

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 1/27

1 Einführung

1.1 Überblick

Die Pneumatik wird bei der Verrichtung mechanischer Arbeit und vermehrt bei Automatisierungsaufgaben eingesetzt. Sie bietet in bestimmten Bereichen der Technik eindeutig Vorteile gegenüber der Mechanik, der Elektrotechnik oder der Hydraulik. Bevor man sich für den Einsatz der Pneumatik entscheidet, sollte man daher sehr wohl die jeweiligen Vor- und Nachteile gegeneinander abwägen. In dem Bestreben, den Bauaufwand, die Betriebssicherheit und die technische Vollkommenheit für die jeweilige Aufgabe zu optimieren, werden sehr häufig zwei oder mehr Steuerungs- und Antriebsmedien miteinander verknüpft. Durch diese Kombination der Medien wird es schwerer, klare Anwendungskriterien beim Abwägen der Vor- und Nachteile zu finden.

Merkmale und Vorteile der Pneumatik:

Transport	Luft ist praktisch überall in unbegrenzter Menge verfügbar und kann sehr einfach in Rohrleitungen über weite Strecken transportiert werden.
Speicherfähigkeit	Druckluft kann in einem Druckbehälter (z.B. Flasche) gespeichert und von dort entnommen werden.
Temperatur	Druckluft ist nahezu unempfindlich gegen Temperaturschwankungen. Dies führt zu einem zuverlässigen Betrieb selbst unter extremen Bedingungen.
Sicherheit	Druckluft bietet kein Risiko in Bezug auf Feuer- oder Explosionsgefahr.
Sauberkeit	Nichtgeölte entweichende Druckluft verursacht keine Verschmutzung.
Aufbau	Die Arbeitselemente sind einfach in ihrem Aufbau und daher preiswert. Translatorische Bewegungen lassen sich in einfacher Weise erzielen.
Geschwindigkeit	Druckluft ist ein schnelles Arbeitsmedium. Es können hohe Kolbengeschwindigkeiten und kurze Schaltzeiten erzielt werden.
Überlastsicherung	Pneumatische Werkzeuge und Arbeitselemente können bis zum Stillstand belastet werden und sind somit überlastsicher.

Nachteile:

Aufbereitung	Druckluft muss aufbereitet werden, da sonst die Gefahr erhöhten Verschleißes der Pneumatik-Komponenten durch Schmutzpartikel und Kondenswasser besteht.
Verdichtung	Mit Druckluft ist es nicht möglich, ganz gleichmäßige und konstante Kolbengeschwindigkeiten zu erzielen.
Kraft	Druckluft ist nur bis zu einem bestimmten Kraftbedarf wirtschaftlich. Bei dem normalerweise verwendeten Betriebsüberdruck von 600 bis 700 kPa (6 bis 7 bar) und in Abhängigkeit von Hub und Geschwindigkeit liegt diese Grenze zwischen 40.000 und 50.000 N.
Abluft	Das Entweichen der Luft ist mit Geräuschentwicklung verbunden. Dieses Problem kann aber weitgehend durch schallabsorbierende Materialien und Schalldämpfer (häufig aus Sintermetall oder Keramik) gelöst werden.

Darstellungen und Texte sind zu einem großen Teil dem Lehrbuch Grundstufe TP 101 der FESTO Didactic, Esslingen, entnommen.

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 2/27

Der Vergleich mit anderen Energieformen ist eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der Pneumatik als Steuer- oder Arbeitsmedium. Zusätzlich müssen noch folgende Faktoren betrachtet werden:

- bevorzugte Steuermedien
- vorhandene Ausrüstung
- vorhandenes Fachwissen
- bereits vorhandene Systeme

Arbeitsmedien sind: elektrischer Strom, Flüssigkeiten (Hydraulik), Druckluft (Pneumatik).

Auswahlkriterien und Systemeigenschaften, die beim Einsatz der Arbeitsmedien zu berücksichtigen sind:

Kraft, Hub
Bewegungsart (linear, schwenkend, rotierend)
Geschwindigkeit
Lebensdauer
Sicherheit und Zuverlässigkeit
Energiekosten
Bedienbarkeit
Speicherfähigkeit

Steuermedien sind: mechanische Verbindungen (Mechanik), elektrischer Strom (Elektrik, Elektronik), Flüssigkeiten (Hydraulik), Druckluft (Pneumatik, Niederdruck-Pneumatik).

Auswahlkriterien und Systemeigenschaften, die beim Einsatz der Steuermedien zu berücksichtigen sind:

Zuverlässigkeit der Bauteile
Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen
Wartungs- und Reparaturfreundlichkeit
Schaltzeit der Bauteile
Signalgeschwindigkeit
Platzbedarf
Lebensdauer
Veränderbarkeit des Systems
Schulungsaufwand

Mit dem hier vorliegenden Versuch sollen Sie die Grundlagen der Pneumatik und einige Methoden kennen lernen.

1.2 Druckluftherzeugung, Verteilung und Aufbereitung

Die Luft wird mit dem Verdichter verdichtet und an das Luftverteilungssystem weitergeleitet. Um sicherzustellen, dass die Luftqualität ausreichend ist, wird sie z.B. in Lufttrocknern und Wartungseinheiten aufbereitet. In der Regel werden pneumatische Bauelemente für einen maximalen Betriebsüberdruck von 800 bis 1000 kPa (8 bis 10 bar) ausgelegt, jedoch empfiehlt es sich, in der Praxis aus wirtschaftlichen Gründen mit einem Druck von 500 bis 600 kPa (5 bis 6 bar) zu arbeiten. Der Verdichter sollte einen Druck von 650 bis 700 kPa (6,5 bis 7 bar) liefern, um den Druckverlust innerhalb des Luftverteilungssystems ausgleichen zu können.

Die Wartungseinheit besteht häufig aus einer Kombination folgender Einheiten:

- Druckluftfilter (mit Wasserabscheider)
- Druckregelventil
- Druckluftöler

Der Einsatz eines Druckluftölers braucht allerdings nur bei Bedarf im Leistungsteil vorgesehen werden (das hängt von den Eigenschaften der Verbraucher ab). Die Druckluft im Steuerteil muss nicht unbedingt geölt werden. (Im Praktikum wird nur mit ölfreier Luft gearbeitet).

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 3/27

Die richtige Kombination, Größe und Bauart werden von der Anwendung und den Ansprüchen des Systems bestimmt. Um die Luftqualität für jede Aufgabe zu garantieren, werden Wartungseinheiten in jedem Steuerungssystem installiert.

- Druckluftfilter** Der Druckluftfilter hat die Aufgabe, Verunreinigungen sowie Kondensat aus der durchströmenden Druckluft zu entfernen. Die Druckluft strömt durch Leitschlitze in die Filterschale. Hier werden Flüssigkeitsteilchen und Schmutzpartikel durch Zentrifugalkraft vom Luftstrom getrennt. Die herausgelösten Schmutzpartikel setzen sich im unteren Teil der Filterschale ab. Das gesammelte Kondensat muss vor Überschreiten der Maximalgrenze abgelassen werden, da es sonst dem Luftstrom wieder zugeführt wird.
- Druckregelventil** Das Druckregelventil hat die Aufgabe, den Arbeitsdruck der Anlage (Sekundärdruck) konstant zu halten, ohne Rücksicht auf Schwankungen des Leitungsdrucks (Primärdruck) und des Luftverbrauchs.
- Druckluftöler** Der Druckluftöler hat die Aufgabe, die Luft mit einer dosierten Ölmenge anzureichern, wenn dies für den Betrieb der pneumatischen Anlage notwendig ist.

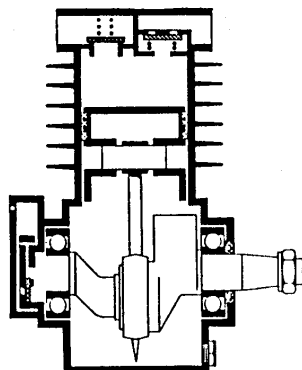


Bild 1: Kolbenverdichter

Der Kolbenverdichter ist weit verbreitet. Er ist einfach im Aufbau und wartungsarm. Die Ventile sind selbststeuernd. Sie werden durch Federn gegen die Ventilsitze gedrückt. Bei einer Abwärtsbewegung des Kolbens öffnet sich das rechte Ventil und Luft wird angesaugt. Bei einer Aufwärtsbewegung des Kolbens wird die Luft verdichtet und entweicht dann über das linke Ventil zum Druckluftspeicher. Dieser muss die Druckluftstöße für das Druckluftverteilungssystem ausgleichen.

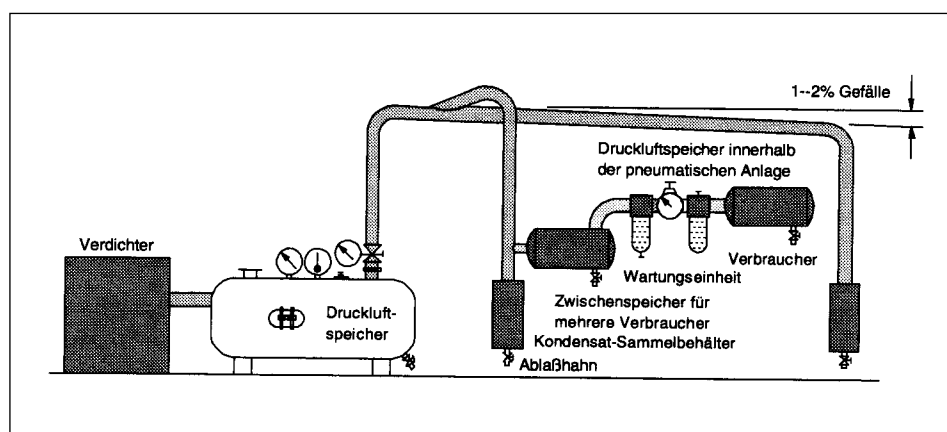


Bild 2: Luftverteilungssystem

Das Gefälle in der Versorgungsleitung soll entstehendes Kondenswasser definiert in den Kondenswassersammelbehälter leiten.

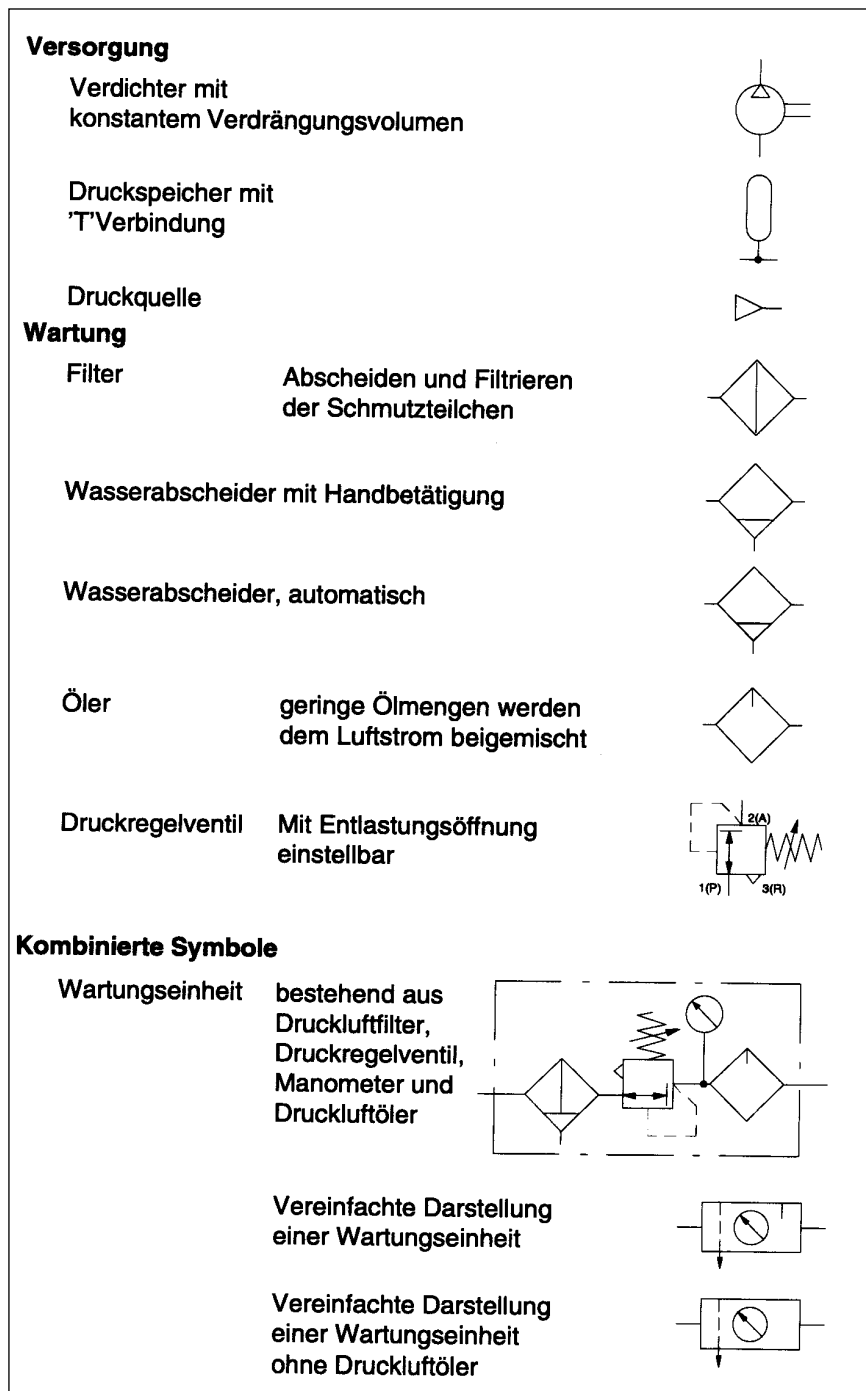


Bild 3: Symbole für den Energieversorgungsteil

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 5/27

1.3 Steuerelemente

1.3.1 Ventile

Ventile haben die Aufgabe, den Druck oder den Durchfluss von Druckmedien zu steuern. Je nach Bauart lassen sie sich in folgende Kategorien einteilen:

1.3.1.1 Wegeventile

Das Wegeventil steuert den Durchgang von Luftsignalen oder Luftströmen. Es sperrt, öffnet oder verändert die Durchlassrichtung des Druckmediums. Das Ventil wird beschrieben durch:

Anzahl der Anschlüsse (Wege), Anzahl der Schaltstellungen, Ventilbetätigungsart, Rückstellungsart. Die Beschriftung der Anschlüsse im Symbol ist in Bild 6 erklärt.

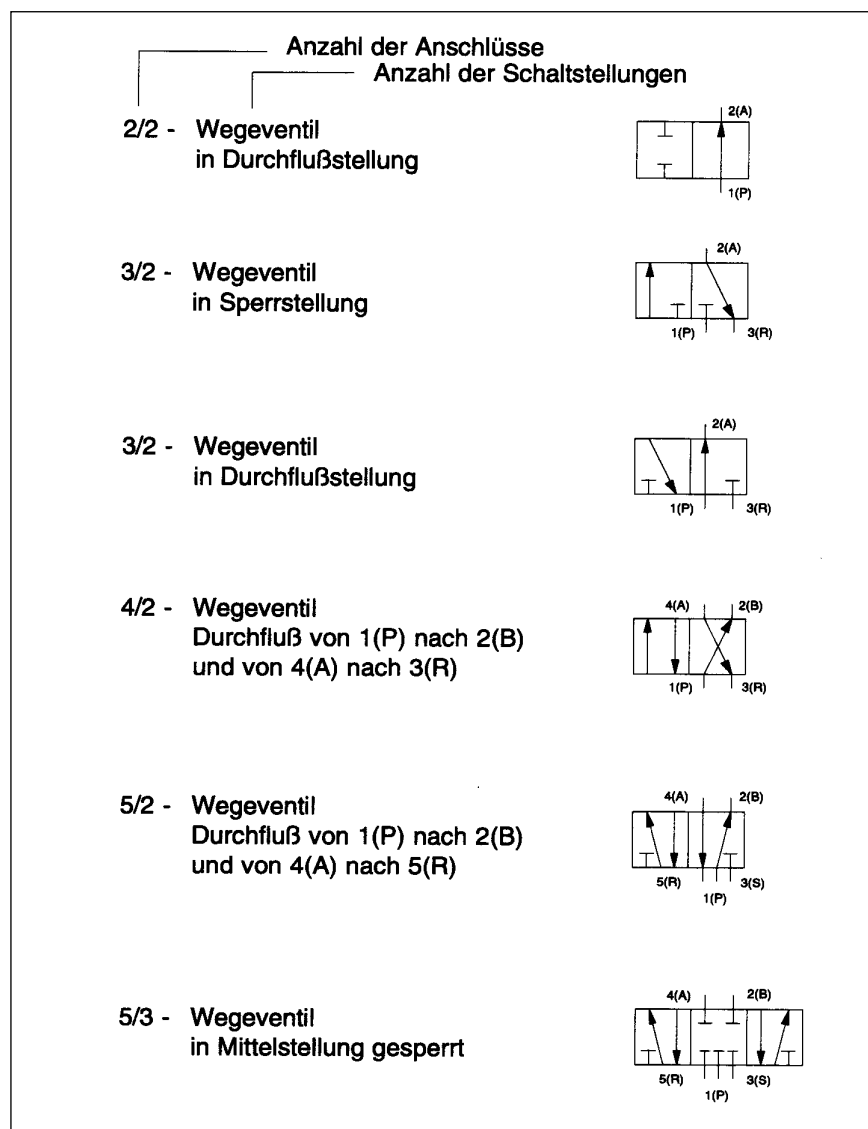


Bild 4: Symbole für Wegeventile

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 6/27

Im Zusammenhang mit Wegeventilen muss die Grundbetätigungsart des Ventils und die Rückstellung berücksichtigt werden. Normalerweise werden die Symbole dafür auf beiden Seiten der Schaltstellungen aufgeführt. Zusätzliche Betätigungsarten, wie z.B. Handhilfsbetätigung, werden gesondert angegeben.

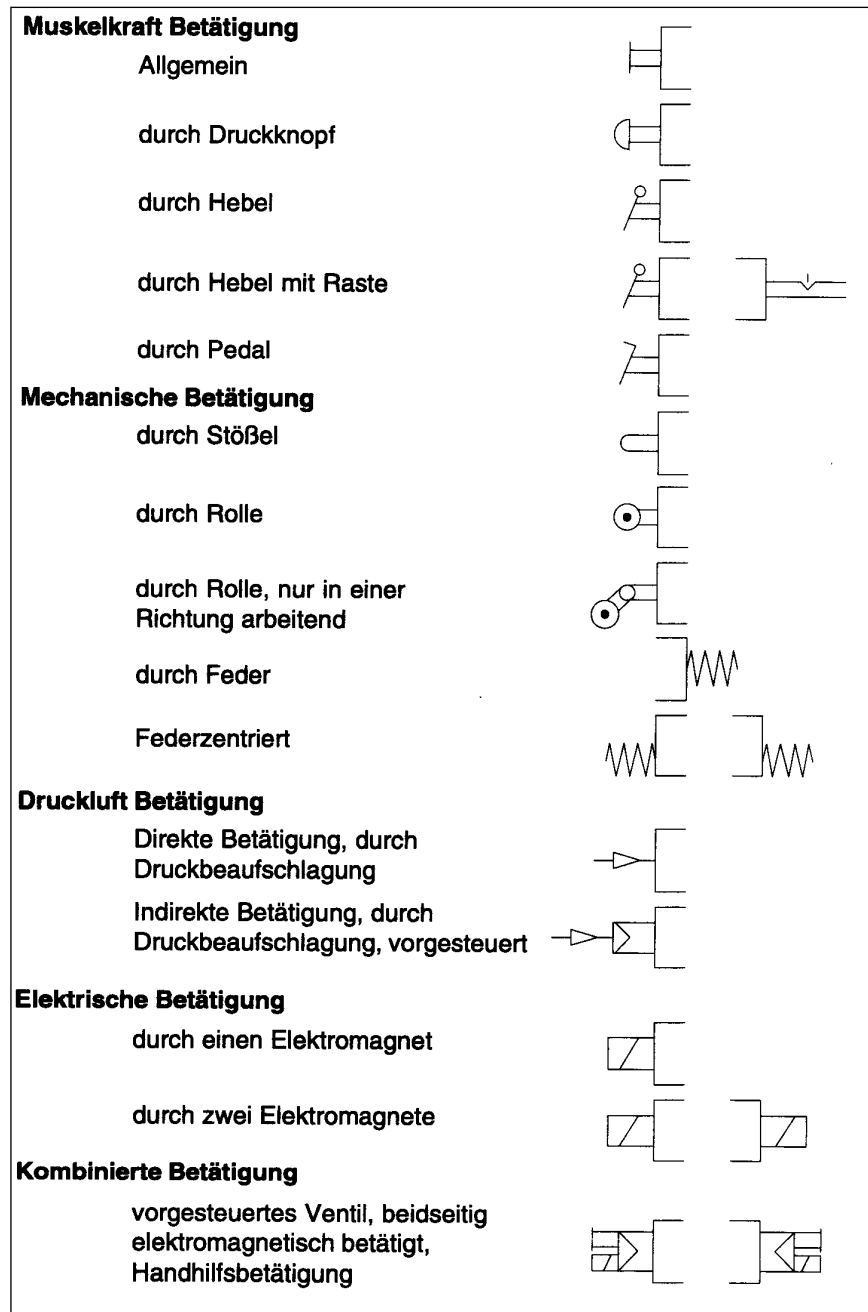


Bild 5: Symbole für Betätigungsarten

DIN ISO 5599-3	Buchstaben-system	Öffnung oder Anschluß
1	P	Druckluftanschluß
2, 4	A, B	Arbeitsleitungen
3, 5	R, S	Entlüftungsleitungen
10	Z	anstehendes Signal sperrt Durchgang von Anschluß 1 nach Anschluß 2
12	Y, Z	anstehendes Signal verbindet Anschluß 1 mit Anschluß 2
14	Z	anstehendes Signal verbindet Anschluß 1 mit Anschluß 4
81, 91	Pz	Hilfssteuerluft

Bild 6: Kennzeichnung der Anschlüsse der Arbeits- und Steuerleitungen an Wegeventilen

1.3.1.2 Sperrventile (Rückschlagventile)

Das Sperrventil erlaubt den Durchfluss des Luftstroms in nur einer Richtung. Anwendung findet dieses Prinzip u.a. in Wechselventilen oder Schnellentlüftungsventilen. Das Rückschlagventil dient als Grundelement für eine ganze Reihe von Varianten.

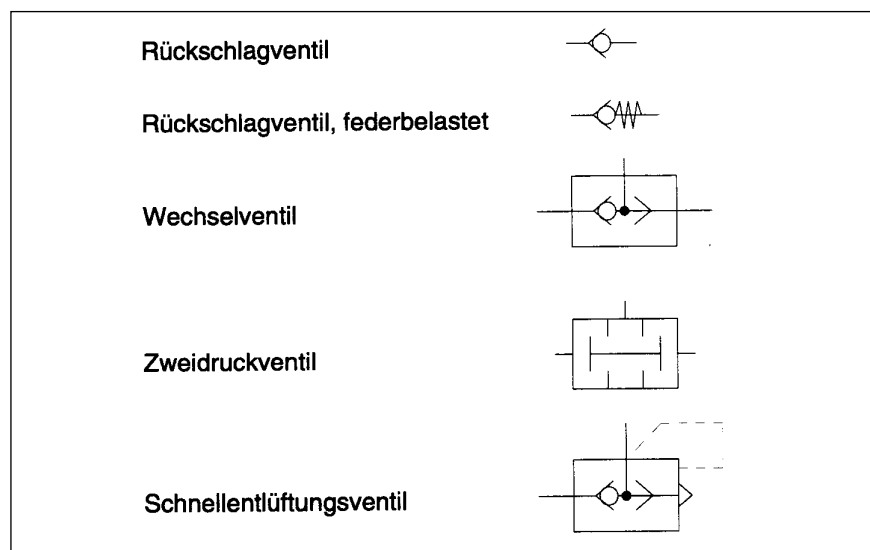


Bild 7: Symbole für Sperrventile

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 8/27

1.3.1.3 Stromventile (Drosselventile)

Das Drosselventil ist in der Regel einstellbar, sperrt oder drosselt den Volumenstrom und steuert somit die Luftdurchflussmenge. Es sollte nach Möglichkeit in unmittelbarer Nähe des Arbeitselementes installiert sein und muss den Anwendungsbedingungen gemäß eingestellt werden. Ist zum Drosselventil zusätzlich ein Rückschlagventil parallel geschaltet, dann wird in der einen Richtung der Durchfluss begrenzt und in der entgegengesetzten Richtung mit maximalem Durchfluss gearbeitet.

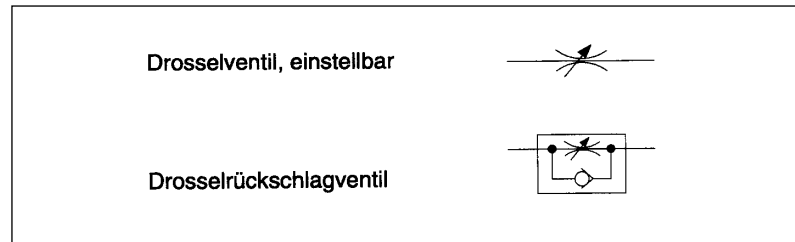


Bild 8: Symbole für Drosselventile

1.3.1.4 Druckventile

Druckventile haben die Aufgabe, den Druck in einem pneumatischen Gesamtsystem oder in einem Teil des Systems zu beeinflussen. Druckventile sind meist gegen eine Federkraft einstellbar.

Beim Druckregelventil ist der Durchfluss immer geöffnet. Das Druckschaltventil bleibt solange geschlossen, bis die Druckkraft den an der Stellfeder eingestellten Grenzwert erreicht.

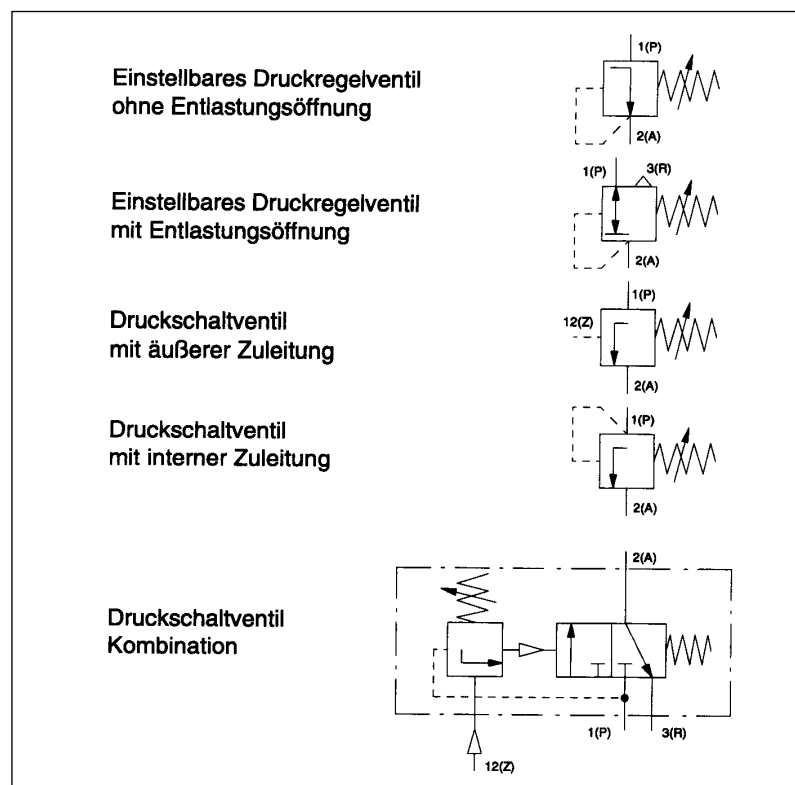


Bild 9: Symbole für Druckventile

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 9/27

1.3.1.5 Absperrventile

Als Absperrventile werden Ventile bezeichnet, die den Durchfluss in beide Richtungen stufenlos freigeben oder absperren (z.B. Kugelhahn).

1.3.2 Signal- und Steuerglieder

Als rein pneumatische Signalglieder gibt es Luftschranken und Reflexdüsen. Als elektrische Signalglieder für Zylinderpositionen haben sich Zylinderschalter bewährt.

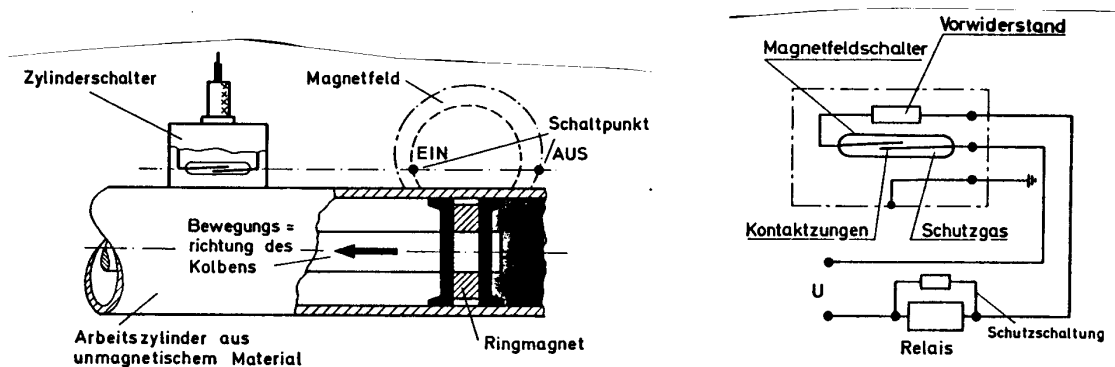


Bild 10: Zylinderschalter

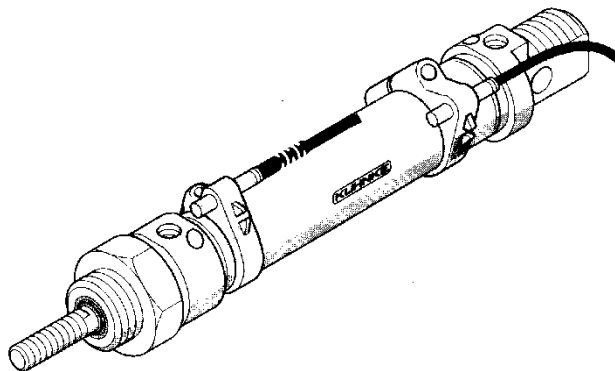


Bild 11: Zylinder mit Reedkontakten zur Endlagenidentifikation

1.4 Arbeitselemente

1.4.1 Zylinder (lineare Antriebselemente)

Der einfachwirkende, der doppelwirkende und der kolbenstangenlose Zylinder sind die Grundlage für weitere Konstruktionsvarianten. Der Einsatz einer Endlagendämpfung, um die Belastung in den Endlagen während der Geschwindigkeitsabnahme des Kolbens zu reduzieren, sorgt für eine längere Lebensdauer. Die Endlagendämpfung kann entweder fest oder einstellbar sein. Ist das zugehörige Symbol mit einem Pfeil gekennzeichnet, so bedeutet dies, dass die Endlagendämpfung einstellbar ist.

Der einfachwirkende Zylinder verfügt über nur einen Luftanschluss und enthält meist eine Rückstellfeder. Einfachwirkende Zylinder ohne Rückstellfeder müssen durch eine äußere Kraft zurückgestellt werden.

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 10/27

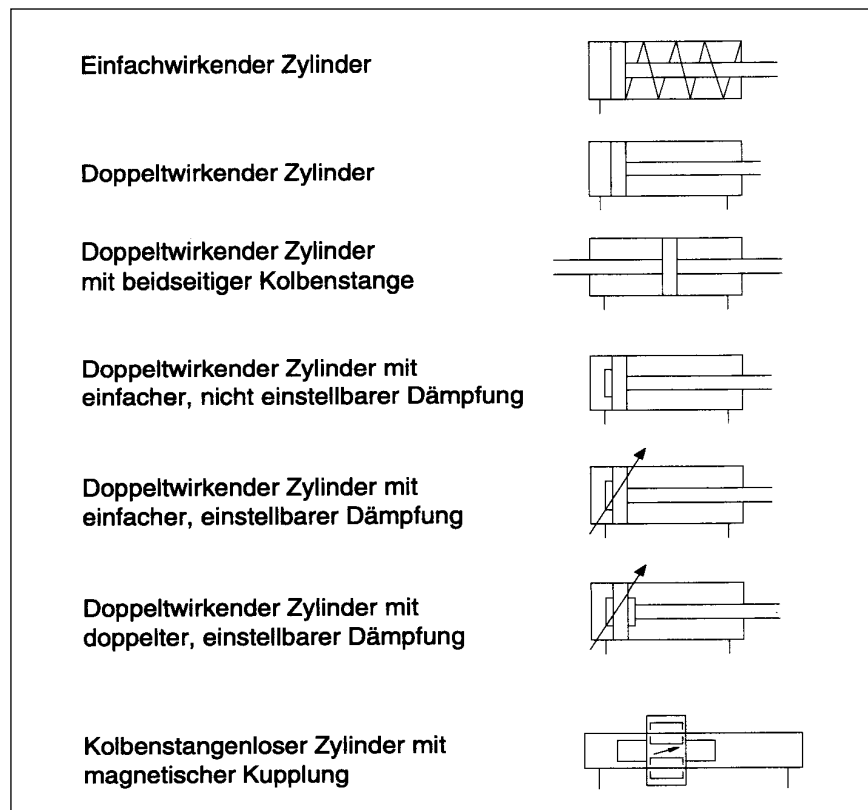


Bild 12: Symbole für Zylinder

Bei dem doppeltwirkenden Zylinder werden die beiden Anschlüsse jeweils zur Be- und Entlüftung benutzt. Dies hat den Vorteil, dass Arbeit in beide Richtungen ausgeführt werden kann. Die auf die Kolbenstange übertragene Kraft ist für den Vorhub etwas größer als für den Rückhub, da die beaufschlagte Fläche auf der Kolbenseite größer ist als die auf der Kolbenstangenseite.

Werden von einem Zylinder große Massen bewegt, so verwendet man eine Dämpfung in der Endlage, um hartes Aufschlagen und Beschädigungen des Zylinders zu vermeiden. Vor Erreichen der Endlage unterbricht ein Dämpfungskolben den direkten Abflussweg der Luft ins Freie. Dafür bleibt ein sehr kleiner, oft einstellbarer Abflussquerschnitt frei. Während des letzten Teils des Hubweges wird die Fahrgeschwindigkeit zunehmend reduziert. Es ist darauf zu achten, dass die Einstellschrauben nie ganz zuge dreht sind, da dann die Kolbenstange die jeweilige Endlage nicht erreichen kann.

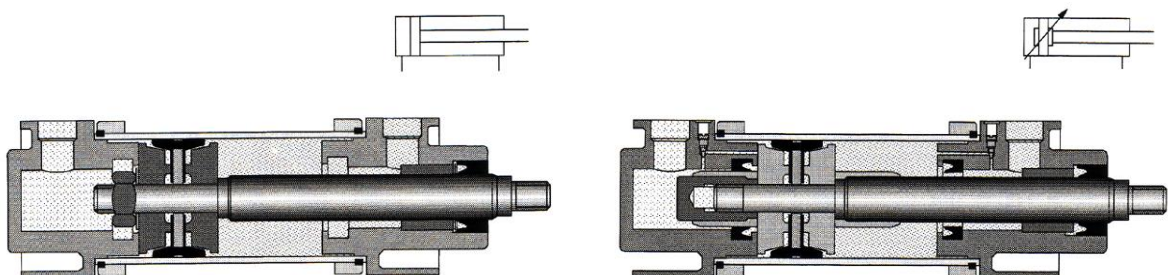


Bild 13: Doppeltwirkende Zylinder ohne und mit Endlagendämpfung

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 11/27

Geschwindigkeitseinstellung für Zylinder

Die Einstellung der Zylinder-Hubgeschwindigkeiten erfolgt durch Drosselung der zu- oder abströmenden Luft (Zuluft- oder Abluftdrosselung).

Gleichmäßiger Lauf bei relativ langsamen Geschwindigkeiten ist in der Regel nur mit doppelwirkenden Zylindern und Abluftdrosselung möglich, da hierbei der Kolben zwischen der Zuluft und dem Abluftpolster "eingespannt" ist. Bei Zuluftdrosselung oder sehr langsamen Kolbengeschwindigkeiten tritt ein stotternder Zylinderlauf ein; diese Erscheinung nennt man "Stick-Slip-Effekt". Sie beruht im Wesentlichen auf dem Unterschied zwischen dem Haft- und dem Gleitreibungskoeffizienten zwischen Kolben und Zylinderwand.

Ist eine extrem geringe oder eine extrem gleichmäßige Ausfahrgeschwindigkeit verlangt, wird dem Druckluftzylinder ein Ölbremsszylinder zugeordnet. Bei dem Ölbremsszylinder sind beide Anschlüsse über ein Drosselrückschlagventil verbunden, so dass das im Zylinder enthaltene Ölvolumen nur umgepumpt wird. Der Ölstrom lässt sich, weil das Öl sich nicht komprimieren lässt, besser und genauer als Druckluft regeln.

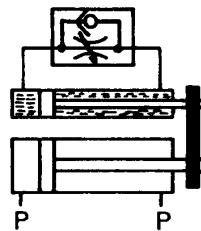


Bild 14: Druckluft-zylinder mit Ölbremsszylinder

Auslaßöffnung ohne Vorrichtung für einen Anschluß	
Auslaßöffnung mit Gewinde für einen Anschluß	
Schalldämpfer	
Leitungsverbindung	
Leitungskreuzung	
Manometer	
Optische Anzeige	

Bild 15: Einige Hilfssymbole

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 12/27

1.5 Steuerungen

Grundsätzlich ist Ansteuerung pneumatischer Aktoren zwischen einer rein pneumatischen und einer elektropneumatischen Steuerung zu unterscheiden.

Bei Steuerungen mit zwei oder mehreren Zylindern gibt es weiterhin zwei grundsätzliche Möglichkeiten, den Ablauf der Einzelhübe der Zylinder (Vor- und Rücklauf) untereinander zu steuern, Folgesteuerungen und Programmsteuerungen.

1.5.1 Folgesteuerungen (Sequenzielle Steuerungen)

a) wegababhängige Folgesteuerung

Hierbei wird ein Arbeitstakt erst nach korrekter Beendigung des vorangegangenen eingeleitet. Die unabhängige Kontrolle, ob ein Ablauf voll ausgeführt wurde, wird bei pneumatischen Anlagen durch pneumatische Endschalter (Ventile in der Funktion von Endschaltern eingesetzt), Reflexdüsen und Luftschranken vorgenommen. Bei elektropneumatischen Steuerungen bedient man sich oft auch elektrischer oder elektronischer Endschalter.

b) zeitabhängige Folgesteuerung

Der Steuerungsablauf ist primär durch Wartezeiten gekennzeichnet.

1.5.2 Programmsteuerungen

a) Programmschaltwerksteuerung

Die Steuerung erfolgt zentral über ein Programmschaltwerk, das von einem Synchron- oder Schrittmotor angetrieben wird. Durch Nockenscheiben oder -bänder, die in Form eines festgelegten Programms angeordnet sind, werden die Schaltventile betätigt, die die Zylinder direkt beaufschlagen, oder lediglich den Zylindern zugeordnete Ventile ansteuern. Durch den zwangsweisen Ablauf eines Programms ohne Rückmeldung oder Kontrollen, kann es bei Ausfällen zur Zerstörung des Materials oder der Anlage kommen.

b) Schrittschaltwerksteuerung

Das Schrittschaltwerk läuft erst bei Quittierung ausgeführter Bewegungen um einen Programmschritt weiter.

c) Steuerung mit speicherprogrammierbarer Steuerung SPS

Verfügt über Eingänge für Rückmeldungen durch Schalt und Sensorelemente und über Ausgänge zur Ansteuerung von Magnetventilen. Leichte Realisierung und Modifizierung eines Programmablaufs mit Bedingungen, logische Verknüpfungen, Zeitgliedern.

In sehr einfachen Fällen, wenn nur wenige Zylinder zu betätigen sind, wird man eine sequentielle Steuerung wählen. Ansonsten wird man auf eine SPS-Steuerung zurückgreifen. Programmschaltwerk- und Schrittschaltwerksteuerungen haben heute an Bedeutung verloren.

1.6 Entwicklung pneumatischer Systeme

Die Entwicklung von Systemlösungen erfordert die klare Herausarbeitung der Problemstellung. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein Problem in textlicher oder graphischer Form darzustellen. Zu den Darstellungsmethoden eines Steuerungssystems zählen:

- Lageplan
- Weg-Schritt-Diagramm
- Weg-Zeit-Diagramm
- Steuerdiagramm
- Funktionsdiagramm
- Funktionsplan
- Schaltplan

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 13/27

1.6.1 Lageplan

Der Lageplan zeigt die Beziehung zwischen den Arbeitselementen und dem Maschinenaufbau. Die Ausrichtung der Arbeitselemente ist ordnungsgemäß dargestellt. Der Lageplan muss nicht maßstabsgetreu und sollte nicht zu detailliert sein.

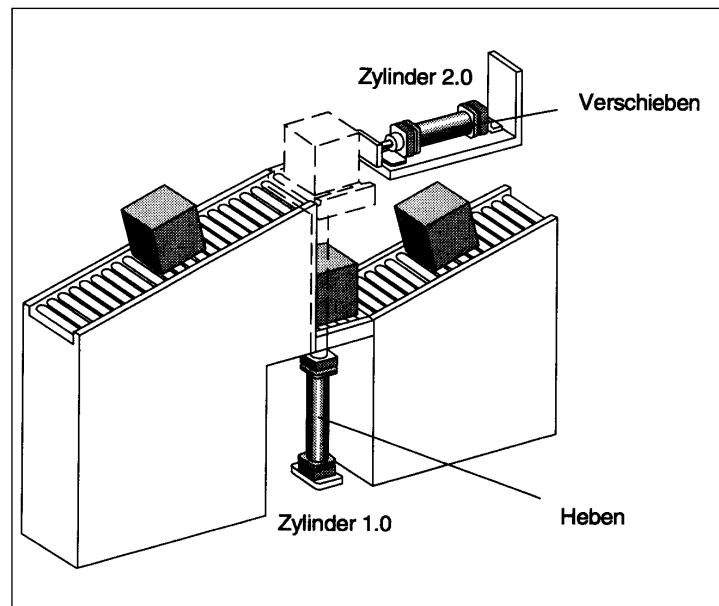


Bild 15: Beispiel eines Lageplans

1.6.2 Weg-Schritt-Diagramm und Weg-Zeit-Diagramm

Das Weg-Schritt-Diagramm und das Weg-Zeit-Diagramm sind Bewegungsdiagramme. Das Weg-Schritt-Diagramm wird für die schematische Darstellung des Bewegungsablaufs verwendet. Das Diagramm gibt die Arbeitsfolge von Arbeitselementen wieder. Der Weg wird in Bezug zur Schrittfolge dargestellt. Besteht ein Steuerungssystem aus mehr als einem Arbeitselement, so werden deren Wege untereinander gezeichnet. Über einen Vergleich der Schritte kann man einen Bezug zwischen den Wegen der einzelnen Arbeitselemente herstellen.

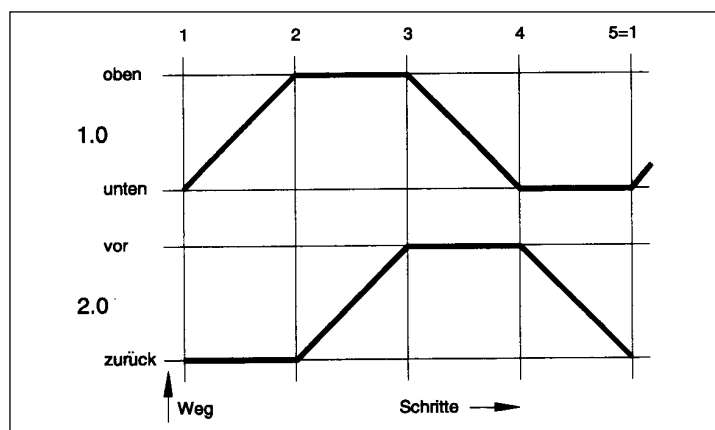


Bild 16: Weg-Schritt-Diagramm

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 14/27

Das Diagramm zeigt die Wege der zwei Zylinder 1.0 und 2.0. In Schritt 1 fährt Zylinder 1.0 aus, Zylinder 2.0 fährt in Schritt 2 aus. In Schritt 3 fährt Zylinder 1.0 ein, Zylinder 2.0 fährt in Schritt 4 ein. Schritt 5 entspricht wieder Schritt 1. Bei einem Weg-Zeit-Diagramm wird der Weg in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen.

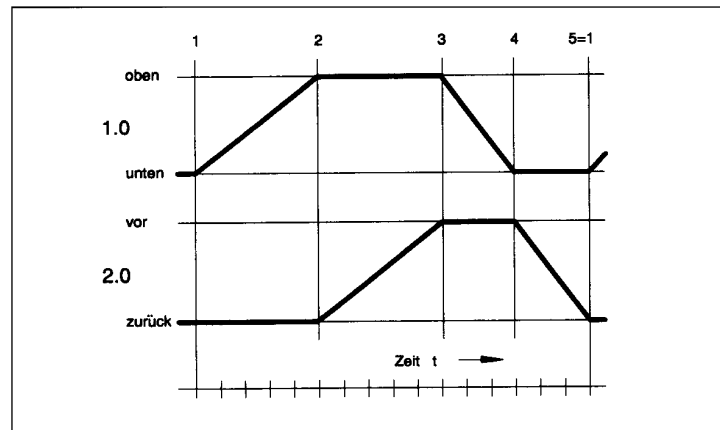


Bild 17: Weg-Zeit-Diagramm

1.6.3 Steuerdiagramm

Im Steuerdiagramm wird der Schaltzustand der Steuerelemente in Abhängigkeit von den Schritten oder der Zeit dargestellt. Die Schaltzeit bleibt unberücksichtigt.

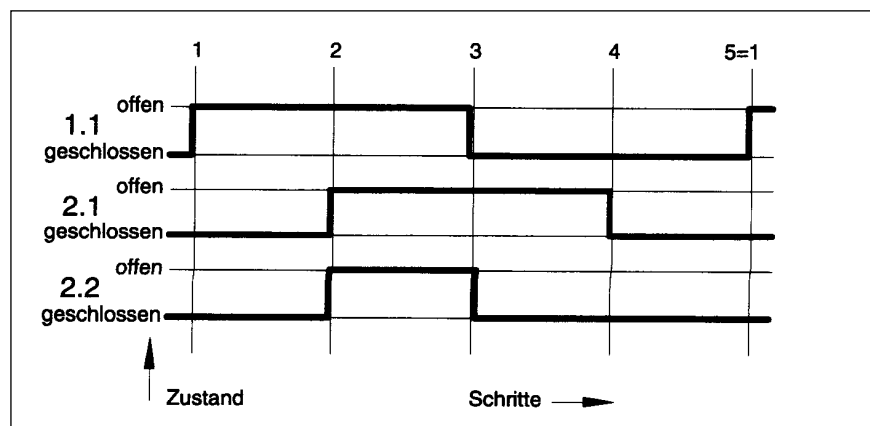


Bild 18: Steuerdiagramm

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 15/27

1.6.4 Funktionsdiagramm

Das Funktionsdiagramm ist die Kombination aus dem Bewegungs- und dem Steuerdiagramm. Die Linien zur Darstellung der einzelnen Zustände werden als Funktionslinien bezeichnet.

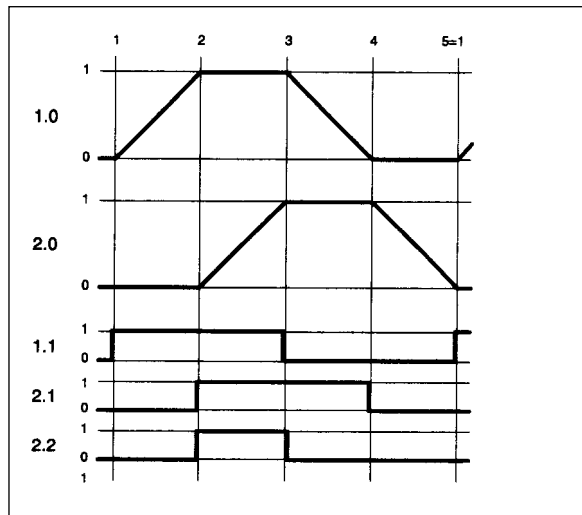


Bild 19: Funktionsdiagramm

Neben den Funktionslinien können in das Funktionsdiagramm zusätzlich auch die Signallinien eingezeichnet werden. Die Grundlagen hierzu sind in der Norm VDI 3260 "Funktionsdiagramme von Arbeitsmaschinen und Fertigungsanlagen" beschrieben.

Die Signallinie hat ihren Ausgang am Signalelement und ihr Ende an der Stelle, wo abhängig von diesem Signal eine Zustandsänderung eingeleitet wird. Pfeile an den Signallinien markieren die Signalfussrichtung. Signalverzweigungen erhalten an der Verzweigungsstelle einen Punkt. Von einem Signalausgang werden Zustandsänderungen von mehreren Bauelementen eingeleitet.

Bei der ODER-Bedingung wird ein Punkt an der Vereinigungsstelle der Signallinien gesetzt. Die UND-Bedingung wird durch einen Schrägstrich an der Vereinigungsstelle der Signallinien gekennzeichnet.

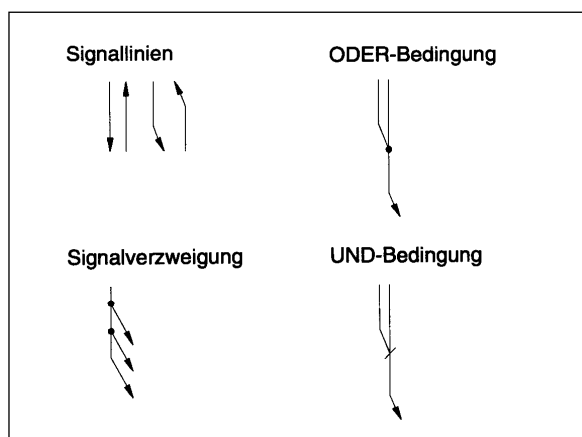


Bild 20: Darstellung von Signallinien

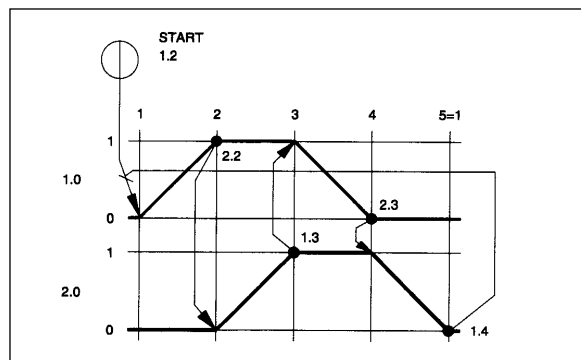


Bild 21: Weg-Schritt-Diagramm mit Signallinien

Das Diagramm zeigt folgenden Ablauf: Ist der Grenzaster 1.4 betätigt und wird der Druckaster 1.2 vom Bediener gedrückt, fährt die Kolbenstange von Zylinder 1.0 aus. Hat der Zylinder 1.0 seine vordere Endlage erreicht, wird der Grenzaster 2.2 betätigt und die Kolbenstange von Zylinder 2.0 fährt aus. Hat der Zylinder 2.0 seine vordere Endlage erreicht, wird der Grenzaster 1.3 betätigt und die Kolbenstange von Zylinder 1.0 fährt ein. Hat der Zylinder 1.0 seine hintere Endlage erreicht, wird der Grenzaster 2.3 betätigt und die Kolbenstange von Zylinder 2.0 fährt ein. Hat der Zylinder 2.0 seine hintere Endlage erreicht, wird der Grenzaster 1.4 betätigt, die Ausgangsstellung ist wieder erreicht.

1.6.5 Schaltplan

Der Schaltplan zeigt den Signalfluss und die Beziehung zwischen den Elementen der Steuerung und den Druckluftanschlüssen. Im Schaltplan wird nicht die physische und mechanische Auslegung der Steuerung wiedergegeben.

Der Schaltplan wird immer mit dem Energiefluss von unten nach oben gezeichnet. Die verschiedenen Ebenen eines Schaltplans sind die Energiequelle, die Signaleingabe, die Signalverarbeitung, die Stellelemente und die Arbeitselemente. Die Lage der Grenzaster wird beim Arbeitselement markiert.

Die Antriebselemente (z.B. Zylinder) werden fortlaufend nummeriert, z.B. 1, 2, 3, ..., die dazugehörigen Stellglieder (z.B. Ventile) mit 1.1, 2.1, 3.1 ..., und die Signalglieder mit fortlaufendem Zählindex 1.2, 1.3, 2.2, 2.3, 2.4 usw. Die Nummerierung läuft üblicherweise von oben nach unten, also entgegengesetzt des Energieflusses

Die Kennzeichnung der Elemente und Leitungen sowie die Anschlussbezeichnungen ermöglichen einen Bezug zu den Bauteilen der eigentlichen Maschine und machen den Schaltplan lesbar.

Die Wegeventile werden in der Regel in ihrer Ruhestellung dargestellt.

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 17/27

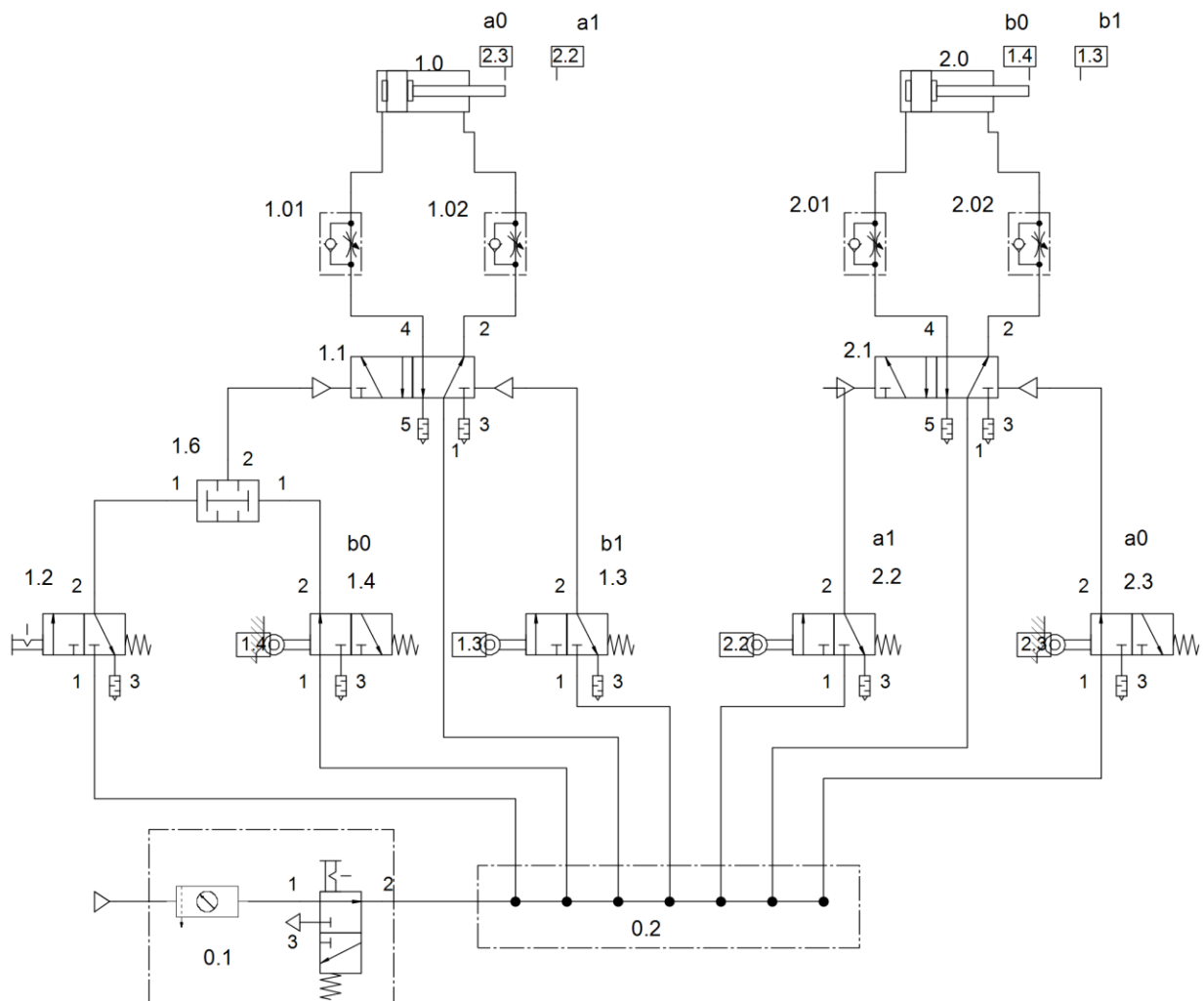


Bild 22: Beispiel eines Schaltplans

Üblicherweise benötigen Zylinder in ihren Zuleitungen Drosselrückschlagventile zur Einstellung der Ausfahrgeschwindigkeiten (z. B. um die mechanischen Anschläge in den Zylindern zu schonen). Im o.a. Fall konnte darauf verzichtet werden, weil die Zylinder über eine integrierte Endlagendämpfung verfügen.

2 Versuchsaufgaben

Sicherheits- und Arbeitshinweise

Im Interesse Ihrer eigenen Sicherheit sollten Sie folgende Hinweise beachten:

- Durch Druckluft abspringende Schläuche können Unfälle verursachen. Druck sofort wegnehmen.
- Erst verschlauchen, dann Druckluft einschalten.
- Vorsicht! Beim Einschalten der Druckluft können Zylinder selbsttätig losfahren.
- Rollenhebelventile bei Fehlersuche nicht von Hand betätigen (Werkzeug benutzen).
- Grenztaster nur seitlich zum Schaltnocken montieren (nicht frontal).
- Zulässigen Arbeitsdruck nicht überschreiten (hier 6 bar).
- Schlauch bis zum Anschlag in die CU-Steckverbindung stecken; kein Sichern notwendig!
- Lösen der CU-Steckverschraubung durch Niederdrücken der Kralle (schwarzer/blauer Ring). Es ist keine Entkupplung unter Druck möglich!
- Vor Schaltungsumbau die Druckluftversorgung abschalten.
- Die hausinterne Druckluftversorgung (Druck 6 bis 7 bar) ist mit der Wartungseinheit auf der Experimentierplatte zu verbinden. Öffnen Sie den Absperrhahn und stellen Sie bei geschlossenem Einschalt-Ventil (rechts) am Druckregler einen internen Arbeitsdruck von 5 bar ein. Verbinden Sie die Wartungseinheit mit einem Verteilerblock (Nr. 152896), bei dem die nicht benutzten Abgänge automatisch gesperrt sind.

2.0 Vorbereitung

- Lesen und verstehen Sie Abschnitt 1. Können Sie die wichtigen Inhalte Ihren Mitstudierenden und dem Praktikumsbetreuer erläutern?

Schriftlich:

- Betrachten Sie Bild 8. Welche Richtung ist die Durchlassrichtung des Drosselrückschlagventils? Welches ist das elektrisch vergleichbare Bauteil?
- Betrachten Sie das Symbol des Zweidruckventils (Bild 7). Skizzieren Sie das entsprechende reale Bauteil. Erklären Sie die Funktionsweise. Welche logische Funktion realisiert es?

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 19/27

2.1 Einfachwirkender Zylinder

Es ist eine Vereinzelungseinrichtung mit einem einfachwirkenden Zylinder zu simulieren. Bei Betätigung eines Ventils soll die Kolbenstange des Zylinders 1.0 ausfahren, und nach Loslassen der Ventilbetätigung wieder einfahren. Die Ausfahrgeschwindigkeit soll einstellbar sein. Das Einfahren des Zylinders soll so schnell wie möglich erfolgen.

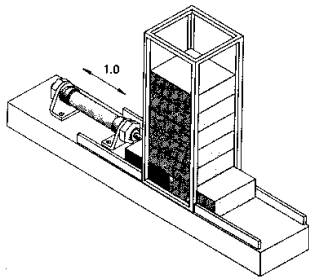


Bild 23: Lageplan einer Vereinzelungseinrichtung

- 2.1.1 Zeichnen Sie das Weg-Schritt-Diagramm und den Systemschaltplan. Der Systemschaltplan kann mit der Software FluidSIM 6 erstellt werden, anschließend kann die Schaltung simuliert werden.
- 2.1.2 Bauen Sie ausgehend vom Verteilerblock die o.g. Schaltung mit einem 3/2-Wegeventil (Nr. 152860), einem einfachwirkenden Zylinder (Nr. 152887), einem Drossel-Rückschlagventil (Nr. 152881) und einem Schnellentlüftungsventil (Nr. 152880) auf. Zur Beobachtung der Druckverhältnisse ist vor und hinter dem Drossel-Rückschlagventil je ein Manometer (Nr. 152865) zu installieren.
- 2.1.3 Variieren Sie die Ausfahrzeit des Zylinders am Drossel-Rückschlagventil, beschreiben und erläutern Sie Ihre Beobachtungen.
- 2.1.4 Bei kleinen Ausfahrgeschwindigkeiten werden Sie ein ruckweises Bewegen der Kolbenstange feststellen. Dieses Phänomen ist auf den Stick-Slip-Effekt zurückzuführen. Durch welche physikalischen Wirkungsmechanismen kommt der Stick-Slip-Effekt zustande?

Zeigen und erläutern Sie einem Betreuer den Stick-Slip-Effekt.

Testat:

2.2 Doppeltwirkender Zylinder

Es ist die gleiche Vereinzelungseinrichtung jetzt mit einem doppeltwirkenden Zylinder zu simulieren. Bei Betätigung eines Ventils soll die Kolbenstange des Zylinders 1.0 ausfahren, und nach Loslassen der Ventilbetätigung wieder einfahren. Die Ausfahr- und die Einfahrgeschwindigkeit sollen einstellbar sein.

- 2.2.1 Zeichnen Sie das Weg-Schritt-Diagramm und den Systemschaltplan. Der Systemschaltplan kann mit der Software FluidSIM 6 erstellt werden, anschließend kann die Schaltung simuliert werden.
- 2.2.2 Bauen Sie ausgehend vom Verteilerblock die o.g. Schaltung mit einem 5/2-Wegeventil (Nr. 152862), einem doppeltwirkenden Zylinder (Nr. 152888) und zwei Drossel-Rückschlagventilen (Nr. 152881) auf. Unter Anderem zur Unterdrückung des Stick-Slip-Effektes muss bei dem doppeltwirkenden Zylinder eine Abluftdrosselung vorgenommen werden.
- 2.2.3 Variieren Sie die Aus- und Einfahrzeit des Zylinders an den Drossel-Rückschlagventilen und beschreiben und erläutern Sie Ihre Beobachtungen.

Lassen Sie sich die Funktionsfähigkeit von einem Betreuer testieren.

Testat:

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 20/27

2.3 Folgesteuerung mit einem doppeltwirkenden Zylinder

Es ist die Vereinzelungseinrichtung nach Aufgabe 2.2 jetzt derart zu gestalten, dass bei Betätigung eines Wegeventils mit Wahlschalter eine stetige Hin- und Her-Bewegung des Kolbens veranlasst wird. Dabei soll die Kolbenstange des Zylinders 1.0 in $t_1 = 0,6$ s ausfahren, in der vorderen Endlage 1 s verharren und dann innerhalb von $t_2 = 0,4$ s wieder zurückfahren, so dass sich eine Zykluszeit von $t_4 = 2,0$ s ergibt.

0.1	Einschaltventil mit Filterregelventil
0.2	Verteilerblock
1.0	Doppeltwirkender Zylinder
1.01	Drosselrückschlagventil
1.02	Drosselrückschlagventil
1.1	5/2-Wege-Pneumatik-Impulsventil
1.2	3/2-Wegeventil mit Wahlschalter
1.3	3/2-Wege-Rollenhebelventil, in Ruhestellung gesperrt
1.4	3/2-Wege-Rollenhebelventil, in Ruhestellung gesperrt
1.5	Zeitverzögerungsventil, in Ruhestellung gesperrt
1.6	Zweidruckventil

Bild 24: Geräteliste

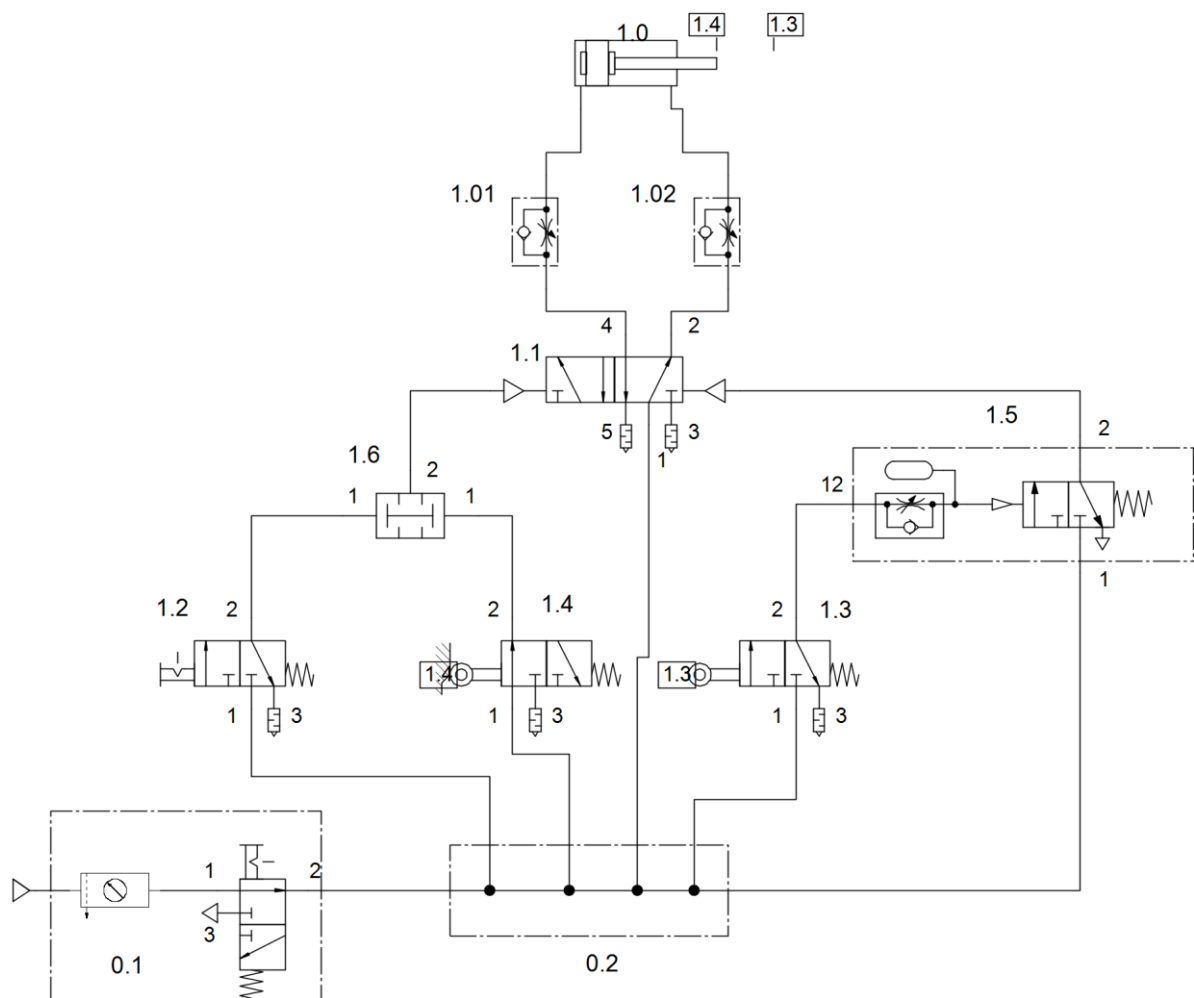


Bild 25: Schaltungsaufbau

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 21/27

2.3.1 Zeichnen Sie das Weg-Schritt-Diagramm.

2.3.2 Bauen Sie die o.g. Schaltung auf und stellen Sie die entsprechenden Elemente so ein, dass sich die vorgenannten zeitlichen Bedingungen ergeben (Abluftdrosselung!).

Lassen Sie sich die Funktionsfähigkeit von einem Betreuer testieren.

Testat:

2.4 Folgesteuerung mit zwei doppelwirkenden Zylindern

Der Lageplan nach 1.6.1 und der Schaltplan nach 1.6.5 betreffen eine Anordnung mit zwei doppelwirkenden Zylindern, bei der auf einer Rutsche ankommende Teile durch den Zylinder 1.0 angehoben und durch einen zweiten Zylinder auf eine weitere Rutsche geschoben werden sollen.

Bei Betätigung eines Ventils soll die Kolbenstange des Zylinders 1.0 ausfahren, aber nur dann, wenn der Zylinder 2.0 eingefahren ist. Der Zylinder 2.0 soll ausfahren, wenn der Zylinder 1.0 bereits ausgefahren ist. Der Zylinder 1.0 soll wieder einfahren, wenn der Zylinder 2.0 ausgefahren ist. Der Zylinder 2.0 soll einfahren, wenn der Zylinder 1.0 bereits eingefahren ist. Die Ausfahr- und die Einfahrgeschwindigkeit sollen einstellbar sein (Abluftdrosselung!).

2.4.1 Zeichnen Sie das Weg-Schritt-Diagramm mit Signallinien.

2.4.2 Realisieren Sie den Schaltplan nach 1.6.5.

2.4.3 Erläutern Sie anhand des Schaltplans ausführlich die Wirkungsweise und das Zusammenspiel der Elemente.

Testat:

2.5 Freiwillige Fleißaufgabe für Spezialisten

Modifizieren Sie die Folgesteuerung aus Aufgabe 2.4 mit Hilfe des vorhandenen pneumatischen Zählers und weiterer vorhandener Pneumatikbausteine mit folgendem Ziel:

- Nach Einschalten des „Hauptschalters“ (manuell betätigtes 5/2-Wegeventil) und einer am Zähler einstellbaren Zyklenanzahl schaltet die Folgesteuerung in Ruhestellung ab.
- Durch Abschalten des „Hauptschalters“ wird der Zähler pneumatisch zurück gesetzt. Erst dann kann durch erneutes Einschalten des „Hauptschalters“ die Folgesteuerung wieder in Betrieb genommen werden (Wiedereinschaltsicherung).

Zusätzlich zu verwendende Pneumatikbausteine:

- Das 3/2-Wege-Schalttafelventil mit Wahltester (Nr. 152863) wird durch ein 5/2-Wege-Schalttafelventil mit Wahltester (Nr. 152862) ersetzt
- Pneumatischer Vorwahlzähler (Nr. 152877)
Ventilanschlüsse: P = Druckluft
A = Ausgangssignal
Y = Rückstellsignal
Z = Zählersignal
- 3/2-Wege-Rollenhebelventil, direkt betätigt, in Ruhe gesperrt (Nr. 152866)
- 5/2-Wege-Pneumatikventil, einseitig druckluftbetätigt (Nr. 152872)
- Optische Anzeige, rot (Nr. 152893)

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 22/27

2.6 Ausarbeitung: Berechnungen und wirtschaftlicher Vergleich

Die Kolbenstangenkraft, die geleistete Arbeit, die Leistung, die verbrauchte Luftmenge, die Betriebskosten der pneumatischen Steuerung nach Abschnitt 2.2 sollen berechnet werden.

2.6.1 Berechnung der Kolbenstangenkraft F

$$F = A \cdot p = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot p \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit

A Kolbenfläche

d Kolbendurchmesser

p relativer Betriebsüberdruck im Zylinder

Berechnen Sie die Kolbenstangenkraft F des doppelwirkenden Zylinders gemäß Bild 26 mit Gleichung 1 auf Basis folgender Daten:

Kolbendurchmesser $d = 20 \text{ mm}$

Relativer Betriebsüberdruck im Zylinder $p = 5 \text{ bar}$

Beachten Sie, dass $1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa} = 100.000 \text{ N/m}^2 = 0,1 \text{ N/mm}^2$

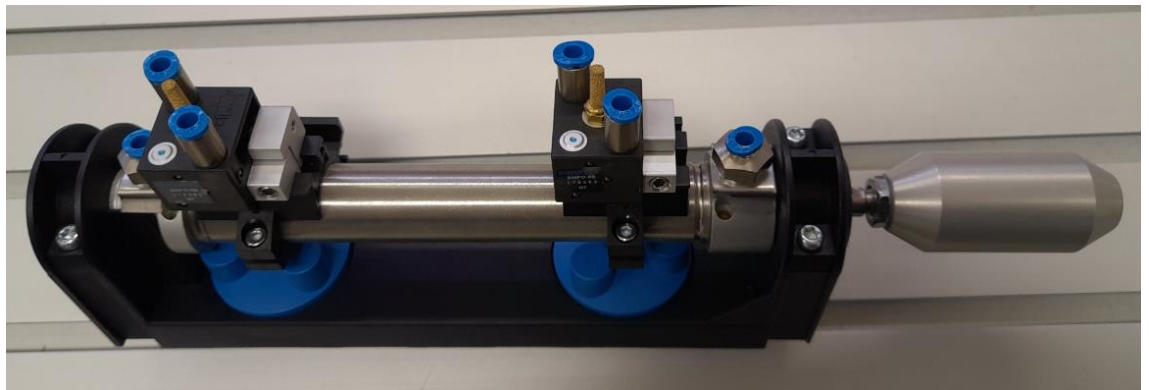


Bild 26: Doppelwirkender Zylinder

2.6.2 Berechnung der geleisteten Arbeit W

$$W = F \cdot s \quad (\text{Gl. 2})$$

Mit

F Kolbenstangenkraft des doppelwirkenden Zylinders

s Verfahrweg, gesamt

Berechnen Sie die geleistete Arbeit W des doppelwirkenden Zylinders mit Gleichung 2 für den vollständigen Verfahrzyklus nach Bild 27 (Vor- und Rückhub).

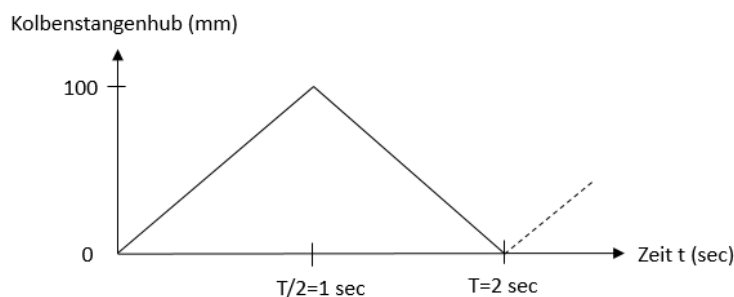


Bild 27: Verfahrzyklus eines doppelwirkenden Zylinders

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 23/27

2.6.3 Berechnung der Leistung P

$$P = \frac{W}{T} \quad (\text{Gl. 3})$$

Mit

W geleistete Arbeit des doppeltwirkenden Zylinders

T Zykluszeit des doppeltwirkenden Zylinders (Vor- und Rückhub)

Berechnen Sie die Leistung P des doppeltwirkenden Zylinders mit Gleichung 3 für den vollständigen Verfahrenszyklus nach Bild 27 (Vor- und Rückhub).

2.6.4 Berechnung des Luftverbrauchs

Die Betriebskosten von pneumatischen Steuerungen werden vorwiegend durch den Verbrauch des Energieträgers Luft und dessen Erzeugung bestimmt. Dabei wird zweistufig vorgegangen. Im ersten Schritt wird der Luftverbrauch berechnet und im zweiten Schritt werden die Betriebskosten ermittelt.

Die verbrauchte Luftmenge wird in der Pneumatik auf den Normzustand bezogen, d.h. es handelt sich um die nicht komprimierte Luft bei dem mittleren Luftdruck p_n der Atmosphäre (der „atmosphärische Druck“) auf Meereshöhe. Siehe auch Bild 28.

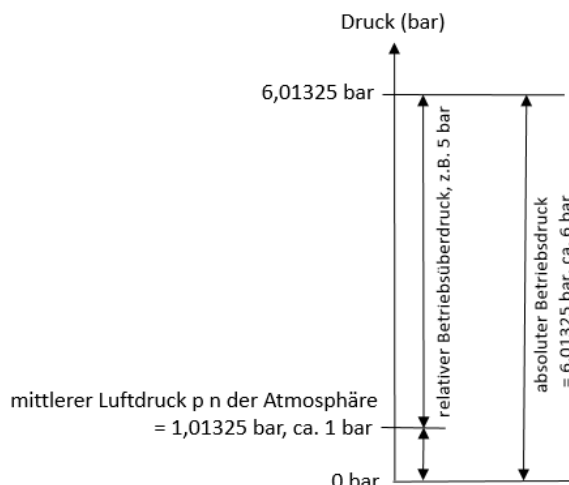


Bild 28: Relativer und absoluter Druck

$$p_n = 1,01325 \text{ bar} \sim 1 \text{ bar} \quad (\text{Gl. 4})$$

und bei der absoluten Normtemperatur

$$T_n = 273 \text{ K} = 0^\circ\text{C} \quad (\text{Gl. 5})$$

Auf Basis der allgemeinen Gasgleichung kann die komprimierte Luftmenge, die sich im Zylinder und in den Schläuchen befindet, in die nicht komprimierte Luftmenge (Ansaugluft) bei dem mittleren Luftdruck p_n der Atmosphäre umgerechnet werden.

$$p_1 \cdot \frac{V_1}{T_1} = p_2 \cdot \frac{V_2}{T_2} \quad (\text{Gl. 6})$$

Der Druck p und die Temperatur T sind absolute Größen, hierin bedeuten:

p absoluter Druck ($1 \text{ bar} = 100.000 \text{ N/m}^2$)

V Volumen

T absolute Temperatur

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 24/27

Mit

$$\text{Absoluter Druck in bar} = \text{Überdruck (Betriebsdruck)} + \text{Luftdruck} = \text{Überdruck} + 1\text{bar} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\text{Absolute Temperatur in Kelvin} = \text{Temperatur in Grad Celsius} + 273\text{ K} \quad (\text{Gl. 8})$$

Vereinfachend gehen wir davon aus, dass der Verdichter, mit Hilfe dessen die Luftmenge komprimiert wird, und der Druckluftspeicher sich in derselben Fabrikhalle wie die pneumatische Steuerung befindet, so dass die gleiche Temperatur vorherrscht, somit gilt:

$$T_1 = T_2 \quad (\text{Gl. 9})$$

Dadurch vereinfacht sich die Gleichung 6 wie folgt:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (\text{Gl. 10})$$

Mit $p_1 = p_n$ und $V_1 = V_n$ kann die verbrauchte Luft V_n (Ansaugluft) unter Normalbedingungen berechnet werden:

$$V_n = \frac{p_2}{p_n} \cdot V_2 \quad (\text{Gl. 11})$$

Mit

$$\text{Absoluter Druck } p_2 = \text{Betriebsüberdruck } p \text{ im Zylinder und in den Schläuchen} + p_n = p + 1\text{bar} \quad (\text{Gl. 12})$$

$$\text{Absoluter Normdruck } p_n = 1\text{bar}$$

$$\text{Komprimiertes Luftvolumen } V_2 \text{ im Zylinder und in den Schläuchen}$$

Ergibt:

$$V_n = \frac{p+p_n}{p_n} \cdot V_2 = \frac{p+1\text{bar}}{1\text{bar}} \cdot V_2 \quad (\text{Gl. 13})$$

Für den doppelwirkenden Zylinder berücksichtigen wir die Kolbenstange vereinfachend nicht, so dass die Fläche des Kolbens auf beiden Seiten gleich sei. Somit kann für den doppelwirkenden Zylinder der Luftverbrauch (Ansaugluft) Q_Z für einen Vor- und Zurückhub wie folgt berechnet werden:

$$Q_Z = 2 \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot s \cdot n \cdot \frac{p+1\text{bar}}{1\text{bar}} \cdot \left(1 + \frac{\eta_v}{100\%}\right) \quad (\text{Gl. 14})$$

Mit

Q_Z Luftverbrauch des Zylinders

d Kolbendurchmesser

s Hub des Zylinders

n Lastspielzahl in z.B. min^{-1} (Anzahl der durchlaufenden Zyklen während einer Zeitspanne)

p Betriebsüberdruck im Zylinder

η_v Leckverluste (typisch ist $\eta_v=20\%$)

Für die Schläuche in der pneumatischen Steuerung wird der Luftverbrauch Q_S wie folgt berechnet:

$$Q_S = K \cdot \left(\frac{d_S}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{p+1\text{bar}}{1\text{bar}} \cdot n \quad (\text{Gl. 15})$$

Mit

Q_S Luftverbrauch der Schläuche

K Anzahl der geschalteten Schläuche

d_S lichter Schlauchdurchmesser

L Länge der Schläuche

n Lastspielzahl in z.B. min^{-1} (Anzahl der durchlaufenden Zyklen während einer Zeitspanne)

p Betriebsüberdruck in den Schläuchen

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 25/27

Berechnen Sie den Luftverbrauch des Zylinders QZ mit Gleichung 14 für den wiederholenden Zyklus nach Bild 27 und auf Basis folgender Daten. Geben Sie den Luftverbrauch in Liter/min an.

Kolbendurchmesser $d = 20 \text{ mm}$

Hub des Zylinders $s = 100 \text{ mm}$

Lastspielzahl $n = 30 \text{ min}^{-1}$ (für Hin- und Rückhub)

Betriebsüberdruck im Zylinder $p = 5 \text{ bar}$

Leckverlust $\eta_v = 20 \%$

Berechnen Sie den Luftverbrauch der geschalteten Schläuche QS in Liter/min mit Gleichung 15 auf Basis folgender Daten. Geben Sie den Luftverbrauch auch in Liter/min an.

Anzahl der geschalteten Schläuche $K = 4$

Lichter Schlauchdurchmesser $d_S = 2,6 \text{ mm}$

Länge der geschalteten Schläuche $L = 650 \text{ mm}$

Lastspielzahl $n = 30 \text{ min}^{-1}$ (für Hin- und Rückhub)

Betriebsüberdruck in den Schläuchen $p = 5 \text{ bar}$

Berechnen Sie den Normluftverbrauch Q der gesamten pneumatischen Schaltung mit Gleichung 16. Geben Sie den Luftverbrauch auch in Liter/min an.

$$Q = Q_Z + Q_S \quad (\text{Gl. 16})$$

2.6.5 Vergleich mit den technischen Daten der verwendeten Wartungseinheit

Der Hersteller Festo der verwendeten Wartungseinheit Festo Didactic, siehe Bild 29, gibt als Normalnennendurchfluß 550 Liter/min an, siehe Tabelle 1. Vergleichen Sie den berechneten Normluftverbrauch Q mit diesem Wert und beurteilen Sie, ob die gewählte Wartungseinheit für den vorliegenden Anwendungsfall geeignet ist.

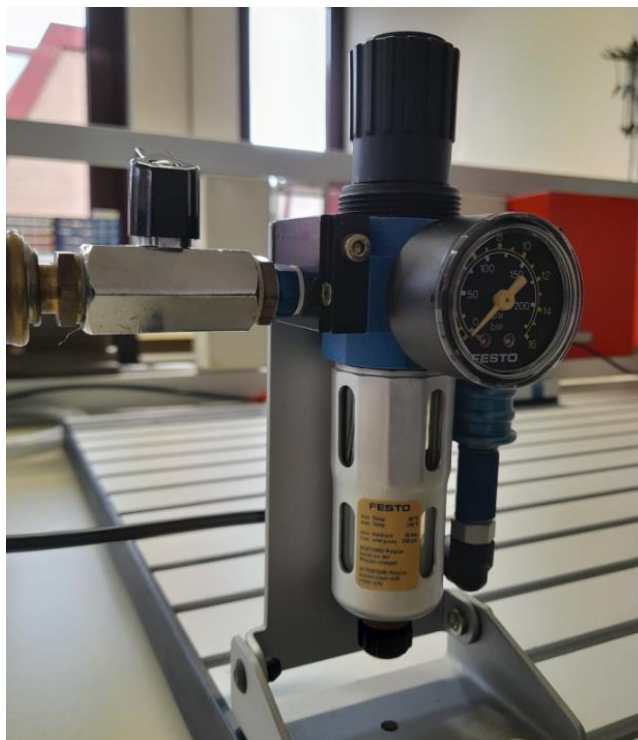


Bild 29: Wartungseinheit Festo Didactic

Versuch 5: Pneumatik - Grundlagen

Stand: 4. August 2023

Blatt 26/27

Medium	Druckluft
Bauart	Sinterfilter mit Wasserabschneider, Kolben-Regelventil, Direkt-Proportionalöler
Druckbereich	0 bis 1000 kPa (0 bis 10 bar)
Normalnennndurchfluß *	550 l/min
Vordruck max.	1400 kPa (14 bar)
Arbeitsdruck max.	1200 kPa (12 bar)
Ölfunktionsbereich	ab 2,4 l/min
Filterfeinheit	0,04 mm
Kondensatmenge	10 cm ³
Anschluß	G 1/8, PK-4 für Kunststoffschlauch PU-4 KS-1/8 für Kupplungsdose KD-1/8N

Technische Daten

* Vordruck 1000 kPa (10 bar)
Betriebsdruck 600 kPa (6 bar)
Differenzdruck 100 kPa (1 bar)

Festo Didactic

Tabelle 1: Technisches Datenblatt der Wartungseinheit Festo Didactic

2.6.6 Betriebskosten der pneumatischen Steuerung

Die Betriebskosten einer pneumatischen Steuerung berechnen sich für die gesamte, vorgesehene Nutzungsdauer wie folgt:

$$BK = Q \cdot BD \cdot AT \cdot S \cdot AS \cdot EK \cdot \frac{60}{100.000} \quad (\text{Gl. 17})$$

Mit

BK Betriebskosten

Q Normluftverbrauch

BD Betriebsdauer in Jahren

AT Arbeitstage pro Jahr

S Anzahl der Schichten pro Arbeitstag

AS Arbeitsstunden pro Schicht

EK relative Energiekosten

Berechnen Sie die Betriebskosten *BK* der pneumatischen Steuerung mit Gleichung 17 für folgende Daten:

Normluftverbrauch *Q* gemäß Abschnitt 2.6.4

Betriebsdauer *BD* = 10 Jahre

Arbeitstage *AT* = 220 Tage pro Jahr

Anzahl der Schichten *S* = 2 pro Arbeitstag

Arbeitsstunden *AS* = 8 h pro Schicht

relative Energiekosten *EK* = 7,3 Cent/m³ [2]

2.6.7 Vergleich mit den Betriebskosten eines ähnlichen elektrischen Linearmotors

Die Betriebskosten eines vergleichbaren elektrischen Linearmotors nach Bild 30 belaufen sich für den gleichen Verfahrenszyklus und für die identische Betriebsdauer von 10 Jahren bei aktuell 37 Cent/kWh auf insgesamt 960 Euro [4]. Vergleichen Sie die im Abschnitt 2.6.6 errechneten Betriebskosten des pneumatischen Zylinders mit denen des Linearmotors. Sind die Betriebskosten des pneumatischen Zylinders größer oder kleiner als die des Linearmotors?



Bild 30: Elektrischer Linearmotor (Foto LinMot®)

Quellen:

- [1] Paetzold, Wolf & Hemming, Werner. Hydraulik und Pneumatik. Christiani Fachbuch, 1996
- [2] Handbuch der Drucklufttechnik - Das Kompendium für eine wirtschaftliche Druckluftherzeugung. 9. Auflage. Atlas Copco, November 2021
- [3] <https://info.atlascopco-kompressoren.de/blog/kostencheck-was-kostet-druckluft-pro-kubikmeter> , heruntergeladen am 17.10.2022
- [4] Technisches Datenblatt, LINEARMOTOREN P10-54X240U, DOC-NO. 0185-0060-D / VERSION 1V4, LinMot®