2. Hydromechanik

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: Zahlwert gleich $\frac{\text{Größe}}{\text{Einheit}}$ oder mathematisch umgeformt als Gleichung: Größe = Zahlwert · 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

Vorsatz Name	Vorsatz Zeichen	Einheiten		Beispiel 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	μg	1 μg = 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)
- Kelwin-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 $(\text{Länge})^2 = l^2$, das Volumen $(\text{Länge})^3 = l^3$.

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 $1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 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		$1\ \text{m/s}^2$
Dichte	ϱ		$1\ \text{kg/m}^3$
Kraft	F, P, K	Newton (N)	$1\ \text{N} = 1\ \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$
		Dyn (dyn)	$1\ \text{dyn} = 10^{-5}\ \text{N}$
		Kilopond (kp)	$1\ \text{kp} = 9{,}80665\ \text{N}$
		Pond (p)	$1\ \text{p} = 9{,}80665 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$
Druck	p	Newton/Quadratmeter	$1\ \text{N/m}^2$
		Bar (bar)	$1\ \text{bar} = 10^5\ \text{N/m}^2$
		technische Atmosphäre (at)	$1\ \text{at} = 1\ \text{kp/cm}^2$
		physikalische Atmosphäre (atm)	$1\ \text{atm} = 101\,325\ \text{N/m}^3$
		Torr	$1\ \text{Torr} = \frac{1}{760}\ \text{atm}$
Arbeit, Energie	W, E	Joule (J)	1 J = 1 Ws = 1 Nm
		Wattsekunde (Ws)	
		Newtonmeter (Nm)	
		Erg (erg)	$1\ \text{erg} = 10^{-7}\ \text{J}$
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 aufgebauschten 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 m ; 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 $g = 9{,}81$ m zu. Daraus ergibt sich nach dem Weg-Zeit-Gesetz die Formel s (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

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

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

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

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

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

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):

Kraft (P) = Masse (m) · Beschleunigung (a)

Die Einheit der Kraft ist 1 Newton (1N). Es ist die Kraft, die der Masse von 1 kg die Beschleunigung von $1 \frac{m}{s^2}$ erteilt; sie wird gemessen in $\frac{kg \cdot m}{s^2}$. 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 (m^3).

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 dm^3 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/m^2), Bar (bar), technische Atmosphäre (at oder kp/cm^2), physikalische Atmosphäre (atm) und Millimeter Wassersäule (mm WS).

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

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 cm^2 ausübt: $1\ at = 1\ kp \cdot cm^{-2} = 0{,}980665$ 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
1 Wattsekunde $= 2{,}778 \cdot 10^{-4}$ Wh $\quad$ 1 erg $= 10^{-7}$ J, Nm, Ws
$= 2{,}778 \cdot 10^{-7}$ kWh $\quad = 2{,}778 \cdot 10^{-11}$ Wh
$= 0{,}102$ kpm $\quad = 1{,}020 \cdot 10^{-8}$ kpm
$= 10^7$ erg

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 ($W_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$).

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 $s = \frac{a}{2} \cdot v^2$ 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 $v = \sqrt{2\,gh} = 24{,}26$ m/s. Die kinetische Energie (W_{kin}) = $\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 588{,}5476 = 588{,}5476\ m^2kg \cdot s^{-2} = 588{,}5476$ J (Joule) = 588,5476 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.

Potentielle Energie (W_{pot}) = Masse (m) · Erdbeschleunigung (g) · Höhe (h).

Die potentielle Energie des Körpers ist also $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$. 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, ab: $\frac{m}{2} \cdot v_1^2 + m \cdot g \cdot h_1 = \frac{m}{2} \cdot v_2^2 + m \cdot g \cdot h_2$.

2.2. Flüssigkeiten

2.2.1. Begriff und Gestalt der Flüssigkeiten

In Flüssigkeiten sind die Moleküle weniger dicht zueinander gelagert als in festen, starren Körpern; sie sind deshalb auch gegeneinander leicht verschiebbar. Obwohl die einwirkenden Kräfte bei Flüssigkeiten und ein gewisses Bestreben nach der Erhaltung des Gleichgewichts der Moleküle vorhanden sind, ist die *Raumbegrenzung* für die Gestaltung der Flüssigkeiten doch allein bestimmend. Die Moleküle befinden sich keineswegs in Ruhe, sondern sie reagieren auf die geringsten einwirkenden Kräfte durch ungeordnete Bewegung nach allen Richtungen.
An der Oberfläche von Flüssigkeiten bestehen Spannungen, die – gleich einer elastischen Haut – gegenüber angreifenden Kräften zusammenhaltend wirken.
Dazu tritt eine Komponente als Kraft auf, die vom Rande aus zur Mitte zieht und so wirkt, als wollte sie die Oberfläche verkleinern. Das zeigt sich z. B. beim Tropfen eines Wasserhahnes. Es sieht aus, als sei die Oberflächenhaut am Rande des Hahnes angeheftet. Der sich immer wieder bildende Tropfen saugt Wasser an, bis seine Masse die entgegenwirkende Kraft übersteigt.
Eine durch eine feste Wand begrenzte Flüssigkeit bildet auf dieser einen zur Wand gerichteten Randwinkel.

Ist der Randwinkel spitz, liegt eine Wandbenetzung vor, ist er stumpf, benetzt die Flüssigkeit nicht.
Ist die Wandfläche völlig mit Flüssigkeitsteilchen überzogen, wie z. B. beim Wasser, ist eine vollkommene Benetzung gegeben.

Wird z. B. ein an beiden Seiten offenes Röhrchen in eine Flüssigkeit gestellt, dann zieht sich diese durch die *Grenzflächenspannung* aufwärts. Das ist deutlich bei einem mit Quecksilber gefüllten Röhrchen zu erkennen. Diese Tatsache zeigt sich auch im Haarröhrchensystem des Bodens (Kapillarität).
Auch die Flüssigkeiten unterliegen der Schwerkraft. Unter ihrem Einfluß streben homogene Flüssigkeiten stets nach waagerechtem Ausgleich. Ihre Oberflächen sind im Ruhezustand in allen Ebenen stets senkrecht zu der wirkenden Schwerkraft ausgerichtet.

2.2.2. Eigenschaften der Flüssigkeiten

2.2.2.1. Unzusammendrückbarkeit (Inkompressibilität)

In der Physik wird von einer „idealen" Flüssigkeit gesprochen, im Gegensatz zur natürlichen oder realen. In einer idealen Flüssigkeit bestehen keine inneren Reibungen; mithin ist ihre Zähigkeit verschwindend gering. Die ideale Flüssigkeit wurde hier nur erwähnt, weil sie in der Strömungslehre Bedeutung hat; in der technischen Hydraulik spielt sie in der *Rohrhydraulik* eine Rolle.
Flüssigkeiten, speziell Wasser, werden in der Hydraulik als *unzusammendrückbar* (inkompressibel) betrachtet. Trotzdem bleibt hervorzuheben, daß bei starkem Druck eine geringfügige Volumenveränderung eintritt, die aber bei Druckvernachlässigung sofort wieder in das frühere Volumen zurückgeht. Diese Tatsache wird als *Elastizität* bezeichnet. Der Widerstand des Wassers gegen eine Volumenveränderung ist sehr groß, sein Elastizitätsmodul E_W kann mit Ausnahme von Druckstößen und ähnlichen Vorgängen vernachlässigt werden. E_W von Wasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur:

Tabelle 5
Elastizitätsmodul von Wasser (E_W) in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

Druck kp/cm²	Temperatur °C	E_W 10^4 kp/cm²
1–25	0	1,9682
	10	2,0664
	20	2,1046
25–50	0	2,0023
	10	2,1005
	20	2,1707

2.2.2.2. Dichte und Wichte

Es ist bekannt, daß Körper von gleichem Volumen verschiedene Massen haben können; sie unterscheiden sich durch ihre **Dichte** (ρ).

Unter Dichte (ρ) ist das Verhältnis der Masse (m) zur Volumeneinheit (1 cm³) zu verstehen $= \frac{m}{V}$ [$g \cdot cm^{-3}$].

Je größer die Masse von 1 cm³ eines Stoffes ist, umso dichter ist er.

Ähnlich kann auch das Gewicht gleicher Rauminhalte verschiedener Körper verglichen werden, indem der Quotient aus Körpergewicht (G) und Volumen ermittelt wird:

$$\gamma = \frac{G}{V} \ [\mathrm{p} \cdot \mathrm{cm}^{-3}].$$

Das Ergebnis ist die Wichte (γ). Da unter gleichen Verhältnissen Masse und Gewicht proportional sind, gilt das auch für das Verhältnis Dichte zu Wichte, d.h., Wasser hat auch bei 4 °C seine größte Wichte; es gilt:

$$\text{Dichte} = \frac{m}{V} \ (\text{Dimension } [\mathrm{g} \cdot \mathrm{cm}^{-3}]),$$

$$\text{Wichte} = \frac{G}{V} \ (\text{Dimension } [\mathrm{p} \cdot \mathrm{cm}^{-3}])$$

$$\text{Dichtezahl} = \frac{m \text{ des Körpers}}{m \text{ einer volumengleichen Wassermenge bei } 4\,°\mathrm{C}}$$

$$\text{Wichtezahl} = \frac{G \text{ des Körpers}}{G \text{ einer volumengleichen Wassermenge bei } 4\,°\mathrm{C}}$$

Der Zahl nach sind Dichtezahl und Wichtezahl sowie Dichte und Wichte übereinstimmend. Die Wichte ändert sich aber entsprechend dem Gewicht am Erdort. Werden andere Maßeinheiten als Gramm und Kubikzentimeter zugrunde gelegt, so entsprechen mg mm^3, kg dm^3, t (Tonne) m^3 einander. In Tabelle 6 sind Dichtezahlen verschiedener Stoffe angegeben.

Tabelle 6

Dichte einiger Stoffe

Flüssige Stoffe [g/cm³]		*Feste Stoffe* (18 °C) [g/cm³]	
Wasser (18 °C)	0,9986	Kalium	0,86
Wasser (0 °C)	0,9998	Natrium	0,97
Wasser (4 °C)	1,000	Aluminium	2,70
Glyzerin (18 °C)	1,257	Zink	7,13
Chloroform	1,489	Zinn	7,28
Tetrachlorkohlenstoff	1,594	Eisen	7,86
Benzol (18 °C)	0,879	Kupfer	8,92
Äthylalkohol	0,791	Silber	10,50
Quecksilber (18 °C)	13,551	Gold	19,30
Quecksilber (0 °C)	13,595		
Gase (0 °C, 760 Torr) [g/cm³]		*Verbindungen* [g/cm³]	
Wasserstoff	0,000 089 9	Wasserdampf (100 °C)	0,000 597 7
Helium	0,000 178 5	Methan	0,000 716 8
Stickstoff	0,001 250 5	Kohlendioxid	0,001 292 8
Sauerstoff	0,001 428 9	Luft	0,001 292 8
Chlor	0,003 22	Kohlendioxid	0,001 976 8

2.2.2.3. Zähigkeit

Flüssigkeiten kann man sich physikalisch in hauchdünnen Schichten übereinander gelagert vorstellen. Diese Schichten setzen einer gegenseitigen Verschiebung einen Widerstand, eine innere *Reibung* entgegen. Es ist also eine Kraft vorhanden, die eine innere Reibung auslöst.

Die Kraft, die die innere Reibung verursacht, wird als dynamische Zähigkeit oder auch einfach Zähigkeit bzw. Viskosität bezeichnet.

Diese als Schubspannung zwischen zwei in der Strömungsrichtung benachbarten Parallelschichten auftretenden Kräfte werden als proportional dem Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zur Stromrichtung angesprochen. Die *dynamische Zähigkeit* ist für viele Flüssigkeiten eine Stoffkonstante; sie hat das Symbol η und wird in Newtonsekunde/Quadratmeter (Ns/m^2), Vielfachen oder Teilen gemessen.

Tabelle 7

Dynamische Zähigkeit einiger Stoffe

Stoff		$10^3 \cdot \eta \cdot kgm^{-1} s^{-1}$	Gase 20 °C	$10^6 \cdot \eta \cdot kgm^{-1} s^{-1}$
Wasser	0 °C	1,082	Wasserstoff	8,8
Wasser	10 °C	1,033	Luft	18,1
Wasser	18 °C	1,020	Kohlendioxid	14,7
Benzol	18 °C	0,67	Methan	10,8
Quecksilber	18 °C	1,566	Chlorwasserstoff	14,3
Glyzerin	18 °C	1656,00		
Alkohol	18 °C	1,25		

Bei vielen Strömungsvorgängen wird die *kinematische Zähigkeit* (ν) verwendet, sie ist der Quotient aus dynamischer Zähigkeit (η) und Dichte (ρ) $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, ihre Einheit ist $\frac{m^2}{s}$; sie wird auch *Stokes* genannt.

2.3. Hydrostatik

2.3.1. Allgemeine Grundlagen

In der Hydrostatik und der Hydraulik werden bei ruhenden und bewegten Flüssigkeiten auftretende Erscheinungen in mathematische Formeln gekleidet. Dabei ist eine große Zahl von Faktoren zu beachten. Die Formeln sind nach den mathematischen Grundsätzen meist empirisch entwickelt und physikalisch beweisbar. In der Hydrostatik und der Hydraulik wird das technische Maßsystem (MKS-System) angewendet. Es ist von folgenden *Grundsätzen* auszugehen:

- Die Inkompressibilität der Flüssigkeit wird vorausgesetzt.
- Für alle Wasserteilchen werden nur senkrecht gerichtete Kräfte gegeneinander oder auf ihre Umfassungen wirkende angesprochen.

- In der Gerinnehydraulik wird die Zähigkeit im Regelfall vernachlässigt.
- Der Einfluß der Temperatur bleibt unberücksichtigt, d. h., das Volumen wird konstant angenommen.
- Die Oberflächenspannung wird nicht in die Formeln einbezogen.
- Alle Formeln und Ansätze sind auf die homogene Flüssigkeit Wasser bezogen, wobei von wirklicher (natürlicher) Flüssigkeit ausgegangen wird.

Als verwendete Dimensionen werden eingesetzt:

Dichte $\equiv$ Wichte = 1
1 Tonne (t) $\triangleq$ 1 Kubikmeter (m^3) oder
1 Kilogramm (kg) $\triangleq$ 1 Liter (l)

$$\frac{1\,t}{1\,m^3} \triangleq \frac{1000\,kg}{1000\,l} \triangleq \frac{1\,kg}{1\,l}$$

Die Geschwindigkeit wird in m/s, die Beschleunigung in m/s^2 ausgedrückt.
Die Erdbeschleunigung g beträgt in unseren Breiten 9,81 m/s^2.

2.3.2. Grundbegriffe der Hydrostatik

In einer ruhenden Flüssigkeit ist der *Druck* allseitig *gleich*, d. h., alle Kräfte, die auf ein Teilchen wirken, halten sich das Gleichgewicht. Alle Druckkräfte sind stets senkrecht auf die Begrenzungsfläche gerichtet. Bei Allseitigkeit des *statischen Druckes* müssen die flächenmäßig nebeneinander gelagerten Flüssigkeitsteilchen Niveauflächen mit konstantem Wert für p bilden, d. h.,

in allen Punkten derselben Tiefe unter dem Wasserspiegel herrscht derselbe Druck.

Daraus ergibt sich, daß es in jedem Punkt der Flüssigkeit nur eine Niveaufläche geben kann und in der Niveaufläche in jedem Punkt senkrecht die aus allen Kraftkomponenten bestehende resultierende Kraft angreift.

Der Druck in einer Flüssigkeit $p\left[\frac{t}{m^2}\right]$ in einer Wassertiefe h [m] ergibt sich aus der Formel $p = \gamma \cdot h \left[\frac{t \cdot m}{m^3}\right]$.

Da bei Wasser $\gamma = 1 \left[\frac{t}{m^3}\right]$ ist, wird beim Druck meist nur $\gamma = h$ gesetzt, d. h. in der Dimension [m] statt $\left[\frac{t}{m^2}\right]$. Diese Tatsache ist zu beachten, um Irrtümer auszuschließen.

2.3.3. Druck unter dem Einfluß der Schwerkraft

Die Druckgleichung für eine ruhende Flüssigkeit unter dem Einfluß der Schwere lautet: $p = p_0 + \gamma \cdot h$; sie besagt,

daß der Druck linear mit der Tiefe zunimmt.

p_0 ist der Atmosphärendruck, der in unseren Breiten im Meliorationswesen vernachlässigt werden kann.

Da in allen Flüssigkeiten verschiedener Wichte (Dichte) $p \equiv h$ ist, verhalten sich ihre statischen Druckhöhen umgekehrt wie ihre Wichten (Dichten):

Wasser (γ_1) $= 1$ $\quad h_2 = \frac{1,00}{1,00} = 1,00 \quad h_1 = 0,00$ m

Glyzerin (γ_2) $= 1,26$ $\quad h_2 = \frac{1,00}{1,26} = 0,794 \quad h_1 = 0,206$ m

Benzin (γ_3) $= 0,70$ $\quad h_2 = \frac{1,00}{0,70} = 1,428 \quad h_1 = -0,428$ m

Chloroform (γ_4) $= 1,49$ $\quad h_2 = \frac{1,00}{1,49} = 0,678 \quad h_1 = 0,322$ m

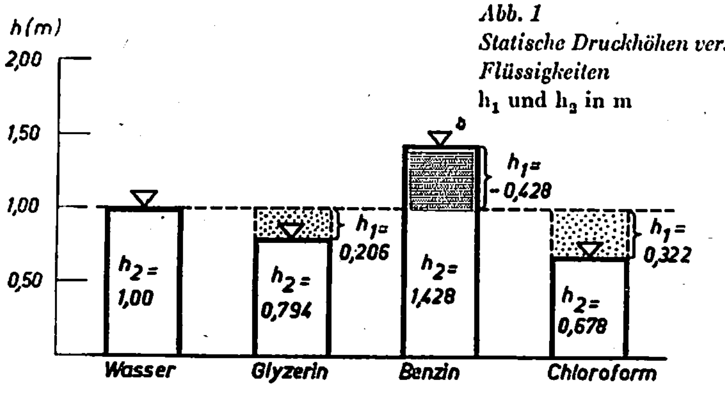


Abb. 1
Statische Druckhöhen verschiedener Flüssigkeiten
h_1 und h_2 in m

2.3.4. Druckfortpflanzung in Flüssigkeiten bei Vernachlässigung des Schweredrucks (Kolbendruck)

Wird vom Schweredruck abgesehen, dann gilt das Gesetz von Pascal, das besagt,

> daß sich der Druck einer gepreßten Flüssigkeit innerhalb eines Gefäßes an alle Stellen der Wandungen gleichmäßig fortpflanzt.

Der durch einen Kolben auf eine Flüssigkeit übertragene Druck $p = \frac{P}{F}$ ist von der Form der Kolbendruckfläche unabhängig. Ein Druck auf eine Flüssigkeit braucht nicht allein durch eine Wasserhöhe h hervorgebracht zu werden, sondern kann auch durch Kolbenpressung entstehen.

Beispiel:

Auf einer Kolbenfläche F_2 lastet ohne K_1 der Druck von $p = \gamma \cdot h \left[\frac{t}{m^2}\right]$. Wird der Kolben K_1 mit einer Kraft P_1 [t] auf die Flüssigkeit im Behälter gedrückt, dann ist das dasselbe, als ob in diesem noch eine Wassersäule mit der Kraft

$$P_1 = \gamma \cdot h_1 \cdot F_1 \left[\frac{t \cdot m \cdot m^2}{m^3} = t\right]$$

wirkt. Durch Umstellung der Gleichung ergibt sich

$$\gamma \cdot h_1 = \frac{P_1}{F_1}\left[\frac{t}{m^2}\right].$$

Der Gesamtdruck p_{ges} auf F_2 ist $= p + p_1 = \gamma \cdot h + \frac{P_1}{F_1}$.

Die Gesamtkraft, die auf K_2 wirkt, ist dann $P_{ges} = \left(\gamma \cdot h + \frac{P_1}{F}\right) \cdot F$.

Ist h_1 gegenüber h_2 sehr groß, wie es bei Kolbendrücken zu sein pflegt, kann $\gamma \cdot h_2$ unberücksichtigt bleiben und P_{ges} ist $P_1 \cdot \frac{F_2}{F_1}\left[t \cdot \frac{m^2}{m^2} = t\right]$. Es drückt mithin auf den Kolben K_2 eine um $\frac{F_2}{F_1}$ oder bei kreisrunden Kolben eine um $\frac{\frac{D^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{D^2}{d^2}$ vergrößerte Kraft.

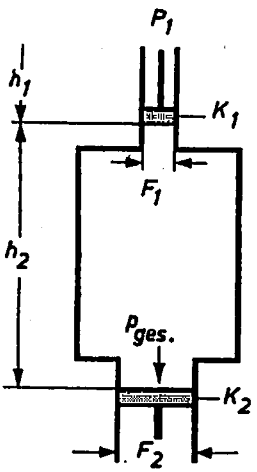


Abb. 2
Kolbendruck

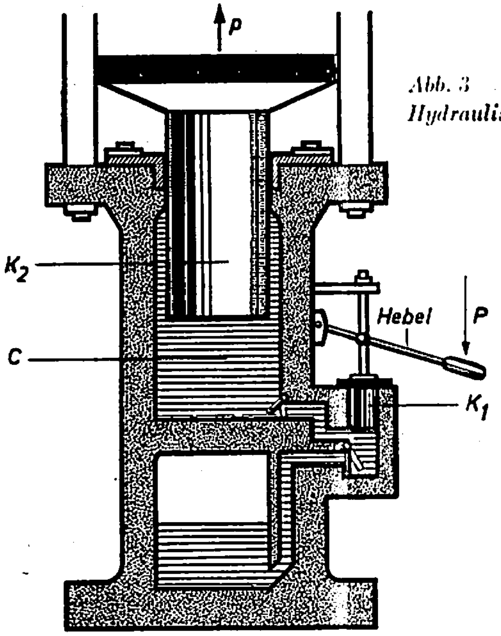


Abb. 3
Hydraulische Presse

In der Technik wird das Prinzip der hydraulischen Druckübertragung durch die *hydraulische Presse* verwirklicht.

Beispiel:

$d = 0{,}06$ m; $d^2 = 0{,}0036$, $F_1 = 0{,}002826$ m²
$D = 0{,}30$ m; $D^2 = 0{,}0900$ m, $F_2 = 0{,}07065$ m²
Übersetzungsverhältnis $d^2 : D^2 \equiv F_1 : F_2 = 1 : 25$

Die drückende Kraft des Kolbens K_2 verhält sich zu der am Kolben K_1 angewendeten Kraft wie das Verhältnis von $D^2 : d^2$. Der Weg, den der Kolben K_2 zurücklegt, verhält sich zu dem von K_1 zurückgelegten Weg, wie sich d^2 zu D^2 verhält; denn das von K_1 verdrängte Flüssigkeitsvolumen muß gleich dem sein, um das der Raum C durch Heben von K_2 vergrößert wird.

2.3.5. Statischer Flüssigkeitsdruck gegen Wände

2.3.5.1. Druck auf horizontale, ebene Bodenflächen

Ist in einem Gefäß die Bodenfläche waagerecht, also eine dem Wasserspiegel parallele Ebene, dann ist der Druck auf jedes Flächenteilchen *gleich groß*. Die Größe der Kraft P, die senkrecht auf die Fläche F wirkt, ist $P = \gamma \cdot h \cdot F$. P entspricht der über F liegenden Wassersäule. Der Angriffspunkt der Gesamtkraft aller Einzelkräfte liegt im Schwerpunkt S des Wasserdruckrechteckes ABCD. Da der Wasserdruck stets senkrecht auf die horizontale Bodenfläche wirkt, ist die Form des Gefäßes nicht entscheidend, sondern lediglich die Wassertiefe h (Abb. 5).

Abb. 4 Statischer Flüssigkeitsdruck

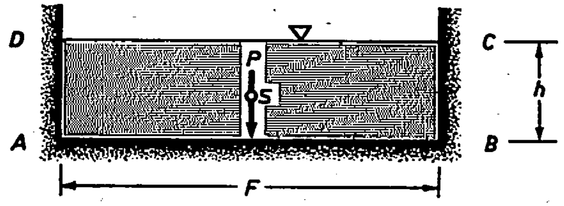
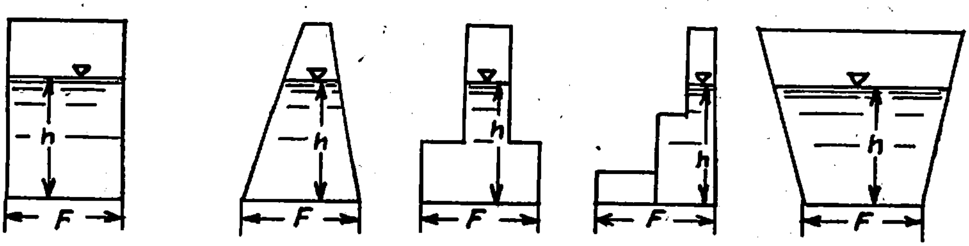


Abb. 5
Bodendruck — auf alle Flächen F wirkt bei gleicher Höhe h der gleiche Bodendruck



2.3.5.2. Druck auf geneigte, ebene Bodenflächen

Der Wasserdruck wirkt stets *senkrecht* (Winkel 90°) auf die Flächenteilchen der Ebene. Es ergibt sich somit das Drucktrapez ABCD (Abb. 6). Die Gesamtkraft P greift im Schwerpunkt S der Wasserdruckfläche ABCD senkrecht auf die Grundfläche A—B an. Der größte Druck ist $p_1 = \gamma \cdot h_2$ (lotrecht, nicht senkrecht zur Grundebene

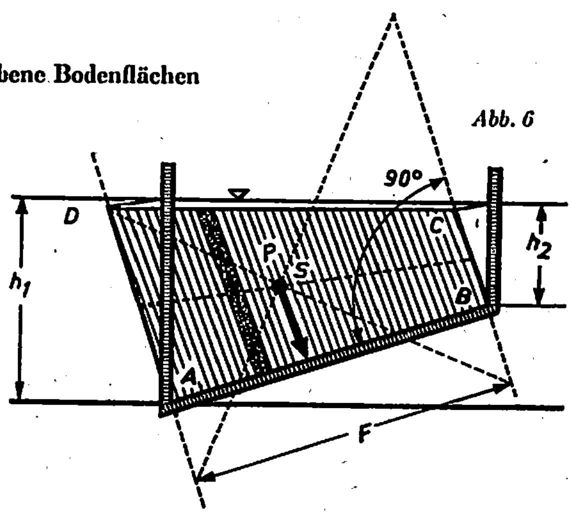


Abb. 6

gemessen), mithin die durchschnittliche Kraft

$$P = \frac{\gamma \cdot h_1 + \rho \cdot h_2}{2}.$$

In die Grundformel übernommen, ergibt sich:

$$P = \frac{\gamma \cdot h_1 + \rho \cdot h_2}{2} \cdot F \text{ oder } P = \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \gamma \cdot F.$$

Da bei Wasser $\gamma = 1$ gesetzt wird, kann diese Größe entfallen.

2.3.5.3. Druck auf lotrechte, ebene Seitenwände

In jeder Tiefe unter dem Wasserspiegel ist der Druck auf ein Flächenteilchen der lotrechten Wand $p = \gamma \cdot h$ bzw. bei Wasser $= h$. Die Drücke sämtlicher Teilflächen sind *senkrecht* auf die lotrechte Wand gerichtet. Graphisch ist die resultierende Druckfläche als gleichschenkliges Wasserdruckdreieck ABC darzustellen

mit dem Inhalt $\frac{h \cdot h}{2}$ und dem Druck $p = \frac{\gamma \cdot h \cdot h}{2} \left[\frac{t}{m}\right]$ bzw.
als Gesamtdruck, wenn als Länge l [m] und als Breite b [m] angesetzt werden

$$p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot l \cdot b.$$

Die Wirkungslinie der Druckkraft geht durch den Schwerpunkt S des Druckdreiecks und liegt $^2/_3 h$ unter dem Wasserspiegel. Bei beiderseitigem Druck ist $p = \frac{\gamma}{2} (h^2 - h_1^2)$.

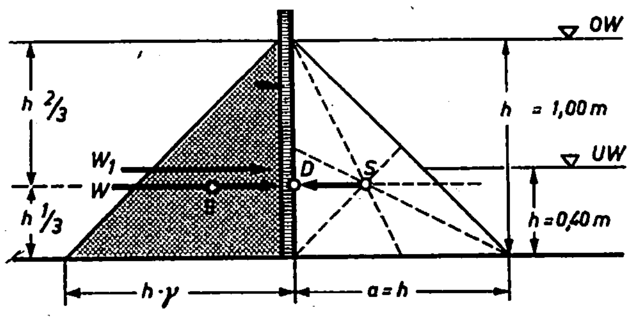


Abb. 7
Druck auf lotrechte, ebene Wand

2.3.5.4. Druck auf geneigte, ebene Seitenwände

Auch in diesem Falle zeigt die graphische Darstellung des Wasserdruckdreieckes, daß der Druck *senkrecht* auf die Wand gerichtet ist und der Kraftangriffspunkt im Schwerpunkt S des Belastungsdreiecks liegt. Die Wirkungslinie W ist senkrecht auf den Druckpunkt D gerichtet.
Der Inhalt des Wasserdruckdreiecks ABC ist

$$\frac{\gamma \cdot h}{2} \cdot \frac{h}{\sin \alpha} \left[\frac{t}{m}\right].$$

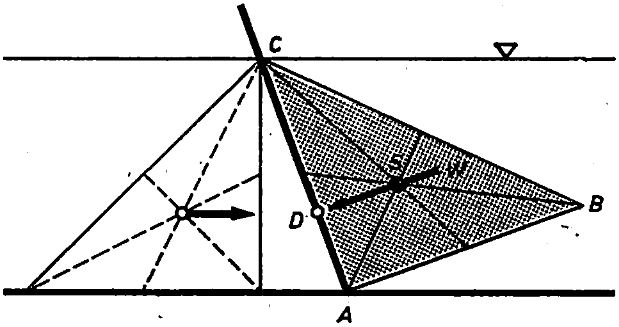


Abb. 8
Druck auf geneigte ebene Wand

Die Kraft P [t] auf eine um α geneigte Fläche mit der Breite b [m] ist bei einer Wassertiefe h [m]

$$P = \frac{\gamma \cdot h \cdot h}{2 \sin \alpha} \cdot b \text{ [t] bzw. } P = \frac{1}{2 \sin \alpha} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot b.$$

2.4. Hydrodynamik

2.4.1. Grundbegriffe der Hydrodynamik

Die Hydrodynamik behandelt die Bewegung der Flüssigkeiten.

In der Hydrostatik wurde ausgegangen von der Formel:

$$\text{Volumen} \cdot \text{Wichte} = \text{Gewicht} \left[\frac{m^3 \cdot t}{m^3} = t\right]$$

Bei der Bewegung muß außerdem die Zeit mit der Einheit Sekunde [s] berücksichtigt werden:

$$\frac{\text{Volumen} \cdot \text{Wichte}}{\text{Zeit}} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Zeit}} \left[\frac{m^3 \cdot t}{m^3 \cdot s} = \frac{t}{s}\right].$$

In der technischen Hydraulik wird die Wichte des Wassers fast immer $\gamma = 1 \left[\frac{t}{m^3}\right]$ gesetzt. Während in der Hydrostatik die *ruhende* Wassermenge die spezielle Einheit m^3 hat, ist in der *Hydraulik* die Einheit $\frac{m^3}{s}$, üblich, die das Maß für den *Abfluß* (Q) angibt.

Der Abfluß (Q), auch Durchfluß, ist die Wassermenge, die in einer Zeiteinheit einen Abflußquerschnitt durchfließt.

Unter F [m^2] wird der vom Abfluß Q erfüllte Abflußquerschnitt (auch Durchflußquerschnitt) verstanden. Mit Geschwindigkeit wird der Weg in der Zeiteinheit $\frac{Q}{F} \left[\frac{m^3}{s \cdot m^2} = \frac{m}{s}\right]$ bezeichnet, im offenen Abflußquerschnitt mit dem Formelzeichen v, in geschlossenen Querschnitten mit c benannt.
Nach dem Fallgesetz müßte die *Fließgeschwindigkeit* fortlaufend beschleunigt werden. Der Beschleunigungskraft tritt aber in den Durchflußquerschnitten eine Kraft, die *Reibungskraft*, entgegen. Die Reibungskraft ist proportional der reibenden Fläche wie

bei festen Körpern, proportional dem Quadrat der Fließgeschwindigkeit und proportional einem Reibungsbeiwert (c)$\left[\frac{t \cdot s^2}{m^4}\right]$.

Die reibende Fläche der festen Umfassung wird mit benetztem Umfang U [m²] bezeichnet.

> **Unter Gefälle ist der lotrechte Höhenunterschied in m zwischen zwei Punkten (Wasserspiegel oder Sohle), bezogen auf deren horizontale Projektion und ihren Abstand, zu verstehen.**

Das Gefälle hat auf die Einheit 1 m bezogen das Formelzeichen I.

> **Das Verhältnis von Abflußquerschnitt zu benetztem Umfang ist der hydraulische Radius (R) $R = \frac{F}{U}$ [m].**

Dem hydraulischen Radius kommt in den Fließformeln große Bedeutung zu. R kann bei gleicher Querschnittsgröße verschiedene Werte haben. Der *günstigste* Querschnitt ist der mit den *geringsten* Reibungsverlusten.

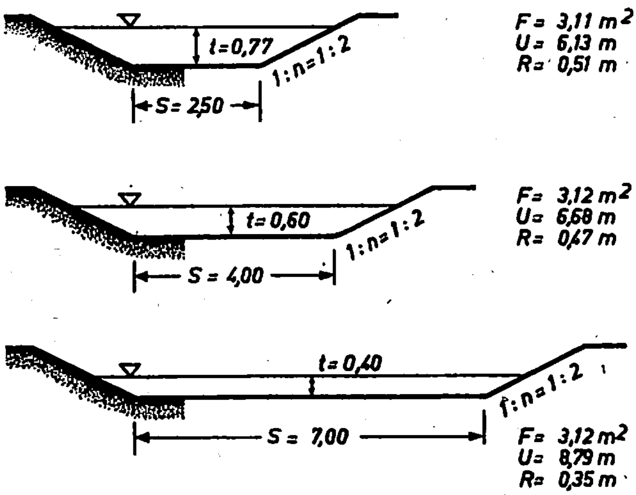


Abb. 9
Einfluß des Querschnitts auf R

S = Sohlbreite
t = Wassertiefe
F = Abflußquerschnitt
U = benetzter Umfang
R = hydraulischer Radius

2.4.2. Strömungsverhältnisse

Bei der Berechnung der Strömungsverhältnisse ist zu unterscheiden zwischen *offenen Gerinnen*, *Freispiegelleitungen* (geschlossenen) und *Druckrohrleitungen*. Die Formelberechnungen werden im Abschnitt 2.5.3., S. 77 behandelt. Beim Strömen bzw. Fließen werden weiter unterschieden:

- stationäres (zeitlich gleichbleibendes) Strömen,
- instationäres (zeitlich veränderliches) Strömen,
- laminares Strömen,
- turbulentes Strömen.

Bei *stationärem Fließen* bleibt im betrachteten Abflußquerschnitt F der Durchfluß Q im Zeitabschnitt gleich ($\frac{Q}{F} = v$); das Fließbild ändert sich nicht. Wechselt der Fließzustand von F zu F_1 und von Zeit zu Zeit, wie z. B. bei ansteigendem Hochwassser oder plötzlichem Ablassen von Stauflächen, dann ist der Fließzustand *instationär.*

Die Fließbewegung kann auch *verzögert* oder *beschleunigt* sein. Ist der Abfluß Q oberhalb einer Stauanlage konstant, dann ist infolge des Rückstaues $F_u > F_o$; da $\frac{Q}{F_u} = \frac{Q}{F_o}$ bleibt, wird $v_u < v_o$. Bei beschleunigter Bewegung ist es umgekehrt.

In der Strömungslehre wird von *Strombahnen* und *Stromlinien* ausgegangen, die bei stationärem Fließen identisch sind. Auch wird unterschieden zwischen:

- eindimensionaler Bewegung,
- zweidimensionaler Bewegung der Flüssigkeitsteilchen.

Das Problem ist einfacher zu verstehen, wenn von der Annahme ausgegangen wird, daß die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen in parallelen Ebenen vor sich geht. Auf diesem Bewegungszustand baut das Hauptgebiet der technischen Hydraulik auf.

Um eine Flüssigkeit, Teile derselben oder einen Körper in der Flüssigkeit zu bewegen, bedarf es einer *Kraft*, die die Widerstände der Reibungskräfte überwindet. Die durch die Bewegung erzeugte *kinetische Energie* muß nach dem Energiesatz „Kraft mal Weg" erzeugt werden. Sie muß größer sein als die Widerstandskräfte, um die Fließbewegung aufrechtzuerhalten.

> Die Größe des Widerstandes gegen feste Umfassungskörper hängt von der Dichte der Flüssigkeit, in gewissen Bereichen von der Fließgeschwindigkeit und auch von der Querschnittsfläche bzw. deren Formgestaltung ab.

Diese Tatsache läßt sich an bewegten Körpern beweisen, die in Flüssigkeiten eingetaucht sind. Die Widerstandskraft wird dabei nach der Formel (nach Newton) berechnet: $P_R = \frac{\xi \cdot \gamma}{2} \cdot v^2 \cdot F$. Darin ist F der Querschnitt des eingetauchten Körpers, v die Geschwindigkeit des Körpers und ξ der sogenannte Widerstandsbeiwert, eine empirisch ermittelte Konstante.

Der verschiedene innere Widerstand von Flüssigkeiten, erzeugt durch die innere Reibung, ist nicht der verschiedenen Dichte, sondern der Zähigkeit zuzuschreiben, so daß vom *Zähigkeitswiderstand* gesprochen wird. Dieser Teil des Widerstandes, der in idealen Flüssigkeiten nicht auftritt und früher in der angewandten (technischen) Hydraulik auch vernachlässigt wurde, findet heute in der Rohrhydraulik große Beachtung. Die Erfahrung hat auch gelehrt, daß

> der Zähigkeitswiderstand umso mehr der Geschwindigkeit proportional wird, je kleiner die Geschwindigkeit ist.

In einem Geschwindigkeitsbereich, der dem linearen Geschwindigkeitsgesetz des Widerstandes entspricht, ist nach Beobachtungen der Widerstand dem Zähigkeitsmaß η der Flüssigkeit proportional.

2.4.2.1. Laminarströmung

In der Strömungslehre wird von Schicht- oder Laminarströmung (lámina = Blatt) gesprochen, wenn die einzelnen infinitesimal (ins unendlich kleine gehenden) dünnen Flüssigkeitsschichten neben- und übereinander gleiten, ohne sich weder zu durchsetzen noch zu vermischen.

Dabei können die Geschwindigkeiten gleich oder verschieden groß sein. Ist die Geschwindigkeit der Gleitschichten untereinander verschieden, dann wirken sie durch die schon erwähnten inneren Reibungskräfte aufeinander ein. Die *Reibungskraft* läuft in diesem Fall parallel der Geschwindigkeit und wirkt auf die Relativbewegung der Schichten hemmend ein. Abgeleitet von dem Newtonschen Gesetz kann die Größe (η) in ihrer Wirkung senkrecht zur Strömung bestimmt werden. Das bedeutet, daß die Reibungskraft nicht allein von der Geschwindigkeit v, sondern auch von dem *Geschwindigkeitsgefälle* $\frac{d_v}{d_n}$, das senkrecht zur Strömung herrscht, abhängt. Dabei wird nur dann von einer Reibung gesprochen, wenn sich die Schichten relativ, d. h. zu einem als ruhend bestehenden Bezugssystem (Rohrwandungen) bewegen.

Der Proportionalitätsfaktor η (Zähigkeit) ist der Koeffizient der inneren Reibung und hat die Einheit 1 kg $m^{-1} \cdot s^{-1}$; häufig wird auch der zehnte Teil dieser Einheit (Poise) benutzt $= \frac{1}{10} \cdot$ kg $m^{-1} \cdot s^{-1}$.

Bei *langsamer* Strömung durch ein Rohr fließt das Wasser mit *konstanter* Geschwindigkeit. Daraus kann geschlossen werden, daß sich Druckkraft (Schwerkraft) und Reibungskraft ausgleichen. Da die äußere Flüssigkeitsschicht aber an der Rohrwand haftet (Adhäsion), wird diese Anziehung mit der zunehmenden Entfernung von der Wand geringer und damit die Geschwindigkeit der entfernteren Bahnlinien größer. Bei einem runden Rohr ergeben sich dabei offensichtlich zylindrische Bewegungsschichten, und zwar koaxiale zum Rohr, woraus sich darstellerisch ein parabolisches Fließprofil ergibt (siehe Abb. 10a, S. 73).

2.4.2.2. Turbulenzströmung

Eine Turbulenzströmung ist gegeben, wenn in einer in einem Rohr bewegten Flüssigkeit Wirbel entstehen und die Flüssigkeitsbahnen dadurch nicht nur verformt werden, sondern sich auch drehen.

Um den Wirbelraum schließt sich in der Regel außen ein Bereich mit einer Zirkulationsströmung an. In diesem Bereich der Zirkulationsströmung nimmt die *Lineargeschwindigkeit* proportional dem Achsabstand ab. Daraus ergibt sich, daß der Ursprung der Wirbel vornehmlich dort liegt, wo die Reibungskräfte in der Flüssigkeit sehr groß sind, was vor allem in der dünnen Grenzschicht an den Rohrwandungen der Fall ist. (Obgleich bei der Laminarströmung die Flüssigkeitsschichten zwar auch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aneinander vorbeigleiten, ist diese Strömungsart als wirbelfrei zu bezeichnen.)

Bei der *turbulenten* Strömung liegen die Stromlinien nicht glatt nebeneinander, sondern sie sind unregelmäßig und laufen ineinander über, woraus folgt, daß die beiden Strömungsarten verschiedenen Gesetzen folgen. Während die Geschwindigkeit v bei der laminaren Strömung in den koaxialen Schichten ohne Fädenvermischung stetig zunimmt, entwickelt sich bei der *Turbulenz* eine turbulente (wirbelnde) Kernströmung.

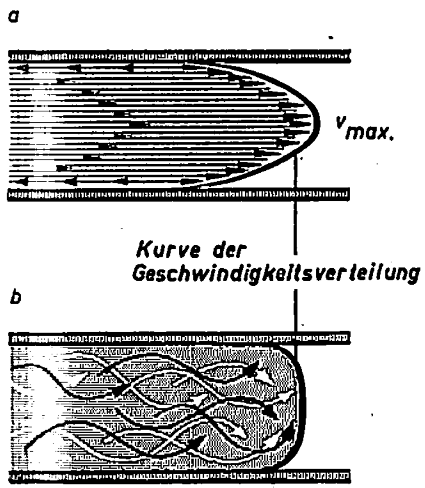


Abb. 10
Darstellung der laminaren Strömung (a) und der turbulenten Strömung (b)

2.4.3. Die Reynoldsche Zahl

Der Widerstandsbeiwert ξ in der Newtonschen Widerstandsgleichung kennzeichnet insbesondere die Form des Körpers und die Strömungseigenschaften der Flüssigkeit.

Dieser Wert ist eine dimensionslose Größe. ξ ist für zwei verschiedene Flüssigkeiten gleich, wenn sie unter sonst gleichen Umständen auf dieselbe kinematische Zähigkeit (Quotient von η und ρ) bezogen sind. Der Wert ξ basiert mithin auf dem Ähnlichkeitsgesetz für Flüssigkeitsströmungen. Reynolds entdeckte, daß ξ unveränderlich bleibt, wenn die dimensionslose Größe $Re = \frac{r \cdot v}{\nu}$ unveränderlich gehalten wird (r = Rohrradius, v = Geschwindigkeit, ν = kinematische Zähigkeit).
Der Beiwert ξ hängt also von der dimensionslosen Größe $Re = \frac{\gamma \cdot l \cdot v}{\eta}$ ab, wobei l eine charakteristische Länge ist und gleich 1 gesetzt werden kann (Re ist die Reynoldsche Zahl).

Ist die Reibung im Verhältnis zur kinetischen Energie groß, dann ist die Reynoldsche Zahl klein und die Strömung laminar. Bei geringer Reibung wird die Reynoldsche Zahl groß, und die Strömung tritt in den turbulenten Bereich ein.

Die kritische Geschwindigkeit (v_k) liegt

in *offenen Gerinnen* bei $Re_k = \frac{v \cdot R}{\nu} = 580,$

in *geschlossenen Druckrohrleitungen* bei $Re_k = \frac{v \cdot D}{\nu} = 2300$ und

wird für *Freispiegelrohrleitungen* mit $Re_k = \frac{v \cdot D}{\nu} = 1200$ angesetzt.

2.4.4. Kontinuitäts- und Bernoullische Gleichung

Da bei *inkompressiblen* Flüssigkeiten die Volumenveränderung durch Druck zu vernachlässigen ist, folgt, daß in einem Rohrsystem mit verschiedenen Querschnitten aber gleichbleibender geodätischer Höhe lediglich *verschiedene* Geschwindigkeiten bei gleichen Flüssigkeitsdrücken bestimmend sind.
Tritt in den Rohrquerschnitt (Abb. 11) F_1 eine Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit v_1 ein, so muß das ausfließende Q aus F_2 mal v_2 demjenigen des einfließenden gleich sein. Es gilt die Kontinuitätsgleichung $F_1 \cdot v_1 = F_2 \cdot v_2$ oder anders ausgedrückt

$$v = \frac{Q}{F} \left[\frac{m^3}{s \cdot m^2} = \frac{m}{s}\right].$$

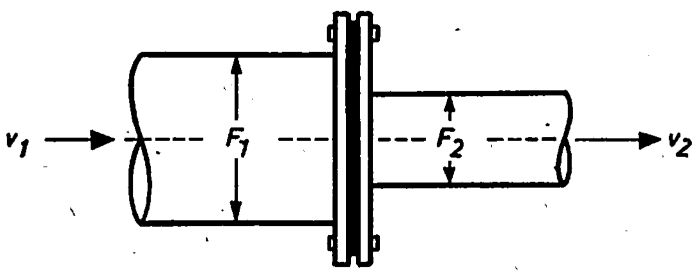


Abb. 11
Darstellung der Kontinuitätsgleichung — da $Q = F \cdot v$ ist, ergibt sich, daß v_2 größer ist als v_1

In einem geschlossenen Kreislauf verhalten sich die Strömungsgeschwindigkeiten umgekehrt wie die Querschnitte.

Fließt unter diesen Bedingungen ein Flüssigkeitsstrom durch ein Rohrsystem, dann heißt die Bewegung *stationäre Strömung*. Ihre Kennzeichnung besteht darin, daß ihr Bewegungszustand in jedem Punkt des bewegten Systems stets derselbe ist.
Für ideale (reibungslose) Flüssigkeiten gelten:

- Kontinuitätsgleichung Q (Durchfluß) $= F_1 \cdot v_1 = F_2 \cdot v_2$,
- Bernoullische Gleichung $\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\nu} + z =$ konstant (z = Höhe über der Nullebene).

Die *Bernoullische Gleichung* hat in dieser Form Gültigkeit für *ideale* Flüssigkeiten, wobei stationäres Fließen und flüssigkeitserfüllter Raum (Kontinuum) vorausgesetzt werden. Es gilt der Satz:

Bei der Bewegung einer idealen Flüssigkeit ist die Summe aus Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2g}$, Druckhöhe $\frac{p}{\gamma}$ und geodätischer Höhe z konstant.

Das Gesetz der Fallhöhe lautet $\left(\text{freier Fall } v = \sqrt{2gh}\right)$.

Wiederholt sei hier nochmals die Formelzeichenbedeutung:

Q (Durchfluß) $\left[\frac{m^3}{s}\text{ auch } m^3/s\right]$, v (Geschwindigkeit) $\left[\frac{m}{s}\text{ auch } m/s\right]$, g (Erdbeschleunigung) $\left[\frac{m}{s^2}\right]$, p (Druck) $\left[\frac{t}{m^2}\right]$, γ (Wichte) $\left[\frac{t}{m^3}\right]$, t (Zeit) [s], z, auch h_g (geodätische Höhe) [m], s (Weg) [m], h, auch $h_{ges.}$ (Fallhöhe) [m].

In der Bernoullischen Gleichung für die natürlich ankommende Flüssigkeit müssen die *Reibungsverluste* im bewegten System berücksichtigt werden, d. h. die Energieumwandlung, die praktisch als Verlust oder Aufzehrung verlorengeht.

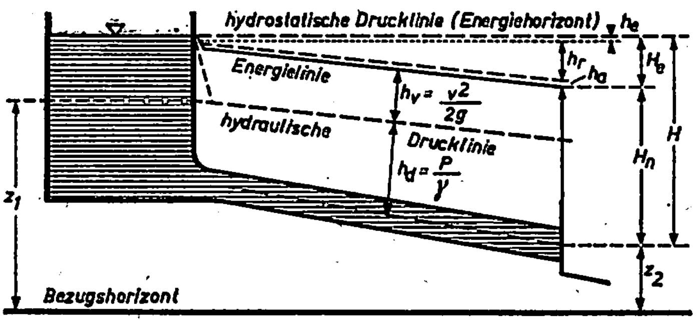
Dieser Verlust (Reibungsverlust) h_r [m] ergibt, daß außer $h_v = \frac{v^2}{2\,g}$ noch h_r mit in die ursprüngliche Gleichung aufzunehmen ist. Die h_r-Werte in einem verzweigten Rohrsystem setzen sich aus den Rohrreibungsverlusten (diese machen den Hauptteil aus) und aus einer Summe von Reibungswiderständen, wie Eintritts-, Krümmungs-, Austritts-, Schieberverlusten usw., zusammen. Diese Summe ist als *Gesamtdruckhöhenverlust* anzusetzen. Die Bernoullische Gleichung für die *wirkliche* Flüssigkeit lautet daher:

$$z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v^2}{2\,g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2\,g} + H_E = H.$$

In dem energetischen Darstellungsbild kann nur davon ausgegangen werden, daß nach dem Energiesatz nie Energie verlorengehen, sondern nur umgewandelt werden kann.

Die zur Überwindung der Reibungswiderstände aufzuwendende Arbeit ist jedoch als solche umgewandelt und praktisch verlorengegangen. Ausgehend vom Energiehorizont (hier auch als hydrostatische Drucklinie bezeichnet), sind die Gesamtdruckhöhenverluste H_E vom Energiehorizont abzusetzen, woraus sich die *Energielinie* (bei stationärer Bewegung = dynamische Drucklinie) ergibt. Der Energielinie schließt sich die zur

Abb. 12
Darstellung der Bernoullischen Gleichung



Fließbewegung erforderliche $h_v = \frac{v^2}{2g}$ (Geschwindigkeitshöhe) an. In der Darstellung ist darunter die parallel zur Rohrachse mit dem Abstand h_v verlaufende hydraulische Drucklinie angegeben.

2.5. Die Formeln zur Berechnung der Geschwindigkeit

2.5.1. Die „klassische" Geschwindigkeitsformel

Werden in die Formel für die Geschwindigkeit $v = \sqrt{g \cdot h}$ anstelle der Fallhöhe (h) das Gefälle $I = \frac{1}{l}$ (l = spezifische Länge = 1 m) und $R = \frac{F}{U}$ (hydraulischer Radius) und der Reibungsbeiwert k eingesetzt, ergibt sich die klassische Formel $v = k \cdot \sqrt{R \cdot I}$.

I ist bei *offenen* Gewässern das *Wasserspiegelgefälle* (häufig wird auch das Sohlengefälle als solches angesprochen), bei *geschlossenen* die Drucklinie, das *Druckgefälle.*

Der Beiwert k hat die Dimension einer Wurzel aus der Beschleunigung ($k = m^{0,5} s^{-1}$). k ist nicht ganz dimensionslos und daher immer so einzusetzen wie alle anderen Werte der benutzten Formeln. Gilt für diese die Metereinheit, so ist k auch in Metern anzusetzen.

2.5.2. Die Formeln zur Weiterentwicklung des k-Wertes

In der weiteren Entwicklung der Formel $v = k \cdot \sqrt{R \cdot I}$ galt die Forschungsarbeit vor allem dem k-Wert. *Ganguillet* und *Kutter* stellten folgende Formel auf:

$$k = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{1}}{1 + 23 + \frac{0{,}00155 \cdot n}{1 \cdot \sqrt{R}}}$$

Hierin ist n der von der Wandrauhigkeit abhängige *Beiwert.* Der n-Wert ist mithin örtlich einzuschätzen, der k-Wert aber außer von n noch von R und I abhängig. Diese Formel ist sehr umständlich zu berechnen und wird heute kaum noch angewendet.

Kutter entwickelte die sogenannte Kuttersche Formel, auch kleine Kutterformel genannt. Sie lautet: $k = \frac{100 \cdot \sqrt{R}}{m + \sqrt{R}}$. Anstelle von n tritt m als Beiwert mit der gleichen Funktion. Zwischen m und n besteht die Gleichung $m = 100\,n - 1$; m hat die Dimension $m^{0,5}$, die konstante Zahl ist $100\left[\frac{m \cdot \frac{1}{2}}{s^2}\right]$. Diese Formel wird heute noch bei *Freispiegelrohrleitungen* angewendet.

Die Formel von *Bazin* $k = \frac{87}{1+\frac{\gamma}{R}}$ entspricht etwa der Kutterformel; der Wert γ ist der Rauhigkeitsgrad der Wandungen. Die Dimensionen sind $\gamma\,[m^{1/2}]$, $87\,\left[\frac{m^{1/2}}{s^2}\right]$.

Sie wurde früher hauptsächlich bei städtischen Kanalisationen mit vielprofiligen gemauerten oder betonierten Leitungen zugrunde gelegt.
In den in diesem Abschnitt bisher genannten Formeln sind $R^{1/2} \cdot I^{1/2}$ und k als Rechengröße mit Beiwerten eingesetzt. Abweichend davon entwickelte *Manning* die Formel $v = k \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$, die heute verbreitet angewendet wird. In ihr hat k die Dimension $[m^{1/3} \cdot s^{-1}]$; k steht in dimensionsloser Beziehung zu n, wie $k = \frac{1}{n}$.

Unter Mitwirkung von *Gauckler* und *Strickler* sammelte *Manning* Erfahrungswerte für k_s, die ohne Formelberechnung eingesetzt werden können, wodurch die Rechnung sehr vereinfacht ist. In Tabelle 8 sind Auszüge der Beiwerte angegeben:

Tabelle 8

	Ganguillet und Kutter n	Kutter m	Bazin γ	Manning-Strickler k_s
Offene Gerinne				
Erdprofile — regelmäßig, keine Wasserpflanzen	0,025	1,75	1,50	38
Erdprofile — mit Rasen und wenig Wasserpflanzen	0,030	2,00	1,75	33—30
Erdprofile — unregelmäßig und Wasserpflanzen	0,035	2,25	2,00	29—27
Kanäle — Bruchsteine	0,016	0,30—0,35	0,65	70—80
Kanäle — glatte Wandungen	0,012	0,25	0,16	80—90
Geschlossene Leitungen				
Dränrohre	0,015	0,30	0,25	70
Gußrohre, neu	0,012	0,20	0,06	90
Steinzeugrohre, neu	0,016	0,25	0,16	80
Zementrohre mit Fugen	0,018	0,35		70—75
Schmutzwasserleitungen	0,017	0,30	0,20	75—80

2.5.3. Anwendung der Fließformeln

2.5.3.1. Berechnung der Wasserläufe

Zur Berechnung der *Geschwindigkeit* und des *Abflusses* der Wasserläufe wird der Durchflußquerschnitt örtlich aufgenommen und auf Millimeterpapier kartiert. Die Wasserquerschnittsfläche wird in der Regel planimetrisch ermittelt; sie kann auch nach Dreiecken und Trapezen errechnet werden.

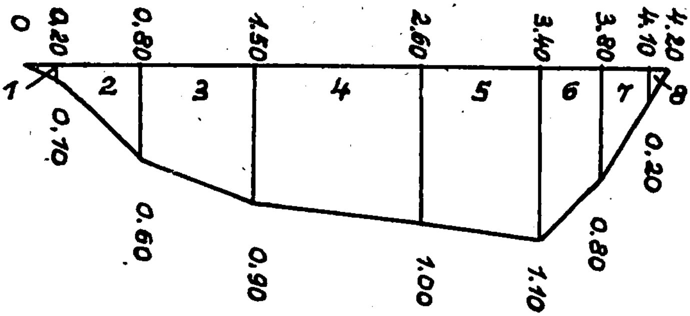


Abb. 13
Unregelmäßiger Querschnitt

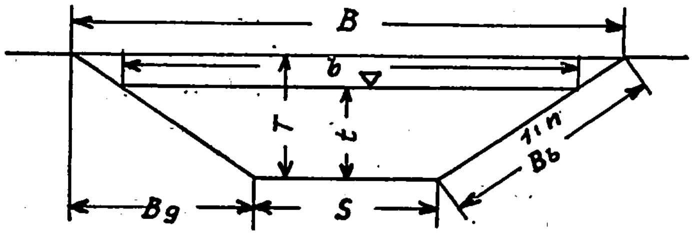


Abb. 14
Trapezquerschnitt

B = obere Breite
b = Breite Wasserspiegelhöhe
Bb = Böschungslänge
Bg = Abstandsbreite von der Sohle
T = Gesamttiefe des Querschnitts
t = Wassertiefe
s = Sohlbreite

Beispiel

Gesucht werden:

Fließgeschwindigkeit v; Abflußmenge Q

Gegebene Werte

Rauhigkeitsbeiwert $k_s = 30$
Abflußquerschnitt $F = 3{,}170\ m^2$; benetzter Umfang $U = 5{,}073\ m$

hydraulischer Radius $R = \frac{F}{U} = \frac{3{,}170}{5{,}073} = 0{,}65\ m$

$h = 0{,}22\ m$, $l = 340\ m$, daraus ergibt sich das Gefälle
$I = \frac{h}{l} = \frac{0{,}22}{340} = 0{,}00065 = 0{,}65\ ‰$

Die *Fließgeschwindigkeit* wird errechnet nach der Formel

$$v = k_s \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$
$$v = 30 \cdot 0{,}65^{2/3} \cdot 0{,}00065^{1/2}$$
$$v = 30 \cdot 0{,}735 \cdot 0{,}0255 = \underline{\underline{0{,}56}}\ m/s$$

Die *Abflußmenge* wird errechnet nach der Formel

$$Q = F \cdot v$$
$$Q = 3{,}170 \cdot 0{,}56 = \underline{\underline{1{,}775}}\ m^3/s$$

2.5.3.2. Berechnung einer Freispiegelrohrleitung

Gesucht werden die *Fließgeschwindigkeit v* und der *Durchfluß Q*.
Gegeben sind:

Rohrdurchmesser D = 0,40 m
Rauhigkeitsbeiwert k_s = 80 (nach *Manning-Strickler*)
Durchflußquerschnitt F = 0,1257 m^2
benetzter Umfang U = 1,257 m
hydraulischer Radius $R = \frac{F}{U} = \frac{0,1257}{1,257} = 0,10$ m
Gefälle I = 0,00085 = 0,85 ‰

Berechnung:

$$v = k_s \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$
$$v = 80 \cdot 0,10^{2/3} \cdot 0,00085^{1/2}$$
$$v = 80 \cdot 0,215 \cdot 0,029 = 0,4988 \approx 0,50 \text{ m/s}$$

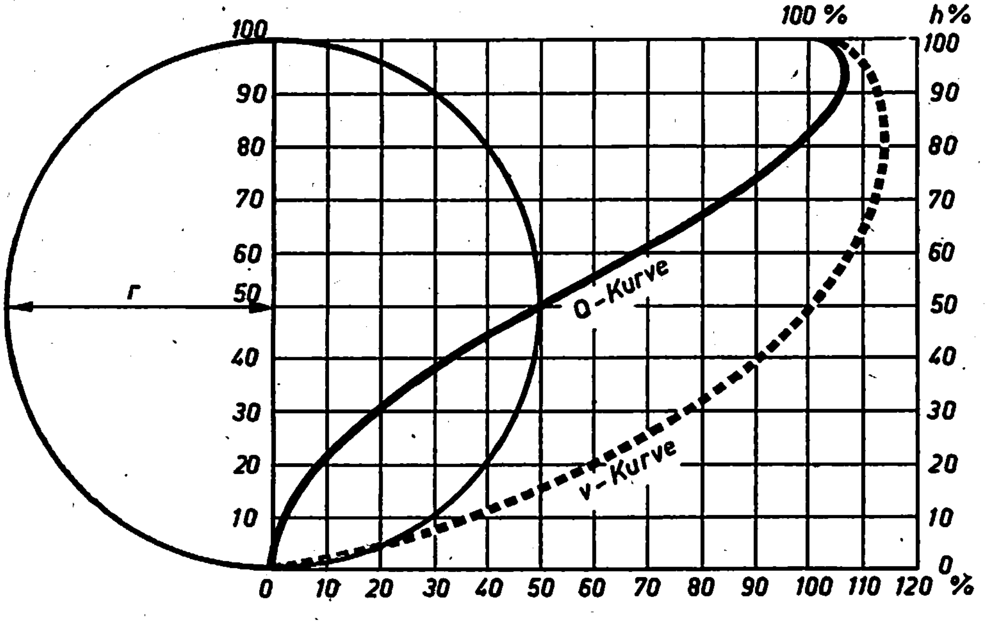
$$Q = F \cdot v$$
$$Q = 0,1257 \cdot 0,50 = 0,063 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.5.3.3. Berechnung von Rohrdurchlässen

In einem *Rohrdurchlaß* ist die Wasserführung von der Füllhöhe abhängig.

Bei voll gefüllten Rohren ist der benetzte Umfang U am größten und die Rauhigkeit am geringsten.

Abb. 15 Verhalten des Abflusses (Q-Kurve) und der Geschwindigkeit (v-Kurve) bei unterschiedlicher Füllhöhe



Wird bei 100 % Füllhöhe Q = 100 gesetzt, sind bei

97,5 % Füllhöhe Q = 106,8,
95,0 % Füllhöhe Q = 107,4,
92,5 % Füllhöhe Q = 107,6,
90,0 % Füllhöhe Q = 106,5,
80,0 % Füllhöhe Q = 97,6.

Das bedeutet, daß bei einer *Füllhöhe von 92,5 %* die *günstigsten* Abflußbedingungen gegeben sind.
Andererseits wird die Füllhöhe durch die *Wassertiefe* des offenen Wasserquerschnittes bestimmt, sofern kein Aufstau vorgesehen ist.

Beispiel für die Berechnung eines Rohrdurchlasses

Ein offener trapezförmiger Graben mit einer Sohlenbreite S von 0,80 m, einer Wassertiefe t von 0,60 m, einem Böschungsverhältnis von 1:1,5 und einem Gefälle von I = 0,55 ‰ hat

eine Fließgeschwindigkeit von 0,34 m/s und
einen Abfluß von 347 l/s.

Ein Rohr von

1,00 m Durchmesser führt bei 60 % Füllung 386 l/s
1,20 m Durchmesser bei 50 % Füllung 467 l/s
0,80 m Durchmesser bei 75 % Füllung 287 l/s

Aus der Gegenüberstellung der angegebenen Zahlenwerte ergibt sich, daß für den Rohrdurchlaß ein Rohr mit 1,00 m Durchmesser zu wählen ist.

2.5.4. Druckrohrleitungen (Rohrhydraulik)

2.5.4.1. Formeln

Die Laminarströmung und die Turbulenzströmung (s. Abschnitte 2.4.2.1., S. 72, und 2.4.2.2., S. 72) lassen sich nach den klassischen Formeln nicht berechnen. Zwar wurden in der Vergangenheit und teils auch noch heute die auf der Grundlage von $k\sqrt{R \cdot I}$ bzw. $k_s \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$ für v basierenden Gleichungen auch für Druckrohre angewendet. Da hierbei jedoch das Gefälle I nicht angesetzt werden kann, steht die Berechnung des Druckverlustes mit der Reibungsverlustzahl λ als Beiwert zu $\frac{v^2}{2g}$ im Vordergrund. Dabei gilt die Beziehung $I = \frac{v^2}{2\,g} \cdot \frac{1}{D}$. Die gebräuchliche Maßeinheit für λ $\left[\frac{1}{m}\right]$ zeigt, daß unter l die spezifische Länge 1,0 m angesprochen wird.

Es wird bei den Formeln nach *Kutter* und *Manning-Strickler* oft so verfahren, daß die Beiwerte k bzw. k_s zur Bestimmung von $\lambda = \frac{8g}{k^2}$ $(8\,g = 9{,}81 \cdot 8 = 78{,}48)$ gesetzt werden. Häufig ist bisher, namentlich besonders für Leichtmetallrohre, in der Beregnungstechnik die Formel von *Lang* mit der Beziehung $\lambda = a + \frac{0{,}0018}{\sqrt{v \cdot D}}$ angewendet worden.

Der Wert a ist für

- geschweißte Rohre 0,0193,
- für Betonrohre 0,014.

Die genannten Formeln gehen davon aus, daß v nicht als Formelwert errechnet, sondern als Quotient $\frac{Q}{F}$ bestimmt werden muß.

In der Turbulenztheorie wird von der Grundlage ausgegangen, daß der Reibungsverlust nicht allein von der Wandrauhigkeit abhängt, sondern auch von der *Art der Kern- oder Koaxial-Strömung*. Das geschieht in der Weise, daß in den Formeln für λ neben der Widerstandszahl k auch die Reynoldsche Zahl aufgenommen wird. Es werden dabei unterschieden:

I. hydraulisch glatter Bereich (nach Formel von *Prandtl-v. Karman*),
II. rauher Bereich (nach Formel von *Prandtl-v. Karman*),
III. Übergangsbereich (nach Formel von *Colebrook*).

Diese lautet:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}71\,D}\right).$$

2.5.4.2. Die Erfassung der Wandrauhigkeit

In der Turbulenztheorie tritt k nicht als Geschwindigkeitsbeiwert, sondern als *Widerstandszahl*, in der Einheit [m] oder [mm] auf. k ist das geometrische Maß für die *absolute Rauhigkeit*. Da bei der Erfassung der absoluten Rauhigkeit die Ähnlichkeit eine bedeu-

Tabelle 9

Wandrauhigkeit	Beispiele	k-Wert [mm]
Nach *Kirschner*		
1. besonders glatt, ideal glatt	Glas und Kunststoffrohre	bis 0,002
2. technisch glatt	wie 1, jedoch nicht so sorgfältig hergestellt, Asbestzementrohre, nahtlose Stahlrohre	bis 0,05
3. mäßig rauh	Schleuderbeton-,	0,20—0,25
	Steinzeugrohre, innen asphaltierte, bitumierte Rohre	bis 0,50
4. rauh	wie 3, jedoch mit leichten bis mittleren Verkrustungen, Beton ohne besondere Güte	0,5—2,0
5. sehr rauh und unregelmäßig	schlechte Ausführung von 4, mit Stoßfugen und Verkrustungen	1,0—20
Nach *Wertz*		
1. glatt (glatter Bereich)	Kunststoffdränrohre	0,05
2. zwischen glatt und rauh (Übergangsbereich)	Tonrohrdränrohre	0,65

tende Rolle spielt, wird nicht die absolute Rauhigkeit als bestimmend angesprochen, sondern k wird auf den *Durchmesser* bezogen und daraus bestimmt. Diese Beziehung wird als *relative Rauhigkeit* $\varepsilon = \frac{k}{D}$ bezeichnet. ε ist dimensionslos. D, k und Re sind in gleichen Längeneinheiten einzusetzen.

Die Zusammenstellung auf Seite 81 zeigt die Schwierigkeit der physikalischen und technischen Erfassung des k-Wertes.
Für die Ermittlung von λ stehen Tabellenwerke, Nomogramme und graphische Kurven zur Verfügung.