3
KINEMATIK

IN DIESEM KAPITEL GEHT ES UM

Geschwindigkeit	Rotation	Translation
Beschleunigung	Gleichförmige Bewegung	Bewegungsdiagramme

Fast alle Objekte und Phänomene, mit denen sich die Physik beschäftigt, haben etwas mit **Bewegung** zu tun: Atome, Licht, Schall, Zahnräder, der Mond, Meteore, Galaxien, … Die Bewegungslehre – **die Kinematik** – steht daher am Beginn der naturwissenschaftlichen Forschung und Ausbildung.

Die **Himmelsmechanik** beschäftigt sich mit der Bewegung der Himmelskörper. Sie ist das älteste Teilgebiet der Physik. Mit ihr hat man sich bereits in der Antike beschäftigt. So war die Beobachtung des Laufs der Sterne am Himmel im alten Ägypten von entscheidender Bedeutung, um die jährliche Nilüberschwemmung vorherzusagen.

3.1 Die Arten der Bewegungen
(types of motion)

Wenn wir komplizierte Bewegungen des Alltags beschreiben wollen, sind Vereinfachungen nötig.

Für eine einfache Beschreibung der Bewegung eines Körpers reduzieren wir seine Gestalt auf einen Punkt (den **Massepunkt**, *mass point*). Das ist fast immer sein **Schwerpunkt**.

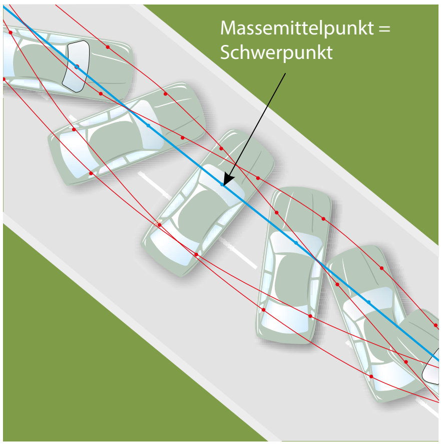


Abb. 58.1 Schleuderspur eines Autos und die Bewegung seines Schwerpunkts. Beachte, welche Bahn er beschreibt.

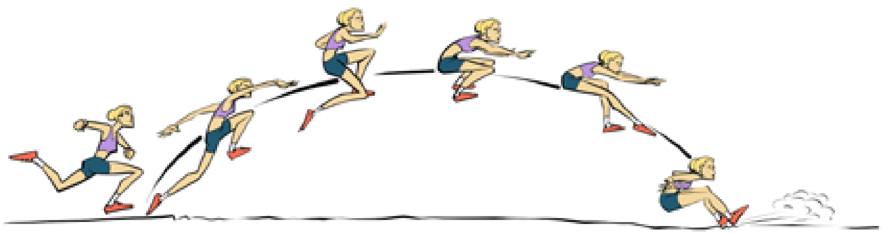
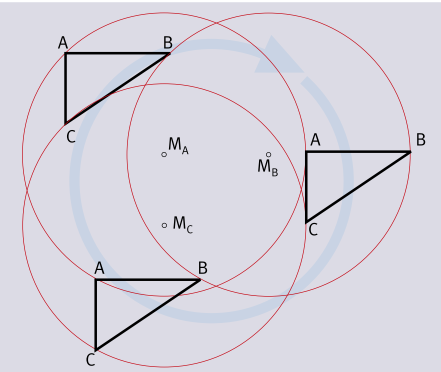
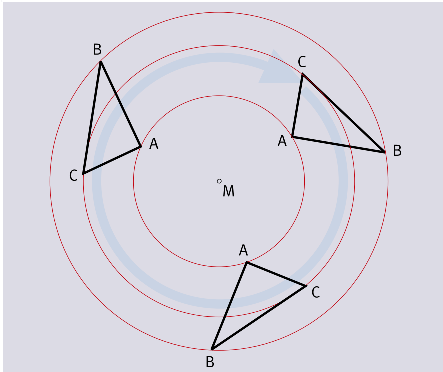


Abb. 58.2 Der Schwerpunkt von Athleten in Sprungbewerben beschreibt eine Parabel. Die Bewegung der Arme und Beine beeinflusst diese Bahn nicht.

Auch gehen wir fürs erste davon aus, dass der Körper fest ist. Komplizierte Bewegungen können auf zwei Arten aufgeteilt werden:

<table>
<tr><th colspan="2">Man unterscheidet zwei Arten von Bewegungen:</th></tr>
<tr><td>Translation
translational motion</td><td>Rotation
rotational motion</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Abb. 58.3
■ Alle Punkte bewegen sich auf kongruenten Bahnen.
■ Die Orientierung des Körpers ändert sich nicht.
■ Die Bahnen der Punkte des Körpers sind gleich lang.
Beispiele: Kabinen des Riesenrads, Personen auf einer Rolltreppe</td><td>Abb. 58.4
■ Alle Punkte bewegen sich auf konzentrischen Kreisen.
■ Die Orientierung des Körpers ändert sich.
■ Die Länge der Bahn eines Punktes des Körpers hängt von dessen Abstand von der Drehachse ab.
Beispiele: durch eine Kurve fahrendes Fahrzeug, Zeiger einer Uhr</td></tr>
</table>

3.2 Translation

3.2.1 Die Geschwindigkeit *(velocity)*

Blitzschnell oder im Schneckentempo?

Um die Schnelligkeit einer Bewegung zu beschreiben, sind Ausdrücke wie „Schneckentempo“ recht nett, die Sprache der Physik ist aber die Mathematik. Die **Geschwindigkeit** wird mathematisch als Quotient aus zurückgelegter Wegdifferenz Δs durch die dazu benötigte Zeitdifferenz Δt definiert:

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad [v] = \frac{m}{s}$$

Während der Zeitdifferenz $t_2 - t_1$ könnte sich die Geschwindigkeit ändern. Daher wird mit der Formel die mittlere Geschwindigkeit definiert.

Die SI-Einheit der Geschwindigkeit ist m/s (Meter pro Sekunde), doch im täglichen Gebrauch benutzt man „Kilometer pro Stunde“.

Wie man leicht zeigen kann, gilt die Umrechnung: **1 m/s = 3,6 km/h**

Abb. 59.1 Der Roboter *Perseverance* – das teuerste Fahrzeug der Welt – kriecht im Schneckentempo über die Marsoberfläche. Er legt maximal 3 Meter pro Minute zurück.

BEISPIEL 3.A

Wettlaufen

Zwei Sportler A und B wollen entscheiden, wer von ihnen der schnellere ist. A läuft 60 m in 10 s, B 200 m in einer halben Minute. Bestimme rechnerisch:
Wer ist schneller? Die Geschwindigkeit ist auch in km/h anzugeben.

Die Daten werden in SI-Einheiten in die Formel für die Geschwindigkeit eingesetzt:

Sportler A:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{60\ m}{10\ s} = 6\ \frac{m}{s} = 6 \cdot 3{,}6\ km/h = 21{,}6\ \frac{km}{h}$$

Sportler B:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{200\ m}{30\ s} = 6{,}7\ \frac{m}{s} = 6{,}7 \cdot 3{,}6\ km/h = 24\ \frac{km}{h}$$

B ist schneller!

Beispiele von Geschwindigkeiten	
Beispiel	**v in m/s**
Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	$3 \cdot 10^8$
Lichtgeschwindigkeit in Glas	$2 \cdot 10^8$
Geschwindigkeit der Erde um die Sonne	$3 \cdot 10^4$
Schallgeschwindigkeit in Luft	$3 \cdot 10^2$
Reizleitung in Nervenfasern	10^2
Gehgeschwindigkeit	1
Wachstumsgeschwindigkeit eines menschlichen Haares	$3 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 59.1

Mittlere Geschwindigkeit *(average speed)*

Wie **Beispiel 3.A** zeigt, wird die Beschleunigungs- und Bremsphase einer Bewegung nicht immer berücksichtigt. Auch die Erdbewegung um die Sonne wird oft als gleichförmig angenommen. Wegen der einfacheren Rechnung nimmt man solche Vernachlässigungen gerne in Kauf.

Die einfache Formel $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ gibt eine **mittlere Geschwindigkeit** an. Diese wird häufig auch als **Durchschnittsgeschwindigkeit** bezeichnet.

Momentangeschwindigkeit *(instantaneous velocity)*

Um die augenblickliche Geschwindigkeit zu bestimmen, muss Δt möglichst klein sein. Je kleiner man Δt wählt, umso eher entspricht der Wert der Momentangeschwindigkeit[1]. Mehr darüber auch auf Seite 65.

MERK & WÜRDIG

- Definition der (mittleren) **Geschwindigkeit v**:

  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad [v] = \frac{m}{s}$

  Umrechnung: 1 m/s = 3,6 km/h

  s … Weg, $[s] = m$
  t … Zeit, $[t] = s$
  $v(t)$ … Geschwindigkeit, $[v] = m/s$

[1] Der mathematische Hintergrund ist Gegenstand der Mathematik in höheren Klassen.

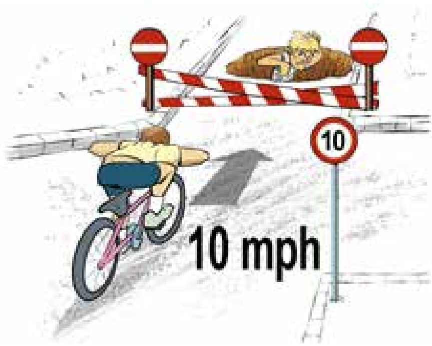


Abb. 60.1 *„The speed is right but the velocity is wrong." (mph = miles per hour)* [1)]

Geschwindigkeit als Vektor $\vec{v}$ – „Hauptsache schnell! Egal wohin?"

Für vektorielle Größen kann man **Richtung** und **Orientierung** angeben. Die Geschwindigkeit $\vec{v}$ ist daher ein anschauliches Beispiel für eine **vektorielle Größe**[2)].

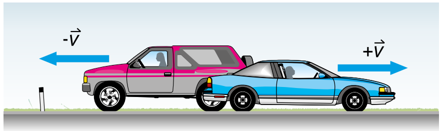


Abb. 60.2 Bei der Geschwindigkeit kommt es auch auf die Orientierung an!

ÜBUNGEN

Abb. 60.3 zu **Ü 3.2**

Abb. 60.4 zu **Ü 3.3**

Wenn du diese Übungen bearbeitest, testest du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema mittlere Geschwindigkeit.

Ü 3.1

Fahrrad. Renate legt mit dem Rad 18 *km* zu ihrer Freundin in 1 Stunde und 15 Minuten zurück. Bestimme rechnerisch, mit welcher Geschwindigkeit sie fährt.

Ü 3.2

Mond. Man weiß, dass der Mond durchschnittlich 384 000 *km* von der Erde entfernt ist. Die NASA hat während ihres Apollo-Programms einen Spiegel auf dem Mond platziert.
Man schickt einen Laserstrahl auf diesen Spiegel.
Bestimme rechnerisch, wie lange es dauert, bis der Laserstrahl wieder auf der Erde empfangen wird. Nutze für deine Berechnung **Tabelle 59.1**.

Ü 3.3

Voyager 1. Am 5. September 1977 starteten die USA die Raumsonde Voyager 1. Sie hat seither etwa 21 574 000 000 *km* zurückgelegt.

a) Berechne näherungsweise die mittlere Geschwindigkeit der Sonde.
Tipp: Aufgrund des Alltagsbezugs in der Angabe ist es bei diesem Beispiel ausnahmsweise sinnvoller, in *km/h* zu rechnen

b) Wo befindet sich die Sonde derzeit? Informiere dich im Internet!

Beispiele für Beschleunigungen	
Beispiel	**a in m/s^2**
Fallbeschleunigung auf der Sonne	273
Fallbeschleunigung auf dem Jupiter	26
Fallbeschleunigung auf der Erde, g	$g \sim 10$
Bremsverzögerung eines Autos	bis 4
Fallbeschleunigung auf dem Mond	$1{,}6 \sim \frac{g}{6}$

Tabelle 60.1

3.2.2 Die Beschleunigung *(acceleration)*

„If you become winded, slow down. If you become restless, speed up!"

Die Beschleunigung a ist ein Maß dafür, wie sich eine Geschwindigkeit im Lauf der Zeit ändert. Analog zur Definition der Geschwindigkeit schreibt man für die **(mittlere) Beschleunigung a**:

$$\boldsymbol{a} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta \boldsymbol{t}} \qquad [a] = \frac{\frac{m}{s}}{s} = \frac{m}{s^2} = m \cdot s^{-2}$$

In Worten: Die (mittlere) Beschleunigung a ist als **Geschwindigkeitsänderung pro verstrichener Zeit** definiert.

Verringert sich die Geschwindigkeit, dann spricht man von negativer Beschleunigung oder **Verzögerung**.

[1)] In der englischen Sprache wird unterschieden: Geschwindigkeit als Betrag *(speed)* und Geschwindigkeit als Vektor *(velocity)*.
[2)] Um die Formelschreibweise leichter lesbar zu machen, wird in dieser Buchreihe die vektorielle Schreibweise nur dann verwendet, wenn die Richtung der Größe eine Rolle spielt.

Beschleunigung als Vektor $\vec{a}$

Unter einer **Geschwindigkeitsänderung** (= Beschleunigung) versteht man entweder

- eine Änderung des Betrages der Geschwindigkeit,
- eine Änderung der Bewegungsrichtung oder
- eine Änderung beider Größen.

Die Beschleunigung $\vec{a}$ ist so wie die Geschwindigkeit eine **vektorielle Größe** (**Abb. 61.1**).

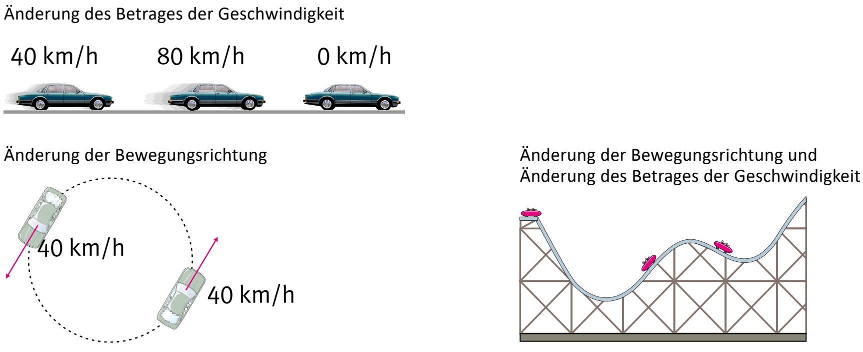


Abb. 61.1

MERK & WÜRDIG

- **Beschleunigung a**

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad [a] = \frac{m}{s^2} = m \cdot s^{-2}$$

s … Weg, $[s] = m$
t … Zeit, $[t] = s$
$v(t)$ … Geschwindigkeit, $[v] = m/s$

BEISPIEL 3.B

Wer beschleunigt besser?

Eine trainierte Radfahrerin startet bei einer Kreuzung bei Grün und erreicht nach 3 s eine Geschwindigkeit von 25 km/h. Laut Pkw-Werbung soll ein Auto in 12,5 s von 0 auf 100 km/h beschleunigen. Wer beschleunigt besser? Die Frage ist rechnerisch zu beantworten.

Radfahrerin:

$v = 25\ km/h = \frac{25}{3{,}6}\ m/s$

$a = \frac{v}{t} \Rightarrow \frac{25\ m/s}{3{,}6 \cdot 3\ s} = 2{,}31\ m/s^2$

$\boldsymbol{a = 2{,}3\ m/s^2}$

Die Radfahrerin beschleunigt besser.

Pkw:

$v = 100\ km/h = \frac{100}{3{,}6}\ m/s$

$a = \frac{v}{t} \Rightarrow \frac{100\ m/s}{3{,}6 \cdot 12{,}5\ s} = 2{,}2\ m/s^2$

$\boldsymbol{a = 2{,}2\ m/s^2}$


Abb. 61.2

ÜBUNGEN

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema Beschleunigung.

Ü 3.4

„VW-Käfer“. Eine älteres Auto beschleunigt von 0 auf 100 km/h (gleichmäßig) in 15 s. Berechne die mittlere Beschleunigung.

Ü 3.5

Das Flughafenlöschfahrzeug FLF12.000 4 × 4 erreicht trotz seiner 32 t Gesamtgewicht in 29 s eine Geschwindigkeit von 80 km/h. Berechne die Beschleunigung.

Ü 3.6

Beurteile die Aussagen und kreuze die richtige Antwort an. Begründe deine Wahl.

a) Eine Bewegung ist beschleunigt, wenn …
- ☐ sich der Betrag oder die Richtung der Geschwindigkeit ändert.
- ☐ sich weder der Betrag noch die Richtung der Geschwindigkeit ändert.
- ☐ sich die Geschwindigkeit nicht ändert.

b) Die Beschleunigung ist …
- ☐ die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit.
- ☐ die Änderung der zurückgelegten Strecke pro Sekunde.
- ☐ – egal welche gleichförmige Bewegung – immer null.


Abb. 61.3 zu Ü 3.5

3.2.3 Die gleichförmige Translation *(uniform translation)*

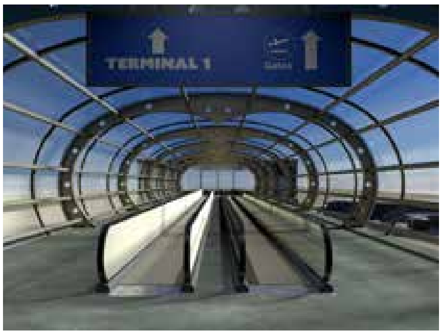


Abb. 62.1 Beispiel für gleichförmige Bewegung

Arrival oder *Departure* – am Flughafen findet man schöne Beispiele für gleichförmige geradlinige Bewegungen: die Bewegung des Koffers auf dem Förderband oder die Bewegung einer stehenden Person auf einer Rolltreppe.

Die Bewegung eines Körpers ist genau dann gleichförmig, wenn der Körper in gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt.

Abb. 62.2 **Gleichförmige Bewegung:** Das Fahrzeug legt in gleichen Zeiten gleiche Wege zurück.

Bei der **gleichförmigen geradlinigen Bewegung** bleibt die Geschwindigkeit v im Betrachtungszeitraum konstant, kurz: $\boldsymbol{v = \text{const.}}$

Die Bewegung ist nicht beschleunigt: $\boldsymbol{a = 0}$.

Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung

Bei einer gleichförmigen Bewegung ist der zurückgelegte Weg s direkt proportional zur (konstanten) Geschwindigkeit v.

Das Weg-Zeit-Gesetz ist daher linear: $\boldsymbol{s(t) = v \cdot t}$

MERK & WÜRDIG

- **Gleichförmige Bewegung:**
  Der Körper legt in gleichen Zeiten gleiche Wege zurück.
  $\boldsymbol{v = \text{const}; \quad a = 0}$
- **Weg-Zeit-Gesetz** der Gleichförmigen Bewegung:
  $\boldsymbol{s(t) = v \cdot t}$

  $s(t)$ … zurückgelegter Weg
  t … dafür benötigte Zeit

BEISPIEL 3.C

Sekundenschlaf

Vor Übermüdung im Straßenverkehr wird oft gewarnt. Bei Unfällen ist immer wieder von Sekundenschlaf als Ursache zu lesen.
Berechne die Wegstrecke, die ein Autofahrer während einer Sekunde bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h zurücklegt.

$v = 100\ km/h = \frac{100}{3{,}6}\ m/s$

$t = 1\ s$

$s = v \cdot t \Rightarrow s = \frac{100\ m}{3{,}6\ s} \cdot 1\ s = \mathbf{27{,}77\ m}$

$\boldsymbol{s = 28\ m}$

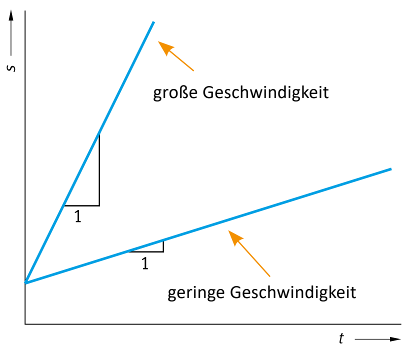


Abb. 62.3 s-t-Diagramme zweier gleichförmiger bewegter Körper mit unterschiedlicher Geschwindigkeit.

Weg-Zeit-Diagramm (s-t-Diagramm)

In der Kinematik ist es üblich, die Zeitachse nach rechts als Abszisse zu wählen.

Zeichnet man Punkt für Punkt das Diagramm der Weg-Zeit-Funktion $s(t) = v \cdot t$, dann merkt man bald, dass die Punkte auf einer Geraden liegen. Man spricht von einem linearen Zusammenhang zwischen Weg und Zeit.

Achtung:
Die Gerade in s-t-Diagrammen entspricht nicht der Bahnform der Körperbewegung!

Die **Steigung** (*slope*) der Geraden ist ein Maß für den Betrag der Geschwindigkeit: Je schneller – desto steiler (**Abb. 62.3**).

Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm (*v-t*-Diagramm)

Im *v-t*-Diagramm wird gezeigt, dass sich der zurückgelegte Weg auch als Flächeninhalt unterhalb des Graphen darstellen lässt. Diese Tatsache gilt allgemein und hat ein breites Anwendungsspektrum.

In **Abb. 63.1** veranschaulicht das *v-t*-Diagramm die Bewegung eines Körpers A, der sich vorwärts bewegt, und eines Körpers B, der sich rückwärts bewegt.

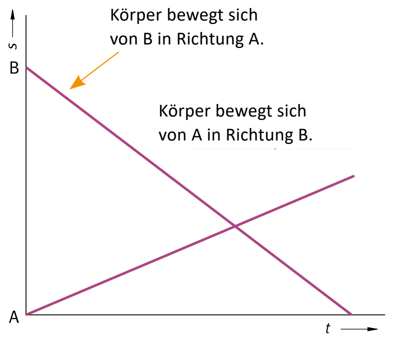


Abb. 63.1 *s-t*-Diagramme zweier gleichförmiger Bewegungen mit unterschiedlicher Orientierung

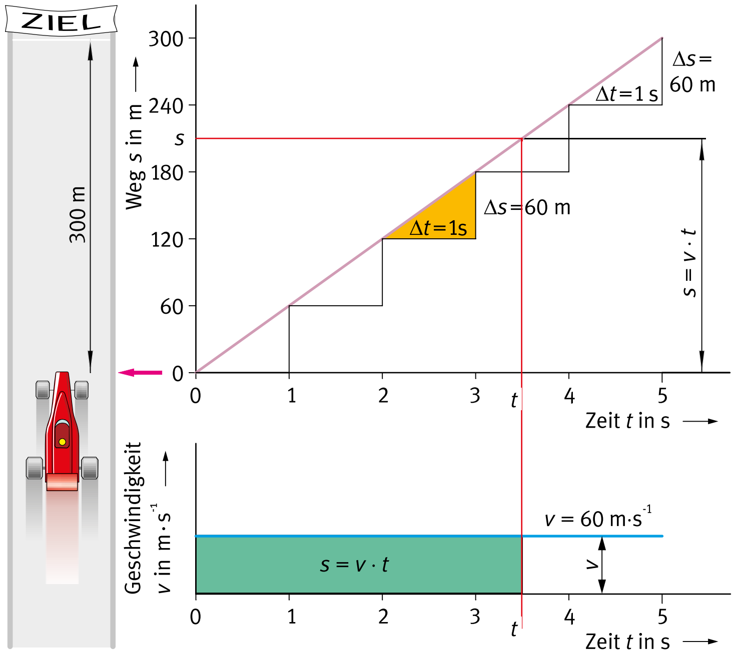


Abb. 63.2 Diagramme der Bewegung eines Rennautos, das mit konstanter Geschwindigkeit ($v = 60\ m/s$) die letzten 300 *m* auf der Zielgeraden zurücklegt.

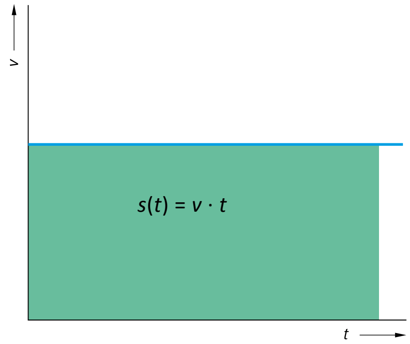


Abb. 63.3 *v-t*-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung

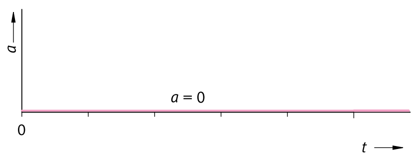


Abb. 63.4 Das *a-t*-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung ist erstaunlich simpel.

MERK & WÜRDIG

v-t-Diagramme

- Im *v-t*-Diagramm kann man den Flächeninhalt unter dem Graphen als zurückgelegten Weg interpretieren.
- Für die gleichförmige Bewegung ist der Weg wegen $v = \text{const}$ besonders leicht als Rechtecksfläche berechenbar.

BEISPIEL 3.D

Diagramme der gleichförmigen Bewegung

Birgit ist mit dem Fahrrad unterwegs. Sie fährt eine Strecke von 60 *km* mit einer mittleren Geschwindigkeit von 30 *km/h*. Bei der Rückfahrt hat sie Gegenwind und erreicht nur mehr eine mittlere Geschwindigkeit von 15 *km/h*.
Zeichne das *s-t*-Diagramm und das *v-t*-Diagramm. Aufgrund des Alltagsbezuges ist es bei diesem Beispiel sinnvoll, auf SI-Einheiten zu verzichten.

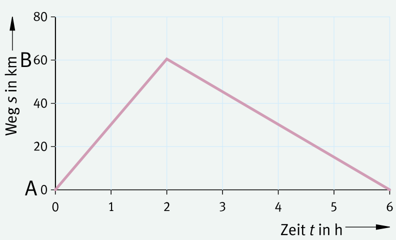


Abb. 63.5

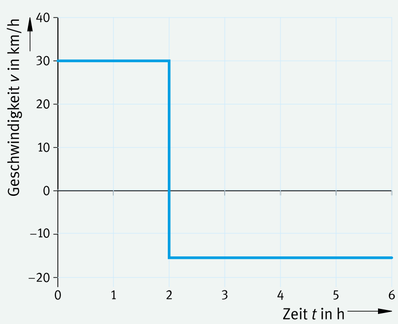


Abb. 63.6

BEISPIEL 3.E

Abb. 64.1 Rohrpostsystem

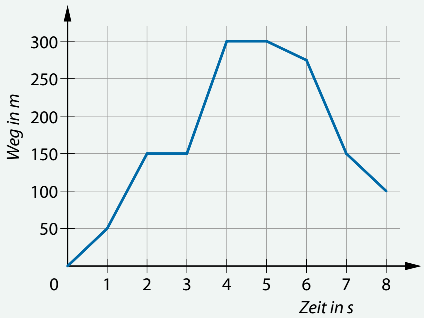


Abb. 64.2 *s-t*-Diagramm einer Rohrpostbüchse

Rohrpost

Das Kaiser-Franz-Josef-Spital in Wien ist mit einem modernen Rohrpostsystem ausgestattet. In **Abb. 64.2** ist das *s-t*-Diagramm für 8 *s* einer Rohrpostbüchse abgebildet.

a) Es ist die Bewegung im Verlauf der ersten und letzten Sekunde zu interpretieren.

b) Es ist die Geschwindigkeit im Verlauf der fünften Sekunde rechnerisch abzuschätzen (in *km/h*).

c) Es ist die mittlere Geschwindigkeit im Zeitintervall [2 *s*; 5 *s*] zu berechnen.

a) In der ersten Sekunde bewegt sich die Rohrpostbüchse gleichförmig mit mittlerer Geschwindigkeit vorwärts.
In der letzten Sekunde bewegt sich die Büchse gleichförmig mit mittlerer Geschwindigkeit rückwärts.

b) Aus dem Diagramm entnimmt man, dass innerhalb der fünften Sekunde ein Weg von etwa 25 m zurückgelegt wurde.
Mit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{25\ m}{1\ s}$ ergibt sich eine geschätzte Geschwindigkeit von 25 *m/s* oder 90 *km/h*.

c) Im Intervall wurde im Verlauf von 3 *s* ein Weg von etwa 150 *m* zurückgelegt. Damit ergibt sich:
$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{150\ m}{3\ s} = 50\ m/s$.
Die mittlere Geschwindigkeit im betrachteten Intervall beträgt 180 km/h.

ÜBUNGEN

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema Beschleunigung.

Ü 3.7

Beurteile die Aussagen und kreuze an, ob du zustimmst oder nicht. Begründe deine Antworten.	JA	NEIN
a) Der Graph des *v-t*-Diagramms der gleichförmigen Bewegung ist eine Gerade.	☐	☐
b) Eine gleichförmige Bewegung ist gekennzeichnet durch konstante Beschleunigung.	☐	☐
c) Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 180 *km/h* rechnet man nicht „gleichförmig“.	☐	☐
d) Eine negative Geschwindigkeit ist bei der gleichförmigen Bewegung verboten.	☐	☐
e) Der Zahlenwert der Geschwindigkeit in *km/h* ist kleiner als in *m/s*.	☐	☐
f) Unter dem Graphen im *v-t*-Diagramm findet man den zurückgelegten Weg.	☐	☐
g) Je steiler die Gerade im Weg-Zeit-Diagramm ist, desto schneller bewegt sich das Objekt.	☐	☐

Ü 3.8

Diagramm. Beschreibe möglichst genau die Bewegung der Fahrzeuge 1 bis 5 in **Abb. 64.3**. Was kann man über den Beginn der jeweiligen Bewegung in Bezug auf Zeit und Ort aussagen?

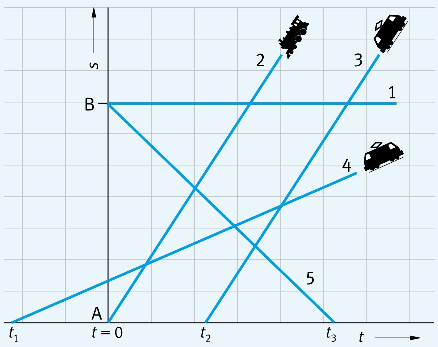


Abb. 64.3 zu **Ü 3.8**

Ü 3.9

Abb. 64.2 zeigt das *s-t*-Diagramm einer Rohrpostbüchse.

a) Erkläre die Bewegung der Büchse im Intervall [3 s; 6 s] hinsichtlich der Art der Bewegung.

b) Berechne: Mit welchen Geschwindigkeiten bewegt sich der Körper in der ersten und in der letzten Sekunde?

c) Berechne: Mit welcher mittleren Geschwindigkeit bewegt sich der Körper in den ersten 5 Sekunden?

Ü 3.10

Badeausflug. Ricardo geht gemütlich eine Strecke von etwa 500 m zum Schwimmteich. Seine mittlere Geschwindigkeit beträgt ca. 4 km/h. Beim Teich angekommen wird er von einem Gewitter überrascht. Er läuft die Strecke schnell nach Hause zurück. Dabei erreicht er eine mittlere Geschwindigkeit von 15 km/h.
Veranschauliche die zusammengesetzte Bewegung mittels s-t-Diagramm und v-t-Diagramm.