

A 1 Beschreibung physikalischer Vorgänge

Übersicht

A 1.1	Sprache der Physik.....	11
A 1.1.1	Raum und Zeit	11
A 1.1.2	Vereinfachung und Idealisierung.....	13
A 1.2	Bewegungen mathematisch beschreiben	14
A 1.2.1	Bewegung in einer Dimension	14
A 1.2.2	Bewegung in mehreren Dimensionen	16
A 1.3	Wichtige Koordinatensysteme	18
A 1.3.1	Kartesische Koordinaten	19
A 1.3.2	Krummlinige Koordinaten.....	20
A 1.M	Mathematische Abschnitte	26

A 1.1 Sprache der Physik

Wie alle Wissenschaften benutzt die Physik zahlreiche Fachwörter oder gibt alltäglichen Worten eine neue Bedeutung. Die Physik – insbesondere die Theoretische Physik – legt die Bedeutung der Worte in der Regel sehr klar und eindeutig fest und benutzt dabei meist mathematische Definitionen.

Sinn und Zweck von Mathematik und Theoriebildung in der Naturwissenschaft Physik werden im EMBACHER 1, Kapitel 1.2, gut motiviert und im FALK/RUPPEL, §2, sehr grundlegend betrachtet. Im Rahmen der abstrakten Formulierung in Abschnitt C 1.1.2 gehen wir auch noch einmal ausführlicher auf dieses Thema ein.

A 1.1.1 Raum und Zeit

In der klassischen Mechanik brauchst du nur wenige Begriffe, um viele interessante Phänomene untersuchen zu können – im Wesentlichen drei: ein **Objekt**, mit dem etwas passiert (dafür gibt es viele Namen, zum Beispiel Körper, Materie, Teilchen oder Masse), den **Raum**, in dem etwas passiert, und die verstreichende **Zeit**.

Du musst dabei unterscheiden zwischen dem Raum an sich und dem **Ort** eines Objekts in diesem Raum. Alle diese Begriffe lassen sich je nach Einsatzzweck durchaus verschieden definieren. In der Philosophie werden sie intensiv diskutiert, aber die Physik als empirische Wissenschaft braucht vor allem leicht verständliche und in der Praxis anwendbare Definitionen.

In der klassischen Mechanik hält man sich an die Festlegungen dieser Begriffe, die **Isaac Newton** vor über 300 Jahren getroffen hat.

Die einfachste Definition für den Begriff des Raums ist der **absolute Raum**. Der Raum existiert in diesem Verständnis aus sich heraus, unabhängig von den in ihm vielleicht enthaltenen Objekten. Du kannst dir den absoluten Raum als in jede Richtung unendlich fortgesetzt und mit der **Euklidischen Geometrie** versehen vorstellen, die du aus der Schule und dem Alltag kennst und in der man Längen und Winkel wie in Abbildung A 1.1 messen kann. Zur Erinnerung: Ein Raum ist genau dann Euklidisch, wenn der Satz des Pythagoras in allen rechtwinkligen Dreiecken gilt.

Der absolute Raum ist außerdem **homogen** und **isotrop**. Homogenität meint hier, dass keine Stelle im Raum in irgendeiner Weise von den anderen zu unterscheiden ist. Isotropie bedeutet, dass alle Richtungen von gleicher Art sind. Der leere, absolute Raum ist also überall vollkommen gleich, unabhängig davon, an welcher Stelle man ihn betrachtet und in welche Richtung man schaut. Er hat keinen Anfang, keine Grenzen und keine Löcher.

Der menschlichen Erfahrung nach hat der physikalische Raum drei Raumrichtungen oder **drei Dimensionen**. Jeden **Punkt** im Raum, also jedes Objekt ohne räumliche Ausdehnung, kannst du deshalb durch Angabe von drei Zahlen, die **Koordinaten** genannt werden, eindeutig von jedem anderen Punkt unterscheiden. Dazu musst du vorher ein System für die Koordinaten festlegen, wie dies in Abschnitt A 1.3 beschrieben wird.

Um auch der Erfahrungstatsache, dass neben den drei Raumdimensionen auch noch die Zeit eine Rolle spielt, gerecht zu werden, definiert man ebenso eine **abso-**

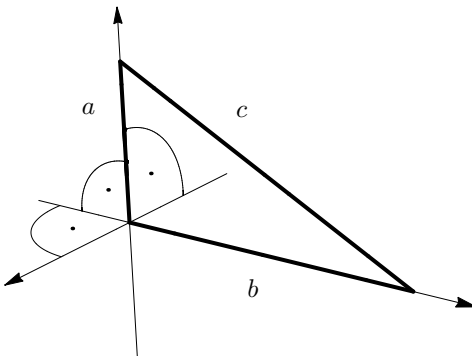


Abb. A 1.1

Der dreidimensionale Euklidische Raum, gekennzeichnet durch die drei rechten Winkel. Für die Längen der Kanten im beispielhaft eingezeichneten rechtwinkligen Dreieck gilt der Satz des Pythagoras, $a^2 + b^2 = c^2$. Die Lage der dargestellten Achsen ist beliebig

lute Zeit. Sie verfließt unabhängig von den Objekten und Ereignissen, erstreckt sich unendlich weit in Vergangenheit und Zukunft und ist ebenfalls homogen. Die klassische Physik kennt also keinen Unterschied zwischen dem Zeitalter der Entstehung der Erde, der griechischen Antike und dem 22. Jahrhundert. Isotropie spielt hier keine Rolle, denn die Zeit hat nur eine Dimension.

Wichtig ist weiterhin das **Prinzip der Gleichzeitigkeit**: Zwei baugleiche Uhren, die einmal synchronisiert wurden, zeigen immer dieselbe Zeit an, unabhängig davon, wo sie sich befinden und wie sie sich bewegen.

Etwas ausführlicher sind diese Vorüberlegungen bei REBHAN 1, Kapitel 2.1, beschrieben. Begriffsbildungen ergeben nur dann einen Sinn, wenn man weiß, wie sie mit Leben zu füllen sind, das heißt wie man die mit den Begriffen bezeichneten Sachverhalte messen kann. Dies ist Gegenstand der Experimentalphysik. Mehr zu **Messvorschriften** steht zum Beispiel bei DEMTRÖDER 1, Kapitel 1.6.

A 1.1.2 Vereinfachung und Idealisierung

Die klassische Mechanik ist eine sehr universelle Theorie. Im Prinzip kannst du nach der Lektüre dieses Buches alle Vorgänge in der alltäglichen Umwelt beschreiben und begründen, solange sie nichts mit den inneren Eigenschaften der Materie wie Magnetismus oder elektrischer Ladung zu tun haben. Allerdings sind die Geschehnisse in der Natur eigentlich immer kompliziert, und viele Ereignisse beeinflussen sich gegenseitig. Das wohl wichtigste Prinzip der Physik ist daher die **Idealisierung**. Sehr häufig lassen sich verwickelte natürliche Gegebenheiten auf viel einfachere Systeme zurückführen, die sich ganz ähnlich verhalten wie die ursprünglichen. Solche **Modellsysteme** aber kannst du im Experiment sehr genau vermessen und mathematisch exakt berechnen. Diesen Schritt bezeichnet man als **Modellbildung**. Der Trick ist also zu erkennen, was an einem Problem wirklich wichtig ist und in einem guten Modell berücksichtigt werden sollte und was nicht. Mit **Problem** bezeichnet man die vorliegende Situation. Aus den einfachen Modellen lassen sich dann allgemeine Gesetze und damit eine **physikalische Theorie** ableiten.

Ein zentraler Modellbegriff der klassischen Mechanik ist der **Massepunkt**, auch **Punktmasse** genannt, also ein Punkt im Euklidischen Raum, der eine bestimmte Masse hat. In der Natur sind nur Elementarteilchen echte Punktmassen, die aber mit der Quantenmechanik beschrieben werden müssen. Alle klassischen Objekte haben hingegen in der Realität eine endliche Ausdehnung. Der Massepunkt ist für uns also bereits eine **Idealisierung** und stellt immer dann eine gute **Annäherung an die Wirklichkeit** dar, wenn die Strecke, die ein Objekt zurücklegt, deutlich größer als das Objekt selbst ist und die Form des Objekts keinen entscheidenden Einfluss auf seine Bewegung hat, zum Beispiel bei einem durch die Luft fliegenden Stein.

Bei EMBACHER 1, Kapitel 1.1 bis 1.3, findest du ausführlichere Gedanken zum Thema Idealisierung.

Das vorliegende Buch beschäftigt sich nur mit der Bewegung von einzelnen oder **Systemen von mehreren Massepunkten**, die aber in einer festen Beziehung zueinander stehen. Ausgedehnte Objekte, die sich nicht mehr sinnvoll als aus Massepunkten zusammengesetzt näherbar sind, werden in der Mechanik als starre Körper bezeichnet. Wir behandeln diese im zweiten Band, HENZ/LANGHANKE 2.

Den **Weg**, den eine Punktmasse beim Verstreichen der Zeit im Raum zurücklegt, nennt man **Bahnkurve** oder häufig auch **Trajektorie**. Die Bahnkurve ist ein wichtiger Begriff, denn ihre genaue Kenntnis ermöglicht dir, den Aufenthaltsort eines Massepunkts zu jedem Zeitpunkt in Vergangenheit und Zukunft zu berechnen. Dies ist Gegenstand von Kapitel A 2.

A 1.2 Bewegungen mathematisch beschreiben

Ein wesentliches Ziel der klassischen Mechanik ist es, die Bewegung eines Objekts, also seine Bahnkurve, für alle Zeiten exakt vorhersagen zu können. Dazu musst du diese Bahnkurve in der exakten Sprache der Mathematik beschreiben können. Diese Beschreibung nennt man **Kinematik**. Für die Theoretische Mechanik benötigst du daher an Mathematik einige Grundkenntnisse der Analysis. Die Beschreibung der Bewegung in mehreren Dimensionen benutzt zusätzlich auch noch Methoden der Linearen Algebra. Das Wichtigste dazu haben wir jeweils in den Matheabschnitten in A 1.M zusammengefasst, und wir werden im Laufe der nächsten Abschnitte immer wieder auf einzelne Matheabschnitte verweisen. Grundlegende Begriffe und Konzepte der Mathematik lernst du zum Beispiel in Matheabschnitt 1 kennen.

A 1.2.1 Bewegung in einer Dimension

Am einfachsten ist die Beschreibung von Bewegungen eines Objekts in nur einer räumlichen Richtung oder Dimension, zum Beispiel eines Zuges auf schnurgerader Strecke. Idealisiert kannst du diesen problemlos als Massepunkt beschreiben, indem du dir die gesamte Masse des Zuges auf einen Punkt lokalisiert vorstellst und die Reibung an Schienen und an der Luft vernachlässigst. Das Objekt ist dabei immer zu einer bestimmten Zeit t an einem bestimmten Ort $r(t)$.

Für die Beschreibung der Bewegung ist interessant, wie schnell der Massepunkt von einem Ort zum anderen kommt, das heißt, in welcher Zeitspanne Δt er die Strecke:

$$\Delta r := r(t + \Delta t) - r(t)$$

zurücklegt. Δr ist gerade der räumliche Abstand zwischen dem Ort des Massepunkts zu einer Zeit t und einer späteren Zeit $t + \Delta t$, mit $\Delta t > 0$.

Die experimentelle Beobachtung der Natur und die alltägliche Erfahrung zeigen dir, dass der Ort eines klassischen Objekts sich nur wenig ändert, wenn die Zeitspanne kurz ist. Man sagt daher auch, „die Natur macht keine Sprünge“. In einer gedachten, sehr kurzen Zeitspanne Δt wird sich daher der Aufenthaltsort Δr auch nur sehr geringfügig ändern. Wir können daher Bahnkurven als **stetige Funktionen des Ortes von der Zeit** idealisieren, wie sie in Matheabschnitt 2 eingeführt werden.

Um die Ortsveränderung eines Massepunkts exakt zu beschreiben, musst du ein Maß dafür einführen, wie schnell sich der Ort ändert. Dazu kannst du den Quotienten aus Strecke und Zeitspanne bilden und dann diese Zeitspanne (und damit auch die Strecke) immer kleiner werden lassen – auf diese Weise erhältst du die Steigung oder Ableitung der Bahnkurve $r(t)$. Aus der Zeitspanne Δt wird dabei eine nur gedachte „unendlich kleine“ Größe dt . Das Gleiche gilt für die Änderung des Ortes dr . Man bezeichnet diese Größen in der Physik üblicherweise als **infinitesimale Größe** oder als **Differentiale**. Diesen Gedankengang bezeichnet man als Grenzwertbildung, er ist die Grundlage der **Differentialrechnung**, die historisch genau parallel zur Newtonschen Mechanik entstanden ist. Wir fassen ihre Grundlagen in Matheabschnitt 3 kurz zusammen.

Man nennt die erste Ableitung des Ortes nach der Zeit,

$$v(t) := \dot{r}(t) := \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{dr(t)}{dt},$$

die **Geschwindigkeit** des Teilchens zur Zeit t .

Da auch die Geschwindigkeit häufig veränderlich ist, lohnt es sich, auch dafür ein Maß einzuführen. Die **Beschleunigung** eines Teilchens ist ganz analog definiert als die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit:

$$a(t) := \ddot{r}(t) := \frac{d^2 r(t)}{dt^2}.$$

Wie kann es aber überhaupt dazu kommen, dass zwei Körper sich in der gleichen Situation unterschiedlich bewegen? Wenn wir von ihrer genauen Form und auch den damit verbundenen Reibungseffekten absehen, bleibt letztlich nur **eine fundamentale Eigenschaft** übrig, die **Masse** genannt wird. Sie ist unabhängig von der Form des Körpers und eine skalare Größe, das heißt du durch eine reelle Zahl ausdrücken. Diese ist im Falle der Masse sogar positiv. Diese Erkenntnis ist die Grundlage dafür, dass du einen realen Körper als Massepunkt idealisieren kannst, ohne wesentliche Informationen zu verlieren. Häufig spricht man deshalb auch nur von „der Masse“ $m \in \mathbb{R}_{>0}$ und meint damit den Massepunkt selbst.

A 1.2.2 Bewegung in mehreren Dimensionen

Der bisher entwickelte Formalismus reicht nicht aus, wenn du beliebige Bewegungen im **dreidimensionalen Raum** beschreiben möchtest. Der Ort eines Massepunkts ist dann allgemein durch drei Zahlen, seine **Koordinaten**, festzulegen, für jede Raumdimension eine. Die Koordinaten legen dabei die Lage und den Abstand bezüglich eines vorher bestimmten Punkts, Ursprung genannt, fest. Am einfachsten ist es, du fasst alle Koordinaten in einem **Vektor** zusammen, wofür es mehrere, das Gleiche bedeutende Schreibweisen gibt:

$$\mathbf{r}(t) := (x(t), y(t), z(t))^T = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = x(t) \mathbf{e}_x + y(t) \mathbf{e}_y + z(t) \mathbf{e}_z. \quad (\text{A 1.1})$$

Zur Festlegung, wie die Abstände gemessen werden, benutzen wir hier die Standardbasis des \mathbb{R}^3 aus den Einheitsvektoren $\{\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z\}$. Sie definiert das sogenannte **kartesische Koordinatensystem**. Man sagt, x , y und z sind die kartesischen Koordinaten des Punkts. Du findest mehr dazu und allgemein zum wichtigen Thema Koordinatensysteme am Ende dieses Kapitels in Abschnitt A 1.3.

Vektoren sind ein sehr wichtiges Konzept in der Physik, mit dem du dich grundsätzlich auseinandersetzen musst, sie sind Gegenstand der Linearen Algebra. Wir fassen in den Matheabschnitten 4 und 5 das zum ersten Verständnis Notwendigste zusammen.

Die physikalische Bewegung wird in der Regel durch eine Funktion des Ortes von der Zeit angegeben, man sagt die Zeit **parametrisiert** die Bahn im Raum.

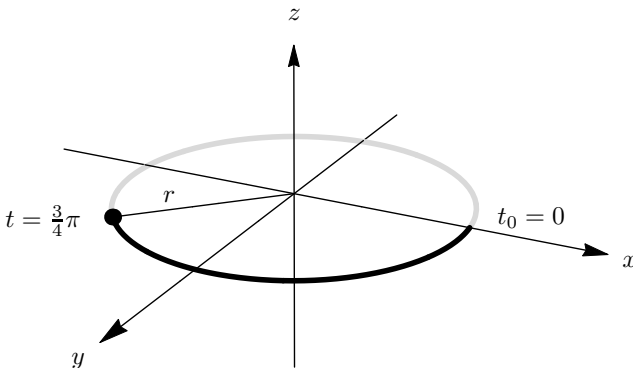


Abb. A 1.2 Parametrisierung der Bewegung eines Massepunkts auf einer Kreisbahn in der x - y -Ebene. Zum Zeitpunkt t hat er den schwarzen Teil des Kreises durchlaufen

Zum Beispiel beschreibt $\mathbf{r}(t) = (0, t, 0)$ eine **geradlinige** Bewegung in Richtung der y -Achse. Wenn du durch komponentenweises Ableiten die zugehörige Geschwindigkeit ausrechnest, $\dot{\mathbf{r}}(t) = (0, 1, 0)$, siehst du, dass sie zeitlich konstant ist. Man nennt die Bewegung dann **gleichförmig**.

Interessanter wird es bei „krummen“ Bewegungen. Um diese zu beschreiben, benutzt man häufig die **Winkelfunktionen** Sinus und Kosinus. Wir haben in Matheabschnitt 6 einige Informationen zu ihnen zusammengestellt.

Um eine **Kreisbahn** mit Radius r in der ($z = 0$)-Ebene zu beschreiben, sind die Winkelfunktionen sehr praktisch. Mit den Festlegungen aus Abbildung A 1.2 kann man schreiben:

$$\mathbf{r}(t) = (r \cos(t), r \sin(t), 0).$$

Wenn ein Teilchen bei $t_0 = 0$ startet, hat es bei $t = 2\pi$ den Kreis einmal durchlaufen.

Du kannst wieder die Geschwindigkeit ausrechnen:

$$\dot{\mathbf{r}}(t) = (-r \sin(t), r \cos(t), 0).$$

Diesmal ist sie nicht konstant, aber ihr Betrag ist es, denn

$$|\dot{\mathbf{r}}(t)|^2 = (-r \sin(t), r \cos(t), 0) \cdot \begin{pmatrix} -r \sin(t) \\ r \cos(t) \\ 0 \end{pmatrix} = r^2 \sin^2(t) + r^2 \cos^2(t) = r^2.$$

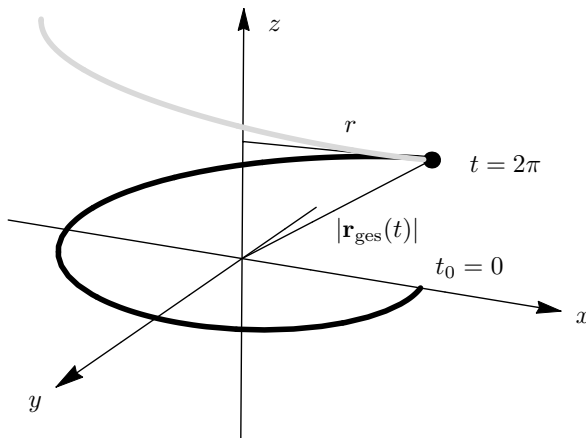


Abb. A 1.3 Parametrisierung der Bewegung eines Massepunkts auf einer ausenandergedragenen Schraubenlinie. Zum Zeitpunkt t hat er den schwarzen Teil der Bahn durchlaufen. Die konstante Beschleunigung in z -Richtung zieht die Spirale dabei immer schneller auseinander

Das Teilchen flitzt also zwar immer „gleich schnell“ auf seiner Kreisbahn, aber es ist dennoch beschleunigt, denn auch die ständige Änderung der Richtung bedeutet eine zeitliche Änderung des Geschwindigkeitsvektors. Eine Beschleunigung, die sich nur auf die Richtung, nicht aber auf den Betrag der Geschwindigkeit auswirkt, ist erst in mehr als einer Dimension möglich. Es ist also notwendig, zwischen Betrag und Richtung eines Vektors zu unterscheiden, vergleiche Matheabschnitt 4.

Wichtig zu bemerken ist auch noch, dass dir die Beschreibung durch Vektoren ermöglicht, komplexe Bewegungen als **Überlagerung** mehrerer einfacherer Bewegungen auszudrücken. Eine Bewegung auf einer sich auseinanderziehenden **Schraubenlinie** wie in Abbildung A 1.3 kannst du daher praktischerweise in die Kreisbahn und eine konstant beschleunigte Bewegung in Richtung der z -Achse, $\hat{\mathbf{r}}(t) = (0, 0, t^2)$, zerlegen. Es ergibt sich als Gesamtbahnkurve:

$$\mathbf{r}_{\text{ges}}(t) = \mathbf{r}(t) + \hat{\mathbf{r}}(t) = (r \cos(t), r \sin(t), t^2).$$

In Aufgabe 5.2.2 kannst du selbst noch weitere ähnliche Bahnen untersuchen.

Diese und andere Beispiele für Bahnparametrisierungen findest du auch bei NOLTING 1, Kapitel 2.1.2, und KIRCHGESSNER/SCHRECK 1, Kapitel 2, sowie besonders schön bei DREIZLER/LÜDDE 1, Kapitel 2.2.

A 1.3 Wichtige Koordinatensysteme

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Position eines Massepunkts im Raum zu beschreiben. Zum Beispiel kannst du, wie in Abschnitt A 1.2.2, die Entfernung der Position von einem fest gewählten Punkt des Raums, **Ursprung** genannt, entlang vorher festgelegter, gerader Achsen einzeln angeben. Gleichberechtigt ist es aber genauso, den absoluten Abstand vom Ursprung sowie den Winkel, um den sich der Massepunkt von seiner Ausgangslage fortbewegt hat, anzugeben. Dies ist zum Beispiel bei der Beschreibung einer Kreisbewegung sinnvoll.

Wichtig bei der Wahl verschiedener **äquivalenter Beschreibungen**, genannt **Koordinatensysteme**, ist einzig, dass die Richtungen, in denen du die Abstände misst, in einem bestimmten Sinne unabhängig voneinander sind. Mathematisch kannst du das beispielsweise immer erreichen, indem du die **Basisvektoren**, die die Richtungen festlegen, orthogonal zueinander wählst. Du brauchst dann immer gleich viele Zahlen, um einen Punkt eindeutig festzulegen. Außerdem ist es häufig sinnvoll, die Maßsysteme in den verschiedenen Richtungen einander anzupassen, die Basisvektoren also auf Länge 1 zu **normieren**. Man sagt dann, sie sind **orthonormal** zueinander. Einen Vektor normierst du immer dadurch, dass du den nicht-normierten Vektor durch seinen Betrag teilst.

Eine genauere Klärung dieser aus der Linearen Algebra stammenden Begriffe findest du in Matheabschnitt 4 oder etwas formalisierter in Pfad B, Matheabschnitt 11.

Im Folgenden stellen wir die gebräuchlichsten Koordinatensysteme und ihre Anwendung vor. In Abschnitt B 1.3 wirst du lernen, wie man mit allgemeinen Koordinaten arbeiten kann – und in Pfad C sogar ganz ohne!

Ausführliche, sehr anwendungsbezogene Erläuterungen zu verschiedenen Koordinatensystemen und deren Anwendung finden sich bei DREIZLER/LÜDDE 1, Kapitel 2.4. Schön sind sie auch bei GREINER 1, Kapitel 10, beschrieben. Bei NOLTING 1, Kapitel 1.7, ist ihre Diskussion dagegen mathematisch anspruchsvoll. Bei KIRCHGESSNER/SCHRECK 1, Kapitel 2.5-6, sind viele Rechnungen detailliert durchgeführt.

A 1.3.1 Kartesische Koordinaten

Bei den kartesischen Koordinaten kannst du dir den physikalischen Raum wie in Abbildung A 1.4 mit einem Gitternetz aus gleichgroßen Würfeln überzogen vorstellen, deren Kantenlängen als 1 definiert werden. Die Koordinaten eines Punktes findest du, indem du angibst, wie viele Würfelkanten du in jede Richtung vom Ursprung aus gehen musst, um zu dem Punkt zu gelangen.

Mathematisch ausgedrückt wird dieses Vorgehen, indem du für einen zum gewünschten Punkt zeigenden Vektor \mathbf{r} schreibst

$$\mathbf{r} := (x, y, z)^T = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = x \mathbf{e}_x + y \mathbf{e}_y + z \mathbf{e}_z,$$

wobei \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y und \mathbf{e}_z jeweils entlang einer Würfelkante zeigen und die orthogonalen Basisvektoren sind, während das Tripel (x, y, z) die konkreten Koordinaten des Punktes bezeichnet.

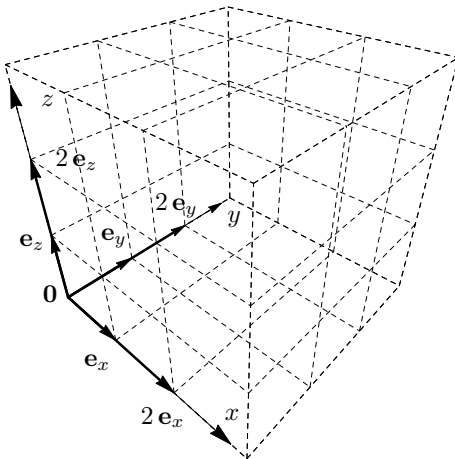


Abb. A 1.4

Kartesische Koordinaten als Überdeckung des Raums mit Einheitswürfeln. Basisvektoren und ihre Vielfachen im Abstand von einem gewählten Ursprung $\mathbf{0}$

Die kartesischen Basisvektoren werden dargestellt als:

$$\mathbf{e}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{e}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Die Besonderheit der kartesischen Koordinaten ist, dass die **Basisvektoren räumlich und zeitlich konstant** sind. Die Konsequenzen dessen werden bei den krummlinigen Koordinaten deutlich.

A 1.3.2 Krummlinige Koordinaten

In der Physik gibt es sehr viele Probleme, bei denen die so anschaulichen kartesischen Koordinaten weder für das physikalische Verständnis noch fürs bloße Rechnen die beste Wahl sind. Wenn das betrachtete System bestimmte Symmetrien aufweist, ist es oft ratsam, keine geraden, sondern krummlinige Koordinaten zu verwenden.

Vereinfacht gesagt weist ein System eine **Symmetrie** auf, wenn du – rein gedanklich – etwas an ihm verändern kannst, ohne dass diese Änderung eine Auswirkung hat. Diese saloppe Definition lässt sich am besten durch Beispiele verstehen: Es ändert sich nichts an den Eigenschaften eines Rades, wenn du es dir um einen beliebigen Winkel gedreht vorstellst. Daher wird es **dreh- oder rotationssymmetrisch** genannt. Dass jede Bewegung genau gleich abläuft, egal ob sie jetzt oder morgen stattfindet, bei ansonsten gleichen Bedingungen, nennt man in der Physik eine **zeitliche Symmetrie**. Der Symmetriebegriff in der Physik ist also viel allgemeiner als die alltägliche Spiegelsymmetrie.

Aus den Symmetrien eines Systems kannst du häufig schon viel über das System herausfinden, bevor du etwas ausrechnest. Symmetrien spielen in der Physik daher eine sehr große Rolle, wir kommen noch öfter auf sie zu sprechen.

Ebene Polarkoordinaten

Das einfachste Beispiel für ein krummliniges Koordinatensystem sind die Polarkoordinaten in einer Ebene. Es bietet sich an sie zu benutzen, wenn das betrachtete System eine **Rotationssymmetrie** in einer Ebene aufweist oder aber wenn der interessante Teil der Bewegung sich dann leichter beschreiben lässt, weil sich dadurch nur noch eine Koordinate zeitlich ändert. Dies ist zum Beispiel bei der Bewegung eines Fadenpendels im Schwerfeld der Erde der Fall.

Du kannst dann die fragliche Ebene mit „Würfeln“ ausfüllen, deren Kanten nicht gerade sind, sondern vom Ursprung aus zum einen auf einer Geraden nach außen und zum anderen entlang einer gedachten Kreislinie um den Ursprung und



<http://www.springer.com/978-3-662-48263-6>

Pfade durch die Theoretische Mechanik 1
Die Newtonsche Mechanik und ihre mathematischen
Grundlagen: anschaulich - axiomatisch - abstrakt
Henz, T.; Jagusch, G.
2016, X, 264 S. 52 Abb. in Farbe., Softcover
ISBN: 978-3-662-48263-6