysik.de, [online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/kraft-auf-stromleiter-e-motor/grundwissen/lorentz-kraft> [abgerufen am 04.11.2023].

Joachim Herz Stiftung (o. D.): *Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen*

Leiters, leifiphysik.de, [online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/magnetisches-feld-spule/versuche/magnetfeld-eines-geraden-stromdurchflossenen-leiters-simulation> [abgerufen am 04.11.2023].

Klähn, Gerhard (2011): Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters,

<https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/>, [online] https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html [abgerufen am 04.11.2023].

Joachim Herz Stiftung (o. D.): Magnetfeld einer Zylinderspule, leifiphysik.de,

[online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/magnetisches-feld-spule/grundwissen/magnetfeld-einer-zylinderspule> [abgerufen am 04.11.2023].

Faradaysches Induktionsgesetz (o. D.): uni-goettingen.de, [online] <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3686> [abgerufen am 04.11.2023].

Joachim Herz Stiftung (o. D.): Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz, lei-

fiphysik.de, [online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/magnetischer-fluss-und-induktionsgesetz> [abgerufen am 04.11.2023].

Joachim Herz Stiftung (o. D.): LENZsche Regel, leifiphysik.de, [online]

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel> [abgerufen am 04.11.2023].

IOP Institute of Physics (o. D.): Magnetic train, iop.org, [online]

<https://spark.iop.org/magnetic-train#:~:text=The%20train%20consists%20of%20two,on%20the%20two%20permanent%20magnets> [abgerufen am 04.11.2023].

- Ohmsches Gesetz (o. D.): elektronik-kompendium.de, [online]
<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0201113.htm> [abgerufen am 05.11.2023].
- Kapazität, Ladespannung, Innenwiderstand? (2012): jubatec.eu, [online]
<https://www.jubatec.eu/kapazitat-ladespannung-innenwiderstand/> [abgerufen am 04.11.2023].
- Joachim Herz Stiftung (o. D.): Spezifischer Widerstand, leifiphysik.de, [online]
<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ohmsches-gesetz-kennlinien/grundwissen/spezifischer-widerstand> [abgerufen am 05.11.2023].
- Schroeter, Christian (o. D.): Informationen rund um Magnetismus, ibsmagnet.de, [online] <https://www.ibsmagnet.de/knowledge/flussdichte.php> [abgerufen am 04.11.2023].
- Wie berechnet man die magnetische Flussdichte? (o. D.): supermagnete.de, [online] <https://www.supermagnete.de/faq/Wie-berechnet-man-die-magnetische-Flussdichte> [abgerufen am 05.11.2023].
- Physikalische Magnetdaten (o. D.): supermagnete.de, [online] <https://www.supermagnete.de/physical-magnet-data> [abgerufen am 04.11.2023].
- Meyer, Lothar (2014): *Naturwissenschaftliche Formelsammlung*, 2. Aufl., Cornelsen, [Buch].
- Joachim Herz Stiftung (o. D.): Magnetschwebbahn Transrapid, leifiphysik.de, [online] <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/stromwirkungen/ausblick/magnetschwebbahn-transrapid> [abgerufen am 04.11.2023].
- Transrapid (2023): [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid> [abgerufen am 04.11.2023].

Linearmotor (2023): [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Linearmotor> [abgerufen am 04.11.2023].

11 Abbildungsverzeichnis

Abb.1:<https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetismus>

Abb.2:<https://physikbuch.schule/trajectories-of-charged-particles-in-magnetic-fields.html>

Abb.3:https://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_07_2v2.html

Abb.4:<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/magnetisches-feld-spule/grundwissen/magnetfeld-einer-zylinderspule>

Abb.5:<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/lenzsche-regel>

Abb.10:<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/stromwirkungen/ausblick/magnetschwebbahn-transrapid>

Abb.11:<https://de.wikipedia.org/wiki/Linearmotor>

Seminararbeit

Erklärung der eigenständigen Erstellung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers/der Verfasserin