Moderne Mechanik

Teil 1

Wechselwirkung und Bewegung

Ziele

Nach Durchsicht dieser Folien solltest du in der Lage sein,

- aus Beobachtungen der Bewegung eines Objekts zu schlussfolgern, ob dieses mit seiner Umgebung interagiert hat oder nicht,

- die Position und Bewegung eines Objekts mathematisch in drei Dimensionen (x,y,z) zu beschreiben,

- den Impuls eines Objekts sowie dessen Veränderung in drei Dimensionen mathematisch zu formulieren, sowie

- ein einfaches (VPython-) Programm lesen und ggf. auch modifizieren zu können (Objekte mit konstanter und veränderlicher Geschwindigkeit).

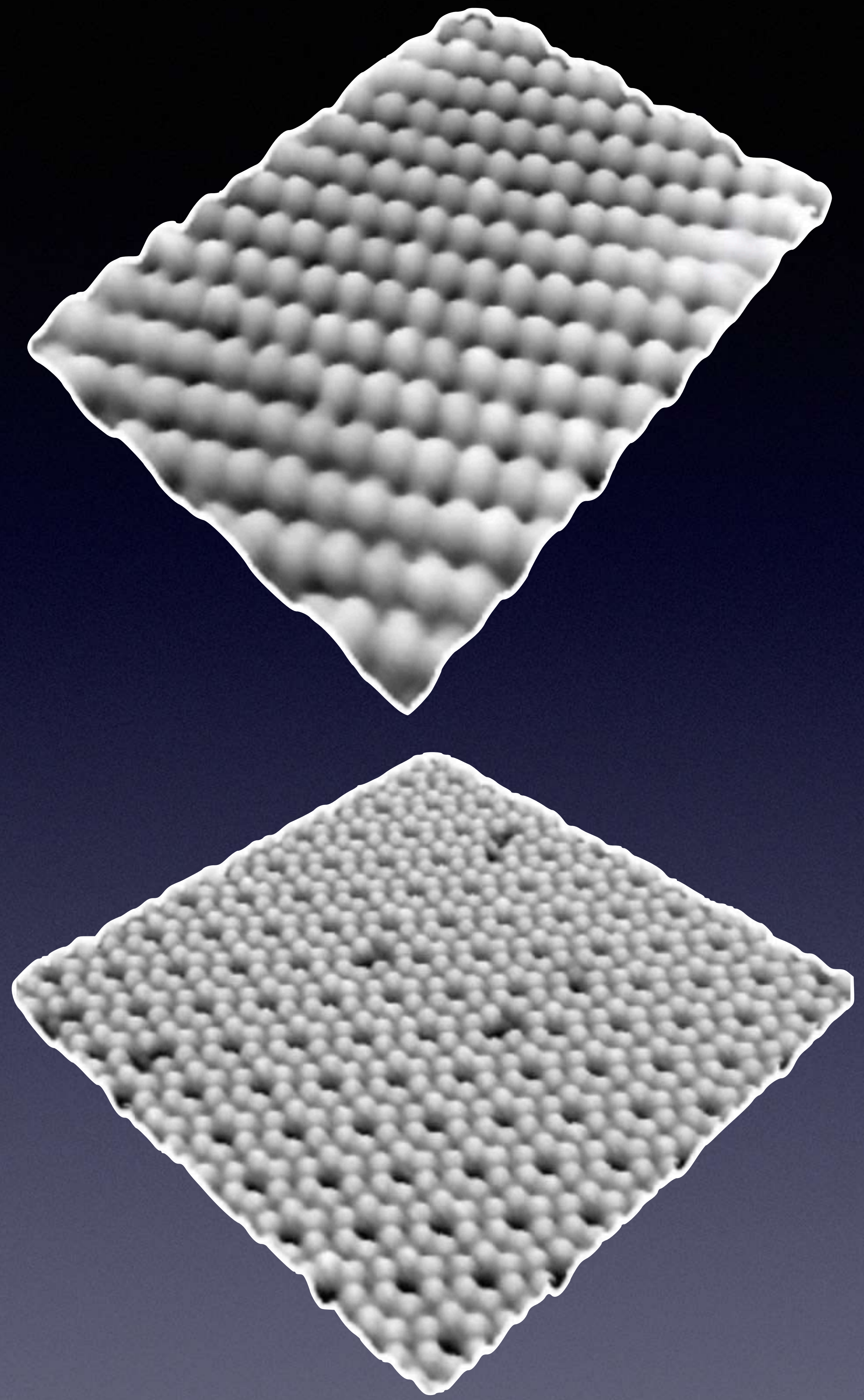
Übersicht

Arten von Materie

Gewöhnliche Materie besteht aus winzigen Atomen. Ein Atom ist nicht die kleinste Art von Materie, denn es besteht aus noch kleineren Objekten (Elektronen, Protonen und Neutronen), aber viele der alltäglichen Eigenschaften der gewöhnlichen Materie lassen sich anhand der atomaren Eigenschaften und Wechselwirkungen verstehen. Typische Abmessungen:

- Atom (Elektronenwolke): 1×10^{-10} m
- Proton: 1×10^{-15} m
- Elektron: 2×10^{-20} m

Wenn Atome miteinander in Kontakt kommen, können sie aneinander haften ("binden"). Mehrere aneinander gebundene Atome können ein Molekül bilden - eine Substanz, deren physikalische und chemische Eigenschaften sich von denen der einzelnen Atome unterscheiden.
Ein starres Objekt gewöhnlicher Größe, das aus miteinander verbundenen Atomen besteht und groß genug ist, um es zu sehen und handhaben zu können, wird als **Festkörper** bezeichnet.



Zwei verschiedene Oberflächen eines Kristalls aus reinem Silizium. Die Bilder wurden mit einem Rastertunnelmikroskop aufgenommen.

Wenn ein Festkörper auf eine höhere Temperatur erhitzt wird, schwingen die Atome im Festkörper stärker um ihre normale Position. Wenn die Temperatur hoch genug ist, kann diese thermische Bewegung die starre Struktur des Festkörpers zerstören. Die Atome können übereinander gleiten. In diesem Fall ist der Stoff eine **Flüssigkeit**.

Bei noch höheren Temperaturen kann die thermische Bewegung der Atome oder Moleküle so groß sein, dass die interatomaren oder intermolekularen Bindungen vollständig aufbrechen, und die Flüssigkeit wird zu einem **Gas**. In einem Gas können sich die Atome oder Moleküle ziemlich frei bewegen und stoßen nur gelegentlich miteinander oder mit den Wänden eines Behälters zusammen.

In der Physik ist es häufig nützlich, von der Bewegung eines „**Punktteilchens**“ zu sprechen. Unter einem solchen Teilchen verstehen wir ein Objekt, dessen Größe, Form und innere Struktur für uns im aktuellen Kontext nicht wichtig sind und das wir als an einem einzigen Punkt im Raum befindlich betrachten können. Bei der Modellierung der Bewegung eines realen Objekts (sei es eine Galaxie oder ein Proton) nehmen wir oft vereinfachend an, dass es sich um ein Punktteilchen handelt.

Selbst die sehr kleinen Objekte, wie Atome, Protonen und Neutronen, sind keine echten Punktteilchen - sie haben eine endliche Größe und eine innere Struktur, die ihre Wechselwirkungen mit anderen Objekten beeinflussen kann.

Kontrollpunkt 1

1. Wie viele Atome sind in etwa in 1 cm^3 Materie enthalten?

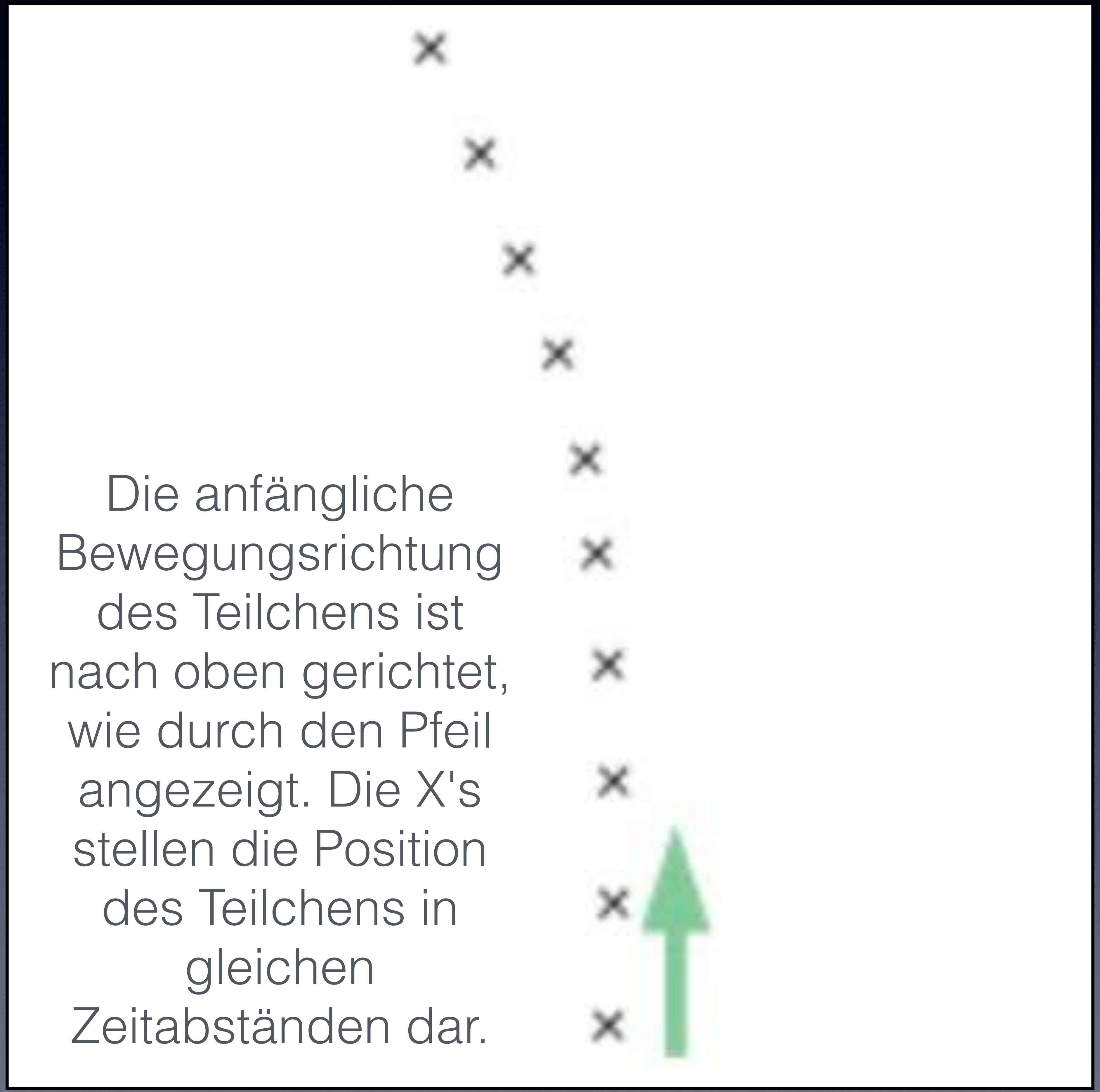
2. Der Kern vieler Atome enthält unter anderem mehrere Protonen. Diese sind positiv geladen und stoßen sich damit gegenseitig ab. Welche Schlussfolgerung können wir aus der beobachteten Stabilität des Kerns ziehen?

Erkennen von Interaktionen

Objekte, die aus verschiedenen Arten von Materie bestehen, interagieren auf verschiedene Weise miteinander: durch Schwerkraft, elektrisch, magnetisch und durch nukleare Wechselwirkungen.

Wie können wir feststellen, dass eine Interaktion stattgefunden hat?

Offensichtlich ist eine **Richtungsänderung** oder eine **Änderung der Geschwindigkeit** ein anschaulicher Indikator für Wechselwirkungen.

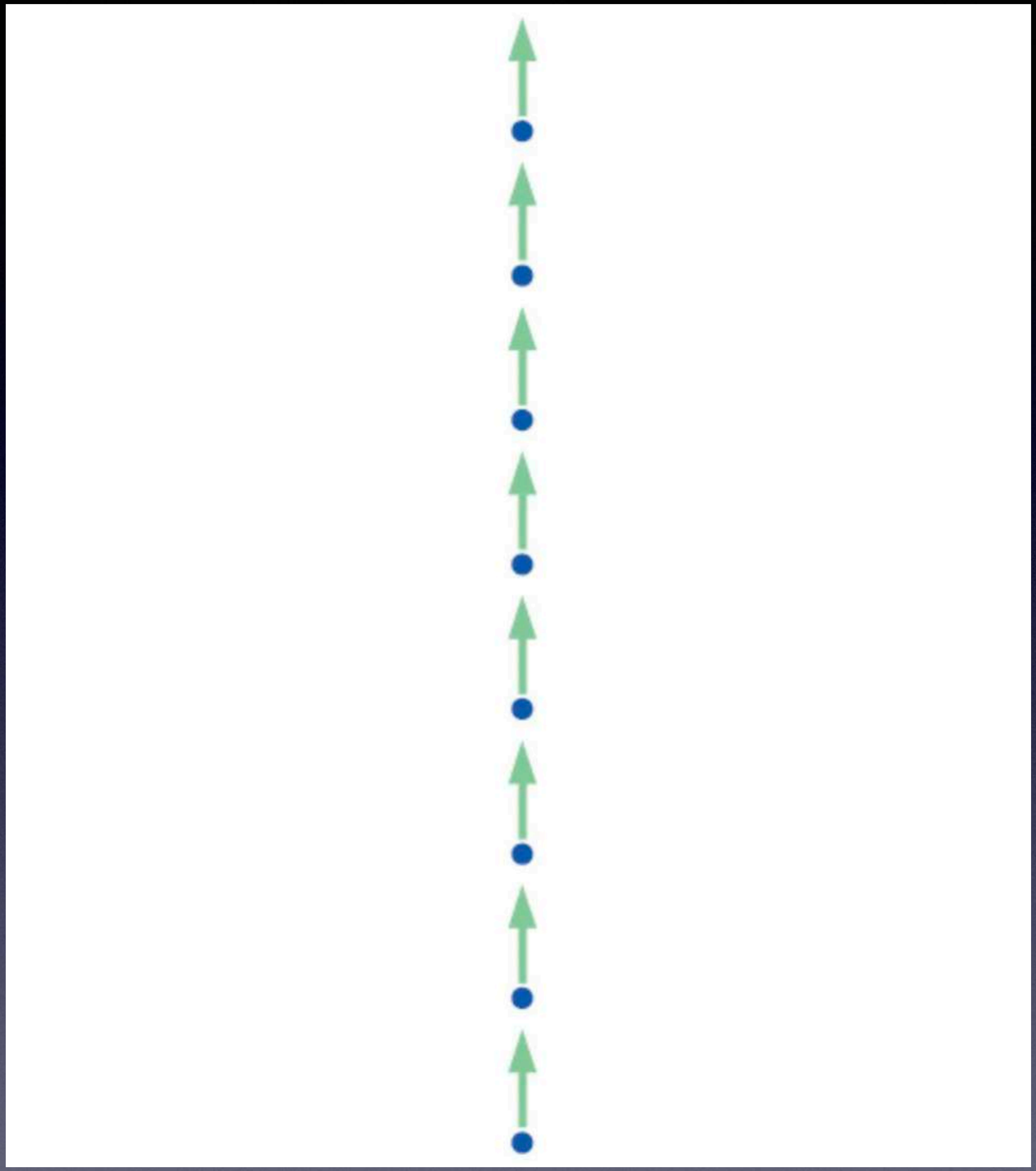


Änderung der Bewegungsrichtung.

Änderung der Geschwindigkeit.

Ein Objekt bewege sich mit konstanter, unveränderlicher Geschwindigkeit in einer geraden Linie. Seine Geschwindigkeit ändert sich nicht (weder seine Richtung noch seine Geschwindigkeit ändern sich). Wir nennen eine Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit „**gleichförmige Bewegung**".

Bleibt ein Objekt in Ruhe, so ändert sich weder die Geschwindigkeit noch die Richtung der Geschwindigkeit des Objekts. Dies ist ein Sonderfall der gleichförmigen Bewegung.



„Gleichförmige Bewegung" - keine Änderung der Geschwindigkeit oder ihrer Richtung.

Speed und *Velocity*

Im englischsprachigen Raum bezeichnet die als „***Velocity***“ bezeichnete Größe eine **Kombination aus Geschwindigkeit** („*Speed*“) **und Richtung** („*Direction*“). Ins Deutsche werden „*Speed*“ und „*Velocity*“ zumeist einheitlich mit „Geschwindigkeit“ übersetzt. Im folgenden werden diese Begriffe verwendet:

- „*Velocity*“: Geschwindigkeit (Vektor) und
- „*Speed*“: Betrag der Geschwindigkeit (Skalar).

In gleicher Weise werden auch andere vektorielle Größen behandelt.

Kontrollpunkt 2

1. Wenn wir ein Objekt in gleichmäßiger Bewegung beobachten, können wir dann schlussfolgern, dass es keine Wechselwirkungen mit seiner Umgebung hat?

2. In welcher der folgenden Situationen gibt es offensichtliche Hinweise für eine *signifikante* Interaktion zwischen zwei Objekten? Wie kannst du das erkennen? (1) Ein geworfener Ball springt von einer Wand (Betrag der Geschwindigkeit unverändert) (2) Eine Raumsonde bewegt sich im interstellaren Raum mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit in Richtung eines entfernten Sterns (3) Ein Kommunikationssatellit umkreist die Erde.

Das erste Newtonsche Bewegungsgesetz

„Jeder Körper verharrt in seinem Ruhezustand oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit (Betrag und Richtung), außer in dem Maße, in dem er gezwungen ist, diesen Zustand durch Kräfte zu ändern, die auf ihn einwirken.“

Erstes Newtonsches Bewegungsgesetz

Die Worte „außer in dem Maße“ bedeuten, dass je stärker die Wechselwirkung ist, desto mehr ändert sich die Geschwindigkeit (Betrag und/oder Richtung). Je schwächer die Wechselwirkung ist, desto geringer ist die Veränderung. Wenn es überhaupt keine (totale) Wechselwirkung gibt, ist die Bewegung des Objekts gleichförmig. Es ist wichtig daran zu denken, dass sich die Geschwindigkeit eines Objekts, das sich überhaupt nicht bewegt, nicht ändert, so dass auch dieses Objekt als gleichförmig bewegt betrachtet werden kann.

Dieses Gesetz bedeutete einen großen Bruch mit der älteren Sichtweise, die davon ausging, dass ein ständiges Schieben erforderlich war, um etwas in Bewegung zu halten. Nein, es sind überhaupt keine Interaktionen erforderlich, um etwas in Bewegung zu halten!

Die Änderung der Geschwindigkeit ist nicht das einzige Anzeichen dafür, dass ein Objekt mit seiner Umgebung in Wechselwirkung getreten ist, aber es ist die einzige Änderung, die für ein einzelnes Objekt möglich ist, das als *Punktteilchen* modelliert wird, das weder Form noch innere Struktur hat. In späteren Kapiteln werden wir uns mit anderen Arten von Veränderungen befassen, z. B. mit der Änderung der Temperatur, der Änderung der Form oder Konfiguration und der Änderung der Identität (z. B. bei Kernreaktionen).

Kontrollpunkt 3

1. Um eine Kiste mit konstanter Geschwindigkeit in einer geraden Linie über einen Tisch zu bewegen, muss man sie immer weiter anschieben. Widerspricht dies dem ersten Newtonschen Gesetz?

2. Ist die Positionsveränderung eines Objekts ein Indikator für eine Wechselwirkung?

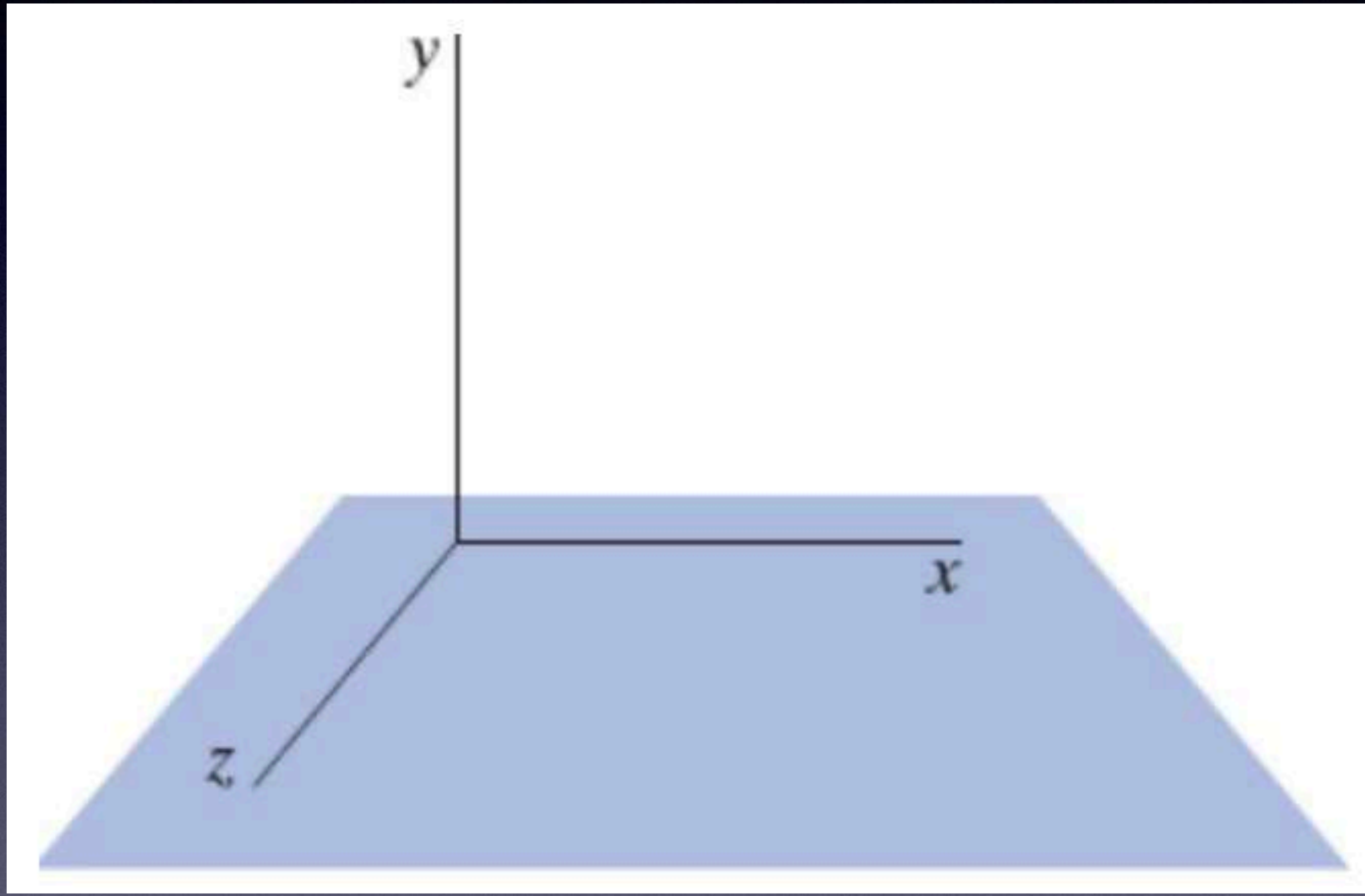
Die 3D-Welt beschreiben: Vektoren

Um quantitative Vorhersagen machen und detaillierte, quantitative Erklärungen liefern zu können, benötigen wir Werkzeuge, mit denen wir die Positionen und Geschwindigkeiten von Objekten in 3D sowie die Änderungen von Position und Geschwindigkeit aufgrund von Wechselwirkungen genau beschreiben können. Diese Hilfsmittel sind mathematische Einheiten, die **3D-Vektoren** genannt werden.

$\vec{r}$ ist ein Vektor

In drei Dimensionen ist ein Vektor ein Tripel von Zahlen $\langle x, y, z \rangle$. Größen wie die Position oder Geschwindigkeit eines Objekts können als Vektoren dargestellt werden. Die meisten Vektoren sind mit Einheiten verknüpft.

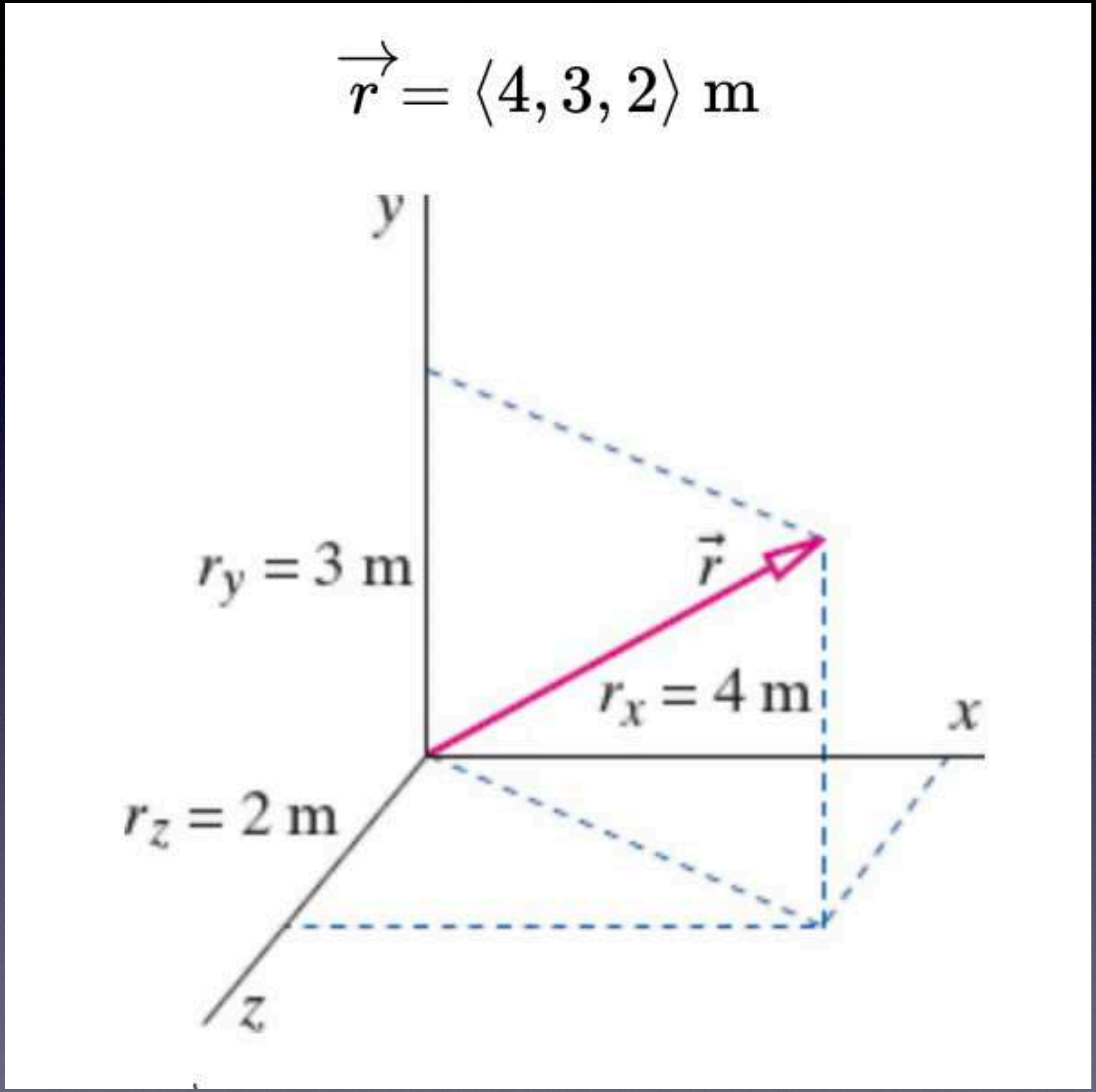
Der Positionsvektor ist ein einfaches Beispiel für eine physikalische Vektorgröße. Es wird ein kartesisches 3D-Koordinatensystem verwendet, um Positionen im Raum und andere Vektorgrößen anzugeben. Ausrichtung der Achsen des Koordinatensystems wie folgt: *x*-Achse nach rechts, *y*-Achse nach oben und *z*-Achse aus der Folie zu dir weisend. Dies ist ein „**rechtshändiges**“ **Koordinatensystem**: Wenn du den Daumen, den Zeige- und den Mittelfinger der rechten Hand senkrecht zueinander hältst und den Daumen mit der *x*-Achse sowie den Zeigefinger mit der *y*-Achse ausrichtest, dann zeigt der Mittelfinger entlang der *z*-Achse zu dir.



Rechtshändiges 3D-Koordinatensystem. Die *xy*-Ebene liegt in der Ebene der Folie, und die *z*-Achse ragt aus der Folie heraus, zu dir hin.

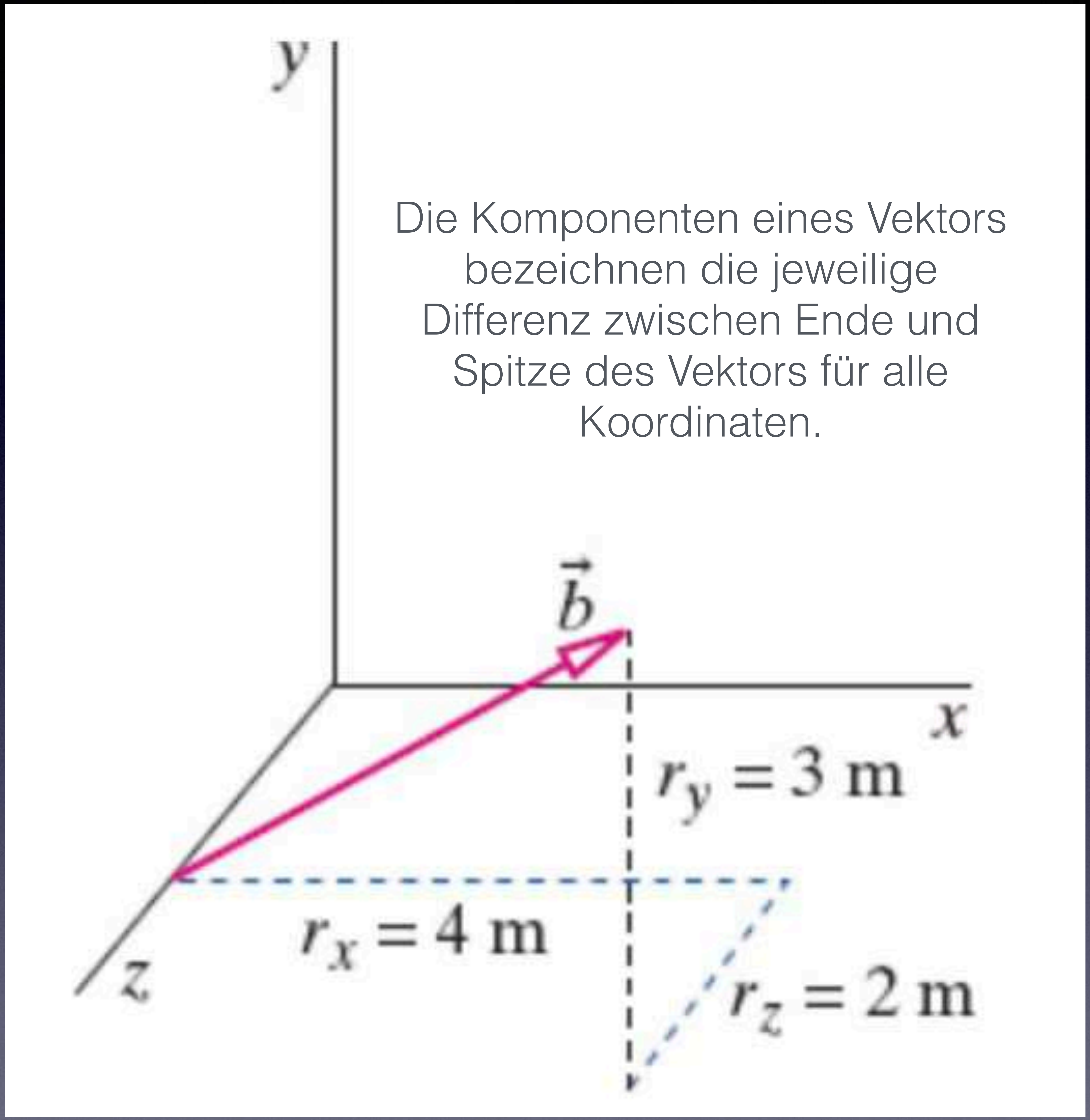
Eine Position im 3D-Raum kann als ein Vektor betrachtet werden, der von einem (Koordinaten-) Ursprung zu diesem Ort zeigt und als **Positionsvektor** (**Ortsvektor**) bezeichnet wird. Die nebenstehende Abbildung zeigt einen Positionsvektor, dargestellt durch einen Pfeil mit Anfang (Pfeil-Ende) am Ursprung, der deine endgültige Position (Pfeil-Spitze) darstellen könnte. Starte am Ursprung und gehe entlang der *x*-Achse 4 m, dann parallel zur *y*-Achse 3 m, und schließlich 2 m parallel zur *z*-Achse. Deine neue Position relativ zum Ursprung ist ein Vektor, der wie folgt geschrieben werden kann:

$$\vec{r} = \langle 4,3,2 \rangle \text{ m}$$



Ein 3D-Positionsvektor (Ortsvektor) und seine *x*-, *y*- und *z*-Komponenten.

Ein Positionsvektor hat die Besonderheit, dass sein Ende *immer* im Ursprung eines Koordinatensystems liegt, was bei anderen Vektoren *nicht* der Fall ist. Es ist wichtig zu beachten, dass z. B. die *x*-**Komponente** eines Vektors die **Differenz** zwischen der *x*-Koordinate des Endes des Vektors und der Koordinate der Spitze des Vektors angibt. Sie gibt *keine* Auskunft über die Lage des Endes des Vektors. Gemäß **Konvention** werden Vektorgrößen, die z. B. die Geschwindigkeit darstellen, in der Regel mit dem **Ende des Pfeils an der Stelle des Objekts** dargestellt.

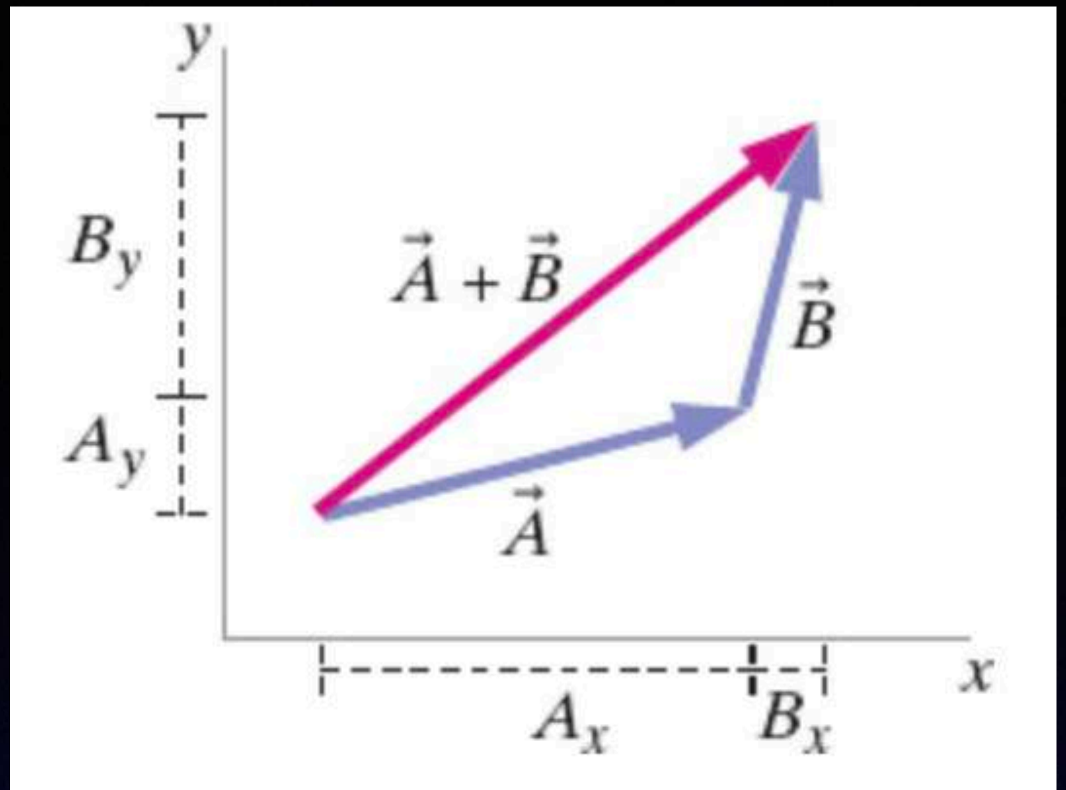


Der Pfeil stellt den Vektor $\vec{b} = \langle 4,3,2 \rangle$ an Position $\langle 0,0,2 \rangle$ dar.

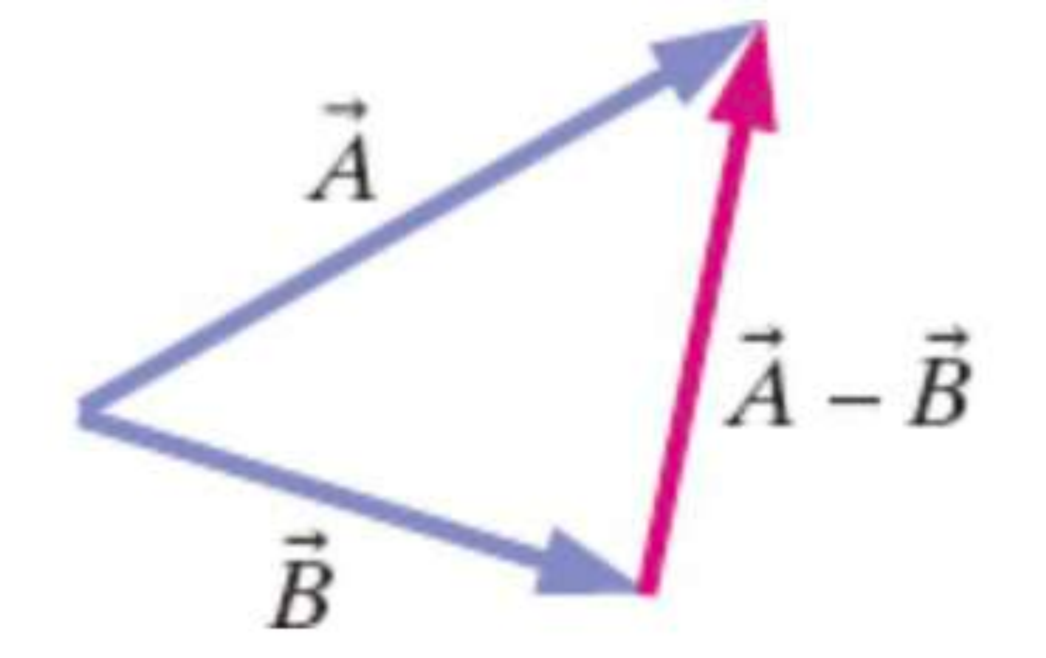
Vektoren sind mathematische Einheiten (Objekte) und haben ihre eigenen mathematischen Operationen. Einige dieser Operationen sind dieselben wie die, die du bereits für Skalare kennst. Andere, wie die Multiplikation, sind ganz anders, und die Division durch einen Vektor ist z.B. gar nicht zulässig.

- Multiplikation oder Division mit Skalar (Skalierung): $s\vec{a} \equiv \left\langle sa_x, sa_y, sa_z \right\rangle$
- Betrag: $\left|\vec{a}\right| \equiv \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ (Skalar)
- Einheitsvektor: $\hat{a} \equiv \vec{a}/\left|\vec{a}\right|$ (skalierter Vektor mit Betrag 1)
- Addition: $\vec{a} + \vec{b} \equiv \left\langle a_x + b_x, a_y + b_y, a_z + b_z \right\rangle$ (Vektor)
- Subtraktion: $\vec{a} - \vec{b} \equiv \left\langle a_x - b_x, a_y - b_y, a_z - b_z \right\rangle$ (Vektor)
- Differentiation: $d\vec{r}/dt \equiv \left\langle dr_x/dt, dr_y/dt, dr_z/dt \right\rangle$ (Vektor)
- Skalarprodukt: $\vec{a} \cdot \vec{b} \equiv a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \equiv \left|\vec{a}\right| \left|\vec{b}\right| \cos\angle\left(\vec{a}, \vec{b}\right)$ (Skalar)
- Kreuzprodukt: $\vec{a} \times \vec{b} \equiv \left\langle a_y b_z - a_z b_y, a_z b_x - a_x b_z, a_x b_y - a_y b_x \right\rangle \equiv \vec{n} \left|\vec{a}\right| \left|\vec{b}\right| \sin\angle\left(\vec{a}, \vec{b}\right)$ (Vektor in Richtung $\vec{n}$)

Beispiele für gültige mathematische Operationen mit Vektoren. Mehr Informationen zum Skalar- und Kreuzprodukt später.



Addition $\vec{A} + \vec{B}$. Identisch mit $\vec{B} + \vec{A}$.



Subtraktion $\vec{A} - \vec{B}$. Beachte dass $\vec{A} - \vec{B} \neq \vec{B} - \vec{A}$ ist.

- Ein Vektor kann nicht einem Skalar gleichgesetzt werden.
- Ein Vektor kann nicht zu einem Skalar addiert oder von einem Skalar subtrahiert werden.
- Ein Vektor kann nicht im Nenner eines Ausdrucks vorkommen. Aber: Obwohl du nicht durch einen Vektor dividieren kannst, beachte, dass die Division durch den Betrag $\left|\vec{a}\right|$ eines Vektors eine zulässige Operation ist.
- Wie bei Skalaren kannst du keine Vektoren addieren oder subtrahieren, die unterschiedliche physikalische Einheiten haben.

Es gibt bestimmte Operationen, die für Vektoren weder zulässig noch sinnvoll sind.

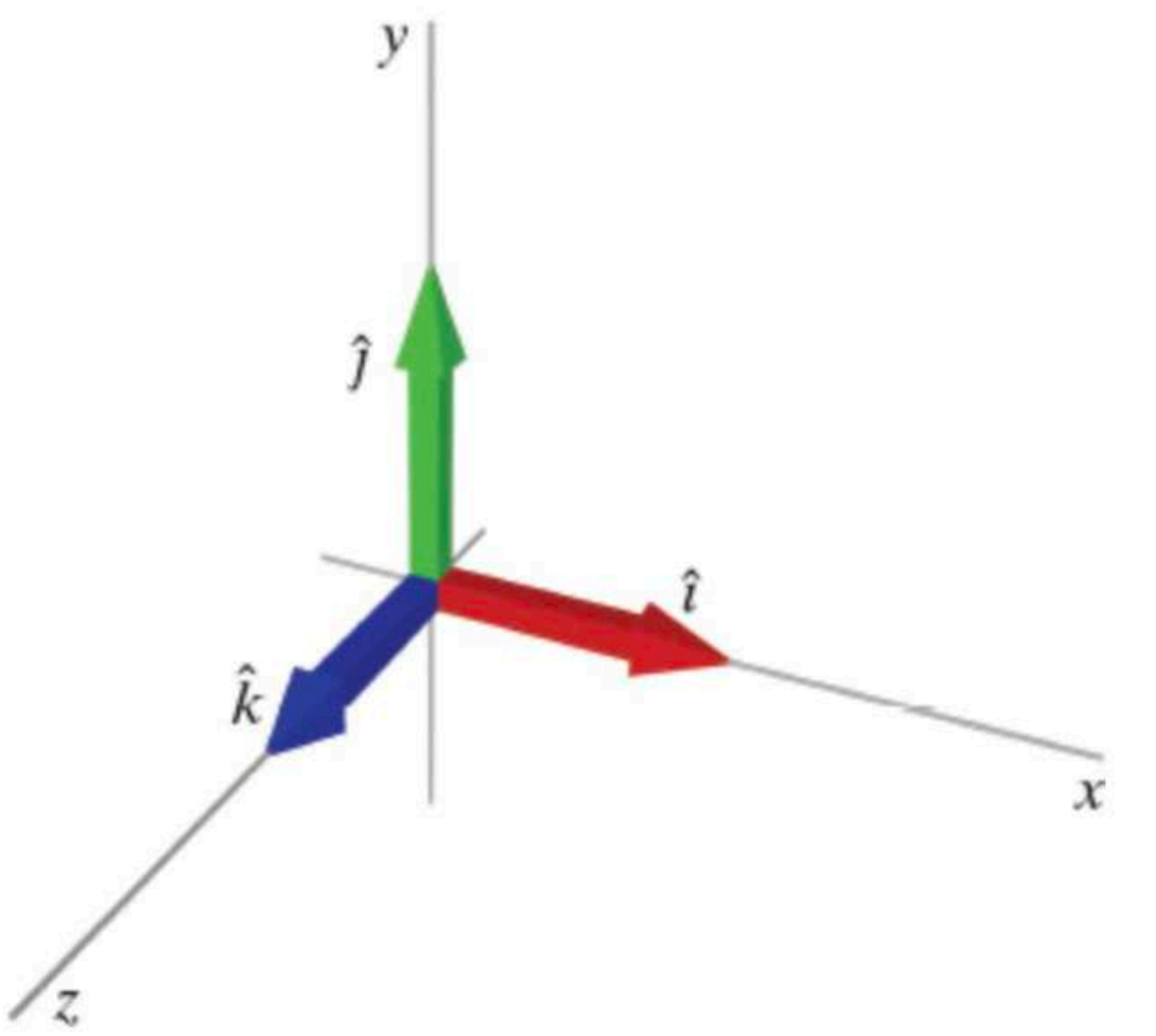
Eine Möglichkeit die Richtung eines Vektors zu beschreiben, besteht darin, einen Einheitsvektor anzugeben. Ein Einheitsvektor ist ein Vektor mit Betrag 1, der in eine Richtung zeigt. Ein Einheitsvektor wird mit einem „*hat*“ (Zirkumflex) anstelle eines Pfeils darüber geschrieben. Der Einheitsvektor $\hat{a}$ wird mit „*A-hat*“ (deutsch „A-Dach“) bezeichnet. Es gilt

$$\vec{a} \equiv \left|\vec{a}\right| \hat{a}$$

In einem 3D-kartesischen Koordinatensystem gibt es drei spezielle Einheitsvektoren, die entlang der drei Achsen ausgerichtet sind. Sie werden „*i-hat*“, „*j-hat*“ und „*k-hat*“ genannt und zeigen entlang der Achsen *x*, *y* bzw. *z*. Damit lässt sich ein Positionsvektor wie folgt darstellen

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$$

$$\hat{i} = \langle 1, 0, 0 \rangle$$
$$\hat{j} = \langle 0, 1, 0 \rangle$$
$$\hat{k} = \langle 0, 0, 1 \rangle$$



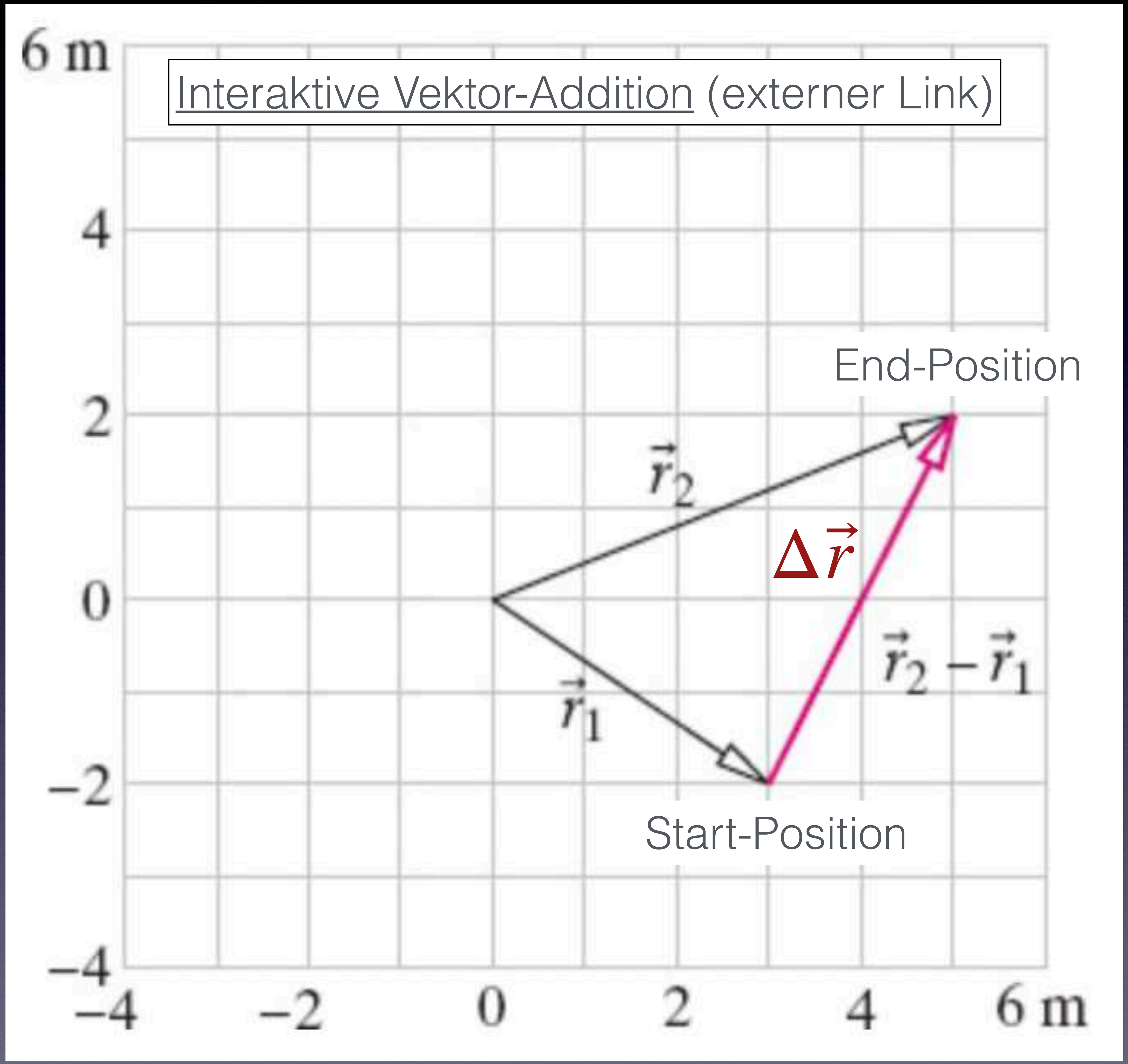
Die (Koordinaten-) Einheitsvektoren $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$.

Da wir häufig an Änderungen interessiert sind, die durch Wechselwirkungen verursacht werden, müssen wir dafür zumeist die Änderung einer vektoriellen Größe berechnen. Zum Beispiel möchten wir vielleicht die Änderung der Position eines sich bewegenden Objekts oder die Änderung seiner Geschwindigkeit während eines bestimmten Zeitintervalls wissen. Das Auffinden solcher Änderungen erfordert eine Vektorsubtraktion. Der griechische Buchstabe Δ wird traditionell verwendet, um die Änderung einer Größe (Skalar, Vektor) zu bezeichnen. Wir verwenden die tief gestellten Zeichen *i* (*initial*) und *f* (*final*) um Anfangs- sowie Endwert einer Größe zu kennzeichnen.

Beispiele:

$\Delta\vec{r} = \overrightarrow{r_f} - \overrightarrow{r_i}$ (Änderung der Position)

$\Delta t = t_f - t_i$ (Zeitunterschied)



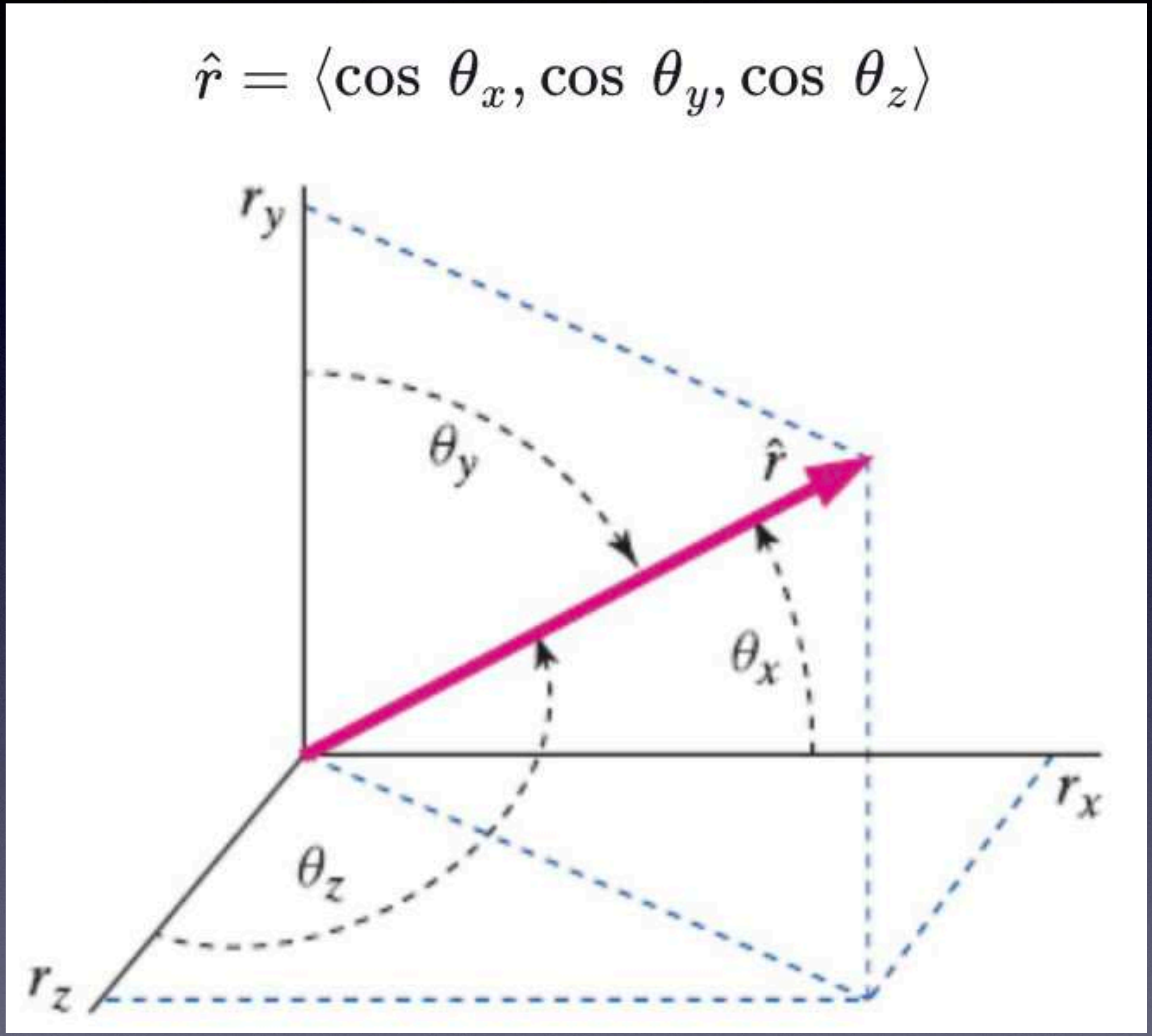
Relativer Positionsvektor $\Delta\vec{r} \equiv \overrightarrow{r_2} - \overrightarrow{r_1}$.

Der jeweilige Winkel zwischen einem Vektor (oder Einheitsvektor) und den Koordinatenachsen wird als Richtungskosinus des Vektors bezeichnet. Die Kosinusfunktion ist nie größer als 1, so wie keine Komponente eines Einheitsvektors größer als 1 sein kann.

Der Positions-Einheitsvektor ist gegeben durch $\hat{r} = \left\langle \cos\theta_x, \cos\theta_y, \cos\theta_z \right\rangle$ mit

$$\cos\theta_x = \frac{\vec{r}\cdot\hat{i}}{\left|\vec{r}\right|\,\left|\hat{i}\right|}\ \left(\frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypothenuse}}\right)$$

Die anderen Komponenten werden analog berechnet.



Ein 3D-Einheitsvektor und seine Winkel θ_x, θ_y sowie θ_z zu den *x*-, *y*- und *z*-Achsen.

Um Position und Verschiebung (Ortsänderung) zu beschreiben, mussten wir einen Ursprung und eine Reihe von Achsen wählen. Was wäre, wenn wir andere Entscheidungen getroffen hätten? Bestimmte Größen im Zusammenhang mit Vektoren ändern sich, wenn eine andere Ausrichtung für die Koordinatenachsen gewählt wird, aber andere bleiben gleich. Skalare Größen wie Masse und Temperatur ändern sich nicht. Die Größe (Betrag) eines Vektors bleibt gleich, wenn Achsen unterschiedlich ausgerichtet sind, obwohl sich die Komponenten des Vektors ändern - die Komponente der Geschwindigkeit hat einen anderen Wert, wenn die Achse so gewählt wird, dass sie eine andere Ausrichtung hat. Aus diesem Grund wird eine Vektorkomponente mathematisch nicht als wahrer Skalar angesehen, obwohl es sich um eine einzelne Zahl handelt.

Kontrollpunkt 4

1. Berechne $\hat{r}$ für $\vec{r} = \langle 4,2,-1 \rangle$ m.

2. Berechne die Winkel θ_x, θ_y und θ_z für $\vec{r}$ zu den Achsen *x*, *y* und *z*.

3. Berechne $\Delta\vec{r}$ für $\vec{r}_i = \langle 1,2,4 \rangle$ m und $\vec{r}_f = \langle 1,-2,4 \rangle$ m.

4. Worin besteht der wesentliche Unterschied zwischen einem Positionsvektor und einem Geschwindigkeitsvektor?

5. Berechne $d\vec{v}/dt$ für $\vec{v} = \left\langle 10, -5t^2, t \right\rangle$ m/s.

SI-Einheiten

Auf allen Folien wird das SI-Einheitensystem (*Système Internationale*) verwendet, wie es in Physik und Technik üblich ist.

Die Verwendung von SI-Einheiten in physikalischen Gleichungen ist unerlässlich. Dies kann eine Umrechnung von einem anderen Einheitensystem in SI-Einheiten erfordern. Wenn die Masse in Gramm gegeben ist, musst du durch 1000 teilen und die Masse in Kilogramm verwenden. Wenn eine Entfernung in Zentimetern angegeben ist, musst du durch 100 teilen, um die Entfernung in Meter umzurechnen. Wenn die Zeit in Minuten gemessen wird, musst du mit 60 multiplizieren, um eine Zeit in Sekunden zu verwenden.

Basisgröße	Größe (Symbol)	Dimension (Symbol)	Einheit	Einheit (Symbol)
Zeit	t	T	Sekunde	s
Länge	l	L	Meter	m
Masse	m	M	Kilogramm	kg
Elektrische Stromstärke	I	I	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	T	Θ	Kelvin	K
Stoffmenge	n	N	Mol	mol
Lichtstärke	I_v	J	Candela	cd

Basiseinheiten des SI-Systems.

Alle nicht in der vorangehenden Tabelle aufgeführten physikalischen Größen sind **abgeleitete Größen**. Deren Dimension kann eindeutig als Potenzprodukt der Dimensionen der sieben Basisgrößen dargestellt werden:

$$\dim Q = T^\alpha \cdot L^\beta \cdot M^\gamma \cdot I^\delta \cdot \Theta^\epsilon \cdot N^\zeta \cdot J^\eta$$

Entsprechend können die zugehörigen **abgeleiteten SI-Einheiten** als Produkt aus einem numerischen Faktor *k* und dem Potenzprodukt der Basiseinheiten ausgedrückt werden:

$$\left[Q\right] = k \cdot \mathrm{s}^\alpha \cdot \mathrm{m}^\beta \cdot \mathrm{kg}^\gamma \cdot \mathrm{A}^\delta \cdot \mathrm{K}^\epsilon \cdot \mathrm{mol}^\zeta \cdot \mathrm{cd}^\eta$$

Jeder der Dimensionsexponenten α, β, γ, δ, ε, ζ und η ist entweder Null oder eine positive oder negative, im Allgemeinen ganze Zahl.

Seit 2019 sind alle SI-Einheiten über sieben **SI-Definitionskonstanten** (siehe nebenstehende Tabelle) exakt definiert.

Eine **Sekunde** ist dann die Zeitspanne für 9 192 631 770 Schwingungen des Cäsium-Atoms.

Ein **Meter** entspricht dann der Strecke, die Licht in $\frac{1}{299792458}\,\mathrm{s}$ zurücklegt.

Ein **Kilogramm** wird über die Planck-Konstante und den beiden zuvor genannten SI-Basiseinheiten definiert.

Symbol	Konstante	Wert
$\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$	Übergangsfrequenz des Cäsium-Atoms	9 192 631 770 Hz
c	Lichtgeschwindigkeit	299 792 458 m/s
h	Planck-Konstante	$6{,}626\,070\,15 \times 10^{-34}$ kg m^2 s^{-1}
e	Elementarladung	$1{,}602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C
k	Boltzmann-Konstante	$1{,}380\,649 \times 10^{-23}$ J/K
N_A	Avogadro-Konstante	$6{,}022\,140\,76 \times 10^{23}$ 1/mol
K_{cd}	Lichtausbeute der 540-THz-Strahlung	683 lm/W

Definierende Konstante des SI-Systems.

Kontrollpunkt 5

1. Eine Schnecke bewegt sich 30 cm in 5 Minuten. Wie hoch war ihre Durchschnittsgeschwindigkeit in SI-Einheiten?

2. Rechne 2,5 g cm^{-3} in SI-Einheiten um.

3. Wir dividieren eine Geschwindigkeit durch eine Beschleunigung. In welcher SI-Einheit wird das Ergebnis angegeben?

Mittlere Geschwindigkeit

Eine Geschwindigkeit wird durch Betrag und Richtung beschrieben und ist deshalb ein ein Vektor. Da diese Größe auch im Alltag eine wichtige Rolle spielt, mag es überraschend sein, dass weder ihre aktuelle Richtung noch ihr Betrag direkt, in einer einzigen Messung, bestimmt werden können. Um die Geschwindigkeit eines sich bewegenden Objekts zu bestimmen ist es notwendig, an zwei Positionen zu messen und daraus die **mittlere Geschwindigkeit** zu berechnen. Definition:

$$\vec{v}_{\mathrm{avg}} \equiv \frac{\vec{r}_f - \vec{r}_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Da das Messintervall endlich ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich das sich bewegende Objekt während dieses Intervalls beschleunigt|verlangsamt.

Vorhersage einer neuen Position

Die Gleichung zur Bestimmung der **mittleren Geschwindigkeit**

$$\vec{v}_{\text{avg}} \equiv \frac{\vec{r}_f - \vec{r}_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

kann wir folgt umgeschrieben werden:

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + \vec{v}_{\text{avg}} \Delta t$$

Diese Gleichung besagt, dass bei Kenntnis von Ausgangsposition $\vec{r}_i$, mittlerer Geschwindigkeit $\vec{v}_{\text{avg}}$ und Zeitintervall Δt, die **nachfolgende Position** $\vec{r}_f$ vorausberechnet werden kann.

Die zuvor eingeführte Gleichung zur Aktualisierung der Position ist eine Vektorgleichung. In **Komponentenform** lautet sie:

$$\left\langle x_f, y_f, z_f \right\rangle = \left\langle x_i, y_i, z_i \right\rangle + \left\langle v_{\mathrm{avg,x}}, v_{\mathrm{avg,y}}, v_{\mathrm{avg,z}} \right\rangle \Delta t$$

Oder komponentenweise geschrieben:

$$x_f = x_i + v_{\mathrm{avg,x}} \Delta t$$

$$y_f = y_i + v_{\mathrm{avg,y}} \Delta t$$

$$z_f = z_i + v_{\mathrm{avg,z}} \Delta t$$

Die **momentane Geschwindigkeit** ist die Änderungsrate der Position. Man erhält sie als Grenzwert aus $\Delta\vec{r}/\Delta t$ falls Δt gegen 0 geht:

$$\vec{v} \equiv \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}, \text{ oder } \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d}{dt}\langle x, y, z\rangle = \left\langle v_x, v_y, v_z \right\rangle$$

Die Ableitung des Positionsvektors $\vec{r}$ nach der Zeit liefert also erwartungsgemäß die Komponenten der (Momentan-) Geschwindigkeit. Zum Verständnis kannst du dir $d\vec{r}$ als sehr kleine („infimitesimale“) Verschiebung und dt als sehr kleines („infinitesimales“) Zeitintervall vorstellen.

Geschwindigkeit ist die Änderungsrate der Position: $\vec{v} = d\vec{r}/dt$. In ähnlicher Weise wird die **momentane Beschleunigung** als die Änderungsrate der Geschwindigkeit definiert:

$$\vec{a} \equiv d\vec{v}/dt$$

Für die **mittlere Beschleunigung** gilt entsprechend:

$$\vec{a}_{\mathrm{avg}} \equiv \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Da die Geschwindigkeit ein Vektor ist, gibt es zwei Teile seiner Zeitableitung, die zur momentanen Beschleunigung beitragen:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\left|\vec{v}\right| \hat{v}\right) = \frac{\left|\vec{v}\right|}{dt}\hat{v} + \left|\vec{v}\right| \frac{d\hat{v}}{dt}$$

Wie wir in späteren Kapiteln noch sehen werden, entsprechen diese Beiträge folgenden Effekten: (1) Anschieben oder Bremsen parallel zur momentanen Bewegungsrichtung (**Änderung des Betrags** der Geschwindigkeit) und/oder (2) Ablenkung senkrecht zur Bewegung (**Änderung der Richtung** der Geschwindigkeit).

Kontrollpunkt 6

1. Angenommen, die Position eines Objekts zur Zeit t ist gegeben durch $\vec{r} = \left\langle 3 + 5t, 4t^2, 2t - 6t^3 \right\rangle$ m. (1) Wie lautet die momentane Geschwindigkeit in Abhängigkeit von t ? (2) Wie lautet die momentane Beschleunigung in Abhängigkeit von t ? (3) Wie groß ist die momentane Geschwindigkeit zur Zeit $t = 0$? (4) Wie groß ist die momentane Beschleunigung zur Zeit $t = 0$?

Impuls*

*im Englischen mit (linear) momentum bezeichnet

Bei dem Versuch, die reale Welt zu modellieren, suchen Physiker nach Konzepten, die für eine sehr große Bandbreite von Systemen und Phänomenen anwendbar sind. Einige der „mächtigsten“ Prinzipien beinhalten „versteckte“ Größen, die wir nicht direkt wahrnehmen. **Impuls** $\vec{p}$ ist eine solche Größe. Je größer die Masse eines Objekts, desto stärker ist die Interaktion, um seine Bewegung zu ändern. Dasselbe gilt für die Geschwindigkeit des Objekts. Wichtig erscheint also das **Produkt von Masse und Geschwindigkeit** zu sein. Impuls ist nicht nur in der klassischen Mechanik, sondern auch in der Relativitätstheorie und Quantenmechanik von grundlegender Bedeutung. Später werden wir lernen, dass der Impuls eine **Erhaltungsgröße** ist: der Gesamtimpuls des Universums ist konstant!

Je größer die Masse oder Geschwindigkeit eines Objekts, desto stärker ist die Interaktion, die erforderlich ist, um seine Bewegung zu ändern.

Das Fangen eines Basketball erfordert eine größere Interaktion als das Fangen eines Tennisballs mit der gleichen Geschwindigkeit.

Für den **Impuls** $\vec{p}$ von Objekten, die sich mit Geschwindigkeiten von weniger als einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit bewegen, können wir folgende **Näherung** verwenden

$$\vec{p} \approx m\vec{v}$$

Wie die Geschwindigkeit ist der Impuls ein **Vektor**, besitzt also Betrag und Richtung. Da die Masse eine positive Zahl sein muss, kann dieser Skalar die Richtung des Vektors nicht verändern. Daher stimmt die Richtung des Impulses eines Objekts mit derjenigen seiner Geschwindigkeit überein.

Wenn wir auf **Newtons erstes Bewegungsgesetz** zurückblicken, können wir sehen, dass die Idee, dass ein Körper „… in seinem Ruhezustand verweilt oder sich mit konstanter Geschwindigkeit in eine konstante Richtung bewegt ...“ durch „**der Impuls eines Körpers bleibt konstant** …“ ausgedrückt werden kann. Später werden wir die Impulsänderung mathematisch mit dem Konzept der „Kraft“ in Verbindung bringen, um Interaktionen zu quantifizieren. Dies wird es uns erlauben, die Bewegung von Objekten, deren Impuls durch Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung verändert wird, quantitativ vorherzusagen.

Die Veränderung des Impulses ist daher eine wichtige Größe. Die Berechnung einer Impulsänderung erfordert eine Subtraktion von Vektoren.

Verwendung des Impulses zur Aktualisierung der Position

Falls du den Impuls, die Masse sowie die momentane Position eines Objektes kennst, kannst du seine Positionsänderung über ein bestimmtes Zeitintervall berechnen. Dies ist immer dann besonders einfach, wenn sich das Objekt mit einer Geschwindigkeit weit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit bewegt. In diesem Fall gilt näherungsweise

$$\vec{r}_f \approx \vec{r}_i + \frac{\vec{p}}{m}\Delta t$$

Kontrollpunkt 8

Zum Zeitpunkt $t_i = 12\,\mathrm{s}$ befindet sich ein Auto mit der Masse $m = 1300\,\mathrm{kg}$ an Position $\vec{r}_i = \langle 94{,}0{,}30 \rangle\ \mathrm{m}$. Sein konstanter Impuls beträgt $\vec{p}_i = \langle 4500{,}0{,}-3000 \rangle\ \mathrm{kg \cdot m/s}$.

1. Wie groß ist seine (konstante) Geschwindigkeit $\vec{v}_i = \vec{v}_f$?

2. Wo ($\vec{r}_f$) befindet sich das Auto zum Zeitpunkt $t_f = 17\ \mathrm{s}$?

Impuls bei sehr großen Geschwindigkeiten

Obwohl sich die meisten Objekte, denen wir in unserem täglichen Leben begegnen, mit Geschwindigkeiten bewegen, die viel geringer als die Lichtgeschwindigkeit sind, ist **Bewegung bei sehr hohen Geschwindigkeiten** nicht ungewöhnlich. Jeden Tag gelangen z. B. Teilchen in die Erdatmosphäre und sind mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit unterwegs. Einige dieser Partikel sind Protonen, die mit Atomkernen in der Atmosphäre reagieren, um Schauer von Hochgeschwindigkeitspartikeln zu erzeugen, die auf die Erde „herabregnen“.

Experimente mit Partikeln, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen, zeigen, dass die **Änderungen in** $m\vec{v}$ sich **nicht proportional zu den Interaktionen** verhalten. Wann immer wir eine Kraft auf ein Teilchen in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit ausüben, steigt dessen Geschwindigkeit kaum an, und es ist nicht möglich, die Geschwindigkeit eines Teilchens auf Lichtgeschwindigkeit oder darüber hinaus zu erhöhen.

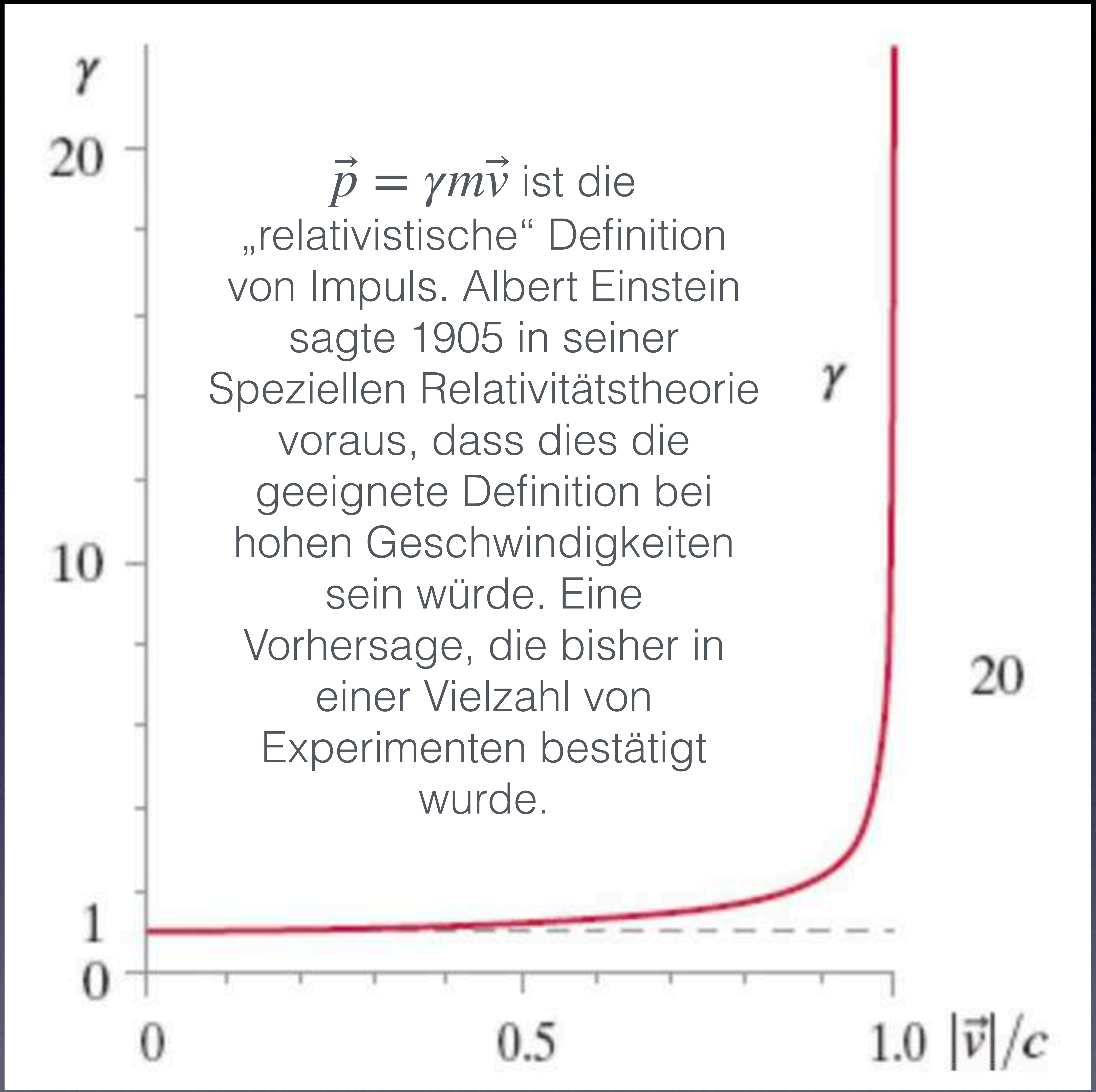
Für ein Massenteilchen ist der (exakte) Impuls als das Produkt der Masse mal Geschwindigkeit definiert, multipliziert mit einem Proportionalitätsfaktor γ

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

Darin ist γ definiert als

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{|\vec{v}|}{c}\right)^2}}$$

γ ist eine dimensionslose positive Zahl, die immer größer oder gleich 1 ist.



$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$ ist die „relativistische“ Definition von Impuls. Albert Einstein sagte 1905 in seiner Speziellen Relativitätstheorie voraus, dass dies die geeignete Definition bei hohen Geschwindigkeiten sein würde. Eine Vorhersage, die bisher in einer Vielzahl von Experimenten bestätigt wurde.

γ als Funktion von $|\vec{v}|/c$. Bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten ist $\gamma \approx 1$. Nahe der Lichtgeschwindigkeit wächst γ rasant an.

Was können wir aus $\vec{p} = \gamma m \vec{v} \approx m \vec{v}$ (für $\left|\vec{v}\right| \ll c$) lernen? Wir sehen, dass wir nicht immer (ganz) „exakt“ sein müssen, um zu nützlichen Ergebnissen zu gelangen. Wir können oft eine ganze Menge lernen, indem wir eine näherungsweise Analyse einer komplexen Situation durchführen. In einigen Fällen können die Unterschiede zwischen einer Näherung und der hypothetisch „exakten“ Analyse gering sein. Allerdings kann ein Vergleich der Vorhersagen des vereinfachten Vorgehens mit Daten aus realen Beobachtungen auf notwendige Verfeinerungen unseres Ansatzes hindeuten, die seine Vorhersagen genauer machen würden.

Mit Physik können wir vereinfachte, idealisierte, ungefähre „Modelle“ realer Phänomene konstruieren, analysieren und verfeinern, in der Hoffnung, dass solche Analysen uns ein nützliches, aber notwendigerweise nur ungefähres Verständnis der realen Welt vermitteln. Jedes Modell bleibt „vorläufig“!

Für große Geschwindigkeiten, oder falls wir bei unserer Analyse sehr genau sein müssen, dürfen wir die Näherung

$$\vec{r}_f \approx \vec{r}_i + \frac{\vec{p}}{m}\Delta t$$

nicht mehr verwenden. Stattdessen müssen wir die exakte Formulierung für den Impuls $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$ nutzen. Damit erhalten wir für die Berechnung der neuen Position

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left|\vec{p}\right|}{mc}\right)^2}} \left(\frac{\vec{p}}{m}\right) \Delta t$$

Kontrollpunkt 9

1. Berechne (auf deinem Taschenrechner und/oder Mobiltelefon) den Wert für γ (mit $c = 299792458\,\mathrm{m/s}$) für $\left|\vec{v}\right| = 10\,\mathrm{m/s}$ und $\left|\vec{v}\right| = 30\,\mathrm{m/s}$. Erhältst du von 1 abweichende Ergebnisse? Unterscheiden sich die Ergebnisse?

2. Wie genau müsstest Du eine Geschwindigkeit von $\left|\vec{v}\right| = 30\,\mathrm{m/s}$ messtechnisch erfassen, damit sich die Berücksichtigung eines von 1 abweichenden Wertes für γ lohnt?

Computergestützte Modellierung

Die **computergestützte Modellierung** spielt nicht nur in der Physik eine wichtige Rolle, sondern in fast allen anderen wissenschaftlichen und technischen Bereichen. Die Erstellung einfacher Rechenmodelle, die auf grundlegenden physikalischen Prinzipien basieren, hilft uns, genauer zu erkennen, wie diese Prinzipien das **Verhalten physikalischer Systeme** bestimmen. Derartige Modelle können auch auf **komplexe Systeme** angewendet werden, die z.B. einer rein analytischen Betrachtung nicht zugänglich sind. Grafik-Tools gestatten es uns, die zeitliche Entwicklung des Verhaltens von 3D Systemen zu visualisieren.

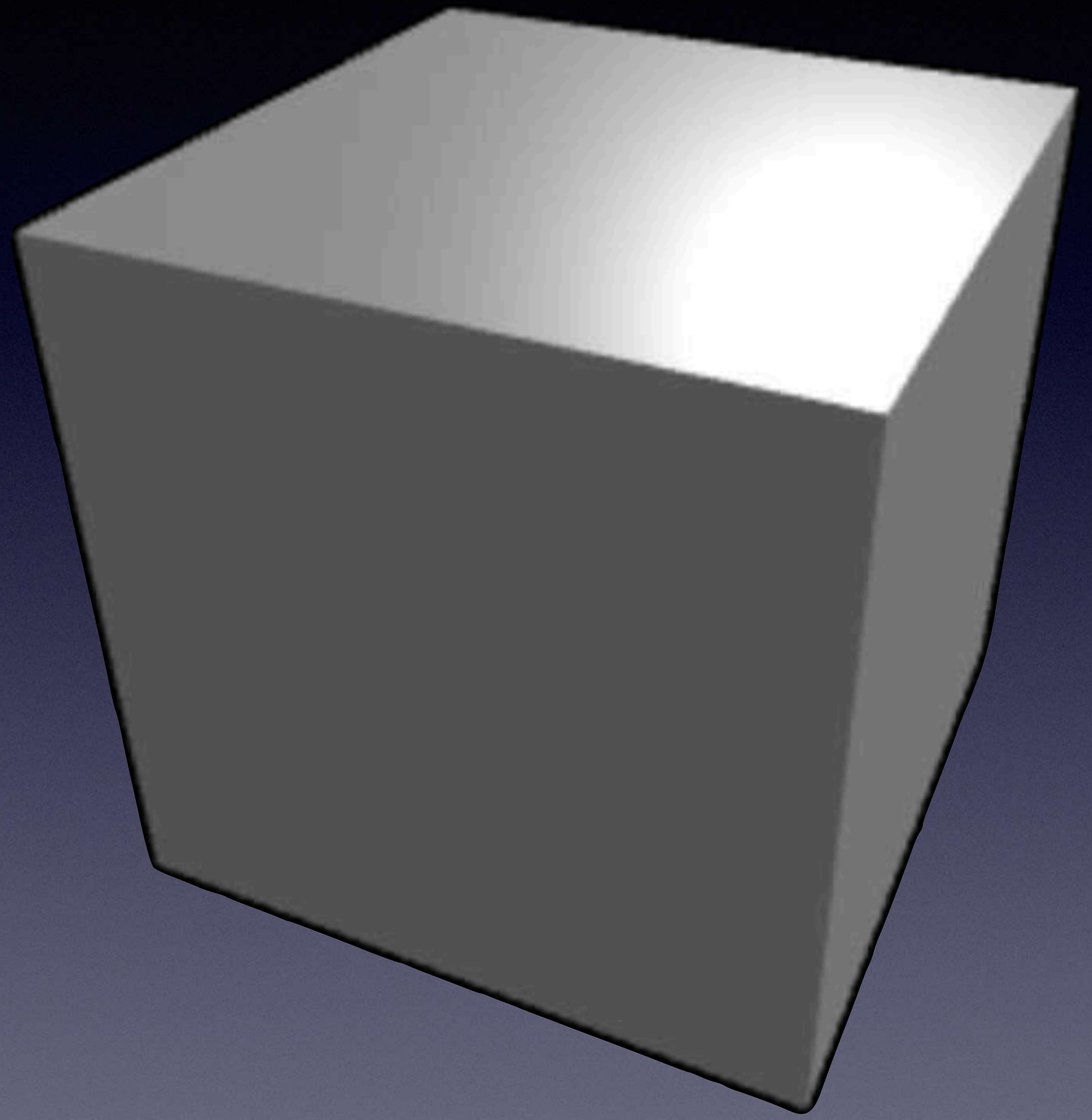
Aus diesen Gründen ist die computergestützte Modellierung als integraler Bestandteil in dieser Folien-Serie enthalten.

In dieser Folien-Serie wird **VPython** verwendet, um Rechenmodelle zu erstellen. VPython ist eine Erweiterung der weit verbreiteten Programmiersprache Python. VPython unterstützt 3D-Vektor-Algebra und ermöglicht es dir, dynamische 3D-Animationen in Echtzeit als Nebenprodukt von Berechnungen zu erstellen. VPython ist **kostenlos** und **Open Source** und läuft unter Windows, MacOS und Linux.

Du kannst dich unter Web VPython anmelden, um VPython online im Browser zu verwenden.

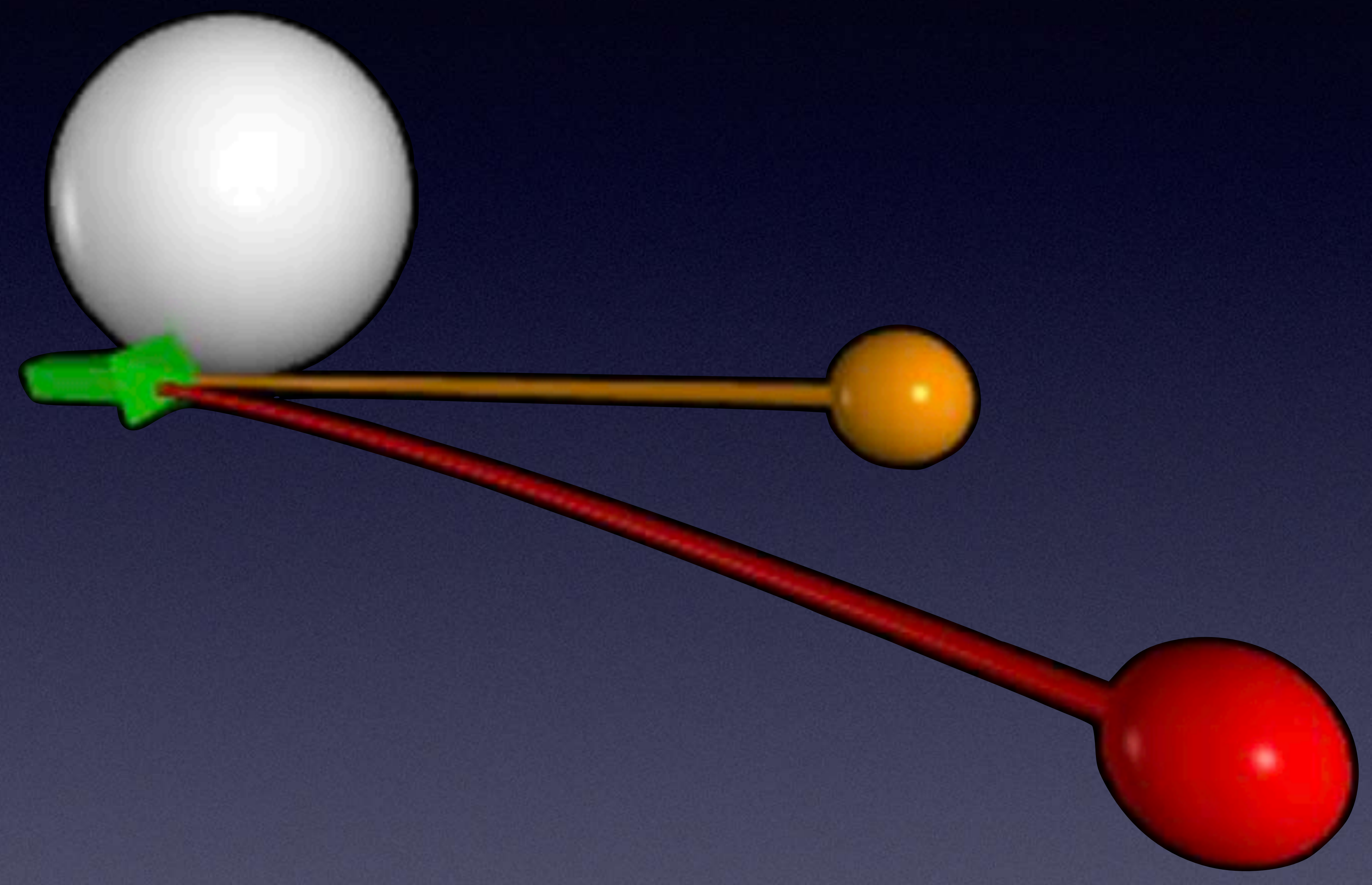
Die nebenstehende Grafik wurde mit VPython erzeugt. Du kannst den Würfel interaktiv rotieren, vergrößern oder verkleinern. Aktiviere hierfür diesen Box-Link in deinem Browser und verifiziere, ob VPython in deinem einwandfrei funktioniert.

Für 3D-Animationen im Browser verwendet VPython WebGL, das von dem Internet Explorer eventuell nicht unterstützt wird.



Visualisierung eines 3D-Würfels mit VPython. Eigene Darstellung.

Die nebenstehende Grafik wurde mit VPython erzeugt. Starte die Animation durch aktivieren des <u>Flugbahn-Links</u>.



Animation der Bewegung zweier Objekte: Grüner Pfeil: Anfangs-Geschwindigkeit (Vektor) beider Objekte. Kugel (orange): Bahn für konstante Geschwindigkeit. Kugel (rot): Bahn mit zusätzlich überlagerter Beschleunigung. Dargestellt ist der Endzustand der Animation. Eigene Darstellung.

```
Web VPython 3.2
from visual import *
origin=sphere(pos=vector(0,0,0),radius=2.75)
ball=sphere(pos=vector(-3,-3,0), color=color.orange,radius=0.5,make_trail=True)
fall=sphere(pos=vector(-3,-3,0), color=color.red,radius=0.5,make_trail=True)
velocity=vector(3,1.5,4)
fallvelocity=velocity
gravity=vector(0,0,1)
arrow(pos=ball.pos,axis=velocity,color=color.green)
delta_t=0.1
t=0.0
while t<3.0:
    rate(10)
    ball.pos=ball.pos+velocity*delta_t
    fallvelocity=fallvelocity+gravity*delta_t
    fall.pos=fall.pos+fallvelocity*delta_t
    t=t+delta_t
```

Code des Programms zur Animation der beiden kugelförmigen Objekte (siehe vorangehende Seite).
Starte die Animation durch aktivieren des Flugbahn-Links.

Das Relativitätsprinzip

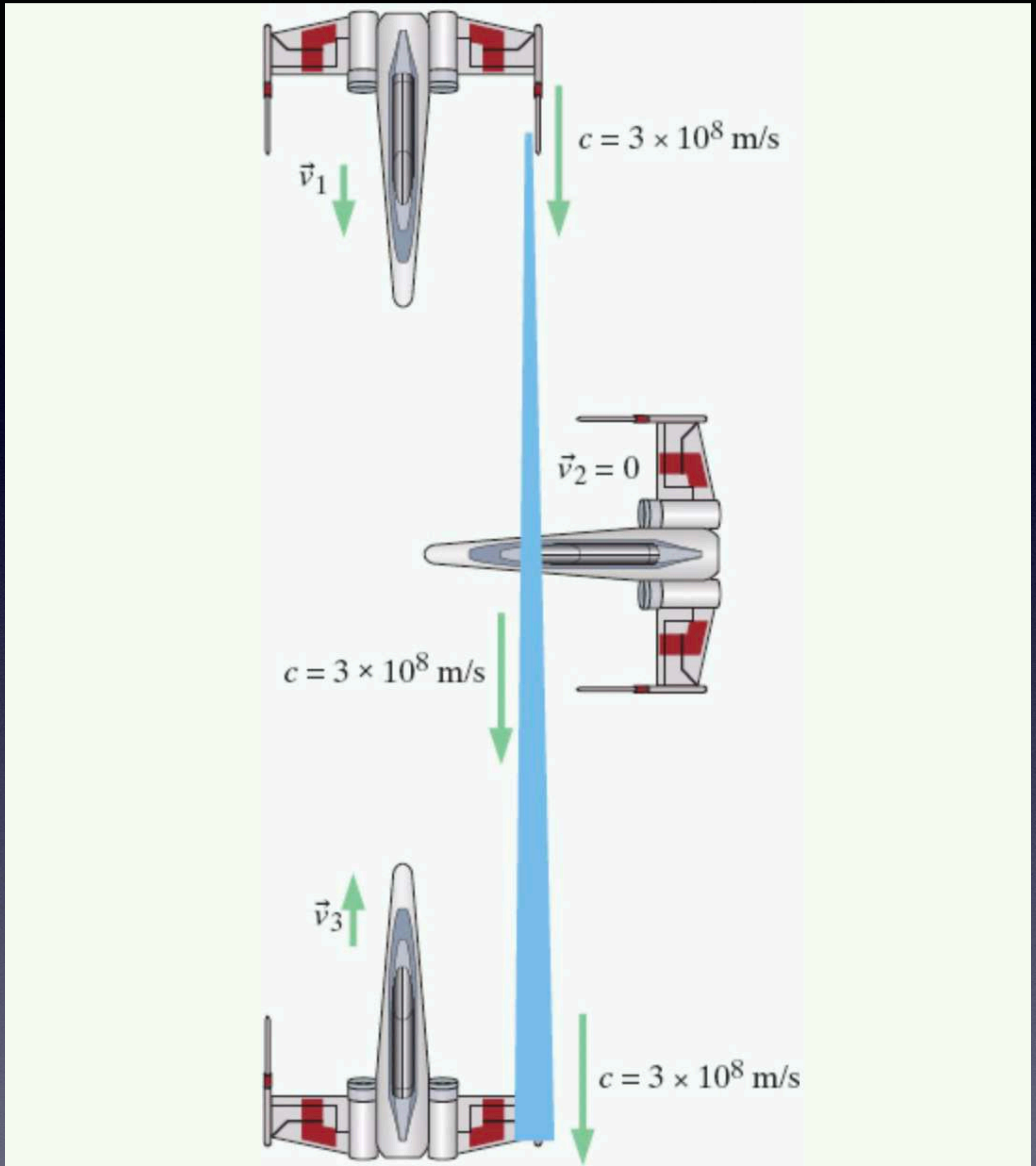
Viele experimentelle Beobachtungen haben zu der Aufstellung des **Relativitätsprinzips** geführt, das erstmals von Galileo erkannt wurde: Physikalische Gesetze wirken für gleichmäßig bewegte Beobachter in gleicher Weise wie für ruhende Beobachter (Einsteins Erweiterungen dieses Prinzips sind als *spezielle Relativitätstheorie* und *allgemeine Relativitätstheorie* bekannt). Phänomene, die in einem gleichmäßig bewegten Raum beobachtet werden (z. B. in einem Zug, der mit konstanter Geschwindigkeit auf einer ebenen, geraden Strecke fährt), gehorchen denselben physikalischen Gesetzen wie Experimente, die in einem stationären Raum durchgeführt werden (z. B. Labor). Nach diesem Prinzip müsste das erste Newtonsche Bewegungsgesetz sowohl für einen Beobachter, der sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, als auch für einen ruhenden Beobachter gelten.

Nehmen wir an, du sitzt (in Fahrtrichtung) im Zug-Restaurant, das sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt und du schaust auf das vor dir auf dem glatten Tisch stehende Glas. Aus deiner Sicht bewegt sich das Glas nicht, und es sind keine Interaktionen erforderlich, um es auf dem Tisch zu halten. Jemand, der am Bahnsteig steht, sieht den Zug vorbeifahren. Er erkennt, dass keine Interaktionen erforderlich sind, um das Glas auf dem Tisch zu halten. Du und Er sind sich einig, dass das erste Newtonsche Bewegungsgesetz eingehalten wird: Der Beobachter sieht, dass sich das Glas ohne Wechselwirkungen mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, und du siehst, dass sich das Glas ohne Wechselwirkungen überhaupt nicht bewegt (konstante Geschwindigkeit Null).

Nun wird der Zug abgebremst. Das Glas gerät ins Rutschen, bewegt sich von dir fort. Für dich sieht es so aus, als ob das Glas vorwärts beschleunigt wird, ohne dass es zu einer Interaktion gekommen wäre, was wie ein Verstoß gegen das erste Newtonsche Bewegungsgesetz aussieht. Das Problem ist, dass du jetzt in einem beschleunigten Bezugssystem sitzt. Newtons erstes Bewegungsgesetz gilt allerdings nur für nicht beschleunigte Bezugssysteme, die so genannten **Inertialsysteme**. Der Beobachter, der sich in einem Inertialsystem befindet, sieht dagegen keinen Verstoß gegen das erste Newtonsche Bewegungsgesetz: Das Glas verhält sich in „normaler“ Weise: Es bewegt sich mit unveränderter Geschwindigkeit und Richtung weiter, wenn der Zug seine Geschwindigkeit ändert.

Das Relativitätsprinzip und das erste Newtonsche Bewegungsgesetz gelten nur für Beobachter, die eine konstante Geschwindigkeit und Richtung (oder Nullgeschwindigkeit) relativ zum **kosmischen Mikrowellenhintergrund** haben, und außerdem möglichst weit von anderen Objekten entfernt sind (so dass Wechselwirkungen vernachlässigbar sind). Dieser Mikrowellenhintergrund ist der einzige Hintergrund und **Bezugsrahmen mit absolutem, universellem** Charakter. Früher nannte man den grundlegenden Bezugsrahmen grob „die Fixsterne“, aber Sterne und Galaxien haben ihre eigenen individuellen Bewegungen im Universum und stellen daher keinen angemessenen Bezugsrahmen dar, gegen den man Bewegung messen kann.

Einsteins **Spezielle Relativitätstheorie** (veröffentlicht 1905) baute auf dem von Galilei eingeführten Relativitätsprinzip auf, fügte aber die Annahme hinzu, dass die **Lichtgeschwindigkeit** gleich sein muss, wenn sie von Beobachtern in verschiedenen, gleichförmig zueinander bewegten Bezugssystemen gemessen wird (die Farbe des Lichts ist für die verschiedenen Beobachter dabei unterschiedlich). Wenn dagegen jemand im oberen Schiff einen Ball oder ein anderes Stück Materie wirft, ist die Geschwindigkeit des Objekts für die Beobachter unterschiedlich; nur die Lichtgeschwindigkeit ist vom Beobachter unabhängig.



Für das vom obersten Raumschiff ausgestrahlte Licht wird von Beobachtern in allen drei Raumschiffen dieselbe Lichtgeschwindigkeit gemessen.

Die Einsteinsche Theorie hat interessante Konsequenzen. Sie sagt zum Beispiel voraus, dass die Zeit in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedlich abläuft. Diese Vorhersagen sind durch zahlreiche Experimente bestätigt worden. Diese ungewöhnlichen Effekte sind nur bei sehr hohen Geschwindigkeiten groß (ein beträchtlicher Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit), weshalb wir diese Effekte im Alltag normalerweise nicht beobachten und nicht-relativistische Berechnungen für Phänomene mit niedriger Geschwindigkeit verwenden können. Damit das **Global Positioning System** (GPS) präzise genug genutzt werden kann, müssen Einsteins Spezielle Relativitätstheorie und auch seine Allgemeine Relativitätstheorie berücksichtigt werden. Schließlich müssen wir „ganz exakt“ wissen, wie die Uhren dort oben ticken.

Kontrollpunkt 10

1. Die Erdoberfläche ist kein Inertialsystem. Denke darüber nach, für welche Bewegungen die Annahme, dennoch in einem Inertialsystem zu sein, eine gute Näherung darstellt und für welche nicht.

2. Ein in Bezug auf den kosmischen Mikrowellenhintergrund ruhendes Raumschiff sendet einen roten Lichtstrahl aus. Ein zweites Raumschiff, das sich mit $2.5 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$ auf das erste Raumschiff zubewegt, nimmt das Licht auf. Welche der Aussagen sind für Beobachter im zweiten Raumschiff zutreffend? (Mehrere Aussagen können richtig sein.) (1) Das Licht breitet sich mit ca. $3 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$ aus (2) Das Licht ist nicht rot. (3) Das Licht breitet sich mit $5.5 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$ aus.

Antworten
(zu den „Kontrollpunkten“)

- K1.1: $\left(10^{-2}\right)^3 \mathrm{m}^3/\left(10^{-10}\right)^3 \mathrm{m}^3 = 10^{-6}/10^{-30} = 10^{24}$ Atome.

- K1.2: Zusätzliche Interaktion. Die elektromagnetische Wechselwirkung treibt den Kern auseinander, die **starke Wechselwirkung** hält ihn zusammen. Neben den beiden genannten Wechselwirkungen gibt es noch die Gravitation sowie die schwache Wechselwirkung.

- K2.1: Es könnte auch die Summe aller Interaktionen Null sein.

- K2.2: (1) Umkehr der Bewegungsrichtung. (3) Kontinuierliche Änderung der Richtung entlang der Umlaufbahn.

- K3.1: Das ständige Anschieben kompensiert die Reibung zwischen Kiste und Tisch.

- K3.2: Nein, falls es sich um eine gleichförmige Bewegung handelt.

- K4.1: $\hat{r} = \left\langle 4/\sqrt{21}, 2/\sqrt{21}, -1/\sqrt{21} \right\rangle$ m

- K4.2: $\theta_x = \arccos\left(4/\sqrt{21}\right) \approx 29{,}2$ Grad, $\theta_y = \arccos\left(2/\sqrt{21}\right) \approx 64{,}1$ Grad, $\theta_z = \arccos\left(-1/\sqrt{21}\right) \approx 102{,}6$ Grad

- K4.3: $\Delta\vec{r} = \langle 0, -4, 0\rangle$ m

- K4.4: Der Anfang eines Vektors stimmt für einen Positionsvektor mit dem Ursprung des Koordinatensystems überein, während er für die Geschwindigkeit am Ort des Objekts eingezeichnet wird.

- K4.5: $d\vec{v}/dt = \langle 0, -10t, 1\rangle$ m/s^2

- K5.1: $\dfrac{30\,\mathrm{cm}}{5\,\mathrm{Minuten}} \times \dfrac{\frac{1}{60}\,\frac{\mathrm{Minuten}}{\mathrm{s}}}{100\,\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{m}}} = 0{,}001\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
- K5.2: $2{,}5\,\dfrac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3} \times \dfrac{10^6\frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{m}^3}}{10^3\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{kg}}} = 2500\,\dfrac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$
- K5.3: $\dfrac{\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]}{\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\right]} = [\mathrm{s}]$
- K6.1: (1) $\vec{v} = \left\langle 5{,}8t{,}2 - 18t^2 \right\rangle\ \mathrm{m/s}$, (2) $\vec{a} = \langle 0{,}8, -36t \rangle\ \mathrm{m/s}^2$, (3) $\vec{v}(t=0) = \langle 5{,}0{,}2 \rangle\ \mathrm{m/s}$, (4) $\vec{a}(t=0) = \langle 0{,}8{,}0 \rangle\ \mathrm{m/s}^2$

- K8.1: $\vec{v} \simeq \langle 3.46, 0, -2.31 \rangle$ m/s, $\vec{r}_f \simeq \langle 111.31, 0, 18.46 \rangle$ m

- K9.1: für $\left|\vec{v}\right| = 10\,\mathrm{m/s}$, $\gamma \simeq 1 + 2 \times 10^{-16}$. Für $\left|\vec{v}\right| = 30\,\mathrm{m/s}$, $\gamma \simeq 1 + 5 \times 10^{-16}$

- K9.2: $\left|\delta\vec{v}\right| \simeq \left|\vec{v}\right| \left(\gamma - 1\right)$. Für $\left|\vec{v}\right| = 30\,\mathrm{m/s}$ ungefähr auf $\pm 1.5 \times 10^{-14}\,\mathrm{m/s}$ genau

- K10.1: Kugel auf Billardtisch vs. großräumige atmosphärische Strömung

- K10.2: Korrekt sind die Punkte (1) und (2)

Nachwort

Die Folien versuchen eine Einführung in die Physik aus der Perspektive des 20. Jahrhunderts zu geben. Physiker erstellen Modelle der natürlichen Welt, die auf einer kleinen Anzahl grundlegender physikalischer Prinzipien und auf einem Verständnis der mikroskopischen Struktur der Materie beruhen, und sie wenden diese Modelle an, um ein sehr breites Spektrum physikalischer Phänomene zu erklären und vorherzusagen.

Abfolge und Inhalt dieser Folien lehnen sich ganz eng an das Buch *Matter and Interactions* von Ruth W. Chabay und Bruce E. Sherwood an (4. Auflage, November 2017, 1040 Seiten, eText, Wiley & Sons Ltd, ISBN: 978-1-119-02908-3). Abbildungen, soweit nicht anders erwähnt, entstammen ebenfalls diesem Buch.

Ende

Folien zusammengestellt von Günther Lang

Es folgt: Teil 2 - Das Prinzip Impuls