Walter Klinger

Die Rolle des Begriffs Orientierung im Bereich der Physik

1. Einleitung

Der Begriff Orientierung bedeutet im ursprünglichen Sinn „Bestimmung der Himmelsrichtung, in der die Sonne aufgeht“. Wird dem Begriff Orientierung diese Bedeutung zugrundegelegt, nämlich Festlegen einer Richtung, so befindet man sich bereits mitten im Bereich der Physik. Erkundigt sich etwa ein Wanderer, der an einem Kreuzweg angelangt ist, bei einem Einheimischen ausschließlich nach der Entfernung zu seinem Ziel, so fehlt ihm eine wichtige Information. Um seinen Zielort wirklich erreichen zu können, hätte er vor allem fragen müssen, welchen der vielen Wege, die von der Kreuzung wegführen, er einzuschlagen hat, d. h. in welche Richtung er gehen muss.

Dieses Beispiel weist darauf hin, dass in der Physik zur exakten Beschreibung eines Sachverhaltes in vielen Fällen die Angabe eines einzigen Zahlenwertes nicht ausreicht.[1] Zur vollständigen Beschreibung einer Situation wie der des Wanderers, ist vielmehr außer der Angabe der Entfernung, d. h. des Zahlenwertes für die Länge der Wegstrecke, auch noch die Angabe der Richtung des zurückzulegenden Weges notwendig.

2. Orientierung durch Vektoren

Physikalische Größen, die durch Betrag und Richtung gekennzeichnet sind, werden Vektoren genannt. Vektorielle Größen sind beispielsweise Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, elektrische und magnetische Feldstärke.

Zur Veranschaulichung werden Vektoren im dreidimensionalen Raum häufig durch gerichtete Strecken, d. h. also als Pfeile dargestellt (Abb. 1). Die Länge des Pfeils wird proportional zum Betrag der Größe gewählt. Die Pfeilspitze hingegen zeigt die Richtung und den Richtungssinn der Größe an. Durch diese Art der Darstellung gewinnt man unmittelbar einen guten Überblick, wie die einzelnen vektoriellen Größen einerseits im Raum und andererseits relativ zueinander orientiert sind.

---

[1] Physikalische Größen, die bereits durch die Angabe einer einzigen Zahl vollkommen bestimmt sind, um einen physikalischen Sachverhalt exakt zu beschreiben, werden als skalare Größen bezeichnet. Beispiele für solche Größen sind „Zeit“, „Masse“, „Temperatur“, „Energie“ und viele andere mehr.

Die Formulierung physikalischer Gesetze mit Hilfe von Vektorgleichungen hat darüber hinaus den immensen Vorteil, dass kein bestimmtes Koordinatensystem zugrundegelegt werden muss: Vektorgleichungen gelten in jedem beliebig gewählten Koordinatensystem. Rechenoperationen mit Vektoren lassen sich sogar völlig ohne Zuhilfenahme eines Koordinatensystems ausführen, wie das in Abbildung 1 für die Addition von Kräften gezeigt ist. Alle mathematischen Operationen, die man mit Vektoren durchführen kann, werden in der sogenannten Vektoranalysis behandelt. Diese ist ein umfangreiches Spezialgebiet der Mathematik, ohne deren Beherrschung Physik heute nicht mehr ernsthaft betrieben werden kann.

Auf einen Aspekt der Vektoralgebra muß hier noch kurz eingegangen werden, da er unmittelbar mit dem Begriff der Orientierung zu tun hat. Lässt man beispielsweise an einem Hebel eine Kraft angreifen (Abb. 2), so dreht sich der Hebel in eine ganz bestimmte Richtung. Greift die Kraft in entgegengesetzter Richtung an, so dreht sich der Hebel ebenfalls in die entgegengesetzte Richtung. Um diesen Sachverhalt mathematisch formulieren zu können, ordnet man den beiden Vektorgrößen „Kraft" und „Hebelarm" einen dritten Vektor so zu, dass er seine Richtung ändert, wenn entweder die Richtung der Kraft oder die Richtung des Hebelarms umgekehrt wird.

In unserem Beispiel handelt es sich um die physikalische Größe „Drehmoment". Die Zuordnung erfolgt nun so, dass der dem Kraft- und Hebelarmvektor zugeordnete Drehmomentenvektor senkrecht auf der Ebene steht, die durch den Vektor des Hebelarms und den Vektor der Kraft aufgespannt wird. Der Drehsinn des Systems (des Hebels) wird durch die Richtung dieses Vektors, d. h. also durch sein Vorzeichen festgelegt. Nach Vereinbarung erhält der Vektor ein positives Vorzeichen, wenn sich das System (der Hebel) entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn dreht und ein negatives, wenn es (er) sich im Uhrzeigersinn bewegt. Dieser Vorzeichenkonvention liegt ein rechtshändiges Koordinatensystem zugrunde. Physikalische Vorgänge werden gewöhnlich in rechtshändigen Bezugssystemen beschrieben.

Werden drei Vektoren in der geschilderten Weise miteinander verknüpft, so wird diese Operation als Vektorprodukt bezeichnet. Mit dem gewöhnlichen Produkt hat das Vektorprodukt allerdings wenig gemeinsam. Es ändert z. B. bei Vertauschung der Faktoren sein Vorzeichen, und sein Betrag hängt vom Winkel ab, den die beiden zu verknüpfenden Vektoren miteinander einschließen. In Hinblick auf Orientierung spielt das Vektorprodukt im Bereich der Physik eine wichtige Rolle.[2]

3. Vektorfelder

Bisher wurden nur solche Fälle betrachtet, in denen die richtungsabhängigen Merkmale eines Objektes mit Hilfe von Vektoren beschrieben werden konnten, etwa: „Eine Kraft **F** beschleunigt einen Körper längs eines Weges **s** und ändert dadurch dessen Geschwindigkeit **v** in Richtung und/oder Betrag“[3]. Eine Verknüpfung des im Jahre 1840 durch Michael Faraday eingeführten Feldkonzepts mit der Darstellung richtungsabhängiger Größen durch Vektoren führte zur Konzeption des Vektorfeldes. Ein Vektorfeld entsteht dadurch, dass jedem Punkt eines Bereiches in einem zwei- oder höherdimensionalen Raum eindeutig ein Vektor zugeordnet wird. Geometrisch kann ein Vektorfeld anschaulich durch Feldlinien dargestellt werden, d. h. durch orientierte Raumkurven, deren Tangenten in jedem Punkt mit dem Feldvektor zusammenfallen. Die Feldstärke, das ist der Betrag der Feldvektoren in einem Punkt, wird durch die Dichte der Feldlinien repräsentiert. Feldlinienbilder sind hervorragend geeignet, um die räumliche Orientierung einer physikalischen Größe in anschaulicher Weise zu beschreiben. Vektorfelder spielen eine äußerst wichtige Rolle sowohl in der gesamten klassischen als auch in der modernen Physik. Ein wohl allen bekanntes Beispiel stellt das Magnetfeld dar (Abb. 3). Andere Beispiele sind das Gravitationsfeld, das Geschwindigkeitsfeld einer strömenden Flüssigkeit oder eines strömenden Gases (vgl. z. B. das Windfeld auf der Wetterkarte) oder die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreitenden Felder elektromagnetischer Wellen. Diese wenigen Beispiele machen deutlich, dass Vektorfelder dem Raum eine Orientierung aufprägen. Der Raum verhält sich nicht mehr isotrop.

[2] Um physikalische Sachverhalte, in denen die Orientierung eine Rolle spielt, beschreiben zu können, muss manchen physikalischen Größen, die auf den ersten Blick als skalare Größen erscheinen, Vektorcharakter zugeschrieben werden. Beispiel hierfür ist etwa die Fläche. Man ordnet der Fläche zunächst einen Orientierungssinn zu, der - ähnlich wie beim Vektorprodukt - positiv ist, wenn die Fläche im Uhrzeigersinn umlaufen wird und negativ, wenn sie entgegen dem Uhrzeigersinn umlaufen wird. Der Fläche wird dann ein Vektor zugeordnet, der auf der Fläche senkrecht steht, also die Richtung der Flächennormalen besitzt und dessen Betrag dem Flächeninhalt entspricht. Die Verwendung solcher Flächenvektoren ist z. B. bei der Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten der elektromagnetischen Induktion (Maxwellsche Gleichungen) notwendig.

[3] Vektorielle Größen werden im Folgenden stets durch Fettdruck der physikalischen Größensymbole gekennzeichnet.

4. Teleologische Prinzipien in der Physik

Orientierung spielt im Bereich der Physik auch in einem völlig anderen Kontext eine wichtige Rolle. Es handelt sich um so genannte teleologische Prinzipien. In der Physik versteht man unter Prinzipien bewährte Sätze von großer Allgemeinheit, die sich als erste Sätze und Richtlinien für den Aufbau eines Wissensgebietes eignen, sich aber innerhalb des Wissensgebietes nicht beweisen lassen.

Eine große Klasse physikalischer Prinzipien stellen die so genannten Extremalprinzipien dar. Sie besagen, dass gewisse Prozesse in der Natur stets so ablaufen, dass bestimmte, für den Prozess wesentliche Größen einen Extremalwert, d. h. also ein Minimum oder ein Maximum, annehmen.

Bereits Aristoteles postulierte solche Minimalprinzipien. Er war beispielsweise der Meinung, dass es das „Wesen" schwerer Körper sei, auf kürzestem Wege nach unten zu fallen, und dass der naturgewollte Ort eines jeden schweren Körpers der tiefstmögliche Ort sei, an dem der Körper den Zustand der Ruhe erreicht. Teleologisches Ziel einer jeden Bewegung ist also – nach Aristoteles – letztendlich, dass ein Körper die ihm von Natur aus bestimmte, seinem Wesen entsprechende tiefste Lage erreicht, wo er in Ruhe verharren kann.

Dieses von Aristoteles formulierte Prinzip ist ein Spezialfall des in der heutigen Physik noch immer gültigen „Prinzips vom Minimum der potentiellen Energie". Es besagt, dass die Gleichgewichtslage eines schwingungsfähigen physikalischen Systems stets durch das Minimum der potentiellen Energie bestimmt ist.

Während die Physik der griechischen Antike vorherrschend durch teleologische Anschauungsweisen geprägt ist (d. h. also, die Natur handelt nach Plan und Endzweck), wird eine teleologische Deutung der Naturvorgänge in der Physik spätestens seit dem 18. Jahrhundert abgelehnt. Physiker sind der Auffassung, dass den Vorgängen der physikalischen Welt eine rein kausale Notwendigkeit zugrunde liegt[4].

Es gibt nun zwei Extremalprinzipien, die historisch gesehen zunächst im Rahmen teleologischer Vorstellungen formuliert und interpretiert wurden. Es handelt sich um das Fermatsche „Prinzip des kürzesten Lichtweges" und das Maupertuissche „Prinzip der kleinsten Wirkung" (*Pierre Louis Moreau Mau-*

[4] Während in der klassischen Physik nach wie vor von absoluter Kausalität ausgegangen wird, gilt dies nicht mehr in dem Maße in der Quantenmechanik, in der sich für das Auftreten gewisser Prozesse nur Wahrscheinlichkeitsamplituden angeben lassen.

pertuis, p. 38). Obwohl von Physikern die teleologische Interpretation heute nicht mehr akzeptiert wird, spielen beide Prinzipien in der Physik auch jetzt noch eine Rolle. Vor allem das Maupertuissche Prinzip der kleinsten Wirkung, hat wegen seiner Anwendbarkeit und Fruchtbarkeit auf allen Gebieten der Physik seine hervorragende Stellung bis in die Gegenwart behauptet.

Bei der Aufstellung seines Prinzips berief sich der berühmte französische Mathematiker Pierre Fermat (1601–1665) auf den alten griechischen Satz, dass „die Natur nichts vergebens macht" und „dass die Natur immer auf dem kürzesten Weg vorgeht" (*P. Fermat*, 1662), dass sie also ein Minimum an Aufwand treibt. Diesem Satz entsprechend wird nach Fermat ein Lichtstrahl, der von einem Punkt A ausgeht und zu einem Punkt B gelangen soll, stets den Weg durchlaufen, der ein Minimum an Zeit braucht. Dieses Fermatsche Prinzip ist auch heute noch das fundamentale Prinzip der geometrischen Optik. Aus ihm lassen sich alle Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Optik wie z. B. das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz ableiten. In heutiger Formulierung lautet es: Der optische Lichtweg L von einem Punkt A nach einem Punkt B (das ist der geometrische Weg s multipliziert mit dem jeweiligen Brechungsindex n) ist stets ein Extremum. In den meisten Fällen handelt es sich um ein Minimum. Mathematisch formuliert gilt also:

$$\text{Lichtweg } \mathbf{L} = \int_A^B n \cdot ds \text{ ist Extremum.}$$

Zur Illustration des Fermatsche Prinzips soll ein anschauliches, dem Lichtweg analoges Beispiel dienen. Angenommen, ein junger Mann liegt am Strand in der Sonne (Abb. 4). Plötzlich hört er einen Hilfeschrei. Er springt auf und sieht, dass das hübsche Mädchen, das er schon seit geraumer Zeit beobachtet hatte, aus dem Boot ins Wasser gefallen ist und um ihr Leben kämpft. Selbstverständlich will er sie retten. Am Strand kann er schneller laufen als im Wasser schwimmen. Wie geht er am besten vor? Welchen Weg soll er wählen, um möglichst schnell an der Unglücksstelle zu sein? Es ist sicherlich nicht sinnvoll, die in Abbildung 4 gestrichelt eingezeichneten Wege zwischen A und B zu wählen. Der schnellste Weg ist der, den auch das Licht einschlagen würde, das in unterschiedlichen Medien ebenfalls unterschiedliche Fortpflanzungsgeschwindigkeiten besitzt.

Wenn man dieses Extremalproblem mit Hilfe der Infinitesimalrechnung löst[5], erhält man das vom Physikunterricht der Schule her gut bekannte Snelliussche Brechungsgesetz, nämlich

$$\sin \alpha / \sin \beta = n,$$

[5] Durch Anwendung des Fermatschen Prinzips lässt sich das Brechungsgesetz auch ohne Infinitesimalrechnung sehr anschaulich auf geometrischem Wege herleiten. Vergleiche hierzu z. B. [Fermat, P., 1894] und [Feynman, R., 1975].

wobei $n = v_1/v_2$ das Verhältnis zwischen der Laufgeschwindigkeit v_1 am Strand und der Schwimmgeschwindigkeit v_2 im Meer bedeutet. Im Fall der Optik ist $n = c_1/c_2$ der Brechungsindex, d. h. das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in Medium 1 und in Medium 2. Die Definition der Winkel α und β ist Abb. 4 zu entnehmen.

Das Maupertuissche Prinzip der kleinsten Wirkung wird gelegentlich so interpretiert, dass die Natur alle Bewegungen von Körpern mit einem Minimum an Wirkung realisiert. Damit ist gemeint, dass ein angestrebtes Ziel mit dem geringsten Aufwand an „Mitteln", d. h. mit dem größten Effekt bzw. auf dem schnellsten Weg erreicht wird (*Maupertuis, P. L. M.*, 1753, p. 38).

In seiner einfachsten Form gestattet das Maupertuissche Prinzip die Bestimmung der Bahn eines bewegten Körpers. Es besagt, dass ein Körper, der sich von einem Ausgangspunkt A zu einem Endpunkt B durch ein Kraftfeld bewegt (siehe Abb. 5), unter allen möglichen Wegen genau den auswählt, für den eine bestimmte physikalische Größe, nämlich die Wirkung des Körpers, den kleinsten Wert annimmt, also ein Minimum ist. Dabei ist die physikalische Größe Wirkung definiert als Skalarprodukt aus dem Impuls **p** des Körpers (Impuls **p** = Masse m des Körpers mal Geschwindigkeit **v** des Körpers) und dem zurückgelegten Weg **s**:

$$\text{Wirkung } S = \int_A^B \mathbf{p} \cdot d\mathbf{s}.$$

Ähnlich wie beim Fermatschen Prinzip geht man zum Auffinden der in der Natur realisierten Bahn folgendermaßen vor. Man variiert mögliche Bahnen des Körpers zwischen den Punkten A und B so lange, bis man eine Bahn erhält, für die die Wirkung ein Minimum ist. Das ist dann die Bahn, die der Körper in der Natur auch wirklich durchläuft. Für die Behandlung solcher Probleme wurde eigens ein mathematisches Verfahren, die so genannte Variationsrechnung entwickelt.

In seiner allgemeinen Fassung ist das Maupertuissche Prinzip der kleinsten Wirkung das umfassendste und fruchtbarste aller Prinzipien der Dynamik. Es gestattet die Aufstellung und Lösung der Bewegungsgleichungen eines mechanischen Systems. In seiner endgültigen mathematischen Fassung, die ihm Hamilton im Jahre 1835 gab, ist dieses Prinzip auch heute noch, d. h. im Zeitalter der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik von höchster Wichtigkeit (*Sambursky, S.*, 1975, p. 355). So wurde erst kürzlich mit Hilfe des Prinzips der kleinsten Wirkung von den Mathematikern A. Chenciner und R. Montgomery eine neue stabile Lösung des klassischen

Dreikörperproblems der Himmelsmechanik gefunden (*Pöppe, Ch.*, 2000, p.15). Nach solchen stabilen Lösungen wird bereits seit mehreren Jahrhunderten gesucht – mit bislang recht magerem Erfolg[6].

5. Orientierung und Symmetrien in der Physik

Eine Analyse der Entwicklungsgeschichte der Physik zeigt, dass die Art und Weise, wie Physiker ihre Wissenschaft betreiben, auf einer Reihe fundamentaler metaphysischer Überzeugungen beruht. Diese metaphysischen Auffassungen über die Natur lagen bereits dem Denken der griechischen Naturphilosophen zugrunde. Sie sind – ungebrochen über die Jahrtausende hinweg – auch für den modernen Naturwissenschaftler unserer Zeit noch gültig. Sie besagen:

1. Die Natur ist geordnet, d. h. im steten Wechsel und Wandel der Erscheinungen herrscht Ordnung, und der Mensch ist fähig, diese Ordnung mit seiner Ratio, seinem Verstand in Erfahrung zu bringen.

2. Eng damit verknüpft ist die Überzeugung, dass sich die Vorgänge in der Natur mathematisch beschreiben lassen, vorausgesetzt für die Beschreibung werden geeignete Begriffe festgelegt.

3. Die Natur ist einfach, d. h. die Vielgestaltigkeit und all das Verwirrende, das uns umgibt, kann auf ein – oder allenfalls auf nur einige wenige – Dinge, Prinzipien, Substanzen (oder wie immer man es nennen möchte) zurückgeführt werden.

4. Aufs Engste verknüpft mit dem Postulat der Einfachheit ist der Aspekt der Symmetrie. Aristoteles (384–322 v. Chr.) und auch noch Leibniz (1646–1716) sahen in den Symmetrien der Natur einen direkten Hinweis auf das besondere Walten einer höheren, einer göttlichen Macht.

Vom modernen Physiker werden Naturgesetze und physikalische Theorien als besonders ästhetisch empfunden, wenn sie möglichst symmetrisch

[6] Das klassische Dreikörperproblem der Himmelsmechanik behandelt den Fall, dass sich drei Massenpunkte (z. B. Sonne, Erde und Mond) in den von ihnen erzeugten Gravitationsfeldern bewegen. Während das Zweikörperproblem (z. B. das System „Planet - Sonne" oder „Erde - Mond") im Rahmen der Newtonschen Mechanik zu analytisch angebbaren Lösungen führt (nämlich zu den bereits von Johannes Kepler aufgrund empirischer Daten beschriebenen Ellipsenbahnen), existieren für das Dreikörperproblem im Allgemeinen keine analytischen Lösungen für die das System beschreibenden Differentialgleichungen. Abgesehen von Sonderfällen verhält sich ein solches Dreikörpersystem chaotisch, d. h. das Verhalten des Systems ist in der Regel nicht mehr auf längere Zeit vorhersagbar.

sind. Abweichungen von Symmetrien lösen vielfach eine Suche nach möglichen Ursachen aus, so dass deren Berücksichtigung in der Theorie wieder zur Herstellung der Symmetrie führt. Die beispielsweise immer wieder von neuem aufgenommene Suche nach dem magnetischen Monopol[7] und nach Gravitationswellen war trotz des erheblichen experimentellen Aufwands bisher leider immer noch vergeblich. Die Suche nach Elementarteilchen hingegen, deren Existenz aus Symmetriegründen vorhergesagt wurde, hat in zahlreichen Fällen zur Entdeckung dieser Teilchen geführt.

In der Physik hat der Begriff „Symmetrie“ eine von der Umgangssprache etwas abweichende Bedeutung. Man spricht in der Physik von „Symmetrie“, wenn Objekte, physikalische Zustände oder die der Materie zugrunde liegenden Naturgesetze gegen bestimmte Operationen, den sogenannten Symmetrieoperationen, invariant sind, d. h. wenn sie nach solchen Operationen in sich selbst übergehen, also wieder ihre ursprüngliche Form besitzen. Beispiele für solche Symmetrieoperationen sind Translation, Raumdrehung, Spiegelung, Punktspiegelung (Parität), Zeitumkehr (Umkehrung des Vorzeichens der Zeit) etc.

Symmetrien spielen in der Physik eine äußerst wichtige Rolle. Denn einer jeden Symmetrie entspricht ein Erhaltungssatz, wie die Mathematikerin Emmy Noether 1918 bewiesen hat. So folgt beispielsweise aus der Invarianz physikalischer Gesetze gegen Translation der Impulserhaltungssatz, aus der Invarianz gegen Verschiebung des Zeitnullpunktes der Energieerhaltungssatz und aus der Invarianz gegen Raumdrehung der Drehimpulserhaltungssatz (Abb. 6).

Als übergeordnetes Prinzip aufgefasst, können Symmetrien als Orientierungshilfe dienen und das Auffinden von Naturgesetzen ganz erheblich erleichtern. Dieses Vorgehen hat sich erst wieder in jüngster Vergangenheit bei der Konstruktion einer in sich konsistenten Theorie der Elementarteilchen bestens bewährt.

6. Orientierung infolge einer Symmetriebrechung

Es gibt nun in der Natur immer wieder Fälle, bei denen Symmetrieverletzungen beobachtet werden. Brechung einer Symmetrie aber führt zur Auszeichnung einer Richtung. Im Folgenden werden zwei Beispiele vorgestellt, die besonders anschaulich zeigen, wie durch Symmetriebrechung in der

[7] Die Existenz des magnetischen Monopols würde eine Unsymmetrie in den Maxwellschen Gleichungen der Elektrodynamik beseitigen.

Natur eine Richtung ausgezeichnet wird und dadurch Orientierung entsteht. Es handelt sich um die Paritätsverletzung und die Verletzung der Zeitumkehr. Eine exakte Beschreibung beider Phänomene erfordert umfangreiche Kenntnisse in theoretischer Physik. Die Sachverhalte und die grundlegenden Ideen dazu sollen deshalb hier nur in qualitativer Weise verständlich gemacht werden.

6.1 Paritätsverletzung

Unter der Paritätsoperation versteht man die Spiegelung des Raums an einem Punkt im Raum, wofür man einfachheitshalber gewöhnlich den Koordinatenursprung wählt. Wie Abb. 7 zeigt, ändern Vektoren, wie z. B. die Zeiger einer Uhr, bei einer solchen Operation ihr Vorzeichen, d. h. die gespiegelten Zeiger weisen in entgegengesetzte Richtung. Ihr Drehsinn hingegen bleibt unverändert. Das bedeutet, die gespiegelten Zeiger der Uhr laufen nach dieser Paritätsoperation in derselben Richtung weiter wie vorher die ungespiegelten Zeiger. Ihr Drehsinn bleibt erhalten.

Bis 1956 waren Physiker zutiefst davon überzeugt, dass Naturgesetze gegen die Paritätsoperation invariant seien. Ein in der Realität beobachteter Vorgang sollte also nach Spiegelung am Koordinatenursprung einen Vorgang liefern, der in der Natur ebenfalls vorkommt, d. h. beobachtet werden kann. Auf allen Gebieten der Physik hatte sich die Invarianz der Naturgesetze gegen die Paritätsoperation immer wieder glänzend bestätigt.

Anfang 1957 ergaben nun Messungen, die von der Physikerin Wu und ihren Mitarbeitern (*Wu, C. S.*, 1957, p. 1413) durchgeführt wurden, dass beim β-Zerfall[8] von ^{60}Co eine Paritätsverletzung auftritt. Diese Veröffentlichung löste bei den Physikern weltweit einen Schock aus. Der berühmte Physiker Wolfgang Pauli (1945 Nobelpreisträger für das nach ihm benannte Pauli-Prinzip) war so bestürzt, dass er einen scherzhaften Nachruf auf die Verletzung der Parität entwarf (Abb. 8).

Der Sachverhalt der Paritätsverletzung beim β-Zerfall ist aus Abbildung 9 ersichtlich. Der Atomkern des Elementes ^{60}Co besitzt den Kernspin I = 5 (Eigendrehimpuls). Das bedeutet, er rotiert um seine eigene Achse. Er ist

[8] Mit β-Zerfall werden all die Arten des radioaktiven Zerfalls bezeichnet, bei denen Elektronen oder Positronen sowie deren Neutrinos beteiligt sind. Das Radionuklid ^{60}Co (Kobalt 60, Eigendrehimpuls I = 5 h/2π) geht beim β-Zerfall durch Aussendung eines Elektrons (Eigendrehimpuls s = 1/2 h/2π) in das stabile Nickelisotop ^{60}Ni (Eigendrehimpuls I = 4 h/2π) über (h ist das Plancksche Wirkungsquantum). Durch Abkühlung der ^{60}Co-Probe auf die Temperatur 1 K (flüssiges Helium) erreicht man, daß sich die Eigendrehimpulse der ^{60}Co-Kerne in einem von außen angelegten homogenen Magnetfeld längs der magnetischen Feldlinien ausrichten, d. h. polarisiert sind.

außerdem radioaktiv, d. h. er zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2}$ = 5.2 a in den stabilen ^{60}Ni-Kern unter Aussendung eines Elektrons (eines β-Teilchens) und eines Antineutrinos, das aber nicht nachgewiesen werden kann. Aus Gründen der Drehimpulserhaltung kann dieser Vorgang nur so erfolgen, dass der Eigendrehimpuls des Elektrons (d. h. sein Spin s = 1/2) parallel zum Kernspin I des ^{60}Co-Kerns ausgerichtet ist.

Beim β-Zerfall gibt es nun zwei Möglichkeiten:

1. Der Elektronenspin des herausfliegenden Elektrons hat die gleiche Richtung wie seine Geschwindigkeit (oberer Fall in Abb 9).
2. Der Elektronenspin des herausfliegenden Elektrons ist seiner Geschwindigkeitsrichtung (d. h. seinem Impuls), entgegengesetzt ausgerichtet (unterer Fall in Abb. 9).

Im ersten Fall stellt das Elektron in Bezug auf die Geschwindigkeitsrichtung eine Rechtsschraube dar, im zweiten Fall eine Linksschraube.

Das Wu-Experiment hat nun ergeben, dass beim β-Zerfall von ^{60}Co wesentlich mehr Elektronen nach unten ausgesandt werden, d. h. dass die Zählrate des unteren Beta-Zählers 2 wesentlich höher ist als die des oberen Zählers 1. Daraus folgt, beim β-Zerfall von ^{60}Co bevorzugt die Natur linkshändige Elektronen.

Wie in Abbildung 7 erläutert wird, bleibt bei der Paritätsoperation der Drehsinn erhalten, d. h. die Spins der Elektronen ändern bei der Paritätsoperation ihre räumliche Richtung nicht, sie bleiben gleichgerichtet. Vektoren hingegen, und das sind im vorliegenden Fall die Geschwindigkeits- bzw. die Impulsvektoren der Elektronen, kehren ihre Richtung um. Bei der Spiegelung am Ursprung entsteht also aus einer Überzahl an Linksschrauben eine Überzahl an Rechtsschrauben. Dies aber entspricht keinem in der Natur beobachteten Vorgang.

Die Paritätsverletzung beim Wu-Experiment zeigt also, dass die Natur bei β-Zerfallsprozessen Linkshändigkeit bevorzugt.[9]

Beim β^+-Zerfall, d. h. bei Zerfallsprozessen, bei denen ein Positron (d. i. das positiv geladene Antiteilchen des Elektrons) ausgesandt wird, werden Rechtsschrauben bevorzugt. Führt man nun außer der Paritätsoperation P

[9] Es sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die durch Paritätsverletzung hervorgerufene Asymmetrie beim β-Zerfall grundsätzlich verschieden ist von der in der belebten Natur vorkommenden Bevorzugung linksdrehender Aminosäuremoleküle. Bei synthetischer Herstellung im Labor treten links- und rechtsdrehende Aminosäuremoleküle stets mit gleicher Häufigkeit auf.

gleichzeitig auch noch die Ladungskonjugationsoperation C durch, die die Eigenschaft hat, ein Teilchen in sein Antiteilchen zu überführen, dann ist das System offenbar invariant gegenüber dem Produkt P • C der beiden Operationen. Die Natur ist somit symmetrisch in Hinblick auf gleichzeitige Ausführung der Operationen Raumspiegelung und Ladungskonjugation (PC-Theorem). Unter Zugrundelegung des PC-Theorems ist die Natur, dem Symmetriebedürfnis der Physiker entsprechend, also auch im Falle des β^- /β^+-Zerfalls wieder symmetrisch.

6.2 Verletzung der Zeitumkehr

Sämtliche Gesetze der klassischen Mechanik sind invariant gegen Zeitumkehr. Denn dreht man in den Bewegungsgleichungen eines Körpers das Vorzeichen der Zeit t um, ersetzt also in den Bewegungsgleichungen der klassischen Mechanik sämtliche Zeitkoordinaten t durch ihren negativen Wert -t, so erhält man wieder eine Bewegung, die in der Realität möglich ist. Wird ein solcher Vorgang gefilmt, so ist es nicht möglich zu entscheiden, ob der Film vorwärts oder rückwärts läuft. Beispiele hierzu sind etwa die periodischen Bewegungen eines schwingenden Fadenpendels (Abb. 10 oben) oder eines sich drehenden Rades, vorausgesetzt Reibungseffekte können vernachlässigt werden.

Es gibt nun viele Vorgänge in der Natur, bei denen man Zeitumkehr, d. h. das Rückwärtslaufen des Films als lächerlich empfindet. Aus Erfahrung weiß man, dass solche Vorgänge unmöglich sind. Ein Kunstspringer im Schwimmbad etwa, der plötzlich unter Wassergespritze aus der Wasseroberfläche auftaucht und nach einigen kunstvollen Drehungen in der Luft oben auf dem Sprungbrett landet, bringt den Betrachter zum Lachen (Abb. 10 unten).

Heiße Körper geben ihre thermische Energie an kältere Körper ab, und zwar solange bis beide Körper die gleiche Temperatur erreicht haben (Abb. 11). Obwohl es der Energieerhaltungssatz zuließe, ist der umgekehrte Vorgang, nämlich dass sich ein Körper von selbst erwärmt, während sich ein andere dabei abkühlt, noch niemals beobachtet worden. Ebenso ist noch niemals beobachtet worden, dass sich ein ruhender Körper, z. B. ein Auto, von selbst in Bewegung setzt unter Abkühlung seiner Umgebung.

Zeitumkehr-invariante Vorgänge werden in der Physik als reversible Prozesse bezeichnet[10], nicht-zeitumkehr-invariante Vorgänge als irreversibel. Durch die Irreversibilität ist in der Natur eine eindeutige Richtung für all

[10] In voller Strenge treten reversible Makroprozesse in der Natur nicht auf. Sie sind nur als Grenzfälle denkbar, lassen sich aber in manchen Fällen mit sehr guter Näherung realisieren.

die zeitlichen Abläufe ausgezeichnet, in denen thermische Energie eine Rolle spielt. Diese Tatsache wird durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ausgedrückt. Dieser aus der Erfahrung heraus gewonnene Satz lässt sich sehr unterschiedlich formulieren, etwa folgendermaßen:

„Wärmeenergie kann niemals spontan, d. h. ohne äußere Einwirkung, von einem kälteren auf einem wärmeren Körper übergehen."

Gleichbedeutend damit ist die Aussage (Formulierung von Thomson und Planck):

„Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine (ein Perpetuum moblile zweiter Art) zu bauen, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmespeichers."

Um solche Aussagen quantitativ fassen zu können, wurde der Begriff „Entropie" in die Thermodynamik eingeführt. Diese physikalische Zustandsgröße ist für die zeitlich einseitige Richtung der Naturabläufe maßgebend. Mit ihr lautet der zweiten Hauptsatz der Thermodynamik:

„Prozesse in einem abgeschlossenen thermischen System laufen stets so ab, dass die Entropie S zunimmt oder höchstens gleich bleibt."

Für die Entropieänderung dS erhält man also:

$$dS \geq 0.$$

Dabei gilt das Gleichheitszeichen nur für reversible, das Größerzeichen für irreversible Prozesse.

Im Rahmen der statistischen Mechanik wird der Entropiebegriff mit Hilfe des Begriffs „Thermodynamische Wahrscheinlichkeit" verknüpft. Das ist die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein vorgegebener Makrozustand durch thermodynamische Mikrozustände realisieren lässt.[11] Der Entropiesatz kann damit anschaulicher so formuliert werden:

„Ein Vorgang geschieht dann von selbst, wenn ein Zustand geringerer Wahrscheinlichkeit in einen Zustand höherer Wahrscheinlichkeit übergeht."

Die Entropie stellt damit ein Maß für die „Unordnung" eines Systems dar; denn ungeordnete Zustände sind wahrscheinlicher als geordnete. Beim Übergang vom Ungleichgewichtszustand zum Gleichgewichtszustand nimmt die Unordnung eines abgeschlossenen Systems zu, d. h. auch die

[11] Es gilt: Entropie $S = k \cdot \ln w$, wobei ln der natürliche Logarithmus, k die Boltzmann-Konstante $k = 1.380 \cdot 10^{-23}$ J/K und w die thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes, d. h. die Zahl seiner möglichen Realisierungen durch Mikrozustände ist.

Entropie strebt einem Maximalwert zu, und damit ist eine Zeitrichtung festgelegt.

7. Orientierung durch Symmetriebrechung in physikalischen Systemen

Abschließend soll noch auf eine weitere Bedeutung des Begriffs Orientierung im Bereich der Physik eingegangen werden. Bei sehr hohen Temperaturen weist der Zustand der Materie einen hohen Grad an Symmetrie auf. Die das System beschreibenden physikalische Größen sind isotrop, d. h. sie sind von der Raumrichtung unabhängig. Physikalische Vorgänge laufen in allen Richtungen in gleicher Weise ab. Kühlt das System ab, so tritt in vielen Fällen bei bestimmten Temperaturen spontane Symmetriebrechung ein, das System verhält sich nicht mehr isotrop.

Ein typisches Beispiel hierzu ist der Phasenübergang zwischen den Aggregatzuständen flüssig und fest. Der Ordnungszustand der Materie nimmt bei solchen Phasenübergängen zu. Manche Kristalle weisen dann ganz bestimmte Orientierungen auf, was leicht daran zu erkennen ist, dass gewisse physikalische Größen, wie z. B. der Brechungsindex oder die elektrische Leitfähigkeit, richtungsabhängig werden.

Ein weiteres anschauliches Beispiel für spontane Symmetriebrechung aufgrund eines Phasenübergangs stellt die spontane Magnetisierung dar. Oberhalb einer bestimmten Temperatur, der so genannten Curie-Temperatur, zeigen ferromagnetische Stoffe nur paramagnetisch Eigenschaften auf. Bei Unterschreiten der Curie-Temperatur, findet spontane Magnetisierung statt, d. h. die atomaren magnetischen Momente richten sich aus, und es entstehen so genannte Weißsche Bezirke, die eine ganz bestimmte magnetische Orientierung aufweisen. Werden diese durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes ebenfalls ausgerichtet, so erhält man – bei hinreichender Remanenz und Koerzitivfeldstärke – einen Permanentmagneten.

Literatur:

MAUPERTUIS, Pierre Louis Moreau: Essai de cosmologie. Oeuvres de M. de Maupertuis, tome I, Lyon 1753, p. 38

SAMBURSKY, Shmuel : Der Weg der Physik, Artemis Verlag, Zürich 1975, p. 355

PÖPPE, Ch.: Stabile Dreierbeziehung: Die himmlische Achterbahn, Spektrum der Wissenschaft, Jahrgang 2000, Heft 11, p. 15

FERMAT, Pierre: Brief an C. de la Chambre vom 1. Januar 1662. In: Oeuvres, ed. P. Tannery u. Ch. Henry, tome II, Paris 1894, p. 457

FEYNMAN, Richard: Lectures on Physics, 5. Auflage, Leighton, 1975, p. 26-4

HÖFLING, Oskar: Physik, Dümmler, Bonn, 1990, p. 457

WU, C. S., AMBLER, E., HAYWARD, R., HOPPES, D., HUDSON, R.: Phys. Rev., (1957), p. 1413

Abbildungen:

Abb. 1:
Komponentendarstellung eines Vektors **v** = (v_x, v_y, v_z) in einem rechtshändigen Koordinatensystem und Addition der an einem rechteckigen Körper angreifenden Kraftvektoren $\mathbf{F_1}$ bis $\mathbf{F_6}$ zu einer resultierenden Kraft $\mathbf{F}_{Gesamt}$ = $\mathbf{F_1} + \mathbf{F_2} + \mathbf{F_3} + \mathbf{F_4} + \mathbf{F_5} + \mathbf{F_6}$ (Die Symbole für Vektoren werden hier aus drucktechnischen Gründen entweder durch fettgedruckte Buchstaben oder durch einen Pfeil über dem Buchstabensymbol dargestellt).

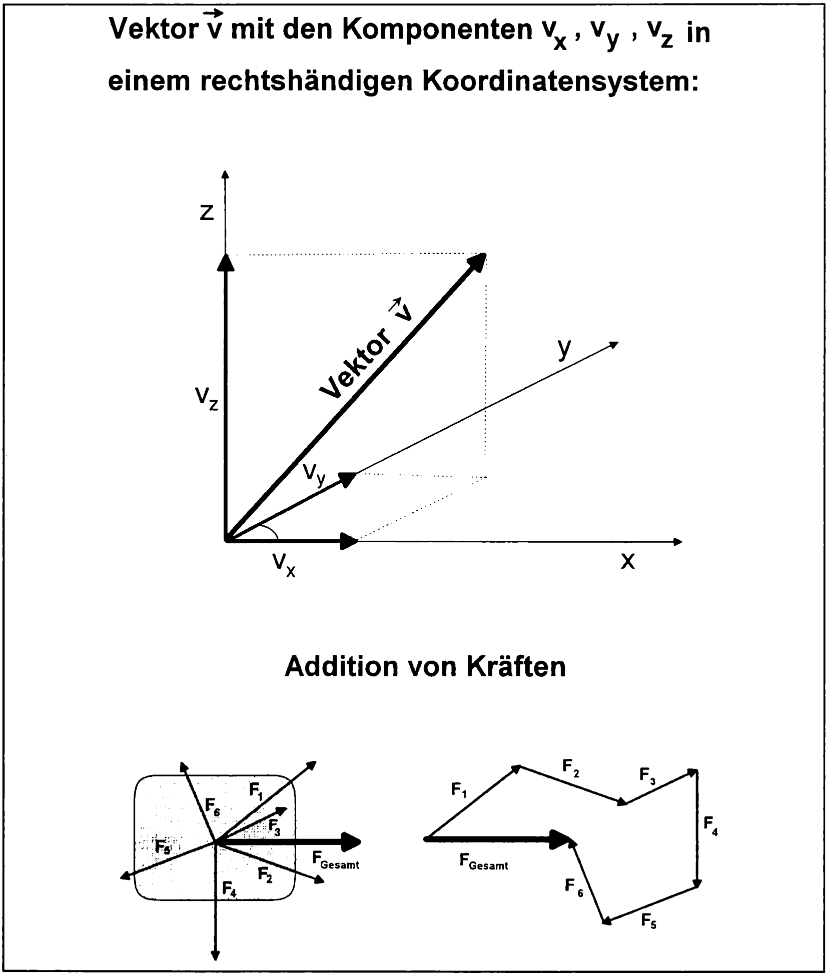


Abb. 2:
Zur Veranschaulichung des Vektorproduktes **M** = [**r** x **F**]:
Den Vektoren **r** und **F** wird ein Vektor **M** so zugeordnet, dass dieser auf der durch **r** und **F** aufgespannten Ebene senkrecht steht. Dem Vektor **M** wird dann die Richtung zugewiesen, in der eine rechtsgängige Schraube fortschreiten würde, wenn der Vektor **r** auf dem kürzesten Weg in Richtung des Vektors **F** gedreht wird. Durch Vertauschung der Reihenfolge von **r** und **F** kehrt sich die Richtung von **M** um, d. h. es gilt: **M** = [**r** x **F**] = - [**F** x **r**]. Beim dargestellten Beispiel handelt es sich um den Ortsvektor **r** (Hebelarm), den Kraftvektor **F** und das dadurch erzeugte Drehmoment **M**.

Vektorprodukt

Den Vektoren $\vec{r}$ und $\vec{F}$ wird ein Vektor $\vec{M}$ so zugeordnet, daß der Vektor $\vec{M}$ auf $\vec{r}$ und $\vec{F}$ senkrecht steht:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}] = - [\vec{F} \times \vec{r}]$$

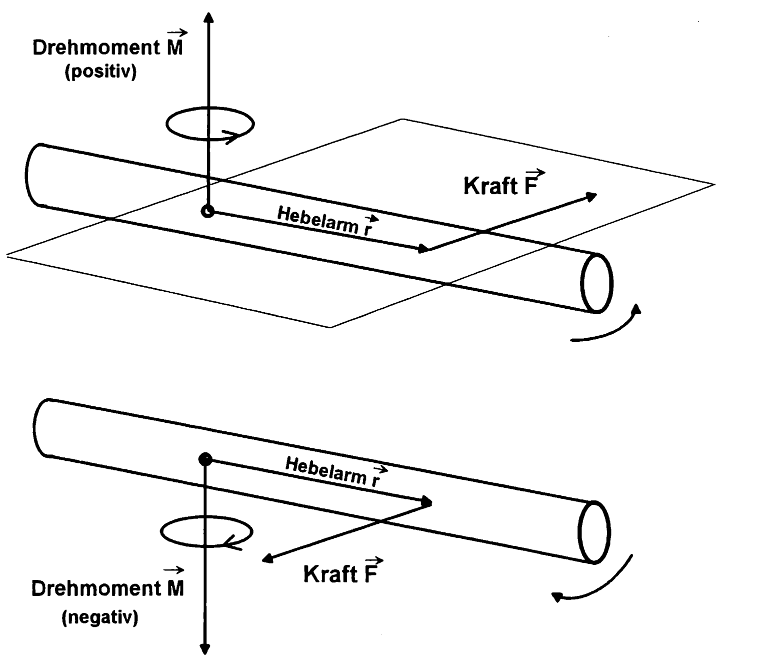


Abb. 3:
Mit Eisenfeilspänen dargestellte magnetische Feldlinienbilder eines stromdurchflossenen Drahtes (oben), einer stromdurchflossenen zylindrischen Spule (Mitte links), eines Stabmagneten (Mitte rechts) sowie einige dazugehörige, schematisch nachgezeichnete Feldlinien (unten links und rechts) [*Höfling, O.*, 1990, p. 457].

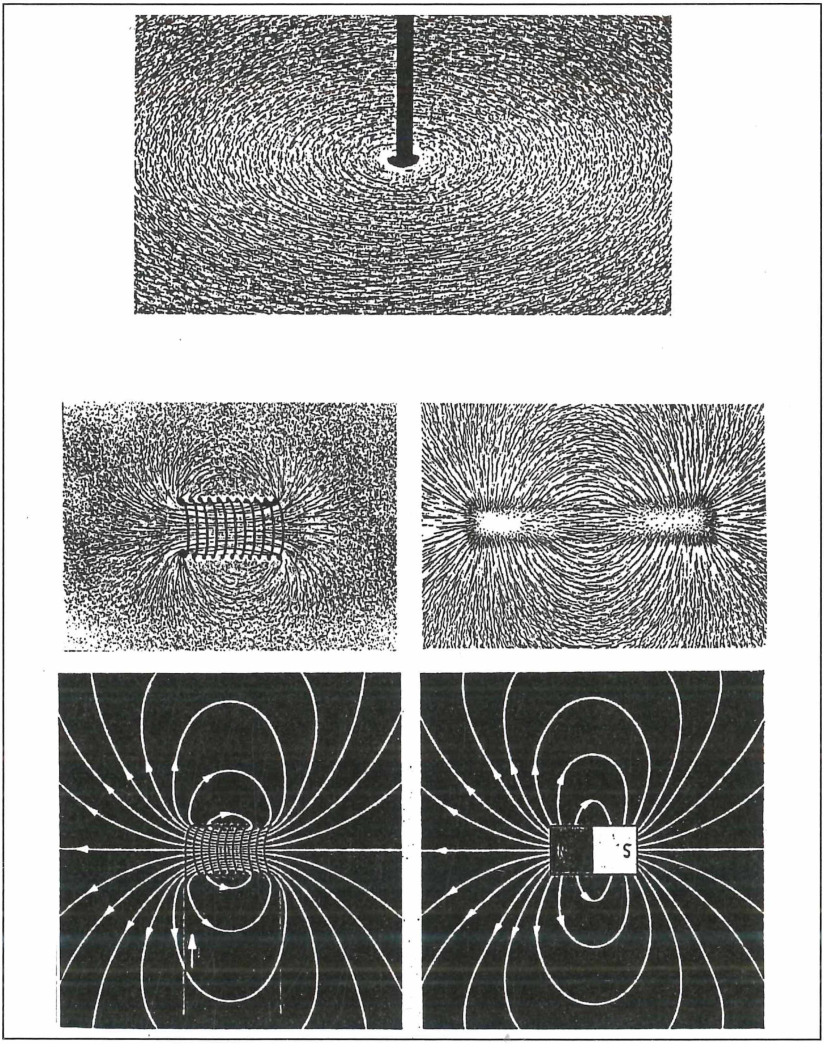


Abb. 4:
Zur Illustration des Fermatschen Prinzips des kürzesten Lichtwegs.
Beschreibung siehe Text.

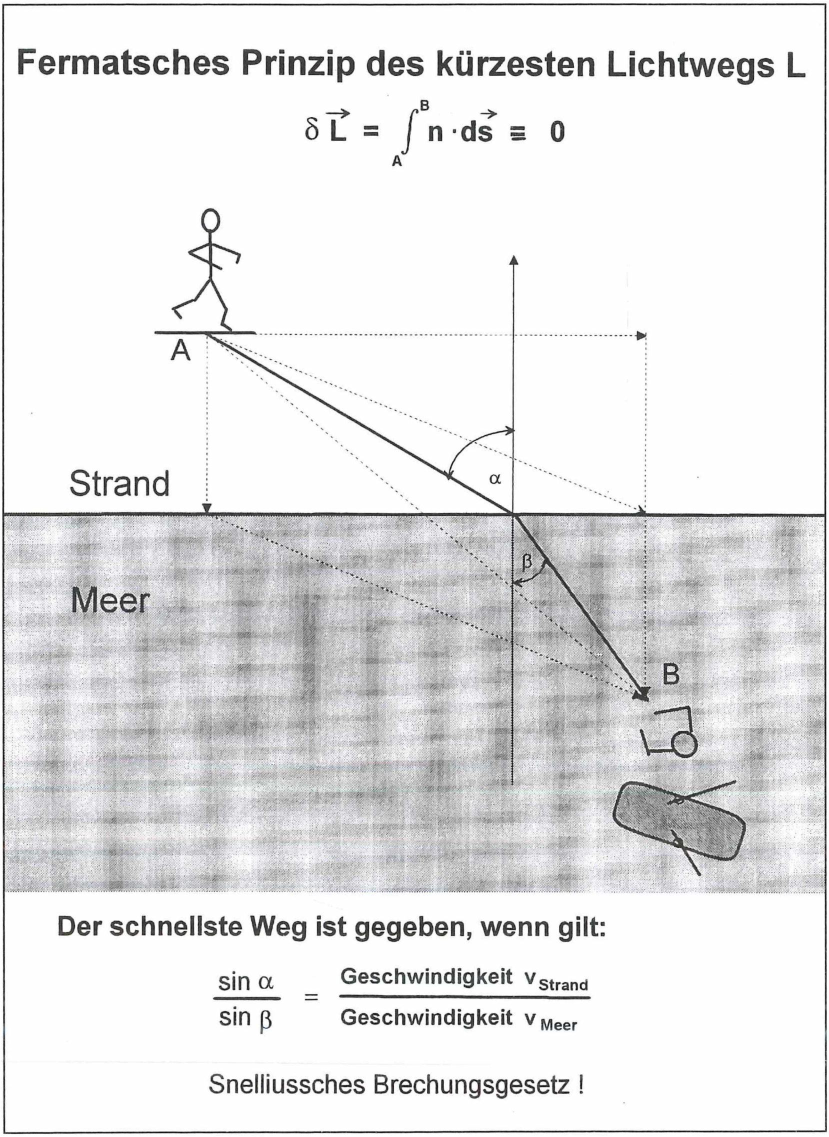


Abb. 5:
Zur Illustration des Maupertuisschen Prinzips der kleinsten Wirkung:
Von allen möglichen Wegen $s_1 \ldots s_n$, die ein frei beweglicher Körper in einem vorgegebenen Kraftfeld von Punkt A nach Punkt B einschlagen könnte, ist in der Natur derjenige realisiert, auf dem die Wirkung S ein Minimum ist.

Maupertuissches Prinzip der kleinsten Wirkung

$$\delta S = \int_A^B \vec{p} \cdot d\vec{s} \equiv 0$$

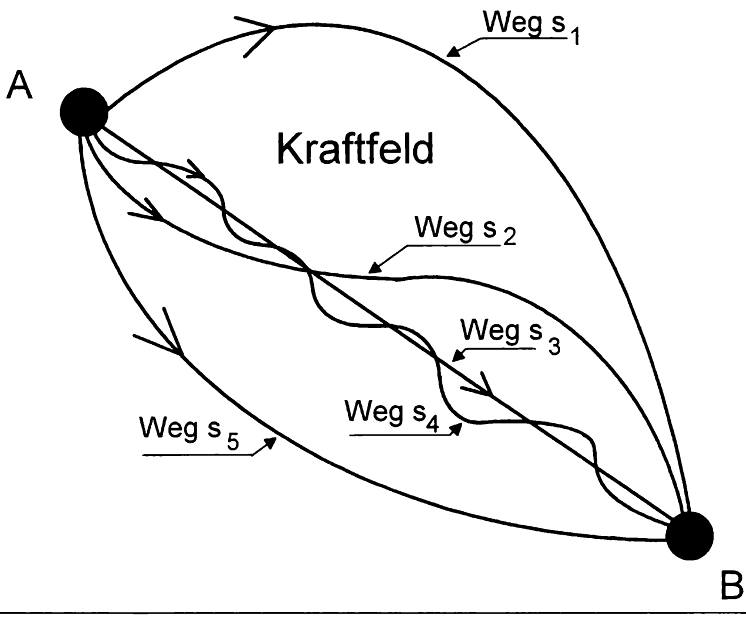


Abb. 6:
Beispiele für Raum-Zeit-Symmetrien und den ihnen entsprechenden Erhaltungssätzen. (Es bedeuten: „→“ „geht über in“; **x** räumlicher Vektor; m Masse eines Objektes, **v** dessen Geschwindigkeit; t Zeitkoordinate; D_{ij} Drehmatrix und Θ Drehwinkel, um den das System gedreht wird.)

Symmetrien und Erhaltungssätze

Raum-Zeit-Symmetrien

Emmy Noether-Theorem

- Invarianz unter Raumtranslationen:

$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}$ ⇔ Erhaltung des *Impulses* $\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$

- Invarianz unter Zeittranslationen:

$t \rightarrow t + \Delta t$ ⇔ Erhaltung der *Energie E*

- Invarianz unter Raum-Drehungen:

$x_i \rightarrow D_{ij}(\Theta)\, x_j$ ⇔ Erhaltung des *Drehimpulses* **J** einschließlich Spin

- Invarianz unter Raum-Spiegelungen:

$\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$ ⇔ Erhaltung der *Parität*: $P = \pm 1$

Abb. 7: Beispiel zur Erläuterung der Paritätsoperation: Spiegelt man Zifferblatt und Zeiger (Vektoren) einer Uhr am Koordinatenursprung, dann haben die Zeiger (Vektoren) des entstehenden Spiegelbilds entgegengesetzte Richtung. Ihr Drehsinn aber bleibt erhalten, d. h. die gespiegelten Zeiger laufen in der gleichen Richtung wie die ursprünglichen Zeiger weiter.

Paritätsoperation

Spiegelung am Koordinatenursprung:

Vektor $\vec{r} = \{ x, y, z \} \Rightarrow \vec{r} = \{ -x, -y, -z \}$

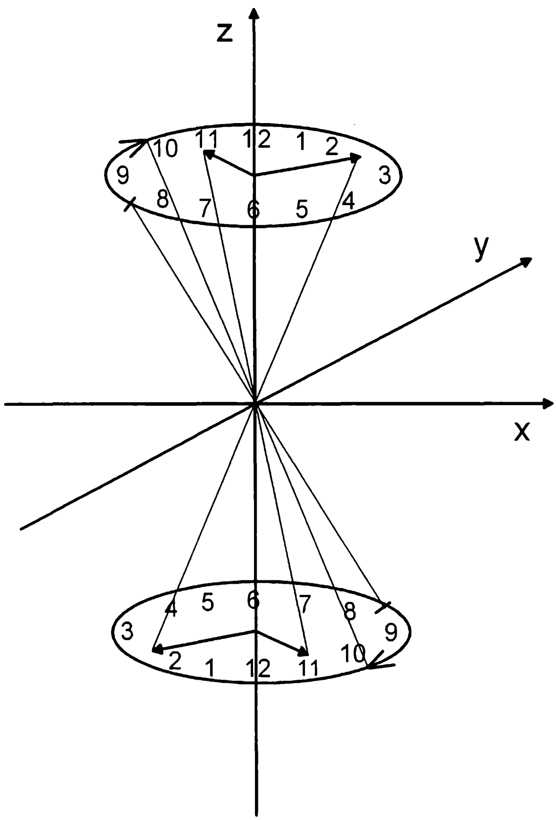
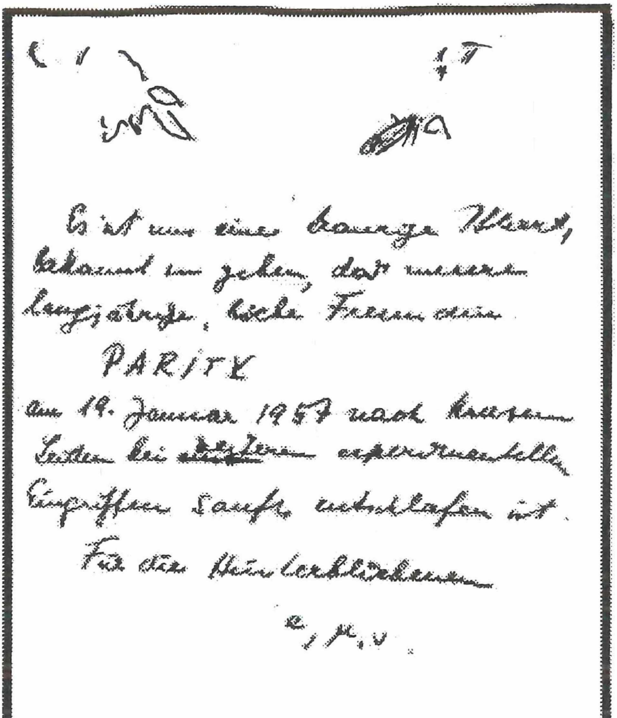


Abb. 8: Scherzhafter Nachruf Paulis auf die Erhaltung der Parität: „Es ist uns eine traurige Pflicht, bekannt zu geben, dass unsere langjährige, liebe Freundin PARITY am 19. Januar 1957 nach kurzem Leiden bei weiteren experimentellen Eingriffen sanft entschlafen ist. Für die Hinterbliebenen: e (Elektron), μ (Müon), ν (Neutrino)“



Es ist uns eine traurige Pflicht,
bekannt zu geben, daß unsere
langjährige, liebe Freundin
PARITY
am 19. Januar 1957 nach kurzem
Leiden bei ~~weiteren~~ experimentellen
Eingriffen sanft entschlafen ist.
Für die Hinterbliebenen
e, μ, ν.

Abb. 9: Erläuterung zur Paritätsverletzung beim β-Zerfall von ^{60}Co: Wegen der Erhaltung des Drehimpulses muss der Eigendrehimpuls der emittierten Elektronen (Spin) stets parallel zum Eigendrehimpuls (Kernspin) des ^{60}Co-Kerns stehen.

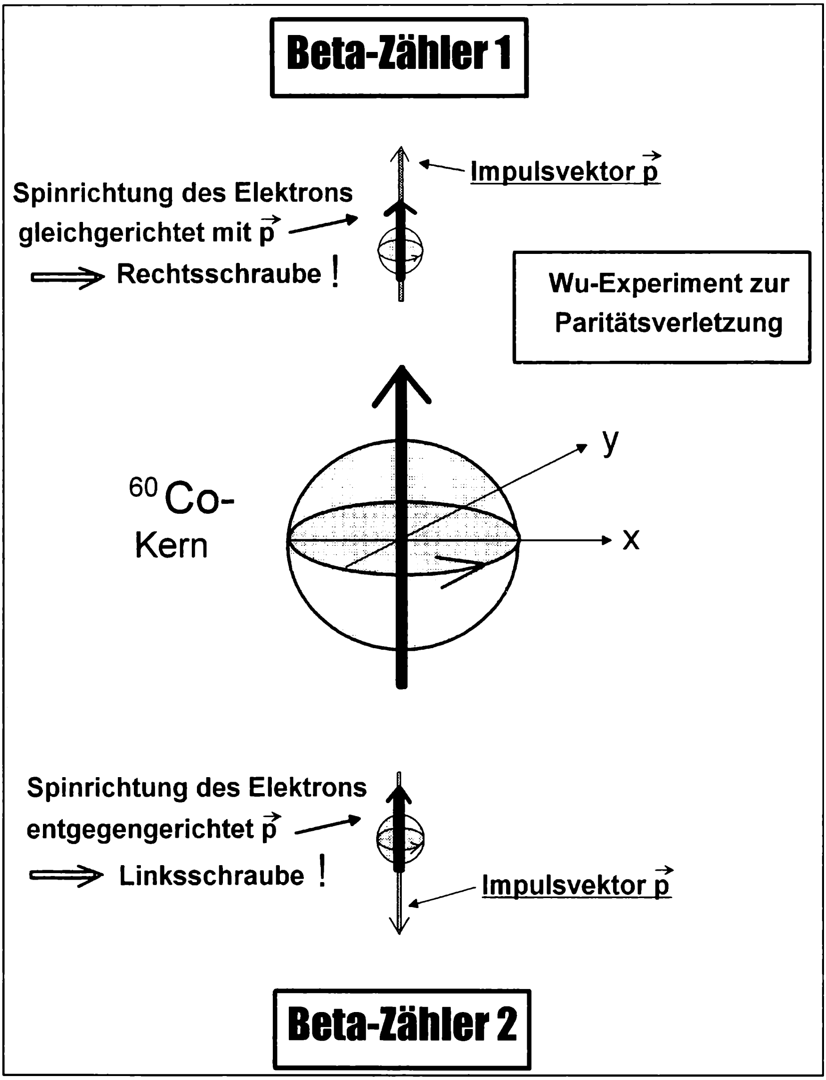
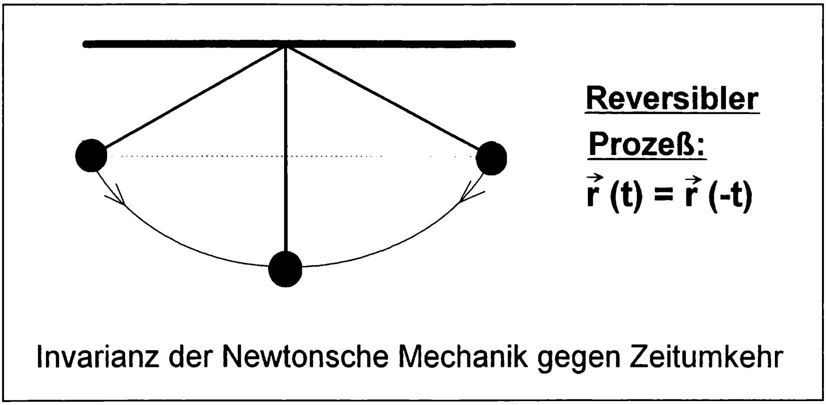


Abb. 10 Beispiel für einen reversiblen und einen irreversiblen Prozess: Ungedämpftes Fadenpendel (oben) und Kunstspringer im Schwimmbad (unten).



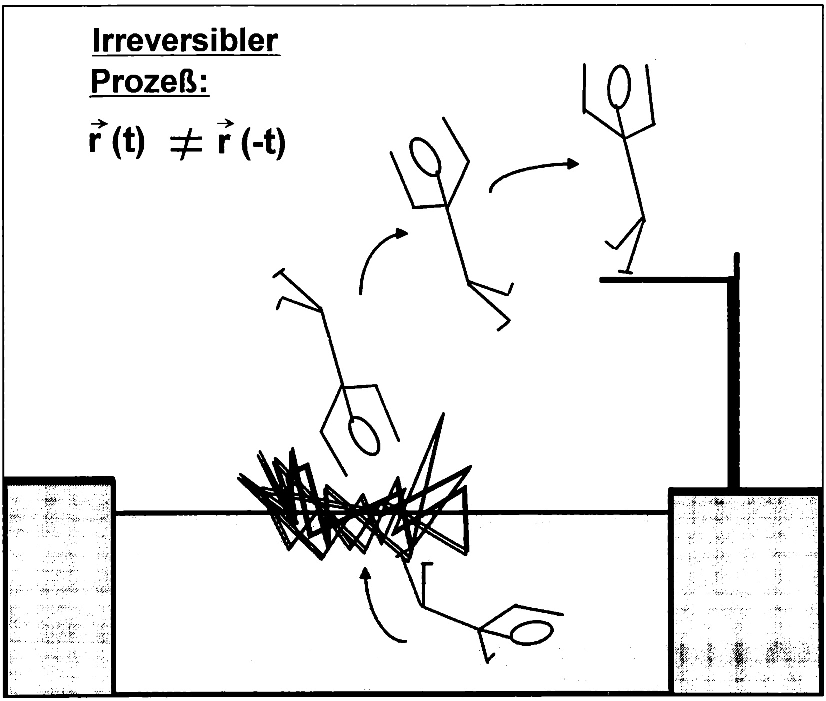
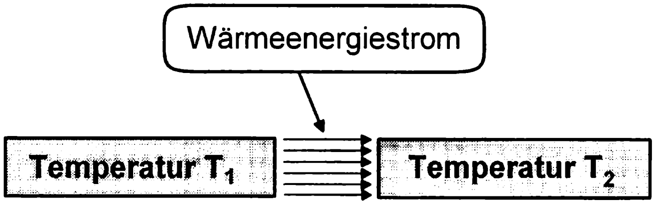


Abb. 11 Beispiel eines irreversiblen thermodynamischen Prozesses und Formulierung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik.

Thermodynamische Prozesse

Beobachtung:



Temperatur T_1 > Temperatur T_2

Thermisches Gleichgewicht herrscht dann, wenn $T_1 = T_2$ ist.

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik:

"Wärmeenergie kann niemals spontan, d. h. ohne äußere Einwirkung von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen."