

Institut Dr. Flad



Projektarbeit

**Diamagnetismus und Magnetismus –
wie bringt man Objekte zum Schweben?**

David Bock

- Lehrgang 70 -

Betreuung: René Dittus

Schuljahr 2020 / 21

Vorwort

Dieses Projekt entstand aus der Idee, magnetische Kraftfelder auf besondere Weise nutzbar zu machen. Genauer gesagt: ein ausgeglichenes Kräftesystem herzustellen, in dem man einen Magneten ohne Energieaufwand dauerhaft schweben lassen kann. Wieso sich der Magnetismus so hervorragend dafür eignet und wieso das praktische Ergebnis, nämlich die „diamagnetisch stabilisierte, magnetische Levitation“, letztendlich ein Wechselspiel aus mehreren verschiedenen Kräften ist, soll hier durch eine stufenweise Einführung in die Theorie erklärt werden. Auf diesem Wege werden experimentalphysikalische Erklärungsansätze zu Rate gezogen, sowie die allgemeinen Eigenschaften von Magnetfeldern und verschiedenen Wechselwirkungen mit Materie durch anschauliche Experimente verdeutlicht. Diese Veranschaulichungen und Überlegungen sind als eine Unterstützung zu betrachten für die leicht nachvollziehbare Heranführung an die Idee und das Ergebnis meiner praktischen Arbeit. Sie sollen einen fließenden Übergang in das Verständnis eines solchen faszinierenden Systems, in dem ein Magnet schwebt, erleichtern. An dieser Stelle möchte ich meinem Ansprechpartner, Herrn Dittus meinen persönlichen Dank aussprechen, der meine Arbeit betreut und begutachtet, sowie mit hilfreichen Anregungen und Lob unterstützt hat. Besonderer Dank geht an meinen Stiefvater, Robbin Sachs, der mich mit zur Verfügung gestellten Werkzeugen, die ich dringend für den praktischen Teil des Projektes benötigt habe, unterstützt hat. Um die theoretische Heranführung an das Thema interessanter und persönlicher zu gestalten, wurden alle Zeichnungen und Fotografien selbst von mir erstellt und nur die nötigsten theoretischen Informationen, zur Untermauerung theoretischer Inhalte, von anderen Quellen zu Rate gezogen.

Inhaltsverzeichnis

Summary	1
1 Einleitung	2
2 Experimentelle und theoretische Heranführung an die Thematik	2
2.1 Den Charakter Magnetfeldes mit eigenem Auge betrachten.....	2
2.1.1 Experimentelle Einführung.....	2
2.1.2 Interpretation und Vergleich der jeweiligen Ergebnisse.....	9
2.2 Einführung Elektromagnetismus.....	10
Elektrische Leiter und ihre Magnetfelder.....	10
2.3 Magnetismus der Materie.....	11
2.3.1 Paramagnetische Materialien.....	11
2.3.2 Ferromagnetische Materialien.....	12
2.3.3 Diamagnetische Materialien.....	12
2.4 Verschiedene Kräftesysteme und Überlegung ihrer Funktionsweise.....	13
2.4.1 Diamagnetische Levitation eines Graphitplättchens.....	14
2.4.2 Diamagnetisch stabilisierte magnetische Levitation.....	17
2.4.3 Demonstration von Abschirmungseffekten mit der gebauten Anlage.....	18
3 Dokumentation Praktischer Teil	20
3.1 Herstellung der Bismutplatten.....	20
3.1.1 Erster Gießversuch.....	20
3.1.2 Zweiter Gießversuch.....	21
3.2 Überlegungen zu den genauen Teilausmaßen.....	24
3.3 Zusammenbau der fertigen Teile.....	31
3.4 Zusatz: Bau einer geeigneten Transportkiste.....	32
4 Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerung	34
5 Literaturverzeichnis	35

Summary

The introduction begins with a series of visual experiments. Here, the focus is set on the force of a magnetic field and its direction of action. They are made visible in three different ways. This is followed by a more precise mathematical consideration of an electrically induced magnetic field and of the comparability with magnetic fields of matter. This is intended to complete an idea of magnetic fields in general, without having to consider their exact origin (here the excesses in quantum mechanics and electrodynamics would be too extensive). Then, different interactions of matter with magnetic fields are named and considered, which are of central importance here. Based on this, two different systems are examined in detail, which enable a diamagnet that floats above a specially arranged magnetic field and a magnet itself. The second part of the project consists of the documentation and explanation of the practical implementation, which relates to the so-called diamagnetic stabilized levitation. It consists of an arrangement of two magnets that attract each other: a smaller magnet is in an equilibrium of forces consisting of magnetic attraction and gravity, which is stabilized by additional repulsion between two diamagnets

Die Heranführung beginnt mit einer Reihe von Anschauungs-Experimenten. Im Vordergrund hierbei steht die Kraftwirkung und die Wirkungsrichtung eines Magnetfeldes, die auf drei unterschiedliche Arten sichtbar gemacht werden. Anschließend erfolgt eine beispielhafte, mathematische Betrachtung eines elektrisch induzierten Magnetfeldes und die Überlegung der Vergleichbarkeit mit Magnetfeldern von Materie. Damit soll eine allgemeine Vorstellung von Magnetfeldern ermöglicht werden, ohne auf ihren genauen Ursprung Rücksicht nehmen zu müssen, da die Ausschweifungen in die Quantenmechanik und Elektrodynamik sonst zu umfangreich wären. Im Anschluss werden unterschiedliche Wechselwirkungen von Materie mit Magnetfeldern betrachtet, die hier von zentraler Bedeutung sind. Mit diesen Grundlagen werden zwei verschiedene Systeme genauer betrachtet, die eine Schweben eines Diamagneten, der über einem speziell angeordneten Magnetfeld schwebt, ermöglichen sowie eines Magneten. Der zweite Teil der Arbeit besteht aus der Dokumentation und Erläuterung der praktischen Umsetzung, die sich auf die sogenannte diamagnetisch stabilisierte Levitation beziehen: Sie besteht aus einer Anordnung von zwei Magneten, die sich gegenseitig anziehen. Ein kleinerer Magnet befindet sich hierbei in einem Kräftegleichgewicht aus magnetischer Anziehung und Schwerkraft, welches durch zusätzliche Abstoßung zwischen zwei diamagnetischen Platten stabilisiert wird.

1 Einleitung

Die Besonderheit, dass jeder Magnet grundsätzlich zwei Pole besitzt, einen sogenannten Nord- und Südpol, geht mit der idealisierten Darstellung einher, dass ein Magnetfeld aus in sich geschlossenen „Feldlinien“ besteht, die vom Nordpol zum Südpol verlaufen und durch den Magneten hindurch wieder zum Südpol. Sie zeigen die Krafrichtung auf einen unendlich kleinen Magneten an, dessen Ausrichtung tangential zu diesen Feldlinien ist. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist aber auch das Ausrichten magnetischer Materialien entlang eines Magnetfeldes, welche durch ein Magnetfeld selbst magnetisiert werden.¹[1] Die räumliche Dichte der Feldlinien ist außerdem proportional zu der Stärke eines Magnetfeldes.²[2]. Auf dieser Grundlage kann in den folgenden Versuchen das Verhalten verschiedener Magnetfeldanordnungen, auf verschiedene Weisen veranschaulicht werden.

2 Experimentelle und theoretische Heranführung an die Thematik

2.1 Den Charakter Magnetfeldes mit eigenem Auge betrachten

Zum Verständnis der Natur eines magnetischen Feldes ist es sinnvoll, sich diese zunächst durch ein paar unterschiedliche Versuche vor Augen zu führen. Für die folgende Reihe von Anschauungsversuchen wurden Magnete verschiedener Größe, Form und gegenseitiger Anordnung verwendet, um zunächst zu demonstrieren, wie sich ein Magnetfeld im Raum ausbreitet und wie sich Magnetfelder verschiedener Anordnungen verhalten.

2.1.1 Experimentelle Einführung

Zur Indizierung wurden entweder kleinere wechselwirkende Magnete oder magnetisierbare Partikel verwendet. Die verschiedenen Magnete, die hier (und auch für die gebaute Anlage) gezeigt werden, sind sehr starke Neodym-Magnete der Marke *Magnetastico*[®] bzw. *Fortag*[®]. Als magnetisierbare Partikel wurden in den folgenden dargestellten Versuchen Stahlspäne bzw. Stahlkugeln der Marke *Umarex*[®] (Durchmesser: 4,5 mm) verwendet.

Zu jedem Versuch wird eine kurze Durchführung erläutert und die Ergebnisse anhand der entstandenen Fotografien qualitativ bewertet und interpretiert.

1 de.wikipedia.org (18.01.2021)

2 de.wikipedia.org (18.01.2021)

2.1.1.1 Visualisierung mit Stahlkugeln um einen Magneten

Ein großer Magnet (bestehend aus 6 einzelnen flachen Magneten (2 cm x 4 cm x 0,5 cm), die entlang der Polarisierungsebene aufeinander haften), wurde mit Stahlkugeln behaftet. Die Polarität wurde willkürlich mit „N“ für den Nordpol und „S“ für den Südpol gekennzeichnet. Die Verbildlichung der ungefähren Form der verschiedenen Magnetfelder auf einer bestimmten (Raum-)Ebene soll hier im Vordergrund stehen. Es wurden im Anschluss nochmals weitere Stahlkugeln hinzugefügt, um auch auf der Vorderseite geschlossene Feldlinien zu verdeutlichen, deren Enden an den markierten Polen haften:

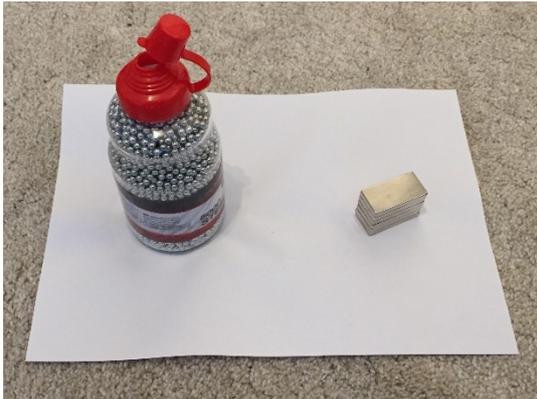


Abb. 1: Versuchsaufbau



Abb. 2: Stahlkugeln an Magnet

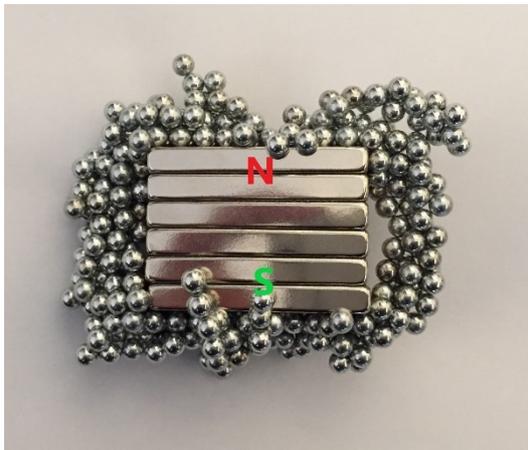


Abb. 3: Stahlkugeln an Magnet



Abb. 4: zusätzliche Stahlkugeln an Magnet

Beobachtung: vom großen Magneten ausgehende Magnetfeld zeigte das Bestreben, durch die magnetischen Stahlkugeln hindurch zu verlaufen. Es entstanden nämlich Kugelketten, die die Feldlinien des Magnetfeldes andeuten, welche offensichtlich in allen Richtungen um den Magneten herum verlaufen. Man erkannte außerdem deutlich, wie diese über den Polen auseinanderlaufen. Man kann anhand der Bilder aber auch erkennen, wie sich diese magnetisierten Ketten gegenseitig beeinflussen, indem sie selbst aneinanderhaften. Das Feld wird durch die Anwesenheit von viel magnetisierbarer Masse somit nicht nur angezeigt, sondern, wie man an den äußeren anhaftenden und ab

gekrümmten Kugelketten (*Abb.4, rechts oben und unten*) erkennen kann, auch stark beeinflusst. Diese Kettenteile scheinen nämlich die Tendenz zu haben, sich nach außen auszudehnen und gleichzeitig von den benachbarten Kugeln angezogen zu werden.

2.1.1.2 Visualisierung mit Stahl-Späne an den Polen eines Magneten

Zur akkurateren Verdeutlichung wurden in einem anderen Anschauungsversuch feinere Partikel zum Visualisieren eines Magnetfeldes genutzt, die sich aufgrund kleinerer Größe und feinerer Verteilung gegenseitig auch weniger beeinflussen sollten. Der gleiche Magnetblock aus 2.1.1.1 wurde zur Sauberhaltung hinter ein Stück Pappe geklebt und Stahlspäne (Reste von Schleif und Feilarbeiten) auf seiner Oberfläche angesammelt.

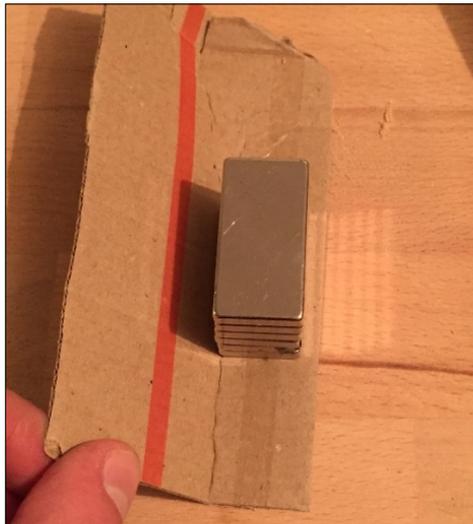


Abb. 5: Magnet auf Pappstück



Abb. 6: angezogene Stahl-Späne

Beobachtung: Die Feldstärke über der Mitte von diesem Magneten schien dort am größten zu sein, da sich dort die größte Menge an Späne sammelte. Mehr konnte man hier jedoch kaum erkennen. Daher habe ich mich entschieden, ein paar weitere Anschauungsversuche mit kleineren Magneten durchzuführen:

2.1.1.2.1 Erweiterung des Versuchs

Die Stahl-Späne vom Vorversuch wurde fein über eine auf Holzbalken erhöhte, dünne Plexiglasscheibe gestreut und von unten langsam ein Magnet, bestehend aus vier kleinen Würfelmagneten (Kantenlänge 5 mm) angenähert, mit einem weißen Brett (für einen kontrastreichen Untergrund). Hierfür habe ich verschiedene Anordnungen der einzelnen Magnete unter der Scheibe fotografiert und erneut die Polaritäten gekennzeichnet:

- 1) mit einem langen, aus vier Würfeln bestehenden Magneten
- 2) gegenseitig anziehende Hälften auf einer Achse
- 3) gegenseitig anziehende Magnethälften parallel zueinander
- 4) zwei sich gegenseitig abstoßende Magnethälften



Abb. 7: Versuchsaufbau



Abb. 8: Metallspäne auf Plexiglas-Scheibe

Beobachtungen: Nach der Annäherung des Magneten knapp unter der Plexiglasscheibe (ca. 1 cm entfernt von den Stahlspänen), ergaben sich verschiedene Muster für verschiedene Magnetfeldanordnungen. Diese werden im Einzelnen betrachtet:

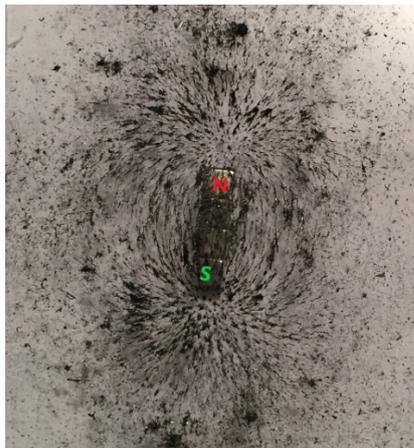


Abb. 9: Feldanordnung 1)

Bei der ersten Anordnung erkennt man deutlich, wie die Feldlinien des Magneten vom Nord- zum Südpol verlaufen.

Bei nächster Anordnung mit zwei geteilten Magneten sieht das Magnetfeld ähnlich aus (Die Magnetblöcke sind durch ein kleines Holzstück voneinander getrennt). Beim Versuch wurde der Magnet durch Annäherung an die Späne aber so stark angezogen, dass er von selbst an der Platte haften blieb. Dies hatte zur Folge, dass sich die Späne um bzw. über den Magneten herum stärker sammelte (s. *Abb.11 und Abb.12*). Hierbei kann man deutlich erkennen, wie das Feld zwischen den Magneten weiterverläuft, wenn auch deutlich schwächer:

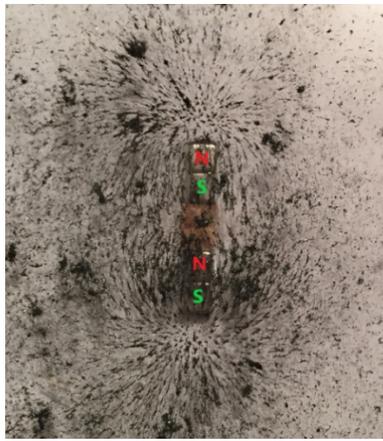


Abb. 10: Feldanordnung 2)

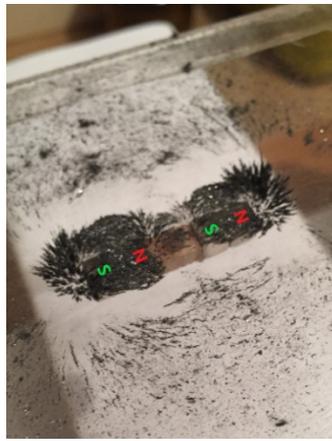


Abb. 11: Queransicht



Abb. 12: Seitenansicht

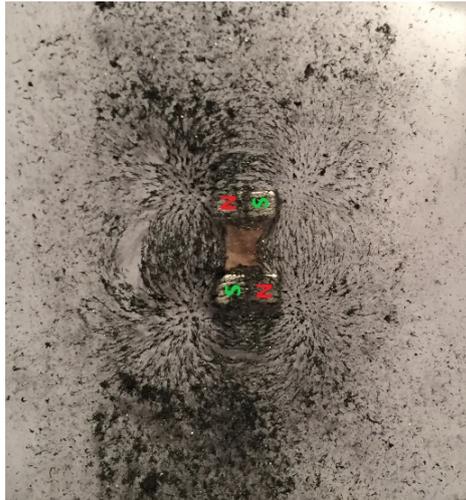


Abb. 13: Feldanordnung 3)

Eine sehr interessante Feldanordnung ergab sich bei den gegenseitig anziehenden, parallel zueinander liegenden Magneten. Besonders auffällig ist hier die scheinbar sehr hohe Feldstärke zwischen den nebeneinanderliegenden, entgegengesetzten Polen. Diese Erkenntnis wird in (Kap.2.4.1.) noch von Bedeutung sein.



Abb. 14: Feldanordnung 4)

Bei der letzten Anordnung mussten die Magnete von Hand mit den gleichen Polen zusammengehalten werden. Man kann auf der Abbildung gut erkennen, dass die Felder entgegengesetzt sind. Die Feldlinien scheinen nicht von Süd zu Südpol, sondern nach hinten herum zum Nordpol und senkrecht, von den Magneten weg, scheinbar ins Unendliche zu laufen.

2.1.1.3 Visualisierung von durch gegenseitige Wechselwirkung

Die Idee zu diesem Versuch entstand vor dem Hintergrund, die Kraftwirkungen selbst genauer zu untersuchen. Hierbei wurde der große Magnet (s. Kap. 2.1.1.1) auf die Mitte eines flachen Kartons gelegt und um ihn herum, in verschiedenen Positionen, ein kleinerer Magnet (wieder bestehend aus 4 kleinen Würfelmagneten) so positioniert, dass diese sich ausrichten und durch ihre Haftreibung gerade so nicht von diesem angezogen werden. Jeweils mit einem unbearbeiteten Magneten mit weniger Haftreibung bzw. mit einem Magneten, der unten mit zwei Gummistreifen beklebt wurde. Die Positionen der einzelnen Magneten wurden abgepaust. Der Nordpol erhält dort die Farbe Grau.



Abb. 15: Magnete, davor



Abb. 16: Magnete (v.u.)

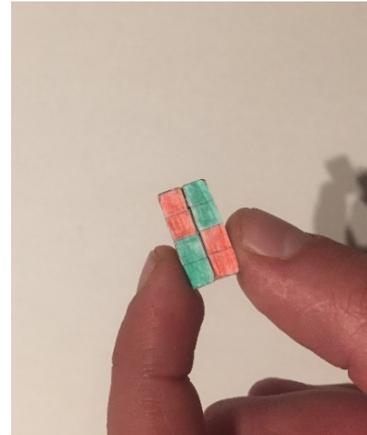


Abb. 17: Magnete (v.o.)

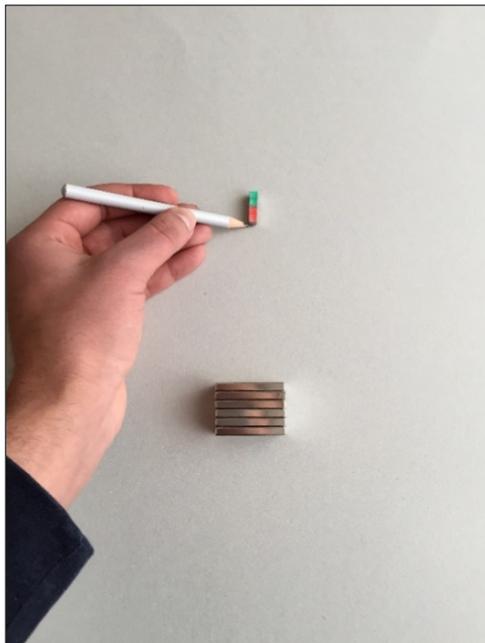


Abb. 18: Zurechtschieben des Magneten



Abb. 19: Abgepauste Positionen

Beobachtung: Der Magnet mit der höheren Haftreibung war in der Gleichgewichtsposition natürlich näher am Magneten, da er eine höhere Anziehung mit seiner Haftreibung besser kompensieren kann. Die jeweiligen Stellen verlaufen elliptisch um den Magneten, mit höheren Abständen an den Polen. Man kann sagen, dass je weiter man die Magnete entfernen muss, um die Anziehungskraft zu kompensieren, desto langsamer nimmt die Feldstärke ab. An den Polen scheint die Abnahme der Feldstärke am geringsten zu sein.

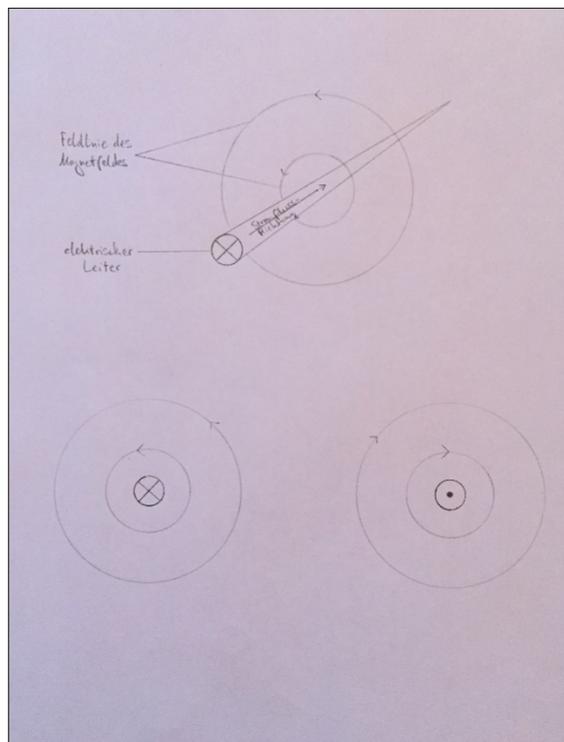
2.1.2 Interpretation und Vergleich der jeweiligen Ergebnisse

Die aussagekräftigsten Ergebnisse erhielt man durch die Darstellung mit dem Magneten und der Metallspäne. Man erhält hier ein vielschichtiges Bild davon, wie sich Magnetfelder gegenseitig beeinflussen. Diese Versuchsmethode stellt eine bessere Alternative dar zu dem Versuch mit Stahlkugeln. Der letzte Versuch mit den verschiedenen Positionierungen der kleinen Magnete zur Untersuchung der Kraftverhältnisse war eine gute Ergänzung zum Verständnis der gegenseitigen Kraftwirkung und Anziehung.

2.2 Einführung Elektromagnetismus

Elektrische Leiter und ihre Magnetfelder

Ein stromdurchflossener, elektrischer Leiter erzeugt um sich herum ein ringförmiges Magnetfeld. Der Feldlinienverlauf wird so festgelegt, dass er mit Sicht in Stromflussrichtung gegen den Uhrzeigersinn verläuft.³[3] Im Folgenden wird dieser Leiterquerschnitt mit einem „x“ gekennzeichnet, umgekehrt mit einem „•“.



In der Abbildung (oben) ist ein stromdurchflossener Leiter dargestellt, den ein ringförmiges Magnetfeld umgibt, mit der zugehörigen Sicht in Stromflussrichtung (unten links) und mit entgegengesetzter Stromflussrichtung (unten rechts).

Abb. 20: Feldlinienverlauf eines el. Leiters

2.3 Magnetismus der Materie

Grundsätzlich gilt: alle geladenen Elementarteilchen eines Atoms besitzen ein sogenanntes magnetisches Moment. Ihre Ursache beruht auf quantenmechanischen Effekten ⁴[6] (diese sollen hier aber nicht im Vordergrund stehen). Nun beruhen die magnetischen Eigenschaften von Materialien auf makroskopischer Ebene aber auf dem Zusammenspiel einzelner Atome, Ionen und Elektronen aus denen ein Material aufgebaut ist. Es haben nur ausgewählte Materialien die Eigenschaft, dass von ihnen selbst ein Magnetfeld ausgeht. Denn nicht immer können die (oftmals vorhandenen!) magnetischen Momente der Bausteine eines Materials gleichmäßig geordnet vorliegen. Dies ist aber die Grundlage dafür, dass ein Magnetfeld auf makroskopischer Ebene von einem Material ausgehen kann.⁵[7] Im Folgenden werden genau diese Materialklassen, die nach außen ein magnetisches Verhalten zeigen, zur groben Vorstellung erläutert.

2.3.1 Paramagnetische Materialien

Hier können sich die einzelnen magnetischen Momente beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes nach diesem ausrichten und verstärken das Magnetfeld. Jedoch sind diese von ihrer Ausrichtung untereinander nicht stark genug aneinandergelockt und so verliert sich nach dem Entfernen des äußeren Magnetfeldes ihre Orientierung wieder. Von einem paramagnetischen Material geht also selbst kein beständiges Magnetfeld aus, es kann äußere angelegte Magnetfelder aber verstärken.⁶[7] Man kann dieses Verhalten insbesondere bei Metallen wie den Alkalimetallen, fast allen Erdalkalimetallen (mit Ausnahme von Beryllium) und den sogenannten Seltenerdmetallen des Periodensystems beobachten. Aber nicht nur bestimmte Metalle zeigen dieses Verhalten: Beispielsweise Sauerstoff und Stickstoffdioxid sind ebenfalls paramagnetisch⁷[8]

4 de.wikipedia.org (21.01.2021)

5 de.wikipedia.org (21.01.2021)

6 de.wikipedia.org (21.01.2021)

7 de.wikipedia.org (21.01.2021)

2.3.2 Ferromagnetische Materialien

Es gibt aber auch solche Materialien, bei welchen die magnetischen Ausrichtungen nach dem Entfernen eines äußeren Magnetfeldes magnetisiert bleiben, entgegengesetzt zum oben genannten Fall. Hier befinden sich die einzelnen Momente in ausreichend starker Wechselwirkung untereinander, sodass das Material nach außen selbst ein Magnetfeld erzeugt. Der wesentliche Unterschied ist hier dadurch gegeben, dass die thermische Wärmebewegung des Materials die Ordnung der einzelnen magnetischen Momente nach dem Wegnehmen des äußeren Feldes nicht zerstört. Je nach materialspezifischer Temperatur ist diese Bewegung der Teilchen aber groß genug, um die dauerhafte Magnetisierung zu zerstören und führt zum Übergang in den paramagnetischen Zustand. Diese Temperatur wird auch als Curie-Temperatur T_c bezeichnet.⁸[7]. Im Folgenden sind einige Substanzen aufgelistet, die bei Raumtemperatur ferromagnetisch sind, bzw. nach überschreiten von T_c paramagnetisch werden:

Tab. 1: typische, paramagnetische Materialien und Curie-Temperaturen⁹[9]

Substanz	Curie-Temperatur T_c [K]
Kobalt	1395
Eisen	1033
Nickel	627
Chrom(II)-oxid	390
Gadolinium	289

2.3.3 Diamagnetische Materialien

Diamagnetismus ist eine grundsätzliche Eigenschaft von Materie: Nach der sogenannten Lenz'schen Regel beeinflusst ein Magnetfeld bewegte Ladungen (z.B. auch in Atomorbitalen) so, dass durch diese ein Magnetfeld erzeugt wird, das dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt, gegebenenfalls durch mechanische Kraftwirkungen.¹⁰[10] Das bedeutet, dass ein solches Material aus einem Magnetfeld verdrängt wird. Dieser Effekt tritt aber nur in vergleichsweise schwacher Form auf, sodass para- oder ferromagnetische Effekte von einem Material meist überwiegen¹¹[11]. Wie stark diese Effekte für ein Material sind, wird durch die sogenannte Magnetische Suszeptibilität X angegeben. Diese Beschreibt das dimensionslose Verhältnis der Magnetisierung zur Magnetfeldstärke in einem Material. Man kann sie auch als verhältnismäßige Schwächung eines äußeren

8 de.wikipedia.org (21.01.2021)

9 de.wikipedia.org (22.01.2021)

10 de.wikipedia.org (21.01.2021)

11 de.wikipedia.org (21.01.2021)

Magnetfeldes in dem Material verstehen. Für diamagnetische Substanzen ergeben sich in Folge dessen negative Werte für χ .¹²[12]

Tab. 2: Übersicht einiger wichtiger diamagnetischer Materialien¹³[11]

Material	Magnetische Suszeptibilität χ
Beryllium	$-2,3 \cdot 10^{-5}$
Gold	$-3,4 \cdot 10^{-5}$
Bismut	$-1,7 \cdot 10^{-4}$
Kohlenstoff: pyrolytischer Graphit, parallel	$-8,5 \cdot 10^{-5}$
Kohlenstoff: pyrolytischer Graphit, senkrecht	$-4,5 \cdot 10^{-4}$

Wie man anhand des besonders diamagnetischen Graphits erkennen kann, kann die Gitterstruktur eines Elements, und die Ausrichtung der Gitterstruktur im magnetischen Feld, die diamagnetischen Eigenschaften deutlich verändern!

2.4 Verschiedene Kräftesysteme und Überlegung ihrer Funktionsweise

Unter Verwendung starker Magnetfelder und der Wechselwirkung mit anderen Magneten und diamagnetischen Materialien kann man verschiedene Systeme herstellen, in denen man durch Kräftegleichgewichte Objekte, die ein magnetisches Verhalten aufweisen, zum Schweben bringen kann. Im Folgenden werden zwei Fälle unterschieden:

Im ersten Fall wird ein diamagnetisches Materialstück zum Schweben gebracht, über einer speziellen Anordnung von Magneten und im zweiten Fall ein Magnet selbst, der von einem anderen Magneten angezogen wird und durch stabilisierende Kräfte von zwei Diamagneten zwischen diesen in einem stabilen Kräftegleichgewicht schwebt.

¹² de.wikipedia.org (21.01.2021)

¹³ de.wikipedia.org (21.01.2021)

2.4.1 Diamagnetische Levitation eines Graphitplättchens

Über einer Magnetfeldanordnung, in dem zwei Nordpole und zwei Südpole in einem „Schachfeldmuster“ angeordnet sind, kann man ein Graphitplättchen zum Schweben bringen. Die folgenden Bilder zeigen ein solches, sogenanntes „DIALEV“ von der Marke *Stern und Schatz GmbH*. Zunächst soll die Anordnung der Polaritäten veranschaulicht werden:

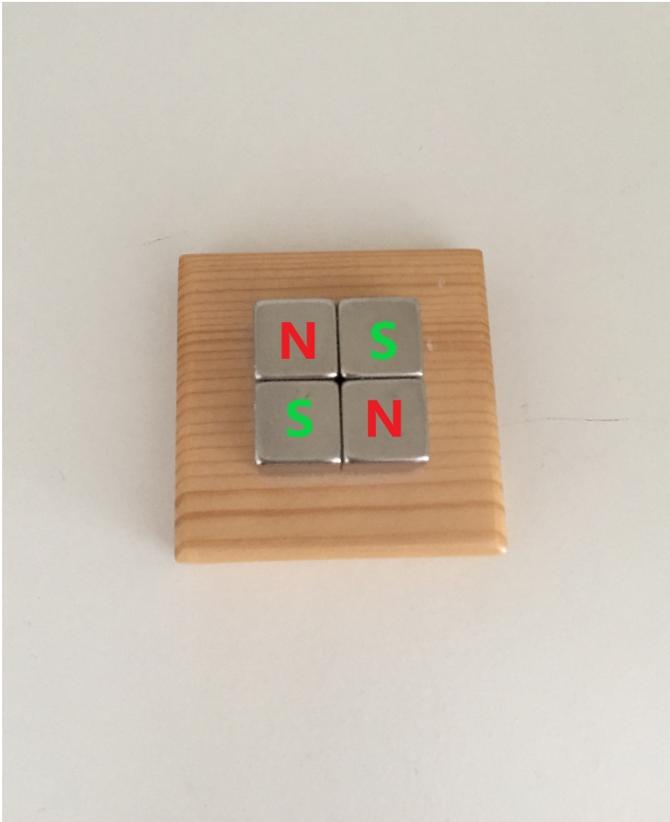


Abb. 21: Anordnung der Magnete

Legt man das zugehörige Graphitplättchen auf die Mitte zwischen den Polen, beginnt dieses sogleich zu schweben:



22: schwebendes Graphitplättchen



Abb. 23: Seitenansicht des Plättchens

Ungefähr 1 mm über den Magnetoberflächen schwebt das Graphitplättchen. Aber wieso ist das der Fall? Und wieso benötigt man eben genau diese Anordnung von mehreren Magneten, damit das diamagnetische Plättchen stabilisiert, über den Magneten schwebt? Aus *Kap. 2.1.1.2* wurde bereits ersichtlich, dass zwei parallel nebeneinanderliegende, entgegengesetzte Pole eine verhältnismäßig hohe Feldstärke in ihrer unmittelbaren Nähe erzeugen, da die Feldlinien auf direktem Weg zum nächsten Pol verlaufen. Damit wird natürlich auch ein verhältnismäßig starkes, exakt entgegengesetztes Magnetfeld in einem diamagnetischen Material erzeugt, das sich über einem solchen Magnetfeld befindet! Mit der Veranschaulichungsmethode aus *Kap. 2.1.1.2* lässt sich das auch für diesen Fall explizit beweisen. Hierzu habe ich das Gerät mit einer Plexiglasscheibe abgedeckt und das Stahlpulver im Anschluss darüber gestreut. Das Ergebnis sieht wie folgt aus:

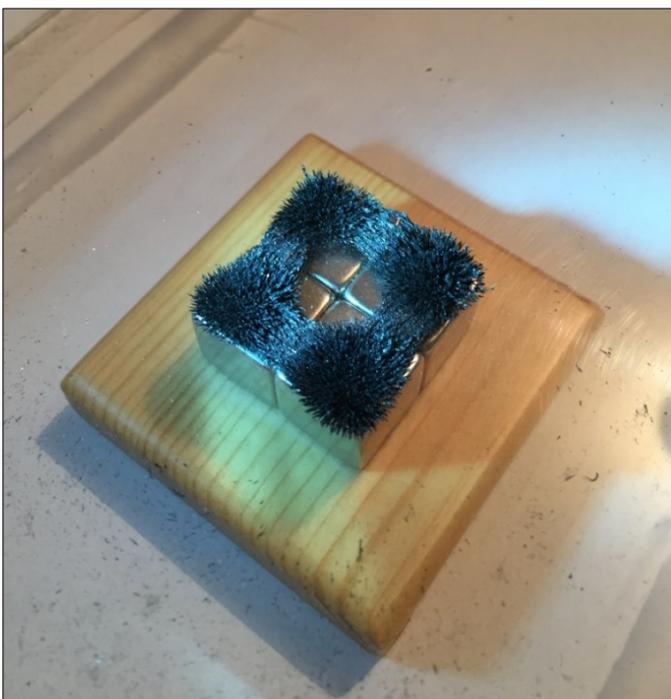


Abb. 24: Stahlspäne über Magnetfeld

Über der Mitte der Magneten hat sich praktisch keine Stahlspäne gesammelt. Die stärkste Wechselwirkung mit dieser ist direkt über den Mittelpunkten der Pole zu sehen und zwischen den benachbarten Polen, wo die Feldlinien aber sehr flach verlaufen. Vermutlich ist das resultierende Abstoßungsmoment direkt über den Mittelpunkten der einzelnen Magnetwürfel am größten, da dort das Feld das Graphit senkrecht durch die Fläche durchwandert und der Kraftbeitrag von dem Magnetfeld hinweg vermutlich am größten ist. Das würde auf jeden Fall erklären, wieso das quadratische Plättchen auch quer, mit minimaler Fläche über diesen Punkten liegt, da das Plättchen nicht nur nach oben, sondern zur Mitte gedrängt werden muss, in den Bereich niedrigerer Feldstärke und minimaler Überschneidungsfläche über den Polen. Und zwar so, dass die äußeren Spitzen zwischen den am stärksten abstoßenden Punkten liegen. Kurz: Das Plättchen wird von allen vier Kanten, die knapp über den Bereichen sehr hoher Feldstärke liegen in die Mitte gedrückt und bleibt dort, weil man Arbeit bzw. Energie aufbringen müsste um es in dem Bereich höherer Abstoßung ringsum zu bringen. Gleichzeitig wird das diamagnetische Material von dem starken Feld nach oben abgestoßen. Es resultiert ein stabilisierter Gleichgewichtszustand aus Schwerkraft und magnetischen Abstoßungseffekten nach oben, die am Rand besonders stark und in der Mitte besonders schwach sind und sich aus Symmetriegründen zu einer Gesamtkraft nach oben addieren.

2.4.2 Diamagnetisch stabilisierte magnetische Levitation

Es gibt aber auch eine Form von magnetischer Levitation, deren Hauptkraftquelle (gegen die Schwerkraft) auf gegenseitiger magnetischer Anziehung beruht. Demnach müssen sich hier zwei Magnete gegenseitig anziehen. Diesmal wird ein kleiner Magnet von einem starken Magneten in großem Abstand, nach oben gezogen und zwischen zwei Diamagnetischen Platten in dem Bereich des Kräftegleichgewichts gehalten:



Abb. 25: Konstruktion für schwebenden Magneten

Die Platten, zwischen denen hier ein Würfelmagnet (5 x 5 x 5 mm) mit einem Abstand von gut 1 mm schwebt, bestehen aus Bismut, einem Schwermetall mit verhältnismäßig hoher diamagnetischer Suszeptibilität (vgl. Tab. 2), das sich zudem sehr gut in passende Formen gießen lässt. In dem Bereich zwischen den zwei Platten, der auf genau 8 mm festgelegt wurde (siehe Dokumentation des praktischen Teils), kann der Magnet stabilisiert schweben. In diesem Bereich übt das Magnetfeld des großen, oberen Magneten nicht nur den gleichen, der Schwerkraft entgegengesetzten Kraftbetrag auf den Magneten aus, sondern in diesem Bereich ist das Magnetfeld auch sehr homogen:

Betrachtet man den in Kap. 2.2.2 hergeleiteten Zusammenhang, dass die Magnetfeldstärke eines Magnetfeldes entlang der Raumachse x , welche hier zwischen den beiden Magneten, bzw. senkrecht zum Pol des großen Magneten liegt, näherungsweise umgekehrt proportional zu x^3 sein soll (was nur eine idealisierte Vorstellung ist, man darf aber annehmen, dass die Feldstärke in niedrigen Entfernungen schnell, bei hohen Entfernungen hingegen immer langsamer gegen null strebt und dementsprechend immer langsamer abnimmt), dann sind bereits sehr schwache, diamagnetische Wechselwirkungen zwischen dem schwebenden Magneten und den Bismut-Platten stark genug, um der Änderung der magnetischen Feldstärke entlang des kleinen Bereichs, in dem der Magnet schwebt, zu kompensieren. Kurz gesagt stößt das Bismut bei exakt definierten Abstandsverhältnissen den kleinen Magneten gerade so stark genug von sich ab, dass dieser nicht nach unten, zu kleinerer magnetischer Anziehung oder nach oben, zum Magneten hin, den Bereich des Kräftegleichgewichts verlässt. Dies

würde ohne diese stabilisierende Wirkung natürlich sofort passieren, da der Magnet in dem Kräftegleichgewicht nach oben und unten eine Potenzialerniedrigung anstrebt. Entweder nach unten, um Lageenergie freizusetzen (vgl.: Gegenstand den man einfach fallen lässt) oder nach oben (vgl.: Magnet, der das Bestreben hat zum entgegengesetzten Magnetfeld zu wandern). Sobald eine der beiden Kräfte überwiegt und nicht stabilisiert würde, wäre das System sofort aus dem Gleichgewicht. Daher ist hier am Ende auch korrekterweise von magnetischer, diamagnetisch stabilisierter Levitation die Rede.

2.4.3 Demonstration von Abschirmungseffekten mit der gebauten Anlage

Mit dem eben beschriebenen System lassen sich, aufgrund der sehr schwachen stabilisierenden Wirkungen vom Bismut, kleinste magnetische Störungen in der Umgebung dieses Gleichgewichts anzeigen. Das Vorhandensein kleinster Feldstörungen führt zu der Ablenkung des kleinen Magneten in bestimmte Raumrichtungen. Zum Beispiel kann man zeigen, wie das Magnetfeld des großen Magneten durch ein ferromagnetisches Material hindurch abgelenkt wird, was ein Nachweis von Abschirmungseffekten eines Magnetfeldes (durch entgegengesetzte Magnetfelder in einem magnetisierten Material) ist:

Bringt man ein magnetisches Materialstück (z.B. hier: eine stählerne Unterlegscheibe) in die Nähe von der Position des Gleichgewichts und richtet dieses ungefähr längs zu der Ausrichtung des Magnetfeldes aus, von dem die Anziehungskraft nach oben ausgeht, dann wird ein Teil dieses Magnetfeldes durch das Material abgelenkt, sodass der Magnet schräg nach unten absinkt, auf die Seite wo das Feld nicht abgeschwächt wird und wo die anziehenden Kräfte nach oben stärker sind:



Abb. 26: Magnet im ungestörten Zustand

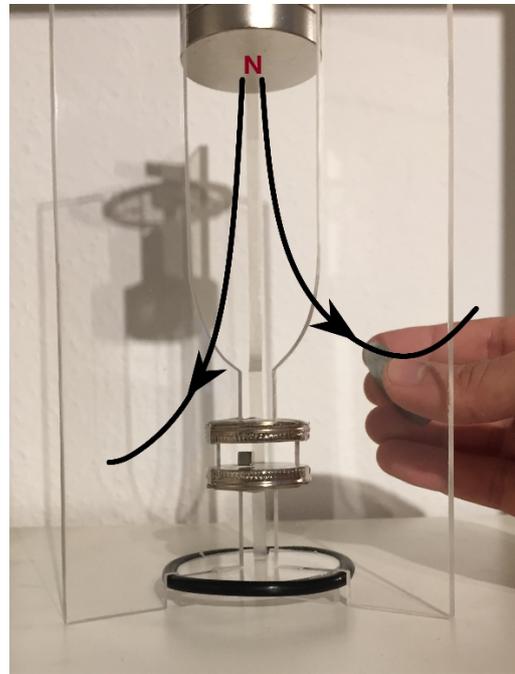


Abb. 27: Magnet im gestörten Zustand

Beobachtung: Der Magnet befindet sich zunächst im ungestörten Kräftegleichgewicht, er erfährt verschiedene Kräfte, die insgesamt nach oben ausgerichtet sind. Nach Einbringung der Störung von rechts wird dort das Magnetfeld gestört (was durch die schwarzen Pfeile angedeutet wird, die den grob vermuteten, gestörten Feldlinienverlauf vom großen Magneten andeuten sollen), der Magnet wird nun auf dieser Seite schwächer nach oben angezogen. Die Folge: er sinkt leicht nach unten links ab.

3 Dokumentation Praktischer Teil

Als Material für die tragenden Teile des Gestells habe ich mich für Plexiglas entschieden. (Stärke: 5 mm), die alle nötigen Teile in Position halten sollten, in einem Winkel von 120° (s. Abb. 27, 28 und 29). Ihre genauen Abmessungen habe ich anschließend, basierend auf den vorhandenen Teilen, wie dem starken, runden Magneten und den Bismutplatten, die ich als ersten Schritt hergestellt habe, sowie den ermittelten Abstandsverhältnissen festgelegt. Zunächst habe ich damit begonnen, das Bismut in Formen zu gießen:

3.1 Herstellung der Bismutplatten

3.1.1 Erster Gießversuch

Bismut wurde über einem Gasbrenner in einem Topf eingeschmolzen und das flüssige Metall in eine flache Metalldose (Durchmesser ca. 6 cm) gegossen:



Abb. 28: Bismutbrocken vor Einschmelzen



Abb. 29: Gießen des flüssigen Bismuts



Abb. 30: Oberseite Bismutplatte



Abb. 31: Unterseite Bismutplatte

Ergebnis: Nach dem Gießversuch stellte sich heraus, dass sich nach dem Erstarren von Bismut eine sehr unregelmäßige Oberfläche durch Auskristallisation bildet, die für eine saubere Verbauung eine Nachbearbeitung zur Folge gehabt hätte. Da Bismut aber ein sehr sprödes Material ist, wollte ich das umgehen.

3.1.2 Zweiter Gießversuch

Das Material habe ich daher erneut eingeschmolzen, diesmal aber in eine kleinere Form (auch aus Gründen der Materialsparbarkeit). Passend für diese Form habe ich einen Prägestempel gebaut, mit dem man an den Stellen, wo ich später die Halterungsstücke plazieren wollte, jeweils eine saubere Nut einprägen konnte. Hierfür habe ich den Deckel eines kleinen Schraubdöschens mit Holzschienchen beklebt und diese mit dünnem Stahlblech besetzt (ca. 5mm x 12 mm Fläche), das ich an die Materialdicke von dem ausgewählten Plexiglas angepasst habe.



Abb. 32: Gussform.



Abb. 33: Schleifen von Holzschienchen

Kleine Holzschienen wurden zunächst am Schleifbock so bearbeitet, dass sie beim Aufdrücken auf das gegossene Bismut genau mittig auf das Döschen passen sollten, auf den Deckel des Döschens (Durchmesser ca 4 cm) mit 2-Komponentenkleber geklebt. Nach dem Aushärten wurden diese mit den zurechtgebogenen Stahlblechstückchen besetzt.

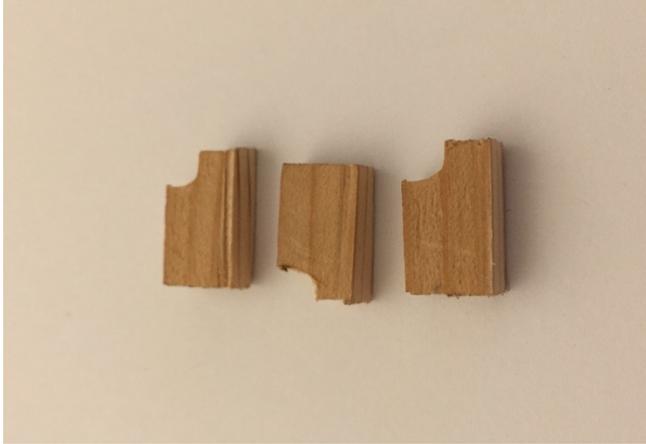


Abb. 34: fertige Holzteile für Prägestempel



Abb. 35: Aufgeklebte Teile



Abb. 36: Stahlblech und Plexiglasteil



Abb. 37: Zurechtbiegen des Stahlblechs



Abb. 38: Aufsetzen des Blechs



Abb. 39: fertiger Stempel.

Anschließend konnte mit dem zweiten Gießversuch begonnen werden:



Abb. 40: Schmelzen von Bi



Abb. 41: Gießen von Bi



Abb. 42: Prägen von Bi



Abb. 43: benutzte Gussform mit Stempel



Abb. 44: fertige Prägeteile

Ergebnis: Die erfolgreich gegossenen und geprägten Teile mussten aus der Form mit einer Kneifzange herausgeschnitten werden, da diese in dem inneren Schraubgewinde haften blieben (s. *Abb. 45*) Gegossen wurde nach Augenmaß, sodass ich im Anschluss anhand der Dicke der Platten, wo die Nut eingestempelt wurde (ca. 5 mm) eine erste genaue Konstruktionskizze erstellen konnte.

3.2 Überlegungen zu den genauen Teilausmaßen

Vor genaueren Überlegungen dazu musste genau ermittelt werden, wie nachher die Abstandsverhältnisse zwischen dem Hauptmagnet, dem Bismut und dem Magneten der dazwischen schweben sollte, aussehen sollten. Hierfür habe ich die Einzelteile passend in einem Regal plaziert, und die Abstandsverhältnisse gemessen. Besonders wichtig war dabei der fixierte Abstand zwischen den Platten. Diese durften nicht zu weit auseinanderliegen, um den schwebenden Magneten stabilisieren zu können. Der Abstand zwischen den Magneten (der später durch eine Schraube genau verstellbar sein sollte),

betrug ca. 13 cm, der gemessene ideale Abstand zwischen den Platten, die mit zwei Münzstapeln der idealen Breite getrennt über einander lagen, lag bei 8,0 mm. Aus diesen Infos erstellte ich eine Konstruktionsskizze.



Abb. 45: Abmessen der Abstände

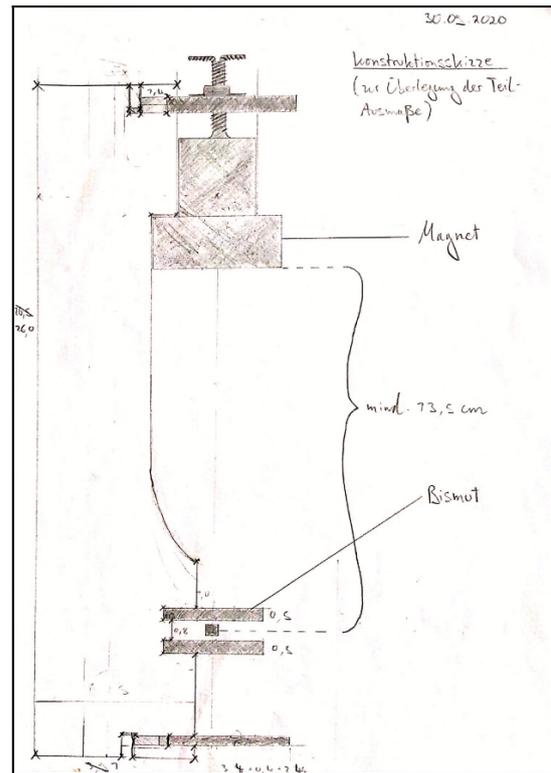


Abb. 46: Konstruktionsskizze

Auf der linken Seite der Konstruktionsskizze ist ein einzelnes Gestellteil (von insgesamt 3) dargestellt, die später die funktionellen Bestandteile der Apparatur zusammenhalten sollten. Der aus 3 Teilen bestehende Magnet (oberer Zylinder: Durchmesser x Höhe: 30 x 30 mm und die zwei unteren Zylinder jeweils 10 x 50 mm), sollte durch eine magnetische Schraube gehalten werden, deren Mutter auf einer darüber liegenden Plexiglasscheibe plaziert sein sollte. Diese wiederum sollte in den Gestellteilen verhakt sein und durch einen Gummi-Ring, der durch die eingekerbten Bereiche im oberen Randbereich verlaufen soll, in die Hauptgestellteile hineingedrückt werden. Ebenso sollte die Verbindung im unteren Bereich aussehen. Diese Skizze stellt aber nur einen Prototyp dar und so sahen die fertigen Teile, wie zum Beispiel die Stellschraube zum Verstellen des Magneten, am Ende anders aus wie in der Skizze dargestellt. Ursprünglich sollten oben auch 2 Plexiglasscheiben (60mm x 3 mm) verbaut sein, letzten Endes erwies sich eine einzelne Platte als Halterung für den Magneten aber als stabil genug. Die genauen Abmessungen (alle Angaben in cm) für die drei Hauptteile habe ich endgültig in einer genauen Zeichnung festgelegt. Der Abstandshalter für die Bismutplatten wurde bewusst um 0,5 mm größer gewählt, um Anpassungen der Einkerbungen für die Bismutplatten im mm-Bruchteilbereich vornehmen zu können.

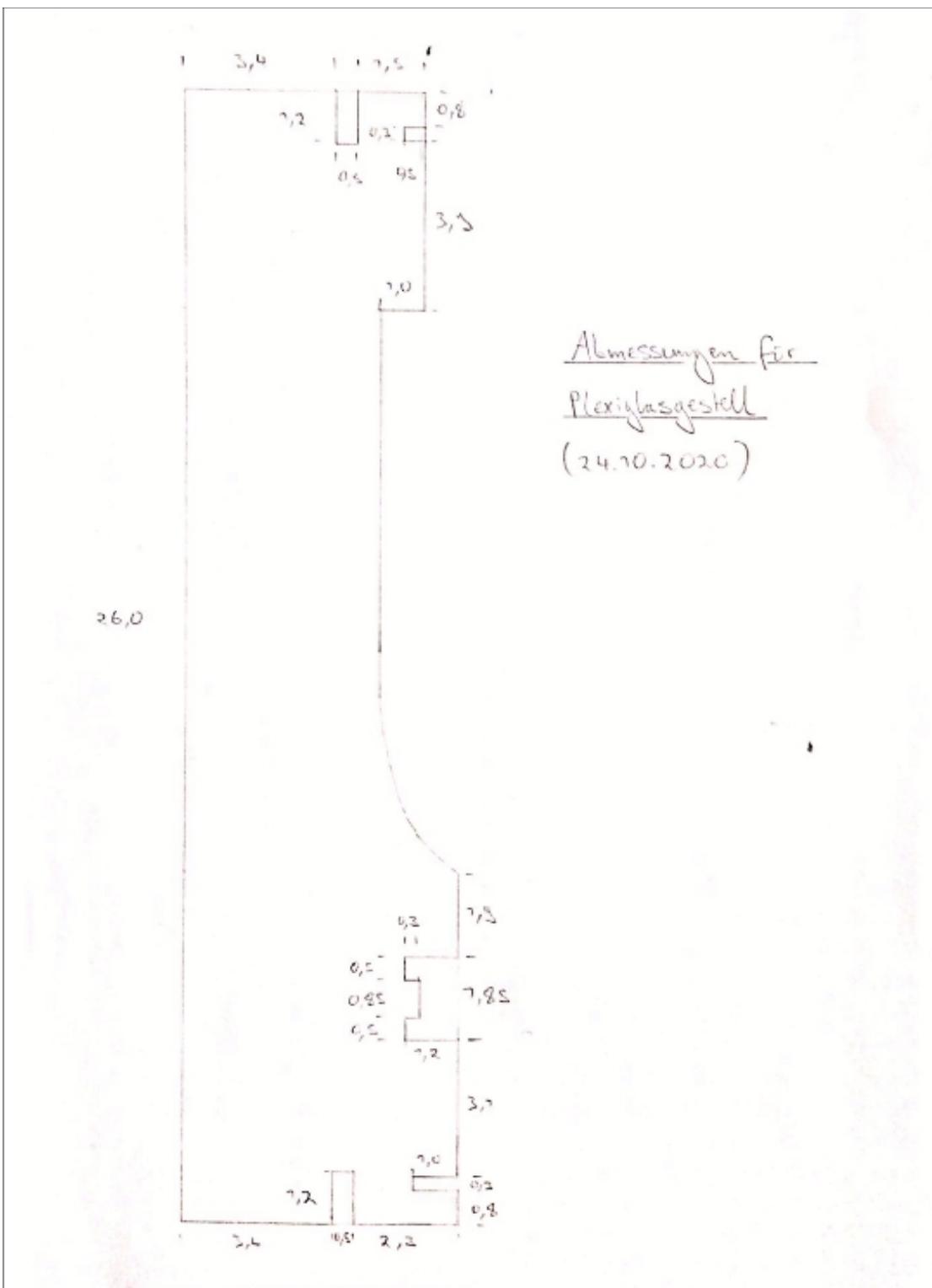


Abb. 47: Abmessungen für Plexiglasgestell.

Der Zeichnung für die drei Hauptgestellteile entsprechend, wurden die Plexiglasscheiben bearbeitet: Hierfür wurde zunächst die obere Scheibe als Halterung für den Magneten hergestellt. Sie erhielt jeweils im vorgesehenen Winkel von 120° die drei Einkerbungen mit der Breite der Hauptgestellteile (5 mm) und Länge von 12 mm. Dazu habe ich die Stellen zuerst grob ausgesägt und anschließend bis zu den gewünschten Ausmaßen ausgefeilt. Im Anschluss erhielt sie eine Bohrung mit einem Durchmesser von etwa 1 cm, durch die später die Schraube hindurchpassen sollte. (Die Mutter wurde mit 2-

Komponentenkleber aufgeklebt) Auf gleiche Weise wurde die untere Verbundscheibe bearbeitet, abgesehen von der Bohrung.

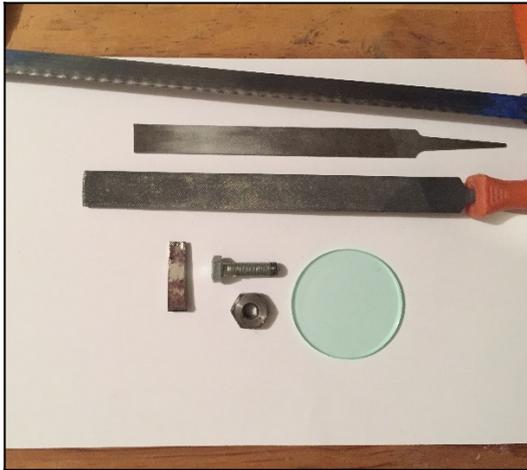


Abb. 48: Rohteile für Magnethalterung



Abb. 49: eingekerbte Halterungsscheibe



Abb. 50: angebohrte Halterungsscheibe

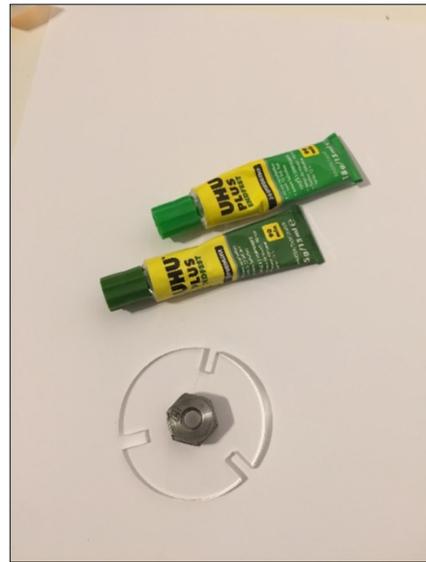


Abb. 51 Aufkleben der Mutter

Für die Herstellung der Stellschraube wurde diese oben etwa 5 mm eingesägt und auf 2 mm Breite ausgefeilt. Ein kleines Stahlstück mit dieser Stärke bekam eine entgegengesetzte Nut mit der Breite der Stellschraube von ca. 8 mm, um es später auf diese aufsetzen zu können.



Abb. 52: Ansägen der Stellschraube



Abb. 53: Ausfeilen der Nut



Abb. 54: Schleifen



Abb. 55: Ausfeilen der Nut



Abb. 56: Abfeilen der Enden

Für die Herstellung der Hauptgestellteile wurden die auszusägenden Konturen auf das Plexiglas abgepaust und anschließend mit einer Kreissäge zunächst am Rand ausgesägt:

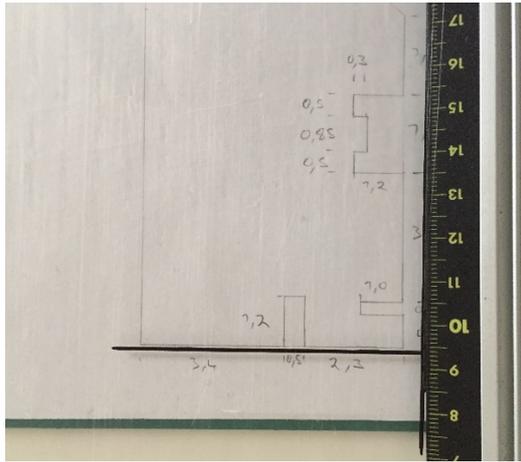


Abb. 57: Abpausen auf Plexiglas



Abb. 58: Grobes Aussägen an der Kreissäge

Anschließend wurden die Äußeren Konturen mit einer Handfeile korrigiert und entgratet.

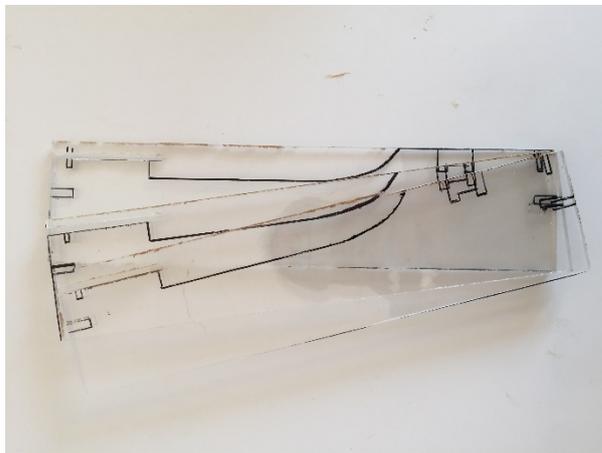


Abb. 59: Ausgesägte Gestellteile



Abb. 60: Entgraten der Gestellteile

Die kurvenförmigen Konturen habe ich nach dem Vorsägen mit einer Handfräse herausgearbeitet und im Anschluss mit feinem Schleifpapier abgeschmirgelt. Die kantigen Einkerbungen wurden zuerst ausgefräst, (bzw. die kleinen Einkerbungen wie bei den Rundscheiben wieder mit der mit der Säge grob angesägt) und mit einer Feile wieder nachgeschliffen, bis die exakte Passgenauigkeit aller Teile untereinander gegeben war.



Abb. 61: Aussägen der runden Bereiche



Abb. 62: Ausfräsen der runden Bereiche



Abb. 63: Abschmirlen der Konturen



Abb. 64: Ausfräsen einer Nut für Bismutplatten

3.3 Zusammenbau der fertigen Teile

Im Folgenden werden die 7 wesentlichen Schritte des Zusammenbaus bildlich dargestellt:

1) Einschrauben der Schraube in die Mutter; 2) Einsetzen des Griffstückes

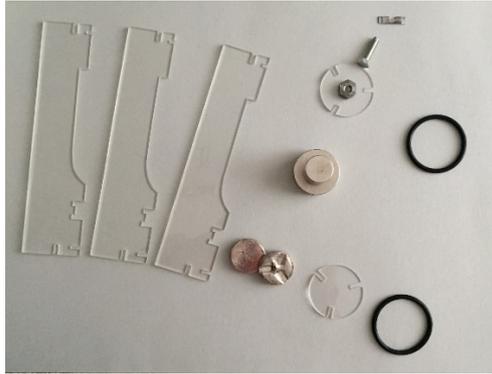


Abb. 65: Zerlegter Zustand aller Teile



Abb. 66: Schritt 1)

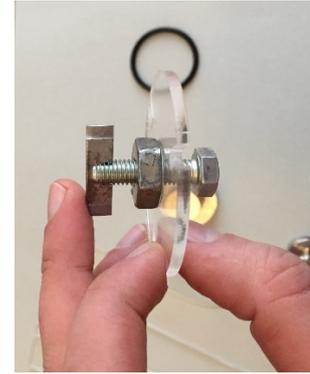


Abb. 67: Schritt 2)

3) Anhaften an den Magneten; 4) Einsetzen in ein Gestellteil

5) Einsetzen der Bismutplatten und der unteren Verbundscheibe



Abb. 68: Schritt 3)



Abb. 69: Schritt 4)



Abb. 70: Schritt 5)

6) Anfügen der übrigen Gestellteile; 7) Anbringen der Gummiringe

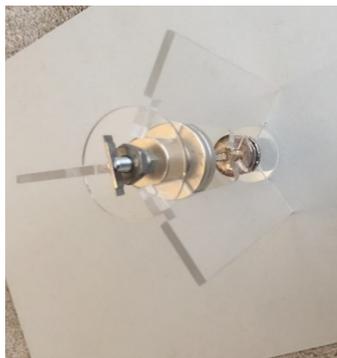


Abb. 71: Schritt 6)

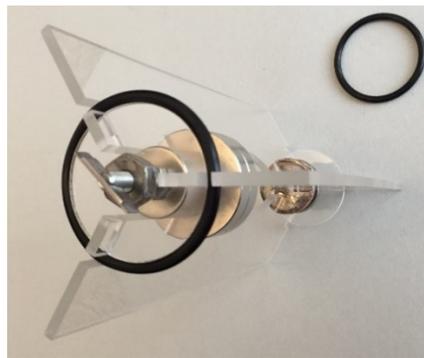


Abb. 72: Schritt 7)



Abb. 73: fertige Anlage

3.4 Zusatz: Bau einer geeigneten Transportkiste

Die Möglichkeit, dass man das Gerät in alle Einzelteile zerlegen, und wie oben wieder zusammenbauen kann, hat zwar den Vorteil, dass man es besonders kompakt transportieren kann. Da der Zusammenbau aber sehr umständlich und wegen dem sehr

großen Magneten sogar gefährlich sein kann (wegen magnetischen Kleinteilen am Gerät oder in der Umgebung), ist der Transport am Stück von Vorteil. Außerdem hat die Konstruktion selbst sehr kompakte Ausmaße (ca. 12 cm x 12 cm x 26 cm), sodass es beispielsweise gut in eine Weinkiste hineinpasst. Eine solche Weinkiste habe ich bearbeitet, um eine praktische und gleichzeitig ästhetische Transportmöglichkeit zu haben. Zunächst habe ich den Grundriss auf eine passende Holzplatte abgepaust und diesen Grundriss mit einer Oberfräse eingefräst

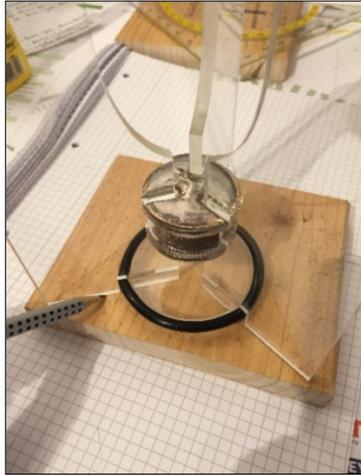


Abb. 74: Abzeichnen des Profils



Abb. 75: Nachziehen der Linien



Abb. 76: Holzteil und Fräse

Für die zwei schräg zulaufenden Schienen musste das Brett in schrägem Winkel (30°) auf einem rechteckigen Holzstück befestigt, bzw. leicht angenagelt werden, da man ein Brett nur längs zur Kante über die Fräse ziehen kann. Die Tiefe des eingefrästen Profils habe ich auf ca. 4 mm festgelegt, damit das Gestell tief und sicher genug stehen konnte. Zudem musste das Gerät in der geschlossenen Kiste nach oben unbeweglich bleiben, um sich während des Transports nicht aus dem Standbrett zu lösen. Hierfür habe ich das eingefräste Brett mit zwei Holzschienen unterlegt, dass das Gestell knapp unter der oberen, einschiebbaren Brettleiste, die einmal eine Halterung für die Weinflasche war, befand. Diese Brettleiste habe ich im Anschluss mit zwei weiteren, leicht schrägen Holzleisten so angebracht werden, dass das Gestell beim Einschieben dieser nach unten gedrückt werden sollte.



Abb. 77: Ausrichten für schräge Nut



Abb. 78: fertiges Standteil



Abb. 79: Halterungsfest

Um das Gerät von außen sichtbar zu machen, habe ich auf geeigneter Höhe die Front der Kiste ausgesägt und ausgehobelt. So, dass die störenden Striche und Schriftzüge auf der Vorderseite nicht mehr sichtbar waren.



Abb. 80: Kiste & Scheibe



Abb. 81: Ausschneiden



Abb. 82: Hobeln vom Ausschnitt

Im Anschluss wurden alle Teile zusammengeleimt, die überstehenden Holzschienen der oberen Brettleiste abgesägt und Die Scheibe von der Innenseite aufgeklebt.



Abb. 83: obere Halterung



Abb: 84: Verleimen der Teile



Abb. 85: fertige Kiste

4 Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Der Bau der Anlage stellte sich als eine lehrreiche Erfahrung heraus. Das Verwenden verschiedener Werkzeuge, sowie das Entstehen und schrittweise Herausstellen des Endergebnisses war sehr motivierend (wie z.B. der erste Gießversuch, der nicht auf Anhieb vollständig geglückt ist) und zufriedenstellend. Der Ehrgeiz, nicht nur eine funktionelle Anlage zu bauen, sondern ein gut aussehendes Ergebnis zu erzielen, hat mich zu einem guten Ergebnis geführt. Zudem habe ich bei der Recherche über die theoretischen Grundlagen mein Wissen erweitern können. Besonders aufschlussreich hierbei war die experimentelle Untersuchung und Verbildlichung verschiedener Magnetfeldanordnungen. Das Durchführen und Befassen mit den Anschauungsversuchen ermöglichte ein vertieftes Verständnis der Thematik.

5 Literaturverzeichnis

Internetartikel:

[3] de.wikipedia.org (18.01.2021), BLAUES-MONSTERLE, Biot-Savart-Gesetz, 17.12.2020. https://de.wikipedia.org/wiki/Biot-Savart-Gesetz#Gerader_Linienleiter

[4] de.wikipedia.org (18.01.2021), BLAUES-MONSTERLE, Biot-Savart-Gesetz, 17.12.2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Biot-Savart-Gesetz#Formulierung>

[5] de.wikipedia.org (18.01.2021), BLAUES-MONSTERLE, Biot-Savart-Gesetz, 17.12.2020. https://de.wikipedia.org/wiki/Biot-Savart-Gesetz#Kreisförmige_Leiterschleife

[8] de.wikipedia.org (21.01.2021), JENSEL, Paramagnetismus, 26.11.2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Paramagnetismus#Beispiele>

[12] de.wikipedia.org (21.01.2021) JENSEL, Magnetische Suszeptibilität, 04.12.2019 https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Suszeptibilität

[7] de.wikipedia.org (21.01.2021), MEIER99, Magnetismus, 14.01.2021. https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetismus#Magnetismus_von_Festkörpern

[6] de.wikipedia.org (21.01.2021), MEIER99, Magnetismus, 14.01.2021. https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetismus#Magnetisches_Moment_von_Elementarteilchen

[11] de.wikipedia.org (21.01.2021) PAULT, Diamagnetismus, 19.12.2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Diamagnetismus#Modell>

[10] de.wikipedia.org (21.01.2021), PETERFRANKFURT, Lenz'sche Regel, 08.01.2021. https://de.wikipedia.org/wiki/Lenzsche_Regel

[1] de.wikipedia.org (18.01.2021), PYRRHOCORAX, Feldlinien, 29.11.2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Feldlinie#Beispiele>

[2] de.wikipedia.org (18.01.2021), PYRRHOCORAX, Feldlinien, 29.11.2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Feldlinie#Eigenschaften>

[9] de.wikipedia.org (22.01.2021), PYXLYLST, Ferromagnetismus, 21.01.2021. https://de.wikipedia.org/wiki/Ferromagnetismus#Stoffe_mit_ferromagnetischen_Eigenschaften