

Paul Gerretz

Hydrogetriebe



PAUL GERRETZ

Ing. (grad.), Oberingenieur,
ehem. Leiter des technischen Kundendienstes für hydrostatische Getriebe
der Mannesmann-Meer AG, Mönchengladbach

Hydrogetriebe

Mit 149 Abbildungen.

ISBN 3-540-07673-5 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-07673-5 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Library of Congress Cataloging in Publication Data
Gerretz, P. 1931-Hydrogetriebe: G4yhdlagen, Bauglieder, Auslegung, Gestaltung.
Bibliography: p. Includes index. 1. Oil hydraulic machinery. 2. Hydraulic control. I. Title.
TJ843.G43 621.2'0424 76-23216

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben auch bei nur auszugsweiser Verwertung vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1977. Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zur Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Offsetdruck: fotokop. wilhelm wehner kg, Darmstadt. Bindearbeiten: Konrad Triltsch, Würzburg.

Vorwort

In den beiden letzten Jahrzehnten hat die Ölhydraulik als Antriebstechnik verbreitet Anwendung im allgemeinen Maschinenbau gefunden. Sie steht in der Vielfalt ihrer Anwendungsarten, Gestaltungsmöglichkeiten und Bedeutung gleichrangig neben dem direkten elektrischen Antrieb. In ihrer Vielfalt hat sie sich bereits in eine Anzahl von Einzelgebieten aufgeteilt, die selbständig nebeneinander existieren. Jedes ist über Jahrzehnte gewachsen und setzt zu seiner Beherrschung Spezialkenntnisse voraus.

Das vorliegende Buch beschränkt sich ausschließlich auf die Hydrogetriebe (hydrostatische Getriebe). Es soll vor allen Dingen den Konstrukteur und den in Ausbildung befindlichen Fachhochschulingenieur mit den Besonderheiten dieser Antriebsart vertraut machen. Da eine Anzahl guter Fachbücher und Veröffentlichungen die rein theoretischen Grundlagen der Hydrostatik, der Hydrodynamik und der Hauptelemente des Hydrogetriebes, nämlich Hydropumpe und Hydromotor, vermittelt, wird in diesem Buch nur insoweit auf die grundsätzlichen Zusammenhänge eingegangen, wie es zum Verständnis für die Entwicklung von Formeln u.ä. für den praktischen Gebrauch erforderlich ist.

Damit ist gleichzeitig die Zielsetzung dieses Buches umrissen: Mit den Erkenntnissen der letzten 20 Jahre soll da, wo früher mit Annahmen gearbeitet werden mußte, weil es an Erfahrung fehlte, der Rechenschieber zur Hand genommen werden, um die Einflußgrößen so klar zu erfassen, daß mit der in der Technik erforderlichen ausreichenden Genauigkeit und Sicherheit projiziert, konstruiert und gefertigt werden kann. Es ist meine Hoffnung, daß es auch in diesem Bereich der Technik gelingen mag, viele Fehler, die noch heute immer wieder unterlaufen, in Zukunft zu vermeiden.

Wegberg, im Sommer 1976

Paul Gerretz

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Grundlagen, Begriffsbestimmung	1
1.1.1	Hydrostatisches Getriebe	1
1.1.2	Hydrodynamisches Getriebe	3
1.1.3	Zusammenfassung	4
1.2	Physikalische Grundgesetze	5
1.2.1	Die Gesetze der Hydrostatik	5
1.2.2	Die Gesetze der Strömungslehre	9
2	Anwendung der physikalischen Grundgesetze auf das Hydrogetriebe	16
2.1	Ableitung der Berechnungsformeln	17
2.1.1	Volumen, Volumenstrom, Drehzahl, Drehmoment, Leistung	17
2.1.2	Drehzahl- und Drehmomentübersetzung	19
2.2	Verluste	20
2.2.1	Volumetrische Verluste	20
2.2.2	Hydraulische und mechanische Verluste	22
2.2.3	Gesamtverluste	23
2.2.4	Wärme durch Leistungsverluste	24
2.2.5	Temperaturerhöhung als Folge von Leistungsverlusten	24
3	Bauglieder des Hydrogetriebes	27
3.1	Hauptglieder	27
3.1.1	Hydropumpen	27
3.1.2	Nicht regelbare Hydropumpen	27
3.1.2.1	Oszillierende Verdränger	27
3.1.2.2	Die kinematischen Zusammenhänge	34
3.1.2.3	Rotierende Verdränger	40
3.1.3	Regelbare Hydropumpen	44

3.1.3.1	Hydropumpen mit veränderlichem Verdrängerweg	45
3.1.3.2	Hydropumpen mit veränderlicher Verdrängerfläche	49
3.1.4	Hydromotoren	49
3.1.5	Nicht regelbare Hydromotoren	49
3.1.5.1	Oszillierende Verdränger	50
3.1.5.2	Die kinematischen Zusammenhänge	50
3.1.5.3	Rotierende Verdränger	53
3.1.6	Regelbare Hydromotoren	53
3.1.6.1	Hydromotoren mit veränderlichem Verdrängerweg	53
3.1.6.2	Hydromotoren mit veränderlicher Verdrängerfläche	53
3.1.7	Drehmomente von Hydropumpe und Hydromotor	53
3.2	Hilfsglieder des Hydrogetriebes	54
3.2.1	Übersicht	54
3.2.1.1	Wellenkupplungen	55
3.2.1.2	Sicherheitsglieder	56
3.2.1.2.1	Überwachung der zulässigen Drehzahl	57
3.2.1.2.2	Überwachung des zulässigen Drehmomentes	59
3.2.1.2.3	Weitere Sicherheitseinrichtungen	60
3.2.1.3	Speiseeinrichtung	62
3.2.1.3.1	Bereitstellung des erforderlichen Volumens bzw. Volumenstromes	63
3.2.1.3.2	Reinhaltung der Betriebsflüssigkeit	63
3.2.1.3.3	Abfuhr der anfallenden Verlustwärme	68
3.2.1.3.4	Wärmezufuhr zur Aufrechterhaltung einer Mindesttemperatur .	70
3.2.1.3.5	Aufrechterhaltung eines Mindestdruckes	70
3.2.1.3.6	Kompensation der durch die Kompressibilität der Flüssigkeit eintretenden Volumenminderung	71
3.2.1.4	Steuerdruckeinrichtung	71
3.2.2	Steuer- und Regeleinrichtungen	72
3.2.2.1	Begriffsbestimmung	73
3.2.2.2	Stellantriebe und Steuereinrichtungen	76
3.2.2.3	Regeleinrichtungen	79
3.2.3	Rohr- und Schlauchleitungen	79
3.2.3.1	Rohrleitungen	79
3.2.3.2	Schlauchleitungen	86
4	Betriebsflüssigkeiten	88
4.1	Mineralöle	88
4.1.1	Auswahlgesichtspunkte	89
4.1.2	Kennwerte für Hydrauliköle	91

4.1.2.1	Viskosität-Temperatur-Verhalten	91
4.1.2.2	Viskosität-Druck-Verhalten	93
4.1.2.3	Dichte, Ausdehnung, Kompressibilität	93
4.1.2.4	Luftlösevermögen	95
4.1.2.5	Dampfdruck, Dampfblasenbildung	97
4.1.2.6	Spezifische Wärmekapazität	98
4.1.2.7	Alterungsbeständigkeit	98
4.1.2.8	Druckfortpflanzung	99
4.1.3	Einfluß der Kennwerte	99
4.1.3.1	Temperaturerhöhung	100
4.1.3.2	Druckerhöhung	100
4.1.3.3	Luftlösung, Luftblasen	101
4.2	Schwerentflammbare Betriebsflüssigkeiten	103
4.2.1	Auswahlgesichtspunkte	103
4.2.2	Kennwerte	104
4.2.3	Einfluß der Kennwerte	104
4.2.3.1	Dichte	104
4.2.3.2	Luftabscheidevermögen	107
4.2.3.3	Temperatur	107
4.2.3.4	Dichtungen	107
4.2.3.5	Anstriche	108
5	Auslegungsberechnung	109
5.1	Rechnerische Bestimmung der Hauptglieder	109
5.2	Beschreibung eines im geschlossenen Kreislauf arbeitenden Hydrogetriebes	109
5.2.1	Speiseeinrichtung	112
5.2.1.1	Bauglieder	112
5.2.1.2	Speisedruck	114
5.2.1.3	Speisevolumenstrom	115
5.2.1.4	Behälter	121
5.2.1.5	Rohrleitungen	124
5.2.1.5.1	Bestimmung der lichten Weite	125
5.2.1.5.2	Ableitung der Auswahlkriterien	126
5.2.1.5.3	Erfahrungsrichtwerte	128
5.2.1.5.4	Beeinflussung des Wirkungsgrades	129
5.2.1.5.5	Grenzwert der Einflußgrößen	133
5.2.1.5.6	Rohrbogen, -abzweige, Querschnittsveränderungen	137
5.2.1.5.7	Größenordnung der Einzelwiderstände	138
5.2.1.5.8	Widerstandsbeiwerte	139

5.2.1.5.9	Bemessung der Saugleitung	145
5.2.1.5.10	Bestimmung der Wanddicke der Rohrleitung	152
5.2.1.5.11	Aufweitung und Längsdehnung der Rohrleitung unter Innendruck .	153
5.2.2	Verbindungselemente	154
6	<u>Gestaltung</u>	157
6.1	Allgemeine Grundsätze	157
6.2	Hydropumpenaggregat	159
6.2.1	Auswahl	159
6.2.2	Aufbau	160
6.3	Hydromotoraggregat	161
6.3.1	Auswahl	161
6.3.2	Aufbau	162
6.4	Speise- und Steuerdruckeinrichtung	164
6.4.1	Auswahl	164
6.4.2	Aufbau	164
6.4.2.1	Pumpen	164
6.4.2.2	Behälter	165
6.5	Gestaltung der Rohrleitung	167
7	<u>Wartung und Lebensdauerverhalten</u>	169
7.1	Wartung von Hydrogetrieben	169
7.2	Lebensdauerverhalten	169
8	<u>Anhang</u>	171
8.1	Normen und Vorschriften	171
8.1.1	Allgemeines	171
8.1.2	Organisationen	171
8.1.3	Normen	172
8.2	Formelzeichen, Formeln, Einheiten	176
8.2.1	Formelzeichen	176
8.2.2	Wichtige Formeln	181
8.2.3	Einheitenvergleich	183
	<u>Literaturverzeichnis</u>	184
	<u>Sachverzeichnis</u>	186

1 Einführung

1.1 Grundlagen, Begriffsbestimmung

Der Begriff "Getriebe" ist in der Technik klar umrissen. Ein Getriebe ist ein Antriebselement, welches zur Wandlung von Drehzahlen und Drehmomenten dient.

Man unterscheidet mechanische Getriebe und hydraulische Getriebe, deren Abtriebsdrehzahl entweder nicht veränderbar, stufenlos veränderbar oder in Stufen veränderbar ist. Beim hydraulischen Getriebe unterscheidet man ferner das hydrostatische Getriebe und das hydrodynamische Getriebe.

Beim mechanischen Getriebe erfolgt die Übertragung der Leistung, d.h. von Drehmoment und Drehzahl, durch mechanische Elemente, wie z.B. Zahnräder, Keilriemen u.ä. Beim hydraulischen Getriebe werden in der Regel als Übertragungsmittel homogene Flüssigkeiten benutzt, z.B. Mineralöle, Öl-Wasser-Gemenge und synthetische Flüssigkeiten.

Die Begriffe "hydrostatisch" und "hydrodynamisch" sind aus einem Teilgebiet der technischen Physik, der Mechanik, entlehnt. In der vorliegenden Wortzusammensetzung bedeutet hydro: Wasser oder inkompressible Flüssigkeit, statisch: Leistungsübertragung durch eine Kraft, dynamisch: Leistungsübertragung durch eine Bewegung.

Die Bezeichnungen "hydrostatische" und "hydrodynamische Getriebe" sind im Laufe der Zeit zu Eigenbegriffen geworden. Streng genommen ist eine ausschließliche Zuordnung in die Gebiete Hydrostatik und Hydrodynamik nicht korrekt.

1.1.1 Hydrostatisches Getriebe

Von Pascal stammt das Gesetz: Wird eine Flüssigkeit einem äußeren Druck ausgesetzt, der nur in einer Richtung wirkt, so pflanzt sich dieser auf alle Flüssigkeitsteile (und die Teile, die mit der Flüssigkeit in unmittelbarer Berührung

senen) nach allen Richtungen fort (Bild 1). Dieses physikalische Grundgesetz der Hydrostatik kommt im hydrostatischen Getriebe, im folgenden kurz Hydrogetriebe genannt, zur Anwendung [1].

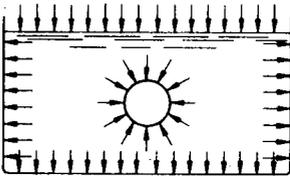


Bild 1. Hydrostatisches Prinzip nach Pascal

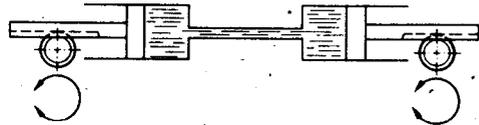


Bild 2. Physikalisches Prinzip eines hydrostatischen Getriebes

In einer Verdrängerpumpe (z.B. Kolbenpumpe) wird ein Flüssigkeitsstrom (Volumen pro Zeiteinheit) unter Druck gesetzt. Führt man diesen Druckflüssigkeitsstrom einem Verdrängermotor (z.B. Kolbenmotor) zu und ermöglicht in diesem eine Druckentspannung, so nimmt die Abtriebswelle dieses Verdrängermotors eine dem Flüssigkeitsstrom direkt proportionale Drehzahl an bei gleichzeitiger Abgabe eines der Druckentspannung direkt proportionalen Drehmomentes. Die bei diesem Vorgang übertragene Leistung ist das Produkt aus dem Volumenstrom (Flüssigkeitsstrom) und der Druckdifferenz (Bild 2) [2].

Ein Hydrogetriebe besteht aus den Hauptgliedern Hydropumpe und Hydromotor, wobei jedes dieser Glieder mindestens einmal vorhanden ist. Man unterscheidet vier Arten:

Hydrogetriebe mit offenem Kreislauf, ohne Speisepumpe (Bild 3). Die Hydropumpe entnimmt die Betriebsflüssigkeit aus dem Flüssigkeitsbehälter und führt diese über Rohrleitungen (Ferngetriebe) bzw. Bohrung oder Kanäle (Kompaktgetriebe) dem Hydromotor zu. Vom Hydromotor gelangt die Betriebsflüssigkeit wieder in den Behälter.

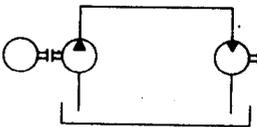


Bild 3. Hydrogetriebe im offenen Kreislauf ohne Speisepumpe

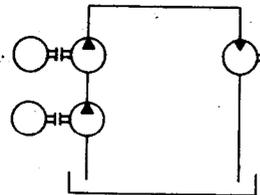


Bild 4. Hydrogetriebe im offenen Kreislauf mit Speisepumpe

Hydrogetriebe mit offenem Kreislauf, mit Speisepumpe (Bild 4). Eine zusätzliche Speisepumpe entnimmt die Betriebsflüssigkeit dem Behälter und führt sie der Hydropumpe zu (Einspeisung). Hydrogetriebe mit geschlossenem Kreislauf, ohne Speisepumpe (Bild 5). Die Hydropumpe entnimmt über ein Nachsaugventil die Betriebsflüssigkeit aus dem Flüssigkeitsbehälter und führt sie dem Hydromotor zu.

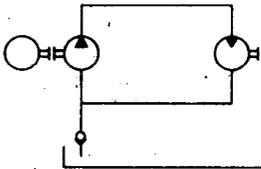


Bild 5. Hydrogetriebe im geschlossenen Kreislauf ohne Speisepumpe mit Nachsaugventil

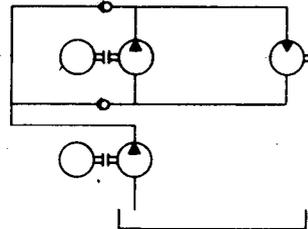


Bild 6. Hydrogetriebe im geschlossenen Kreislauf mit Speisepumpe und Speiseventile

Von diesem gelangt die Betriebsflüssigkeit unmittelbar zur Hydropumpe zurück. Zum Ausgleich von Leckverlusten saugt die Hydropumpe ein bestimmtes Flüssigkeitsvolumen über ein Nachsaugventil laufend nach.

Hydrogetriebe mit geschlossenem Kreislauf, mit Speisepumpe (Bild 6). Eine zusätzliche Speisepumpe entnimmt die Betriebsflüssigkeit aus dem Flüssigkeitsbehälter und füllt beim Anfahren über zwei Speiseventile Rohrleitungen, Hydropumpe und Hydromotor. Die Betriebsflüssigkeit wird dann von der Hydropumpe dem Hydromotor zugeführt. Vom Hydromotor gelangt die Betriebsflüssigkeit unmittelbar zur Pumpe zurück. Zum Ausgleich von Leckverlusten speist die Speisepumpe laufend in das System ein.

Um die erforderliche Betriebssicherheit zu gewährleisten, sind weitere Bauglieder erforderlich, wie z.B. Kupplungen, Filter, Wärmetauscher, Druckmeßgeräte, Druckbegrenzungsventile u.ä. Nähere Erläuterungen hierzu siehe Abschnitt 3.2.

1.1.2 Hydrodynamisches Getriebe

Von Newton stammt das Gesetz: Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung (Bild 7). Es kommt im hydrodynamischen Getriebe zur Anwendung.

In einer Zentrifugalpumpe (z.B. Kreiselpumpe) wird einem Flüssigkeitsstrom (Masse pro Zeiteinheit) eine Geschwindigkeit aufgedrückt. Führt man diesen Massenstrom einer Turbine zu und ermöglicht in dieser eine Verzögerung der Geschwindigkeit, so gibt die Abtriebswelle der Turbine ein der Verzögerung pro-

portionales Drehmoment ab. Die Abtriebsdrehzahl ist abhängig von der Belastung. Die bei diesem Vorgang übertragene Leistung ist das Produkt aus Dralländerung des Massenstromes und der Winkelgeschwindigkeit [3].

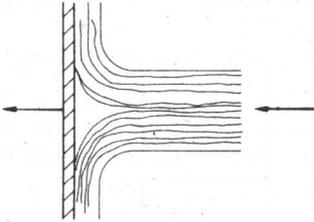


Bild 7. Hydrodynamisches Prinzip nach Newton

Das hydrodynamische Getriebe besteht aus den Hauptgliedern Pumpenrad, Turbinenrad, Leitrad und Gehäuse (Bild 8).

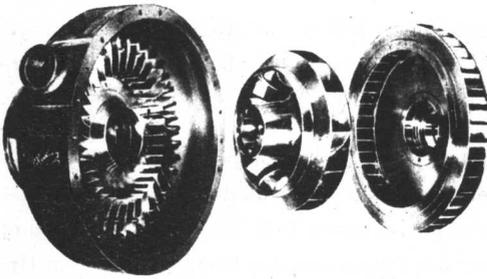


Bild 8. Bauelemente eines hydrodynamischen Getriebes

1.1.3 Zusammenfassung

Hydrogetriebe und hydrodynamisches Getriebe sind in Funktionsprinzip, Aufbau und Anwendungsmöglichkeit grundverschieden. Beide arbeiten nach völlig unterschiedlichen physikalischen Grundgesetzen. Beim Hydrogetriebe resultieren Abtriebsdrehmoment - und - drehzahl aus den Beziehungen (Bild 9)

Drehmoment = Druck des Volumenstromes mal Verdrängerfläche mal Hebelarm,

$$M = p S r;$$

$$\text{Drehzahl} = \frac{\text{Volumenstrom}}{\text{verdrängtes Volumen pro Umdrehung}},$$

$$n = \frac{Q}{S 2r \pi}.$$

Beim hydrodynamischen Getriebe resultiert das Abtriebsdrehmoment aus (Bild 10) [4]

Drehmoment = Massenstrom mal Differenz der Geschwindigkeitskomponenten mal Hebelarm,

$$M = \frac{Q}{g_n} (c_1 \cos \alpha_1 r_1 - c_2 \cos \alpha_2 r_2).$$

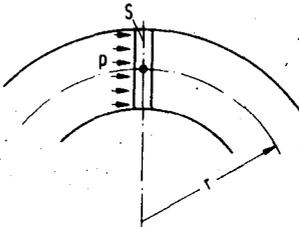


Bild 9. Drehmoment beim Hydrogetriebe

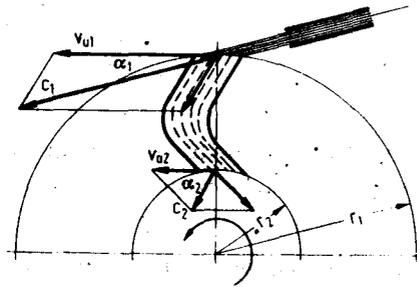


Bild 10. Drehmoment beim hydrodynamischen Getriebe

Die Abtriebsdrehzahl ist abhängig von der Belastung, der konstruktiven Auslegung von Kreiselpumpe und Turbine sowie der Antriebsdrehzahl der Kreiselpumpe.

1.2 Physikalische Grundgesetze . .

1.2.1 Die Gesetze der Hydrostatik

In der Physik werden die Gesetze der Hydrostatik meist an Behältern, die mit einer ruhenden, inkompressiblen, homogenen Flüssigkeit gefüllt sind, abgeleitet. Diese Flüssigkeit zeigt das für rein theoretische Untersuchungen ideale Verhalten und soll daher als "ideale Flüssigkeit" bezeichnet sein.

Im Gegensatz hierzu steht die "reale Flüssigkeit", die das natürliche Verhalten zeigt. Obwohl beim Hydrogetriebe die reale Flüssigkeit in Bewegung und in beschränktem Ausmaß kompressibel ist, bleiben die Gesetze der Hydrostatik (mit der "idealen Flüssigkeit") gültig.

Als wesentliches Merkmal der Hydrostatik ist der Flüssigkeitsdruck p , die pro Flächeneinheit wirkende Druckkraft, anzusehen. Jeder Flüssigkeitsdruck läßt sich in Form eines Höhenmaßes ausdrücken. Ist ein Gefäß im luftleeren Raum mit einer idealen Flüssigkeit mit der Masse m gefüllt, so beträgt der Flüssigkeitsdruck am Boden des Gefäßes (Bild 11)

$$p_h = \frac{G}{S}$$

Setzt man

$$G = Sh \rho g_n,$$

so wird

$$p_h = \frac{Sh \rho g_n}{S} = h \rho g_n$$

und damit

$$h = \frac{p_h}{\rho g_n} \quad (1)$$

d.h. jeder Flüssigkeitsdruck kann als ein durch das Eigengewicht einer entsprechend hohen Flüssigkeitssäule hervorgerufener Druck (Kraft pro Flächeneinheit) angesehen werden.

Nach der früheren technischen Definition übt eine Wassersäule von 10 m Höhe bei einer Temperatur von 4°C auf eine Fläche von 1 cm² eine Druckkraft von 1 kp = 9,81 N aus. Der Flüssigkeitsdruck beträgt dann

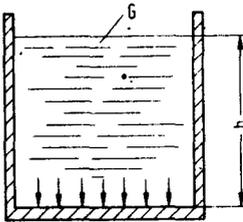


Bild 11. Flüssigkeitsdruck aus der Gewichtskraft

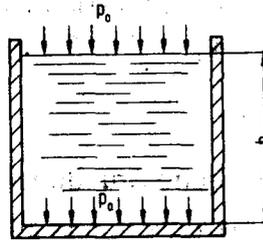


Bild 12. Absoluter Druck aus Gewichtskraft und Luftdruck

$$1 \text{ kp/cm}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2 = 0,981 \text{ bar.}$$

Unter Berücksichtigung des Luftdruckes p_0 , der auf die Oberfläche der Flüssigkeitssäule wirkt, beträgt der Druck am Boden des Gefäßes (Bild 12)

$$p_a = p_h + p_0 = h \rho g_n + p_0.$$

Dieser Druck wird absoluter Druck genannt und hatte im früheren Maßsystem die Einheit ata. Der den absoluten Druck übersteigende Druck $p_{\ddot{u}}$ wurde Überdruck genannt (Einheit: atü), der Luftdruck p_0 hieß Atmosphärendruck (Einheit: atm). Eine Unterschreitung des jeweils herrschenden Luftdruckes wurde Unterdruck p_u

1.2 Physikalische Grundgesetze

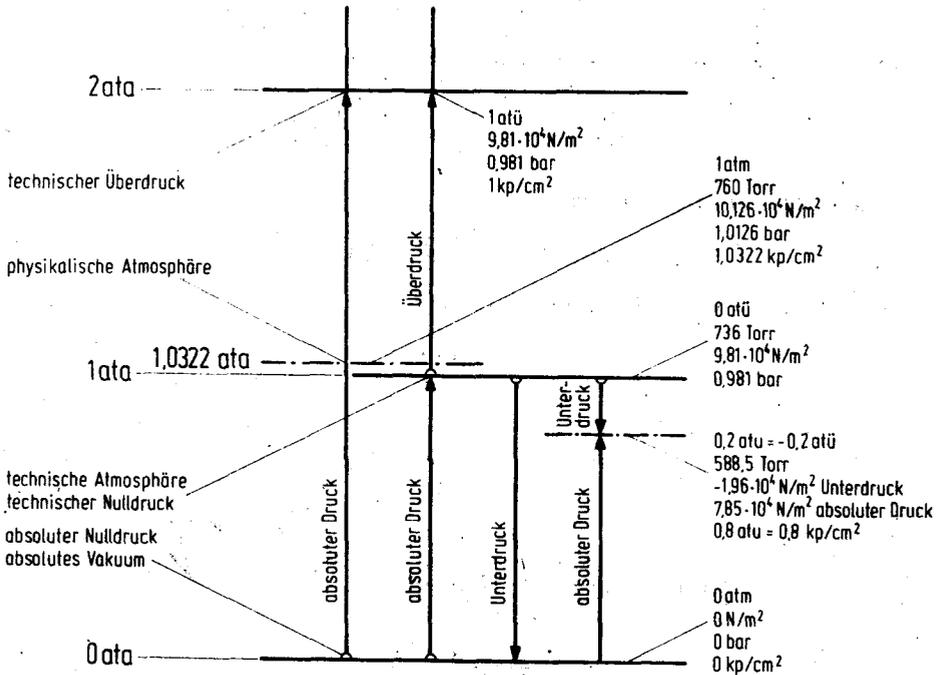


Bild 13. Gegenüberstellung der Druckangaben in verschiedenen Maßsystemen

genannt (Einheit: atu). Zur Veranschaulichung dieser verschiedenen Drücke dient Bild 13.

Da der Luftdruck schwankt, hat man als technische Atmosphäre 1 at = 735,559 Torr = 0,967841 atm = 0,980665 bar = $9,80665 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ festgelegt. Dieser Druck herrscht grundsätzlich im vom vollen Luftdruck belasteten Raum. Da der Luftdruck aber im räumlichen Bereich der technischen Praxis überall vorhanden ist, hebt sich seine Wirkung praktisch immer auf (Bild 14). Jeder Gegenstand wird allseitig mit dem gleichen Druck belastet [5].

Um das Gesetz von Pascal (vgl. Abschnitt 1.1.1) zu veranschaulichen, denke man sich ein Gefäß gemäß Bild 15. Der Kolben K_1 soll um die Höhe h_1 durch Verdrängen des Volumens mittels Kolben K_2 (K_3, K_4) angehoben werden. Das zu verdrängende Volumen beträgt

$$V_1 = S_1 h_1.$$

Dieses Volumen V_1 muß gleich sein dem durch K_2 (K_3, K_4) verdrängten Volumen, also

$$V_1 = V_2 (= V_3 = V_4) = S_1 h_1 = S_2 h_2 (= S_3 h_3 = S_4 h_4).$$

Der von K_2 (K_3, K_4) auszuführende Hub beträgt also

$$h_2 = \frac{S_1 h_1}{S_2}, \left(h_3 = \frac{S_1 h_1}{S_3}, h_4 = \frac{S_1 h_1}{S_4} \right).$$

Die zu verrichtende Arbeit beträgt

$$A = F_1 h_1 = F_2 h_2 (= F_3 h_3 = F_4 h_4).$$

Die an K_1 wirksam werdende Kraft F_1 beträgt

$$F_1 = S_1 p_1.$$

Es ist also

$$S_1 p_1 h_1 = F_2 h_2 (= F_3 h_3 = F_4 h_4)$$

und weiter

$$S_1 p_1 h_1 = F_2 \frac{S_1 h_1}{S_2} \left(= F_3 \frac{S_1 h_1}{S_3} = F_4 \frac{S_1 h_1}{S_4} \right).$$

$$p_1 = \frac{F_2}{S_2} = \frac{F_3}{S_3} = \frac{F_4}{S_4}.$$

Der Druck ist also an jedem Kolben gleich.

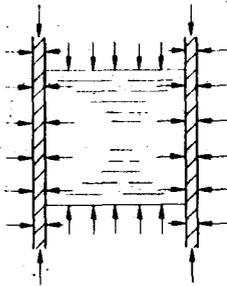


Bild 14. Ausgleich des Luftdruckes

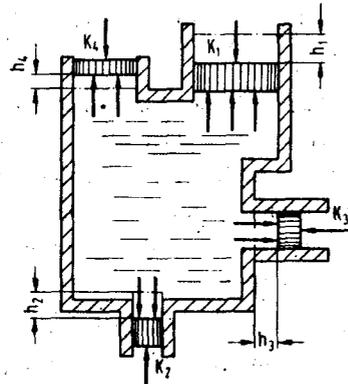


Bild 15. Veranschaulichung des Gesetzes von Pascal

Die vorstehenden Darstellungen beinhalten die wichtigsten Funktionsgrundlagen des Hydrotriebes, deren Kenntnis Voraussetzung für seine Auslegung und Gestaltung sind. Die Ableitung der speziellen Berechnungsformeln erfolgt in Abschnitt 2.

1.2.2 Die Gesetze der Strömungslehre

Die folgenden Erörterungen setzen voraus, daß die Gesetze der Strömungslehre in ihrer Ableitung bekannt sind. Es werden daher nur wesentliche Gesichtspunkte, die für die Erklärung noch aufzuzeigender Zusammenhänge von Bedeutung sind, angeführt.

In Abschnitt 1.2.1 wurde bereits erwähnt, daß im Gegensatz zu den Voraussetzungen bei der klassischen Ableitung der Grundgesetze der Hydrostatik beim Hydrogetriebe die Betriebsflüssigkeit weder ruhend noch verlustfrei noch inkompressibel ist. Die Kompressibilität und die Bewegung der Flüssigkeit spielen bei der Auslegung eines Hydrogetriebes eine bedeutende Rolle. Trotzdem behalten die Gesetze der Hydrostatik ihre volle Gültigkeit.

Da die Betriebsflüssigkeit innerhalb des Hydrogetriebes in Bewegung ist, sind neben den Gesetzen der Hydrostatik die der Strömungslehre, von Bedeutung. Der Begriff der "Strömung" läßt sich definieren als Bewegung einer kontinuierlichen, über bestimmte Räume verteilte Flüssigkeitsmasse, deren einzelne Teilchen in jedem Augenblick unter der Wirkung ihrer Umgebung stehn und somit ihre Bewegung gegenseitig ständig beeinflussen [6]. Jedes Masseteilchen der strömenden Flüssigkeit besitzt eine ihm zugeordnete Geschwindigkeit, die sich in Größe und Richtung laufend verändern kann. Bleiben Größe und Richtung der Geschwindigkeit aller Masseteilchen, die an einer Strömung teilnehmen, mit der Zeit unverändert, so ist die Strömung stationär. Ändern sich Größe und Richtung der Geschwindigkeit der Masseteilchen laufend, ist die Strömung instationär. Darüber hinaus kann eine Strömung ein-, zwei- oder dreidimensional sein.

Die Bahnen, die die einzelnen Masseteilchen zurücklegen, bezeichnet man als Stromlinien. Die Stromlinien einer Anzahl betrachteter Masseteilchen bilden zusammen eine Stromröhre, deren flüssiger Inhalt als Stromfaden bezeichnet wird. In der praktischen Anwendung betrachtet man den gesamten Volumenstrom in einem Rohr als einen einzigen Stromfaden und rechnet mit dem über den Querschnitt der Stromröhre genommenen Mittelwert der Geschwindigkeit. Sie beträgt

$$\bar{v} = \frac{Q}{S},$$

wenn Q das in der Zeiteinheit durchströmende Volumen bezeichnet und S den Strömungsquerschnitt senkrecht zur Strömungsachse (Bild 16).

Die Geschwindigkeit v ändert sich umgekehrt proportional mit dem Strömungsquerschnitt S . Daraus resultiert mit (Bild 17)

$$v_1 = \frac{Q}{S_1}, v_2 = \frac{Q}{S_2}, v_3 = \frac{Q}{S_3}, v_4 = \frac{Q}{S_4}$$

die Kontinuitätsgleichung der raumbeständigen Flüssigkeit

$$Q = vS = \text{konstant.}$$

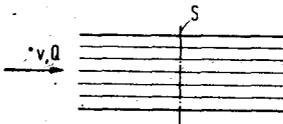


Bild 16. Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit, Volumen und Volumenstrom

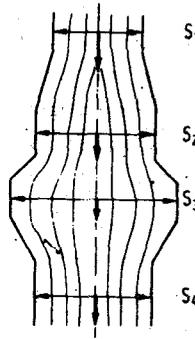


Bild 17. Kontinuität der Strömung einer raumbeständigen Flüssigkeit

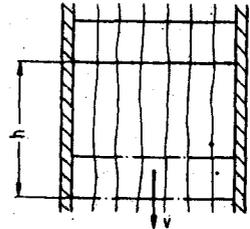


Bild 18. Im "freien Fall" ausströmendes Volumen

Die Einflüsse, die die Strömungsgeschwindigkeit v und damit die Größe des Volumenstromes Q bestimmen, lassen sich mit den bekannten Ableitungen der Dynamik auch für die reibungsfreie Strömung bestimmen. Fließt aus einem offenen Gefäß ein Volumen im "freien Fall" aus (Bild 18), so erreicht dieses nach Zurücklegen der Strecke h die Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{2g_n h}. \quad (2)$$

Das gilt auch für den Fall des Ausströmens aus einer Öffnung am Boden eines Gefäßes oder in der Wandung (Bilder 19 und 20), verlustfreies Verhalten vorausgesetzt, also innere Reibung der Flüssigkeit, Strahleinschnürung usw. vernachlässigt. Hier "schiebt" das "fallende" Volumen das ausströmende Volumen vor sich her. Mit (1) ist dann

$$v = \sqrt{2g_n \frac{p_h}{\rho g_n}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_h}$$

worin p_h der Flüssigkeitsdruck an der Ausflußöffnung ist (freier Fall setzt fehlende Atmosphäre voraus).

Steht eine Flüssigkeit unter zusätzlicher Druckbelastung $p_{\bar{u}}$ (Bild 21), so kann man sich auch hier die zusätzliche Druckbelastung durch eine Vergrößerung der Höhe der Flüssigkeitssäule entstanden vorstellen. Es wird dann nach (1)