

1. Felder in der Physik

1.1 Idee des Feldes

Vorversuch 1/1:

Nehmen Sie eine leere Bier- oder Limonadendose. Füllen Sie diese mit etwas Wasser. Es sollte nur ein paar Millimeter hoch stehen. Erhitzen Sie die Dose auf einer Heizplatte, bis das Wasser siedet, was Sie am kräftigen Brodeln hören können. Lassen Sie es noch ein bis zwei Minuten brodeln und besorgen Sie inzwischen ein Gefäß mit Kühlwasser. Nehmen Sie dann einen Topflappen und tauchen Sie die Dose mit der Öffnung nach unten in das Kühlwasser ein. Erklären Sie den spektakulären Effekt, der dann eintritt.

In der Umgangssprache ist der Begriff 'Feld' assoziativ mit Begriffen wie Wald und Wiese, Acker, Weide, Getreide, Bereich, Umfeld, Landarbeit, Furchen, Fußball, Feldbett usw. verknüpft. In der Wissenschaft erhält der Feldbegriff eine disziplin-spezifisch eingeeengte und abstraktere Bedeutung. In der Psychologie spricht man von einem psychologischen (Um)Feld, in der Soziologie von sozialen Einflußfeldern, in der Linguistik von Wortfeldern, in der Didaktik von didaktischen Feldern, in der Biologie von morphogenetischen Feldern. Gemeinsam ist diesen Feldbegriffen, daß sie räumliche oder begriffliche Bereiche kennzeichnen, in denen Eigenschaften oder Verhalten interessierender Objekte oder Prozesse untersucht werden können.

In der Physik hat man es in der Regel mit meßbaren Größen zu tun. Als Annäherung an den physikalischen Feldbegriff können wir uns zunächst unter Feld einen Bereich im Raum vorstellen, innerhalb dessen für jeden Punkt eine physikalische Größe durch Zahlenwert und Einheit angegeben werden kann. Wir leben ständig in mehreren physikalischen Feldern. Stellen Sie sich einen Raum (ein Zimmer, ein Saal, ein Labor) vor, in dem an verschiedenen Stellen in verschiedenen Höhen viele Thermometer plaziert sind. Eins zeigt eine Temperatur von 20,1 °C, ein anderes, tiefer plaziertes 20,0 °C, ein drittes weiter oben angebrachtes 20,2 °C. Diese Messungen können wir theoretisch an beliebig vielen Punkten des Raumes festmachen. Im Prinzip kann jedem Punkt ein Temperaturwert zugeordnet werden. Diese Zuordnung läßt sich durch Tabellen, graphische Darstellungen usw. übersichtlich gestalten. Wir sprechen in diesem

Fall von einem Temperaturfeld. Wenn wir statt der Thermometer Barometer nehmen und die Prozedur wiederholen, erhalten wir Auskunft über ein Druckfeld. Darstellungen des Druckfeldes der Atmosphäre über Europa können Sie in manchen Tageszeitungen oder in Nachrichtensendungen im Fernsehen finden. Hier wird das Feld dadurch veranschaulicht, daß Punkte mit gleichem Druck miteinander verbunden werden. Diese Linien werden für geeignet abgestufte Druckwerte auf die Landkarte gezeichnet.

Es lassen sich noch viele andere Felder, in denen wir leben, angeben, z.B. Luftfeuchtheitsfelder, Beleuchtungsstärkefelder, magnetische Felder u.a.m.

Natürlich versucht man, die interessierenden Größen als Funktion des Ortes und gegebenenfalls auch der Zeit anzugeben. Wir werden als Beispiel für eine Druckfeldrepräsentation die sogenannte barometrische Höhenformel näher betrachten.

Im zweiten Kapitel wird der Druckbegriff ausführlich besprochen. Wir werden hier einige Bemerkungen über ihn vorwegnehmen. In vielen Büchern steht, daß der Luftdruck durch das Gewicht der Luft verursacht wird. So kann man das nicht sagen. Ein einfaches Experiment widerlegt diese Behauptung. Wenn man etwas Luft in einen geschlossenen Behälter einschließt, diesen mit einem Druckmesser verbindet und die Luft erwärmt, steigt der Druck der eingeschlossenen Luft, obwohl deren Masse sich nicht ändert. Allerdings beeinflusst das Gewicht der Luft, die auf der Erdoberfläche lastet, die Luftdichte. Größeres Gewicht bedeutet, bei gegebenem Volumen, größere Dichte. Diese wiederum führt dazu, daß eine entsprechende Vermehrung der Kollisionen der Moleküle mit einer der Temperatur entsprechenden Geschwindigkeit auftritt und so die Druckerhöhung bewirkt. Mehr darüber finden Sie im Band VI: 'Das Entropiekonzept'.

In der Schule ist die Einführung des Druckes als Kraft pro Fläche üblich. (Die Probleme, die sich bezüglich der Richtungen ergeben können, werden in Abschnitt 2.3 diskutiert.) Viele Lernende haben dann Probleme, sich den Druck an einem Punkt vorzustellen. Wenn man sich die Fläche immer mehr verkleinert und schließlich auf einen Punkt zusammengezogen denkt, meint man, daß dort auch der Druck verschwinden müßte. Das ist aber falsch. Dieser Fehlschluß kommt dadurch zustande, daß der Druck mit der Kraft verwechselt wird. Das Argument trifft auf die Kraft zu, aber nicht auf den Druck als Quotient, der auch im Grenzfall für eine gegen Null gehende Fläche meist einen wohldefinierten Wert besitzt. So etwas ist Ihnen ja vom Differenzieren her geläufig.

Es ist also sinnvoll, einem Punkt in einer bestimmten Höhe h über dem Erdboden einen Wert für den Luftdruck zuzuordnen. Den Wert liefert die barometrische Höhenformel:

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} \cdot G \cdot h\right). \quad (1/1)$$

Dabei bedeuten p_0 und ρ_0 den Druck und die Dichte der Luft am Boden und G die Gravitationsfeldstärke. Die Temperaturabhängigkeit wird in dieser Formel nicht berücksichtigt, was ihre Übereinstimmung mit der Wirklichkeit beeinträchtigt.

Beispiel 1/1:

Der höchste Berg der Erde, der Mount Everest, ist etwa 8900 m hoch. Der Druck und die Dichte der Luft in Meereshöhe betragen etwa $p_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}$ und $\rho_0 = 1,3 \text{ kg m}^{-3}$. Wie hoch ist der Luftdruck am Gipfel?

$$p = 1 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} \cdot \exp\left(\frac{-1,3 \text{ kg m}^{-3} \cdot 10 \text{ N kg}^{-1} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \text{ m}}{1 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}}\right),$$

$$p = 1 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} \cdot \exp(-1,157),$$

$$p = 1 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} \cdot 0,31 = 0,31 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2},$$

$$p = 0,31 \text{ Pa},$$

denn

$$1 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ Pa (1 Pascal)}.$$

Der Luftdruck auf dem Mount Everest beträgt also ca. 1/3 des Druckes in Meereshöhe.

Im Wetterbericht wird der Luftdruck in Hektopascal (hPa) angegeben, wobei $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$. Der normale Luftdruck beträgt also etwa 1000 hPa.

Wenn die Atmosphäre der Erde überall die gleiche Temperatur hätte - was nicht der Fall ist - dann würde der Druck exponentiell mit der Höhe abnehmen. Exponentielles Verhalten heißt, daß der Druck nicht den Wert Null erreicht, er kommt nur mit zunehmender Höhe immer näher an den Wert Null heran.

Alle Größen, die wir bis jetzt betrachtet haben, sind Skalare. Man nennt die entsprechenden Felder SKALARFELDER. Man kommt aber in der Physik nicht mit Skalaren aus (vgl. Band I). Viele Größen haben Vektorcharakter. Bei einer strömenden Flüssigkeit z.B. können wir jedem Punkt einen Geschwindigkeitsvektor zuordnen. Wir sprechen dann von einem VEKTORFELD.

Abbildung 1/1 zeigt ein ebenes Skalarfeld und ein ebenes Vektorfeld. Beträge der skalaren und vektoriellen Größen sind durch Dicke der Punkte bzw. Länge der Pfeile gekennzeichnet. Die Pfeilrichtung gibt die Richtung der Vektoren an.

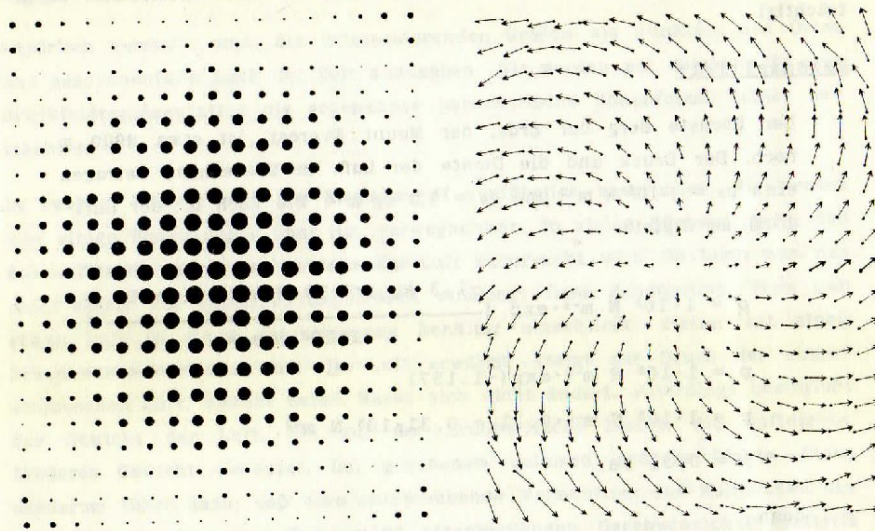


Abb. 1/1: Skalar- und Vektorfeld

Besonders wichtig und interessant in der Physik sind Kraftfelder, also Felder, deren Vektoren Kräfte repräsentieren. Mit einem dieser Kraftfelder, dem Gravitationsfeld der Erde, sind wir am besten vertraut.

Wir werden jetzt kurz rekapitulieren, was wir aus Band I, 'Das Teilchenkonzept', schon über diese Kraft wissen und sie ausführlicher im Kapitel 3 behandeln. Es ist uns bekannt, daß ein Teilchen der Masse m_1 auf ein anderes im Abstand r befindliches Teilchen der Masse m_2 (sozusagen fern-) wirkt, indem es eine Kraft ausübt mit dem Betrag

$$F_{12} = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1/2)$$

Das besagt das Newtonsche Gravitationsgesetz. Die Masse m_1 wird oft als 'Quelle' für die Anziehungskraft auf m_2 bezeichnet. Die Kraft mit dem Betrag F_{12} wird vom Körper 1 hervorgerufen und ist vom Körper 2 auf die Quelle 1 gerichtet. Ebenso kann m_2 als die Quelle für die gleich große, aber entgegengesetzte Kraft auf m_1 angesehen werden. Wir haben diese gegenseitige Kraftausübung als Wechselwirkung bezeichnet. Die Massen m_1 und m_2 werden in diesem Zusammenhang auch als 'schwere' Massen bezeichnet (vgl. Band I).

Für den Betrag der auf einen Körper der Masse m an der Erdoberfläche wirkenden Gravitationskraft gilt die wohlbekannte Formel (siehe Bd. I)

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{G}.$$

Wie in Kapitel 3 ausführlich besprochen wird, ist \vec{G} , die Gravitationsfeldstärke, als Quotient von \vec{F}_g und m , nicht nur von m abhängig.

Nur wenigen Lernenden ist klar, daß man diese Formel mit dem geläufigen Wert für \vec{G} näherungsweise auch auf Satelliten in einer Erdumlaufbahn (falls die Entfernung von der Erde nicht ganz beträchtlich ist) anwenden kann. Das kann daran liegen, daß der Zusammenhang dieser Formel mit der allgemeinen Schreibweise (1/2) nicht gesehen wird. Wir werden uns das an einem Beispiel klarmachen.

Beispiel 1/2:

Wie ändert sich \vec{G} , wenn man von der Erdoberfläche, also vom Abstand $r_E = 6370$ km vom Erdmittelpunkt, zu einem Punkt einer Satellitenbahn in 400 km Höhe übergeht? Viele Menschen meinen, dort gäbe es überhaupt keine Gravitationskraft der Erde mehr. Für den Betrag der Gravitationskraft der Erde auf einen Körper der Masse m gilt nach (1/2)

$$F_g = \gamma \cdot \frac{m_E \cdot m}{r^2} = G \cdot m \quad \text{mit } G = \gamma \cdot \frac{m_E}{r^2}.$$

Wir versehen jetzt das G mit einem Index, der die Höhe über der Erdoberfläche angibt. In vielen Büchern finden Sie

$$G_0 = 9,81 \text{ N kg}^{-1}.$$

Für den Abstand h von der Erdoberfläche bekommt man

$$G_h = \gamma \cdot \frac{m_E}{(r_E + h)^2} \quad (1/3)$$

Also haben wir:

$$G_h = G_0 \cdot \frac{r_E^2}{(r_E + h)^2}$$

$$G_h = G_0 \cdot \frac{(6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2}{(6,37 \cdot 10^6 \text{ m} + 0,4 \cdot 10^6 \text{ m})^2}$$

$$G_{400} = G_0 \cdot 0,89.$$

G ist also in 400 km Höhe nur 11 % geringer als an der Erdoberfläche.

Die Fernwirkung auf den Körper können wir uns nur unbefriedigend erklären. Man kann sich die Übertragung einer Kraftwirkung auf einen Körper ohne Hebel, Stangen, Seile usw. vielleicht besser vorstellen, wenn man annimmt, daß die Kraft, die auf ihn an seinem Ort wirkt, eine Eigenschaft des Raumes ist. Wir können uns dann auf die vertraute Denkweise der Nahwirkung stützen. Dazu ist der physikalische Feldbegriff geeignet! Man sagt, daß die Erde mit der Masse m_E als eine Art 'Gravitationsladung' wirkt und um sich herum ein Gravitationsfeld erzeugt, das durch die Gravitationsfeldstärke \vec{G} gekennzeichnet ist. Der Betrag von \vec{G} ändert sich in der Umgebung von m_E wie in (1/3) angegeben. Die Existenz des \vec{G} -Feldes ist unabhängig von der Existenz anderer Körper mit den Massen m_i in der Umgebung um m_E . Anders ausgedrückt: Die Gravitationsfeldstärke \vec{G}_h mit dem in (1/3) gegebenen Betrag existiert im Abstand h von der Erdoberfläche, egal ob sich dort ein Körper z.B. der Masse m_i befindet oder nicht. Das Feld \vec{G}_h ist existent, wenn die Gravitationsladung m_E vorhanden ist. Die 'Antwort' auf die Existenz dieses Feldes erfolgt, wenn der Körper mit der Masse m_i in das Feld \vec{G}_h 'eingebettet' wird, was zur Wechselwirkung des Erdfeldes mit dem Feld des eingebrachten Körpers führt, die sich als Kraft entsprechend (1/2) manifestiert. Die Existenz von \vec{G} ist also nur an m_E geknüpft, während das Auftreten der Kraft einen Wechselwirkungspartner erfordert.

Im Prinzip läßt sich das Gravitationsfeld so untersuchen, d.h. seinen Betrag und seine Richtung lassen sich derart ermitteln, daß man den Körper der Masse m_i in das von m_E erzeugte Feld bringt und die Kraft mißt. Dividiert man das Ergebnis durch m_i , erhält man den Betrag von \vec{G} . Die Richtung von \vec{G}

ist gleich der der Kraft. Der eingebrachte Körper mit der Masse m_i wird auch 'Probekörper' genannt.

Ersetzt man den Probekörper durch einen anderen mit der Masse m_2 , so ändert sich an ein und demselben Ort nichts an \vec{G}_h . Dennoch hat die Kraft auf den neuen Probekörper, falls $m_2 \neq m_1$ ist, gemäß (1/2) einen anderen Betrag. In diesem Zusammenhang tritt häufig ein Mißverständnis auf. Man findet oft die Formulierung, der Probekörper dürfe nicht zu groß sein, weil er dann selbst das Feld 'stört'. Das geht aber etwas an dem Problem vorbei. Wenn man die Feldstärke an einem Punkt mit wohldefiniertem Abstand zum felderzeugenden Körper bestimmen will, so kann man einen Probekörper mit beliebiger Masse nehmen und dessen Schwerpunkt an diesen Punkt bringen, eben weil das Verhältnis Kraft durch Masse des Probekörpers nicht mehr von der Masse des Probekörpers abhängt. Das war ja der Sinn der Größe 'Feldstärke'.

Problematisch wird es erst, wenn man dynamische Vorgänge betrachtet. Auf eine Eisenkugel z.B. wirkt an der Erdoberfläche die Kraft $\vec{F}_{gK} = m_K \cdot \vec{G}$ (der Index K steht für Kugel). Nach dem 3. Newtonschen Gesetz (vgl. Band I) wird die Erde von der Kugel mit derselben gegengleichen Kraft angezogen. Läßt man die Kugel los, so werden die Erde und die Kugel gleichzeitig beschleunigt. Man bemerkt nur durch die ungeheure Masse der Erde nichts von ihrer Beschleunigung (vgl. Abschnitt 6.2 in Band I). Die Bewegung der Erde ist dann vernachlässigbar. Wenn sich jedoch der felderzeugende Körper aufgrund der Einwirkung des Probekörpers auf ihn zubewegt, dann ändert sich auch die Feldstärke am Ort des Probekörpers. Um diese Komplikation zu vermeiden, beschränkt man sich entweder auf den statischen Fall, d.h., man nimmt an, der felderzeugende Körper ist fixiert, er ist gleichsam 'festgenagelt', so daß er sich nicht bewegen kann, oder aber man nimmt den Fall des kleinen Probekörpers an, der keinen merklichen Einfluß auf die Bewegung des felderzeugenden Körpers ausübt. Der Probekörper soll auch nicht imstande sein, die Massenverteilung im felderzeugenden Körper zu ändern. Das läßt sich ohne weiteres für den Fall verallgemeinern, daß das Feld von einer Konfiguration mehrerer Körper erzeugt wird. Wenn man z.B. sagt, "der Mond bewegt sich im Feld der Erde", dann setzt man dabei stillschweigend voraus, daß die Erde als ruhend betrachtet wird. Man vernachlässigt dabei ihre Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems Erde-Mond und um die Sonne. Wenn man aber das Verhalten eines der beiden Partner in einem Doppelsternsystem untersucht, in dem beide Sterne etwa die gleiche Masse besitzen, dann kann man das nicht mehr so einfach. Wir werden solche Fälle aber nicht behandeln.

Wenn wir von nun an von 'Bewegung in einem Feld' sprechen, dann setzen wir voraus, daß dadurch der felderzeugende Körper oder die Konfiguration mehrerer felderzeugenden Körper nicht beeinflusst wird. Wir wollen sie als ruhend oder 'festgenagelt' betrachten. Eine eventuelle Änderung des Feldes soll andere Ursachen als die Bewegung eines Probekörpers haben.

Ähnlich wie eine Masse (die Gravitationsladung) eines Teilchens ist auch eine elektrische Ladung Q dazu fähig, den Zustand des Raums in ihrer Umgebung derart zu verändern, daß eine Probeladung q angezogen oder in diesem Fall auch abgestoßen wird. Hier entsteht noch ein zusätzliches Problem. Es liegt wieder nahe, die Feldstärke in der Umgebung der Ladung Q als Quotient Kraft durch Ladung (des Probekörpers, vgl. Kapitel 4) einzuführen. Auch diese Größe ist unabhängig von q . Deshalb kann zunächst der Betrag der Probeladung beliebig groß sein. Dadurch, daß sich ihr eigenes Feld dem der Ladung Q überlagert, entsteht noch kein Problem. Häufig wird jedoch das Feld von einer auf einem Leiter sitzenden Ladung Q erzeugt. Auf ihm kann sich leicht ihre Verteilung ändern (vgl. Kapitel 4).

Hier kann also die felderzeugende Ladung Q durch Einwirkung des Feldes der Probeladung q in ihrer Wirkung beeinflusst werden. Eine so bewirkte Beeinflussung des Feldes wollen wir jedoch nicht zulassen, denn dann wäre die Feldstärke nicht mehr eindeutig. Man muß also auch hier verlangen, daß entweder die felderzeugenden Ladungen festsitzen, oder daß die Probeladung so klein ist, daß sie keine derartigen Effekte verursacht.

Wir erwähnen noch kurz das Magnetfeld. Auch in der Umgebung eines Magneten können auf einen weiteren Magneten oder auf eine bewegte Ladung Kräfte ausgeübt werden, so daß wir auch jedem Magneten die Fähigkeit zusprechen können, in seiner Umgebung ein Magnetfeld zu erzeugen.

Abschließend können wir sagen:

Ist eine physikalische Größe A in Abhängigkeit von räumlichen Koordinaten wie z.B. x , y , z beschreibbar, dann bezeichnen wir sie als Feldgröße. Dabei kann A z.B. ein Skalar oder ein Vektor sein, entsprechend handelt es sich um ein Skalar- oder ein Vektorfeld. Ist A in dem betrachteten Bereich räumlich konstant, sprechen wir von einem homogenen Feld, im anderen Fall ist das Feld inhomogen. Wenn sich A zeitlich nicht ändert, nennen wir das Feld stationär, andernfalls instationär. Felder selbst kann man nicht 'sehen' oder 'anfassen', sondern nur an ihren Wirkungen erkennen.

Der Feldbegriff ist ein Konstrukt des menschlichen Geistes, ein Mittel zur Beschreibung vieler physikalischer Phänomene. Wegen seiner umfassenden Anwendbarkeit sprechen wir vom FELDKONZEPT.

1.2 Entwicklung des Feldbegriffes

Vorversuch 1/2:

Fahren Sie mit einem Plastikamm durch die Haare oder reiben Sie ihn an einem Pullover. Halten Sie ihn dann ganz dicht vor Ihr Gesicht. Was fühlen Sie? Untersuchen Sie auch, was passiert, wenn sie ihn in die Nähe von Papierschnipseln, Wollfusseln, Spänen aus Alu-Folie (Lametta-Stückchen), Watteflöckchen usw. bringen.

Die Entwicklung des physikalischen Feldbegriffes steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung des Kraftbegriffes. Wir erfahren es tagtäglich, daß Kräfte durch direkte Berührung, d.h. Stoßen, Schieben, Ziehen usw., wirksam werden. Wir nennen dies Nahwirkung.

Jedoch kannte man schon im Mittelalter die Wirkung von Kräften, bei denen keine direkte Berührung nötig ist. Eine Magnetnadel richtet sich 'von selbst' in die Nord-Süd-Richtung aus. Zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Metallkugeln fliegt ein Wattebausch 'von selbst' hin und her. Man sprach hier von Fernwirkung.

Das führt aber zu einigen Problemen: Wie wird diese Wirkung überhaupt übertragen? Wie schnell breitet sich dieser Zustand, in dem auf eine Masse oder eine Ladung eine Kraft ausgeübt werden kann, im Raume aus, wann 'merkt' ein irgendwo im Raum befindlicher Probekörper, daß sich etwas mit dem felderzeugenden Körper geändert hat?

Der englische Naturforscher GILBERT (1540-1603) nahm z.B. an, daß geliebener Bernstein von einem unsichtbaren 'Effluvium' umgeben wird, das gleichsam aus dem Bernstein 'herausgerieben' wird, in die Umgebung ausschwärmt und andere Körper, z.B. Papierschnipsel zwingt, sich zum Bernstein hin zu bewegen.

DESCARTES (1596-1650) führte im 17. Jahrhundert die elektrische Kraft auf Wirbel des 'Effluvium' zurück. Er schrieb 1633:

"In der Umgebung eines elektrifizierten Körpers wird ein Wirbel aus sich ausbreitendem feinen Material im Zustand der Bewegung erzeugt, der leichte Körper, die in seinem Aktivitätsbereich liegen, zu diesem elektrifizierten Körper zwingt. Die Existenz dieses Wirbels ist mehr als eine bloße Vermutung, wenn nämlich ein elektrifizierter Körper direkt vor das Gesicht gebracht wird, hat man die Empfindung, als ob man von einem Spinnennetz berührt wird" (siehe Vorversuch 1/2).

In GILBERTS und DESCARTES' Ausführungen kommt Unbehagen gegenüber dem Gedanken der Fernwirkung zum Ausdruck. NEWTON (1643-1727) hatte jedoch mit seiner Gravitationstheorie, in der keine geheimnisvollen 'Effluvia' und deren Wirbel vorkommen, große Erfolge erzielt. Er hatte ein mathematisches Modell gefunden, das es erlaubte, Gravitationskräfte zu berechnen. Er mochte nicht über den Mechanismus der Anziehung spekulieren und sagte (schrieb) dazu: "Hypotheses non fingo" (Ich mache keine Hypothesen). Die Idee einer Kraft, die direkt in der Entfernung wirkt, wurde zur Denkgewohnheit. M. BORN (1882-1970) schrieb dazu:

"Es ist nichts weiter als Gewohnheit, wenn eine Idee sich so ein-drucksvoll in die Köpfe einprägt, daß sie letztlich als Erklärungsprinzip benutzt wird."

FARADAY (1791-1867) betrachtete das Problem ganz anders. Er benutzte keine rein mathematischen Modelle zur Beschreibung der Natur, sondern anschauliche physikalische Begriffe, wie etwa den der Feldlinien, die die wechselwirkenden Körper verbinden. Für ihn gab es z.B. 'magnetische Kraftlinien', die sich durch Eisenfeilspäne darstellen ließen oder durch kleine Magnetnadeln, indem diese sich in die Richtung der Tangenten daran einstellten. Später hat er diesen Gedanken auch auf elektrische Kraftfelder angewendet. Die Gesamtheit der elektrischen und magnetischen Phänomene konnte für ihn nicht befriedigend mit der Fernwirkung erklärt werden. Der Raum zwischen den wechselwirkenden Körpern mußte eine Rolle spielen. Brachte man z.B. ein isolierendes Material zwischen die unterschiedlich geladenen Platten eines Kondensators, so änderte sich die Ladungsverteilung auf den Platten. Dieser Effekt konnte nicht allein durch Wechselwirkung zwischen den Ladungen auf den Platten erklärt werden. FARADAY ging davon aus, daß hier das eingeführte Medium bedeutsam war.

Ähnlich verhielt es sich mit der Bewegung eines Metalldrahtes im Magnetfeld, wobei, wie er entdeckte, unter gewissen Bedingungen ein Strom erzeugt wurde. Er stellte dazu fest:

"Allein die Tatsache der Bewegung des Drahtes kann diesen Strom nicht erzeugt haben. Es muß ein Zustand oder eine Bedingung um den Magneten existieren und durch ihn erhalten bleiben, und innerhalb der Reichweite dieses Zustandes muß sich der Draht befinden."

FARADAYS Entdeckung ermöglichte in der Folge vielfältige Anwendungen der Elektrizität, die uns heute das Leben angenehmer machen.

Die Schlüsselfrage war damals, ob Änderungen der elektrischen oder magnetischen Kraftfelder Zeit benötigen, um sich im Raum auszubreiten. Diese Frage wurde von MAXWELL (1831-1879) beantwortet, der 1856-1865 seine Theorie des Elektromagnetismus entwickelte und elektromagnetische Wellen voraussagte. Es dauerte mehr als 20 Jahre, bis durch H. HERTZ im Jahr 1888 die Existenz solcher Wellen experimentell nachgewiesen wurde. Diese Entdeckung führte zur Entwicklung von Funk und Fernsehen (vgl. Band III: Das Wellenkonzept).

MAXWELL schrieb 1865 über seine Theorie:

"Die Theorie, die ich vorschlage, kann Theorie des elektromagnetischen Feldes genannt werden, denn sie hat zu tun mit dem Raum in der Nachbarschaft der elektrischen oder magnetischen Körper... Das elektromagnetische Feld ist jener Teil des Raumes, der die elektrischen und magnetischen Körper enthält und umgibt."

In Kapitel 10 finden Sie einen Überblick über die Maxwellsche Theorie.

Übungen zu Kapitel 1

1.1 Erklären Sie umgangssprachlich folgende Begriffe!

Skalarfeld	Gravitationsladung
Vektorfeld	Gravitationsfeldstärke
Kraftfeld	Homogenes Feld
Fernwirkung	Stationäres Feld
Nahwirkung	Probekörper

1.2 Akzeptabel oder nicht? Begründen Sie gegenüber anderen Lernenden!

- 1.2/1 Ein physikalisches Feld ist ein Bereich im Raum, in dem etwas mit physikalischen Mitteln Meßbares existiert.
- 1.2/2a Vektorfelder sind stets Kraftfelder.
- 1.2/2b Kraftfelder sind stets Vektorfelder.
- 1.2/3 Der physikalische Feldbegriff ist nur bei ebenen Flächen anwendbar.
- 1.2/4 Ein zweidimensionales stationäres Vektorfeld erhält man z.B., wenn man eine Metallplatte waagrecht aufhängt, unter die Platte eine Gasflamme stellt und eine Weile wartet. Jedem Punkt der Platte wird dann eine konstante Temperatur zuzuordnen sein. Diese wird in der Mitte höher, am Rand niedriger sein.
- 1.2/5 Bei einem Tornado (der meteorologischen Erscheinung, nicht dem Flugzeug gleichen Namens) kann man jedem Punkt im Raum eine Windgeschwindigkeit zuordnen. Man hat dort ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld, ein inhomogenes, instationäres Vektorfeld.
- 1.2/6 Die Erde ist 'Quelle' oder 'Verursacher' eines Gravitationsfeldes und eines magnetischen Feldes.
- 1.2/7 Wo ein physikalisches Feld ist, kann sich kein zweites etablieren.
- 1.2/8 Die Tatsache, daß Gravitationsfelder durch den leeren Raum hindurch wirken, ist kein Beweis für die Richtigkeit der Fernwirkungstheorie.

- 1.2/9 Newtons Gravitationsgesetz gilt nur für die Erde und ihre nähere Umgebung. In größeren Entfernungen, z.B. auf Bahnen von Satelliten, ist die Gravitationskraft der Erde nicht mehr wirksam. Dort herrscht Schwerelosigkeit.
- 1.2/10 Die Kraft, die die Erde auf einen Körper in ihrer Nähe ausübt, hat denselben Betrag wie die Kraft, die dieser Körper auf die Erde ausübt.
- 1.2/11 Die Kraft auf einen Probekörper mit der Masse m ist gleich dem Produkt aus m und der Gravitationsfeldstärke an diesem Punkt.
- 1.2/12 Da Gravitationskräfte auch durch den leeren Raum wirken können, z.B. durch den Raum zwischen Erde und Sonne, spielt der Raum in der Feldtheorie keine Rolle.
- 1.2/13 Die Gravitationsfeldstärke, die ein festlegender Körper an einem Punkt seiner Umgebung erzeugt, ist unabhängig davon, ob sich an diesem Punkt ein Körper mit großer oder kleiner Masse oder gar kein Körper befindet.
- 1.2/14 Der Begriff Gravitationsfeldstärke ist nur ein anderer Name für Erdbeschleunigung.
- 1.2/15 Eine Ladung Q erzeugt in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld. Jedem Punkt dieser Umgebung kann eine elektrische Feldstärke zugeordnet werden. Eine an einen dieser Punkte gebrachte Probeladung q erfährt dort eine Kraft, die unabhängig von q ist.
- 1.3 Haben Sie wirklich verstanden? Überprüfen Sie sich gegenseitig!
- 1.3/1 Nennen Sie weitere Felder (außer Gravitationsfeld und magnetisches Feld), die von der Erde verursacht werden.
- 1.3/2 Warum benötigt man, um Feldkräfte zu messen, einen Probekörper?

1.4 Erfahren Sie den Formalismus als hilfreiches Werkzeug!

- 1.4/1 Für die Gravitationsfeldstärke $\vec{G}(h)$ als Funktion des Abstandes h von der Erdoberfläche gilt (1/3). Setzen Sie für den Betrag an der Erdoberfläche $G_0 = 9,8 \text{ N kg}^{-1}$ und geben Sie die Reihenentwicklung der Funktion $G(h)$ an. Lesen Sie daraus ab, wie $G(h)$ sich ändert, wenn $h = 0,001 r_E, 0,01 r_E, 0,1 r_E$ und $1 r_E$ ist.
- 1.4/2 Als NEWTON sein Gravitationsgesetz formulierte, konnte er auch die darin enthaltene Gravitationskonstante γ recht genau angeben. Er kannte den Erdradius $r_E = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ und den Betrag der Gravitationsfeldstärke $G = 9,8 \text{ N kg}^{-1}$. Er nahm an, die mittlere Dichte der Erde sei $5 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. Was bekam er für γ heraus? Wie machte er es? Wie groß war der Fehler?
- 1.4/3 Ein im Gravitationsfeld der Erde kreisender Satellit benötigt eine Zentripetalkraft \vec{F}_c , deren Betrag durch $m \cdot v^2/r$ gegeben ist und die durch die Gravitationskraft geliefert wird. Wenn der Satellit auf eine Kreisbahn mit doppeltem Radius gebracht werden soll: Was können Sie über die dann benötigte Bahngeschwindigkeit sagen? Wie groß ist das Verhältnis von Bahngeschwindigkeit zu Radius? Wie hängt die kinetische Energie des Satelliten vom Bahnradius ab?
- 1.4/4 Der Mond ist viel kleiner und viel leichter als die Erde. Es ist $m_M = 0,0123 m_E$ und $r_M = 0,27 \cdot r_E$. Wie groß ist das Verhältnis der Gravitationsfeldstärken an den Oberflächen beider Himmelskörper?

1.5 Lösen Sie folgende Probleme:

- 1.5/1 Nehmen Sie eine 'Scheibe' Luft mit der Fläche A und der Dicke Δh an. Dabei soll $\Delta h = h - 0$ und h die Höhe über dem Meeresspiegel sein. Zeigen Sie, daß die Druckdifferenz Δp zwischen der Höhe 0 und der Höhe h gegeben ist durch:
- $$\Delta p = - \rho_0 \cdot G \cdot \Delta h,$$
- wobei ρ_0 die Luftdichte ist und p als der Quotient aus Kraft und Fläche definiert ist.

- 1.5/2 Für viele Gase, so auch für die Luft, ist (bei konstanter Temperatur) die Dichte proportional dem Druck, und es gilt mit der Konstanten k :
- $$\rho = k \cdot p.$$
- Wenn man den Druck p_0 und die Dichte ρ_0 am Meeresspiegel kennt, kann man auch schreiben:
- $$\rho/p = \rho_0/p_0.$$
- Zeigen Sie, daß p und h folgender Differentialgleichung genügen:
- $$dp/p = -k \cdot G \cdot dh, \quad \text{wobei } k = \rho_0/p_0 \text{ ist.}$$
- Integrieren Sie diese Gleichung und leiten Sie somit (1/1) ab.
- 1.5/3 Zeigen Sie mit Hilfe des Ergebnisses der letzten Aufgabe, daß die Dichte der Luft gegeben ist durch
- $$\rho = \rho_0 \cdot \exp(-k \cdot G \cdot h).$$
- 1.5/4 Der Luftdruck in Meereshöhe beträgt, wie man leicht am Barometer ablesen kann, etwa $1 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Wie groß ist das Gewicht einer Luftsäule mit dem Querschnitt 1 m^2 , die vom Meeresspiegel bis zum Ende der Erdatmosphäre reicht?
- 1.5/5 In die barometrische Höhenformel kann man die sogenannte Skalenhöhe $h_s = p_0/(\rho_0 \cdot G)$ einführen. Wie groß ist h_s für $p_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ und $\rho_0 = 1,3 \text{ kg m}^{-3}$? Welche anschauliche Bedeutung hat sie?
- 1.5/6 Zeichnen Sie den Luftdruck als Funktion der Höhe (bis ca. 100 km) auf Millimeterpapier und markieren Sie h_s . Bei welcher Höhe ist der Luftdruck auf $p_0/2$ gesunken? Kontrollieren Sie die Ablesung aus Ihrer graphischen Darstellung durch eine Rechnung.
- 1.6 Schreiben Sie eine Kurzfassung dieses Kapitels!
- Schreiben Sie auf, welche Begriffe aus diesem Kapitel Sie für die wichtigsten halten. Tun Sie das in einer Art 'kartographischer Darstellung' (Mapping), in der die Begriffe hierarchisch bewertet und entsprechend weiter oben oder unten eingetragen werden und die Beziehungen zwischen ihnen mit Pfeilen und Stichwörtern verdeutlicht werden.
- 1.7 Arbeiten Sie die Vorversuche auf!
- Schätzen Sie insbesondere ab, welche 'Kraft' nötig ist, die am aufgeladenen Kamm festgehaltenen Gegenstände festzuhalten.