

Zusammenfassung

Die hydrostatische Leistungsübertragung nutzt das *Druckmittel „Flüssigkeit“* als *Energieträger*. Dessen Transport unterliegt den Gesetzen der Hydromechanik für ruhende und strömende Flüssigkeiten. Zu den grundlegenden Gesetzen zählen jenes des gleichverteilten Drucks (Pascal), des Weiteren die Erhaltungssätze des Massenstroms und der Energie (Kontinuität, Bernoulli). Erweitert man die Energiebilanz der strömenden Flüssigkeit, gelangt man von der ortsabhängigen (stationären) Strömung zur zusätzlich zeitabhängigen (instationären), von der inkompressiblen und reibungsfreien (idealen) Flüssigkeit zur kompressiblen und zähen (newtonschen). Im Besonderen wird die Innenströmung in Rohren (Strömungsformen, Druckverluste) sowie jene in Funktionsspalten (Parallel-, Ringspalt) und Einbauteilen (Drossel, Blende) behandelt. Um die Druckflüssigkeit beurteilen zu können, sind kennzeichnende *physikalische Eigenschaften* wie Dichte, Viskosität und Luftabscheidevermögen zu definieren. In hydraulischen Anlagen verwendete Druckflüssigkeiten sind darüber hinaus durch *spezifische Angaben* (Stoffart, Viskositätsklasse) und *physikalische Kennwerte* zur Qualitätsbewertung (Mindestanforderungen) zu kennzeichnen. Neben den *Mineralölen* werden die für spezifische Umgebungsanforderungen zu verwendenden *schwerentflammbaren* und *umweltverträglichen Druckflüssigkeiten* gesondert behandelt. Die Mindestanforderungen erfassen den Anlieferungszustand von Druckflüssigkeiten, bewerten jedoch nicht deren veränderte Eigenschaften durch Gebrauch. Eigenschaftsänderungen verursacht neben *Alterung* die *Verschmutzung*, deren Arten abschließend dargestellt werden.

2.1 Grundlagen der Hydromechanik

In pneumatischen Anlagen dienen gasförmige Fluide, in hydraulischen Anlagen flüssige Fluide als Energieträger. Nachfolgend werden Strömungsvorgänge für flüssige Energieträger behandelt, wobei vereinfachtes rheologisches Stoffverhalten (grch. rhein: fließen, Rheologie: Lehre vom Deformations- und Fließverhalten der Stoffe) vorausgesetzt wird (ideale und newtonsche Flüssigkeiten, DIN 1342 Teil 1 und 2). Das Fluid wird hier Druckflüssigkeit (kurz: Flüssigkeit) genannt. In hydraulischen Anlagen eingesetzte Flüssigkeiten sind jedoch vom idealisierten Verhalten (chemisch wie rheologisch) abweichende Stoffe (nichtnewtonsche Flüssigkeiten, DIN 1342 Teil 3). Betrachtet man das reale Stoffverhalten, wird das Fluid als Hydraulikflüssigkeit (DIN 24320), solches auf Mineralölbasis auch als Hydrauliköl (DIN 51524) bezeichnet, Abschn. 2.3.3, 2.3.1.

Aus der **Fluidmechanik** [1] (Strömungsmechanik), also der auf die gesamte Stoffklasse der Fluide sich beziehenden Mechanik, werden nachfolgend Grundprinzipien und Strömungsvorgänge für Flüssigkeiten behandelt. Die **Hydromechanik** gliedert wie folgt:

Hydrostatik, die Lehre vom Gleichgewicht ruhender Flüssigkeiten.

Hydrodynamik, die Lehre vom Gleichgewicht strömender Flüssigkeiten.

2.1.1 Gesetze der Hydrostatik: *Pascalsches Gesetz, Kompressibilität, Schallgeschwindigkeit*

Das Gesetz von Pascal: Die Wirkung einer Kraft auf eine ruhende Flüssigkeit pflanzt sich als Druck nach allen Richtungen innerhalb der Flüssigkeit in gleicher Größe fort. Hierbei bleibt das Flüssigkeitsgewicht unberücksichtigt. Die auf die benetzte Fläche bezogene Kraft ist senkrecht zur Benetzungsfläche gerichtet. Der Pressdruck oder hydrostatische Druck wird mit einem Manometer angezeigt.

Hydrostatischer Druck: $p = F/A$

Druckübersetzer, hydraulische Pressen und entlastete Ventilkolben sind Anwendungsbeispiele für das Gesetz von Pascal (Abb. 2.1).

Der Gewichts- oder Schweredruck. Eine Flüssigkeit übt auf den Boden ihres Gefäßes infolge ihres Gewichts im Schwerfeld eine Kraft aus, die auf die **Fläche** bezogen wird. Für die Flüssigkeitsgewichtskraft F_G gilt

$$F_G = V\rho g = Ah\rho g = pA.$$

Gewichtsdruck: $p = h\rho g$

(h Höhe der Flüssigkeitssäule, ρ Dichte der Flüssigkeit, g Fallbeschleunigung).

Bei tiefer Gefäßwandung ist der mit der Höhe h linear ansteigende Gewichtsdruck zu berücksichtigen. Im geschlossenen, unter Druck stehenden Gefäß überlagern sich Press- und Gewichtsdruck zum Gesamtpressdruck.

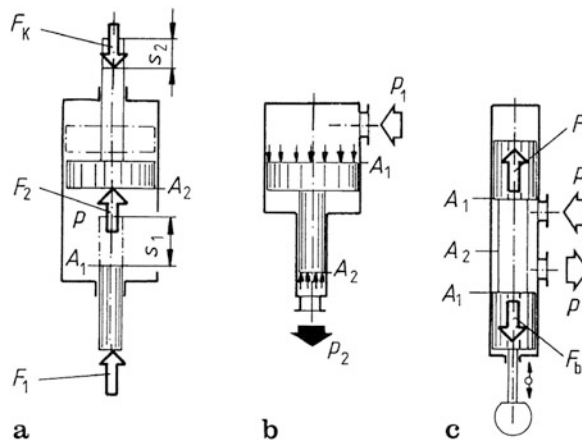


Abb. 2.1 Anwendungsbeispiele für das hydrostatische Gesetz von Pascal. Die Eigengewichte der Kolben, der Flüssigkeit sowie die Kolbenreibung sind nicht berücksichtigt. **a** Gemeinsamer Druckraum, Zweikolbensystem (Hydraulische Presse): $F_K = F_2 = F_1 A_2 / A_1$, $s_2 = s_1 A_1 / A_2$; **b** Getrennter Druckraum, Einkolbensystem (Druckübersetzer): $p_2 = p_1 A_1 / A_2$; **c** Gemeinsamer Druckraum, Einkolbensystem (Steuerkolben): $(F_b) = (A_1 - A_2)p$

2.1.1.1 Kompressibilität

Im Gegensatz zu den *Gasen als dichteveränderlichen Fluiden* können *Flüssigkeiten i. Allg. als dichtebeständige (inkompressible) Fluide* aufgefasst werden ($\rho = \text{const}$). Die zwar geringe Nachgiebigkeit von Druckflüssigkeiten darf jedoch bei großem Volumen unter hohem Druck nicht mehr vernachlässigt werden. Bei strömenden Flüssigkeiten treten Druckstoß- und Kavitationsprobleme sowie das Verhalten der Rohrleitungen hinzu, so dass die hydrostatische Energieübertragung an die *kompressible Strömung* gebunden ist.

Die Dichte von Druckflüssigkeiten hängt von der Temperatur und dem Druck ab, Abschn. 2.2.1, und damit auch das Volumen. Die Druckeinflüsse überwiegen, man bezeichnet die Volumenminderung infolge Drucksteigerung als **Kompression**. Wegen niedriger Strömungsgeschwindigkeit und hoher Druckausbreitungsgeschwindigkeit wird häufig adiabatisch-reversible (isentrop) Zustandsänderung vorausgesetzt. Man geht also von der Verdichtung einer Flüssigkeitsmenge aus, die gegenüber ihrer Umgebung wärmedicht abgeschlossen ist, so dass kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet.

Für Druckflüssigkeiten nähert sich die Adiabate sehr stark der Isochore, Abb. 2.2b, d. h., das an der Energieübertragung beteiligte Flüssigkeitsvolumen bleibt weitgehend unverändert ($\rho \approx \text{const}$). Es wird fast keine äußere Arbeit am Fluid geleistet, die übertragene Energie ist die Differenz von Ausschub- und Einschubarbeit (Verdrängungsarbeit).

Für die mathematische Behandlung benötigt man Kenngrößen, die in der Thermodynamik für isotherme Zustandsänderungen von Fluiden definiert sind und auf Abb. 2.2a entnehmbaren Beziehungen beruhen:

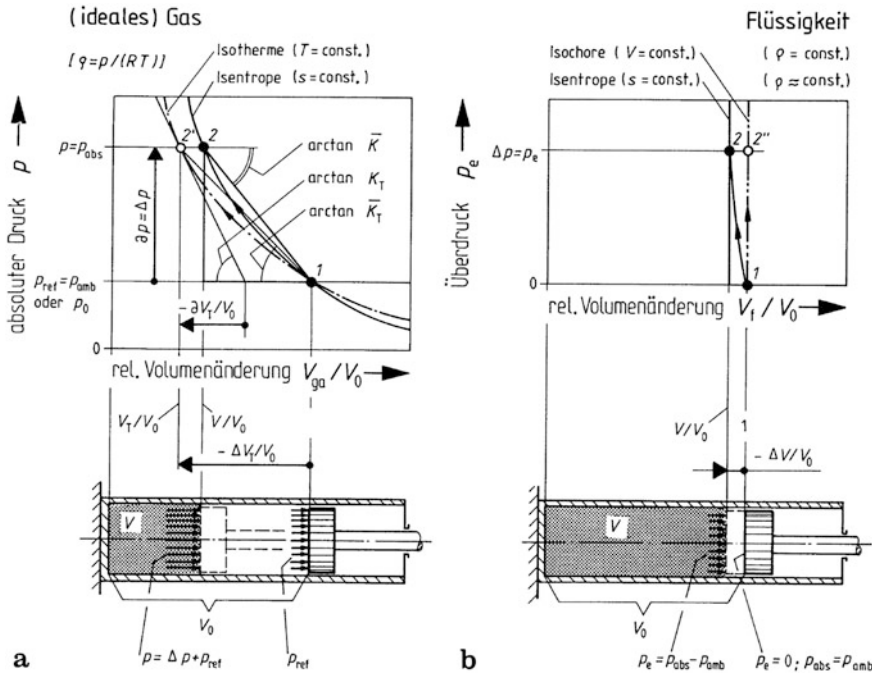


Abb. 2.2 Volumenbezogenes Zustandsdiagramm ($p, (V/V_0)$ -Diagramm) von Fluiden. **a** Verdichtung eines (idealen) Gases als dichteveränderliches Fluid des Anfangsvolumens V_0 unter Referenzdruck p_{ref} , i. Allg. Atmosphärendruck p_{amb} , nach Druckzunahme auf (absoluten) Druck ($p = p_{\text{abs}}$) bei isothermer und isentroper (adiabatisch-reversibler) Zustandsänderung, Kenngrößen für Zusammendrückbarkeit in der Fluidtechnik; **b** Verdichtung eines dichtebeständigen Fluids (ideale Flüssigkeit) des Anfangsvolumens V_0 unter Atmosphärendruck ($p_e = 0$ bar) nach Druckzunahme auf Überdruck p_e bei isochorer und isentroper Zustandsänderung ($p_e, (V/V_0)$ -Diagramm)

Mit dem spezifischen Volumen $v = V/m$ und dessen differenzieller Minderung $-\partial v = -\partial V/m$ ergibt sich für differenzielle Druckzunahme ∂p bei konstanter Temperatur T die (isothermische) Kompressibilität χ_T (oder κ)

$$\chi_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{\partial V_T}{V} \frac{1}{\partial p} \quad (\text{SI-Einheit von } \chi_T : 1/\text{Pa}). \quad (2.1a)$$

Anstelle des in der Thermodynamik bevorzugten spezifischen Volumens v bevorzugt die Fluidmechanik die Dichte ρ . Mit $v = 1/\rho$ und $\partial \rho = -\rho^2 \partial v$ folgt aus (2.1a)

$$\chi_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T = \frac{\partial \rho_T}{\rho} \frac{1}{\partial p}. \quad (2.1b)$$

Die Kompressibilität χ_T ist durch (2.1a) als die differenzielle relative Volumenminderung $-\partial V_T/V$ bzw. durch (2.1b) als die differenzielle relative Dichtezunahme $\partial \rho_T/\rho$ bei konstan-

ter Temperatur T erklärt, jeweils bezogen auf die ursächlich differenzielle Druckänderung ∂p . Der Kehrwert der Kompressibilität ist der in der Fluidtechnik gebräuchliche *isothermische Kompressionsmodul*

$$K_T = 1/\chi_T = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = -\frac{V}{\partial V_T} \partial p \quad (\text{SI-Einheit von } K_T : \text{Pa}), \quad (2.2a)$$

der als *wahrer Kompressionsmodul* (Tangentenmodul) bezeichnet wird und z.B. zur Untersuchung von Schwingungen in Leitungen dient, Abb. 2.2a.

Um die Volumenminderung von Fluiden, $-\Delta V_T$, über ein Druckintervall Δp zu beschreiben, verwendet man den *mittleren (isothermischen) Kompressionsmodul*

$$\bar{K}_T = -V_0 \left(\frac{\Delta p}{\Delta V} \right)_T = -\frac{V_0}{\Delta V_T} \Delta p = -\frac{V_0}{V_T - V_0} \Delta p. \quad (2.2b)$$

Das Anfangsvolumen V_0 ist das Volumen der Druckflüssigkeit in einem Referenzzustand der durch einen bestimmten Wert der Referenzgrößen Druck und Temperatur festgelegt ist. *Referenzdruck* p_{ref} kann der *Normdruck* p_n (DIN 1343), praktisch der gerundete *Atmosphärendruck* p_{amb} (DIN 1314), $p_{\text{ref}} = p_{\text{amb}} = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$ sein. Die Druckzunahme Δp ist dann als *atmosphärische Druckdifferenz*, genannt *Überdruck* p_e

$$\Delta p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} = p_e, \quad (2.3)$$

definiert.

V_T ist das Volumen der Druckflüssigkeit nach (isothermer) Verdichtung.

Der mittlere Kompressionsmodul hängt ferner von der Art der Zustandsänderung ab. Der isothermische Kompressionsmodul \bar{K}_T für Mineralöle beträgt etwa das 0,87 fache des *mittleren isentropischen Kompressionsmoduls*

$$K = -V_0 \left(\frac{\Delta p}{\Delta V} \right)_s = -\frac{V_0}{\Delta V} \Delta p = -\frac{V_0}{V - V_0} \Delta p \quad (2.4)$$

(SI-Einheit von \bar{K} : Pa, übliche Einheit: bar),

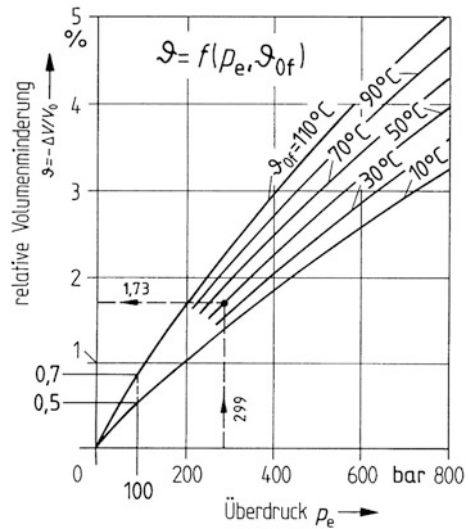
der überwiegend angewendet wird. Bei Letzterem ist das Anfangsvolumen V_0 der Temperatur T_0 vor Druckzunahme, das Flüssigkeitsvolumen V der Temperatur T nach der Verdichtung zuzuordnen.

Die relative (isentrope) Volumenminderung ist

$$-\vartheta = -\Delta V/V_0 = (V_0 - V)/V_0 = \Delta p/\bar{K} \quad (2.5a)$$

und beträgt für Hydrauliköle und bei $\Delta p = 400 \text{ bar}$ etwa 2 bis 3 % je nach Flüssigkeitstemperatur ϑ_{of} und gewährt in druckabhängiger Auftragung, Abb. 2.3, einen unmittelbaren Einblick in die „Elastizität“ der Druckflüssigkeit [4].

Abb. 2.3 Relative Volumenminderung ϑ von Druckflüssigkeiten auf Mineralölbasis mit einer Viskosität von $\nu = 53 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40°C (entspricht HL 46, HLP 46) abhängig vom Überdruck p_e bei isentroper Zustandsänderung und von der Flüssigkeitstemperatur ϑ_{0f} vor Druckzunahme



Nach (2.4a) und (2.5a) lässt sich für ein unter Atmosphärendruck p_{amb} stehendes und der Flüssigkeitstemperatur vor Druckzunahme zugeordnetes Anfangsvolumen V_0 die Volumenminderung

$$-\Delta V = V_0 - V = V_0 \Delta p / \bar{K} \quad (2.5b)$$

bestimmen, die sich nach isentroper Verdichtung auf das Volumen V bei Betriebsdruck p ergibt.

Hinweise für die Praxis

Der mittlere isentropische Kompressionsmodul \bar{K}_T von Hydraulikölen liegt bei Drücken bis 300 bar und Temperaturen von 20 bis 70°C im Bereich von $\bar{K}_T = (1,34 \dots 1,92) \cdot 10^4 \text{ bar} = (13,4 \dots 19,2) \text{ kbar}$.

Der Kompressionsmodul K ist ein Volumenmodul, im reibungsfreien Fluid definiert als Quotient Druck p durch die von diesem erzeugte relative Volumenänderung (Volumendilatation). Diese Kenngröße der Elastizitätslehre (DIN 13 316) entspricht dem Elastizitätsmodul E von Festkörpern, also dem Quotient Spannung durch Dehnung eines längsbeanspruchten Stabs. Zum Vergleich dient meist der E-Modul von Stahl, E_{St} , im Mittel angegeben zu $\bar{K}_{\text{Öl}} = 16 \text{ kbar} = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, $E_{\text{St}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 = 210 \cdot 10^9 \text{ Pa}$.

Der Vergleich mit E_{St} zeigt, dass Hydrauliköl etwa 130-fach kompressibler ist als Stahl.

Wenn Luftblasen im Hydrauliköl zu erwarten sind, wird der Kompressionsmodul im Mittel zu $\bar{K}_{\text{Öl}} = 12 \text{ kbar} = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ angenommen. Dieser Wert nähert den Kompressionsmodul des Flüssigkeit-Luft-Gemisches an, worin der wahre Kompressionsmodul der Druckflüssigkeit neben der aus der Zustandsänderung der Luft sich ergebenden Kompressibilität enthalten ist [3], Abb. 2.4 und Abschn. 2.2.3.

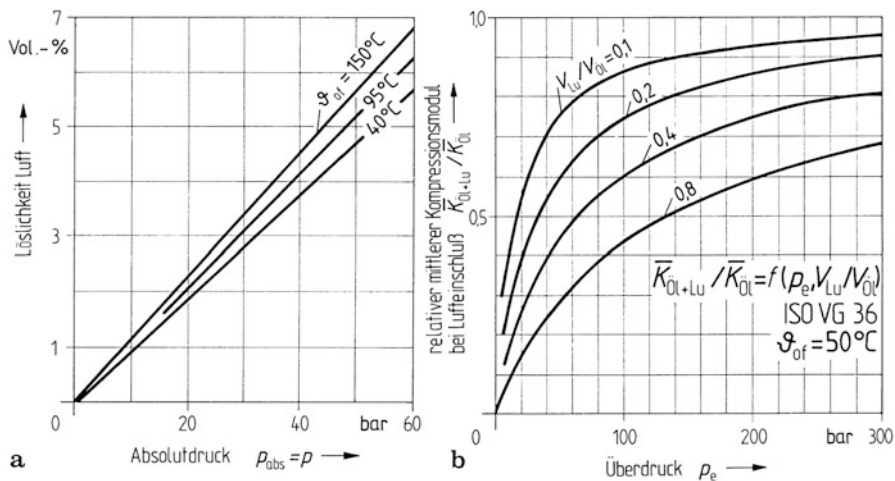


Abb. 2.4 System Luft-in-Öl mit gelöster und ungelöster (freier) Luft. **a** Löslichkeit in Abhängigkeit von Absolutdruck p_{abs} und Druckflüssigkeitstemperatur ϑ_{of} vor Druckzunahme; **b** Einfluss des Lufteinschlusses auf den mittleren Kompressionsmodul in Abhängigkeit von Überdruck p_e und Volumenanteil ungelöster Luft (V_{Lu}/V_{Ol})

Bei Druckflüssigkeiten hängt der mittlere Kompressionsmodul von der Viskosität ab, steigt mit dem Druck und sinkt mit der Temperatur, Abb. 2.5. Unverdichtete, warme Druckflüssigkeit ist kompressibler als verdichtete, kalte. Vereinfachend wird ein linearer Anstieg des Kompressionsmoduls mit dem Druck bis $p = 300$ bar angenommen [4].

2.1.1.2 Kompression einer Flüssigkeitsmenge bei starrer Gefäßwandung

Aufgrund ihrer Kompressibilität verhält sich die druckbeaufschlagte Flüssigkeitsmenge elastisch nachgiebig, vergleichbar einer mechanischen Druckfeder.

Die Zusammendrückung im starren kreisrunden Rohr lässt sich durch folgende Beziehungen beschreiben:

lichter Rohrquerschnitt	$A = \pi d^2 / 4$
Rohrlänge	l
Anfangsvolumen (Füllvolumen)	$V_0 = Al$
zugeordnet dem Referenzdruck p_{ref}	
gleich Leitungsvolumen	$= V_L$
Volumen bei Betriebsdruck	V
Volumenminderung	$-\Delta V = V_0 - V = A \Delta s$
Zusammendrückung („Federweg“)	$\Delta s = (V_0 - V) / A = -\Delta V / A.$

Bei einer Druckzunahme $\Delta p = p - p_{\text{ref}}$ vom Referenzdruck p_{ref} auf den Betriebsdruck p folgt aus der Volumenminderung $-\Delta V$ nach (2.5b) wegen

$$\Delta s = V_0 \Delta p / (A \bar{K}) = l \Delta p / \bar{K}$$

Zusammendrückung bei starrer Gefäßwandung

$$\Delta s = l \Delta p / \bar{K}. \quad (2.6a)$$

Aus Druckzunahme Δp und lichtem Rohrquerschnitt A folgt die Federkraft

$$\Delta F = A \Delta p.$$

Federkraft ΔF und Federweg Δs sind nach dem Elastizitätsgesetz verknüpft:

$$\Delta F = c_h \Delta s,$$

so dass sich über das Gleichgewicht der auf die Flüssigkeit wirkenden Kräfte wegen

$$c_h = \frac{A \Delta p}{\Delta s} = \frac{A \Delta p A \bar{K}}{V_0 \Delta p} = \frac{A^2 \bar{K}}{V_0}$$

die *hydraulische Steifigkeit* (kurz: *hydraulische Steife*) bei starrer Gefäßwandung

$$c_h = A^2 \bar{K} / V_0 \quad (\text{SI-Einheit von } c_h : \text{N/m, übliche Einheit: N/mm}) \quad (2.6b)$$

als Parameter für die Druckflüssigkeitssäule in Leitungen gewinnen lässt.

Hinweise für die Praxis

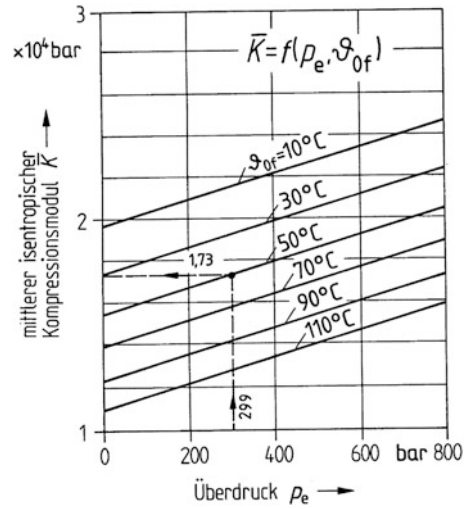
Um hydrostatische Antriebe möglichst starr auszuführen, d. h. in abgedichteten Räumen die Fluidenergie mittels *angenähernten Volumenschlusses* übertragen zu können, ist die hydraulische Steife c_h konstruktiv sehr hoch festzulegen. Leitmerkmale für die Auslegung sind Querschnitt A , Volumen V_0 und Kompressionsmodul \bar{K} .

Ist der mittlere isentropische Kompressionsmodul \bar{K} gegeben, erzielt man durch großen Querschnitt A und kleines unter Druck stehendes Flüssigkeitsvolumen V_0 , d. h. wegen $c_h = A^2 \bar{K} / l$ durch kleine Leitungslänge l , eine hohe hydraulische Steife c_h .

Sind die geometrische Abmessungen (A , l) (Formkennwert) festgelegt, steigt die hydraulische Steife c_h (Bauteilkennwert) mit wachsendem Druck p , da der Kompressionsmodul (Stoffkennwert) druckabhängig zunimmt. Der Anstieg des Kompressionsmoduls ist degressiv, obgleich näherungsweise für Drücke bis ca. 300 bar linearer Anstieg angenommen wird.

Im Gegensatz zu *reibungsfreien* metallischen Federn, verhält sich die Druckflüssigkeitssäule nichtlinear-elastisch, so dass die hydraulische Steife keine Konstante ist. Ihre Abhängigkeit vom (Federweg) Δs , also auch die *Nichtlinearität der „hydrostatischen Federkennlinie“* wird durch den vom Druck abhängigen mittleren isentropischen Kompressionsmodul \bar{K} wiedergegeben, Abb. 2.5.

Abb. 2.5 Mittlerer isentropischer Kompressionsmodul \bar{K} von Druckflüssigkeiten auf Mineralölbasis mit einer Viskosität von $\nu = 53 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40°C (entspricht HL 46, HLP 46) abhängig von Überdruck p_e und Flüssigkeitstemperatur ϑ_{of} vor Druckzunahme



Die hieraus hergeleitete mittlere hydraulische Steife (Sekantenfedersteife) $c_h = \bar{c} = \Delta F / \Delta s$ ist für genauere Untersuchungen durch die *Federsteife im Arbeitspunkt* (Tangentenfedersteife) $c = dF / ds$ zu ersetzen, z. B. wenn diese als Schwingungsparameter (DIN 1311) für die Behandlung von Flüssigkeitsschwingungen angewendet wird. An die Stelle des mittleren \bar{K} tritt dann in (2.6b) der *wahre Kompressionsmodul* K_T , vgl. (2.2a) [4].

Zu *niedrige hydraulische Steife* c_h bringt *Nachteile* wie Schwingungen und Stöße, Schaltverzögerungen, ungleichmäßigen Vorschub, unerwünschte Beanspruchungen an Bauteilen mit sich.

In *Analogie zur Elektrizitätslehre* kann die Bauteileigenschaft Elastizität der unter Druck stehenden Flüssigkeitssäule außer durch die hydraulische Steife c_h auch durch die *hydraulische Kapazität*

$$C_h = -\frac{dV}{dp} \approx -\frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{V_0}{\bar{K}} \quad (2.7)$$

(SI-Einheit von C_h : m^5/N , übliche Einheit: cm^5/N)

beschrieben werden. Mit $dp = (1/C_h) dV$ und $dV = q_v dt$ erhält man durch Integration

$$p = \frac{1}{C_h} \frac{dy}{dx} \int q_v dt$$

die zur elektrischen Spannung u am Kondensator

$$u = \frac{1}{C} \int i dt$$

analoge Beziehung [3, 6, 7]. Hydraulische Kapazität C_h und hydraulische Steife c_h , (2.6b), stehen in der Beziehung

$$C_h = A^2 / c_h. \quad (2.8)$$

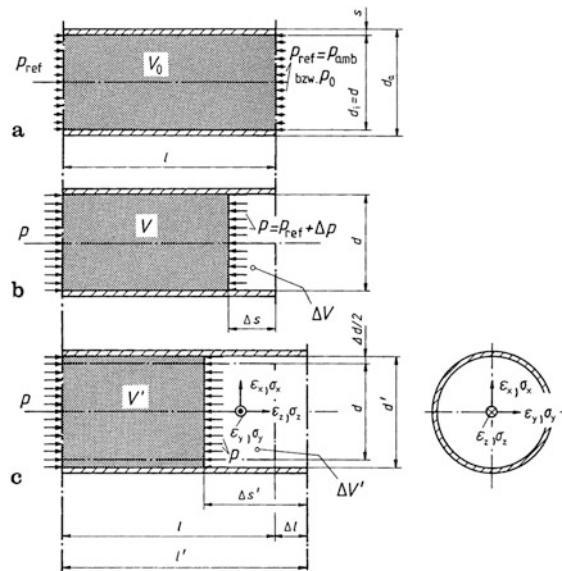


Abb. 2.6 Zusammendrückung eines unter Druck stehenden Flüssigkeitsvolumens. **a** Rohr mit Anfangsvolumen V_0 bei Referenzdruck p_{ref} ; **b** Zusammendrückung Δs und Nachfüllvolumen ΔV unter Druckzunahme Δp vom Referenzdruck p_{ref} zum Betriebsdruck p bei starrer Rohrwandung; **c** Zusammendrückung $\Delta s'$ und Nachfüllvolumen $\Delta V'$ unter Druckzunahme Δp jedoch bei elastisch aufgeweiteter Rohrwandung

2.1.1.3 Kompression einer Flüssigkeitsmenge bei elastischer Gefäßwandung

Die mit Druckflüssigkeit gefüllte Rohrleitung erfährt unter dem Druck p eine elastische Volumendilatation e , die eine Aufweitung Δd und eine Längenänderung Δl mit sich bringt, Abb. 2.6c.

Das Nachfüllvolumen im elastisch verformten Rohr lässt sich durch folgende Beziehungen herleiten:

verformter lichter Rohrleitungsquerschnitt

$$A' = \pi d'^2 / 4$$

unter Betriebsdruck

$$p = (p_{ref} + \Delta p)$$

verformte Rohrleitungslänge

$$l' = l + \Delta l$$

Querschnittsänderung

$$\Delta A = A' - A$$

Ölhydraulik

Handbuch der hydraulischen Antriebe und
Steuerungen

Findeisen, D.; Helduser, S.

2015, XXVII, 1011 S. 425 Abb., 25 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-642-54908-3