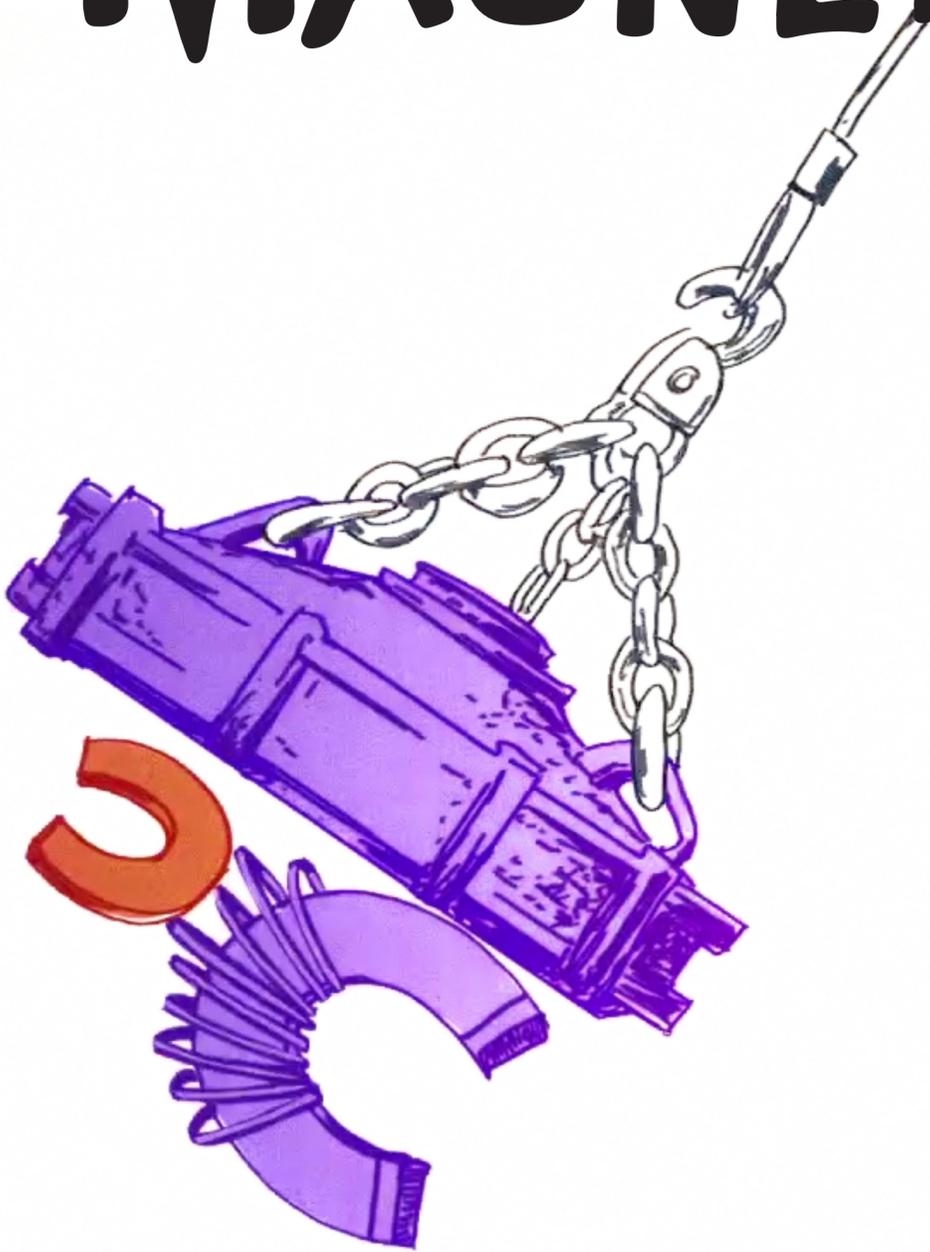


MAGNETISMUS ^{hoch 4}



Lernmaterialien
entwickelt von der
Universität Münster für
die Lehramtsausbildung
im Fach Physik für das
Thema Magnetismus.
(Stand 06/2020)

1	Was ist hier „magnetisch“?	3
2	Das magnetische Pendel	5
3	Teaser „Magnetismus hoch 4“	8
4	Noch mehr Phänomene...	9
5	Magnetismus modellieren	11
6	Anwendungen & Phänomene	13
7	Ein magnetisches Gedächtnis	15
8	Eine Frage der Größenordnung	17
9	Die Bezirke des Herrn Weiss	18
10	Magnetisierungskurven	21
11	Elektronen als Träger der magnetischen Momente	23
12	Wie entstehen magnetische Momente?	26
13	Spin schlägt Strom	30
14	Was ist zu erwarten?	31

1. WAS IST HIER „MAGNETISCH“?

Ein typischer Einstieg in das Thema Magnetismus in der Schule erfolgt häufig mit der nachfolgenden Aufgabe die vielen Schülerinnen und Schülern zu Beginn der weiterführenden Schule gestellt wird:

„Findet heraus, welche Objekte im Klassenraum von einem Magneten angezogen werden!“

Ein Beispiel für eine solche Aufgabe aus einem Schulbuch für die Jahrgangsstufe 5 und 6 findet Ihr in der rechten Abbildung!

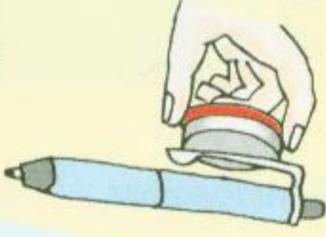
Genau mit dieser Aufgabe soll auch dieses Seminar zum Magnetismus beginnen! In der Kiste findet Ihr typische Schulmagneten mit denen Ihr den Versuch selbst durchführt! Bearbeitet dazu die Aufgabe auf Seite 4!

Protokoll zum Versuch: Magnetische Anziehung

Aufgabe: Prüfe unterschiedliche Stoffe auf magnetische Anziehung

Vorbereitung:

- Vermutung: Alle Gegenstände aus Metallen werden angezogen.
- Geräte: Magnet, verschiedene Gegenstände aus unterschiedlichen Stoffen, z. B. aus der Federmappe
- Sicherheit: Nickel und Cobalt nicht aus den Döschen nehmen.
- Versuchsanordnung



Durchführung: Den Magneten von oben an den jeweiligen Gegenstand halten

Beobachtung:

- Der Magnet hebt einen Gegenstand hoch, Kraft ist spürbar: Anziehung.
- Sonst herrscht keine magnetische Anziehung

Gegenstand	Stoff, aus dem er besteht	Zieht an	Zieht nicht an
Kugelschreiber	Kunststoff		X
Kugelschreiberfeder	Eisen	X	
Spitzerklinge	Eisen	X	
Fahrradfelge	Aluminium		X
Bleistift	Holz		X
Ehering der Lehrerin	Gold		X
Roter Armband	Kupfer		X
Filmdöschen: Silberiger Barren darin	Nickel		X
Filmdöschen: Bläuliches Metall darin	Cobalt	X	
		X	

Ergebnis: Die Vermutung ist falsch. Es werden nur Gegenstände aus Eisen, Nickel oder Cobalt angezogen. Andere Metalle werden vom Magneten nicht angezogen.

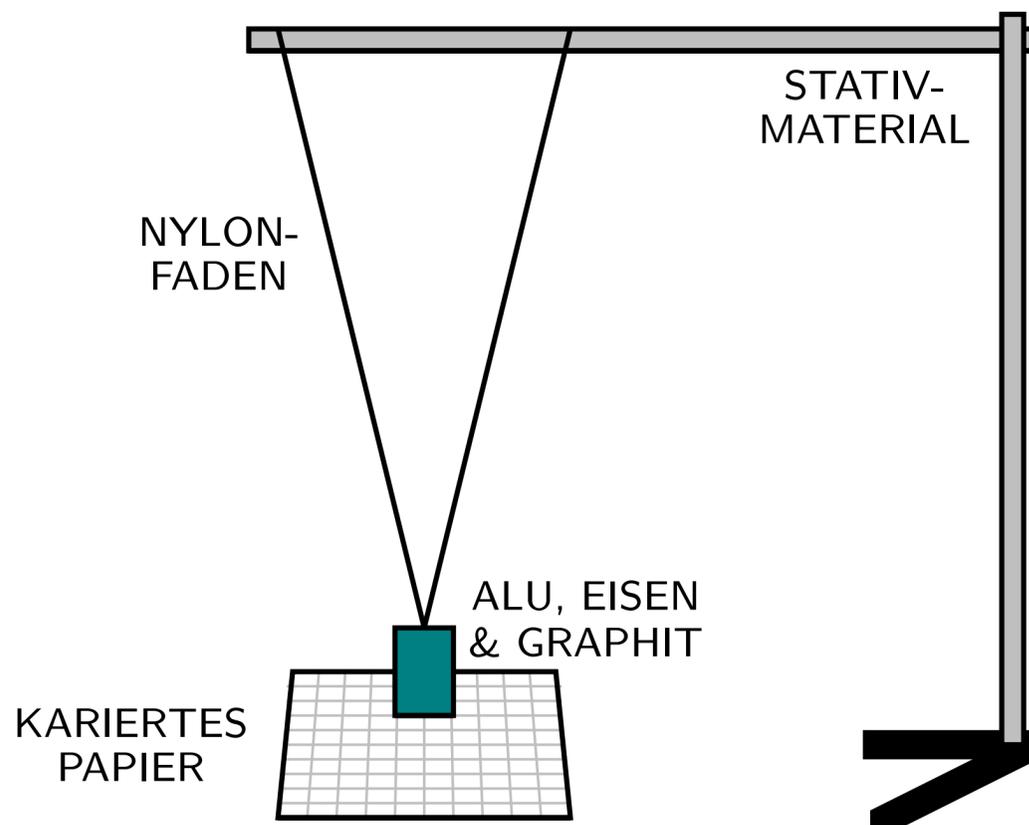
Mögliche Fehler:

- Der Magnet könnte zu schwach gewesen sein.
- Wir haben nicht alle möglichen Stoffe geprüft.

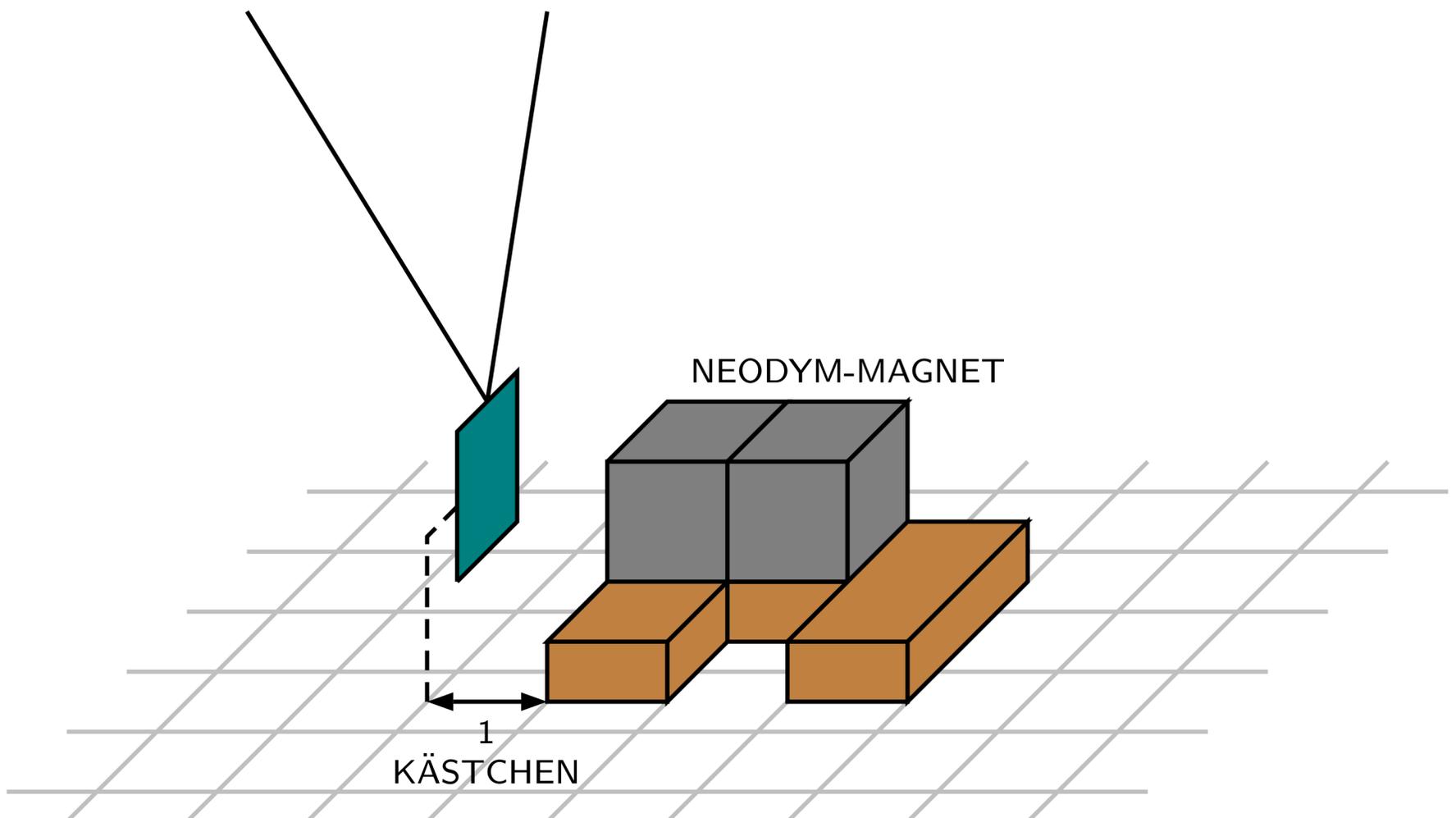
2. DAS MAGNETISCHE PENDEL

Jetzt wird „richtig“ experimentiert! Die für das Experiment notwendigen Gegenstände findet Ihr in der Kiste.

Alles im Experiment „magnetisches Pendel“ dreht sich um die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Graphit, Aluminium und Eisen. Aus jedem dieser Materialien befindet sich ein dünnes Plättchen in der Kiste. Denken wir an die Aufgabe aus Kapitel 1 zurück „wissen“ wir doch bereits, dass von diesen drei Stoffen lediglich Eisen von einem Magneten angezogen wird. Wir überprüfen diese Aussage durch folgenden Versuchsaufbau. Beginnt den Versuch mit Graphit oder Aluminium und untersucht als letztes Eisen.



Das Plättchen aus Aluminium, Eisen oder Graphit hängt an einem dünnen Nylonfaden wenige Millimeter über der Tischplatte, sodass es frei schwingt. Durch diese Aufhängung reagiert das Plättchen sehr sensibel auf äußere Einflüsse, sodass Ihr bei der Versuchsdurchführung sehr vorsichtig und ruhig vorgehen müsst. Am wichtigsten ist es, dass sich das Plättchen zu Beginn des Versuchs in Ruhe befindet. Diese Ruheposition könnt Ihr mithilfe des karierten Blattes markieren, das Ihr unter dem Plättchen befestigt, damit Ihr Veränderungen leichter erkennen könnt.



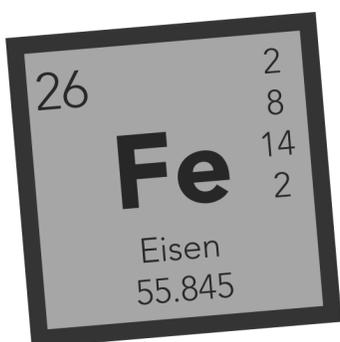
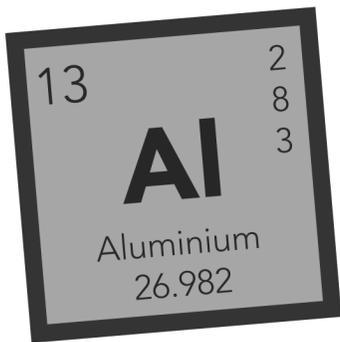
Nachdem Ihr das erste Plättchen befestigt habt, nehmt Euch die beiden starken Neodym-Magneten und nähert sie dem Pendel an. Positioniert die beiden Magneten, wie in der obigen Abbildung dargestellt ca. ein Kästchen des karierten Papierees weit vom Plättchen entfernt und beobachtet dann vorsichtig, wie das Plättchen auf die Magneten reagiert! Wenn ein eindeutiger Effekt erkennbar ist versucht den Magneten langsam vor und zurück zubewegen. Welches Verhalten zeigt sich jetzt?

Hinweis!

Das magnetische Pendel schließt sich als Experiment direkt an die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften aus Kapitel 1 an. Verglichen mit dem typischen Schalexperiment wurden nur zwei Änderungen vorgenommen:

1. Durch die Verwendung des Neodym-Magneten treten, verglichen mit einem typischen Schulmagneten, stärkere Kräfte auf. Damit sind vorhandene Wechselwirkungen leichter zu erkennen.
2. Die Plättchen reagieren durch die Pendelaufhängung im Vergleich zum Schalexperiment sehr sensibel auf Wechselwirkungen mit dem Magneten.

Notiert eure Beobachtungen! Wie reagiert Eisen, Aluminium oder Graphit, eine besondere Form von Kohlenstoff, auf den Neodym-Magneten? Geht bei der Untersuchung und der Beschreibung genau vor, um die kleinen Effekte möglichst gut zu beschreiben.



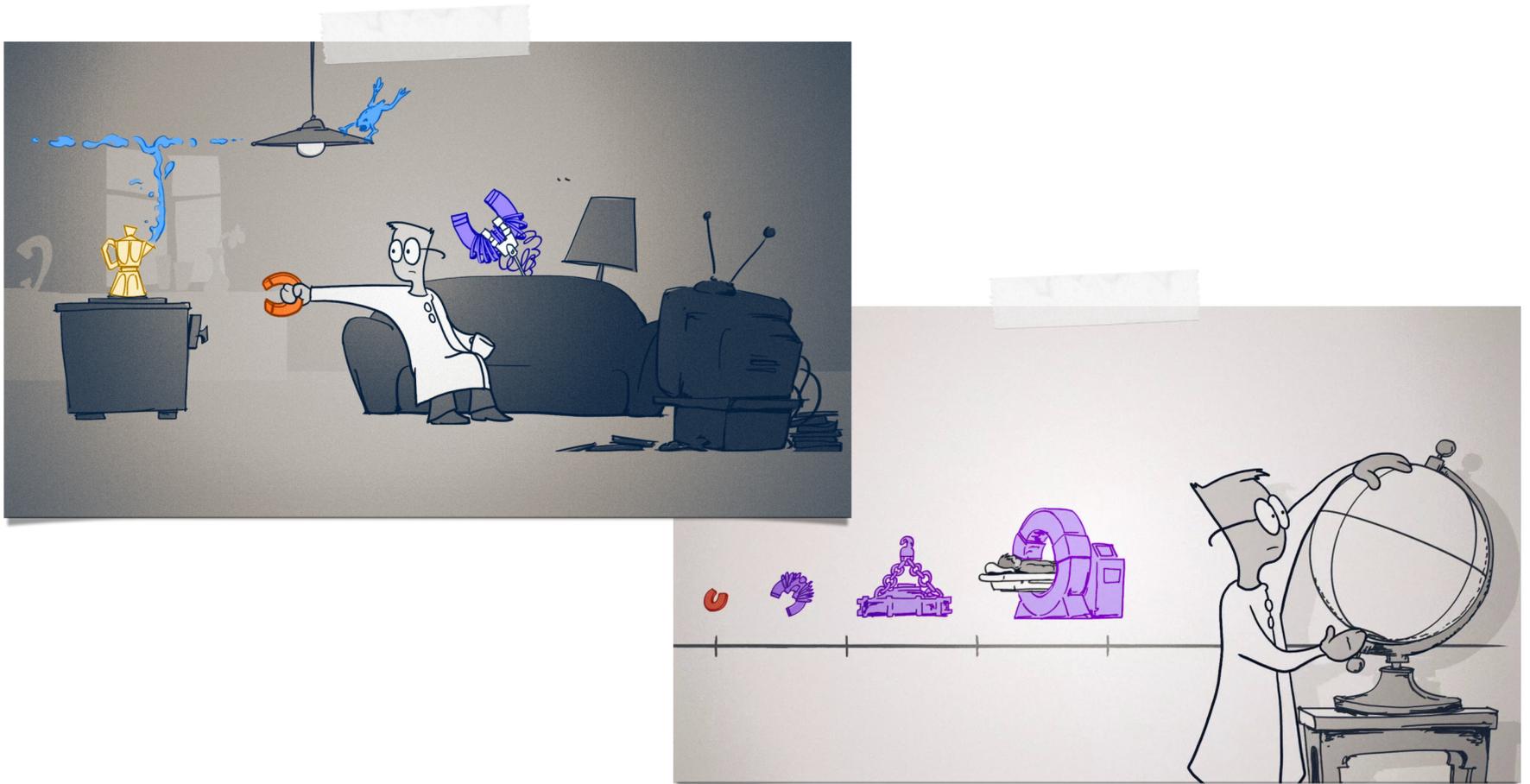
Hinweis!

Bei der verwendeten Graphit-Probe handelt es sich um pyrolytisches Graphit, eine besondere Form von Graphit, die besonders starke magnetische Eigenschaften besitzt und dem bekannte Graphit aus beispielsweise einer weichen Bleistiftmine stark ähnelt.

3. TEASER „MAGNETISMUS HÖCH 4“

Zur Einführung in das Thema Magnetismus wurde ein Kurzfilm (Teaser) entwickelt! Den Teaser könnt Ihr Euch auf den iPads unter dem entsprechenden Link ansehen. Nehmt Euch dafür in Ruhe Zeit.

Im Teaser werden einige Inhalte dargestellt, die in den Seminarsitzungen genauer untersucht werden sollen. Aus diesem Grund liefert der Teaser noch keine vollständigen Erklärungen, sondern versucht Fragen aufzuwerfen, die anschließend im Seminar behandelt werden.



Ein wichtiger Aspekt des Teasers ist die Beschreibung der eher unbekannt magnetischen Erscheinungsformen Dia- und Paramagnetismus in Ergänzung zum Ferromagnetismus! Wie wird das Verhalten von dia-, para- und ferromagnetischen Stoffen in äußeren Magnetfeldern beschrieben?

Erinnert Euch an die vorherige Aufgabe. Welcher Stoff gehört zu welcher magnetischen Erscheinungsform und warum? Tragt dies auf linken Seite zum Experiment nach!

4. NOCH MEHR PHÄNOMENE...

Die folgenden Phänomene betrachten wir zusammen in einer Demonstrationsphase. Beschreibt nachfolgend kurz, was Ihr im Experiment beobachtet habt und skizziert den Versuchsaufbau! Notiert Euch auch, was für den Einsatz der Experimente in der Praxis wichtig ist.

Die beiden Experimente zeigen typische Phänomene, die sich mit schulischen Mitteln auf einfache Art und Weise auch im Klassenraum realisieren lassen!

Ein „Knick“ im Wasser:

Diamagnetische Levitation:

Nachdem Ihr nun in den Experimenten und im Teaser die grundlegenden Phänomene zum Dia-, Para- und Ferromagnetismus kennengelernt habt, gilt es diese auch zu verstehen. Einen ersten Schritt dazu stellt die physikalische Modellierung der Phänomene dar. Damit beginnen wir im folgenden Kapitel.

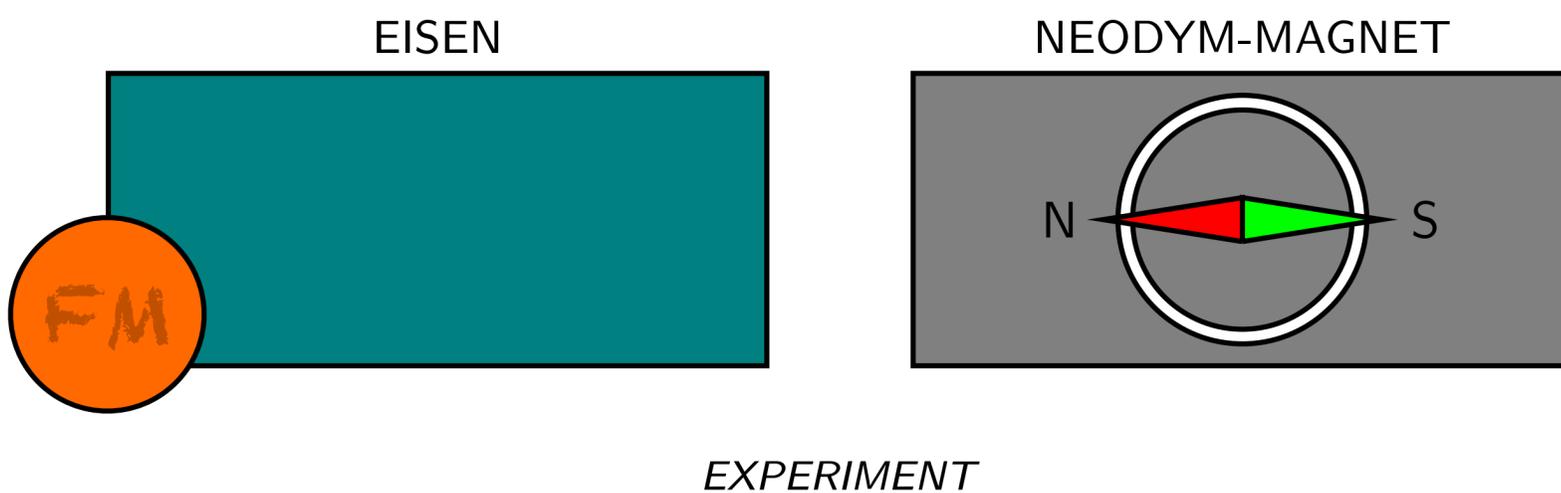
5. MAGNETISMUS MODELLIEREN

Mithilfe eines Kompasses lässt sich die Ausrichtung eines Magneten im Experiment bestimmen.

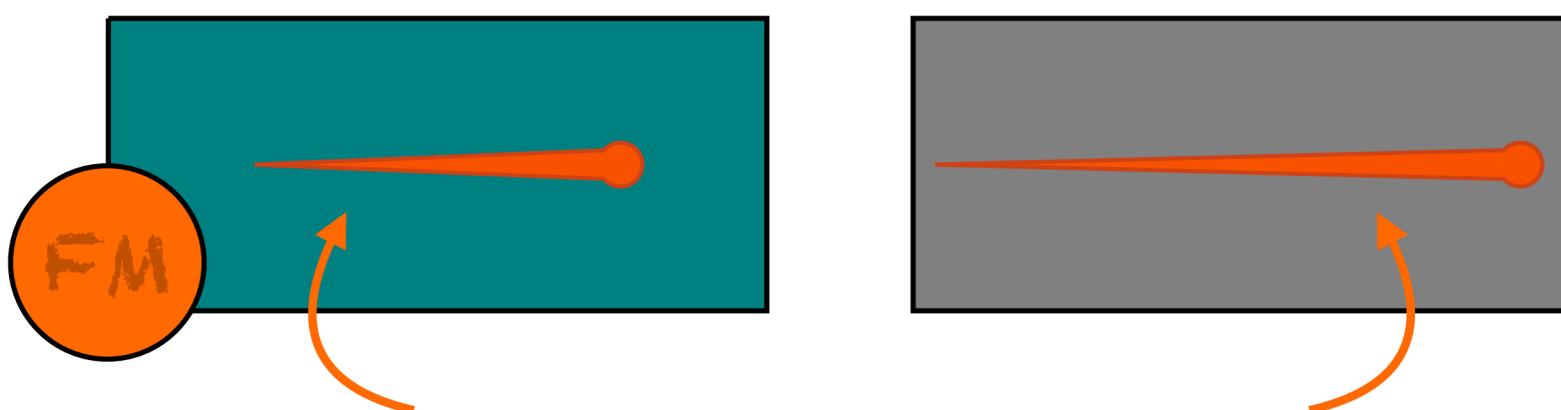
Um die Ausrichtung physikalisch beschreiben zu können, kann die sogenannte *Magnetisierung* genutzt werden. Die *Magnetisierung* beinhaltet zwei Informationen:

1. In welche Richtung erfolgt die Wechselwirkung, d.h. liegt eine Anziehung oder Abstoßung vor (Pfeilrichtung)?
2. Wie stark ist die Wechselwirkung zwischen Objekt und Magnet (Pfeillänge)?

Durch das Magnetfeld des Neodym-Magneten ergibt sich auch im Eisen eine *Magnetisierung*, die unten als Pfeil dargestellt ist. Die *Magnetisierung* ist in Richtung des Magnetfeldes des Neodym-Magneten ausgerichtet, aber die Stärke ist im Vergleich zu diesem geringer. Dies wird durch die jeweiligen Eigenschaften der „Tropfen-Pfeile“ ausgedrückt.

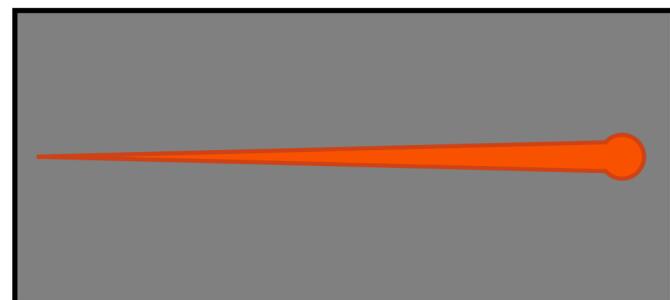
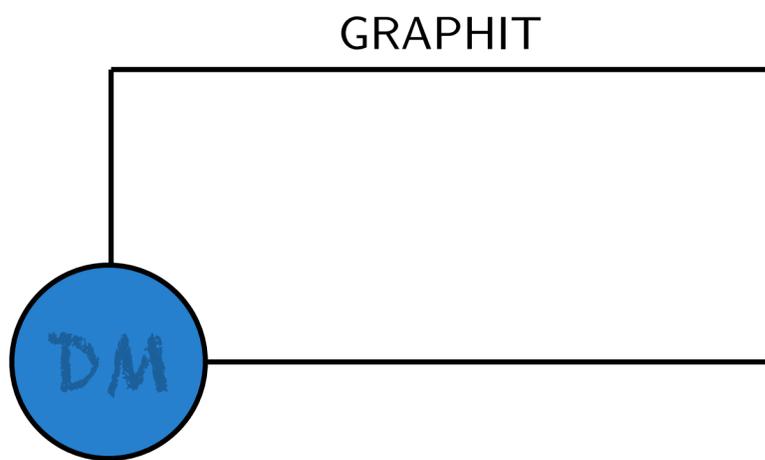
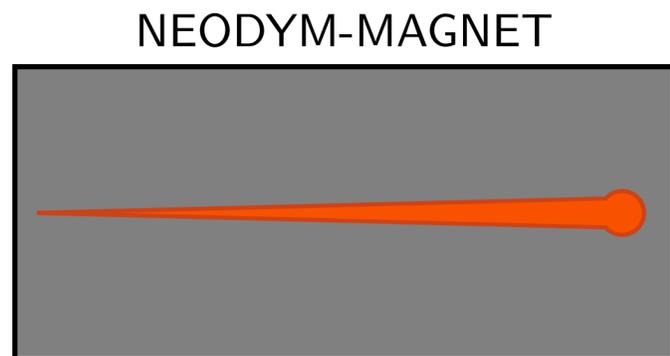
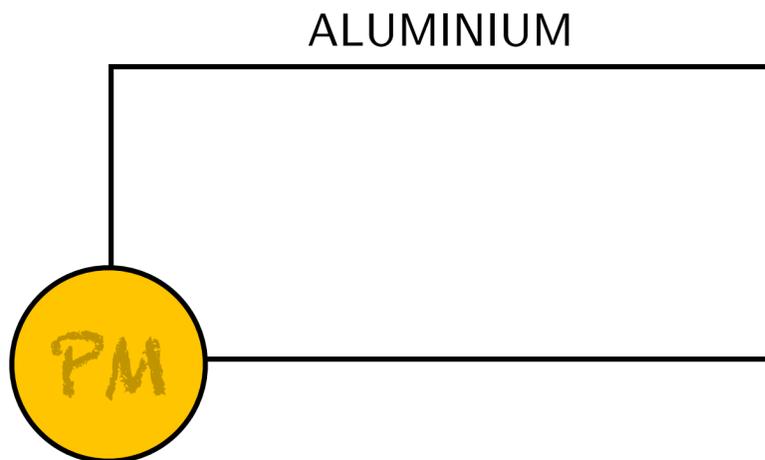


MODELLIERUNG (MAGNETISIERUNG)



Magnetisierung parallel ausgerichtet, aber unterschiedlich stark!

Skizziert mithilfe der Experimente des Realexperimentes auch für Graphit und Aluminium die *Magnetisierung*, die sich beim magnetischen Pendel einstellt:



Welche allgemeinen Aussagen lassen damit für die *Magnetisierung* dia-, para- und ferromagnetischer Stoffe im äußeren Magnetfeld treffen? Diese Kategorisierung und Beschreibung ist wichtig für das weitere Verständnis!

6. ANWENDUNGEN & PHÄNOMENE

Wie der Teaser u.a. gezeigt hat existiert Magnetismus in unterschiedlichsten Formen überall in unserer Welt und unserem Alltag. Jetzt gilt es herauszufinden welche Formen von Magnetismus mit welchen Kontexten verbunden sind. In der Kiste findet Ihr dazu ein Memory!

Die Hälfte der Memorykarten zeigt Abbildungen von Anwendungen und Phänomenen die jeweils einer Erscheinungsform von Magnetismus zuzuordnen sind. Die andere Hälfte enthält die entsprechende Bezeichnung sowie in der rechten unteren Ecke einen Hinweis auf die magnetische Erscheinungsform, wie im folgenden Beispiel abgebildet:



Die vier am häufigsten auftretenden Erscheinungsformen von Magnetismus sind:

FM FERROMAGNETISMUS

DM DIAMAGNETISMUS

PM PARAMAGNETISMUS

EM ELEKTROMAGNETISMUS

Diese vier Formen bilden „Magnetismus hoch 4“! In diesem Kurs beschäftigen wir uns aber nur wenig mit Elektromagnetismus.

Was ist zu tun?

Spielt eine Runde Memory und tragt die Paare in die nachfolgende Tabelle ein!
 Welche magnetischen Erscheinungsformen treten in welchen Kontexten auf?

MAGNETISCHE ERSCHEINUNGSFORM	ANWENDUNG / NATURPHÄNOMEN
<i>Ferromagnetismus</i>	<i>Lautsprecher</i>

Fallen Euch noch weitere Beispiele oder Kontexte ein, in denen Magnetismus eine Rolle spielt? Tragt wenn möglich auch die jeweilige Erscheinungsform von Magnetismus ein.

MAGNETISCHE ERSCHEINUNGSFORM	ANWENDUNG / NATURPHÄNOMEN

7. EIN MAGNETISCHES GEDÄCHTNIS

In Kapitel 2 haben wir untersucht, wie sich dia-, para- und ferromagnetische Stoffe im magnetischen Feld eines Magneten verhalten und in Kapitel 5 haben wir gesehen, wie sich dieses Verhalten mithilfe der *Magnetisierung* beschreiben lässt. Aber was passiert mit der *Magnetisierung*, wenn der Magnet entfernt wird?

Um diese Frage zu beantworten, braucht Ihr erneut die Plättchen aus Aluminium, Graphit und Eisen sowie die beiden Neodym-Magneten und einen Kompass!

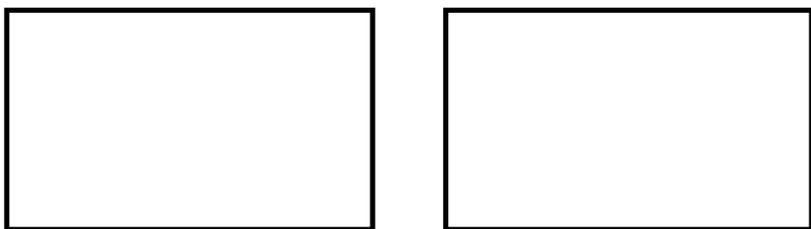
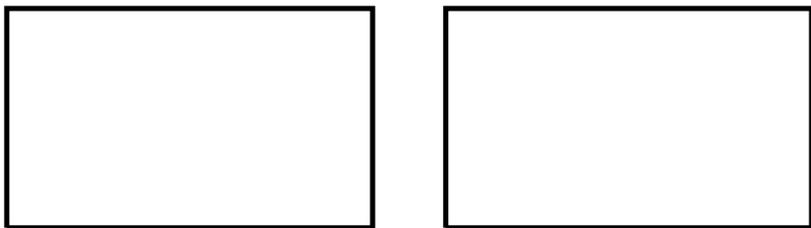
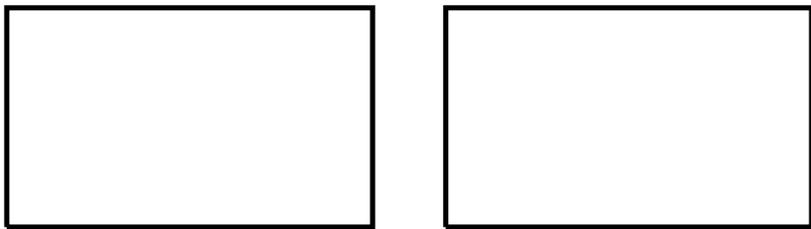
Was ist zu tun?

Versucht selbstständig herauszufinden, was mit der *Magnetisierung* passiert, wenn die Stoffe zunächst im Magnetfeld des Neodym-Magneten magnetisiert werden und man anschließend den Neodym-Magneten entfernt! Wie kann Euch hier der Kompass helfen? Skizziert die Vorgehensweise und den Versuchsaufbau!

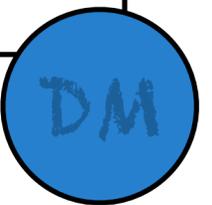
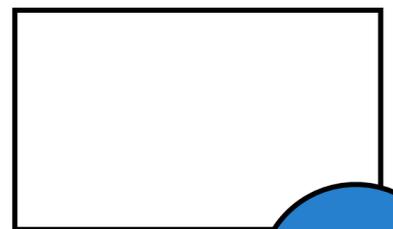
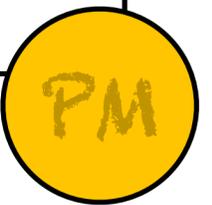
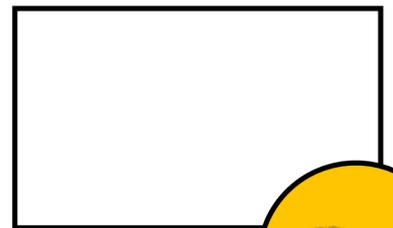
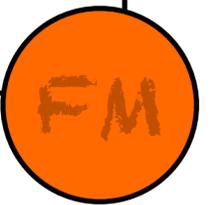
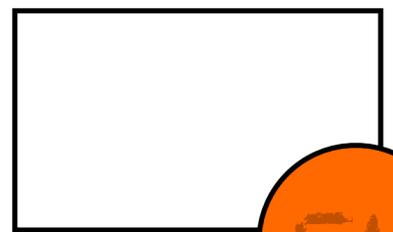
Könnt Ihr erklären was der Titel des Kapitels „Ein magnetisches Gedächtnis“ bedeutet und auf welche Stoffe sich dieser bezieht? Welche Einschränkung ist zu nennen?

Wie lassen sich die vorherigen Überlegungen und experimentellen Erkenntnisse mithilfe der *Magnetisierung* für die unterschiedlichen Stoffe bzw. Erscheinungsformen von Magnetismus beschreiben?

mit Magnetfeld (vorher)



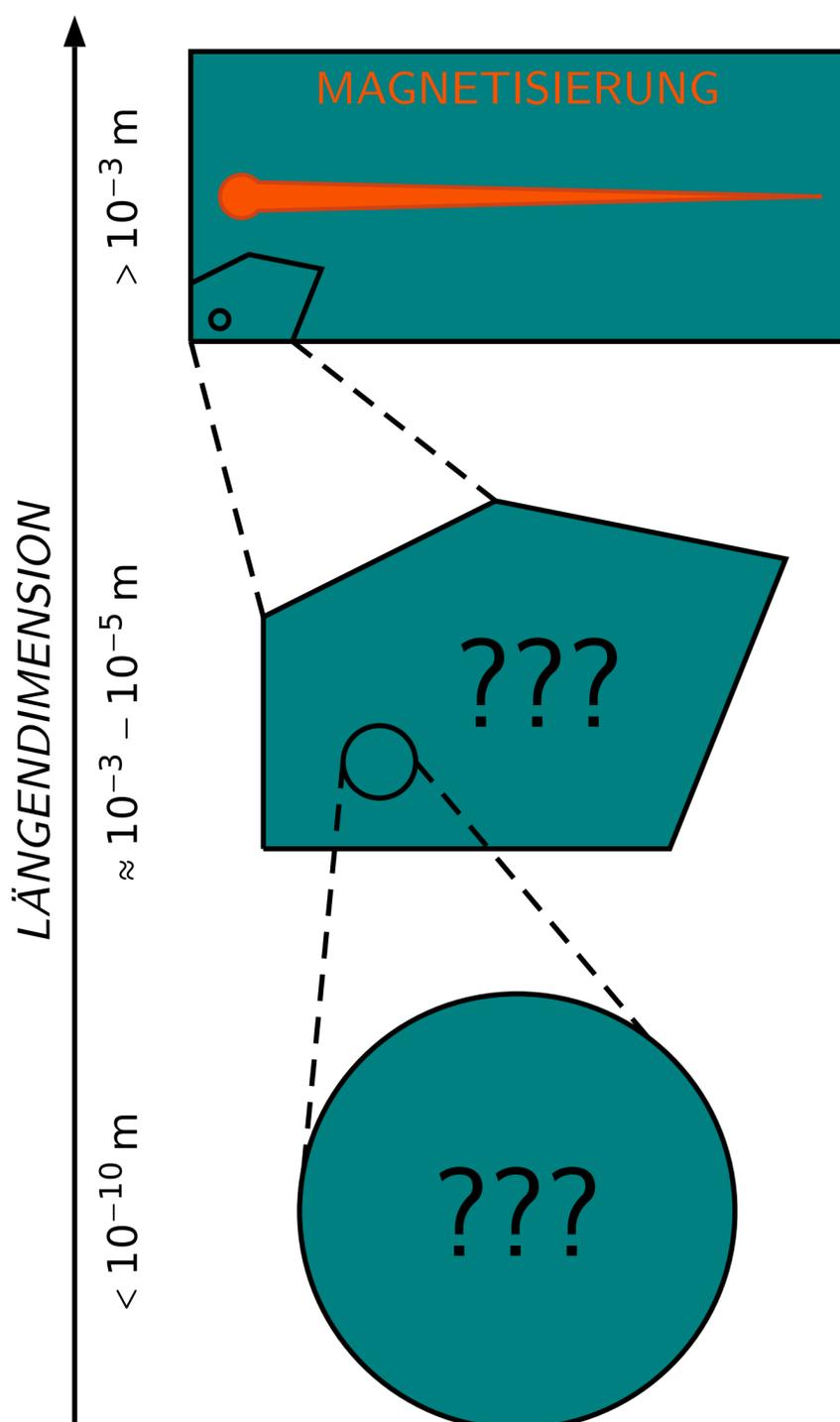
ohne Magnetfeld (nachher)



8. EINE FRAGE DER GRÖßENORDNUNG

In den vorherigen Kapiteln dieses Forscherbuchs habt Ihr unterschiedliche Formen von Magnetismus phänomenologisch kennengelernt (siehe Kapitel 2). Weiterhin wurde mit der *Magnetisierung* eine Modellgröße eingeführt, die es uns erlaubt magnetische Phänomene abstrakt zu beschreiben. Als Repräsentation für die Magnetisierung wurde ein „Tropfenpfeil“ gewählt.

In den nachfolgenden Kapiteln versuchen wir die Ursachen der *Magnetisierung* zu verstehen. Dazu stelle man sich vor, dass immer kleinere Längendimensionen untersucht werden. Wir „schauen“ somit immer genauer hin...



Die *Magnetisierung* zur Beschreibung von Proben der Längendimension $> 10^{-3} \text{ m}$ wurde bereits in **Kapitel 5** eingeführt.

Im Anschluss an diese Beschreibung untersuchen wir in **Kapitel 9** bereits eine kleinere Größenordnung im Bereich von 1 mm zu 1 μm . Hier betrachten wir die so genannten *Weisschen Bezirke*.

Ab **Kapitel 11** befinden wir uns in der subatomaren Dimension. Hier kommt Ihr den Ursachen der Magnetisierung auf die Spur. Die entscheidende Rolle hier spielen die *magnetische Momente* von Elektronen.

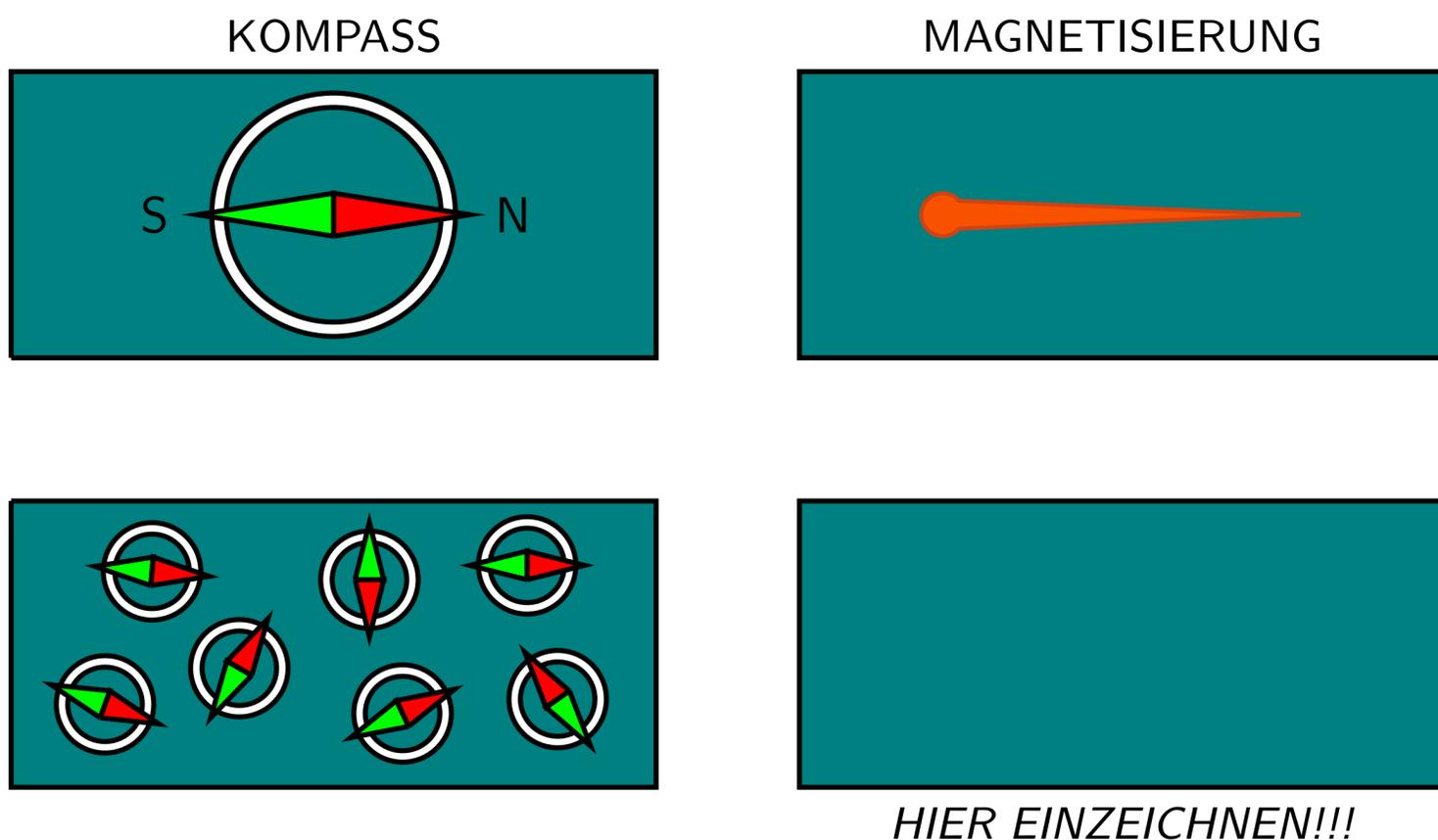
Diese Idee der immer kleiner werdenden Längendimension ist für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel wichtig.

9. DIE BEZIRKE DES HERRN WEISS

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, versuchen wir der Ursache der *Magnetisierung* durch eine genauere Betrachtung - quasi einen Blick durch eine Lupe - auf die Spur zu kommen. Eine ähnliche Idee verfolgte der Physiker Pierre-Ernest Weiss schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts.

Wichtig für das Verständnis ist die Einführung der *Magnetisierung* in Kapitel 5! Die *Magnetisierung* wird in Richtung der Ausrichtung eines Kompasses über einem Objekt, z.B. einem Stück Eisen, definiert. Ihr könnt an dieser Stelle auch gerne noch einmal in Kapitel 5 nachsehen!

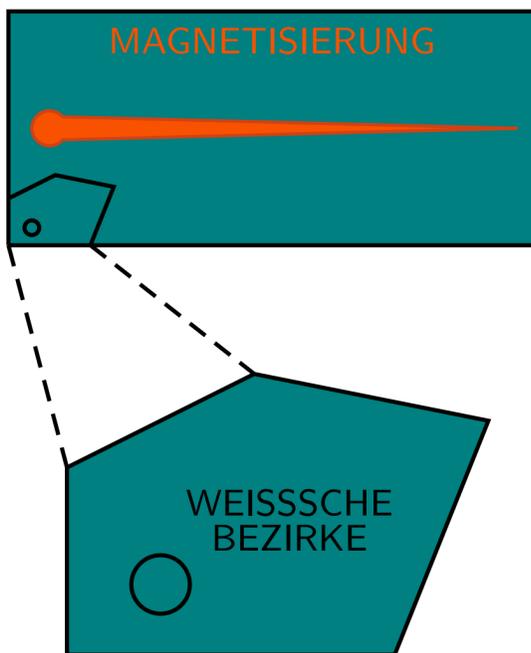
Jetzt stellen wir uns vor, dass wir an Stelle eines großen Kompass viele kleine Kompass zur Messung der *Magnetisierung* zur Verfügung haben, wie in der nachfolgenden Abbildung angedeutet ist. Zeichnet das entsprechende Bild der zugehörigen kleineren *Magnetisierungen* der einzelnen Bereiche ein!



Die von Euch eingezeichneten *Magnetisierungen* werden jeweils nur einzelnen Bereichen zugeordnet. Solche Bereiche existieren in Ferromagneten tatsächlich und werden als *magnetische Domänen* oder *Weissche Bezirke* bezeichnet.

Hinweis!

Bei dia- und paramagnetischen Stoffen existieren keine *Weisschen Bezirke*. Eine genauere Beschreibung für diese Formen erarbeiten wir in Kapitel 11.



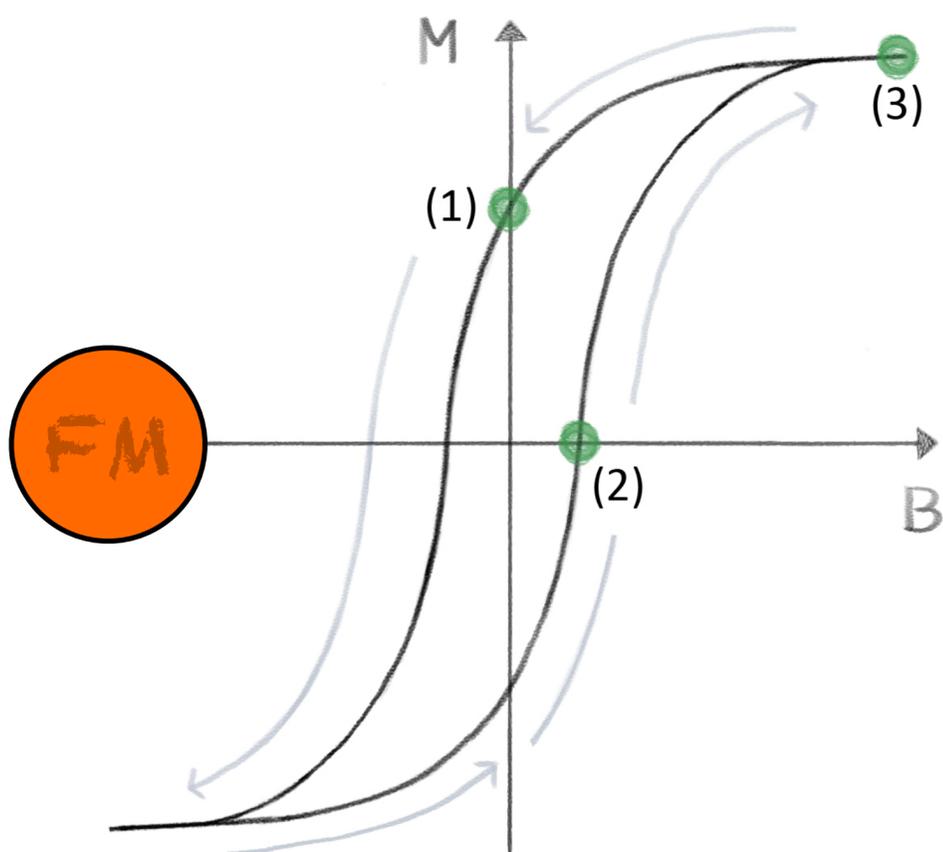
Zurück zur Abbildung auf Seite 18! Wir betrachten erneut die *Weisschen Bezirke* eines Eisenstückes. Auf den iPads findet Ihr ein Widget, also eine interaktive Simulation, mithilfe dessen Ihr die Eigenschaften der *magnetischen Domänen* und der *Magnetisierung* M insgesamt in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld B untersuchen könnt.

Aufgaben:

1. Kennt Ihr Realexperimente an denen sich das Widget orientiert? Überlegt welchen experimentellen Vorgang das Widget im Kern darstellt und nennt mögliche zugehörige Experimente
2. Welcher Zusammenhang besteht zwischen den einzelnen *magnetischen Domänen* und der *Magnetisierung* eines Objektes? Schaut Euch das Widget an und versucht selbst ein einfaches Beispiel graphisch zu skizzieren!

Unten abgebildet findet Ihr noch einmal die Kurve des Widgets. Dieser Verlauf der *Magnetisierung* M in Abhängigkeit vom Magnetfeld B wird als Hysteresekurve bezeichnet. Zusätzlich zum Widget sind nun drei Punkte (1-3) auf eben dieser Hysteresekurve ausgezeichnet.

3. Versucht die Bedeutung der drei ausgezeichneten Punkte (1-3) jeweils mit Bezug zu einem Realexperiment *schülergerecht* zu erklären!



10. MAGNETISIERUNGSKURVEN

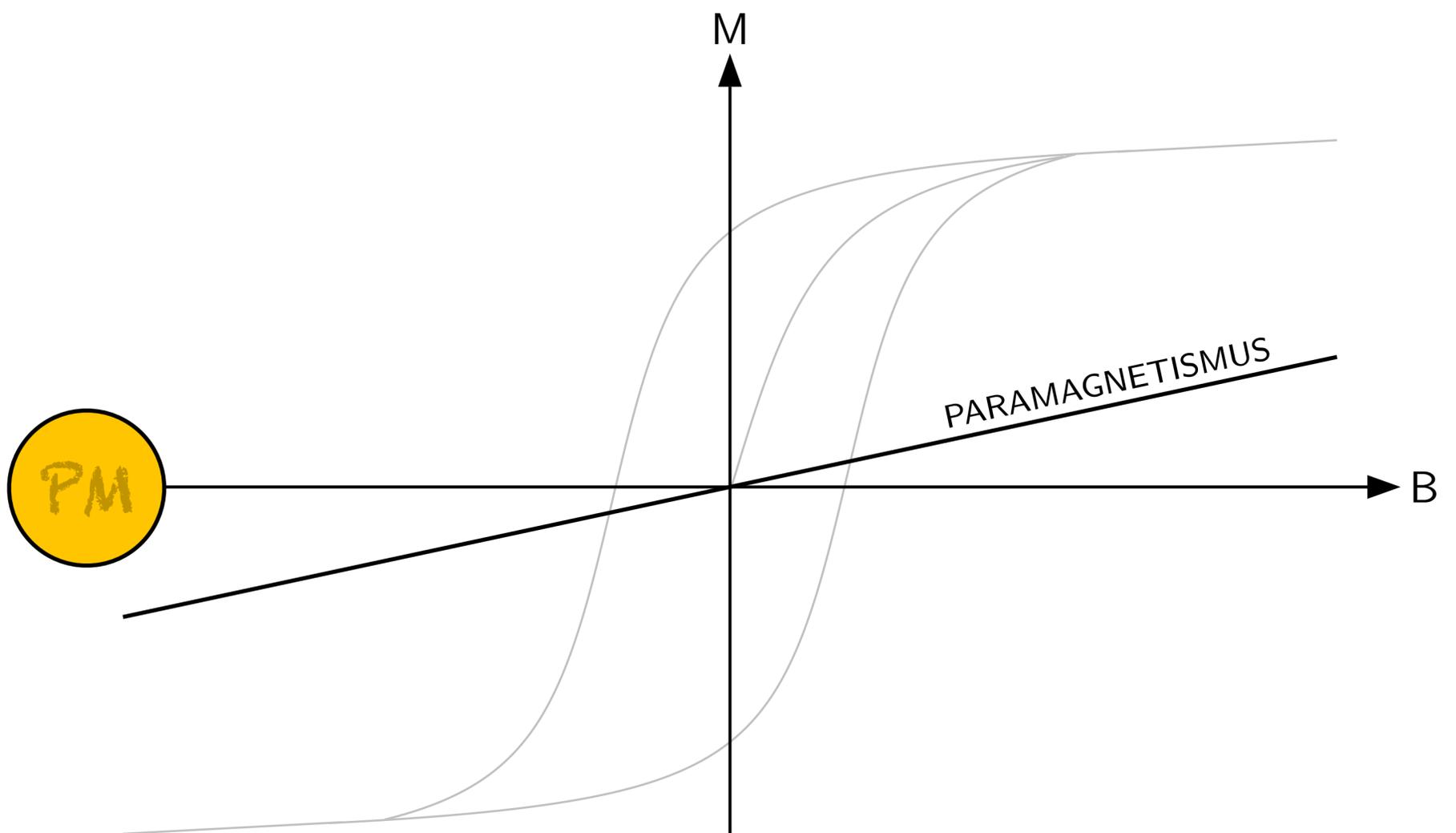
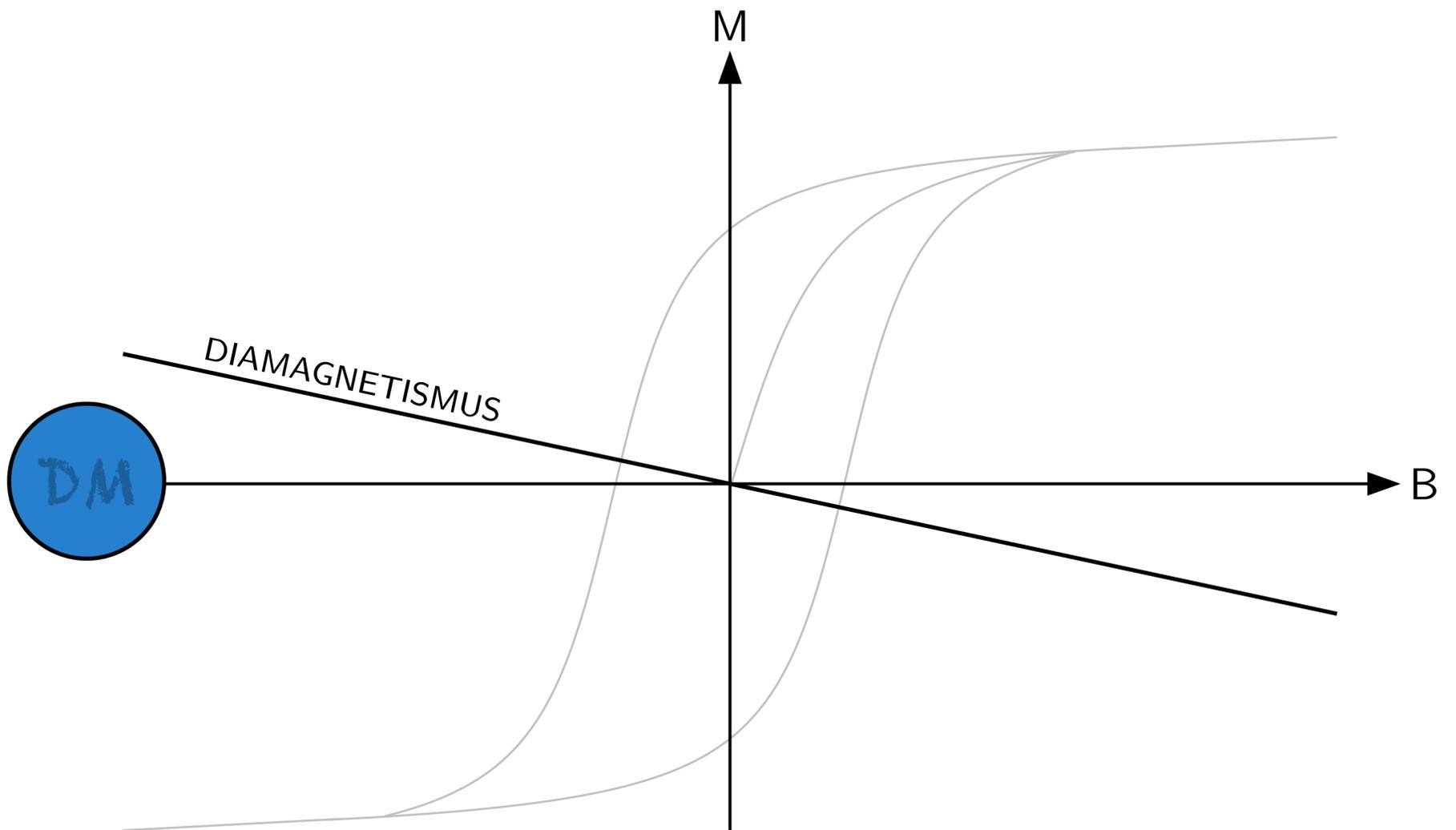
Die ferromagnetische Hystereseurve ergibt sich durch die Messung der *Magnetisierung* in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld. Ähnliche Experimente lassen sich grundsätzlich auch für dia- und paramagnetische Substanzen durchführen!

Was ist zu tun?

Versucht mithilfe der dargestellten Magnetisierungskurven das Verhalten eines dia- bzw paramagnetischen Stoffes in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld zu beschreiben! Was sagen die Magnetisierungskurven über die Experimente aus Kapitel 2 sowie Kapitel 7 und eure dortigen Erkenntnisse aus?

Diamagnetismus:

Paramagnetismus:



11. ELEKTRONEN ALS TRÄGER DER MAGNETISCHEN MOMENTE

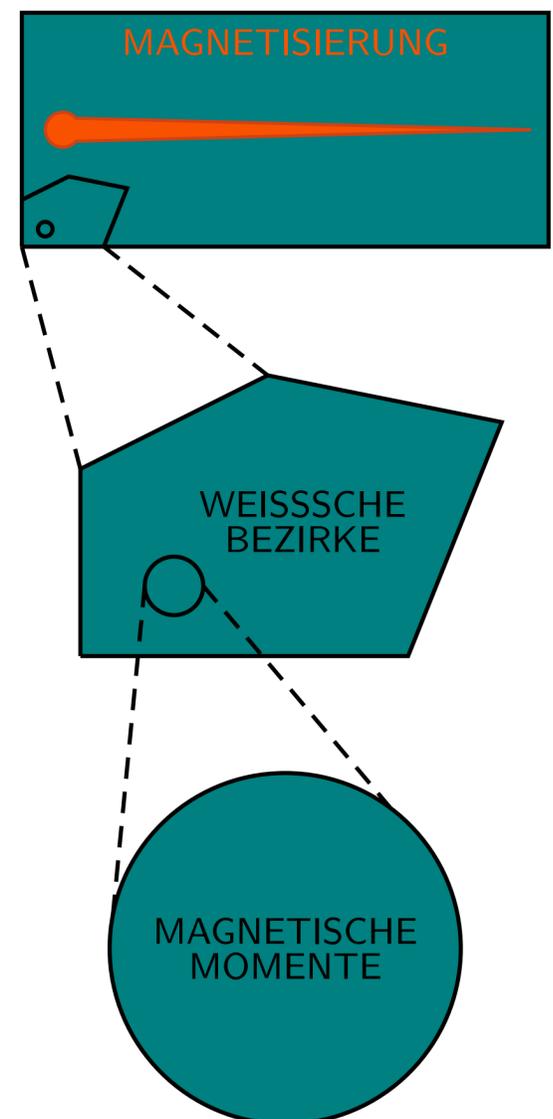
Wenn Ihr die bisherigen Kapitel betrachtet, könnt Ihr feststellen, dass alle Erklärungen und Beschreibungen mithilfe der *Magnetisierung* sich auf die Stoffe als Ganzes beziehen. Im Falle von ferromagnetischen Stoffen kann man in einem nächsten Schritt auch *Weissche Bezirke* untersuchen, die aufgrund ihrer Größe weiterhin einer makroskopischen Dimension zugeordnet werden können. Doch damit sind wir noch nicht am Ende...

Dieses Kapitel soll die mikroskopische Beschreibung aller drei Formen von Magnetismus behandeln. Wir befinden uns nun im subatomaren Bereich, also in einer Größenordnung unter 10^{-10} m!

Die *Magnetisierung* eines Stoffes oder eines *Weisschen Bezirkes* ergibt sich aus den *magnetischen Momenten*. Die Träger dieser *magnetischen Momente* sind dabei nichts anderes als die Elektronen des Stoffes. Man bezeichnet sie somit als die kleinstmöglichen Magneten, die für sämtliche magnetischen Eigenschaften verantwortlich sind.

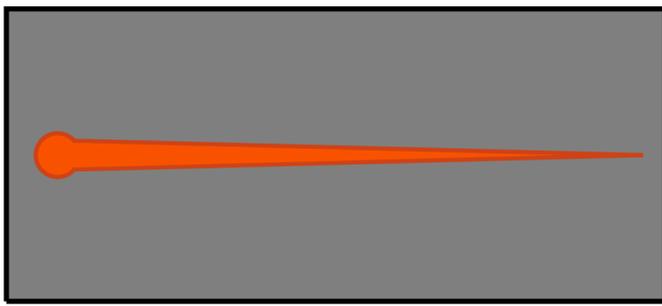
Jedem Elektron kann dann, ähnlich wie bei der pfeilartigen Darstellung der *Magnetisierung* in Kapitel 5, ein kleiner Pfeil zugeordnet werden. Der Pfeil beschreibt wieder die Richtung und Stärke der magnetischen Eigenschaften. In diesem Fall spricht man jedoch von mikroskopischen *magnetischen Momenten* an Stelle der makroskopischen Größe *Magnetisierung*.

Als Beispiel betrachten wir zunächst wieder ein Stück Eisen. Ihr wisst bereits, welche *Magnetisierung* sich in einem äußeren Magnetfeld ergibt! Analog zu dieser Beschreibung richten sich auch die *magnetischen Momente* parallel zum äußeren Magnetfeld, wie rechts dargestellt aus.

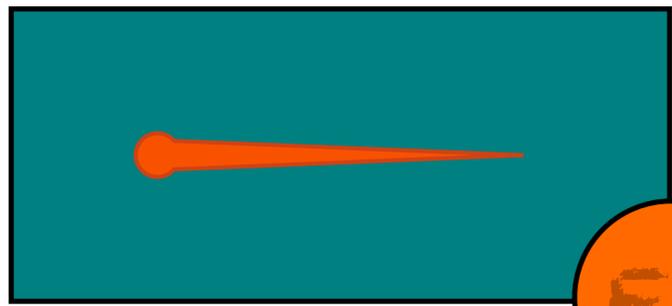


Jeder kleine Pfeil repräsentiert das magnetische Moment eines einzelnen Elektrons.

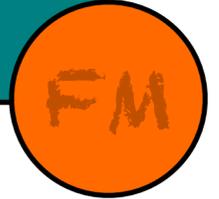
MAGNETISIERUNG



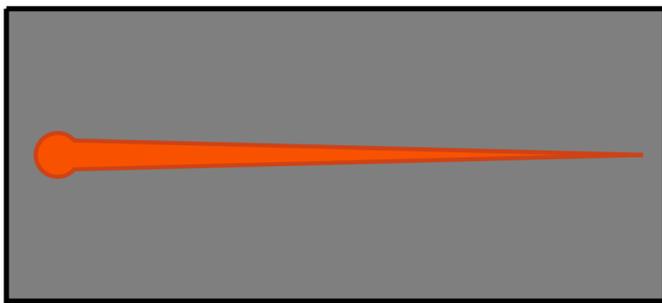
MAGNET



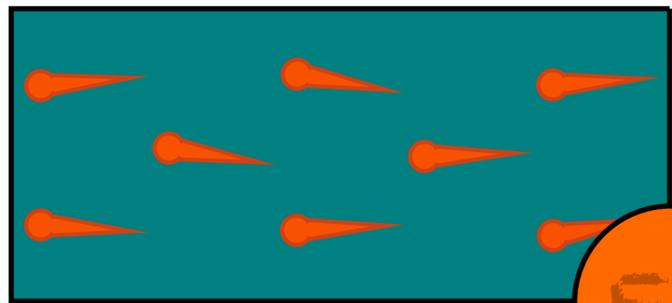
EISEN



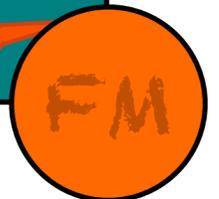
MAGNETISCHE MOMENTE



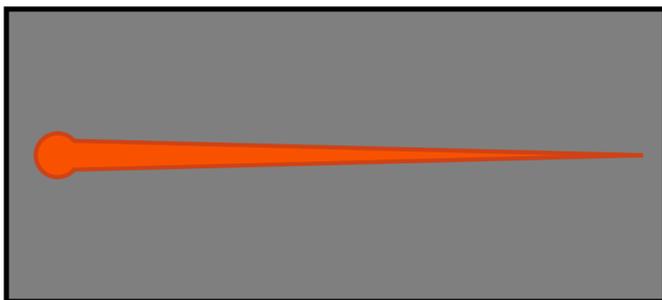
MAGNET



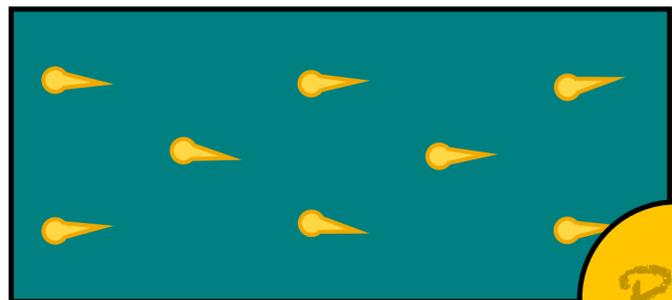
EISEN



Auch für para- und diamagnetische Stoffe lässt sich die Wirkung eines Magneten auf ein Objekt mithilfe der *magnetischen Momente* durch Pfeile modellieren. Bei Aluminium richten sich die Pfeile, genau wie die *Magnetisierung*, in Richtung des Magnetfeldes aus. Sie sind jedoch schwächer.



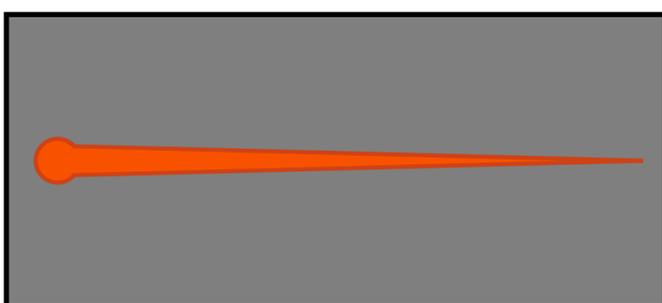
MAGNET



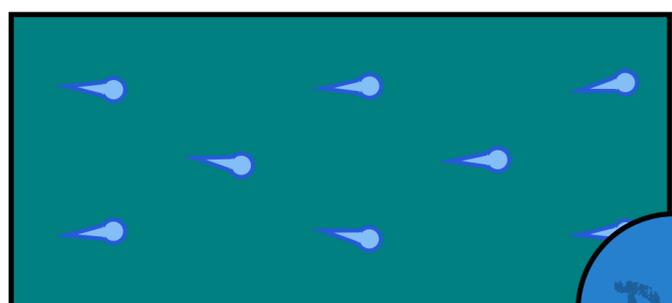
ALUMINIUM



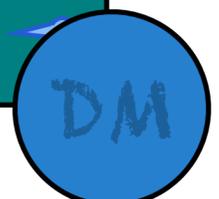
Für Graphit sind die *magnetischen Momente* auch schwächer als bei Eisen. Aufgrund Eigenschaften der *Magnetisierung*, sind die *magnetischen Momente* hier entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet!



MAGNET



GRAPHIT



Die *magnetischen Momente* sollen von nun an zur mikroskopischen Beschreibung der unterschiedlichen Magnetismusformen genutzt werden. Aus diesem Grund gilt es die Eigenschaften der *magnetischen Momente* genauer zu betrachten.

Aus den einführenden Experimenten zur Abstoßung und Anziehung lässt sich bereits eine Erkenntnis ableiten, die durch die Modellierung auf der vorherigen Seite nochmals hervorgehoben wird:

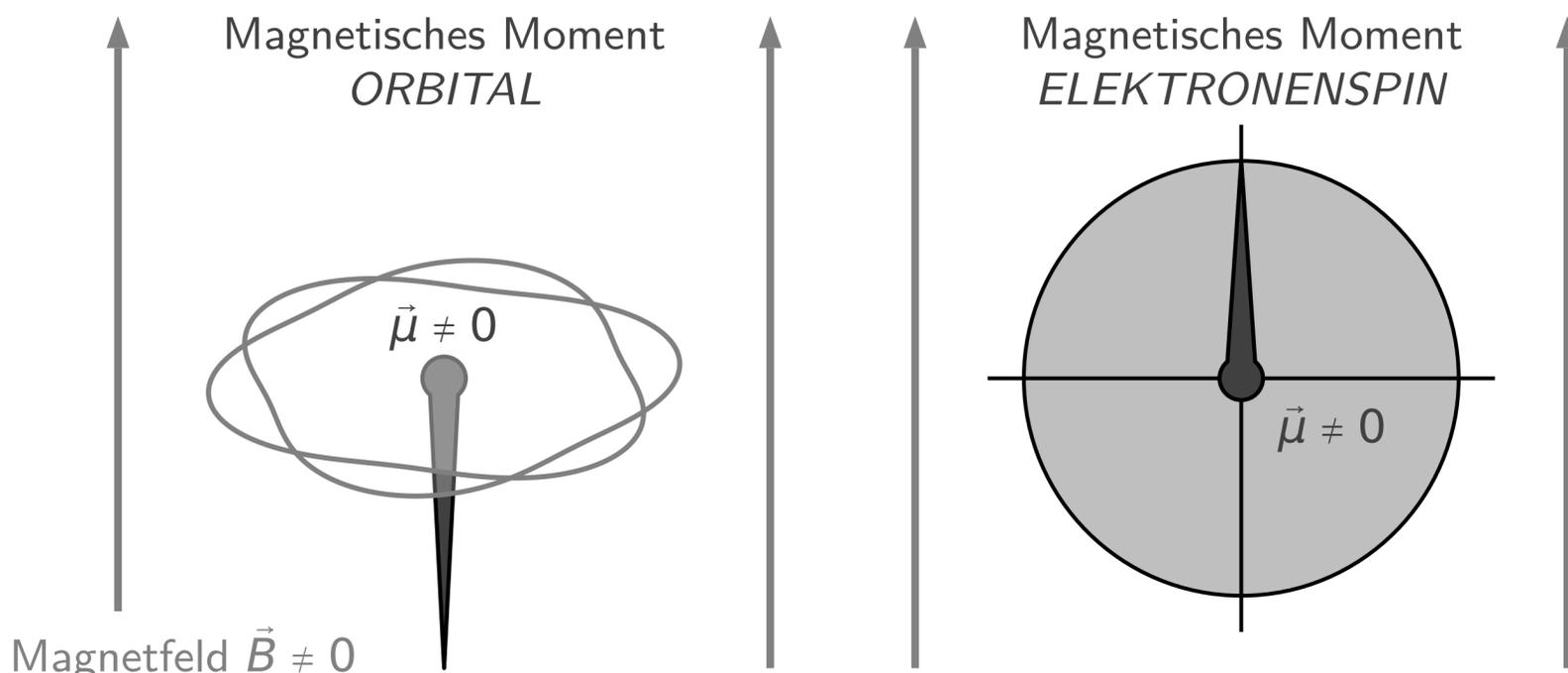
Bei der Betrachtung *magnetischer Momente* müssen **zwei Arten von *magnetischen Momenten* unterschieden werden.**

Die beiden Arten *magnetischer Momente* lassen sich zwei unterschiedlichen Ursachen zuordnen, die jeweils ein *magnetisches Moment* erzeugen:

1. *Magnetische Momente* ergeben sich aus dem **Elektronenspin**.
2. *Magnetische Momente* resultieren aus **mikroskopischen Strömen im Orbital**

Hinweis!

Erinnert Euch an die Beschreibung von Elektronen in der Atomphysik. Zur vollständigen Beschreibung des Zustandes eines Elektrons ist ebenfalls die Angabe des **Spinzustandes** und die Angabe des Ortszustandes, des **Orbitals**, notwendig.



12. WIE ENTSTEHEN MAGNETISCHE MOMENTE?

Aus den vorherigen Kapiteln wissen wir,

... dass magnetische Momente als Eigenschaften von Elektronen betrachtet werden können.

... wie sich die magnetischen Momente im äußeren Magnetfeld verhalten.

... welcher Zusammenhang zwischen den kleinsten magnetischen Einheiten, den magnetischen Momenten, und der Magnetisierung eines ganzen Objektes besteht.

Wir werden nun versuchen die Eigenschaften und Entstehung der beiden unterschiedlichen Formen *magnetischer Momente* zu erklären.

Variante A: Elektronenspin

Die Elektronen als kleinste Träger der *magnetischen Momente* besitzen unterschiedliche Eigenschaften. Sie haben eine Masse, weisen die Elementarladung auf und ihnen wird als zusätzliche Eigenschaft der *Spin* zugeordnet. Der Spin der Elektronen ist eine quantenmechanische Größe und erklärt viele Theorien und Phänomene. Mit Bezug zum Magnetismus kann der Spin fixes *magnetisches Dipolmoment* interpretiert werden. Jedes Elektron besitzt damit exakt dasselbe *magnetische Moment* als Folge des Spins. Diese Dipolmomente sind stets vorhanden. Man kann sie als Mikro-Magnetisierungen oder kleine Kompassnadeln interpretieren interpretieren, die sich im Magnetfeld ausrichten!

Können Sie erklären welche Erscheinungsformen von Magnetismus sich mithilfe der *magnetischen Spin-Momente* erklären lassen und warum?

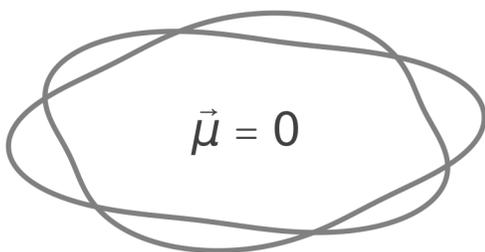
Variante B: Mikroskopische Ströme im Orbital

Die *magnetischen Spin-Momente* richten sich in Richtung des äußeren Magnetfeldes aus und führen somit zu Para- oder Ferromagnetismus. Es muss jedoch noch eine zweite Art *magnetischer Momente* geben, die genau entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet ist und diamagnetische Phänomene bewirkt. Schaut Euch für das Verständnis dieser magnetischen Momente das Video „Wirbelstrombremse“ an!

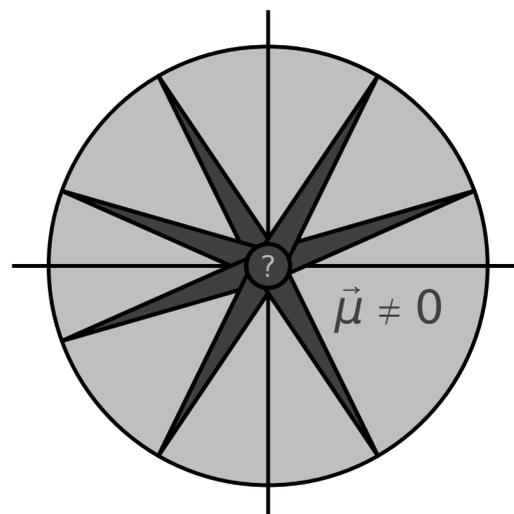
Bei der Wirbelstrombremse werden in einem bewegten Material im äußeren Magnetfeld Ströme induziert, die wiederum ein Gegenfeld verursachen. Übertragen wir dieses Prinzip auf Elektronen stellen wir fest, dass auch für jedes Elektron ein mikroskopischer Strom im äußeren Magnetfeld existiert.

In welchem Experiment habt Ihr die Entstehung der Wirbelströme bereits kennengelernt? Wie unterscheiden sich makroskopische Wirbelströme und die Wirbelströme im Orbital?

Magnetisches Moment
ORBITAL



Magnetisches Moment
ELEKTRONENSPIN



Magnetfeld $\vec{B} = 0$

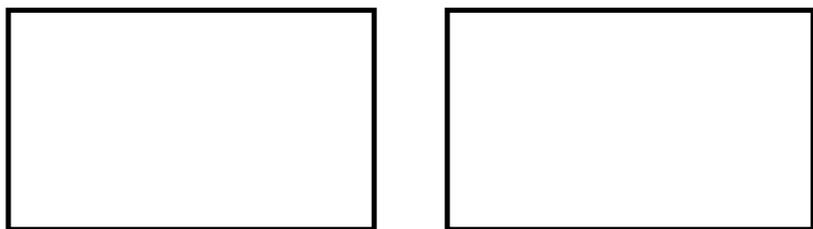
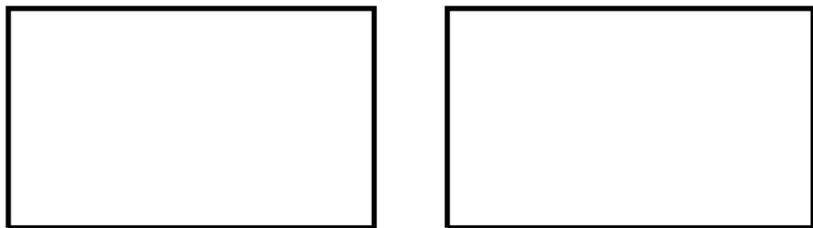
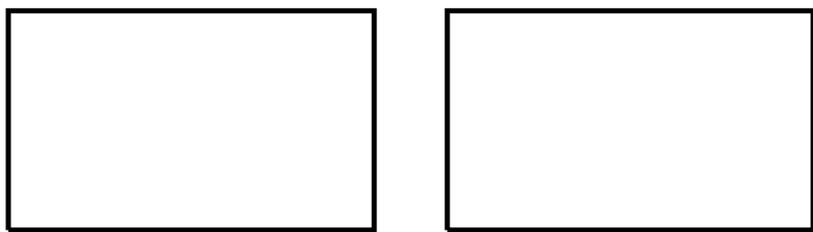
In Kapitel 5 habt Ihr festgestellt, dass sowohl bei dia- als auch bei paramagnetischen Stoffen die *Magnetisierung* ohne äußeres Magnetfeld verschwindet. Die Ursachen für das Verschwinden sind bei den beiden Erscheinungsformen jedoch unterschiedlich. Versucht diese auf Grundlage der Kenntnisse über das Zustandekommen der *magnetischen Momente* aus den vorherigen Seiten zu erklären. Nutzt dafür auch Bilder oder schematische Darstellungen!

Diamagnetismus:

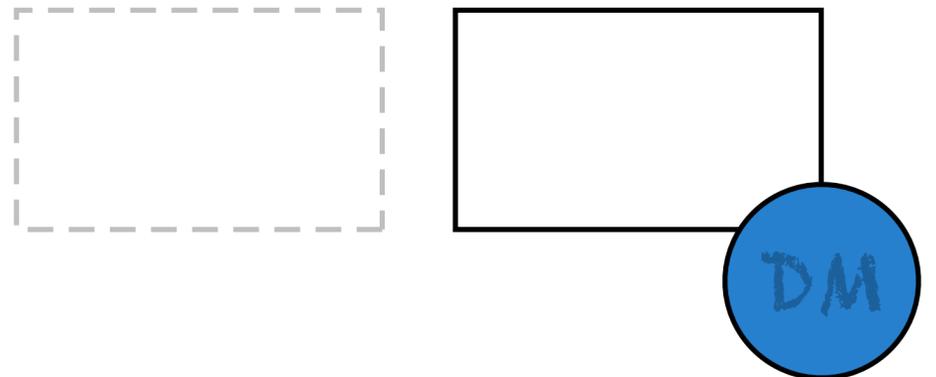
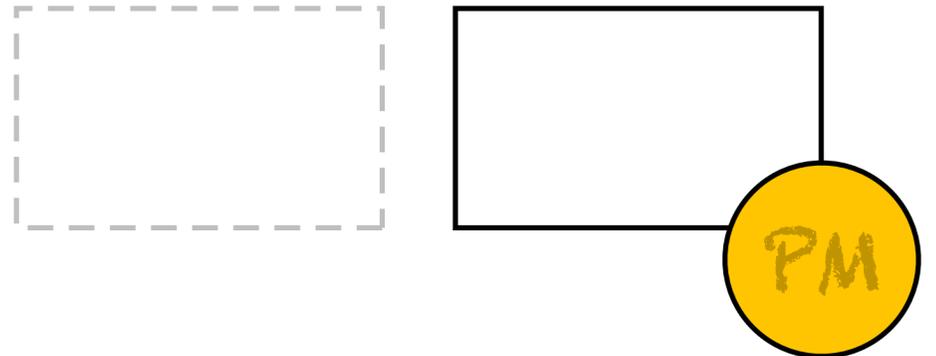
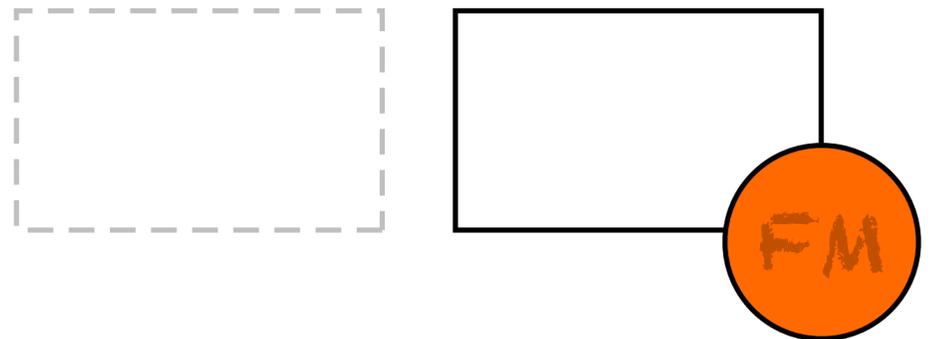
Paramagnetismus:

Diese Zeichnung kennt Ihr bereits von Seite 16. Tragt nun anstelle der *Magnetisierung* die *magnetischen Momente* mit und ohne äußeres Magnetfeld für die unterschiedlichen Erscheinungsformen ein! Berücksichtigt dabei insbesondere auch die vorherigen Erkenntnisse aus Kapitel 12.

mit Magnetfeld (vorher)



ohne Magnetfeld (nachher)



Aus Kapitel 12 zur Entstehung der *magnetischen Momente* ergibt sich, dass die aus mikroskopischen Strömen resultierenden *magnetischen Momente* aufgrund ihrer Richtung für Diamagnetismus verantwortlich sind. Ebenso zeigt sich, dass die *Spin-Momente* aufgrund ihrer Richtung die Existenz von Para- und Ferromagnetismus begründen.

Diese Zuordnung ist aus fachlicher Sicht vollkommen richtig, aber bei genauerer Betrachtung nicht ohne zusätzliche Informationen nachvollziehbar. Dies soll durch folgende Argumentation verdeutlicht werden:

1. (Nahezu) jede Materie besitzt Elektronen.
2. Jedem Elektron wird der Spin als charakteristische Größe zugeordnet.
3. Für jedes gebundene Elektron erzeugt ein äußeres Magnetfeld mikroskopische Ströme.
4. Jedes Elektron besitzt *Strom- und Spin-Momente*, sodass jede Form von Materie sich im äußeren Magnetfeld gleichzeitig dia- und para- bzw. dia- und ferromagnetisch verhält.

Kann das sein?

Das einfache magnetische Pendel-Experiment zeigt, dass keineswegs jede Materie gleichzeitig angezogen und abgestoßen wird wie Argument 4 impliziert. Berechnet man die Größe der magnetischen Momente für ein äußeres Magnetfeld der Stärke $B = 1 \text{ T}$ zeigt sich, dass die Spin-Momente bei dieser Magnetfeldstärke effektiv mehr als 1000x größer sind, als die magnetischen Strom-Momente.

Was bedeutet das für das magnetische Verhalten realer Substanzen?

14. WAS IST ZU ERWARTEN?

Aus der Abschätzung der Stärke *magnetischer Spin- bzw. Strom-Momente* folgt, dass für jede Form von Materie die Erscheinungsform Para- oder Ferromagnetismus zu erwarten ist und Diamagnetismus stets zu schwach ist, um beobachtet zu werden. Das magnetische Pendel-Experiment mit Graphit und andere Experimente (Levitation, Wasser etc.) widersprechen dieser Aussage.

Um zu verstehen, warum in der Tat viele Substanzen diamagnetisch sind, müssen wir eine weitere Information berücksichtigen. Erst durch Betrachtung der **Struktur der Materie** realer Substanzen können magnetische Erscheinungsformen der Stoffe erklärt und auch vorhergesagt werden. Wir versuchen dies an einem Beispiel, dem einfachst möglichen Beispiel Wasserstoff, zu erläutern.

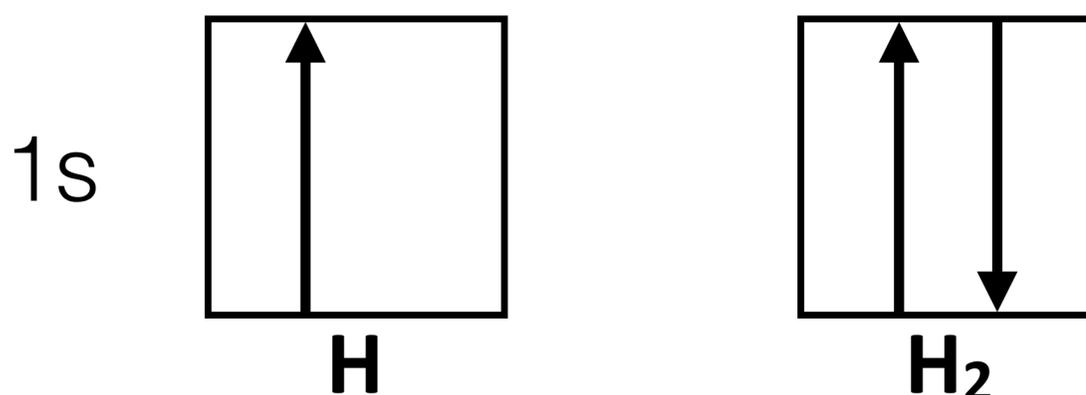
Wasserstoff besitzt, wie wir wissen, neben dem Atomkern lediglich ein Elektron. Für dieses Elektron existiert ein magnetisches Spin-Moment, das das magnetische Strom-Moment um den Faktor 1000 übertrifft.

In „*Grundversuche der Physik in historischer Darstellung (Band 1)*“ schreibt der Autor Carl Ramsauer :

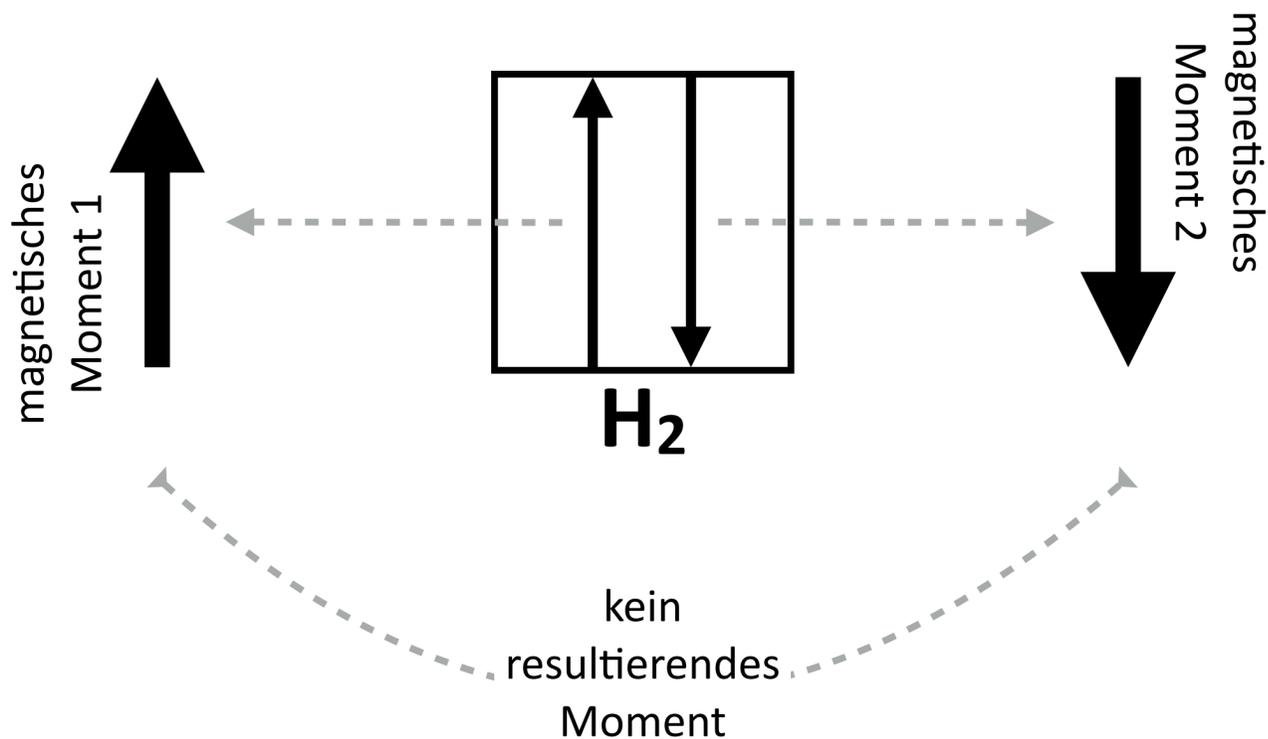
[...] Als Resultat erhielt FARADAY: Stickstoff ist diamagnetisch, Wasserstoff ebenfalls, jedoch in noch stärkerem Maße, [...]

Wie ist dies möglich?

Bei Faradays experimenteller Arbeit zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften wird Wasserstoff in seiner natürlichen Form als Wasserstoffmolekül H_2 untersucht. Betrachten wir die Elektronenkonfiguration von atomarem und molekularem Wasserstoff in der Kästchenschreibweise nach Pauling:



Bei molekularem Wasserstoff können die beiden Elektronen aufgrund des Pauli-Prinzips nicht denselben Spinzustand aufweisen. Aus diesem Grund spricht man bei molekularem Wasserstoff von vollständig gepaarten Elektronenspins und im Gegensatz dazu bei atomarem Wasserstoff von einem ungepaarten Elektron. Wichtig dabei ist: Die entgegengesetzt ausgerichteten *Spinmomente* gepaarter Elektronen heben sich gegenseitig auf.



Da die *Spinmomente* sich kompensieren, dominiert beim Wasserstoffatom der Diamagnetismus des Orbitals.

Um die Erscheinungsform realer Substanzen zu erklären bzw. vorherzusagen, muss somit stets die Struktur der jeweiligen Materie berücksichtigt werden.

Man kann dabei festhalten:

1. Existieren ausschließlich *gepaarte Elektronen* dominiert der *Diamagnetismus*.
2. Liegen *ungepaarte Elektronen* vor, dominiert der *Paramagnetismus* oder *Ferromagnetismus*.

Hinweis!

Eine Argumentation über die Elektronenkonfiguration kann auf diese Art und Weise nur für Gase und Flüssigkeiten, aber nicht für die meisten Festkörper geführt werden. Die Erklärungen für Festkörper sind etwas komplexer, aber beinhalten im Wesentlichen ähnliche Ideen.

Jetzt sollt Ihr selbst für reale Atome und Moleküle überlegen, welche magnetischen Erscheinungen zu erwarten sind. **Begründet** welche Magnetismusform bei den folgenden Stoffen im Grundzustand bei starken Magnetfeldern „realistischer“ Größe vorliegt...

Sauerstoff (atomar):

Helium (atomar):

Sauerstoff (atomar):

Krypton (atomar):

Bei Interesse findet Ihr auf den iPads ein Video in dem das magnetische Verhalten von molekularem Sauerstoff und Stickstoff experimentell untersucht wird.

Aufgrund der stets vollständig gefüllten Schalen ist nun auch klar, dass sämtliche Edelgase diamagnetisch sind. Mithilfe des Molekülorbitals lässt sich zeigen, warum Wasser diamagnetisch ist. Insgesamt können auf diese Art und Weise alle magnetischen Erscheinungen von Gasen und Flüssigkeiten hergeleitet werden. Bei Festkörpern sind die Erklärungen komplexer. Die grundlegenden Bausteine magnetischer Spin- und Strom-Momente existieren hier jedoch auch und die Phänomene sind identisch.

Welche Fragen aus dem Bereich Magnetismus sind an dieser Stelle für Euch noch offen geblieben?

Abbildungsnachweis:

S. 3: Aufgabenstellung zum traditionellen Einführungsexperiment aus:

Appel, T., Küchenberg, F., Lohmann, D., Müller, M., Peters, G., Stumpf, R. & Voß, M. (2009). Spektrum Physik Gymnasium 5/6. S. 28, Braunschweig: Schroedel.