

Franziskusgymnasium Lingen

In den Strubben 11

49809 Lingen

F a c h a r b e i t
im Leistungskurs Physik



Die Antriebs- und Schwebetechnik der
Magnetschwebebahn
(Schwerpunkt: Schwebetechnik)

Verfasser: Lukas Nadjiri

Fachlehrer: Hr. Marco Lögering

Abgabetermin: 31.03.2006



Inhaltsverzeichnis

Prolog:

Thematischer Überblick	III
Magnetische Lagerung	III
1. <u>Einleitung:</u>	
1.1. <u>Entwicklung der Magnetschwebetechnik & Geschichtliche Hintergründe</u>	1
2. <u>Permanentmagnetisches Schweben</u>	2
3. <u>Elektrodynamisches Schweben</u>	
3.1. Thematische Einführung	4
3.2. Versuchsaufbau	6
3.3. Messungen.....	7
3.4. Regressionsuntersuchung	8
3.4.1. Grenzwertige Regressionsuntersuchung.....	11
3.5. Theoretischer Beschreibungsansatz	31
4. <u>Elektromagnetisches Schweben</u>	
4.1. Thematische Einführung	15
4.2. Versuchsaufbau	17
4.3. Versuchsauswertung.....	19
<u>Anhang</u>	
5. <u>Vergleich der Schwebetechniken</u>	21
6. <u>Zusätzliche Erläuterungen und Tabellen</u>	24
<u>Literaturverzeichnis</u>	37
<u>Schlusswort</u>	38



Thematischer Überblick

Im Folgenden sollen verschiedene Schwebetechniken untersucht und teilweise anhand experimenteller Testreihen dynamisch beschrieben werden.

Dabei unterscheidet man drei verschiedene Schwebeprinzipien:

1. Permanentmagnetisches Schweben (PMS)

Bei diesem System handelt es sich um ein Prinzip, das auf der magnetischen Abstoßung zweier gleichartiger Permanentmagneten beruht.

2. Elektrodynamisches Schweben (EDS)

Diese Technik nutzt die abstoßenden magnetischen Wirbelströme, die ein sich bewegendes magnetisches Feld in einem Leiter erzeugt. (Dies ist die in der Theorie interessanteste Methode, weshalb der Schwerpunkt dieser Arbeit auch auf diesem Kapitel liegen soll.)

3. Elektromagnetisches Schweben (EMS)

Bei dieser Methode des Schwebens, zieht sich ein regelbarer Elektromagnet von unten mit der gleichen Kraft an die Schiene heran wie die Gravitationskraft dieser entgegenwirkt.

Doch vorab wird kurz die Historie der verschiedenen Schwebesysteme aufgezeigt. Schließlich sollen der Vollständigkeit wegen die Techniken in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und tatsächlichen Einsatz in der Bahntechnik untereinander sowie mit konventionellen Bahnsystemen im Anhang verglichen werden.

Warum überhaupt eine magnetische Lagerung?

Die mechanische Rad-Achse-Motor Übersetzung erzeugt zum Einen Verschleiß und zum Anderen Reibung, die exponentiell zur Geschwindigkeit steigt. Dies macht hohe Geschwindigkeit recht unwirtschaftlich. Das Schweben auf strömendem Gas (ähnlich eines Luftkissenfahrzeugs)¹ ist Aufgrund des Gewichts, sowie nicht zuletzt der dafür notwendigen Apparaturen für ein schienengebundenes Fahrzeug

¹ Wie z.B. der Transrapid 03. Höchstgeschwindigkeit <150km/h [1]



recht unpraktikabel. Folglich lässt auch dies keine rational höheren Geschwindigkeiten im Vergleich zu konventionellen Bahnsystemen zu. Ein anderes Prinzip um Kräfte berührungsfrei auf einen Körper wirken zu lassen ist die Nutzung eines elektrischen Feldes. Wie auch bei der magnetischen Lagerung werden hierbei keine Kontaktmedien, wie Schmierstoffe oder Gase benötigt. Ähnlich stoßen sich auch hierbei gleichartige Pole ab. Da die elektrische Feldstärke durch die Durchschlagfestigkeit des Vakuums jedoch auf etwa $10^6 \frac{V}{m}$ [6] beschränkt ist und die auf Grund der Sättigungsinduktion¹ von ferromagnetischen Stoffen maximale magnetische Feldstärke auf $1,5 \cdot 10^6 \frac{A}{m}$ [6], errechnet sich

ein Verhältnis von²: $\frac{F_{mag}}{F_{el}} = 3 \cdot 10^6$

Aufgrund dessen werden bei der Bahnschwebetechnik ausschließlich magnetische Felder genutzt. Elektrische Felder lagern z.B. superleichte Werkstoffe in der Mikroindustrie.

1. Einleitung

1.1 Die Entwicklung



[2] Die Nutzbarkeit der Magnetschwebetechnik für schienengebundene Fahrzeuge wurde von Dipl. Ing. Hermann Kemper 1933 erstmals erkannt. Bereits als Student wollte er, dass in seinen Augen kaum mehr entwicklungswürdige Rad-Schiene System auswechseln. Dabei ging er soweit, nicht nur den Reibungswiderstand konventioneller Antriebe sondern auch den dann einzig übrigen Widerstand durch die Luft zu umgehen und

nahm an, dass seine stets auf EMS basierenden Züge in luftleeren Röhren³ Geschwindigkeiten von 1000-3000km/h [2] erreichen würden. Auf diesem System elektromagnetischen Schwebens beruhten auch die ersten Magnetschwebbahnen als 1969 der damalige

¹ Die Sättigungsinduktion stellt eine Materialabhängige Induktionsbeschränkung in Werkstoffen dar. D.h. Angenommen man hätte eine Eisenkern in einer Stromdurchflossenen Spule mit dem Strom $I = \infty$, ist dieser trotz dem nur in der Lage ein begrenztes Magnetfeld aufzubauen.

² Rechenbeispiel im Anhang Seite 25



Bundesverkehrsminister George Leber eine Studie über ein neues schienengebundenes Hochgeschwindigkeitsfahrzeug vergab. So z.B. 1969 der Transrapid 1 (TR01) von Krauss-Staffei (Modell), 1971 der Messerschmidt-Bölkow-Blohm (MBB) (90km/h), 1971 der TR02 (164km/h) und der TR04 (253km/h)^[3]. Im Gegensatz dazu erreichten ausschließlich auf PMS basierende Bahnen die Produktionsreife nie. Warum, soll im folgenden Kapitel genauer erklärt werden.

Der Erlangen-Erprobungs-Träger 1964 war das erste EDS nutzende System (160km/h)^[3]. Jedoch endete letztlich 1977 die Studie und der Systementscheid fiel zugunsten des EMS Systems mit synchronem³ Langstator⁴. Danach wurde in Deutschland ausschließlich an dieser Technik weitergearbeitet.

2. Permanentmagnetisches Schweben

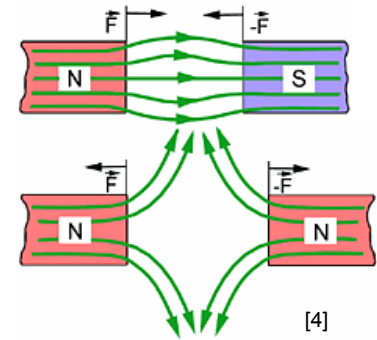
Bei diesem System werden Permanentmagneten so gerichtet, dass ihre gleichen Pole zueinander zeigen. Jedem sind die dann auftretenden abstoßenden Kräfte bekannt. Eisen, Kobalt und Nickel oder vorzugsweise Legierungen können so magnetisiert werden, dass sie die Hüllenverschiebung der Atome, die die Magnetwirkung ausmacht, beibehalten. Man nennt sie dann auch Dauermagneten. Dadurch, dass nun sämtliche Atomhüllen dieser Verschiebung in die selbe Richtung erliegen, stellt sich, da der Körper nach außen immer noch neutral geladen ist, kein elektrisches, sondern ein magnetisches Feld ein. Bei der Zueinanderrichtung gleichartiger Pole wirkt nun nicht nur eine starke Kraft, welche die Magneten längs auseinanderzudrücken versucht, sondern auch eine Weitere, die die Magneten zum seitlichen Ausweichen zwingt. Aufgrund dessen ist eine stabile Führung einer Schwebebahn nur in einer Art Wanne möglich, da ein solches Trag- und Führungssystem ein stark schlierendes Fahren zur Folge hätte und bei hohen Geschwindigkeiten ohne zusätzliches Rückhaltesystem, sogar die Gefahr aus ihr zu entgleisen bärge. Eine weitere Eigenschaft eines auf Abstoßung

³ Synchrones Wanderfeld zur Geschwindigkeit. Genauere Erklärung: Siehe Partnerarbeit, „Schwerpunkt Antriebssystem“ Kapitel 5.2.

⁴ (Linear-)Antrieb in der Schiene. Nähere Beschreibung: Siehe ebenfalls Arbeit, „Schwerpunkt Antriebssystem“ unter Kapitel 4.1.2.



beruhenden Schwebesystems ist, dass das Magnetfeld sich nicht zwischen den Polen konzentriert, sondern rings herum. Die Feldlinien⁵ werden aus dem Schwebespalt gedrängt, was ein starkes Magnetfeld um und in der Bahn zur Folge hat. Dies bedeutet, dass elektronische Geräte gestört werden würden und die Mitfahrt für



Herzschrittmacherpatienten gefährlich sein könnte, sowie die Möglichkeit der Löschung von Festplatten mitgenommener Laptops.

Ein ganz anderer, technischer Aspekt ist, dass ein solches System nicht mit einem Antrieb kombiniert werden könnte, was wegen eines separaten Aggregats ein Mehr an Gewicht zur Folge hätte, und deshalb mehr Abstoßung also Magneten benötigte. Dabei ist weder Lang- noch ein Kurzstatorantrieb⁶ vorstellbar. Ein solcher in die Schiene integrierter Antrieb versucht nämlich die Magnete und damit die Bahn mitzuziehen, indem vor den Magneten ein anziehendes und hinter ihnen ein abstoßendes Feld initiiert wird. Da PMS jedoch wie gesagt auf Abstoßung basiert, wäre es bei den auftretenden anziehenden Kräften hinfällig. Ein Kurzstatorantrieb also ein Antrieb im Fahrzeug ist erstrecht nicht mit dem Prinzip des PMS zu kombinieren, da hierbei gleich einem Drehmotors der ständig umzupolende Rotor, die Permanentmagneten wären, was völlig paradox ist. Die einzige Möglichkeit die Bahn anzutreiben ist es, spezielle Magneten zu montieren, die im Wanderfeld mitgezogen werden sollen. Diese würde aber teilweise die abstoßenden Kräfte kompensieren.

Allerdings ist diese Technik des PMS recht simpel und bedarf keinerlei aktiver Regelung. Eine Führungswanne als passive Regelung reicht völlig aus, da sich das Magnetfeld automatisch nach $F \sim 1/d^2$ verstärkt wenn die Bahn durch (Über)Ladung absinkt⁷. Das größte Hindernis dieses Systems ist es jedoch, dass Permanenten meist zu schwach sind und in ihrer Stärke mit der Zeit nachlassen können. Die für die völlige Tragkraft

⁵ Eine weitere Veranschaulichung des Feldlinienverlaufs ist im Anhang Seite 25 zu finden

⁶ (Linear-) Antrieb im Fahrzeug. Dass der Antrieb auch mit Permanentmagneten funktioniert ist aber ausgeschlossen, da diese sich im Wanderfeld umpolen müssen.
→ Verweist auf Partnerarbeit Kapitel 4.1.2

⁷ Es ist praktisch natürlich möglich ist, dass die Bahn absinkt und aufsetzt, also $d = 0$



nötige Permanentmagnetisierung des gesamten Bahnbodens und oder der Strecke wäre erstens kompliziert und teuer und zweitens den unmittelbaren Anwohnern nahe der Schiene nicht zuzumuten. Erheblich höhere Reisegeschwindigkeiten wären so nicht möglich.

3.1 Elektrodynamisches Schweben

Das Prinzip der EDS ist in der Theorie etwas komplizierter als die der beiden anderen Systeme. Wie der Name bereits verrät ist dafür Bewegung von Nöten. Die Bewegung des Magnetfeldes, hat eine Änderung der von ihr durchsetzten Fläche zur Folge. Das Magnetfeld wird dabei von einer supraleitenden Spule erzeugt, sodass der Strom darin, einmal erregt, immer weiterfließt. Dieses B-Feld erzeugt in der Schiene bei Bewegung ein weiteres, dem verursachenden magnetischen Feld Entgegengesetztes, sodass sich beide abgestoßen. Ein Schwebezustand stellt sich ein.

Bei dem hier gezeigten Aufbau wird ein Dauermagnet als Verursacher des B-Feldes genutzt und der Leiter durch Rotation bewegt, was zwar eine praktische Vereinfachung für das Experiment ist also nur einen Wechsel des Bezugssystems darstellt.

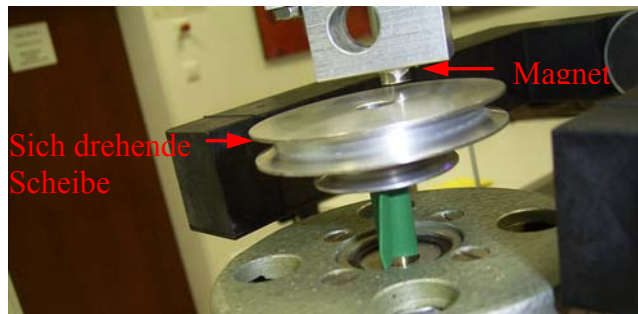
1831 wurde von Michael Faraday der Effekt_[6] der

elektrischen Induktion festgestellt, nach welchem bei einer Änderung des magnetischen Flusses Φ in einem sich darin befindenden Leiter mit Windungsanzahl n eine Spannung induziert wird.

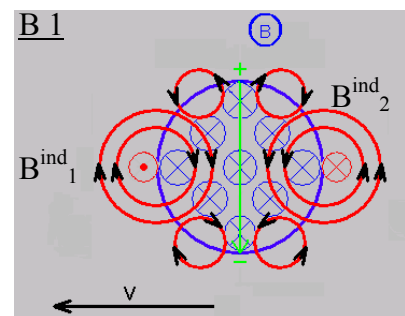
Für diese Spannung U^{ind} gilt:

$$U_{ind} = -n \cdot \dot{\Phi} = -n (B \cdot \dot{A} + \dot{A} \cdot B), \text{ bei } B \perp v$$

Für den elektrodynamischen Schwebeffekt ist jedoch nur die zeitliche Änderung der Fläche \dot{A} von Bedeutung. Sie kommt deshalb zustande,



[5]



[5]



da der Magnet in seiner Bewegung zwar immer eine gleich große Fläche durchsetzt, jedoch immer eine andere, sodass man abhängig von der Geschwindigkeit auch schreiben kann $U_{ind} = -n \cdot B \cdot d \cdot v$. Die Kraft, die diese Ladungstrennung verursacht, werde F_U genannt.

Das Vorzeichen ist hier nicht genau zu verfolgen, da in dieser Formel die Richtung von v nicht angegeben ist. Es lässt sich aber sagen, dass die Spannung in ihrer Wirkung, der Lenzschen Regel nach, ihrer Ursache entgegenwirken muss. Die Wirbelströme müssen also v verzögern. Dies wird auch bei der Anwendung der 3-Fingerregel deutlich, die die Richtung des Elektronenflusses vorgibt. Da es sich nicht um einen einfachen geraden Leiter handelt (zu vergleichen mit dem grünen Pfeil), in dem sich die Spannung nach $+$ und $-$ abzweigen lässt, sondern um einen kurzgeschlossenen Leiter, wie es bei einer Fläche der Fall ist, sind sie gezwungen, um die Potentiale auszugleichen, auf einer kreisförmigen Bahn zu fließen.

Eine solche Ladungstrennung durch v hat nun einen andauernden Strom zur Folge, sodass die Elektronen in Gebiete niedrigeren Potentials strömen. So würden sie z.B. aus dem oberen Teil der Skizze zunächst in den Außenbereich des Magneten außerhalb des B-Feldes⁸ fließen. Von dort aus würden sie wiederum in den unteren Bereich der Skizze, in dem gegensätzlichen Potenzial vorliegt, gezwungen, sodass sie eine wirbelförmige Bahn beschreiten. Auf Grund dieser Eigenschaft werden solche Ströme auch Wirbelströme genannt.

Da fließender Strom ein magnetisches Feld zur Folge hat, fungiert der Rundfluss der Wirbelströme als eine Art Spule. Nach der Linken-Hand Regel für Spulen⁹ ist, wie man deutlich sieht, das in v Richtung vordere Magnetfeld B^{ind}_1 dem verursachenden Magnetfeld B entgegengerichtet und stößt dieses ab. Das in v Richtung hintere Magnetfeld B^{ind}_2 hingegen ist dem verursachenden Magnetfeld gleichgerichtet, zieht es also an.

⁸ Dort herrscht zwar auch ein Magnetfeld vor. Da mit steigendem Abstand die Feldstärke jedoch quadratisch abnimmt kann es wegen seiner geringen Stärke verglichen mit der die unmittelbar zwischen Magneten und Leiter auftritt vernachlässigt werden.

⁹ Wenn der Daumen auf der Spule aufliegt und in Richtung des Elektronenflusses zeigt, geben die locker umfassenden Finger die Richtung des B-Feldes an

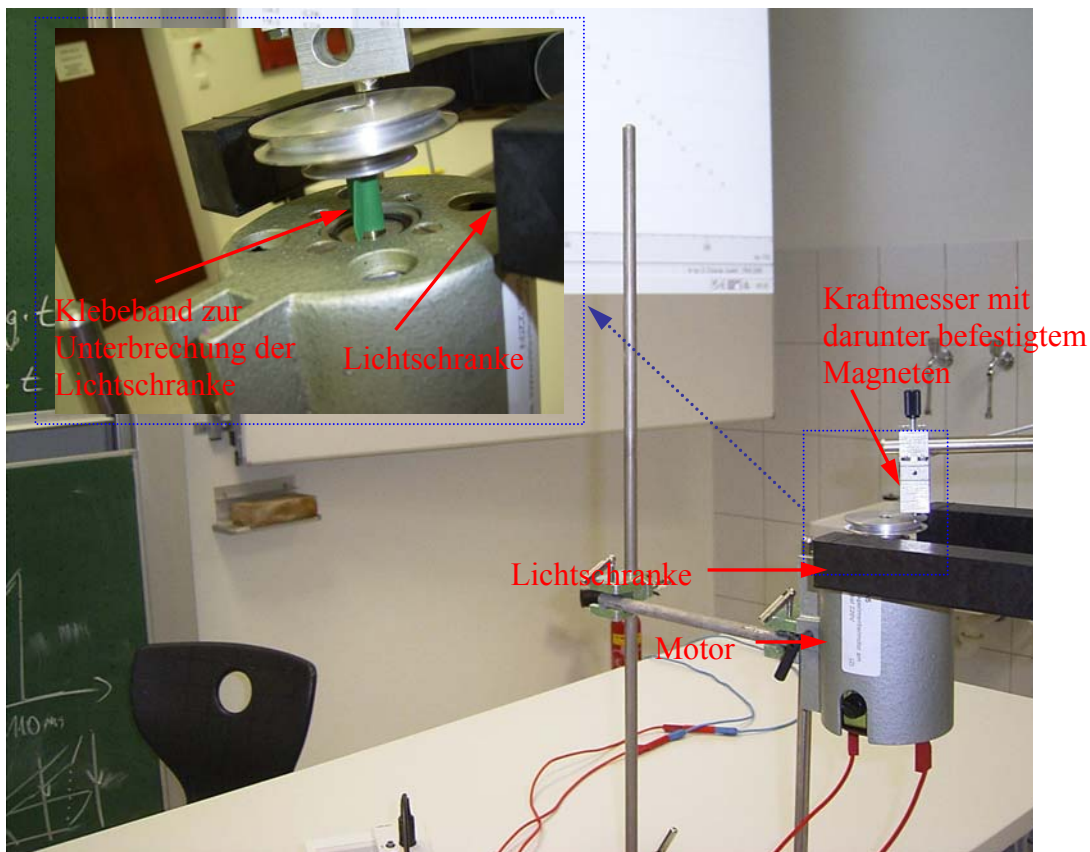


→ v wird also durch die Wirbelströme gebremst. Dieser Effekt ist in der Praxis auch als Wirbelstrombremse bekannt¹⁰.

Es treten jedoch auch Kräfte auf, die den Magneten von dem sich bewegenden Leiter abstoßen und bei steigender Geschwindigkeit v zunehmen. Diese verhelfen den elektrodynamisch gelagerten Bahnen zum Schweben. Sie soll experimentell näher betrachtet werden.

3.2 Versuchsaufbau

Benötigt werden: Ein relativ schneller Motor, (vorzugsweise)¹¹ eine Aluminiumscheibe, ein im Verhältnis zur Scheibe kleiner Magnet, ein Kraftmesser, ein Streifen recht festes undurchsichtiges Klebeband, eine Lichtschranke sowie natürlich eine mit dem Motor verbundene regulierbare Spannungsquelle und eine Anzeige für die Lichtschranke.



¹⁰ Dieser Effekt wird sich z.B. beim ICE 03 als verschleißfreie Bremse zunutze gemacht. Auch im Versuch zeigte sich, dass die max. Frequenz des Motors bei einem angebrachtem Magnet von 213f auf 199f sank.

¹¹ Es bedarf eines Stoffes, der nicht magnetisierbar ist: $\mu_0 = 1$. So kann sich folglich kein Magnetfeld gleich dem Verursachenden aufbauen und durch seine Anziehungskraft den EDS Effekt stören. Es muss sich aber der trotzdem ein leitendes Material handeln, damit sich Wirbelströme bilden können.



Der Motor wird am Tisch fest montiert, sodass die daran befestigte Scheibe horizontal steht und ruhig läuft. Darüber wird nun ein Kraftmesser¹² aufgehängt unter dem sich ein Magnet so befindet, dass einer seiner Pole zur Scheibe und der Andere zum Kraftmesser gerichtet ist, sodass B senkrecht zur Platte und damit auch zu v steht.

Für die Geschwindigkeitsmessung wird eine Lichtschranke verwendet. Durch das am Stiel des Motors unter der Platte befestigte (siehe Bild) grüne Klebeband, wird die Lichtschranke pro Umdrehung einmal unterbrochen und gibt eine Frequenz an.

Nach $v = 2\pi r * f$

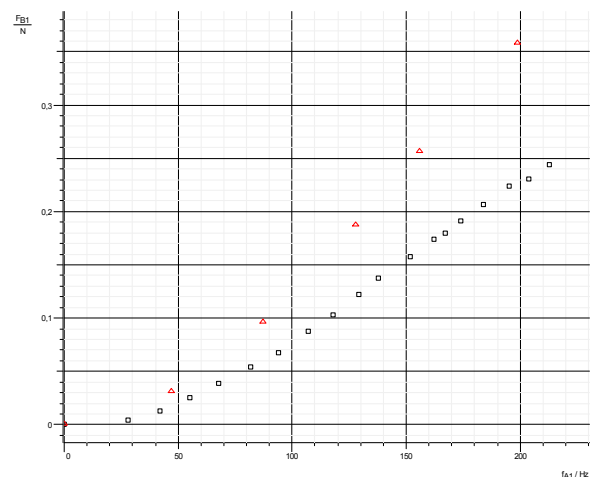
lässt sich jedoch erkennen, dass $v \sim f$ und $2\pi r$ lediglich in die Konstante der aufzustellenden Gleichung eingeht.

Es sei zwar gesagt, dass ein möglichst großer Radius anzustreben ist um eine große Geschwindigkeit und Versuchsbreite zu erzielen, jedoch darf sich der Magnet nicht zu dicht am äußeren Rad der Aluminiumscheibe befinden, damit sich die Wirbelströme bilden können! Dies ist auch der Grund dafür den Magneten nicht zu groß zu wählen. Die in B1 skizzierten Wirbelstrombahnen sind nämlich zum Einen auch an den Seiten vorzufinden und zum Anderen nicht zwingend kreisrund. Wie sich bei dem Versuch zeigte, bedurfte es etwa einer halben Magnetbreite an Abstand zum Leiterrand. Das verdeutlicht den weiten Verlauf der Ströme, auch wenn es ihnen wegen der Kraft F_U , die die Fläche unter dem Magneten in der Mitte teilt, nicht möglich ist diese Trennung zu überwinden.

3.3 Graphische Darstellung¹³ der Messungen

Bei der Messung wird nun die Kraft (groß) F bei der Frequenz (klein) f aufgetragen.

Es stellt sich nun die Frage welcher Zusammenhang zwischen v bzw. f



¹² Vorzugsweise ebenfalls aus einem nichtmagnetischen Material um kein Störmagnetfeld zu erzeugen. In diesem Fall Aluminium.

¹³ Die dazugehörigen Tabellen liegen im Anhang bei

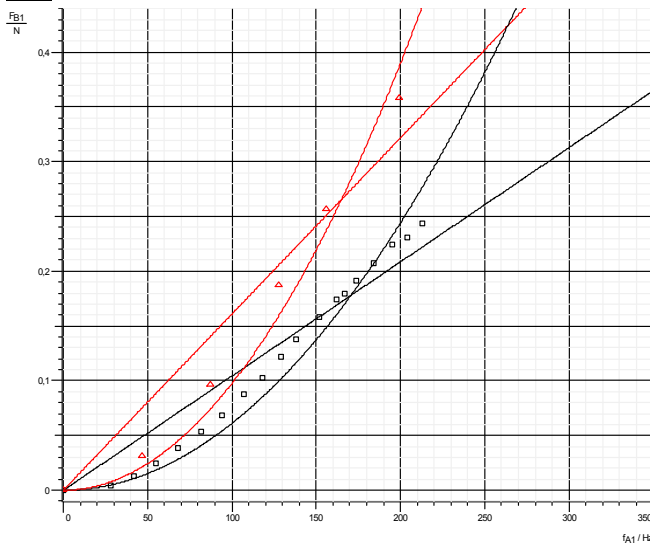


und F besteht. Dies soll zunächst mit Hilfe des Computer Programms Cassy Lab¹⁴ geschehen, welches die Werte auch aufgenommen hat.

3.4 Regressive Bestimmung der Funktion

Hier sieht man eine lineare Regression (lin. Reg.) und eine quadratische Regression (quad. Reg) für zwei Funktionen. Die roten Punkte geben eine Messreihe wieder und die schwarzen eine andere. Dabei sind die unterschiedlichen Werte für F durch eine leichte Veränderung des Aufbaus zu erklären. Bei Rot wurde unter Anderem der Abstand des Magneten zur Platte verringert.

D1



Es ist recht offensichtlich, dass die beiden Regressionen nicht passen. Der eigentliche Graph scheint irgendwo zwischen ihnen zu verlaufen. Nun ist es jedoch recht schwierig, aus den relativ niedrigen Werten für F und damit einem kleinen Ausschnitt aus der Funktion, auf den funktionalen Zusammenhang zu schließen. Jedoch lässt sich der Tabelle

bereits entnehmen, dass einige Funktionen nicht in Frage kommen, dies zeigt ein Blick auf die Korrelationskoeffizienten der linearen Regressionen.

Funktion \ Werte	Für k	Resultierender Korrelationskoeffizient r^2
$y=k*x$ für alle Werte	0,001608	0,9643
$y=k*x$ für $\frac{1}{2}$ der Werte	0,001003	0,9397
$y=k*x$ für alle Werte	0,001043	0,9781
$y=k*x$ für $\frac{1}{2}$ der Werte	0,0007251	0,9364
$y=k*x^2$ für alle Werte	0,000009741	0,9839
$y=k*x^2$ (es werden 4 der 6 Werte genommen, da \rightarrow)	0,00001167 eine quad. Regression mit 3 Werten zu ungenau ist.)	0,9968
$y=k*x^2$ für alle Werte	0,0000061	0,9781
$y=k*x^2$ für $\frac{1}{2}$ der Werte	0,000007643	0,9966

¹⁴ Cassy Lab1.54; written by Dr. Michael Hund & Dr. Karl-Heinz Wietzke for Leybold Didactic



Ein quadratischer Zusammenhang hingegen scheint schon recht gut zu passen. Jedoch wäre es fragwürdig, wenn es sich bei der gesuchten Funktion wirklich um eine quadratische handeln würde, warum sich die eigentliche Konstante $k = \frac{y}{x}$ bzw. $k = \frac{y}{x^2}$ um 25,3 / 19,8 % bei einer Verringerung der Messwerte ändert.¹⁵

Nun soll die Steigung des Graphen untersucht werden, der die Messpunkte miteinander verbindet. Da man jedoch den Funktionsterm der Messreihe nicht kennt, kann man folglich auch keine Ableitungsfunktion aufstellen. Allgemein lässt sich aber über die Steigung m , für $\lim_{h \rightarrow 0}$, an der

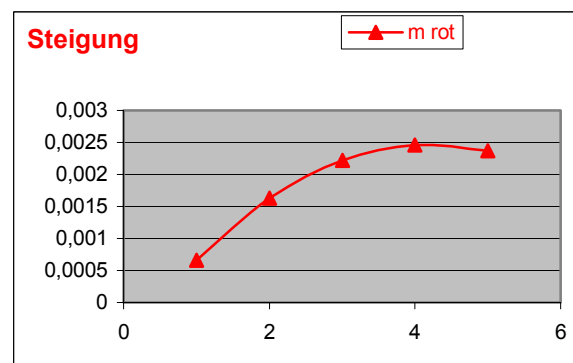
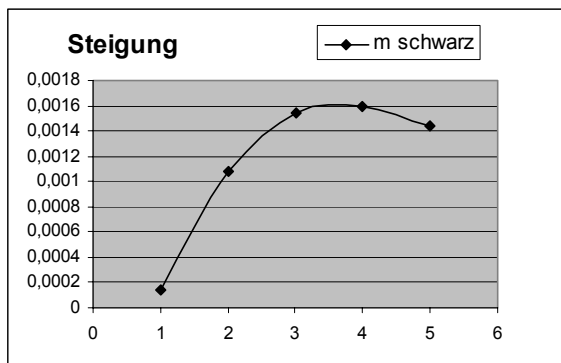
Stelle x sagen, $\lim_{h \rightarrow 0} m_x = \frac{f(x+h) - f(x)}{x+h-x}$. Da hier aber nur eine Tendenz

gesucht wird, reicht es aus, die Steigung zwischen den einzelnen Messpunkten zu kennen.

Mit Hilfe von Excel¹⁶ wird diese abschnittsweise Steigung angegeben. Für

diese gilt zwischen den Messpunkten x_1 und x_2 : $\bar{m}_{x_1, x_2} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$.¹⁷

D2



Man sieht deutlich, dass die Steigung erst zunimmt und gegen Ende leicht abnimmt. Dies ist ein sehr wichtiges Kriterium zur Bestimmung der gesuchten Funktion, da ein solches Verhalten viele Funktionen ausschließt. Die linearen und quadratischen Funktionen sind bereits

¹⁵ Tabellarische Verdeutlichung $k = \frac{y}{x}$ und $k = \frac{y}{x^2}$ im Anhang Seite 26

¹⁶ Microsoft Excel 2002 (10.2614.2625)

¹⁷ Da die Schritte bei der schwarzen Messreihe recht klein sind, was die Variabilität der Steigung zwischen den einzelnen Punkten erhöht, wird für die Steigungsbestimmung ein Punkt alle ca. 50Hz bestimmt; so lässt sich eine Tendenz besser erkennen. Dies trifft auch für die rote Reihe zu. Deren Messpunkte wurden jedoch bereits ca. im 50Hz Abstand aufgenommen. Vollständige Tabelle mit Diagramm: Siehe Anhang Seite 27



widerlegt, jedoch würden sie auch dieses Kriterium nicht erfüllen, da sie eine konstante bzw. eine stetig wachsende Steigung besitzen. Das Wachstum an Steigung höherer Funktionen wächst mit ihrem Grad, was folglich auch jede Exponentialfunktion $y = a * (x + c)^b + d$ ausschließt.

Die Steigung einer Logarithmusfunktion ist im Ursprung am größten, und strebt im Unendlichen gegen 0. Die Ableitung einer solchen Funktion ergäbe eine Hyperbel, was nicht mit der Feststellung aus D2 übereinstimmt. Solch eine Steigung zeigen auch unverschobene trigonometrische Funktionen. Da der Versuch aber nichts mit Wechselströmen oder Winkeln zu tun hatte und ein alternierender Verlauf nicht zu erklären wäre, kommen auch diese nicht in Frage. Eine Hyperbel kommt ebenso wenig in Betracht. Ihr Steigungsverhalten ist

nämlich abhängig vom betrachteten Ast $F = a * \left(\frac{1}{(x + c)^b + d} \right)$ entweder

gleich dem einer Logarithmus- oder einer Potenzfunktion bzw. Exponentialfunktion, die bereits ausgeschlossen wurden.¹⁸ Welche Funktionen kommen also noch in Frage?

Die bisherigen Kriterien zusammengefasst lässt sich beschreiben wie die gesuchte Funktion aussehen muss.

An jeder Stelle $x \forall x \in \mathbb{R}^+$ gilt stets: $f'(x) \geq 0$. Danach wird die Steigung zunächst größer $f''(x) > 0$, bis zu einer Stelle x , erkennbar in D2 (in Punkt 4), für die gilt $f''(x) = 0$, für folgende Werte gilt dann $f''(x) < 0$. Im Punkt 0 muss gelten $f(0) = 0$, da sich ohne Bewegung keine Kraft einstellen kann. Außerdem muss dort gelten $f'(0) = 0$ da die Steigung von diesem Punkt an zu wachsen beginnt.¹⁹,

Es blieben noch zwei Funktionsarten, die diese Kriterien erfüllen übrig.

Zum Einen käme eine grenzwertige $f(x) = a * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + b * g(x)} \right) \right)$ in Frage,

zum Anderen eine ganzrationale Funktion:

¹⁸ Gegenüberstellung solcher Funktionen: Siehe Seite 27

¹⁹ Die Orientierung von v spielt in diesem Versuch für die Kraft keine Rolle:

Also: $f(-x) = f(x)$. Weil es sich nicht um eine zusammengesetzte Funktion handeln kann, da an der Stelle 0 keine Definitionslücke vorliegt und diese auch differenzierbar ist, muss ein fließender Übergang bei 0 vorherrschen, was nur bei $f'(0) = 0$ erfüllt ist.



$f(x) = a_n * x^n + a_{n-1} * x^{n-1} + \dots + a_1 * x$ (die Konstante entfällt, da der Graph durch den Ursprung verlaufen soll). Dabei würde $x=0$ mit $f'(0) = 0 \wedge f(-x) = f(x)$, einen Tiefpunkt im Koordinatenursprung beschreiben, da im Folgenden $f''(x) > 0$. Die Stelle x mit $f''(x) = 0$ beschreibt einen Wendepunkt dessen darauf folgender Sattelpunkt²⁰ nicht im Messbereich liegt. Im negativen Bereich müsste der Graph ebenso verlaufen, was bedeutet, dass es sich mindestens um eine ganzrationale Funktion 6. Grades mit 6 Parametern handeln müsste. Eine solche Regression ist mit Hilfe von Cassy Lab bereits nicht mehr durchführbar, da es „nur“ über 4 Parameter verfügt. Weil sich jedoch mit einer ganzrationalen Funktion mit beliebig vielen Parametern a_n bis a_1 bei $f(x) = a_n * x^n + a_{n-1} * x^{n-1} + \dots + a_1 * x$ jede beliebige Funktion als ganzrationale beschreiben ließe und trotzdem letztendlich nur eine Näherung wäre, soll von der weiteren Betrachtung einer solchen Funktion abgesehen werden. Zwar ist es wegen des kleinen Messfensters nicht experimentell widerlegbar, aber ein oder mehrere Sattelpunkte im Verlauf scheinen nicht vorstellbar, sodass nun ein grenzwertiger Zusammenhang untersucht werden soll.

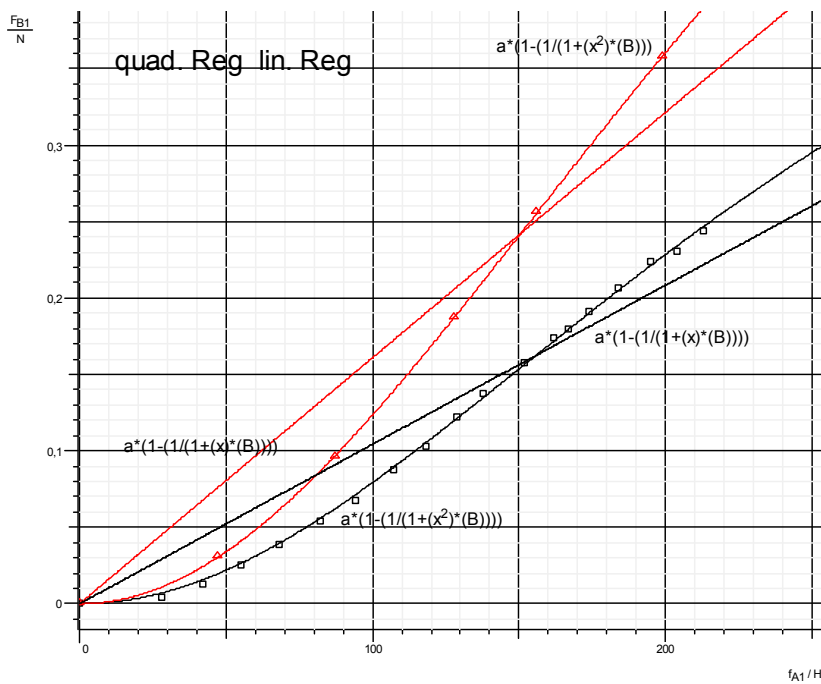
3.4.1 Grenzwertige Regressionsuntersuchung

$f(x) = a * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + b * g(x)} \right) \right)$ Dies ist der funktionale Zusammenhang einer

jeden grenzwertigen Funktion. Es bleibt jedoch zu untersuchen wie x dabei eingeht. Da die Funktion im Koordinatenursprung ihren Ursprung hat, muss gelten $g(0) = 0$; sodass der Klammerinhalt 0 ist und somit auch das Produkt. Für $\lim_{x \rightarrow \infty}$ muss gelten $g(x) = \infty$, sodass der Quotient gegen 1 strebt und das Produkt folglich gegen den Grenzwert a . Verschiedene Regressionen für $g(x)$ sollen nun untersucht werden.

Zunächst wieder eine lineare und eine quadratische Funktion $g(x) = x$ und $g(x) = x^2$.

²⁰ Es kann sich nur um Sattelpunkte handeln, da der Graph steigt und an jeder Stelle $f'(x) \geq 0$ gelten muss.



Die quadratische Regression scheint die Messpunkte sehr genau zu verbinden. Eine tabellarische Auswertung verdeutlicht dies noch einmal.

Funktion \ Werte	Für a	Für b	Resultierender Korrelationskoeffizient r ²
g(x)=x für alle Werte	17761	9,056*10 ⁻⁸	0,9641
g(x)=x für ½ der Werte	11077	9,056*10 ⁻⁸	0,9390
g(x)=x für alle Werte	11512	9,056*10 ⁻⁸	0,9777
g(x)=x für ½ der Werte	8605	9,056*10 ⁻⁸	0,9353
g(x)=x ² für alle Werte	1,0009	0,00001407	1,0000
g(x)=x ² (es werden wieder 4 der 6 Werte genommen) ₁₅	0,9651	0,00001466	1,0000
g(x)=x ² für alle Werte	0,613	0,00001486	0,9994
g(x)=x ² für ½ der Werte	0,5846	0,00001563	0,9992

Es fällt auf, dass nicht der lineare Funktion aber der quadratische Zusammenhang von $g(x)$ einen äußerst guten bzw. **perfekten** Korrelationskoeffizienten aufweist. Auch bei der Verringerung der Messwerte, ändern sich die Parameter nur wenig. So z.B. $a = 4,6 / 3,7 \%$ und $b = 5,2 / 4,0\%$. Das quadratische Eingehen von $g(x) = x^2$ scheint also nicht nur am geeignetsten, sondern gemessen an der Fehlbarkeit praktischer Versuche, die hier sogar sehr gering zu sein scheint, auch das Richtige zu sein²¹

²¹ Dies noch einmal zu verdeutlichen sollen auf Seite 28 im Anhang weitere Funktionen für $g(x)$ untersucht werden.



Wenn man nun die gefundenen Terme zusammensetzt

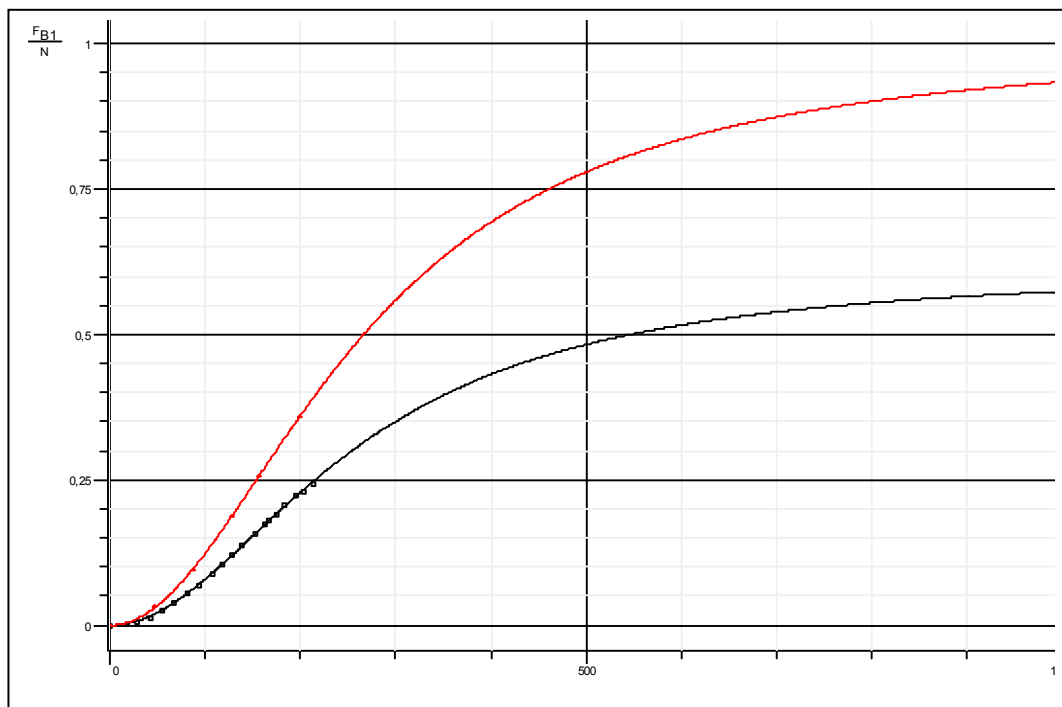
$$\rightarrow f(g(x)) = a * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + b * g(x)} \right) \right) = a * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + b * x^2} \right) \right) \text{ in dem Versuch mit}$$

$$x = f \text{ und } y = F \Rightarrow F(f) a * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + b * f^2} \right) \right) \text{ mit den Angaben in der}$$

$$\text{Literatur vergleicht: } F(v)_{[7]} = F_0 * \left(\frac{\left(\frac{v}{v_0} \right)^2}{1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2} \right) = F_0 * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + v^2 * \frac{1}{v_0^2}} \right) \right)$$

fällt auf, dass es die selbe Formel ist und $a \hat{=} F_0$ und $b \hat{=} \frac{1}{v_0^2}$, dabei sind

F_0 und v_0^2 ein Produkt verschiedenster Konstanten, die vom Versuchsaufbau abhängig sind. Wie nun bereits gezeigt, ist $v \sim f$ d.h., dass $2\pi r$ lediglich als zusätzlicher Faktor in den Parameter b einfließt. Damit wäre gezeigt, dass die bestimmte Funktion sowohl mit der Bekannten übereinstimmt, als sie sich auch autark als unzufällig gut passende Regression bewährt hat. Der Verlauf der Funktion mit den Parametern a und b der beiden Messreihen, sieht wie folgt aus;





Nun sieht man, dass die Messreihe wirklich nur eine kleine Teilmenge der gesamten Funktion ist und sich dem Grenzwert $(f(x) \lim_{x \rightarrow \infty} \rightarrow f(x) = a/a)$ nicht allzu sehr nähert. Jedoch reichen die Messwerte zumindest über den Wendepunkt hinaus, was bei der Regression eine große der Hilfe war. Die Funktion wird beschrieben durch:

$$a * \left(1 - \frac{1}{1 + (x * b)^2} \right)$$

$$\hat{a} = 0,6129 / 1,0009$$

$$\hat{b} = 0,003855 / 0,003751$$

Es fällt auf, dass die Werte für b recht nah aneinander liegen, dies bestätigt die hohe Güte der aufgenommenen Messdaten, da b nach der Formel aus der Literatur v_0 darstellt, welches sich nach aufbauunabhängigen Konstanten richtet. Nämlich nach der Stärke der Reaktionsschiene, dem spezifischen Widerstand ihres Materials und der Magnetfeldkonstanten μ_0 .

Diese Funktion nun theoretisch zu erarbeiten, d.h. zu beweisen, ist recht kompliziert. Dafür sind einige neue Anschauungen so z.B. dass sich das durch die Wirbelströme entstehende Magnetfeld B^{ind}_1 im Leiter bei steigender Geschwindigkeit dem verursachenden Magnetfeld B annähert, nötig.

Für diese Näherung d ergibt sich dann:

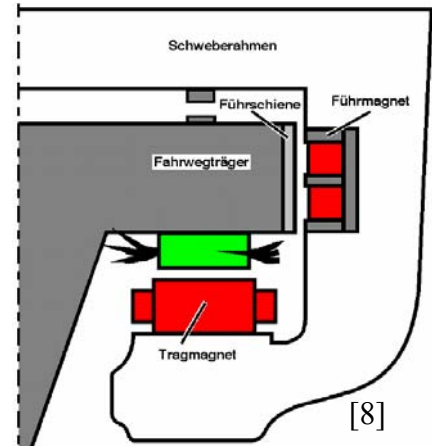
$$d = r - r * \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2v_{el}} * v_{mag}} \right) \quad \text{Mit } v_{mag} \text{ als einziger Variable lässt sich eine}$$

Grenzwertfunktion erkennen, sodass folglich auch die Kraft zweier B-Felder aufeinander, nach $F = \frac{1}{d^2}$ einem Grenzwert entgegenstreben muss.

Eine Herleitung dessen soll, da es sich nur um einen Ansatz handelt, später auf Seite 31 im Anhang aufgeführt werden. So kann am Besten auf die Probleme, die bei der Erarbeitung entstanden eingegangen werden.

4.1 Elektromagnetisches Schweben

Das elektromagnetische Schweben baut auf einem sich anziehenden magnetischen Feld, zwischen Schiene und Fahrzeug auf. Dieses magnetische Feld wird von dem Stromfluss in Spulen der Bahn (rot) und der Schiene (grün) erzeugt. Die resultierende Kraft wird ausgenutzt um die Bahn von unten an die Schiene heranzuziehen um sie sowohl vertikal als auch horizontal zu stabilisieren. Die



seitlichen Spulen der Führungsmagnete wären dabei eigentlich überflüssig, da es sich erstens wie gesagt um ein anziehendes Magnetfeld handelt. D.h. es wird erstens im Gegensatz zu einem abstoßenden keine seitlich verschiebende Kraft hervorgerufen und zweitens ein Kippen dadurch verhindert, dass die Tragmagneten unter beiden Seiten der Schiene befestigt sind. Dieses System wird beispielsweise bei der deutschen Magnetschwebbahn, dem Transrapid eingesetzt.[8]

So leicht das theoretische Prinzip jedoch scheinen sollte, so kompliziert ist es in der Praxis, was durch den folgenden Versuch verdeutlicht werden soll. Für ein sichereres Schweben ist bei dieser anziehenden Technik nämlich eine Regelung von Nöten, die verhindert, dass die Tragmagneten die Schiene berühren. Nach $F \sim \frac{B}{d^2}$ ist dies jedoch relativ schwierig.

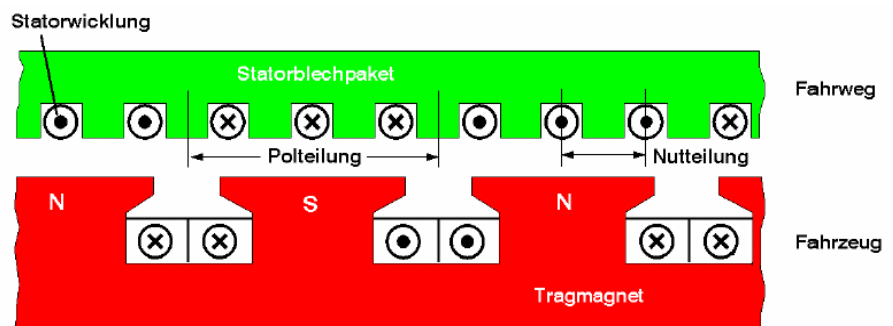
Wenn sich demnach der Abstand zur Schiene verdoppelt, ist eine Vervierfachung der magnetischen Kraft erforderlich, um wieder einen stabilen Schwebezustand herzustellen. Hierbei ist die Rede von einem angestrebten Abstand $d=10\text{mm}^{22}$, den es also sehr genau zu bestimmen gilt. Dies gelingt in dem man sich den Effekt der Lenzschen Regel zu nutze macht. Neben den Tragspulen der Bahn befinden sich weitere kleinere Spulen, an die eine Wechselspannung angeschlossen ist, die folglich in die Unterseite der Schiene nach $U_{ind} = -\dot{\Phi}$ eine schwache Spannung induziert. (Die Änderung der durchsetzten Fläche wirkt sich erst dann aus wenn sich die Bahn bewegt), sodass im Stehen

²² Exemplarisch für EMS Bahnen Angaben des Transrapid 08 [8]

$U_{ind} = -\dot{\Phi} = -\dot{B} * A$ und in Bewegung $U_{ind} = -(\dot{B} * A + \dot{A} * B)$ gilt. \dot{B} ist dabei die Änderung des B-Feldes pro Zeit, hervorgerufen durch den Wechselstrom und \dot{A} die Flächenänderung pro Zeit, abhängig von der Geschwindigkeit. Die induzierte Spannung wirkt nun nach der Lenzschen Regel der Ursache entgegen. Die Ursache ist die Änderung von B, dessen eigentliche Ursache die Änderung der Spannung ist. Je nach Abstand wird die induzierte Spannung dabei stärker oder schwächer, sodass man einen Einfluss des Abstands auf die Spannung feststellen kann. Beim Schweben werden die Abstandsänderungen über die Spannungsabfälle und -zunahmen etwa 100mal in der Sekunde gemessen und mit im Computer gespeicherten Sollwerten für die Spannung U konstant im Stehen und $U(v)$ je nach Geschwindigkeit v verglichen.²³ Wenn die gemessene Spannung zu hoch oder zu niedrig, ergo der Abstand zu klein oder zu groß ist, wird der Spulenstrom der Tragmagnete verringert bzw. verstärkt bis der angestrebte Spaltabstand wieder erreicht ist.

Der Regulierungsmechanismus aber auch die Trag- und Führungsmagnete selbst werden bei EMS Langstator Bahnen²⁴ von einer Bordbatterie gespeist um ein völliges kontaktfreies Schweben zu gewährleisten. In die Bordbatterie wiederum wird ein Strom durch die

Veränderung des Magnetfelds induziert. Wenn sich die Bahn nämlich an den Nuten vorbeibewegt, werden die



Tragmagneten, in denen sich zusätzliche Spulen befinden, an diesen Vertiefungen vorbeigeführt. Dies hat eine Veränderung des Abstandes der Spulen zum Ausgangspunkt des B-Feldes zur Folge. Je nach Position des Tragmagneten, in dessen Mitte man sich die Spulen in etwa vorstellen

²³ Erklärung zu abweichenden Sollwerten in der Praxis: Anhang Seite 29

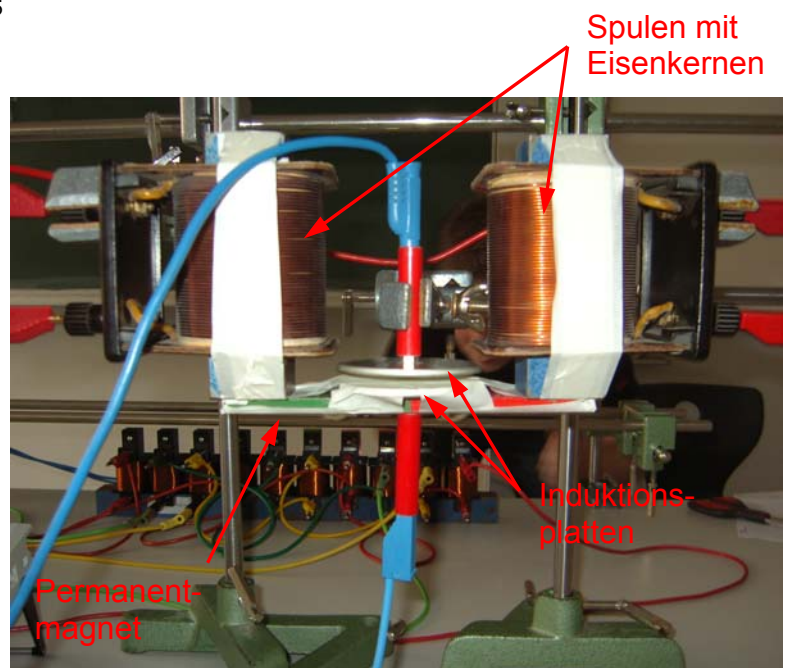
²⁴ Bei Kurzstatorbahnen liegt der Antrieb wie bereits erklärt im Fahrzeug, sodass die nötige Speisung mit Strom ohnehin über Schleifkontakte erfolgen muss, was Batterien überflüssig macht.

kann, wird das B-Feld stärker bzw. schwächer. Diese Änderung von B induziert dann in die Ladespulen eine Spannung, die schließlich die Bordbatterie wieder auflädt. Bei dem Versuch soll jedoch nur die Schwebetechnik und deren Regelung näher betrachtet werden, nicht deren Speisung.

4.2 Versuch

Zwei mit Eisenkernen gefüllte Spulen werden vertikal aufgestellt und möglichst waagrecht zueinander befestigt und so an eine regelbare Stromquelle angeschlossen, dass sich unter einer ein Nord- und unter der anderen ein Südpol bildet.²⁵

Als leichter zum Schweben zu bringender Teil dient ein Dauermagnet, dessen Nord- und Südpol sich entsprechend den Spulen ausrichten, weshalb auch deren unterschiedliche Ausrichtung von Bedeutung ist. Wenn man nun den



Spulenstrom fließen lässt, wird der Dauermagnet angezogen und haftet an den Eisenkernen. Für einen Schwebezustand ohne Kontakt ist jedoch eine Regelung von Nöten, die sowohl einen Kontakt als auch das Abfallen verhindert. Diese wird im Experiment leicht von der des Transrapid abgewandelt. Benötigt werden dafür zunächst zwei Leiterplatten, (hier: Aluminiumplatten).

Die Eine wird fest zwischen den Spulen befestigt und die Andere an dem zum Schweben zu bringenden Magnet. Somit nimmt die

²⁵ Unter diesen regelbaren Spulen ist sich etwa der regelbare magnetische Teil des Fahrzeuges vorzustellen. Im Versuch ist dies aber der fest montierte Teil, da die beiden Spulen und ihre Kerne für ein dauerhaftes, experimentell erzeugbares Magnetfeld nicht tragbar wären. Dies macht keinen weiteren Unterschied, weil es für die entstehenden anziehenden Kräfte nicht von Bedeutung ist, welcher Teil sich oben oder unten befindet.



Aluminiumscheibe, welche hier als zu induzierende Platte dienen soll, die Abstandsänderung des zum Schweben zu bringenden Magneten an. Durch das Anlegen einer Wechselspannung²⁶ an die obere Platte, wird nun wie bereits beschrieben ein sich änderndes B-Feld erzeugt, welches in die untere eine Spannung induziert. Diese vom Abstand abhängige induzierte Spannung der unteren Platte wird nun aber direkt gemessen; im Gegensatz zur Regelung des Transrapid, die wie beschrieben die Spannungsänderung des erzeugenden Stroms misst. Diese Änderung wird nämlich von dem Effekt den die induzierte Platte, nach der Lenzschen Regel rückwirkend auf die verursachende Spannung hat, bewirkt.

Dies dient im Versuch nur zur Vereinfachung und funktioniert, da sich der Magnet nicht bewegt. Ein solcher Aufbau würde bei einer Schwebbahn entweder Schleifkontakte benötigen, um die in die Schiene induzierten Spannungen zu messen, oder wäre auf eine Reihe von speziellen induzierenden Spulen in der Schiene angewiesen, was recht aufwendig und teuer wäre. Trotzdem sind es im Grunde die gleichen Funktionsweisen. Die des Experimentes ist nur etwas einfach, weil man die induzierte Spannung direkt misst. Gleich bleibt, dass ein Verhältnis von Abstand und Spannung hergestellt wird.

Mithilfe eines computergestützten Auswertungssystems mit Relaisschaltung kann man nun das Relais so programmieren, dass es, wenn die Spannung zu klein ergo der Abstand zu groß den Strom ein-, und wenn die Spannung zu groß, ergo der Abstand zu klein den Strom ausschaltet.

Im Versuch, muss nun bei geschlossener Schaltung ein möglichst großer Strom durch die Spulen fließen, um ein starkes B-Feld zu erzeugen und den Magneten somit optimal anziehen zu können. Dann kann man sich einen Abstand d_{Soll} aussuchen, in dem der Magnet später ungefähr schweben soll, dadurch dass man dem Relais vorgibt das es bei mehr als der induzierten Spannung $U(d_{Soll})$ den Stromkreis öffnet. Es sei jedoch

²⁶ Im Versuch mit einem Sinusgenerator erzeugt, um eine optimale Frequenz zu finden.



darauf zu achten, dass an diesem Abstand d_{Soll} die magnetische Kraft durch die Spulen größer ist als die Gravitationskraft.

Von den Magneten angezogen verringert sich demnach der Abstand bis das Relais den Stromkreis bei $U(d) > U_{Soll}$ öffnet und keine magnetische Anziehung mehr vorhanden ist, sodass sich der Abstand wegen der Erdanziehung verkleinert und das Relais den Stromkreis bei $U(d) < U_{Soll}$ wieder schließt und alles von Neuem beginnt. Letztendlich pendelt sich der Abstand auf Grund von Dämpfungen wie Reibung bei d_{Soll} ein. Jedoch kann man mikroskopisch betrachtet von einem schwingenden Schwebezustand sprechen.²⁷

Trotzdem sich die Abstandsänderung δd im Versuch auch praktisch als sehr präzise herausstellte, kam es leider nicht zum Schweben des Magneten.

4.3 Versuchsauswertung und Fehleranalyse

Damit der Magnet stabil unter den Spulen schweben kann, ist ein ständiges Ein- und Ausschalten des Relais notwendig. Dabei muss es jedoch in so kurzer Zeit t reagieren, dass die Strecke, die der Magnet fällt

$s = \frac{1}{2} g * t^2$ und dem Sollabstand d_{Soll} also $s \frac{1}{2} g * t^2 + d_{Soll}$ dabei nicht größer

wird als der Bereich, in dem die magnetische Kraft noch in der Lage ist den Magneten wieder anzuziehen. Da das Relais sehr viel zu träge war und lediglich eine Frequenz, wie beim Experiment zu hören war, von einigen wenigen Hz bewies²⁸, war dieses Kriterium leider nicht erfüllt.²⁹

Was den Versuch zusätzlich am Gelingen hinderte war, dass es zwei Pole und zwei Spulen gab, deren Abstand nicht separat zu bestimmen war, da die Messung des Abstandes in der Mitte stattfand.

Somit kann es durch eine unvollkommene Ausbalancierung zu einem seitlichen Kippen kommen, welches eine Verkleinerung des Abstands auf der einen Seite zur Folge hat und eine Vergrößerung auf der anderen.

²⁷ Ein solches Schwebeverhalten hat der Transrapid nicht. Sein beschriebenes Regelungssystem kann, anders als ein Relais, verschiedenste Stromstärken stufenlos fließen lassen.

²⁸ Beim Transrapid etwa 100Hz

²⁹ Rechnerisch nachgeprüft im Anhang Seite 30



Dieses Ungleichgewicht kann durch das Ein- oder Ausschalten der Magnetfelder der Spulen nicht ausgeglichen werden, solange sie synchron reagieren. Dieses Problem stellte sich jedoch einerseits wegen der großen Gründlichkeit beim Messen der Waagerechten und der penibel symmetrischen Gewichtsverteilung als kleineres Problem als erwartet heraus. (- zumindest im Vergleich mit der Relaischaltung) Ein stabiler Schwebezustand über mehr als einige Sekunden wäre aber auch nicht bei einer genügend schnellen Schaltung möglich gewesen.

(Als anschauliche Vorstellung dieses schwingenden Schwebezustands sei der digitalen Version dieser Arbeit ein Video beigefügt, bei dem der Magnet sich nur in einem bestimmten durch Stangen abgegrenzten Abstand bewegen kann und somit am zu weiten Fallen gehindert wird. Wenn sich das auf dem Video gezeigte Auf und Ab um ein Vielfaches schneller und mit geringeren Amplituden vorstellt, wird erkennbar, dass eine Magnetschwebbahn durchaus nach diesem System funktionieren kann.)

.....Anhang.....



Vergleich der Schwebeprinzipien

Der Vollständigkeit wegen soll im Anhang schließlich, nach den vorausgegangenen Erklärungen der physikalischen Funktionsweisen, nun noch knapp auf wirtschaftliche Aspekte eingegangen werden.

So soll z.B. das PMS System mit anderen verglichen werden und dessen Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

Wenn die Vorteile des PMS in Kapitel 1.1 abschmetternd gering schienen, trifft dies in keinsten Weise auf die Realität zu. Dieses System, in der M-Bahn genutzt, war nämlich das erste und bis heute in Deutschland einzige über Probezwecke hinausgehende Schwebeprinzip. (Auch wenn die Zeit in der die M-Bahn fahrplanmäßig Personen beförderte vom 18.07.1991^[10] nur 13 Tage dauerte, da die S-Bahn Trassen, die zwischen Ost- und Westberlin verliefen und bereits seit 16.06.1983 als Teststrecken genutzt wurden, nach der Wende wieder benötigt wurden und ein allgemeiner Umbau zum M-Bahn System zu teuer gewesen wäre.)



[11]

Andererseits schwebte sie nicht wirklich. Im Fahrgestell der Bahn montierte abstoßende Dauermagneten übertrugen etwa 85% des Fahrzeuggewichts. Das übrige Gewicht wurde von Rollen getragen, die auch für die Spurführung verantwortlich waren. Sie so konnte zwar keine sehr hohen Geschwindigkeiten erreichen, aber das sollte sie auch nicht. Die M-Bahn war als Nahverkehrsmittel geplant und eingesetzt worden. Angetrieben wurde sie von einem Langstator. Ausschließlich für die Reaktion mit dem Langstator bestimmte Dauermagneten wurden dabei an die Antriebswicklungen der Schiene angezogen und im magnetischen Wanderfeld mitgezogen.

In Deutschland wurde die M-Bahn nach ihrer Demontage nirgendwo wieder eingesetzt und auch in anderen Ländern wurde und wird dieses Prinzip nicht weiterverfolgt. Die Idee, Vorteile aus der Magnetschwebetechnik zu nutzen und mit konventionellen Systemen zu



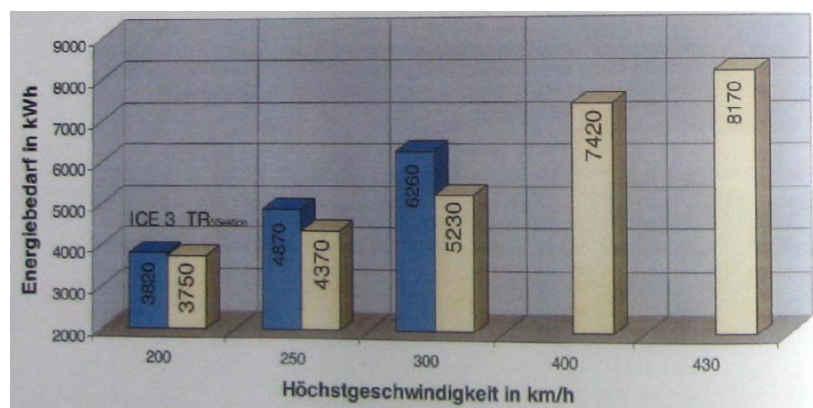
Schwebetechnik der Magnetschwebebahn (Anhang)

kombinieren wird oft wieder aufgegriffen. So auch bei neuen ICE Studien, oder einer Paderborner Studie. Der große Vorteil einer solchen Technik wäre es, dass man die bestehenden Schienennetze weiternutzen könnte, ein Nachteil, dass die Reibungskräfte nicht völlig vermieden werden können. Die Studie sieht nämlich nur eine Installation eines Kurzstatorantriebes im Fahrgestell vor um die Reibung lediglich auf die Achsen zu beschränken und so den Strom effektiver als ein Drehmotor für den Antrieb zu verwenden. Die Schiene müsste lediglich um eine etwas breitere dritte Schiene in der Mitte ergänzt werden. Einen konventionellen Motor bräuchte eine solche Bahn nicht.

Jedoch arbeiten all diese Systeme nicht völlig kontaktlos im Gegensatz zu dem des Transrapids.

Das national wie international sehr bekannte Modell des EMS ist der in Deutschland entwickelte und zum Personentransport zugelassene Transrapid in seiner vorläufigen Endversion 08. Das EMS System ist wie bereits erklärt das seit 1977 einzige in Deutschland verfolgte Prinzip für Hochgeschwindigkeitszüge, vielleicht ist er deshalb in seiner Produktionsreife weltweit ein Vorbild. Die einmaligen Kosten für z.B. das Schienennetz und den Zug selbst sind dabei wesentlich geringer als man annimmt. Der Unterhalt ist durch fast völlige Verschleißlosigkeit und den auf den Luftwiderstand reduzierten Verlustwiderstand sogar günstiger.

Das zeigt dieses Diagramm bei dem der Energieverbrauch für den ICE (blau) und für den Transrapid (hellbraun) bei der Geschwindigkeit x aufgetragen ist.



[3]

Auch ökologisch ist der Transrapid dem konventionellen Schienenverkehr weit voraus, so werden pro Meter Strecke für ICE 14 m² Fläche benötigt, für den Transrapid dagegen 12 m² bei einer aufgeständerten Trasse sogar



nur 2 m². Trotz vieler Vorteile wird es aber wahrscheinlich nicht all zu bald dazu kommen, dass der Transrapid das Bahnsystem erneuert. Dafür sind die einmaligen Kosten zu hoch. Jedoch kommt der Transrapid beim völligen Neubau von Trassen³⁰ durchaus in Frage, da der Neubau einer konventionellen ICE Trasse preislich etwa vergleichbar ist.

Die größte Konkurrenz für den Transrapid wäre in einem solchen Fall der japanische „Maglev“^[8] auch „Linear Motor Car“ genannt. Er nutzt den elektrodynamischen Effekt. Das B-Feld wird dabei von supraleitenden Spulen erzeugt, die ein äußerst starkes Magnetfeld und folglich wie in der vorangegangenen Arbeit beschrieben eine große abstoßende Kraft erzeugen. Supraleiter sind zwar eine enorme Stromersparnis, da sie nur einmal erregt zu werden brauchen und danach die Ströme in ihr verlustfrei weiterfließen. Jedoch ist diese Energieersparnis wesentlich geringer als die aufzubringende Energie, die nötig ist, um die verwendeten Hochtemperatur Supraleiter mit Hilfe von flüssigem Helium auf nur wenige Kelvin abzukühlen. Da die Antriebsspulen ebenfalls gekühlt werden und supraleitend sind, ist darin ein sehr hoher Stromfluss möglich, der Geschwindigkeiten >500km/h ermöglicht.

Der Maglev bewegt sich allerdings nicht völlig kontaktfrei. Bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 100km/h muss er auf „Stützrädern“ fahren, da die elektrodynamische Abstoßung nicht groß genug ist. Außerdem wird der Strom an Bord über Schleißkontakte von der Schiene abgegriffen. Trotz allem stellt das EDS das einzig praktikable System für Japan dar, da ein großer Schwebespalt von etwa 50-100mm und damit eine große Erdbebenresistenz, die in Japan verlangt wird, nur bei diesem System gegeben ist.

³⁰ Darunter ist der Neubau einer Bahntrasse und deren Stromversorgung ohne jede Möglichkeit zur Bündelung mit bestehenden Infrastrukturen zu verstehen.



6. Zusätzliche Erklärungen und graphische Verdeutlichungen

Die nun folgenden Tabellen, Diagramme und Erklärungen sollen die vorausgegangene Arbeit ergänzen.

Sie sind dabei nicht unbedingt notwendig, aber gerade das Nachrechnen verschiedener Zusammenhänge, vertieft meiner Meinung nach das Verständnis sehr. Der digitalen Version dieser Arbeit liegen verschiedene Animationen, Funktionen, Bilder interaktive Tabellen, sowie die dazugehörigen Programme bei; besonders interessant für Kapitel 3.5: „Theoretischer Beschreibungsansatz“. Dieses folgt im Anhang, da es als eine Art Ergänzung der „regressiven Bestimmung der Funktion“ zu sehen ist, an dessen Ende der Ansatz des sich auch Terms befindet. Die genaue Herleitung jedoch folgt auf Seite 31. Auch weil sich der Anforderungsbereich dieses Kapitels von dem Anforderungsbereich der Anderen unterscheidet, soll dieser Teil ein wenig abgetrennt von ihnen stehen.

Den folgenden verschiedenen Ergänzungen gehen jeweils die Nummern der Kapitel voran, die sie ergänzen.



III

Das angegebene Kräfteverhältnis vom elektrischen und magnetischen Feld errechnet sich wie folgt;

Für die Energiedichte in den Feldern gilt:

$$\omega_{el} = \frac{1}{2} * \epsilon_0 * E^2 \quad \text{und} \quad \omega_{mag} = \frac{1}{2} * \mu_0 * H^2$$

Eingesetzt mit den maximalen Feldstärken $H = 1,5 * 10^6 \frac{A}{m}$ und $E = 10^6 \frac{V}{m} \rightarrow$

$$\text{ergibt sich } \omega_{mag} = \frac{1}{2} * \mu_0 * \left(1,5 * 10^6 \frac{A}{m}\right)^2 = 1,41 * 10^6 \frac{A * V * s}{m^3} = 1,41 * 10^6 \frac{W}{m^3}$$

$$\text{und } \omega_{el} = \frac{1}{2} * \epsilon_0 * \left(10^6 \frac{V}{m}\right)^2 = 4,4 \frac{A * V * s}{m^3} = 4,4 \frac{W}{m^3}.$$

Da man die Energie im Raum auch als Druck, also flächenbezogene Kraft,

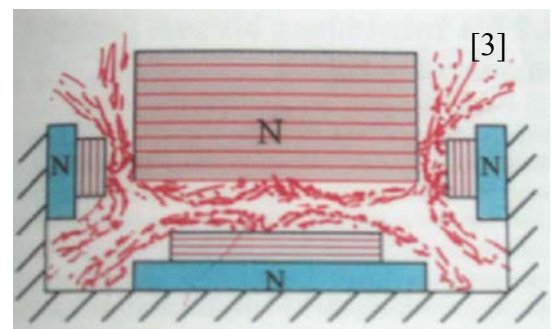
verstehen kann gilt nach: $\omega = \frac{W}{m^3} = \frac{N * \cancel{m}}{m^3} = Pa$. Übt das magnetische Feld

eine Kraft von $1,41 * 10^6$ und das elektrische eine Kraft von $4,4 N$ pro Quadratmeter aus, sodass sich ein Kräfteverhältnis von

$$\frac{F_{mag}}{F_{el}} = \frac{1,41 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{4,4 \frac{N}{m^2}} = 319333 : 1 \text{ ergibt.}$$

2.1

Auf diesem sieht man die Feldlinien die zwischen Abstoßenden Magnetfeldern entstehen einmal speziell für eine Art Magnetische Führungswanne, wie sie für ein PMS nötig wäre und beim EDS tatsächlich eingesetzt wird

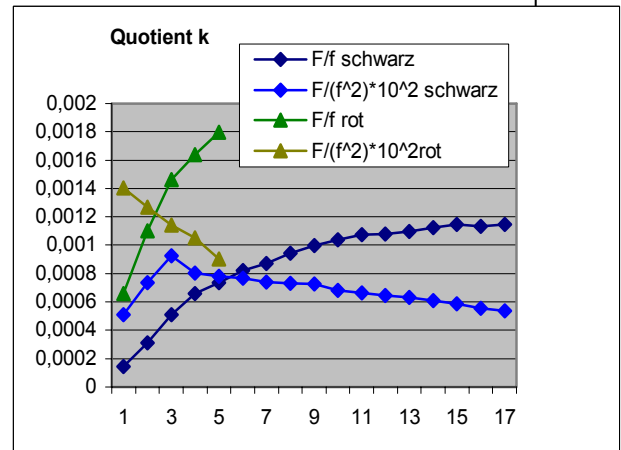




3.1

Hier sieht man die bereits vorgestellten Messdaten noch einmal tabellarisch zusammengefasst. Spalte eins und zwei bzw. **fünf** und **sechs** stellen die aufgenommenen Messwerte dar. Die Spalten drei und vier bzw. **sieben** und **acht** zeigen den Versuch mit Hilfe von Excel eine Konstante für $k = \frac{y}{x}$ und $k = \frac{y}{x^2}$ zu finden die sich, wenn es sich um eine lineare oder quadratische Funktion handeln würde, einstellen müsste. Die resultierenden Werte für k sind zusätzlich im Diagramm in den jeweiligen Farben zusammengefasst.

v	f	F	F/f	$F/(f^2) \cdot 10^2$	f	F	F/f	$F/(f^2) \cdot 10^2$
	0		0undef	undef		0	0undef	undef
	28	0,004	0,000142857	0,000510204		47	0,031	0,00065957
	42	0,013	0,000309524	0,000736961		87	0,096	0,00110345
	55	0,025	0,000709091	0,001289256		128	0,187	0,00146094
	82	0,054	0,000658537	0,000803093		156	0,256	0,00164103
	94	0,068	0,000723404	0,000769579		199	0,358	0,00179899
	107	0,088	0,00082243	0,000768626				
	118	0,103	0,000872881	0,00073973				
	129	0,122	0,000945736	0,000733129				
	138	0,138	0,001	0,000724638				
	152	0,158	0,001039474	0,000683864				
	162	0,174	0,001074074	0,000663009				
	167	0,18	0,001077844	0,000645416				
	174	0,191	0,001097701	0,000630863				
	184	0,207	0,001125	0,000611413				
	195	0,224	0,001148718	0,000589086				
	204	0,231	0,001132353	0,000555075				
	213	0,244	0,00114554	0,000537812				



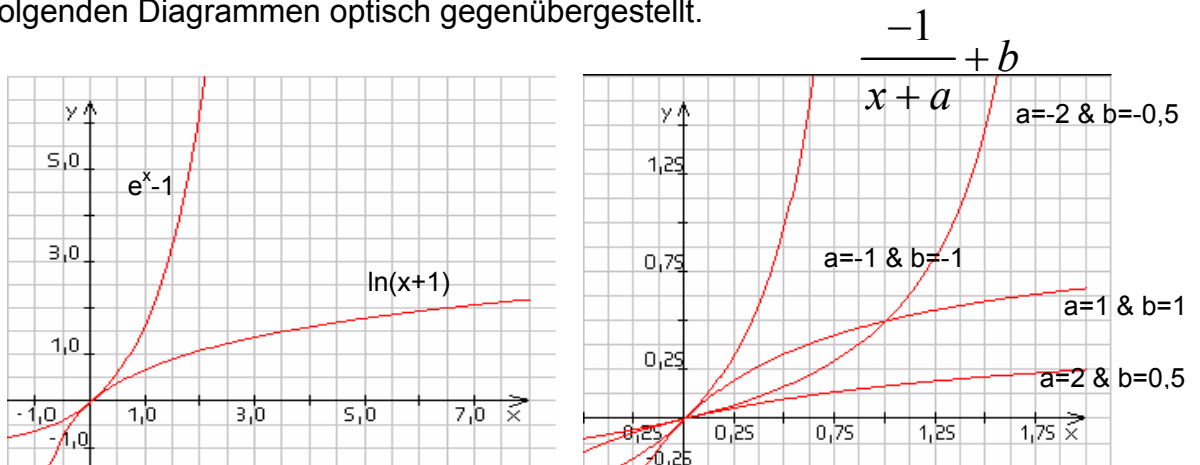


3.4

In dieser Tabelle ist die Steigung zu D2 aufgezeigt. Für das Diagramm sind bei der roten Messreihe alle Daten genommen worden, da der Abstand bereits optimal war. Bei der schwarzen wurde selektiv jeder Punkt mit vergleichbarem Abstand gewählt, etwa 50 Hz. Diese Punkte sind mit einem D gekennzeichnet.

f	F		f	F	Steigung
0	0		0	0	
28	0,004	D	47	0,031	0,00065957
42	0,013		87	0,096	0,001625
55	0,025		128	0,187	0,00221951
68	0,039	D	156	0,256	0,00246429
82	0,054		199	0,358	0,00237209
94	0,068				
107	0,088	D			
118	0,103				
129	0,122				
138	0,138				
152	0,158				
162	0,174	D			
167	0,18				
174	0,191				
184	0,207				
195	0,224				
204	0,231				
213	0,244	D			

Zur Veranschaulichung sollen nun einige der besprochenen Funktionen graphisch dargestellt werden. Um den Gedankenvergleich exponentieller und Logarithmischer Funktionen mit den zwei Ästen einer Hyperbel zu vereinfachen, werden sie mit Hilfe von „Funktion 6.3“ in den zwei folgenden Diagrammen optisch gegenübergestellt.



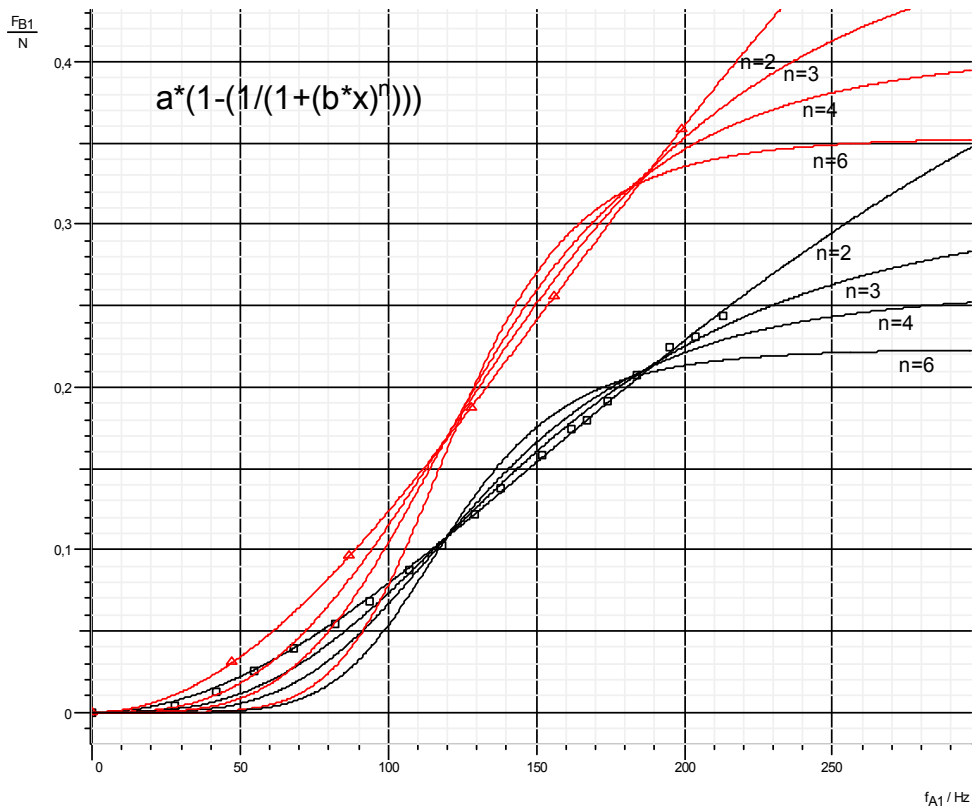


Die zusätzlichen Parameter a & b in den Funktionen sind deshalb erforderlich, damit der Graph durch den Koordinatenursprung verläuft. Es muss für die gesuchte Funktion gelten: $F(0) = 0$. Der Punkt im Ursprung ist hier nämlich als sicherer Wert zu sehen ist. Ohne Bewegung kann sich das Magnetfeld im Leiter nämlich nicht ändern, sodass auch keine Wirbelströme fließen können. So kann schließlich auch kein gleichartiges Magnetfeld B^{ind} entstehen, welches das verursachende Magnetfeld B abstößt.

3.4

Um zu zeigen, dass $g(x) = x^2$ sein muss werden im Folgenden weitere Funktion untersucht für die gilt: $g(0) = 0 \wedge g(\infty) = \infty$.

So z.B.:



Man sieht deutlich, dass die Funktionen immer „bauchiger“ werden, je höher ihr Grad ist. Nur $g(x) = x^2$ schmiegt sich optimal an die Messreihe an. Dies schließt alle Potenzfunktionen höheren Grades und damit auch die Exponentialfunktion aus.



4.1.

Bei näherer Betrachtung dieser Theorie fällt auf, dass die induzierte Spannung nicht nur vom Abstand abhängig sein kann. Für die magnetische Feldstärke gilt nämlich nach:

$${}_{[12]}H = \Theta * l \wedge_{[12]} \quad \Theta = \Phi * \frac{l}{\mu_r * A} \wedge_{[12]} \quad \Phi = B * A$$
$$\Rightarrow H = B * \frac{l^2}{\mu_r * A}$$

Man sieht: Die Feldstärke hängt auch von μ_r , einer Konstanten für das Medium, in dem das B-Feld wirkt, ab. Was also, wenn sich etwas anderes als Luft, auf die die Sollwerte geeicht sind, in dem Messspalt befindet? Weicht dann nicht die gemessene Spannung trotz richtigen Abstands von den Sollwerten ab?

Der Schwebespalt, in dem das Magnetfeld wirkt, befindet sich unter der Schiene und ist ca. 10mm groß. Es ist also zunächst einmal äußerst unwahrscheinlich, dass sich irgendetwas darin befinden kann, nachdem die vorausgehende Druckwelle eines 400km/h Zuges darüber hinweggeschoben wurde. Es könnte aber auch sein, dass sich durch Regen viel Wasser unter der Schiene gesammelt hat. All dies ist jedoch unerheblich, da die Permittivitätszahl μ_r von allen nicht ferromagnetischen Stoffen, sehr nah an der von Luft liegt. Selbst wenn der Messspalt ganz mit Wasser gefüllt wäre ergäbe sich mit $\mu_r \mu_{Wasser} = 0,999991$. Im Gegensatz zu Luft $\mu_r = 1,00000037$ stellt sich lediglich ein Unterschied von $<0,000094\%$ ein, der offensichtlich sehr zu vernachlässigen ist. Da alle anderen organischen Stoffe zum Grossteil aus Wasser bestehen, ist es für die Abstandsmessung nicht weiter gravierend wenn sich kleine Tiere, Moos oder andere Pflanzen im Messspalt befinden.



4.3

Zur quantitativen Fehleranalyse der Arbeit soll im Anhang einmal qualitativ nachgerechnet werden warum das Relais zu langsam war.

Der Schwebezustand stellte sich, wie erklärt deshalb nicht ein, weil der Magnet in der Reaktionszeit des Relais aus dem effektiven Wirkungsbereichs des B-Felds gefallen ist. Bei den im Versuch gegebenen Werten:

$d_{Soll} = 1cm$, dem maximalen Abstand $d_{max} = 5cm$ indem die magnetische Kraft > Gravitationskraft, der Frequenz großzügig geschätzt $\approx 10Hz \rightarrow$ Reaktionszeit von $\frac{1}{10}s$ und $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich für den Abstand nach:

$$d = d_{Soll} + s \frac{1}{2} g * t^2 \Rightarrow d = 1cm + 9,81 \frac{m}{s^2} * \frac{1}{10^2} s^2 = 10,81cm$$

Dieser Abstand ist mehr als doppelt so groß, wie der, in dem der Magnet noch gehalten werden kann.

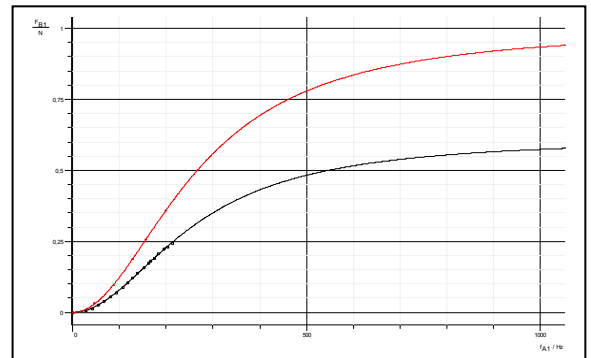
Ein stabiler Schwebezustand mit dem Abstand nach dem Fallen $d = d_{max}$ würde sich erst bei mindestens 17Hz einstellen. Jedoch ist zu beachten, dass jeder Körper in Bewegung eine Trägheit besitzt. D.h. selbst wenn das Relais den Stromkreis bereits geschlossen hat und der fallende Magnet noch im Bereich ist in dem die magnetische Kraft > der Gravitationskraft kann sich der Orientierungswechsel von v auf Grund der Trägheit der Masse nur langsam vollziehen, sodass es sein kann, dass in einem solchen Fall der Magnet trotzdem nicht wieder angezogen werden kann. Um dies zu vermeiden ist etwa eine Frequenz von mindestens 25Hz nötig.

3.5 Theoretischer Beschreibungsansatz

In Kapitel 3 wird die Entstehung der Wirbelströme und ihre Wirkung aufgezeigt. Anhand dieses Kapitels lässt sich aber auch die Funktion begründen, ja sogar voraussehen.

Z.z.: Wie kommt es zu einem Grenzwert für die resultierende Kraft F und wie hängt dieser mit der Geschwindigkeit v zusammen?

Um diese komplexe Aufgabe lösen zu können, sollen zunächst verschiedene Anschauungen herbeigezogen werden.

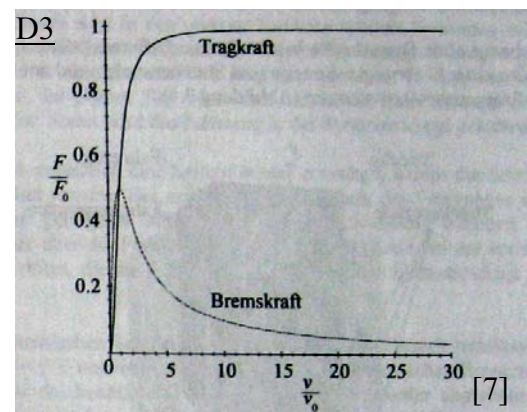


Grundlegend sind dabei die Erkenntnisse aus dem Experiment und dessen Auswertung in Kapitel 3.3.

Die steigende abstoßende Kraft ist nur dadurch zu erklären, dass sich das verursachende B-Feld dem in \vec{v} Richtung vorderem B^{ind}_1 (Siehe B1, Seite 4) annähert. Die bei höherem v auch höhere induzierte Spannung $U_{ind} = n * B * l * v$ allein erklärt dies nicht, da durch sie U^{ind}_1 und U^{ind}_2 gleichermaßen verstärkt werden, und sich demnach auch ihre abstoßende und anziehende Wirkung kompensieren müsste. Dies ist auch der Grund warum sich das Zentrum von B^{ind}_1 verlagern muss. B^{ind}_1 ist nämlich wegen seiner entgegen gesetzten Polung die einzige Kraft, die in der Lage ist, das verursachende B-Feld abzustößen.

Dieser Theorie nach, müsste sich B^{ind}_2 dann bei steigendem v von B entfernen. Das dies so ist, wurde zwar nicht im Experiment untersucht, ist jedoch in D3 zu erkennen:

Dies wird auch aus der Veranschaulichung vom Verlauf der Wirbelstrombahnen deutlich, dafür wird im Folgenden zunächst nur der abstoßende Wirbelstromkreis beschrieben. Wenn das Elektron

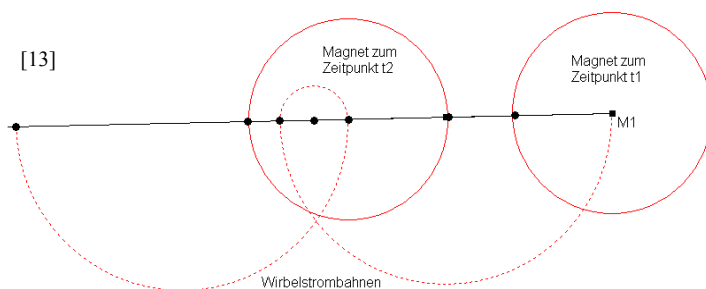




nämlich bei der völligen Beschreitung dieser Wirbelstrombahn die Zeit t benötigt, hat sich der Magnet bereits fortbewegt, und zwar in der selben Zeit t um $s = v \cdot t$. Da nun wie in Kapitel 3 gezeigt durch die Ladungstrennung durch F_U ein Elektronenüberschuss im oberen Bereich des B-Feldes entsteht, werden die Elektronen in den Außenbereich gezwungen. Da sie dabei einerseits wegen des Elektronenüberschusses verdrängt und andererseits wegen des Elektronenmangels auf der gegenüberliegenden Seite von F_U angezogen werden, führen sie eine Art kreisförmige Bewegung aus. Da eine gewisse Breite im Leiter für F_U existiert, die die Elektronen zunächst parallel durchfließen, wenden die Wirbelströme von dem Ort des Elektronenüberschusses mit verschiedenen Radien zum gegenüberliegenden Pol. Man kann sich vorstellen, dass die Wirbelströme wie Feldlinien aus einem Magneten austreten.

Da sich die Elektronen, in Richtung des anderen Pols fließen um 180° wenden, müssen sie auch vor dem Magneten vorbeifließen, weil sich in dem gesamten B-Feld schließlich Potentiale befinden. In diesem Bereich werden sie von der positiver Ladung angezogen.

Wenn die Elektronen nun aber wieder in das B-Feld einkehren wollen, greift die Kraft F_U , die die Ladungstrennung bewirkt und versucht sie



erneut um 180° zu drehen.

Dieses Einkehren der Elektronen kann man sich wiederum wie das Einkehren der Feldlinien in einen Dauermagneten

vorstellen. Dabei kehren sie jedoch mit kleinerem Radius wieder in das B-Feld ein, da sich der Magnet auf sie zu bewegt. Die selben Richtungsänderungen der aus- und einkehrenden Elektronen, sprechen dafür, dass es sich bei dem Elektronenfluss um den selben handelt. Dies muss außerdem auch deshalb so sein, da sich sonst zwei Potentiale bilden würden, die nebeneinander, etwa in der Mitte vor dem B-Feld bestünden. Diese Kriterien gesammelt, lässt sich nun zusammenfassen:



Schwebetechnik der Magnetschwebbahn (Anhang)

Die Strecke der Elektronen lässt sich demnach als zwei Halbkreise beschreiben³¹. Der erste sei ganz allgemein $\pi * r$ mit irgendeinem Radius r , der zweite ist $\pi * \frac{1}{2}(2r - s_{Vsch})$, da das Elektron nur noch die Differenz aus dem Durchmesser des ersten Halbkreises und der Strecke s_{Vsch} , die das Magnetfeld in selber Zeit zurückgelegt hat, überwinden muss. $\frac{1}{2}$ deswegen, weil der Radius in der Mitte des Durchmessers steht. Nun kann man über den Ansatz, dass die Zeit jeweils für die Strecke der Elektronen s_{el} und des Magnetfeldes s_{Vsch} gleich sein muss argumentieren, sodass man nach $t = \frac{s_{el}}{v_{el}} = \frac{s_{Vsch}}{v_{mag}}$ einsetzen kann:

$$\frac{\pi r + \pi \left(r - \frac{1}{2} s_{Vsch} \right)}{v_{el}} = \frac{s_{Vsch}}{v_{mag}}$$

unabhängig von t erhält man: $\Leftrightarrow s_{Vsch} = \frac{4\pi r_{el} * v_{mag}}{2v_{el} + \pi * v_{mag}}$ oder umgeformt:

$$\begin{aligned} s(v_{mag}) &= 4\pi r_{el} * \left(\frac{v_{mag}}{2v_{el} + \pi * v_{mag}} \right) = 4\pi r_{el} * \left(\frac{1}{\pi} - \frac{2v_{el}}{\pi * (2v_{el} + \pi * v_{mag})} \right) = 4r_{el} - \frac{8r * v_{el}}{2v_{el} + \pi * v_{mag}} \\ &= 4r_{el} * \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2v_{el}} \pi * v_{mag}} \right) \end{aligned}$$

Man sieht nun, dass es sich um einen grenzwertigen Term handelt. Er gibt die Strecke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit an, um die sich das B-Feld verschiebt, während ein Elektron seine Wirbelstrombahn beschreitet. Die Verschiebung der B-Felder d ist dabei durch den Radius des zweiten Halbkreises gegeben. r ist der Radius, der sozusagen eine bestimmte Wirbelstrombahn beschreibt. Da es hiervon wie auch bei Feldlinien unendlich viele gibt, die logischerweise auch die Strecke in $\overline{v_{mag}}$

³¹ Die Bahn ist eher als elliptisch anzusehen, was nichts an der Verschiebung ändert, jedoch die Streckenlänge selbiger. → Die Konstante aus einer Kreisberechnung darf also später nicht genau genommen werden.



Richtung unterschiedlich schneiden und somit auch unterschiedliche Werte für d zulassen, ist r als eine Art Scharparameter zu sehen. Das ändert jedoch nichts an der Verschiebung d , der Differenz aus der zurückgelegten Strecke und $2r$ (dem Durchmesser). Sodass gilt:

$d = (2r - s_{Vsch})$ wie schon bei der Streckenberechnung der Wirbelströme abhängig von der Strecke s_{Vsch} , die man nun einsetzen kann und erhält:

$$d = 2r - 4r_{el} * \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2v_{el}} \pi * v_{mag}} \right), \text{ was durch } 2r - 4r_{el} \text{ auf den ersten Blick}$$

suspekt erscheinen mag, da der Grenzwert dieser Funktion im Negativen liegt, obwohl er eine Strecke beschreiben soll. erinnert man sich nun aber an die Näherung zurück, die sich für die Strecke der Wirbelstrombahn vereinfacht als $2 * \pi * r$ ergab, ist dies durchaus dadurch zu erklären, dass³² es sich in der Tat um eine elliptische Elektronenbahn handeln muss. In einer Ellipse ist Verhältnis von Durchmesser zu Radius $\frac{2r}{x * 2\pi r}$

nämlich günstiger. So wäre in diesem Fall eine Ellipse mit „Streckungsfaktor“ für $\pi = \frac{1}{2}$, was einem Senkrecht zu $\overline{v_{mag}}$ „zusammengedrückten“ Kreis oder in diesem Fall zwei Halbkreise beschreiben würde. Es kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass der „Streckungsfaktor“ von π noch niedriger liegt. Dies würde aber letztlich nur bedeuten, dass der Grenzwert für die Annäherung nicht genau bei $d = 0$ liegt. Aber dies muss auch nicht so sein. Man weiß lediglich, dass ein Grenzwert existiert. Man muss aber den „Streckungsfaktor“ einschränken, da bei $x < \frac{1}{\pi}$ weder ein Kreis noch eine Ellipse zustande käme.

Es lässt sich nun mit zulässigen Werten für $\frac{1}{\pi} \leq x \leq \frac{1}{2}$ weiterrechnen.

³² Siehe auch vorherige Einschränkung in Fußnote 31



Schwebetechnik der Magnetschwebebahn (Anhang)

Jedoch stößt die physikalische Anschauung nun an ihre algebraischen Grenzen, die zu überwinden, zumindest ich nicht in der Lage bin. Wenn man nun nämlich v_{el} nicht als konstant, sondern als von der induzierten Spannung und damit auch von v_{mag} , die dem Elektron eine Driftgeschwindigkeit auf den Weg gibt, für abhängig befindet, kürzt sich zunächst die Geschwindigkeit v_{mag} heraus:

Die Elektronendriftgeschwindigkeit ist definiert als: $v_{el} = \frac{I}{n \cdot e \cdot A}$ ³³

Da aber nur die induzierte Spannung für die Geschwindigkeit v_{mag} bekannt ist, gilt nach dem Vorwissen:

$$I = \frac{U_{ind}}{R} \wedge U_{ind} = B \cdot l \cdot v_{mag} \rightarrow v_{el} = \frac{B \cdot l \cdot v_{mag}}{n \cdot e \cdot A \cdot R}$$

Der Widerstand, stellt dabei das Problem dar. Er ist nach $R = \frac{\delta \cdot s_{el}}{A^2}$ ³⁴ auch

von der Länge der Strecke abhängig. Wenn sich der Term nun wie folgt in die Gleichung für d einsetzt ergibt sich demnach:

$$d = 2r - 4r_{el} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{n \cdot e \cdot A \cdot \delta \cdot s_{Vsch} \cdot \pi \cdot v_{mag}}{B \cdot l \cdot v_{mag} \cdot A^2}} \right)$$

und v kürzt sich wie erwartet heraus. Es erscheint jedoch eine andere von v abhängige Größe s_{Vsch} .

Von diesem Zeitpunkt an war es mir nicht mehr möglich weiter zu rechnen. s_{Vsch} in die Gleichung eingesetzt, würde zwar wieder die Abhängigkeit von v_{mag} verdeutlichen, letztendlich aber nur dazu führen die bereits schon recht unschöne Formel weiter zu verkomplizieren und ständig s_{Vsch} in R und R in s_{Vsch} einsetzend, sinnlos im „Kreis zu rechnen“.

³³ n ist die Zahl der freien Ladungsträger im Leiter, e die Ladung eines Elektrons und A der Leiterquerschnitt

³⁴ δ ist der spezifische Widerstand für ein bestimmtes Material



Ausgehend von dem Term $d = 2r - 4r_{el} * \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2v_{el}} \pi * v_{mag}} \right)$ könnte sich,

nur abhängig von v_{mag} und v_{el} , am Besten auf einen Grenzwert schließen lassen.

Dies ist jedoch nur dann unter der gravierenden Näherung, dass v_{el} konstant ist, zulässig. Was für die sehr kleine Elektronendriftgeschwindigkeit nicht unbedingt völlig falsch sein müsste. Es soll jedoch an dieser Stelle die Rechnung abgebrochen werden, da nach dem Scheitern meiner Algebra ein „errätseln“ des Terms nicht Sinn dieser Arbeit wäre.

Es sei jedoch festzuhalten, dass die resultierende Kraft aus dem sich annähernden Abstand d , nach $F \sim \frac{1}{d^2}$ für das quadratische Eingehen von v_{mag} verantwortlich sein muss und mit dem errechneten Term auch durchaus sein kann. Selbst der kritische Punkt der Elektronengeschwindigkeit ist nicht vollends zu widerlegen. In der gegebenen Formel ist nämlich neben schlicht v , hier genannt v_{mag} , die Rede von einem weiteren v_0 , dessen Entstehung jedoch nicht näher erklärt wird. Dieses v_0 ist wie v_{el} von vom spezifischen Widerstand und der Stärke der Reaktionsschiene abhängig. Anders als v_{el} ist es aber konstant. Dass dies jedoch eine Näherung sein sollte, wird nicht gesagt. Die aber Tatsache, dass es sich um die selben Konstanten handelt unterstützt den erarbeiteten funktionalen Zusammenhang in seinen Ansätzen.

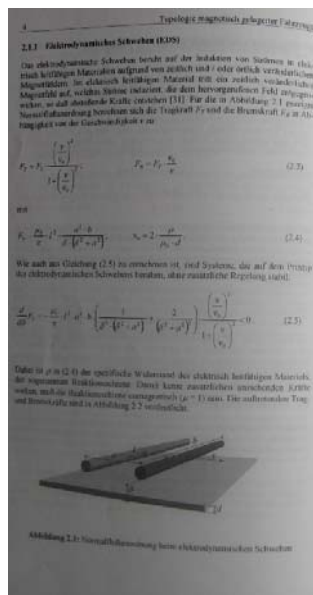
Es ist jedoch zu bedauern, dass die Rechnung nicht bis zum Ende durchgeführt werden konnte.



Literaturverzeichnis

- [1] Forschung und Innovation, Ausgabe 1/1998 Schwerpunkt: Electronic Commerce
- [2] <http://www.osnabrueck.de/erlebnis/33586.html> (02.03.2006)
- [3] Transrapid: Technik und Einsatz von Magnetschwebbahnen, Dr. Ing. Horst Götzke, Stuttgart
- [4] <http://www.szut.uni-bremen.de/bildungsgaenge/phyta/images5/em15.gif> (05.03.2006)
- [5] Eigene Fotografie bzw. Skizze (liegt digitaler Version bei)
- [6] <http://www.chemie.uni-bremen.de/stohrer/biograph/faraday.htm> (02.03.2006)
- [7] Magnetische Lagerung für ein autonomes Transportsystem mit normalbehafteten, Linearantrieb, Dipl. Ing. Ingolf Göring, Aachen

$$F(v) = F_0 * \frac{\left(\frac{v}{v_0} \right)^2}{1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2} \quad \text{Seite 4:}$$



(liegt digitaler
Version bei)

- [8] Information Herr Schubsky: Linearmaschinen.pdf (liegt digitaler Version bei)
- [9] <http://www.transrapid.de> (1.03.2006)
- [10] <http://user.cs.tu-berlin.de/~gozer/M-Bahn/> (22.03.2006)
- [11] <http://www.berliner-verkehrsseiten.de/m-bahn/> (22.03.2006)
- [12] Freundliche Leihgabe: Formelsammlung Dipl. Ing Karl Hein Herbers
- [13] Selbst erstellte Euklid Animation, (liegt digitaler Version bei)

Verwendete Grafikprogramme

- Cassy Lab1.54; written by Dr. Michael Hund & Dr. Karl-Heinz Wietzke for Leybold Didactic
- Microsoft Excel 2002 (10.2614.2625)
- Funktion 6.3
- Euklid DynaGeo 2.7 Test Version (Roland Mechling)
- MathType 5.2c Demo Version



Schlusswort

In der vorausgegangenen Arbeit habe ich versucht, das Thema so darzustellen, dass es mit Hilfe des Hintergrundwissens des vergangenen Semesters und Grundlagen der einfachen Physik, verstanden werden kann. Indem bei jedem der zwei Hauptaspekte der Arbeit ein Versuch aufgeführt ist, sollen die theoretischen Aspekte, besonders beim EDS veranschaulicht werden. Dies wissenschaftlich korrekt, prägnant und trotzdem leicht verständlich zu erklären, war eine Schwierigkeit, die sich jedoch auf Grund der recht großen Verbundenheit mit dem zur Zeit (Semester 12.1) behandelten Themen der Elektrodynamik als kleinerer Anforderungsbereich der Arbeit erwies. Gerade weil das Thema so eng mit dem Behandelten zusammenhing, war es mir müßig diese Facharbeit schlicht als Rekapitulation der recht zahlreichen Informationen im Internet zu gestalten. Die Versuche zeugen von den ersten Schritt in diese Richtung, da der Versuchsaufbau keiner Pauschalbeschreibung entstammt. Nun war der Versuchsaufbau zur Untersuchung des elektrodynamischen Schwebens letztendlich recht simpel, da die gegebenen Voraussetzungen, wie z.B. der hochsensible Kraftmesser oder das Cassy, für die ich mich beim Förderverein bedanken möchte, das Experiment enorm vereinfachten. Um den Aufbau jedoch zu optimieren, war es nicht nur von Nöten direkt den zu untersuchenden Zusammenhang zu überblicken, sondern es galt auch diesen durch kreatives Umgestalten zu fördern. Dies war besonders beim Versuchsaufbau des EMS gefragt. Dadurch, dass die Experimente recht früh in der Facharbeitszeit stattfanden, war es nicht möglich sich bereits vollends in das Thema einzuarbeiten, sodass eigenständig eine Methode des stabilen Schwebens erarbeitet werden musste. Dass der Versuch scheiterte, habe ich sehr bedauert, aber ich bin mir sicher, dass er funktionieren würde wenn man die zwei genannten Fehlerquellen durch doppelte Abstandsmessung und ein schnelleres Relais ausschließt. Dass der Transrapid nun auch auf diesem Prinzip aufbaut, wenn auch etwas komplizierter, ist eine Bestätigung.



Die Ergänzungen im Anhang wie z.B. die Analyse eines Stoffes im Messspalt, geben dabei eine innere Diskussion über die gefundenen Theorien wieder, „Kann die These stimmen?“. Bei diesem Beispiel stimmt sie, bei anderen ergab sich manchmal ein paradoxes Bild, welches zum Umdenken zwang. Diese Vorgehensweise ist zwar sehr langwierig, führt aber zu besserem Verständnis, was sich hoffentlich auch auf den Leser dieser Arbeit übertragen hat. Ein solches Vorgehen erklärt auch die wenigen Verweise. Ebenso ist die Regression ein Beispiel dafür. Dabei war vorher nichts so offensichtlich wie es im Nachhinein scheinen soll, wie z.B. dass die Kriterien einer passenden Regression vom Steigungsverhalten der Messwerte abhängt, welches man erst dann erhält, wenn man die Steigung zwischen ihnen mittelt.

Diese Steigungsbestimmung ähnelt dem Lösen einer Differenzialgleichung in gewisser, vereinfachter Hinsicht. Ohne von einer solchen Rechnung zu wissen, galt es aber einen eigenen Rechenweg zu finden, der sehr ähnlich auch ans „Ziel“ führte und letztendlich von einer bestehenden Formel, die als einziges Zitat anzusehen ist, bestätigt wurde.

Dies alles war zugegeben im Vergleich zum theoretischen Beschreibungsansatz, nicht unlösbar und bedurfte nur einen Teil des Zeit- und Energieeinsatzes. Aus den gegebenen Sachverhalten, wie steigende abstoßende Kraft und sinkende Anziehende, auf eine völlig neue Anschauung der Wirbelströme zu schließen, war etwas völlig anderes. Da dieser Sachverhalt einiges komplexer war, kann es jedoch sein, dass man sehr genau nachlesen muss. Jedoch lag mir auch bei diesem Kapitel viel daran, dass es vor dem gleichen Hintergrundwissen wie für die übrigen Kapitel zu verstehen ist. Triviale Umformungen mussten allerdings zu Gunsten einer einheitlichen geraden Linie manchmal übersprungen werden. Obwohl dieser Teil der Arbeit vermutlich etwa ebensoviel Zeit wie der Rest der Arbeit benötigte, habe ich mich letztendlich entschieden, ihn im Anhang einzufügen. Dies erstens, weil die Untersuchung wahrscheinlich über den Rahmen der Arbeit hinausgeht. Und zweitens, weil die Lösung, obgleich alle mühsame Theorie bereits zu einem Term führt, der auf eine grenzwertige Funktion gleich der zu zeigenden



schließen lässt und selbst in den Konstanten mit denen der bestehenden Formel recht gut übereinstimmt, von einem algebraischen Problem der Umformung, dessen zumindest ich nicht im Stande zu lösen bin, vereitelt wird und so leider unvollkommen ist.

Zum Gelingen dieser Arbeit, besonders des Kapitels 4 hat, womit ich meinen Dank ausdrücken und diese Arbeit schließen möchte, auch Herr Schubsky, Verantwortlicher für Öffentlicharbeit aber auch Ingenieur ,der Transrapid Versuchstrecke Emsland, nicht nur durch Informationsmaterial sondern, wie ebenfalls der Vorsitzende der IABG (ein Unternehmen, dass den Transrapid vermarktet und Ingenieure ausbildet) durch motivierende Worte, beigetragen. So war es mir möglich dieses Dokument nicht als Arbeit, sondern als Möglichkeit zu betrachten, mich über Sachverhalte, die mich bereits vorher interessiert haben, zu informieren.



„Versicherung“/Erklärung

1. Versicherung der selbstständigen Erarbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Verwendete Informationen aus dem Internet sind dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung gestellt worden.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

2. Einverständniserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift