DREHEN MACHT MAGNETISCH –
DIE KLASSISCHE PHYSIK HAT DOCH RECHT

Petra Schulz

[Originaltext aus: Mensch und Technik naturgemäß, Heft 1/1987, S. 29-37, Layout, Inhalt und Abbildungen geändert. 1. Korrektur 2003]

Zusammenfassung
Das Elektron wird als rotierende Kugel aufgefaßt. Bei Bahndrehimpulsänderung oder Spinänderung nimmt das Elektron Photonen aus dem Magnetfeld auf. Bei Bahndrehimpulserhöhung absorbiert das Elektron ein Elektronenspin-Äquivalent und bei Spinumkehr zwei Elektronenspin-Äquivalente entgegengesetzten Spins.

Magnetismus in der Natur

Immer ist beim Magnetismus Magie im Spiel: wenn die Astgabel in den sensiblen Händen eines Wünschelrutengängers vor einer angepeilten Wasserader ausschlägt; wenn die Verletzungen an dem gebrochenen Körperteil eines Kranken durch Magnetfeldbehandlung schneller heilen; wenn die Stecknadel vom Hufeisenmagneten ruckartig emporgehoben wird. Welch eine Magie in der Natur, wenn die Tiere wie die heimfliegenden Zugvögel ihre Bewegungsrichtung und die Pflanzen ihr Wachstum durch den Erdmagnetismus steuern lassen! Magie bleibt es auch dann, wenn sich die Forscher mit wissenschaftlichen Methoden an das Phänomen des Magnetismus´ herantasten. Die magnetischen Vorgänge sind heute keineswegs verstanden, sie werden nur mathematisch richtig beschrieben, jedoch ungeheuer abstrakt quantenmechanisch verbrämt, so daß sie für alle Zeit unvorstellbar sein sollen.

Um den Einstein-de-Haas-Effekt herum

Wird Materie magnetisiert, so tanzen ihre Teilchen so etwas wie einen Wiener Walzer. Der Einstein-de-Haas-Effekt zeigt, wie beispielsweise links herum wirbelnde Elektronen in einem ruhenden drehbar aufgehängten runden Eisenstab durch den Strudel eines vorüberfließenden Magnetfeldes zu rechts herum tanzenden Teilchen ummagnetisiert werden und dabei das Eisenstück entgegengesetzt drehen lassen.

Die Auswertung dieses Versuchs und ähnlicher Experimente zeigte folgendes: Kreisende oder/und kreiselnde Elektronen sind magnetisch und tragen somit ein magnetisches Moment, das mit dem Drehimpuls des Elektrons Hand in Hand geht. Sogar für kompliziert zusammengesetzte neutrale Körper wie zahlreiche Planeten und Gestirne wurde gefunden, daß der Bruch aus dem magnetischen Moment und dem Drehimpuls eine Konstante ist.

Niedergang der klassischen Physik

Das magnetische Moment eines Teilchens ist aber nicht nur proportional dem Drehimpuls dieses Teilchens, sondern zusätzlich noch dem g-Faktor (Landé-Faktor) g. Im Falle des Elektrons ist bei reinem Bahndrehimpuls $g = 1$ und bei reinem inneren Drehimpuls (gleich Drall, gleich Spin) $g = 2$. Beim Einstein-de-Haas-Effekt wirkte nur der Spin mit dem anomalen g-Faktor von $g = 2$ /1/.

Nach dieser beobachteten magnetomechanischen Anomalie durfte das Elektron nicht mehr als rotierende Kugel begriffen werden. Die anschauliche Physik mußte durch etwas anderes ersetzt werden, sie wurde durch die abstrakte Wellenmechanik verdrängt. Seit dem Siegeszug der Schrödingergleichung in alle Gebiete der Physik haben sich die Wissenschaftler nicht mehr bemüht, physikalische Vorgänge im atomaren und subatomaren Bereich auf klassische Weise zu erklären.

Neuansatz: Elektron doch als rotierende Kugel
Hier soll nun doch einmal versucht werden, die Anschaulichkeit von Bahndrehimpuls und Spin des Elektrons an Hand eines klassischen Vorstellungsbildes beizubehalten. Weitere neuklassische Modelle zu anderen mikroskopischen Materieeigenschaften beschreiben die beiden verstorbenen Physiker H. Röschlau /2/, A. Wesp /3/ sowie der urfysiker A. Seeger /4/.

Für die Energieänderung ΔE bei Variation der magnetischen Quantenzahl um eine Einheit gilt Gleichung 1

$$\Delta E = g \cdot \Delta H \cdot \mu_o \,, \qquad \text{(Gl. 1)}$$

wobei ΔH die Änderung des äußeren Magnetfelds und μ_0 eine Naturkonstante, das Bohrsche Magneton, bedeuten /5/. Das Verhältnis der Energiebetragsänderungen von Spin (ΔE_S) und Bahndrehimpuls (ΔE_B) ist nach Gleichung 2

$$\frac{\Delta E_S}{\Delta E_B} = \frac{2}{1} \,. \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Wir führen also einem Elektron Energie aus einem Magnetfeld zu und wollen dabei als Demonstrationsbeispiel zwei Fälle miteinander vergleichen:

1. Ein Elektron mit der magnetischen Spinquantenzahl m_S=-1/2 erlebt eine Spinumkehr zur magnetischen Spinquantenzahl m_S=+1/2.
2. Ein Elektron mit der magnetischen Bahndrehimpulsquantenzahl m_B=1 erlebt durch Energiezufuhr die Bahndrehimpulsquantenzahl m_B=2.

Als Elektron stellen wir uns eine spinnende Kugel vor, deren Rotationsachse um 45 Grad zur Flugbahn des Elektrons gekippt ist, siehe in Abb. 1a die erste Figur. Solch ein Vorstellungsbild suggerieren etliche Lehrbücher. (Die genauere Angabe der Spinrichtung ist uninteressant und wird vernachlässigt.) Das ist – abgesehen von der eingeschränkten Drehachsenrichtung – im Grunde genommen das uralte klassische Modell für ein Elektron. Das Besondere des hier vorgestellten Anschauungsbildes ist aber, daß die Kugel fast so durchdringbar sein soll wie das Nichts und dadurch für gedankliche Folgeüberlegungen erst handhabbar.

Das Elektron mit dem entgegengesetzten Spin hat eine Rotationsachse, die um 45 Grad in die andere Richtung der Bahn geneigt ist. Also, damit stehen die beiden Spinachsen der spinungleichen Elektronen senkrecht aufeinander (siehe in Abb. 1a die linke Seite bis zum Gleichheitszeichen).

Photonen aus dem Magnetfeld
Wird ein Elektron einem Magnetfeld ausgesetzt, so wird es von Teilchen umströmt (es sind Lichtteilchen, also Photonen) und von einigen wenigen getroffen, ja förmlich überrollt. Der Magnetfeld-Teilchenstrom sei im folgenden gedanklich in lauter Pakete von Elektronenspin-Äquivalenten zerlegt gedacht. Ein Elektronenspin-Äquivalent sei das Teilchen, das dem Elektron in Größe und Form völlig gleicht, und dem Betrag nach den gleichen Spin wie das Elektron trägt. Ein Treffereignis von einem Magnetfeld-Teilchen mit einem Elektron führt auf jeden Fall zu einem Massenzuwachs des Elektrons, weiterhin können Spin und/oder Drehimpuls verändert werden.

Der absolute Wert des Elektronenspin-Äquivalents ist für die zitierten Beispiele uninteressant, der Wert ist vor allem abhängig vom angelegten Magnetfeld, das bei einem Absorptionsprozeß zu einer Magnetfeldänderung ΔH innerhalb des Elektrons führt, die in den folgenden Beispielen als konstant angesehen wird.

Spinumkehr in zwei Schritten über die atmende Kugel
Um den Spin des Elektrons auszuschalten, würde es genügen, das ursprüngliche Elektron mit einem entgegengesetzt spinnenden Elektronenspin-Äquivalent aus dem Magnetfeld zu überlagern, das passungsgerecht in die Kugel des Elektrons gesetzt wird. Diese Überlagerung der sich nun behindernden, weil entgegengesetzt rotierenden und dabei innerlich um 90 Grad zueinander geneigten Kugeln, ergibt eine atmende Kugel maximal gleicher Größe wie die jeweiligen Ausgangskugeln. Die atmende Kugel zieht sich zu einem Punkt zusammen, krempelt sich um zur ursprünglichen Größe, schnurrt wieder zu einem Punkt zusammen, dehnt sich dann wieder aus, eine Vorgangsfolge, die sich rhythmisch wiederholt (siehe Abbildung 1a, rechte Seite).

Wird die atmende Kugel mit einem weiteren Elektronenspin-Äquivalent umgekehrten Spins aus dem Magnetfeldstrom an Ort und Stelle vereinigt, so entsteht eine Kugel, die wie das Magnetfeld-Teilchen spinnt, nur etwas „massiver“ (energiereicher) als dieses ist, indem es noch die atmende Kugel in sich trägt (siehe Abbildung 1b). Das Umklappen des Spins erfolgt in zwei Stufen.

Spinumkehr in einem Schritt
Der Spin kann sich auch in einem Schritt umkehren. Das Elektron wird zu diesem Zweck mit einem doppelten Elektronenspin-Äquivalent aus dem magnetischen Feld überlagert. Das doppelte Elektronenspin-Äquivalent besteht aus zwei gleichsinnig spinnenden Elektronenspin-Äquivalenten, die miteinander verschmolzen sind. Es entspricht somit einer Kugel, die sich doppelt so schnell wie eine Einzelkugel dreht. Wenn dieses doppelte Elektronenspin-Äquivalent den zum Elektron entgegengesetzten Spin trägt, entsteht das spinumgeklappte Elektron der Abbildung 1b auf der rechten Seite, siehe Abbildung 1c. Wir halten an dieser Stelle fest, zur Spinumkehr benötigt man zwei gleichsinnig rotierende Elektronenspin-Äquivalente.

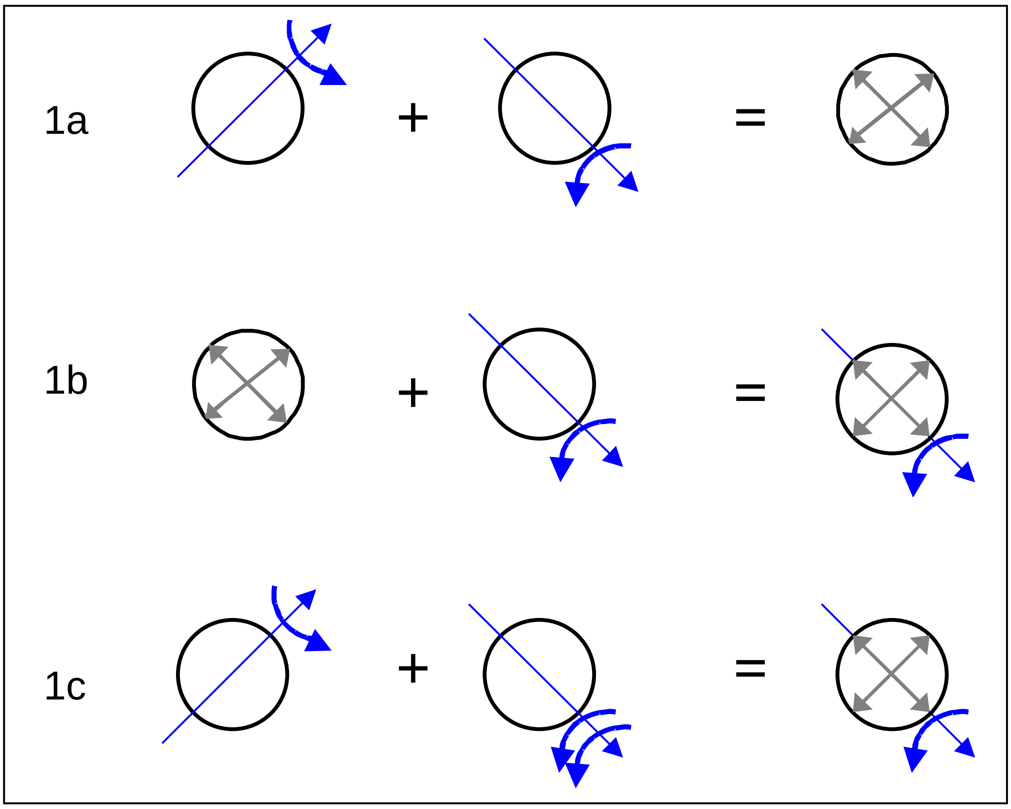

Abb. 1: Zur Spinumkehr eines Elektrons. (Runde Pfeile geben die Spinrichtung an. Die Anzahl dieser Pfeile symbolisiert die Größe des Spins. Der gerade lange Pfeil stellt die Spinachse dar.)

1a: Ein Elektron und ein Elektronenspin-Äquivalent mit entgegengesetztem Spin verschmelzen zur atmenden Kugel, die Atmung wird dargestellt durch zwei Doppelpfeile.

1b: Die atmende Kugel verschmilzt mit einem weiteren Elektronenspin-Äquivalent zum spinumgekehrten energiereichen Elektron.

1c: Ein Elektron verschmilzt mit einem doppelten Elektronenspin-Äquivalent entgegengesetzten Spins in einem Schritt zum spinumgeklappten energiereichen Elektron.

Bahndrehimpulserhöhung
Um den Bahndrehimpuls eines auf einer Kreisbahn fliegenden Elektrons um eine Stufe zu erhöhen, brauchen wir ein gleichsinnig spinnendes Elektronenspin-Äquivalent gleicher Flugbahn. Dadurch bildet sich ein Teilchen, das mit gleicher Geschwindigkeit die gleiche Kreisbahn umfährt, aber einen doppelt so großen Spin trägt wie das ursprüngliche Teilchen.

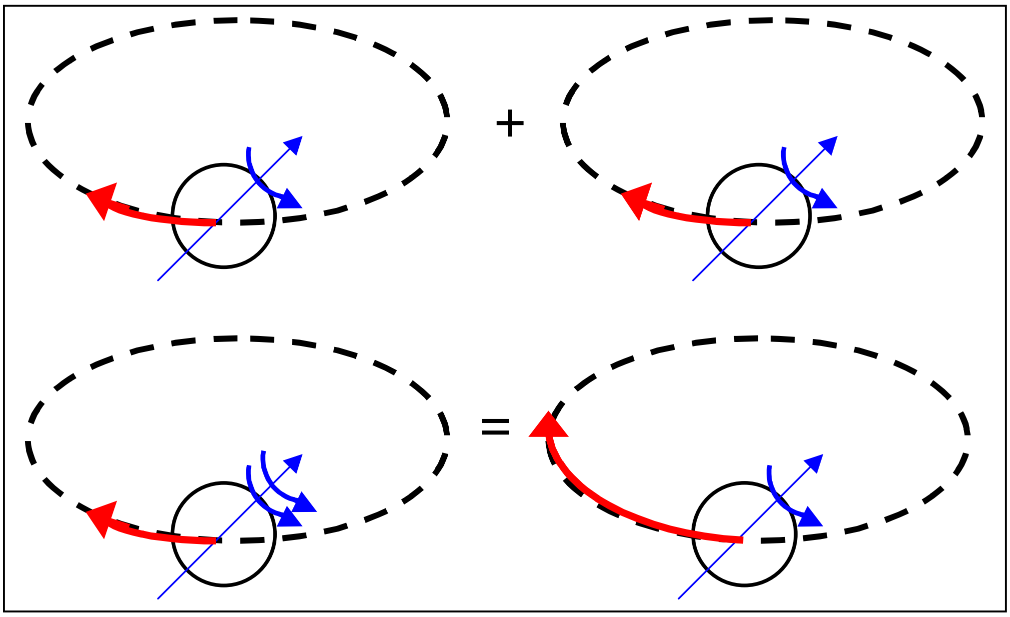

Abb. 2: Die Verschmelzung eines Elektronenspin-Äquivalents von einem Elektron mit einem Elektronenspin-Äquivalent aus dem Magnetfeld gleichen Spins, gleichen Bahndrehimpulses und gleicher Flugbahn (gestrichelt gezeichnet: Kreisbahn) ergibt ein Elektronspin-Äquivalent gleichen Drehimpulses, aber doppelten Spins.
Und nun ein Gedankenexperiment: Das so entstandene Gebilde ist gleichwertig zu einem einzelnen Elektronenspin-Äquivalent gleichen Spins, aber doppelten Bahndrehimpulses, siehe zweite Reihe rechts. (Die Länge des dicken Bahnpfeils gibt die Größe des Bahndrehimpulses an.)

Energieverhältnis von Spinänderung zu Bahndrehimpulsänderung
Der Beweis von Gleichung 2 läßt sich nun leicht an Hand der klassischen Energiegleichung für die kinetische Energie E eines Rotors mit dem Radius r, der Masse m und der Kreisfrequenz ω erbringen. Für die Rotation gilt Gleichung 3

$$E = \frac{mr^2 \cdot \omega^2}{2}. \qquad \text{(Gl. 3)}$$

Welche Größe für den Radius eingesetzt werden muß, ist belanglos, da er sich nicht ändern soll. Für die Energiebilanz bei der Drehimpulsänderung wird auf das Bild des Elektronenspin-Äquivalents mit doppeltem Spin der Abbildung 2 zurückgegriffen. In der Abbildung werden nur die agierenden Elektronenspin-Äquivalente gezeichnet. Die Energiebetragsänderungen sind, da der Radius und die Winkelgeschwindigkeit ω als konstant angenommen werden, nach Gleichung 4

$$\Delta E = \frac{r^2 \cdot \omega^2}{2} \cdot \Delta m. \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Nachdem der Spin umgeklappt wurde, betrug der Massenzuwachs des Elektrons $\Delta m=2m_{\text{Ä}}$, wobei $m_{\text{Ä}}$ die Masse des Elektronenspin-Äquivalents ist. Somit ergibt sich für den Energiesprung bei Spinumkehr

$$\underline{\underline{\Delta E_S}} = \frac{r^2 \cdot \omega^2}{2} \cdot 2m_{\text{Ä}} = \underline{\underline{r^2 \cdot \omega^2 \cdot m_{\text{Ä}}}}\,. \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Ändert man den Bahndrehimpuls um den kleinsten Quantensprung, so ändert sich die Elektronenmasse nur um $m_{\text{Ä}}$. Die Bahnenergieänderung ist dann

$$\underline{\underline{\Delta E_B = \frac{r^2 \cdot \omega^2}{2} m_{\text{Ä}}}}\,. \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Das Verhältnis der Energiebetragsänderungen von Spin- und Bahndrehimpulsvariation ergibt sich dann – wie nach Gleichung 2 gefordert – aus Gleichung 5 und 6 zu Gleichung 7

$$\frac{\Delta E_S}{\Delta E_B} = \frac{r^2\omega^2 m_{\text{Ä}}}{\frac{r^2\omega^2 m_{\text{Ä}}}{2}} = \frac{2}{1}\,. \qquad \text{(Gl. 7)}$$

Bahnradiusänderung
Der Bahndrehimpuls kann sich zum Beispiel bei konstanter Kreisfrequenz verändern, wenn sich der Bahnradius vergrößert. Dieser etwas schwierige Fall soll hier nicht betrachtet werden. Als Hinweis soll gelten: Auftretende geringfügige Radiusänderungen der Kreisbahn könnte man für die Abweichungen der g-Faktoren von ganzzahligen Werten verantwortlich machen.

Unterschiedliche Bahnrichtungen
Zum Schluß noch zwei Anmerkungen: Die Bahndrehimpulsquantenzahl $m_{\text{B}} = 0$ entsteht durch Überlagerung eines Elektrons mit einem Elektronenspin-Äquivalent, dem Betrag nach gleich großer, aber entgegengesetzter Bahngeschwindigkeit. Das Additionsprodukt (oder besser: Verschmelzungsprodukt) führt dann eine Schwingung durch den Bahnmittelpunkt aus – entsprechend der Herstellung von linear polarisiertem Licht aus zwei entgegengesetzt zirkular polarisierten Anteilen.

Wer das vorgestellte neuklassische Modell akzeptiert, der wird es sicher auch anwenden, um verschiedene Bahnrichtungen zu erzeugen, indem er etwa ein Elektron mit vertikaler und ein Elektronenspin-Äquivalent mit horizontaler Flugbahn vereinigt. Die alte klassische Vorstellung verschiedener Bahnneigungen für unterschiedliche magnetische Richtungsquantenzahlen behält ihre Daseinsberechtigung.

Schluß
Mit dem vorliegenden Aufsatz hoffe ich, nicht nur einen Diskussionsbeitrag geliefert, sondern auch ein brauchbares Arbeitsmodell abgegeben zu haben. In Zukunft sollen sich die Physiker mehr auf klassische Vorstellungen zurückbesinnen, als sich nur auf abstrakte mathematische Operationen zu verlassen. Es könnten erhebliche Verständigungsschwierigkeiten abgebaut werden.

Literatur

/1/ dtv-Lexikon der Physik. München 1970, Band 3, S. 276-277
/2/ H. Röschlau: „$h \cdot v = m \cdot c^2$“. Eigenverlag Kappeln 1981
/3/ A. Wesp: „Der universelle physikalische Raum“, Haag+Herchen-Verlag, Frankfurt am Main 1983
/4/ A. Seeger: „Elektromagnetismus mechanisch erklärt“. ufy Eigenverlag, Darmstadt 1983
/5/ H. Neuert: „Physik für Naturwissenschaftler“. Band III, BI-Hochschulbuch, Mannheim, Wien, Zürich 1978, S. 685

ANHANG (GLOSSAR)

Bahndrehimpuls
Ein Auto in einem Kinderkarussell fährt mit einer Geschwindigkeit (sagen wir Bahngeschwindigkeit dazu) im Kreise herum. Physikalisch gesehen, ist der Bahndrehimpuls gleich Impuls (Masse mal Bahngeschwindigkeit) mal Bahnradius. Die Bahngeschwindigkeit drückt man praktischer aus durch (->) Kreisfrequenz mal Bahnradius. Mit der Kreisfrequenz lautet die Formel für den Bahndrehimpuls: Bahndrehimpuls ist gleich Masse mal Kreisfrequenz mal Bahnradius zum Quadrat. Der Bahndrehimpuls hat wie der Spin (und die Wirkung) die Dimension Energie mal Zeit.

Bohrsches Magneton
Das Bohrsche Magneton ist das kleinste (->) magnetische Moment des Elektrons.

Eigendrehimpuls
siehe Spin

Impuls
Masse mal Bahngeschwindigkeit

Kreisfrequenz
Kreisfrequenz ω ist die Anzahl der Bahnumläufe pro Zeit, dividiert durch die Kreiszahl 2π (π=3,14). Oder: Kreisfrequenz ist gleich Frequenz durch 2π.

Magnetisches Moment
Jeder magnetisierte Körper (also jeder Magnet) hat ein magnetisches Moment, was gleich Stromstärke mal Fläche bedeutet, die der Elektronenstrom umflossen hat. (Das Ganze muß noch mit einer Naturkonstanten multipliziert werden, die von der Art des benutzten Einheitensystems abhängt, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll.)

Einstein-de-Haas-Effekt
Drehungen und Magnetismus bedingen einander, hatte Einstein vermutet. Im Einstein-de-Haas-Versuch wurde der Magnetismus eines magnetisierten Eisenstückes in Drehbewegung des Eisenstabes umgewandelt.

Der Versuch lieferte den g-Faktor (Landé-Faktor), der besagt, wieviel mal ein Magnetfeld auf den Drehimpuls eines Elektrons einwirken kann: einmal, wenn der Bahndrehimpuls beeinflußt wurde, und zweimal, wenn der Spin des Elektrons magnetisiert wurde /5/.

Quantenzahl
Die Materie wie auch die Strahlung nimmt Einflüsse ihrer Umgebung nur schlückchenweise (in „Quantensprüngen“) auf. Wenn es sich um kleine Änderungen handelt, dann findet sich dieser schluckweise erfolgende Vorgang in den Quantenzahlen widergespiegelt. Quantenzahlen sind wichtig, wenn die Physik kleiner Teilchen (Elektronen, Elementarteilchen, Atome, Moleküle) dargestellt werden soll.

Spin
Dreht sich eine Eisläuferin auf der Stelle oder rotiert eine Karussellkutsche um ihre Achse, dann besitzen alle genannten Figuren einen Spin. Für eine auf der Stelle kreiselnde Kugel wie das Elektron läßt sich der Spin in Analogie zur Formel für den (->) Bahndrehimpuls leicht angeben: Spin ist gleich Elektronenmasse mal (->) Kreisfrequenz mal Elektronenradius zum Quadrat. Der Spin hat wie der Bahndrehimpuls (und die Wirkung) die Dimension Energie mal Zeit.

Häufig sind Spin und Bahndrehimpuls gleichzeitig vorhanden, so zum Beispiel in dem eben erwähnten fahrenden Karussell mit den sich drehenden Gondeln. Die Elektronen in einem Hufeisenmagneten besitzen dagegen keinen Bahndrehimpuls.