

2.1. Grundbegriffe der Hydromechanik

2.1.1. Darstellung physikalischer Größen

Die bei den physikalischen Erscheinungen mitwirkenden Faktoren werden als *physikalische Größen* (Längen, Zeiten, Geschwindigkeiten, Kräfte) angesprochen. Größen werden gemessen, d. h. durch Zahlen dargestellt. Um die Größen messen zu können, ist eine Vergleichsgröße notwendig; sie ist die Maßeinheit oder einfach die *Einheit*. Wird die Einheit gewechselt, so bleibt die Größe trotzdem unverändert. Die Zahl, die angibt, wie oft die Maßeinheit in der physikalischen Größe enthalten ist, ist die *Maßzahl* oder der *Zahlwert*. Einheit und Zahlwert sind umgekehrt proportional.

Größen werden quantitativ gekennzeichnet; dabei sind sowohl die Einheit als auch der Zahlwert anzugeben, z. B. Länge (l) = 100 m, Zeit (t) = 2 s. Der Zahlwert ist dann eine Verhältniszahl, also das Verhältnis der gemessenen Größe zur Einheit: $\text{Zahlwert} = \frac{\text{Größe}}{\text{Einheit}}$ oder mathematisch umgeformt als Gleichung: $\text{Größe} = \text{Zahlwert} \cdot \text{Einheit}$.

Es ist nicht immer zweckmäßig, die Meßwerte in ursprünglichen Einheiten anzugeben, vor allem dann nicht, wenn es sich um zu große oder sehr kleine Maßzahlen handelt. Es werden dann *Bruchteile* oder *Vielfache* mit besonderem Namen oder Vorsilben verwendet, die mit der Bezeichnung verbunden sind, z. B. Millimeter (mm) oder Kilometer (km) usw. In Tabelle 1 sind Auszüge aus der „Anordnung über die Tafel der gesetzlichen Einheiten“ vom 31. Oktober 1958 angegeben.

Tabelle 1

Auszüge aus der Anordnung über die Tafel der gesetzlichen Einheiten

GBl der DDR, Sonderdruck Nr. 289 vom 15. Dezember 1958

Name	Vorsatz Zeichen	Einheiten	Name	Beispiel Zeichen	Zusammenhang
Tera	T	10^{12} (1 000 000 000 000)	Teravolt	TV	1 TV = 10^{12} V
Giga	G	10^9 (1 000 000 000)	Gigawatt	GW	1 GW = 10^9 W
Mega	M	10^6 (1 000 000)	Megapond	Mp	1 Mp = 10^6 p
Kilo	k	10^3 (1 000)	Kilohertz	kHz	1 kHz = 10^3 Hz
Hekto	h	10^2 (100)	Hektoliter	hl	1 hl = 10^2 l
Deka	da	10^1	Dekagramm	dag	1 dag = 10 g
Dezi	d	10^{-1} (0,1)	Dezitonne	dt	1 dt = 10^{-1} t
Zenti	c	10^{-2} (0,01)	Zentimeter	cm	1 cm = 10^{-2} m
Milli	m	10^{-3} (0,001)	Milliampere	mA	1 mA = 10^{-3} A
Mikro	μ	10^{-6} (0,000 001)	Mikrogramm	μ g	1 μ g = 10^{-6} g
Nano	n	10^{-9} (0,000 000 001)	Nanometer	nm	1 nm = 10^{-9} m
Pico	p	10^{-12} (0,000 000 000 001)	Picofarad	pF	1 pF = 10^{-12} F

2.1.2. Grundgrößen und abgeleitete Größen

Mit wenigen Ausnahmen lassen sich alle in der Mechanik auftretenden Größen auf wenige Grundgrößen zurückführen, die voneinander unabhängig sind. Alle anderen werden als *abgeleitete Größen* bezeichnet. Grundgrößen sind:

- Länge (m)
- Zeit (s)
- Masse (kg)
- Ampere (A)
- Kelvin-Temperatur (°K)
- Lichtstärke (Candela = cd)

Die abgeleiteten Größen sind Potenzprodukte der Grundgrößen. Um den Zusammenhang zum Ausdruck zu bringen, wurde der Begriff der Dimension der Größe eingeführt. Die Fläche hat die Dimension (Länge)² = l², das Volumen (Länge)³ = l³.

Die Grundeinheit für den Weg ist das *Meter*, für die Zeit die *Sekunde*. Als zweckmäßige Geschwindigkeitseinheit ergibt sich daraus die Geschwindigkeit von 1 m des zurückgelegten Weges in 1 s. Diese physikalische Einheit hat keine besondere Benennung; sie lautet 1 m/s oder 1 m · s⁻¹. Damit wird zum Ausdruck gebracht, daß die Maßangabe m/s die Dimension der Geschwindigkeit ist. Der Zahlwert und die dimensionierte Einheit legen dann die Größe der betrachteten Geschwindigkeit fest, z. B.

$$12 \text{ km/h} = \frac{12000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 3,33 \text{ m/s.}$$

Tabelle 2

Dimensionen und Formelzeichen wichtiger mechanischer Größen

Begriff	Zeichen	Dimension	Größe
Geschwindigkeit	v, c		1 m/s
Beschleunigung	a		1 m/s ²
Dichte	ρ		1 kg/m ³
Kraft	F, P, K	Newton (N)	1 N = 1 $\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$
		Dyn (dyn)	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
		Kilopond (kp)	1 kp = 9,80665 N
		Pond (p)	1 p = 9,80665 · 10 ⁻³ N
Druck	p	Newton/Quadratmeter	1 N/m ²
		Bar (bar)	1 bar = 10 ⁵ N/m ²
		technische Atmosphäre (at)	1 at = 1 kp/cm ²
		physikalische Atmosphäre (atm)	1 atm = 101 325 N/m ²
		Torr	1 Torr = $\frac{1}{760}$ atm
Arbeit, Energie	W, E	Joule (J)	1 J = 1 Ws = 1 Nm
		Wattsekunde (Ws)	
		Newtonmeter (Nm)	
		Erg (erg)	1 erg = 10 ⁻⁷ J
Leistung	P	Watt (W)	1 W = 1 J/s

Auch andere Einheiten ergeben sich aus den genannten Grundeinheiten. So können z. B. die Einheit der Beschleunigung zurückgeführt werden auf die Einheiten der Geschwindigkeit und der Zeit, die Einheit der Kraft auf die Einheiten der Beschleunigung und der Masse.

2.1.3. Wichtige Einheiten der Mechanik

2.1.3.1. Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit (v) eines bewegten Körpers wird durch die Wegstrecke bestimmt, die er in der Zeiteinheit zurücklegt.

Sie ist die zahlenmäßige Festlegung für den Bewegungszustand des Körpers in jedem Punkt des bewegten Systems. Die Anzahl der Wegeinheiten dividiert durch die Anzahl der Zeiteinheiten ergibt $v = \frac{s}{t}$; d. h., die Geschwindigkeit wird durch den Quotienten aus Weg und Zeit bestimmt. Der Weg wird in m oder km, die Zeit in s oder h gemessen.

2.1.3.2. Gleichförmige und ungleichförmige Bewegung

Eine gleichförmige Bewegung liegt vor, wenn ein Körper in gleichen Zeiteinheiten gleiche Wege zurücklegt.

Die Bewegung ist ungleichförmig, wenn in gleichen Zeiteinheiten ungleiche Wege überwunden werden.

Beschleunigt heißt die Bewegung, wenn der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg sich im Gegensatz zur vorhergehenden gleichgroßen Zeiteinheit ständig vergrößert. Im umgekehrten Fall, wenn die Bewegung ständig in der gleichen Zeiteinheit abnimmt, handelt es sich um eine *verzögerte* Bewegung.

2.1.3.3. Der freie Fall

Unter freiem Fall wird das Fallen eines Körpers im freien Raum ohne Widerstandskräfte verstanden.

Der vom fallenden Körper zurückgelegte Weg ist von seiner Masse und vom Stoff des Körpers abhängig. Das ist deshalb wichtig, weil leichten aufgebauchten Stoffen in der Luft ein größerer Widerstand entgegengesetzt wird und das Fallgesetz nur im luftleeren Raum Geltung hat.

Beim freien Fall ist der Weg s eine quadratische Funktion der Zeit t , mathematisch ausgedrückt $s = c \cdot t^2$, worin c eine Konstante, und zwar in der ersten Sekunde $\frac{9,81}{2}$ m = 490,5 cm, ist. Die Fallhöhen ($h =$ Weg s) sind den Quadraten der Fallzeiten proportional. Beträgt die Fallstrecke in einer Zeiteinheit $1^2 = 1$ m, dann ist sie in 2 Zeiteinheiten $2^2 = 4$, in 3 Zeiteinheiten $3^2 = 9$ m, in 4 Zeiteinheiten $4^2 = 16$ m usw.

Wird die nach 1 Sekunde ($t = 1$) erlangte Fallgeschwindigkeit mit v_1 bezeichnet, dann folgt, daß $v_1 = g$ (Fallbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$; g bestimmt daher die Geschwindigkeit) und nach der 2. Sekunde $v_2 = 2g$, $v_3 = 3g$ usw. ist. Die Geschwindigkeit des freien Falles nimmt also in jeder Sekunde um $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ zu. Daraus ergibt sich nach dem Weg-Zeit-Gesetz die Formel $s \text{ (Weg)} = \frac{g}{2} \cdot t^2$.

Wird für den Weg s die Fallhöhe h eingesetzt, errechnet sich die Endgeschwindigkeit nach $v = 2gh$ bzw. $v = 4,429 \cdot h$.

Die Fallgeschwindigkeit beträgt danach in

$$\text{der 1. Sekunde } v_1 = \frac{g}{2} = \frac{9,81}{2} = 4,905 \text{ m/s}$$

$$\text{der 2. Sekunde } \frac{1g + 2g}{2} = \frac{29,43}{2} = 14,715 \text{ m/s}$$

$$\text{der 3. Sekunde } \frac{2g + 3g}{2} = \frac{49,05}{2} = 24,525 \text{ m/s}$$

$$\text{der 4. Sekunde } \frac{3g + 4g}{2} = \frac{68,67}{2} = 34,335 \text{ m/s}$$

Der zurückgelegte Weg s (h) ist nach der

$$1. \text{ Sekunde } h_1 = \frac{9,81}{2} \cdot 1^2 = 4,905 \text{ m}$$

$$2. \text{ Sekunde } h_2 = \frac{9,81}{2} \cdot 2^2 = 19,620 \text{ m}$$

$$3. \text{ Sekunde } h_3 = \frac{9,81}{2} \cdot 3^2 = 44,145 \text{ m}$$

$$4. \text{ Sekunde } h_4 = \frac{9,81}{2} \cdot 4^2 = 78,480 \text{ m}$$

$$5. \text{ Sekunde } h_5 = \frac{9,81}{2} \cdot 5^2 = 122,625 \text{ m}$$

2.1.4. Die wichtigsten Grundbegriffe der Mechanik

2.1.4.1. Kraft

Eine Kraft (F , P , K) wird in der Mechanik bestimmt durch das Produkt einer Masse (m) mit der ihr durch die Einwirkung der Kraft erteilten Beschleunigung (a):

$$\text{Kraft (P)} = \text{Masse (m)} \cdot \text{Beschleunigung (a)}$$

Die Einheit der Kraft ist 1 Newton (1N). Es ist die Kraft, die der Masse von 1 kg die Beschleunigung von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erteilt; sie wird gemessen in $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$. Als Einheiten können auch das Dyn (dyn), das Pond (p) sowie deren Vielfache und Teile eingesetzt werden.

2.1.4.2. Rauminhalt (Volumen)

Als Volumeneinheit (V) gilt ein Würfel der Längeneinheit (Produkt aus Länge, Breite und Höhe); die gesetzliche Einheit ist das Kubikmeter (m³).

Vielfach gestaltete Körper werden nicht durch Längen, sondern volumetrisch gemessen. Deshalb ist eine zweite Volumeneinheit zulässig, die auf der Grundeinheit der Masse basiert. Es ist das Volumen von 1 kg bzw. 1 g reinem Wasser mit 4 °C bzw. 1 Liter (l) oder 1 Milliliter (ml). Obwohl der exakte Wert eines Liters 1,000028 dm³ beträgt, kann der kaum erfassbare Unterschied für technische Messungen vernachlässigt werden.

2.1.4.3. Druck

Unter Druck (p) wird die senkrecht auf eine Flächeneinheit wirkende Kraft verstanden.

Einheiten für den Druck sind Newton/Quadratmeter (N/m²), Bar (bar), technische Atmosphäre (at oder kp/cm²), physikalische Atmosphäre (atm) und Millimeter Wassersäule (mm WS).

$$\begin{aligned} 1 \text{ physikalische Atmosphäre (atm)} &= 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \\ &= 1,013 \text{ bar} \\ &= 1,033 \text{ kp/cm}^2 \end{aligned}$$

Die in der Technik angewendete Atmosphäre (technische Atmosphäre at) weicht etwa 3,3% von der physikalischen Atmosphäre (atm) bei gleicher Höhe über NN ab. Sie entspricht dem Druck, den 1 kp auf eine Fläche von 1 cm² ausübt: 1 at = 1 kp · cm⁻² = 0,980665 bar, was einer Quecksilbersäule von 735,56 mm Höhe entspricht. Die Umrechnung des Luftdrucks ist im Wetterdienst üblich (Tabellen 3, 4).

Tabelle 3
Barometerskala

Höhe m	Luftdruck Torr	Höhe m	Luftdruck Torr
0	760	700	699
100	751	800	690
200	742	900	682
300	733	1 000	674
400	724	2 000	593
500	716	5 000	409
600	707	10 000	220

Tabelle 4

Umrechnung Torr in Millibar (mbar)

Torr	mbar	Torr	mbar	Torr	mbar
650	867	698	931	746	995
652	869	700	933	748	997
654	872	702	936	750	1 000
656	875	704	939	752	1 003
658	877	706	941	754	1 005
660	880	708	944	756	1 008
662	883	710	947	758	1 011
664	885	712	949	760	1 013
666	888	714	952	762	1 016
668	891	716	955	764	1 019
670	893	718	957	766	1 021
672	896	720	960	768	1 024
674	899	722	963	770	1 027
676	901	724	965	772	1 029
678	904	726	968	774	1 032
680	907	728	971	776	1 035
682	909	730	973	778	1 037
684	912	732	976	780	1 040
686	915	734	979	782	1 043
688	917	736	981	784	1 045
690	920	738	984	786	1 048
692	923	740	987	788	1 051
694	925	742	989		
696	928	744	992		

2.1.5. Arbeit und Energie

2.1.5.1. Arbeit

Die Arbeit (W) ist das Produkt aus Kraft und Länge (Weg) oder aus Leistung und Zeit (Arbeit = Kraft · Weg).

Der physikalische Begriff Arbeit wird gleichgesetzt mit dem Aufwand zur Überwindung von Widerständen. Bei der Arbeit ist immer durch eine Kraft ein bestimmter Weg zurückzulegen. Die geleistete Arbeit ist umso größer, je größer die aufzuwendende Kraft und je größer der zurückzulegende Weg ist. Arbeit und Weg der wirkenden Kraft sind proportional.

Die gesetzlichen Einheiten für die Arbeit sind Joule (J), Newtonmeter (Nm), Erg (erg), Wattsekunde (Ws) und Kalorie (cal) sowie Vielfache und Teile davon. Es sind auch alle Einheiten möglich, die sich als Produkt einer zulässigen Krafteinheit und einer zulässigen Längeneinheit oder als Produkt einer zulässigen Leistungseinheit und einer zulässigen Zeiteinheit ergeben.

1 Joule

1 Newtonmeter

$$\begin{aligned} 1 \text{ Wattsekunde} &= 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ Wh} & 1 \text{ erg} &= 10^{-7} \text{ J, Nm, Ws} \\ &= 2,778 \cdot 10^{-7} \text{ kWh} & &= 2,778 \cdot 10^{-11} \text{ Wh} \\ &= 0,102 \text{ kpm} & &= 1,020 \cdot 10^{-8} \text{ kpm} \\ &= 10^7 \text{ erg} & & \end{aligned}$$

2.1.5.2. Energie

Energie (E) ist die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu leisten; sie ist das Produkt aus Kraft und Länge (Weg) oder aus Masse und Quadrat ihrer Geschwindigkeit, dividiert durch 2.

Als Einheiten gelten Joule (J), Wattsekunde (Ws), Newtonmeter (Nm), Erg (erg) und Kalorie (cal). Außerdem sind die Einheiten möglich, die als Produkt aus einer zulässigen Krafteinheit und einer zulässigen Längeneinheit oder als Produkt aus einer zulässigen Leistungseinheit und einer zulässigen Zeiteinheit gebildet werden.

Es werden kinetische Energie und potentielle Energie unterschieden.

■ Kinetische Energie

Die kinetische Energie oder Bewegungsenergie ist das Produkt aus Masse und Quadrat der Geschwindigkeit, dividiert durch 2 ($W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$).

Die Einheit ist das Joule (J). Bei der Krafteinwirkung auf einen Körper wird dieser in seiner Bewegung beschleunigt oder verzögert. Das ist in der Natur zu beobachten, z. B. beim Wind oder dem Wasser. Wirkt eine Kraft, z. B. die Schwerkraft, auf die frei bewegliche Masse m (Wasser), so erteilt sie ihr die Beschleunigung $a = \frac{P}{m}$. Die Masse erlangt dadurch in der Zeit t die Geschwindigkeit $v = a \cdot t$ und legt dabei den Weg $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ zurück, anders ausgedrückt $\frac{1}{2} m v^2$.

Beispiel:

Ein Körper mit einer Masse von 2 kp fällt $h = 30$ m senkrecht herab und erreicht am Ende die Geschwindigkeit $v = \sqrt{2gh} = 24,26$ m/s. Die kinetische Energie ($W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 588,5476 = 588,5476 \text{ m}^2\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} = 588,5476 \text{ J (Joule)} = 588,5476 \text{ Ws}$. Beim Fallen ist also die im Körper gespeicherte Arbeit in etwa 600 Ws umgewandelt worden.

■ Potentielle Energie

Wird eine Masse von der Höhe h_1 auf die Höhe h_2 angehoben, ist die wirkende Schwerkraft zu überwinden; sie wirkt unabhängig vom Weg. Beim Anheben des Körpers wird eine bestimmte Arbeit geleistet. Im angehobenen Körper speichert sich damit Energie, die als potentielle Energie bezeichnet wird.

$$\text{Potentielle Energie (} W_{\text{pot}} \text{)} = \text{Masse (m)} \cdot \text{Erdbeschleunigung (g)} \cdot \text{Höhe (h)}.$$

Die potentielle Energie des Körpers ist also $W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$. Daraus folgt, daß jeder Körper im Raum eine durch die Schwerkraft bestimmte potentielle Energie hat.

Die unter dem Einfluß der Schwerkraft geleistete Arbeit ist gleich der Abnahme der zugehörigen potentiellen Energie. Wird ein Körper hochgehoben, wird positive Arbeit geleistet, und die potentielle Energie wächst an. Das Gegenteil tritt ein, wenn der Körper abgesenkt wird, seine potentielle Energie ist in der neuen Lage geringer.

Wird also eine Masse bewegt, dann treten potentielle und kinetische Energie eng verbunden miteinander auf. Die Körperbewegung unter der Einwirkung seiner eigenen Potentialkraft bedeutet Arbeitszuführung, die im Ergebnis der Zunahme der kinetischen Energie gleich ist, während die von der Kraft aufgebrauchte Arbeit seine potentielle Energie entsprechend verringert:

W_{kin} und W_{pot} sind konstant.

Es gilt daher in der Mechanik der Satz:

Kinetische und potentielle Energie sind einzeln veränderlich, die Gesamtenergie bleibt konstant.

Daraus leitet sich der Satz von der Erhaltung der Energie, kurz „Energiesatz“ genannt,

$$\text{ab: } \frac{m}{2} \cdot v_1^2 + m \cdot g \cdot h_1 = \frac{m}{2} \cdot v_2^2 + m \cdot g \cdot h_2.$$