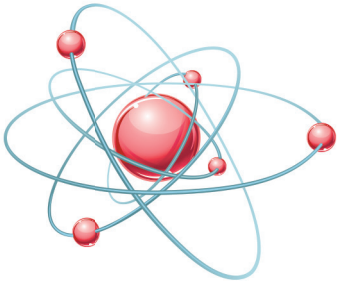
RAINER DOHLUS

PHYSIK

BASISWISSEN FÜR STUDIERENDE TECHNISCHER FACHRICHTUNGEN



NIKOL VERLAG

Vorwort

Physik interessiert Sie zwar sehr, doch nun wächst sie sich zum Krisenfach aus?

Die Prüfung ist nah und das Verständnis fern oder Sie haben gar schon eine Prüfung versiebt?

Und dass man für die Physik soviel Mathematik braucht, hätten Sie auch nicht gedacht . . .

Von der amerikanischen Kiloware Physik fühlen Sie sich erschlagen?

Und in dünneren Physikbüchern, die eher Formelsammlungen gleichen, finden Sie nur einfache Einsetzaufgaben weit unterhalb des Prüfungsniveaus?

Dann versuchen Sie es doch mal mit diesem Lehrbuch.

Es beschäftigt sich ausschließlich mit den mathematiklastigen Kernthemen der klassischen Physik, die praktisch in jedem Physik-Kurs der ersten Studiensemester anwendungsbezogener Studiengänge mit Physik im Haupt- oder Nebenfach behandelt werden. Es folgt dem Grundsatz: Verständnistiefe hat Vorrang vor thematischer Breite. Reines Lernwissen wird gar nicht behandelt.

Dem Buch liegt die Idee zugrunde, dass ausgehend von den Axiomen der Physik nur eine mit einer Herleitung unterlegte Formel wirklich verstanden wird. Nur durch ein Denken in Zusammenhängen wird die in Physikprüfungen häufig beobachtete falsche Anwendung von Formeln bzw. die Benutzung falscher Formeln vermieden. Viele durchgerechnete Beispiele veranschaulichen den Stoff, 124 Übungsaufgaben mit Lösungen dienen der weiteren Stoffvertiefung.

Dieses Buch eignet sich nicht als schnelles Nachschlagewerk und schon gar nicht als Formelsammlung. Es eignet sich auch nicht für die Strategie „Bestehen mit Minimalaufwand“. Sie werden von dem Buch dann profitieren, wenn Sie es von vorne bis hinten oder doch in längeren, zusammenhängenden Passagen durcharbeiten – ja, „arbeiten“ – darum werden Sie nicht herumkommen.

Also gleich an die Arbeit … Ich wünsche Ihnen viel Erfolg!

Mein Dank gilt dem Lektorat Maschinenbau, insbesondere Frau Imke Zander für die gute Zusammenarbeit sowie meinem Lektor Herrn Thomas Zipsner für viele Tipps und Anregungen im Rahmen der Ausgestaltung des Buches sowie für die aufmerksame Durchsicht der Text- und Bilddateien.

Schottenstein, Herbst 2018 Rainer Dohlus

Inhaltsverzeichnis

1 Mechanik 1

1.1 Wie es sich bewegt – egal warum 2

1.1.1 Zwei unmittelbar im Alltag erlebbare Größen: Entfernung und Zeit 2

1.1.2 Wenn es nur geradeaus geht 3

1.1.3 Geschwindigkeiten können addiert werden 5

1.1.4 Eine geradlinige Bewegung – aber ungleichförmig 7

1.1.5 Nicht immer, aber häufig der Fall: Die geradlinige Bewegung mit konstanter Beschleunigung 11

1.1.6 Wenn eine Masse auf Kurvenfahrt geht 15

1.1.7 Beschleunigung ohne Geschwindigkeitsänderung – gibt es sowas? 21

1.1.8 Aufgaben 22

1.2 Warum es sich bewegt 26

1.2.1 Ohne Kraft keine Beschleunigung 26

1.2.2 Wenn sich trotz Kraftwirkung gar nichts tut: das Gleichgewicht . 29

1.2.3 Das zweite Newtonsche Axiom und die Sache mit der Reibung . . 31

1.2.4 Was es noch so für Kräfte gibt 34

1.2.5 Noch einige Bemerkungen zur Trägheit 41

1.3 Einiges bleibt unverändert: die Erhaltungssätze 42

1.3.1 Die gespeicherte Arbeit 42

1.3.2 Da ist noch die Reibung . . . Geht vielleicht doch Energie verloren? 46

1.3.3 Kurz, aber heftig: der Kraftstoß 47

1.3.4 Was es so für Stöße gibt . . . einige Spezialfälle 52

1.3.5 Nun endlich: die exakte Definition des Schwerpunktes 59

1.3.6 Aufgaben 62

1.4 Von fundamentaler Bedeutung in der Physik: der Feldbegriff 65

1.4.1 Zunächst noch ein Wort zur Schwerebeschleunigung 65

1.4.2 Ein schweres Feld mit Potential 66

1.5 Nun geht's rund: Drehbewegungen 70

1.5.1 Wenn der Weg zum Winkel wird: Grundgrößen der Drehbewegung 70

1.5.2 Das Wichtigste: die Drehachse 73

1.5.3 Zentrifugalkraft und Zentripetalkraft oder ist das nicht das Gleiche? . . . 75
1.5.4 Die Sache mit der kinetischen Energie bei der Rotation . . . 77
1.5.5 Und wenn es sich nun doch nicht um eine Schwerpunktsachse dreht . . . 80
1.5.6 Moment mal: was ist die Ursache einer Winkelbeschleunigung? . 83
1.5.7 Wenn es sich nicht bewegen soll: die Probleme mit der Statik . . . 86
1.5.8 Auch ein Sekundenzeiger arbeitet und leistet etwas . . . 89
1.5.9 Etwas bleibt auch bei der Drehung immer erhalten! . . . 92
1.5.10 Eine weitere Scheinkraft: die Corioliskraft . . . 96
1.5.11 Fluch oder Segen: Unwuchten in der Technik . . . 98
1.5.12 Aufgaben . . . 102

2 Thermodynamik . . . 111
2.1 Wenn ein Körper die Form verliert: Einiges über Fluide . . . 111
2.1.1 Die Bewegung des Formlosen: die Strömung . . . 111
2.1.2 Wenn ein Rohr dicht ist, geht nichts verloren . . . 112
2.1.3 Drücke und nichts als Drücke . . . 113
2.1.4 Wenn die Strömung nicht ideal ist . . . 115
2.1.5 Wenn Körper umströmt werden . . . 117
2.2 Warum es kein Perpetuum Mobile zweiter Art gibt . . . 118
2.2.1 Temperatur und Volumen – zwei unzertrennliche Freunde . . . 120
2.2.2 Wie ist das mit dem Energiesatz in der Wärmelehre . . . 124
2.2.3 Keine Zustandsänderung ohne Energieaustausch . . . 131
2.2.4 Nun endlich: die Wirkungsgrade der Wärmekraftmaschinen . . . 137
2.2.5 Wirkungsgrad 100 % – schön wär's . . . 143
2.2.6 Sehr merkwürdig: die Entropie . . . 149
2.2.7 Wenn aus Festkörpern Flüssigkeiten und aus Flüssigkeiten Gase werden . . . 151
2.3 Aufgaben . . . 153

3 Schwingungen und Wellen . . . 159
3.1 Wenn man nach kurzer Zeit wieder am Anfang steht: periodische Bewegung . . . 159
3.1.1 Wann schwingt etwas harmonisch? . . . 159
3.1.2 Schon realistischer: das physikalische Pendel . . . 164
3.1.3 Die Schwingung und der Energiesatz . . . 166
3.1.4 Noch realistischer: Berücksichtigung der Dämpfung . . . 167
3.1.5 Gewollt oder ungewollt: Oszillator mit „fremder" Erregung . . . 172
3.2 Wenn viele Oszillatoren zusammenwirken: Wellen . . . 176
3.2.1 Was man weiß, was man wissen sollte zu Wellenerscheinungen . 176
3.2.2 Die Sache mit dem Energietransport . . . 182

3.2.3 Echos gibt es nicht nur in den Bergen: die Reflexion von Wellen . 186
3.2.4 Gruppen reisen langsamer ... 188
3.2.5 Ein Zugeständnis an die Eigenheiten des menschlichen Gehörs: die Schallpegel 190
3.2.6 50 dB + 50 dB = 100 dB, oder nicht? 192
3.2.7 50 dB + 50 dB kann auch Null ergeben ... Die Interferenz 194
3.2.8 Emittierte Tonhöhe und wahrgenommene Tonhöhe sind unterschiedlich? 196
3.2.9 Wenn die Schallquelle ihren eigenen Schall überholt ... 199
3.3 Aufgaben 200

4 Elektrizität 209
4.1 Die Ladung, das Feld und was daraus folgt 209
4.1.1 Ein Strom von Ladungen ... 209
4.1.2 Was die Elektronen antreibt: die Coulombkraft 211
4.1.3 Zwei etwas abstraktere Größen: elektrisches Feld und Potential . 214
4.1.4 Was den Strom begrenzt: der elektrische Widerstand 218
4.1.5 Ein Netzwerk aus Spannungsquellen und Widerständen 220
4.1.6 Elektrische Ladungen als Quellen und Senken des elektrischen Feldes 223
4.1.7 Ein Speicher für Ladungen: der Plattenkondensator 225
4.1.8 Im elektrischen Feld steckt Energie ... 233
4.1.9 Aufgaben 234
4.2 Der Strom, das Feld und was daraus folgt 238
4.2.1 Der stromführende Draht und was ihn umgibt 238
4.2.2 Wenn der Strom im Kreis herum fließt ... 242
4.2.3 Von der Schwierigkeit, eine Ladung im Magnetfeld zu bewegen ... und was die magnetischen Eigenschaften von Materie damit zu tun haben 244
4.2.4 Wie Strom auch im Großen die Dinge bewegt 249
4.2.5 Kann man Magnetfelder messen? 252
4.2.6 Einen Fluss gibt's auch beim Magnetfeld 254
4.2.7 Aufgaben 256
4.3 Was zeitliche Änderungen der Felder bewirken 259
4.3.1 Wie man außer mit Batterien noch Strom machen kann ... 259
4.3.2 Effizienter als einphasiger Wechselstrom: Drehstrom 267
4.3.3 Wie eine Spule beim Einschalten ihren eigenen Strom begrenzt . 271
4.3.4 Auch im Magnetfeld steckt Energie ... 274
4.3.5 Wenn Strom und Spannung nicht mehr synchron sind: Kapazitäten und Induktivitäten in der Wechselstromtechnik 276
4.3.6 Was leistet eigentlich ein Wechselstromkreis? 281
4.3.7 Widerstände können komplex sein 284

4.3.8 Viel Wirbel bei den Feldern: elektromagnetische Wellen 286
4.3.9 Die Welle und ihre Energie 292
4.3.10 Aufgaben 293

5 Optik 299
5.1 Von der Welle zum Strahl 300
5.1.1 Spieglein, Spieglein an der Wand 302
5.1.2 Licht lässt sich brechen 307
5.1.3 Gebrochenes Licht – und trotzdem schöne Bilder 311
5.1.4 Geräte, die die Grenzen menschlichen Sehens erweitern 318
5.1.5 Auch Linsen können dick werden 325
5.2 . . . und nun doch wieder zurück zur Welle 327
5.2.1 Licht + Licht = Dunkelheit? 327
5.2.2 Wenn das Licht um die Ecke biegt 333
5.2.3 Könnte man mit einem Lichtmikroskop auch Atome sehen? 336
5.2.4 Ein Gitter, um Licht zu zerlegen 339
5.2.5 Licht kann auch einen Drehsinn haben 341
5.3 Aufgaben 343

6 Lösungen 351
6.1 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 1.1 (Kinematik) 351
6.2 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 1.2 bis 1.3 (Kräfte, Energie, Impuls) 356
6.3 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 1.5 (Drehbewegungen) 362
6.4 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 2.1 bis 2.2 (Thermodynamik) 375
6.5 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 3.1 bis 3.2 (Schwingungen und Wellen) 382
6.6 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 4.1 (Elektrische Felder) 393
6.7 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 4.2 (Magnetische Felder) 399
6.8 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 4.3 (Zeitabhängige Felder) 404
6.9 Lösungen zu den Aufgaben Abschn. 5.1 bis 5.2 (Optik) 410

Sachverzeichnis 421

Mechanik

1

Spricht man von Mechanik, so denkt man unweigerlich an Maschinen, Motoren, Getriebe und Roboter. In der Physik wird der Begriff etwas weiter gefasst. Hier gibt es auch eine Mechanik der deformierbaren Medien, also z. B. der Flüssigkeiten. Hierzu später mehr. Vorläufig wollen wir uns zum Einstieg in die Physik auf die **Mechanik starrer Körper** konzentrieren. In Abb. 1.1 werden Pakete auf ein Förderband gelegt, werden durch ei-

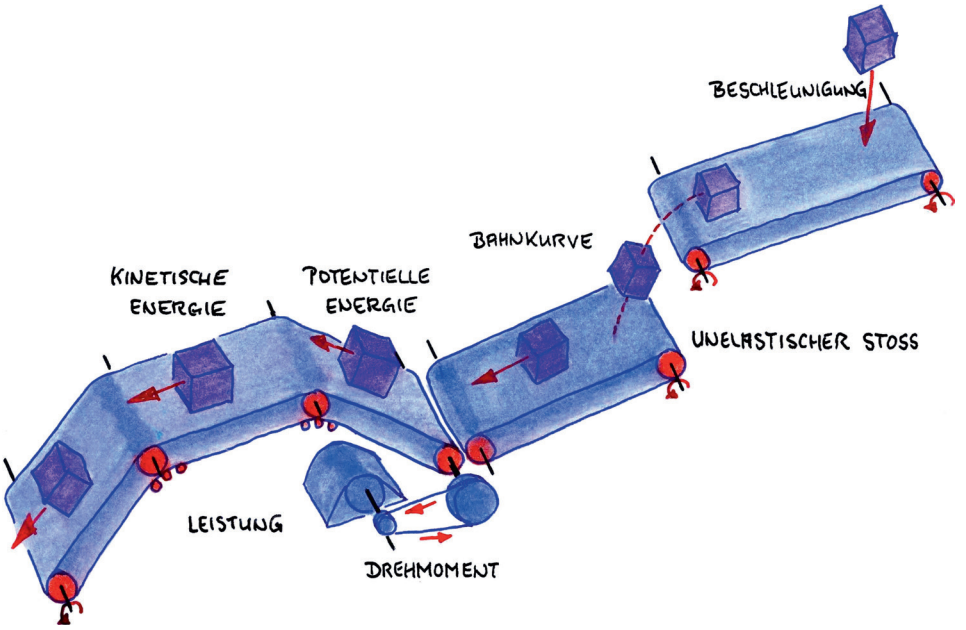


Abb. 1.1 Um die Bewegung der Pakete auf dem Fließband zu beschreiben, führt die Physik Größen wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Energie, Impuls, Drehimpuls, Drehmoment etc. ein

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

R. Dohlus, *Physik*, https://doi.org/10.1007/978-3-658-22779-1_1

ne **Kraftwirkung** in Bewegung gesetzt, erfahren also eine **Beschleunigung**, setzen ihre Bewegung mit konstanter **Geschwindigkeit** fort und fallen schließlich – einer bestimmten **Bahnkurve** folgend – auf ein zweites Band. Hier findet ein **unelastischer Stoß** statt. Werden die Pakete bergauf transportiert, gewinnen sie **potentielle Energie**. Der Motor, der das Band antreibt, leistet **Arbeit** und erbringt auf die Zeit bezogen eine **Leistung**. Beim Antrieb der Rollen wirken **Drehmomente**, die Rollen selbst haben ein **Massenträgheitsmoment** etc. All diese Größen werden wir im Kapitel Mechanik einführen.

1.1 Wie es sich bewegt – egal warum

Wir werden zunächst nur nach dem Verlauf einer Bewegung fragen, nicht nach ihrer Ursache. Die Physik nennt diese Lehre von der Bewegung ohne Ursachenforschung **Kinematik**. Dabei können wir es natürlich langfristig nicht bewenden lassen. Wir werden sehr bald die Ursachen ergründen müssen. Vorläufig jedoch beobachten und beschreiben wir nur. Dazu benötigen wir einen Raum, in dem die Bewegung stattfindet. Wir müssen Entfernungen messen, die zurückgelegt werden und wir müssen Zeiten stoppen, in denen Ortsveränderungen stattfinden.

1.1.1 Zwei unmittelbar im Alltag erlebbare Größen: Entfernung und Zeit

Zu den elementarsten, im Alltag direkt fühlbaren physikalischen Größen zählen wohl der **Raum**, in dem wir leben und die **Zeit**. Die Messung des Rauminhalts oder Volumens kann dabei ebenso wie die Messung von Flächeninhalten stets auf die Messung von **Längen** zurückgeführt werden. Am einfachsten gelingt dies bei Quadern oder Rechtecken. Hier muss man einfach nur Länge, Breite und Höhe bzw. nur Länge und Breite miteinander multiplizieren. Die Bestimmung des Volumens bzw. der Fläche kann also auf drei bzw. zwei Längenmessungen zurückgeführt werden.

Den **Rauminhalt** eines unregelmäßig geformten räumlichen Körpers kann man auf die gleiche Art, nämlich durch Einpassen von Quadern bekannten Volumens, bestimmen. Wählt man die Quader sehr klein, lässt sich damit die Kontur des Körpers beliebig gut annähern und das Volumen sehr genau bestimmen. Der physikalischen Größe der Länge kommt also eine elementare Bedeutung zu. Nach DIN 1304, in der **Formelzeichen physikalischer Größen** standardisiert werden, bekommt die **Länge** das **Formelzeichen** s.

Im Systeme International d'Unités, dem **SI-Einheitensystem**, hat die Länge die **Einheit Meter**:

$$[s] = 1 \text{ Meter} = 1 \text{ m}\,.$$

Die Längeneinheit Meter ist eine von **sieben Basiseinheiten**, die nötig sind, um alle im Formelgebäude der Physik auftretenden Größen darzustellen. Natürlich gibt es mehr als sieben physikalische Größen; die über die sieben **Basisgrößen** hinausgehenden so genannten **abgeleiteten Größen** können durch Multiplikation oder Division aus den Basisgrößen gebildet werden.

Im einfachsten Fall kann man eine physikalische Einheit einfach durch eine materielle Maßverkörperung darstellen. Bei der Längeneinheit war das lange Zeit der Fall; es gab ein Urmeter, das als Längenstandard diente. Das ist aber leichtsinnig, denn geht der Eichkörper verloren, ist auch die Einheit nicht mehr definiert. Man ist daher bemüht, die Basiseinheiten von universellen Größen abzuleiten. Beim Meter wird hierzu die **Vakuumlichtgeschwindigkeit** bemüht.

► **Definition der Basiseinheit Meter:** Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299.792.458 Sekunden durchläuft.

Somit sind wir bereits bei der zweiten Basiseinheit, nämlich der **Sekunde** angelangt. Die **Zeit** ist die zweite Basisgröße im SI-Einheitensystem; ihr **Formelzeichen** ist t. Die Einheit Meter hängt also von der Einheit Sekunde ab: das Licht legt in einer Sekunde den Weg von 299.792.458 m zurück.

► **Die Sekunde ist als Basiseinheit wie folgt definiert:** Die Sekunde ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.

Hierzu ist zu sagen, dass ein Atom die Energiedifferenz zwischen zwei Zuständen in Form von elektromagnetischer Strahlung abgeben kann. Diese Strahlung hat eine bestimmte Frequenz und damit auch eine Periodendauer. Sie wird hier zur Festlegung der Zeiteinheit verwendet.

1.1.2 Wenn es nur geradeaus geht …

Mit den zwei Größen Länge und Zeit sind wir in der Lage, die einfache, geradlinige und gleichförmige Bewegung eines Pakets auf dem Förderband zu beschreiben. Der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der dafür aufgewendeten Zeit wird **Geschwindigkeit** v genannt:

$$v = \frac{s}{t}\,. \tag{1.1}$$

Die Geschwindigkeit hat also die **Einheit m/s**. Es wird hier davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit während der Zeitdauer t konstant ist.

Beispiel

Bewegt sich ein Paket auf dem Förderband eine Strecke von 5 m und braucht dafür 2 s, dann errechnen wir die Geschwindigkeit

$$v = \frac{5\,\mathrm{m}}{2} = 2{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 2{,}5 \cdot \frac{0{,}001\,\mathrm{km}}{(1/3600)\,\mathrm{h}} = 2{,}5 \cdot 3{,}6\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} = 9\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}\,. \tag{1.2}$$

Die Einheit [km/h] ist zwar weit verbreitet, ist aber keine SI-Einheit.

Gl. 1.2 gibt den Betrag der Geschwindigkeit an. Für eine exakte physikalische Beschreibung des Vorgangs ist aber auch die **Richtung der Bewegung** von Bedeutung. Nun wird man im Falle des Förderbandes einwenden, dass die Richtung durch das Band selbst vorgegeben ist. Das ist richtig, trotzdem möchte man – unter anderem auch wegen weiterer auftretender Fragestellungen wie z. B. der Addition von Geschwindigkeiten – die Bewegung in einem frei gewählten Bezugssystem angeben. Das lässt sich durch die aus der Mathematik bekannten **Vektoren** bewerkstelligen. Als Bezugssystem verwendet man in der Physik üblicherweise ein **kartesisches Koordinatensystem**, das im Falle des Förderbandes durch die Schnittkanten der Wand- und Bodenflächen der Halle gebildet werden könnte, in der das Band steht (Abb. 1.2).

Natürlich ist die Wahl des Koordinatensystems willkürlich und wird der Zweckmäßigkeit unterworfen. So könnten wir natürlich die x-Achse des Systems längs des Förderbandes legen. In diesem Fall wäre die Bewegung eindimensional und man bräuchte eigentlich

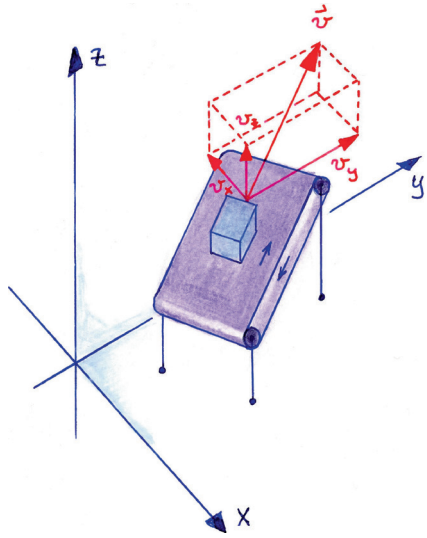


Abb. 1.2 Ein Paket bewegt sich auf einem Förderband mit der Geschwindigkeit v durch den Raum. Die Bewegung kann durch den Vektor $\vec{v}$ dargestellt werden. Ein mögliches Koordinatensystem wird durch die Kanten des Raumes gebildet, in dem sich das Band befindet

gar kein Koordinatensystem. So sind wir oben verfahren. Man könnte auch das Zweiteinfachste tun: man legt das Koordinatensystem so, dass die Bewegung des Paketes in der xy-Ebene stattfindet. Es genügen dann zwei Koordinaten. Im allgemeinsten Fall wird die Bewegung im Dreidimensionalen beschrieben (Abb. 1.2). Man benötigt dann drei Koordinaten. Man sieht also, von der Wahl des Koordinatensystems hängt es ab, ob ein Problem einfach oder kompliziert beschrieben wird. Natürlich darf das Endergebnis nicht von der Wahl des Koordinatensystems abhängen.

Haben wir also ein Koordinatensystem festgelegt, kann die Geschwindigkeit unseres Paketes im Raum durch einen Vektor bestehend aus drei Komponenten beschrieben werden:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} . \tag{1.3}$$

Da die Komponenten v_x, v_y und v_z senkrecht aufeinander stehen, gilt der Satz des Pythagoras in drei Dimensionen:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 ,$$

so dass wir für den **Betrag des Vektors** erhalten:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} . \tag{1.4}$$

Im Fall des Förderbandes könnte beispielsweise $v_x = -1{,}5\,\mathrm{m/s}$, $v_y = 3\,\mathrm{m/s}$ und $v_z = 1\,\mathrm{m/s}$ sein, der Betrag wäre dann $v = 3{,}5\,\mathrm{m/s}$.

1.1.3 Geschwindigkeiten können addiert werden

Geschwindigkeiten können addiert werden. Bei der gleichförmig geradlinigen Bewegung ist das besonders einfach und über eine **Vektoraddition** realisierbar.

Beispiel

Eine Fähre überquert (Abb. 1.3) eine Meerenge, in der eine Meeresströmung herrscht. Angenommen, die Fähre hätte eine relative Geschwindigkeit $\vec{v}_\mathrm{F}$ zum Wasser und das Wasser wiederum hätte eine Geschwindigkeit $\vec{v}_\mathrm{W}$ relativ zum Ufer:

$$\vec{v}_\mathrm{F} = \begin{pmatrix} -0{,}5 \\ 0{,}3 \end{pmatrix} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} , \qquad \vec{v}_\mathrm{W} = \begin{pmatrix} 0{,}1 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} .$$

Will man die Geschwindigkeit der Fähre bezüglich des Ufers (also bezüglich des ortsfesten Koordinatensystems) wissen, muss man die beiden Geschwindigkeiten addieren:

$$\vec{v} = \vec{v}_\mathrm{F} + \vec{v}_\mathrm{W} = \begin{pmatrix} -0{,}5 \\ 0{,}3 \end{pmatrix} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} + \begin{pmatrix} 0{,}1 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \begin{pmatrix} -0{,}4 \\ 0{,}3 \end{pmatrix} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} .$$