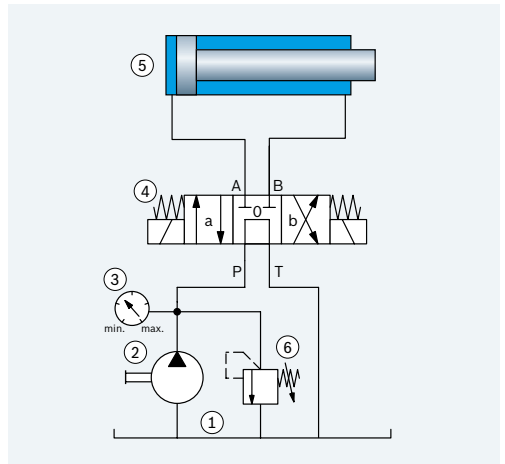


Wissen kompakt

Hydraulik – Grundlagen



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 Allgemeines	9
1.1 Einführung in die Hydraulik	9
1.2 Antriebstechniken im Vergleich	12
1.3 Grafische Symbole	15
2 Physikalische Grundlagen	16
2.1 Hydraulische Grundlagen	16
2.1.1 Hydrostatik – Gesetz von Pascal	16
2.1.2 Hydrodynamik – Gesetz von Bernoulli	21
2.1.3 Rohrströmungen	24
2.1.4 Kavitation	27
2.2 Mechanische Grundlagen	29
2.2.1 Zusammenhang zwischen hydraulischen und mechanischen Größen	29
3 Komponenten	31
3.1 Druckmedium, Verdrängung	31
3.1.1 Druckflüssigkeiten im Vergleich	31
3.1.2 Verdrängerprinzip und seine Anwendung	35
3.2 Hydropumpen	38
3.2.1 Außenzahnrادpumpen	38
3.2.2 Innenzahnrادpumpen	41
3.2.3 Flügelzellenpumpen	42
3.2.4 Axialkolbenpumpen - Schrägscheibenbauweise	43
3.2.5 Axialkolbenpumpen - Schrägachsenbauweise	46
3.2.6 Radialkolbenpumpen mit innerer Abstützung	50
3.2.7 Pumpenstellsysteme	52
3.2.8 Hydropumpen im Vergleich	56
3.3 Hydroventile	58
3.3.1 Übersicht der Hydroventile	58
3.3.2 Wegeventile	72
3.3.3 Druckbegrenzungsventile	74
3.3.4 Druckreduzierventile	76
3.3.5 Druckzuschaltventile	77
3.3.6 Druckabschaltventile	78
3.3.7 Rückschlagventile	80
3.3.8 Entsperrbare Rückschlagventile	82
3.3.9 Drosselventile	83
3.3.10 Stromregelventile	85

3.4	Hydrozylinder	87
3.4.1	Grundlagen Hydrozylinder	87
3.4.2	Plungerzylinder	96
3.4.3	Teleskopzylinder	97
3.4.4	Differenzialzylinder	98
3.4.5	Servozylinder	100
3.4.6	Gleichgangzylinder	102
3.5	Hydromotoren	104
3.5.1	Außenzahnradmotoren	104
3.5.2	Axialkolbenmotoren – Schrägscheibenbauweise	106
3.5.3	Axialkolbenmotoren - Schrägachsenbauweise	108
3.5.4	Radialkolbenmotoren mit äußerer Abstützung	110
3.5.5	Hydromotoren im Vergleich	112
3.6	Verbindungstechniken	114
3.6.1	Verbindungstechniken im Vergleich	114
3.7	Zubehör	119
3.7.1	Hydrospeicher	119
3.7.2	Hydrofilter	123
3.7.3	Kühler	125
3.7.4	Manometer	130
4	Grundsaltungen	133
4.1	Schaltpläne in der Hydraulik	133
4.1.1	Grafische Darstellung hydraulischer Schaltkreise	133
4.2	Ventilsteuerungen	136
4.2.1	Steuerung mit Wegeventilen	136
4.2.2	Geschwindigkeitssteuerung mit Drosselventilen	142
4.2.3	Lastunabhängige Geschwindigkeitsregelung mit Stromregelventilen	150
4.2.4	Eilgangschaltungen	157
4.3	Hydrostatische Antriebe	161
4.3.1	Wirkprinzipien der Hydrostatik im Vergleich	161
4.4	Druck- und kraftabhängige Steuerungen	165
4.4.1	Druckabsicherung in hydraulischen Anlagen	165
4.4.2	Steuerung mit Druckschaltern	169
4.4.3	Steuerung von Verbrauchern im Parallelbetrieb	170
4.4.4	Schaltungen mit Speichern	172
5	Systeme	180
5.1	Energieerzeuger	180
5.1.1	Hydroaggregate	180
	Stichwortverzeichnis	188

1 Allgemeines

1.1 Einführung in die Hydraulik

Definition

Die Hydraulik ist die wissenschaftliche Lehre von den ruhenden und strömenden Flüssigkeiten. In der technischen Praxis versteht man unter Hydraulik allgemein das Erzeugen von Kräften und Bewegungen durch Druckflüssigkeiten. Der Begriff leitet sich aus den altgriechischen Wörtern „hydor“ (das Wasser) und „aulos“ (das Rohr) ab.

Historische Entwicklung

Bereits in der Antike machten sich Menschen die Energie des fließenden Wassers zunutze. So entstanden beispielsweise die ersten Wasserräder nachweislich etwa um 200 v. Chr. Sie haben sich bei Wassermühlen bis in unsere Zeit erhalten und finden in ihrer technischen Weiterentwicklung als Wasserturbinen in Kraftwerken auch heute noch Verwendung.

ab ca. 5000 v. Chr.	Menschen nutzen die Energie des fließenden Wassers.
ca. 200 v. Chr.	Die ersten Wasserräder entstehen.
ab ca. 1600	Der Wasserdruck wird als Antriebskraft genutzt.
1653	Der französische Physiker Pascal (1623-1662) erläutert das hydrostatische Prinzip am Beispiel der hydraulischen Presse.
1795	Der britische Ingenieur Joseph Bramah (1749-1814) fertigt eine hydraulische Presse mit Wasser als Druckflüssigkeit zur Erzeugung großer Kräfte. Er gilt damit als Schöpfer der ersten industriellen Anwendung der Hydraulik.
1851	Der britische Industrielle William G. Armstrong (1810-1900) entwickelt einen Speicher ("Gewichtsakkumulator"), mit dessen Hilfe große Volumenströme erzeugt werden konnten.
1905	Beginn der Ölhydraulik: Williams und Janney setzen erstmals Mineralöl als Übertragungsmedium für hydrostatische Getriebe ein.
1922	Der Ingenieur Hans Thoma setzt eine mit Mineralöl betriebene Radialkolbenpumpe industriell um.
seit 1950	Die Ölhydraulik setzt sich in allen Bereichen der Industriehydraulik durch.

Tab. 1: Geschichte der Hydraulik

Anwendungsgebiete der Hydraulik

Hydraulische Systeme finden Anwendung in Bereichen der Leistungsübertragung sowie der Steuer- und Regelungstechnik. Um die Breite der möglichen Anwendungsbereiche einzuteilen, unterscheidet man grundsätzlich zwischen der **Industriehydraulik** (oder Stationärhydraulik) und der **Mobilhydraulik**.

Anwendungen in der Industriehydraulik

Unter Industriehydraulik werden Anwendungen zusammengefasst, bei denen Hydraulikkomponenten ortsfest installiert sind. Anwendungsbeispiele sind Werkzeugmaschinen, Kunststoffmaschinen oder Pressen in der Walzwerkindustrie.

Kunststoffspritzgussmaschine



Tower Bridge



Windkraftanlage



Stranggießanlage mit Walzwerk



Tab. 2: Anwendungen in der Industriehydraulik

Anwendungen in der Mobilhydraulik

Die Mobilhydraulik umfasst Anwendungen, bei denen Hydraulikkomponenten in mobilen Arbeitsmaschinen installiert sind. Hydraulik wird hier z.B. eingesetzt in Baggern, Radladern, Straßenwalzen, Pistenraupen, Traktoren, Staplern oder Kommunalfahrzeugen.

Mobilbagger



Mobilkran



Radlader



Hubwerksregelung Traktor



Tab. 3: Anwendungen in der Mobilhydraulik

1.2 Antriebstechniken im Vergleich

Antriebstechniken

Für die Realisierung von Antrieben kommen Lösungen aus den Technikbereichen der Hydraulik, der Pneumatik, der Elektrik und der Mechanik in Frage:

- ▶ In hydraulischen Antrieben wird Bewegung mit Hilfe einer Druckflüssigkeit erzeugt, die feste Körper verdrängt. Hydraulik-Antriebe werden in vielen Bereichen der Industrie und in mobilen Arbeitsmaschinen, z.B. Bagger, eingesetzt.
- ▶ In pneumatischen Antrieben wird Bewegung mit Hilfe von Druckluft erzeugt. Bekannte Anwendungen sind pneumatische Schraubwerkzeuge in Kfz-Werkstätten oder die Beförderung von leichten Gütern in Fertigungsstraßen.
- ▶ Elektrische Antriebe arbeiten meist mit Elektromotoren, die in zunehmendem Maße elektronisch geregelt werden. Anwendung finden elektrische Antriebe beispielsweise bei hochgenauen Werkzeugmaschinen oder in Druckmaschinen.
- ▶ Mechanische Antriebe erzeugen translatorische oder rotatorische Bewegungen oder Kurvenbahnen durch den Einsatz von Kurbeltrieben, Getrieben mit fester Übersetzung, stufenlosen Getrieben oder Kurvengetrieben.

Je nach Einsatz und Verwendung werden verschiedene Anforderungen an die Antriebstechnik gestellt. Unterschiede zwischen den Antriebstechniken ergeben sich insbesondere in Bezug auf die Energieversorgung, die Verteilung der Energie, die Eigenschaften des verwendeten Übertragungsmediums und die Eigenschaften des Antriebs (Art der Bewegung) selbst.

Gegenüberstellung der Antriebstechniken

Folgende Tabelle enthält eine Gegenüberstellung der Antriebstechniken anhand ihrer wichtigsten technischen Kriterien.

Kriterium	Hydraulik	Pneumatik	Elektrik	Mechanik
Energieträger	Druckflüssigkeit	Luft	Elektronen	Bewegung, Lage, Verformung
Energieübertragung	Rohre, Schläuche, Bohrungen	Rohre, Schläuche, Bohrungen	elektrisch leitendes Material	Wellen, Gestänge, Riemen, Ketten, Räder, usw.
Umwandlung aus bzw. in mechanische Energie	Hydropumpe, Hydromotor, Hydrozylinder	Verdichter, Pneumatikzylinder, Pneumatikmotor	Generator, Batterie, Magnet, Elektromotor	—
Wichtigste Kenngrößen	Druck p , Volumenstrom q_v	Druck p , Volumenstrom q_v	Spannung U , elektrischer Strom I	Kraft F , Drehmoment M , Geschwindigkeit v , Drehzahl n
Speicherung	Blasenspeicher, Kolbenspeicher, Membranspeicher	Druckluftbehälter	Kondensator	Gewichtskraft

Kriterium	Hydraulik	Pneumatik	Elektrik	Mechanik
Leistungsdichte	sehr gut (hohe Betriebsdrücke)	gut (Einschränkung durch max. Betriebsdruck)	weniger gut (Leistungsgewicht von Elektromotoren ca. 10-mal höher als von Hydromotoren)	gut (keine Energieumwandlung notwendig; Einschränkungen, wenn hohe Anforderungen an die Regelbarkeit)
Wirkungsgrad	abhängig von Leckage und Reibung bei der Energieumwandlung; Verluste bei Steuerung und Regelung in Ventilen	abhängig von Leckage und Reibung bei der Energieumwandlung; Verluste bei Steuerung und Regelung in Ventilen	abhängig von Verfügbarkeit der Elektrizität als Primär-Energie	abhängig von der Größe der Reibungsverluste
Erzeugung linearer Bewegung	sehr einfach (über Zylinder; Anfahren und Bewegungsumkehr unter Volllast möglich)	sehr einfach (über Zylinder)	weniger einfach (über Linear-Elektromotor, Gewindespindel, usw.)	einfach (über Kurbeltrieb, Spindel usw.)
Erzeugung rotierender Bewegung	einfach (über Hydromotor)	einfach (über Druckluftmotor)	sehr einfach (über Rotations-Elektromotor)	sehr einfach (über Getriebe)
Erzeugung von Kurvenbahnen	weniger gut	weniger gut	weniger gut	sehr gut bei bestimmten Anwendungen (Biegetechnik)
Weggenauigkeit	sehr gut (Flüssigkeit ist kaum kompressibel)	weniger gut (Luft ist kompressibel)	unterschiedlich: weniger gut bei Asynchronmotoren sehr gut bei Synchron- und Schrittmotoren	sehr gut (durch Form- und Kraftschluss)
Steuer- und Regelbarkeit, Signalverarbeitung	sehr gut (über Ventile und Verstellpumpen; Einsatz von Servoventilen in der Regelungstechnik; weitere Verbesserung in Kombination mit Elektrik)	sehr gut (über Ventile)	sehr gut (über Schalter, Relais, Halbleiter, Regelmotoren, variable Widerstände usw.)	gut (über Getriebe, Hebelsysteme usw.)

Tab. 4: Technische Kriterien der Antriebstechniken

Fazit

Durch den Vergleich der Antriebstechniken ergeben sich folgende Feststellungen:

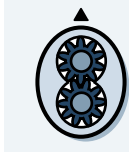
- ▶ Hydraulische Antriebe haben Vorteile bei der Erzeugung hoher Kräfte bei gleichzeitig sehr kompakter Bauweise. Nachteilig ist bei dieser Antriebstechnologie der Aufwand der betrieben werden muss, um zu verhindern dass Druckflüssigkeit austritt und in die Umwelt gelangt.
- ▶ Pneumatische Antriebe können bevorzugt dort eingesetzt werden, wo schnelle Bewegungen bei geringem Kraftbedarf gefordert sind. Weitere Vorteile bieten die vergleichsweise geringen Investitionskosten und eine gute Umweltverträglichkeit. Die relativ starke Geräuscentwicklung ist ein Nachteil dieser Technologie.
- ▶ Elektrische Antriebe zeichnen sich durch eine hohe Regeldynamik und Flexibilität aus. Von Nachteil sind die vergleichsweise hohen Investitionskosten.
- ▶ Mechanische Antriebe sind einfach realisierbar und können sehr einfach lineare und rotierende Bewegungen erzeugen. Ein Nachteil ist jedoch die weniger gute Steuer- und Regelbarkeit.

Durch die Kombination verschiedener Antriebstechniken, beispielsweise die Verbindung von Hydraulik und der Elektrotechnik bei drehzahlvariablen Pumpenantrieben (Sytronix), können die Vorteile der jeweiligen Technologie optimal genutzt und Nachteile ggf. kompensiert werden.

3.2 Hydropumpen

3.2.1 Außenzahnradpumpen

Kurzbeschreibung



Außenzahnradpumpen sind Verdrängermaschinen, bei denen die Verdrängerkammern durch außenverzahnte Zahnräder gebildet werden.

In den Gehäusebohrungen von Außenzahnradpumpen greifen zwei Zahnräder ineinander, von denen eines angetrieben wird (z.B. durch Elektromotor). Dieses angetriebene Zahnrad treibt das zweite Zahnrad gegenläufig an. In den Zahnzwischenräumen wird die Druckflüssigkeit gefördert.

Charakteristik

Außenzahnradpumpen sind Konstantpumpen. Sie zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und eine hohe Leistungsdichte aus. Sie haben gute Notlaufeigenschaften, so dass eine kurzzeitig unzureichende Schmierung, z.B. beim Anlauf, keine Schäden an den Pumpen verursacht.

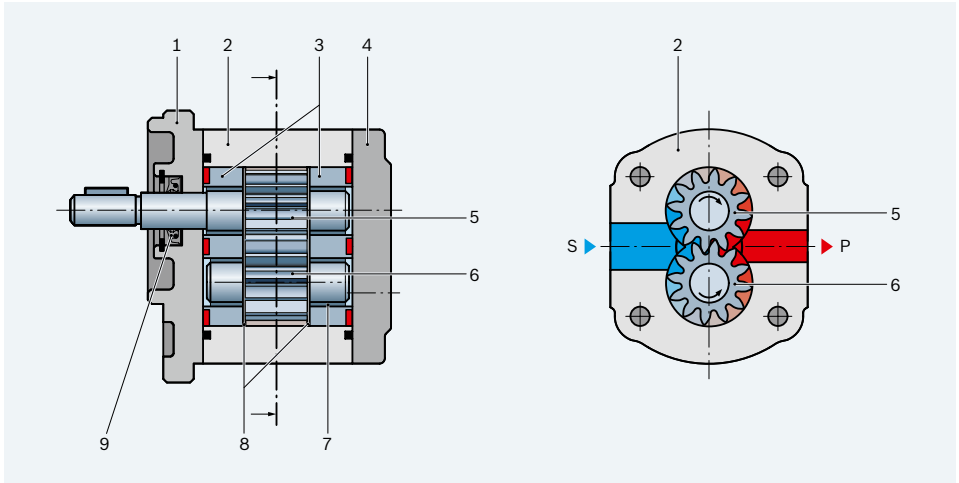
Außenzahnradpumpen bestehen aus wenigen Bauteilen, wobei das Gehäuse mit niedrigem Fertigungsaufwand aus einem Aluminiumstrangprofil hergestellt werden kann.

Nachteilig sind Leckage- und Reibungsverluste sowie eine erhebliche Geräuscentwicklung, die je nach Ausführung der Pumpen unterschiedlich stark auftreten können.

Außenzahnradpumpen können in einem weiten Drehzahlbereich eingesetzt und mit Druckflüssigkeiten innerhalb eines großen Viskositätsbereichs betrieben werden. Dadurch ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Mobilhydraulik (Traktoren und Gabelstapler) und in industriellen Anwendungen.

Aufbau

Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Außenzahnradpumpe im Längs- und Querschnitt.



- | | |
|--|--|
| 1 Flansch (Frontdeckel) | 7 Lager |
| 2 Gehäuse | 8 Dichtfläche zwischen Lagerbrillen und Zahnrädern |
| 3 Lagerbrillen | 9 Wellendichtring |
| 4 Gehäusedeckel (Enddeckel) | P Druckanschluss |
| 5 Antriebswelle mit treibendem Zahnrad | S Sauganschluss |
| 6 Angetriebenes Zahnrad | |

Abb. 9: Längs- und Querschnitt einer Außenzahnradpumpe

Bauarten und Varianten

Außenzahnradpumpen mit Schrägverzahnung

Die effektivste Reduzierung der Geräuscentwicklung bei Außenzahnradpumpen wird bei einer schrägverzahnten Pumpe der Ausführung „Bosch Rexroth SILENCE PLUS“ erreicht. Durch die Schrägverzahnung mit einem runden Zahnprofil werden die nacheinander fördernden Verdrängerkammern so überlagert, dass sie einen gleichmäßigen Förderstrom mit nur geringer Förderstrom-Pulsation liefern. Das runde Zahnprofil lässt die beiden Zahnräder ohne Spiel ineinander greifen, so dass die Druckflüssigkeit vollständig aus den Zahnzwischenräumen verdrängt wird. So bleibt keine Druckflüssigkeit in den Verdrängerkammern, die sonst als sog. „Quetschöl“ zu schlagartigen Entladungsstößen beim Übergang vom Druck- zum Saugbereich führen würde.

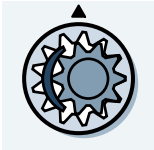
Bei niedrigen und mittleren Drücken wird das Geräusch der Außenzahnradpumpen „SILENCE PLUS“ vom Betriebsgeräusch des antreibenden Elektromotors überdeckt und kaum wahrgenommen.



Abb. 10: Außenzahnradpumpe mit Schrägverzahnung

3.2.2 Innenzahnradpumpen

Kurzbeschreibung



Innenzahnradpumpen sind Verdrängermaschinen, bei denen die Verdrängerkammern durch ein Ritzel und ein exzentrisch gelagertes Hohlrad gebildet werden. Druck- und Saugbereich sind durch ein Segmentfüllstück getrennt.

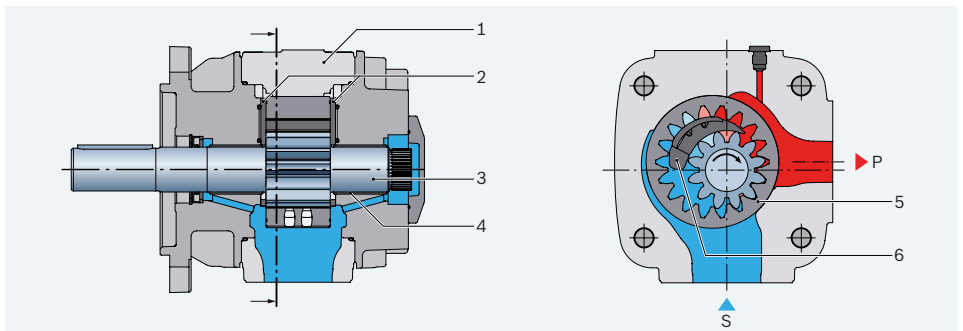
Charakteristik

Innenzahnradpumpen sind Konstantpumpen. Sie sind durch einen weiten Drehzahlbereich gekennzeichnet und können mit Druckflüssigkeiten innerhalb eines großen Viskositätsbereichs betrieben werden. Durch Spaltkompensation erreichen Innenzahnradpumpen einen hohen Wirkungsgrad.

Aufgrund ihres niedrigen Geräuschpegels haben Innenzahnradpumpen ein großes Einsatzgebiet. In der Stationärhydraulik werden sie z.B. für Werkzeugmaschinen, Pressen und Kunststoffmaschinen eingesetzt. In der Mobilhydraulik finden Innenzahnradpumpen vor allem Anwendung bei Fahrzeugen, die in geschlossenen Räumen arbeiten (z.B. bei Elektro-Gabelstaplern).

Aufbau

Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Innenzahnradpumpe im Längs- und Querschnitt.

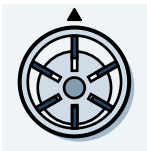


- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1 Gehäuse | 5 Hohlrad |
| 2 Axialscheiben | 6 Segmentfüllstück |
| 3 Ritzelwelle | P Druckanschluss |
| 4 Lager | S Sauganschluss |

Abb. 11: Längs- und Querschnitt einer Innenzahnradpumpe

3.2.3 Flügelzellenpumpen

Kurzbeschreibung



Flügelzellenpumpen sind Verdrängermaschinen, bei denen die Verdrängerkammern zwischen Hubring, Rotor und Flügel gebildet werden.

Im Rotor einer Flügelzellenpumpe befinden sich bewegliche Metallplättchen, die sog. Flügel. Die Flügel werden in Schlitzen geführt, die radial zur Antriebswelle im Rotor angebracht sind. Beim Drehen des Rotors werden sie durch die Fliehkraft an die Innenwand des Hubrings gedrückt. Die Flügel unterteilen so den Raum zwischen Hubring und Rotor in Verdrängerkammern. Aufgrund der exzentrischen Lage des Hubrings ändern die Verdrängerkammern, die bei diesen Pumpen als Zellen bezeichnet werden, während der Drehung des Rotors ihre Größe.

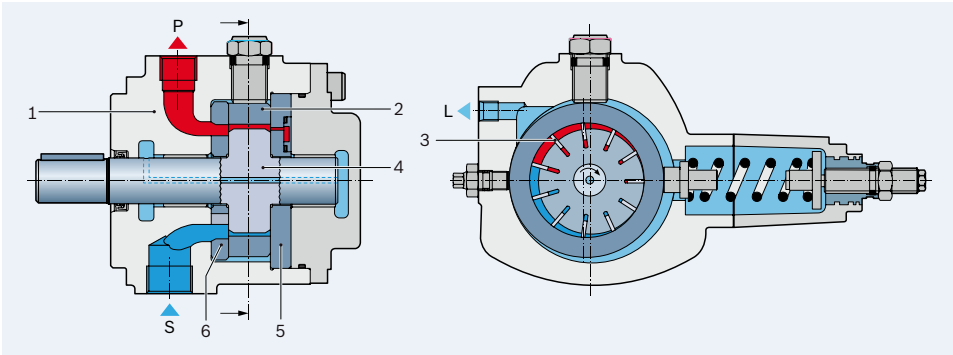
Charakteristik

Flügelzellenpumpen sind Konstant- oder Verstellpumpen. Sie zeichnen sich durch geringe Pulsation und niedrige Geräuscentwicklung aus. Durch ihre Bauweise ist eine Verstellung des Fördervolumens einfach zu realisieren.

Aufgrund ihrer Eigenschaften sind Flügelzellenpumpen vielseitig einsetzbar. In der Industrie kommen sie häufig in Werkzeugmaschinen und in der Verpackungstechnik zum Einsatz.

Aufbau

Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Flügelzellenpumpe im Längs- und Querschnitt.



- | | | | |
|---|--------------------------|---|------------------|
| 1 | Gehäuse | 6 | Steuerplatte |
| 2 | Hubring | L | Leckageanschluss |
| 3 | Flügel, radial beweglich | P | Druckanschluss |
| 4 | Rotor mit Antriebswelle | S | Sauganschluss |
| 5 | Kompensationsscheibe | | |

Abb. 12: Längs- und Querschnitt einer Flügelzellenpumpe

Impressum

Wissen kompakt
Hydraulik – Grundlagen

Herausgeber:

Bosch Rexroth AG
Drive & Control Academy
Bahnhofplatz 2
97070 Würzburg, Germany

Nachdruck, Vervielfältigung und Übersetzung, auch auszugsweise, nur mit unserer vorherigen schriftlichen Zustimmung und mit Quellenangaben gestattet.

Wir übernehmen keine Haftung für die Übereinstimmung des Inhalts mit den jeweils geltenden gesetzlichen Vorschriften.

Änderungen vorbehalten.

2., überarbeitete Auflage (Februar 2017)

Materialnummer: R961008906

ISBN: 978-3-9814879-6-1

Bosch Rexroth AG

Drive & Control Academy
Bahnhofplatz 2
97070 Würzburg, Germany
Telefon: +49 9352 18-1920
E-Mail: media@boschrexroth.de
www.boschrexroth.com/academy

Bosch Rexroth ist einer der weltweit führenden Spezialisten in der Antriebs- und Steuerungstechnik und verfügt über ein einzigartiges technologisches Know-how. Dieses Wissen gibt die Drive & Control Academy weiter und unterstützt die maßgeschneiderte Aus- und Weiterbildung sowie die Qualifizierung technischer Fachkräfte.

Für alle, die einen ersten Einblick in das technologische Know-how von Bosch Rexroth erlangen wollen, wurde die Buchreihe „Wissen kompakt“ entwickelt. In dieser Reihe bietet „Hydraulik – Grundlagen“ einen Überblick über Grundprinzipien und Komponenten der Hydraulik, wie beispielsweise Schaltventile, Hydropumpen, Hydromotoren oder Hydrozylinder. Veranschaulicht werden diese Themen anhand von Grafiken und Schaltplänen.

Dieses Buch kann als Nachschlagwerk, ergänzend zu einem Training bei Bosch Rexroth, oder zum Selbststudium genutzt werden.

