

7. Magnetische Materialien

7.1 Magnetische Dipole und Arten des Magnetismus

7.1.1 Monopole, Dipole und Kreisströme

Die **Quellen** des elektrischen Feldes sind Ladungen; gemessen in Coulomb. Ladungen sind letztlich Eigenschaften unserer "Elementarteilchen"; sie kommen *immer* in ganzen Vielfachen der **Elementarladung**, d. h. von $\pm e$.

Von Ladungen, charakterisiert durch die Ladungsdichte ρ kommt man zum elektrischen Feld \underline{E} über die Grundgleichung der Elektrostatik, auch **Poisson-Gleichung** genannt:

$$\nabla \cdot \underline{E} = \frac{\rho}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}$$

Die Elektrotechnik wird das noch hinreichend üben; wir gehen hier deshalb nicht näher darauf ein, sondern fragen uns, wo eigentlich das **magnetische Feld** herkommt?

Nicht von magnetischen "Ladungen", d. h. isolierten "Süd"- oder "Nordpolen" bzw. besser ausgedrückt: von **magnetischen Monopolen**. Die gibt es nämlich (noch) *nicht* – trotz intensiver (und sehr teurer) Suche der Elementarteilchenphysiker.

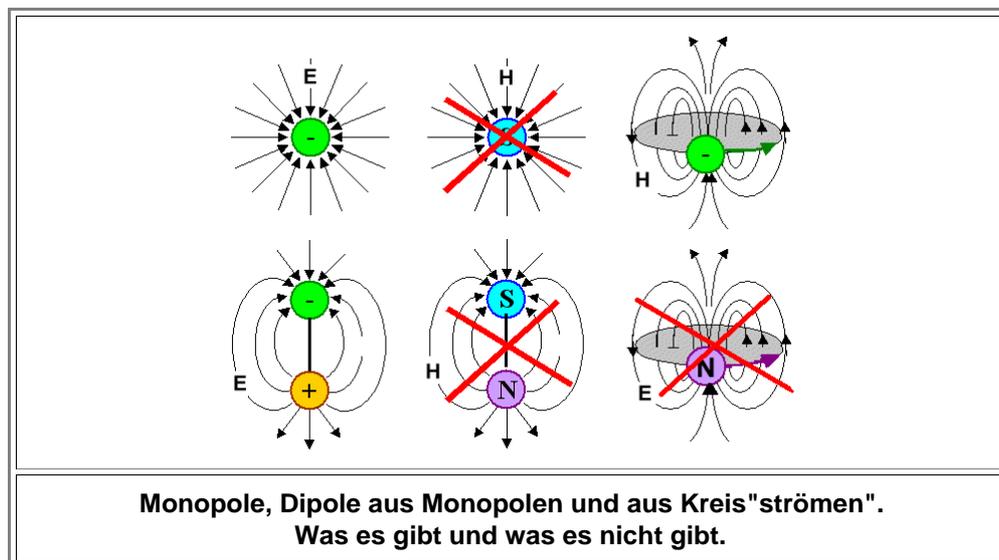
Warum es keine magnetischen Monopole zu geben scheint, ist eine Schlüsselfrage der Physik. Es gibt nämlich keinen guten Grund für diese experimentell gefundene Tatsache – soweit wir wissen, verbietet kein Naturgesetz ihre Existenz.

Sei's drum. Wir suchen dann eben nach **magnetischen Dipolen**. Die gibt's bekanntlich, da wir Magneten mit Nord- und Südpol haben.

Allerdings kann der magnetische Dipol nicht wie der elektrische Dipol aus zwei magnetischen Monopolen bestehen, die irgendwie in einem festen Abstand angeordnet sind.

Wie kann man dann einen magnetischen Dipol "machen"? Durch einen im Kreis fließenden Strom, d.h. durch im Kreis (oder in jeder geschlossenen Kurve) herumlaufende elektrischen Ladungen! (Für einen elektrischen Dipol geht die Analogie wiederum nicht.)

Das ist in der Skizze unten symbolisch-bildlich dargestellt.



Wir definieren jetzt ein **magnetisches Dipolmoment** \underline{m} als das Resultat eines im "Kreis" fließenden Stromes I mit der umflossenen Fläche A :

$$|\underline{m}| = I \cdot A$$

Das magnetische Dipolmoment ist ein Vektor (senkrecht zur Fläche) und hat die Einheit $[\underline{m}] = \text{Am}^2$. Diese Definition hat den Vorteil, daß damit viele Formeln besonders einfach werden. Sie gilt auch für sehr kleine Ströme und Flächen.

Gibt es so eine Art kleinstes \underline{m} , so eine Art Dipol-Gegenstück zur Elementarladung? Klar - wir müssen nur den Strom und die Fläche so klein als möglich machen.

- Den kleinstmöglichen Strom bekommen wir, wenn nur ein **einziges** Elektron auf einer Kreisbahn läuft. Den kleinstmöglichen Radius der gedachten Kreisbahn ist der kleinstmögliche Radius im z. B. Bohrschen Atommodell. Der kleinstmögliche Radius ist wiederum bestimmt durch die von Bohr eingeführte **Drehimpulsquantelung**; der kleinstmögliche Drehimpuls ($L = \hbar$) gibt die notwendigen Daten.
- Zeit für die erste schnelle Übung:

Fragebogen
Einfache Fragen zu 7.1

- Was wir ziemlich einfach erhalten (mit m^*e = Masse des Elektrons (**der Stern * stellt sicher, daß wir dieses m nicht mit dem magnetischem Moment verwechseln**), h = **Plancksches Wirkungsquantum**, e = Elementarladung) ist die "**elementare magnetische Einheit**", das "**Bohrsche Magneton**":

$$m_{\text{Bohr}} = \frac{h \cdot e}{4\pi \cdot m^*e} = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

- Haben wir damit die Ursache der magnetischen Eigenschaften der Materialien? Kommen magnetische Dipole letztlich von den Elektronen, die irgendwie um den Atomkern eiern?
 - Sorry. In der Regel eher nicht – und das liegt nicht daran, daß das Bohrsche Modell zu einfach ist (auch in der korrekten Quantentheorie haben die "eiernden" Elektronen magnetische Momente), sondern weil sich diese "**Bahnmomente**" fast immer gegenseitig aufheben.
 - Wir merken uns deshalb:

<p>Die magnetischen Momente der Atome kommen überwiegend vom <i>Spin</i> der Elektronen</p>
--

- Oder noch einfacher: Zu den elementaren Eigenschaften der **Elektronen** gehört, daß sie außer einer Masse, einer negativen Elementarladung und einem halbzahligen ($\pm 1/2$) **Spin** auch ein **magnetisches Dipolmoment** haben.
- Das (unzerstörbare und unabänderbare) magnetische Moment eines Elektrons ist

$$m^e = \pm m_{\text{Bohr}}$$

- Das Vorzeichen ist wie beim Spin, daher die Kopplung mit dem Spin. Zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin haben deshalb in Summe auch kein magnetisches Moment mehr.
- Nochmal: Die magnetischen Momente der Atome und Festkörper kommen weitaus überwiegend von den magnetischen Momenten der Elektronen oder, wie man sagt, vom Spin. Soweit möglich werden die Elektronenzustände der Atome aber so besetzt sein, daß sich **alle** magnetischen Momente – Bahnmomente und Spinmomente – kompensieren.
- Das läßt uns zwei grundsätzlichen Möglichkeiten:
 1. Atome mit geradzahlgiger **Ordnungszahl z** können immer die magnetischen Momente kompensieren und haben deshalb **kein** magnetisches Moment.
 2. Atome mit ungeradzahlgiger Ordnungszahl **z** haben zwangsweise ein magnetisches Moment von mindesten **$1 m_{\text{Bohr}}$** .
- Damit sind eine Menge Atome "magnetisch". Und zwar nicht nur als einzelnes Atom, sondern meist auch noch in einem Kristall oder in einem Molekül, usw. Außerdem müssen wir bedenken, daß in einem Festkörper oft nicht Atome vorliegen, sondern **Ionen** – z. B. bei allen **Metallen**. Dann kann die Elektronenzahl ungeradzahlig sein, auch wenn das Atom (wie z. B. Eisen) eine geradzahlgige Ordnungszahl hat. Wir wollen das aber gar nicht so genau wissen, denn für die Elektrotechnik ist die **Herkunft** der magnetischen Momente nicht so wichtig, nur das **Ergebnis**.

- Wichtig ist nur noch:

**Die magnetischen Momente der Atome können
sich
in beliebige Richtungen anordnen oder beliebig
drehen,
ohne daß sich die atomare Anordnung ändern
muß!**

● Bei den elektrischen Dipolmomenten ging das nicht. Nur in Flüssigkeiten, in denen sich das ganze Molekül drehen kann, konnte die *elektrische Orientierungspolarisation* auftreten. Für magnetische Momente geht das auch in Festkörpern!

▸ Damit haben wir jetzt eine der elektrischen Polarisation analoge Situation:

1. Hat das Material *keine* magnetischen Dipole, wird das externe magnetische Feld H welche induzieren. Solche Materialien nennen wir **Diamagnete** .
2. Hat das Material magnetischen Dipole (mit statistisch verteilten Richtungen), wird das externe magnetische Feld H diese Dipole mehr oder weniger stark ausrichten. Solche Materialien nennen wir **Paramagnete**.
3. Hat das Material magnetischen Dipole *und* noch eine starke (immer quantenmechanische) Wechselwirkung zwischen diesen Dipolen, werden sich die magnetischen Momente *von selbst* ordnen; z. B. stehen alle parallel. Solche Materialien nennen wir je nach Art der Ordnung **Ferromagnete**, **Ferrimagnete** oder **Antiferromagnete**.

● *???* **Nr. 3** ist neu, das hatten wir bei elektrischen Dipolen nicht. Aber nur deshalb nicht, weil die Zeit knapp ist. Es gibt sehr wohl auch *ferroelektrische Materialien*, bei denen sich elektrische Dipole von selbst ausrichten.

▸ Im Grunde interessieren uns bei magnetischen Materialien nur die "Ferro"-Abarten. Im nächsten Modul schauen wir uns das Ganze aber erstmal noch etwas genauer an.

▸ Hier sind alle schnellen Fragen zu diesem Unterkapitel:

Fragebogen

Schnelle Fragen zu 7.1.1