



Leseprobe

Schmidt

Dynamik

PHYSIK

Studienbrief 2-050-0502

4. Auflage 2014



HDL

HOCHSCHULVERBUND DISTANCE LEARNING

Impressum

Verfasser: Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Phys. Joachim **Schmidt**
Professor für Recycling
im Fachbereich Fahrzeug-, Produktions- und Verfahrenstechnik
im Institut für Recycling
an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel

Der Studienbrief wurde auf der Grundlage des Curriculums für das Studienfach „Physik“ verfasst. Die Bestätigung des Curriculums und des Studienbriefes erfolgte durch den

Fachausschuss Wirtschaftsingenieurwesen,

dem Professoren und Dozenten von HDL-Mitglieds- und kooperierenden Hochschulen als Mitglieder angehören.

4. Auflage 2014

ISBN 978-3-86946-188-5

Redaktionsschluss: Februar 2014

Studienbrief 2-050-0502

© 2014 by Service-Agentur des Hochschulverbundes Distance Learning.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung und des Nachdrucks, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung der Service-Agentur des HDL reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Service-Agentur des HDL
(Hochschulverbund Distance Learning)

Leiter: Dr. Reinhard Wulfert

c/o Agentur für wissenschaftliche Weiterbildung und Wissenstransfer e. V.
Magdeburger Straße 50, 14770 Brandenburg

Tel.: 0 33 81 - 35 57 40

E-Mail: kontakt-hdl@aww-brandenburg.de

Fax: 0 33 81 - 35 57 49

Internet: <http://www.aww-brandenburg.de>

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Abkürzungen	5
Physikalische Konstanten	7
Einleitung	9
Literaturempfehlung.....	10
1 Dynamik: Übersicht, Begriffe, Abgrenzungen.....	11
1.1 Übersicht und Grundbegriffe	11
1.2 Schwere und träge Masse, Dichte.....	12
2 Dynamik (Kinetik) von Massenpunkten.....	15
2.1 Newtonsche Axiome	15
2.2 Kräfte und Kraftgesetze.....	18
2.2.1 Gewichtskraft	18
2.2.2 Gravitationskraft.....	19
2.2.3 Elastische Kraft (Federkraft)	21
2.2.4 Trägheitskraft und d'Alembertsches Prinzip	22
2.2.5 Zentrifugal- und Zentripetalkraft	22
2.2.6 Reibungskräfte.....	24
2.3 Aufstellen und Lösen von Bewegungsgleichungen.....	28
3 Arbeit, Leistung, Energie, Erhaltungssätze.....	34
3.1 Arbeit	34
3.1.1 Hubarbeit (Arbeit der Gewichtskraft).....	36
3.1.2 Arbeit im Gravitationsfeld	37
3.1.3 Spannarbeit einer Feder.....	38
3.1.4 Beschleunigungsarbeit.....	39
3.2 Leistung	40
3.3 Mechanische Energie.....	41
3.4 Energieerhaltungssatz und Energieformen.....	43
3.5 Impulserhaltungssatz und Stoßgesetze	48
3.5.1 Impulserhaltungssatz	48
3.5.2 Stoßgesetze.....	50
4 Dynamik (Kinetik) des starren Körpers.....	54
4.1 Grundlagen, Schwerpunkt	54

4.2	Drehbewegungen um eine feste Achse, Drehmoment	58
4.3	Rotationsenergie, Trägheitsmoment.....	60
4.4	Erweiterung des Energieerhaltungssatzes: Drehimpuls, Drehimpulserhaltungssatz	62
4.5	Gleichgewicht am starren Körper (Statik)	65
	Lösungshinweise zu den Übungsaufgaben.....	68
	Literaturverzeichnis	74
	Sachwortverzeichnis	75

Abkürzungen

Physikalische Größe	Formelzeichen	Physikalische Einheit	Einheitenzeichen
Fläche	A		m ²
Beschleunigung	a		m · s ⁻²
Zähigkeitskoeffizient	b		kg · s ⁻¹
Widerstandsbeiwert	c _w		1
Gasreibungskoeffizient	D		kg · m ⁻¹
Energie, allgemein	E	Joule Kilowattstunde Elektronenvolt	J = N · m = kg · m ² · s ⁻² kWh = 3,6 · 10 ⁶ J eV = 1,60219 · 10 ⁻¹⁹ J
Potenzielle Energie	E _{pot}		J
Kinetische Energie	E _{kin} , E _{kin'} , E _{kin'} trans		J
Spannenergie	E _{span}		J
Rotationsenergie	E _{kin, rot} , E _{rot}		J
Frequenz	f, ν	Hertz	Hz = s ⁻¹
Kraft, allgemein	F	Newton	N = kg · m · s ⁻²
Resultierende Kraft	F _{res}		N
Hangabtriebskraft	F _H		N
Normalkraft	F _N		N
Trägheitskraft	F _t		n
Zentripetalkraft	F _{Zp}		N
Zentrifugalkraft (Fliehkraft)	F _{Zf}		N
Elastische Kraft (Federkraft)	F _F		N
Reibungskraft	F _R , R		N
Kraftkomponente in Richtung Weg	F _s		N
Gewichtskraft	G		N
Gravitationsbeschleunigung (Fallbeschleunigung)	g		vgl. Tabelle Phys. Konstanten
Höhe	h		m
Massenträgheitsmoment	J _A , J _S		kg · m ²
Federkonstante	k		N · m ⁻¹
Drehimpuls	L		kg · m ² · s ⁻¹
Länge, Weg	ℓ, s, r	Meter	m
Drehmoment	M		N · m
Masse	m	Kilogramm	kg
Leistung	P	Watt	W = J · s ⁻¹ = kg · m ² · s ⁻³

Physikalische Größe	Formelzeichen	Physikalische Einheit	Einheitenzeichen
Impuls	p		$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \text{N} \cdot \text{s}$
Schwerpunktvektor	$r_{s'}, x_s$		m
Zeit	t	Sekunde	s
Volumen	V		m^3
Geschwindigkeit	v		$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Tangentialgeschwindigkeit	v_{tan}		$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Arbeit, allgemein	W	Joule	$\text{J} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Hubarbeit	W_{hub}		J
Arbeit im Gravitationsfeld	W_{grav}		J
Spannarbeit einer Feder	W_{span}		J
Beschleunigungsarbeit	W_{kin}		J
Rotationsarbeit	W_{rot}		J
Wegkoordinaten	x, y, z		m
Winkelbeschleunigung	a		s^{-2}
Winkel	α, β, φ	Radian Grad	1 °
Gravitationskonstante	γ		vgl. Tabelle Phys. Konstanten
Viskosität	η		$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Reibungszahl	$\mu_{\text{H}}, \mu_{\text{G}}, \mu_{\text{R}}$		1
Dichte	ρ		$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Winkelgeschwindigkeit	ω		s^{-1}

Physikalische Konstanten

Gravitationskonstante	γ	=	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
Normfallbeschleunigung	g	=	$9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Gaskonstante	R	=	$8,314,4 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Avogadro-Konstante	N_A	=	$6,02205 \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$
Loschmidt-Konstante	N_L	=	$2,68675 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Boltzmann-Konstante	k	=	$1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Elektrische Feldkonstante	ϵ_0	=	$8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{A}^2$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	=	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{A}^{-2}$
Elektrische Elementarladung	e	=	$1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Spezifische Ladung des Elektrons	e/m_e	=	$1,758805 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c	=	$2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Faraday-Konstante	F	=	$9,64846 \cdot 10^7 \text{ C} \cdot \text{kmol}^{-1}$
Planck-Konstante	h	=	$6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Ruhmasse des Elektrons	m_e	=	$9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Ruhmasse des Protons	m_p	=	$1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Ruhmasse des Neutrons	m_n	=	$1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Atomare Masseneinheit	m_u	=	$1 \text{ u} = 1,660566 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Erdradius	6.378 km	Sonne – Erde	$1,495 \cdot 10^8 \text{ km}$
Erdmasse	$5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	Sonnenradius	$6,96 \cdot 10^5 \text{ km}$
Fallbeschleunigung		Sonnenmasse	$1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
am Pol	$9,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Erde – Mond	$3,84 \cdot 10^5 \text{ km}$
am Äquator	$9,78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Mondradius	1.738 km
		Mondmasse	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$

Einleitung

Der vorliegende zweite Studienbrief des Physikkurses beschäftigt sich mit der „Dynamik“, in der nach der Ursache von Bewegungen und Bewegungsabläufen gefragt wird.

Fundament der „klassischen“ Dynamik sind die Newtonschen Axiome, die die Eigenschaften von Kräften beschreiben. Basierend auf speziellen Kraftgesetzen können dynamische Gleichgewichte für physikalische Problemstellungen formuliert und daraus die Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Weg-Zeit-Gesetze ermittelt werden.

Eine elegante Methode zur Formulierung und Lösung von physikalischen Aufgabenstellungen in der Mechanik ist der Energieerhaltungssatz, der nach der Einführung der Begriffe „Arbeit“, „Leistung“ und „Energie“ angegeben wird und äquivalent zum dynamischen Gleichgewicht der Kräfte ist. Als weiterer wichtiger Fundamentalsatz der Mechanik wird der Impulserhaltungssatz besprochen, dessen bekanntester Anwendungsbereich die Stoßgesetze von Massenpunkten sind.

An ausgedehnten Massen („Starrer Körper“) treten Drehmomente und damit Rotationsbewegungen auf, zu deren physikalischer Beschreibung die Begriffe „Trägheitsmoment“ und „Drehimpuls“ eingeführt werden.

In diesem Zusammenhang wird als weiterer fundamentaler Erfahrungssatz der Drehimpulserhaltungssatz angegeben.

Es sei darauf hingewiesen, dass die genannten Erhaltungssätze Idealisierungen realer physikalischer Systeme darstellen. Dennoch lassen sich mit ihnen eine Reihe physikalischer Problemstellungen beschreiben und verstehen.

Schließlich werden, basierend auf den Begriffen „Kraft“ und „Drehmoment“, die Bedingungen für das statische Gleichgewicht starrer Körper behandelt.

Zur Vertiefung des Lehrstoffes befinden sich in den einzelnen Abschnitten ausführlich dargestellte Beispiele; das Verständnis des erlernten Stoffes wird – wie auch im ersten Studienbrief – in jedem Kapitel durch Übungsaufgaben abgefragt.

Literaturempfehlung

- DEUS, P./STOLZ, W. (1999): „Physik in Übungsaufgaben“.
Aufgabensammlung mit vielen anwendungsorientierten Beispielen; als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- DIETMAIER, Chr./MÄNDL, M. (2006): „Physik für Wirtschaftsingenieure“.
Übersichtliche Darstellung der Physik für das Ingenieurstudium. Aufgaben mit vollständig durchgerechneten Lösungen; als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- DOBRINSKI, P./KRAKAU, G./VOGEL, A. (2010): „Physik für Ingenieure“.
Standardwerk für das Ingenieurstudium, viele Übungsaufgaben mit Lösungen.
- EICHLER, J. (2011): „Physik – Grundlagen für das Ingenieurstudium“.
Kurze, übersichtliche Darstellung aller Bereiche der Physik, als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- HERING, E./MARTIN, R./STOHRER, M. (2012): „Physik für Ingenieure“.
Anspruchsvolles Buch, übersichtliche Darstellung, für fortgeschrittene Studenten geeignet.
- LINDNER, H. (2010): „Physik für Ingenieure“.
Leicht verständliche Einführung in die Physik mit vielen Anwendungsbeispielen, als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- LINDNER, H. (2013): „Physikalische Aufgaben“.
Aufgabensammlung mit vielen anwendungsorientierten Beispielen, als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- PAUS, H. J. (2007): „Physik in Experimenten und Beispielen“.
Sehr umfangreiches Buch, das sich vorrangig an Physikstudenten oder an Studenten der Ingenieurwissenschaften mit der Neigung zur Physik wendet.
- PFEIFER, H./SCHMIEDEL, H./STANNARIUS, R. (2004):
„Kompaktkurs Physik mit virtuellen Experimenten und Übungsaufgaben“.
Sehr umfangreiches Buch, das sich vorrangig an Studenten der Ingenieurwissenschaften mit Neigung zur Physik wendet.
- SCHULZ, H. J./EICHLER, J./ROSENZWEIG, M./SPRENGEL, D./WETZEL, H. (1996): „Experimentalphysik für Ingenieure“.
Übersichtliche Darstellung der Physik für das Ingenieurstudium, mit Beispielen, als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.

- STOLZ, W. (2013): „Starthilfe Physik“. Kurze, übersichtliche Darstellung der Physik; als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- TURTUR, C. W. (2013): „Prüfungstrainer Physik“. Umfangreiche Aufgabensammlung mit vollständig durchgerechneten Beispielen; als studienbriefbegleitende Literatur zu empfehlen.
- WALCHER, W. (2006): „Praktikum der Physik“. Standardwerk für Laborversuche, mit vielen praktischen Hinweisen.

1 Dynamik: Übersicht, Begriffe, Abgrenzungen

- In diesem Kapitel erhalten Sie einen ersten Überblick über das Gedankengebäude der Dynamik (Kinetik) mit den dort relevanten physikalischen Begriffen und Größen.

Studienziele

1.1 Übersicht und Grundbegriffe

In SCHMIDT (2014) haben wir die Grundlagen der Bewegungslehre (Kinematik) mit den Basisgrößen Weg und Zeit und den daraus abgeleiteten Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung behandelt. Dabei wurde nicht nach der Ursache für die Bewegungsabläufe gefragt. Die Frage nach der Ursache von Bewegungen oder Änderungen von Bewegungen ist Gegenstand der Dynamik. Als Basisgröße zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge wird die Masse m eingeführt. Zusammen mit den bereits definierten Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung lassen daraus u. a. die abgeleiteten Größen Kraft, Impuls, Energie, Arbeit und Leistung herleiten.

Grundlagen des gesamten Gedankengebäudes der klassischen Dynamik sind einerseits die nach dem berühmten Engländer Isaac NEWTON (1643 – 1727) benannten Newtonschen Axiome, die die Gesetzmäßigkeiten für Kräfte und daraus resultierende Bewegungen beschreiben. Andererseits gelten für mechanische Systeme (unter idealisierten Bedingungen) drei **fundamentale Erhaltungssätze**, die als

- **Energieerhaltungssatz**,
- **Impulserhaltungssatz** und
- **Drehimpulserhaltungssatz**

bezeichnet werden.

Mit Hilfe dieser Erhaltungssätze lassen sich – wenn auch häufig idealisiert und vereinfacht – viele physikalische Probleme lösen.

Der Begriff „klassische Dynamik“ soll zum Ausdruck bringen, dass es auch eine „nichtklassische Dynamik“ gibt, die in atomaren Dimensionen allgemein als Quantenmechanik und in kosmischen Dimensionen bzw. für sehr große Ge-

schwindigkeiten als Allgemeine bzw. Spezielle Relativitätstheorie bekannt ist. Diese Theorien haben für allgemeine technische Vorgänge keine praktische Bedeutung.

Dieses wollen wir uns am Beispiel der Speziellen Relativitätstheorie verdeutlichen. Ein von Albert EINSTEIN (1879 – 1955) angegebener Ausdruck für den sogenannten relativistischen Massenzuwachs lautet

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Darin ist m die Masse eines mit der Geschwindigkeit v bewegten Körpers, m_0 seine Ruhemasse und c die Lichtgeschwindigkeit. Die Gleichung sagt aus, dass die Masse m eines Körpers stark anwächst, wenn sich seine Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert (für $v \rightarrow c$ strebt der Nenner gegen Null und der Ausdruck für m gegen unendlich). Für technisch relevante Geschwindigkeiten spielt der Massenzuwachs keine Rolle. Selbst für eine Geschwindigkeit von 50 Mio. km/h beträgt der relativistische Massenzuwachs gerade 0,1 %.

Um verschiedene physikalische Einflüsse separat behandeln zu können, teilt man die klassische Dynamik üblicherweise in die Dynamik von Massenpunkten und die Dynamik des starren Körpers ein. Für den ersten Fall denkt man sich die Masse des Körpers in einem einzigen Punkt vereinigt. Im Falle des starren Körpers liegen ausgedehnte Massen vor, so dass zusätzliche Größen wie Massenträgheitsmomente, Drehimpulse und Rotationsenergien betrachtet werden müssen.

1.2 Schwere und träge Masse, Dichte

Die SI-Masseneinheit 1 kg ($[m] = 1 \text{ kg}$), die heutzutage als ein Eichkörper (Zylinder aus einer Platin-Iridium-Legierung) in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird, wurde ursprünglich von Wasser abgeleitet: Eine Wassermenge mit dem Volumen 1 Kubikdezimeter bei 3,98 °C und Normalluftdruck besitzt die Masse 1 kg. Die Masse eines beliebigen Körpers lässt sich nun prinzipiell durch einen Vergleich mit Wasser auf zwei Arten bestimmen (vgl. Bild 1.1):

1. Man probiert mit einer Waage aus, welche Wassermenge x dem Körper das Gleichgewicht hält. Durch eine Volumenbestimmung des Wassers erhält man so aus einer „statischen“ Messung die Masse des Körpers, die als schwere Masse bezeichnet wird.
2. Ein zwischen zwei Federn gespannter Wagen vollführt eine pendelartige Bewegung mit der Schwingungsdauer T (Dauer für eine vollständige Pendelbewegung). Wie wir in der 3. Lerneinheit sehen werden, nimmt die Schwingungsdauer mit wachsender Masse zu. Man bestimmt nun zunächst die Schwingungsdauer mit dem Körper im Wagen. Dann ersetzt man den Körper durch Wasser und bestimmt die Menge x an Wasser, die zur selben Schwingungsdauer führt wie die durch den Körper. Die aus dieser „dynamischen“ Messung bestimmte Masse wird als träge Masse bezeichnet.

In der Praxis werden derartige Vergleichsmessungen natürlich nicht mit Wasser, sondern mit geeichten kg-Massen oder Teilen von kg-Massen („Gewichten“) durchgeführt. Dazu werden genauestmögliche „Kopien“ des Urkilogramms aus Stahl hergestellt.

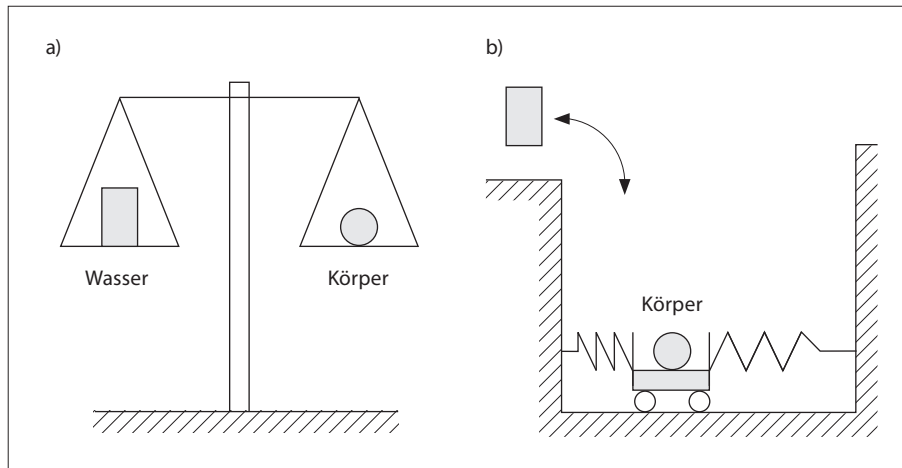


Bild 1.1 Massenvergleich:

- Bestimmung der schweren Masse mit Balkenwaage (statische Messung),
- Bestimmung der trägen Masse mit Pendelwagen (dynamische Messung).

Experimentell besteht kein Unterschied zwischen der schweren und der trägen Masse. Diese keineswegs triviale Erkenntnis wurde im Jahre 1909 von dem ungarischen Physiker EÖTVÖS sichergestellt. Wir wollen daher im folgenden nicht zwischen der trägen und der schweren Masse eines Körpers unterscheiden.

Die oben dargestellten Verfahren erlauben eine direkte Massenbestimmung. Indirekt kann die Masse durch eine Volumenbestimmung bei bekannter Dichte ermittelt werden. Für den Zusammenhang zwischen Masse m , Volumen V und Dichte ρ gilt:

$$m = \rho \cdot V,$$

wobei ρ in Tabellenwerken häufig in der Einheit $[\rho] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ angegeben wird. In Tabelle 1.1 sind einige Dichtewerte zusammengefasst:

Stoff	ρ in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Stoff	ρ in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Aluminium	2.700	Gummi	1.100
Blei	11.340	Wasser (4 °C)	999,973
Eis (0 °C)	917	Benzin	720
Glas	2.700	Quecksilber	13.550
Holz	500	Öl	900
Platin	21.450	Luft	1,293
Eisen	7.860	Wasserstoff	0,091

Tabelle 1.1 Dichte einiger Stoffe

Die Volumenbestimmung eines festen Körpers kann beispielsweise über die geometrischen Abmessungen oder mit Hilfe eines Überlaufgefäßes (Bild 1.2) erfolgen.

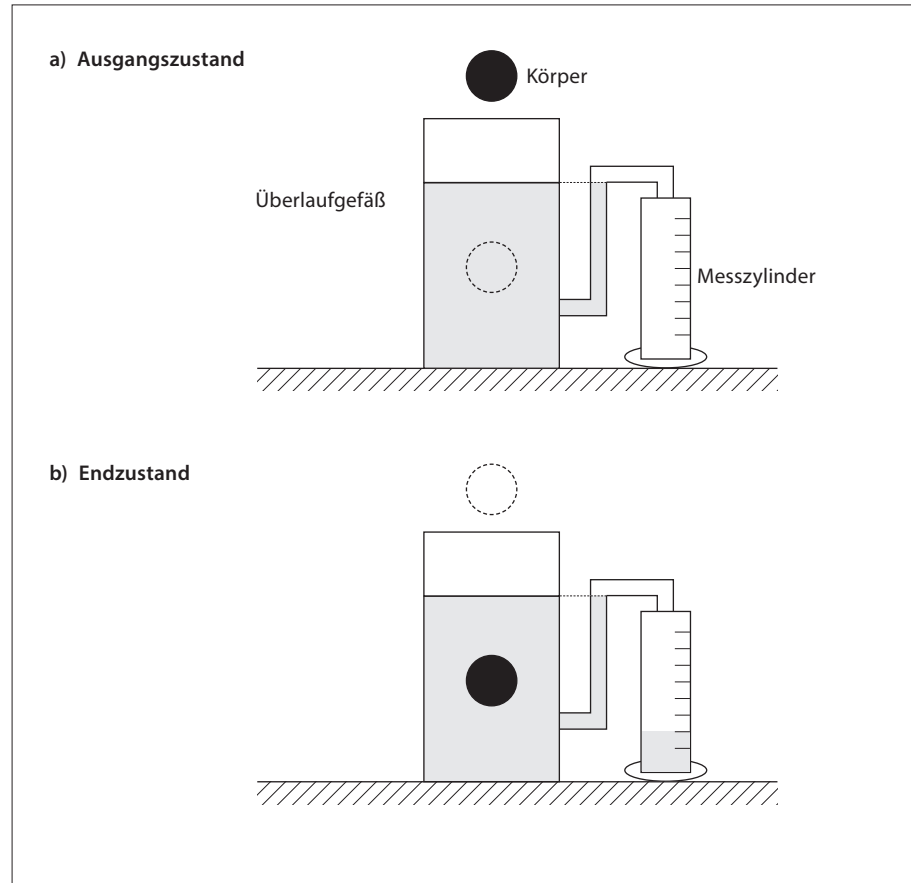


Bild 1.2 Überlaufgefäß zur Volumenbestimmung eines Festkörpers. Das verdrängte Flüssigkeitsvolumen wird in einem Messzylinder gesammelt und gemessen.

Beispiel

B 1.1 Die Masse einer Aluminiumkugel mit einem Durchmesser von $d = 10 \text{ cm}$ ist zu ermitteln. Für das Kugelvolumen gilt:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 .$$

Damit

$$m = \rho \cdot V = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3$$

$$= \frac{4}{24} \pi \cdot \rho \cdot d^3 = \frac{4}{24} \pi \cdot 2.700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,1)^3 \text{ m}^3 = 1,41 \text{ kg} .$$