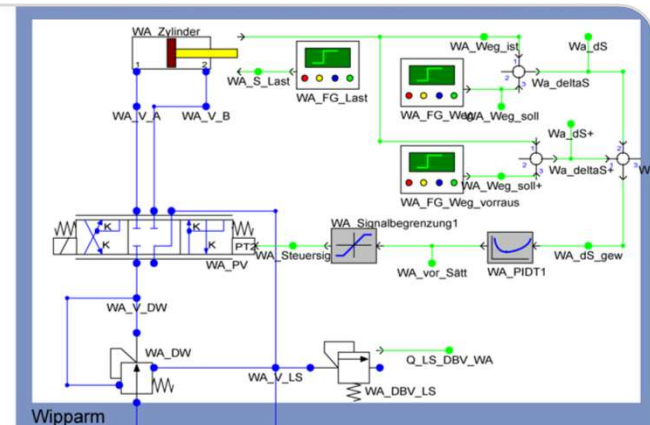
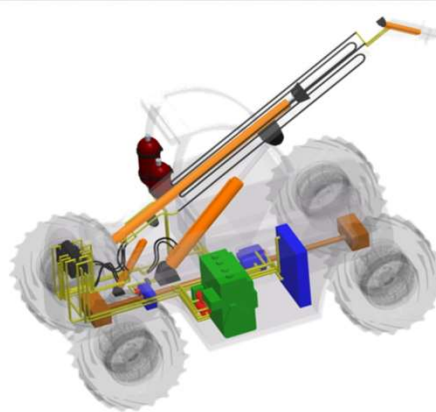


Modellbildung und Simulation

Übung 4: Modelle mit konzentrierten Parametern - Zustandsgleichungen



Einführung



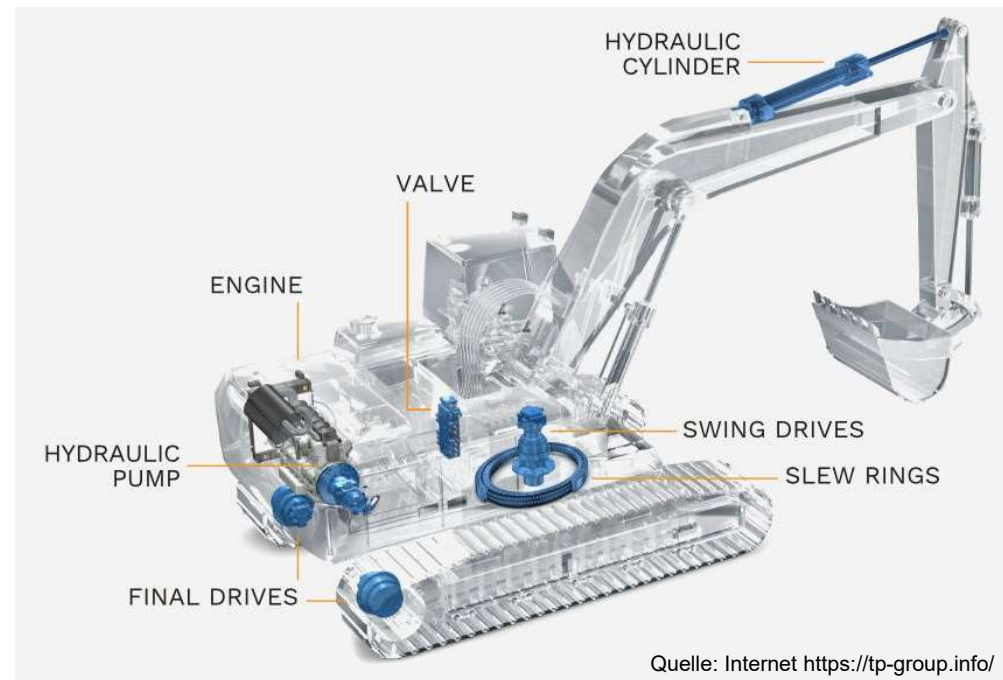
- Wo ist der Antrieb?
- Wie ist der Leistungsfluss zu den Motoren?

■ Vorteile Hydraulik:

- Einfache Verteilung der Leistung im Vgl. zur Mechanik
- Hohe Leistungsdichte
- Gutes Zeitverhalten durch kleine Trägheiten
- Gute Regel- und Steuerbarkeit
- Gute Schmierung und Wärmeabfuhr durch Fluid

■ Nachteile:

- Schlechterer Wirkungsgrad
- Wartung des Fluids
- Umwelt (Geräusch, Leckage, Feuergefährdung)



Quelle: Internet <https://tp-group.info/>

Lernziele

- Nach der Übung sind Studierende in der Lage:
 - Die Grundlagen der Hydraulik für die Modellierung anzuwenden.
 - Die vorgestellten Wandler zu modellieren.
 - Zustandsgleichungen aufzustellen.

- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- Spezielle Wandler
- Aufgabe 1.1-1.2
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

Grundlagen Hydraulik

■ Potenzial:
Druck p in Pa

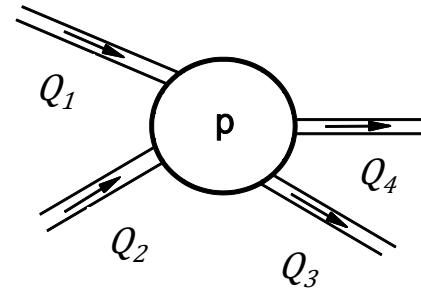
■ Stromgröße:
Volumenstrom
 Q in m^3/s

Analogietafel: Potential-Strom-Darstellung				
	Elektrisch	Mechanisch		Hydraulisch
		Translation	Rotation	
Potentialdifferenz e	Spannung $U = L\dot{Q}$	Kraft $F = m\ddot{x}$	Moment $M = J\ddot{\varphi}$	Druck $p = L_h\ddot{V}$
Stromgröße f	Stromstärke $I = \frac{dQ}{dt}$	Geschwindigkeit $v = \frac{dx}{dt}$	Drehgeschwindigkeit $w = \frac{d\varphi}{dt}$	Volumenstrom $Q = \frac{dV}{dt}$
int. Potentialdifferenz p	Magn. Fluss $\Phi = LI$	Impuls $p = mv$	Drall $L = Jw$	Druckimpuls $\Gamma = L_h Q$
int. Stromgröße q	Ladung Q	Verschiebung x	Winkel φ	Volumen V
Widerstand R	$\frac{U}{I}$	$\frac{F}{v} (= d, \text{Dämpfer})$	$\frac{M}{w} (\text{Drehdämpfer})$	$\frac{p}{Q}$
Kapazität C	$\frac{Q}{U}$	$\frac{x}{F} (= \frac{1}{c}, \text{Federkonstante})$	$\frac{\varphi}{M}$	$\frac{V}{p}$
Induktivität L	$\frac{U}{I}$	$\frac{F}{v} (= m, \text{Masse})$	$\frac{M}{w} (= J, \text{Trägheitsmoment})$	$\frac{p}{Q}$
Leistung $P = e \cdot f$	$U \cdot I$	$F \cdot v$	$M \cdot w$	$p \cdot Q$
Energie $E = \int f \cdot dp$	$\frac{1}{2} L \cdot I^2$	$\frac{1}{2} m \cdot v^2$	$\frac{1}{2} J \cdot w^2$	$\frac{1}{2} L_h \cdot Q^2$
Maschenregel	$\sum U_i = 0$	$\sum v_i = 0$	$\sum \omega_i = 0$	$\sum p_i = 0$
Knotenregel	$\sum I_i = 0$	$\sum F_i = 0$	$\sum M_i = 0$	$\sum Q_i = 0$

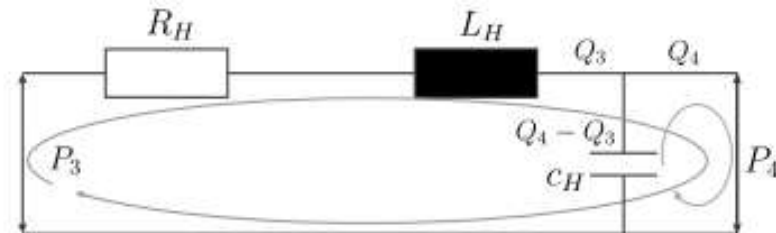
Hydraulik Grundgleichungen

■ Druckaufbaugleichung (Knotengleichung):

$$\dot{p} = \frac{1}{c_H} \sum Q = \frac{1}{c_H} (Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4)$$



■ Druckgleichung (Maschengleichung): $\sum p = 0$



➡ Große Ähnlichkeiten zur Elektrotechnik

Hydraulische Komponenten

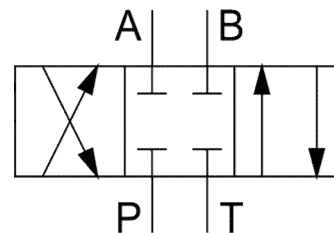
■ Tank

- „Ground“ oder Referenzdruck 

■ Wegeventile

- Pfeile zeigen die
- Beispiel: 4/3-Wegeventil

Anzahl Anschlüsse/ Anzahl Positionen



P: Pumpenanbindung
T: Tankverbindung
A+B: Anschlüsse

■ Rückschlagventil:

- Lassen nur eine Fließrichtung zu



Inhalt

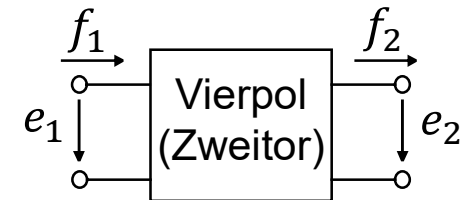
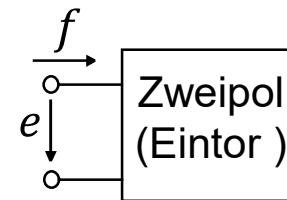
- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- Spezielle Wandler
- Aufgabe 1.1-1.2
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

Prozesselemente

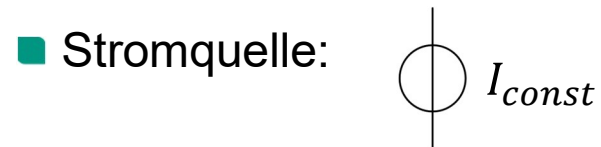
- Quellen
- Speicher
- Senken
- Übertrager
- Wandler

- Strom und Potenzialgrößen bestimmen die Leistung

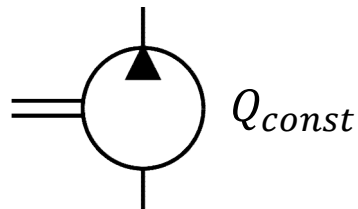


Quellen

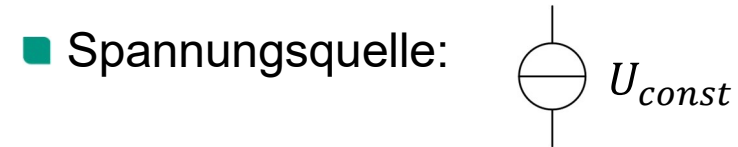
■ Ideale Stromquellen:



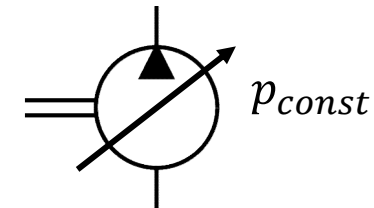
■ Pumpe mit konstanter Drehzahl



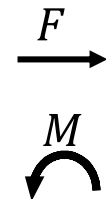
■ Ideale Potenzialquellen:



■ Druckgeregelte Pumpe:



■ Eingeprägte Kräfte/Momente; Gewichtskraft



Senken

- Repräsentieren die Verluste eines Systems:
 - Bei linearem Zusammenhang:

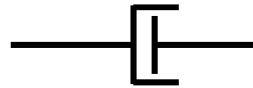
Elektrotechnik:

- Leitungsverluste, Widerstände in Schaltungen, ...
- Symbol:



Mechanik:

- Reibung, ...
- Modelliert als
- Dämpfer:



- Rotationsdämpfer:

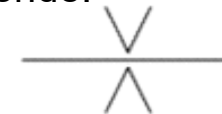


Hydraulik:

- Engstellen, Newtonsche Reibung
- Drossel:



- Blende:

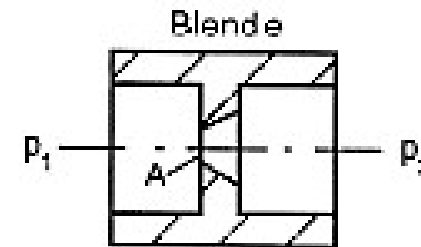


Hydraulische Widerstände

■ Blende:

scharfe Einlaufkante, bzw.
Querschnittsübergänge
→ turbulente Strömung.

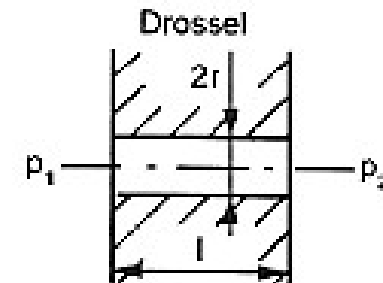
$$Q = \alpha_0 A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$$



■ Drossel:

konstanter Querschnitt, ausreichender
Länge; für laminare Strömung eines
Newton'schen Mediums

$$p = R_H \cdot Q$$

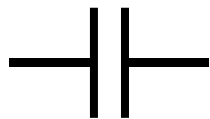


Potenzialspeicher

- Meistens auch Kapazitäten/Speicher genannt.

- Elektrotechnik:

- Kondensator, kapazitive Effekte,...
- Symbol:



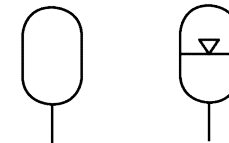
- Mechanik:

- Feder, elastische Materialien
- Symbol:



- Hydraulik:

- Hydraulische Speicher:



- Kompressibilität des Fluids; angedeutet als reale Leitung:



Stromspeicher

■ Oft auch Induktivität oder Trägheit genannt:

■ Elektrotechnik:

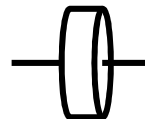
■ Spulen, induktive Effekte, ...

■ Symbol:



■ Mechanik:

■ Rotierende Massen:



■ Massen:

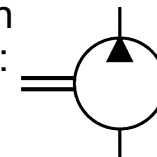


■ Hydraulik:

■ Trägheit des Fluids



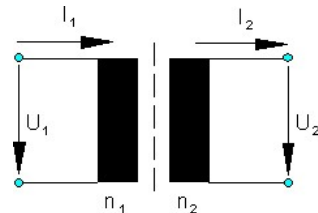
■ Trägheiten von Pumpen oder anderen mechanischen Bestandteilen:



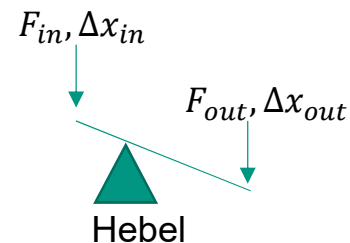
Übertrager:

- Ein- und Ausgangsleistung identisch
- Strom- und Potenzialgrößen ändern sich
- Beispiele:

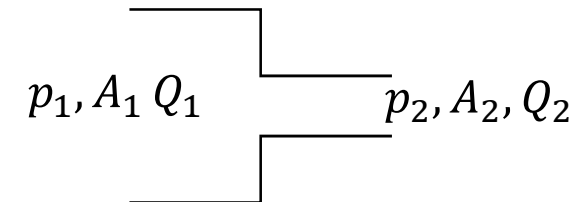
- Elektrotechnik:
 - Transformator



- Mechanik:
 - Seilzug, Hebel, Getriebe, ...



- Hydraulik:
 - Druckübertrager



Wandler

- Wandeln den Leistungsfluss zwischen unterschiedlichen Domänen
- Meist Mechanik als 2. Disziplin
- Der Leistungsfluss ist nicht immer umkehrbar. Bsp. Verbrennungsmotor

Beispiel:	Energieform 1	Energieform 2
Elektromotor	Elektrische Energie	Mechanische Energie
Piezoaktuator	Elektrische Energie	Mechanische Energie
Hydr. Pumpe oder Motor	Hydraulische Energie	Mechanische Energie
Hydraulischer Zylinder	Hydraulische Energie	Mechanische Energie
Verbrennungsmotor	Chemische Energie	Mechanische Energie
Batterie	Chemische Energie	Elektrische Energie
Brennstoffzelle	Chemische Energie	Elektrische Energie

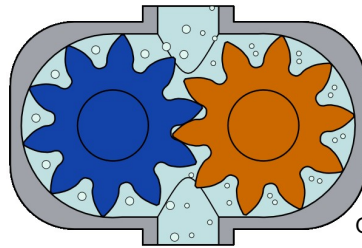
Inhalt

- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- **Spezielle Wandler**
- Aufgabe 1.1-1.2
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

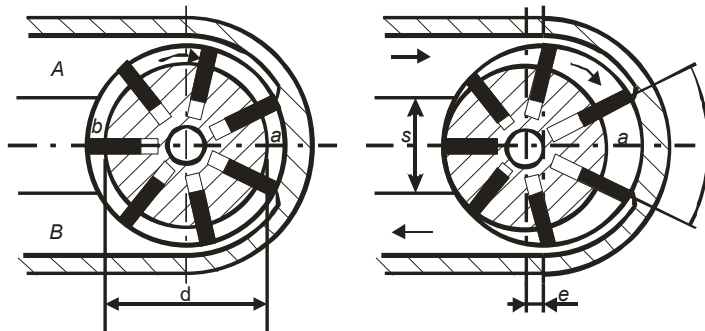
■ Mögliche Bauformen:

Zahnradpumpe:

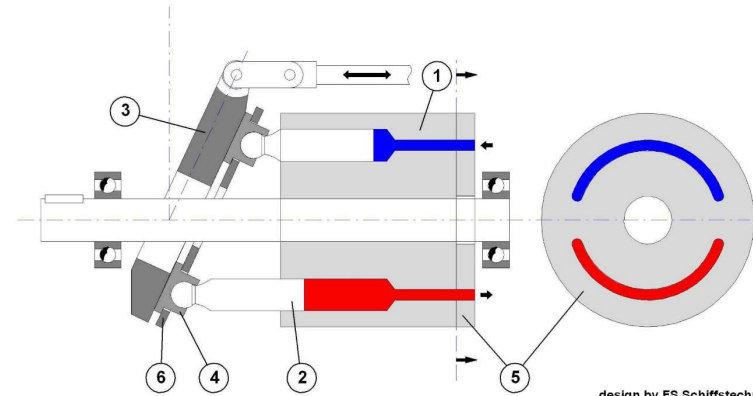


Quelle: Wikipedia

Flügelzellenpumpe:



Axialkolbenpumpe:



design by FS Schiffstechnik

Quelle: <https://fs-schiffstechnik.de/service/>

Hydraulische Pumpen und Motoren

■ Idealisierte Pumpen und Motoren:

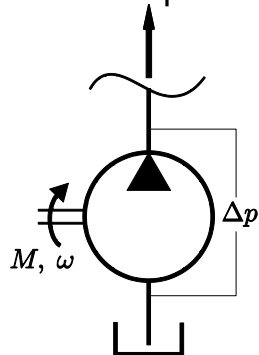
- V_{th} : Schluckvolumen

$$M = \frac{V_{th}}{2\pi} \cdot \Delta p$$

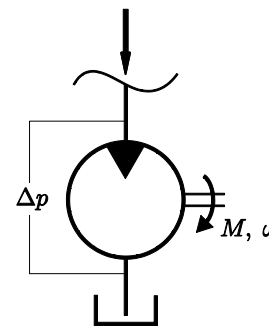
$$Q = V_{th} \cdot n = \dot{V}_{th}$$

- Account for efficiency: $\eta_{total} = \eta_{vol} \cdot \eta_{mech}$

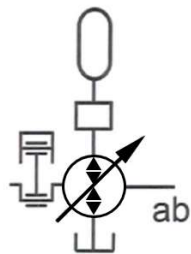
Pumpe:



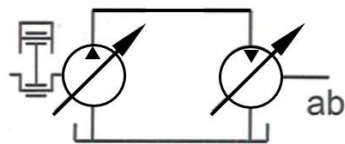
Motor:



- Mögliche Anwendungen in Hybridsystemen:

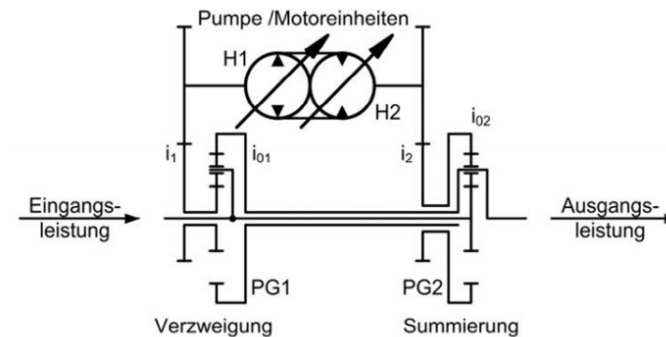


a) parallel



b) seriell

- Mögliche Anwendung in Getrieben:



c) Leistungsverzweigte Getriebe

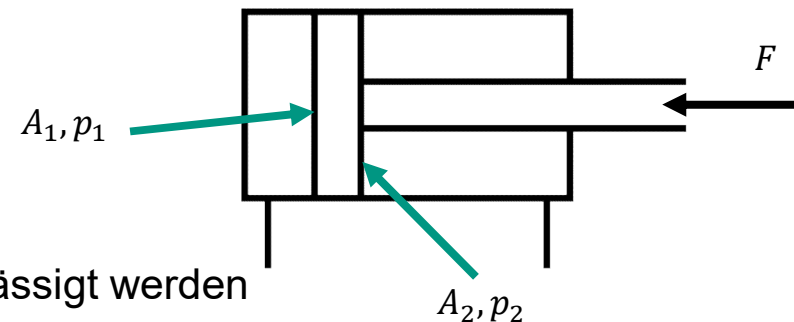
Hydraulischer Zylinder

■ Idealisierter Zylinder:

■ Kraftberechnung:

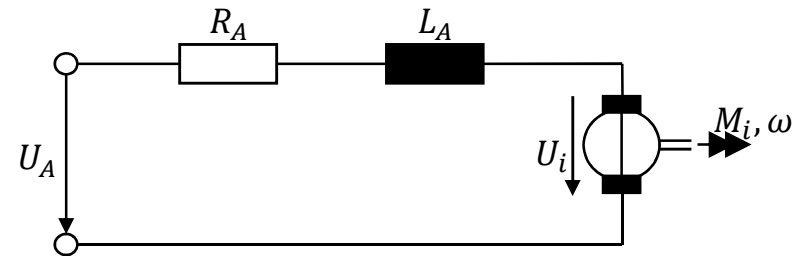
■ Häufige Annahmen:

- Trägheit des Fluids kann vernachlässigt werden
- Kompressibilität des Fluids kann vernachlässigt werden
- Die Bauteile werden als starr angenommen
- Es gibt keine Leckage



DC-Motor:

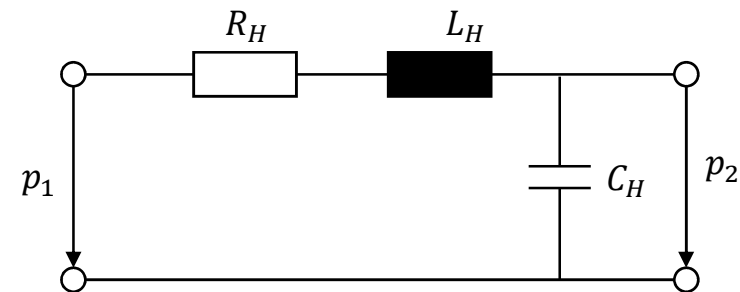
- Mit konstanter Erregung durch Permanentmagnete oder Erregerspulen.
- Berechnung:



Hydraulic pipe:

■ Effects:

- Compressibility of Fluid and the pipe
- Friction between fluid and the wall
- Inertia of the flowing fluid
- Effects appear over the whole pipe
- Effects are summarized with lumped parameters
- The capacity can be split or its position varied

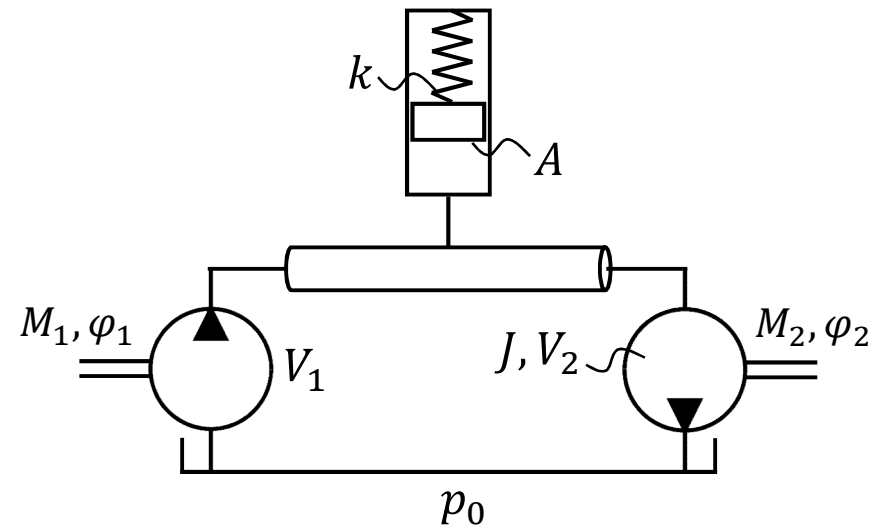


- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- Spezielle Wandler
- **Aufgabe 1.1-1.2**
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

Aufgabe 1

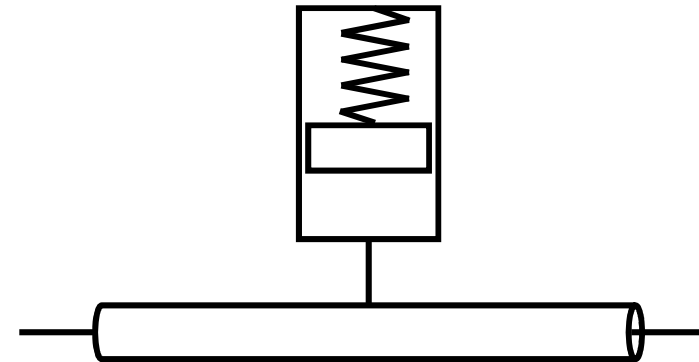
Gegeben ist das dargestellte Hydrauliksystem bestehend aus einer Pumpe und einem Motor. Zwischen Pumpe und Motor befindet sich eine reale Hydraulikleitung mit einem Kolbenspeicher.



Aufgabe 1.1

1. Berechnen Sie die Gesamtkapazität des Kolbenspeichersystems:

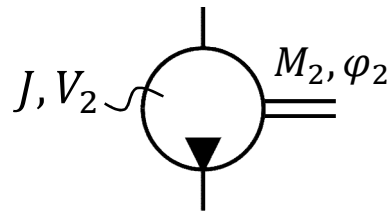
- Zusammenhang Druck-Volumenstrom Fluid: $\Delta p = E_{öl} \cdot \frac{\Delta V}{V_0}$
- Kapazität Leitung: C_{pipe}



Aufgabe 1.1

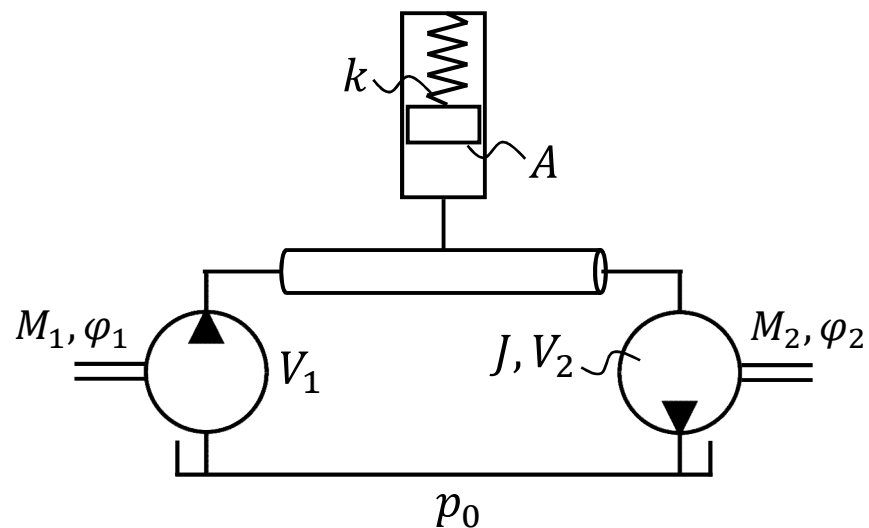
Aufgabe 1.2

2. Ermitteln Sie die hydraulische Induktivität des Motors. Die Trägheit des Öls kann dabei vernachlässigt werden.



Aufgabe 1.3

3. Stellen Sie die Zustandsgleichung des Systems auf. Gehen Sie von der selben hydraulischen Induktivität für Pumpe und Motor aus. Vernachlässigt werden kann die hydraulische Induktivität der Leitung sowie die mechanischen und volumetrischen Verluste des Motors und der Pumpe.



- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- Spezielle Wandler
- Aufgabe 1.1-1.2
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

■ Ziel: Matrixschreibweise

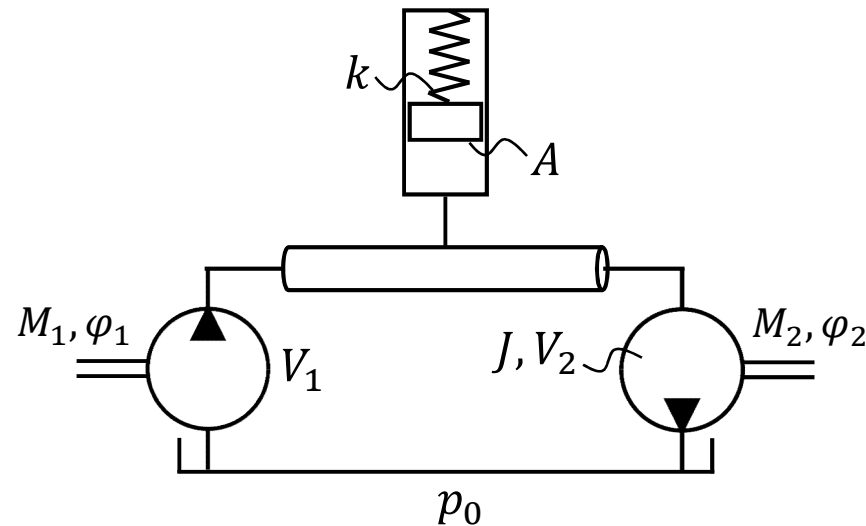
$$\begin{bmatrix} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \end{bmatrix}$$

■ Vorgehen:

1. Festlegen von Teilsystemen:
 - Identifizieren von Disziplinen, Wandler und weitere Subsysteme
2. Festlegen der integrierten Stromgrößen
3. Aufstellen von Nebenbedingungen
 - Welche Stromgrößen sind gekoppelt? Welche Koppelbedingungen gibt es?
4. Auswahl der verallgemeinerten integrierten Stromgrößen
5. Aufstellen der Zustandsgleichungen
 - Teilsysteme mathematisch Beschreiben
 - Einsetzen der Nebenbedingungen, in Matrixform überführen

Aufgabe 1.3

3. Stellen Sie die Zustandsgleichung des Systems auf.



1. Festlegen der Teilsysteme
2. Festlegen der integrierten Stromgrößen
3. Aufstellen der Nebenbedingungen

Aufgabe 1.3

4. Auswahl der verallgemeinerten integrierten Stromgrößen
5. Zustandsgleichung aufstellen

Aufgabe 1.3

Aufgabe 1.3

Aufgabe 1.3

Aufgabe 1.3

Aufgabe 1.4

4. Wandeln Sie das hydraulische System aus Abbildung XX in ein elektrisches um.

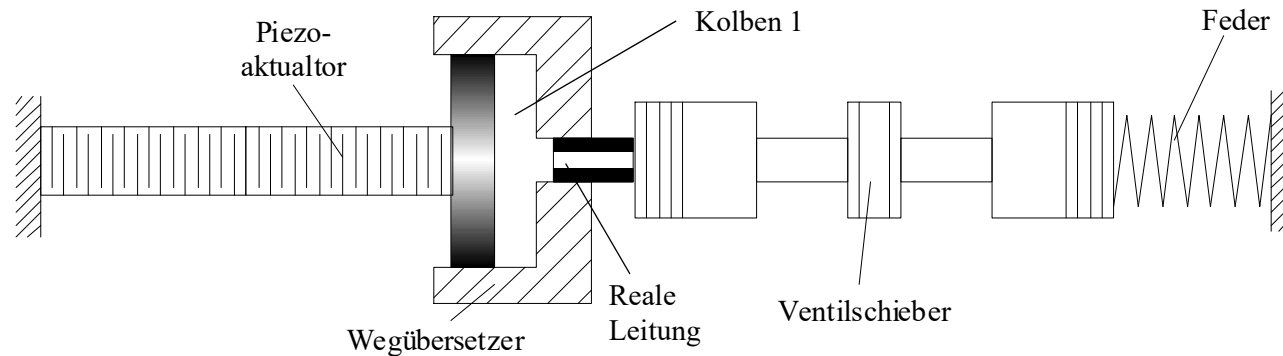
Inhalt

- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- Spezielle Wandler
- Aufgabe 1.1-1.2
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

Aufgabe 2

Modellierung eines bei der Diesel Einspritzung eingesetzten Common-Rail-Ventils, welches durch einen Piezoaktuator angesteuert wird.

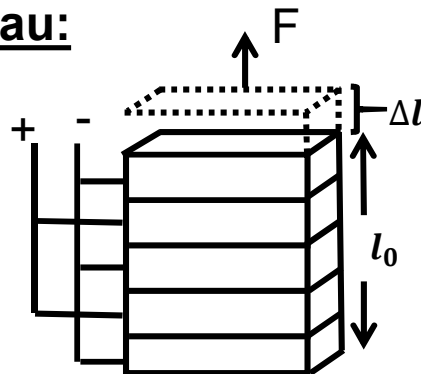


Aufgabe 2

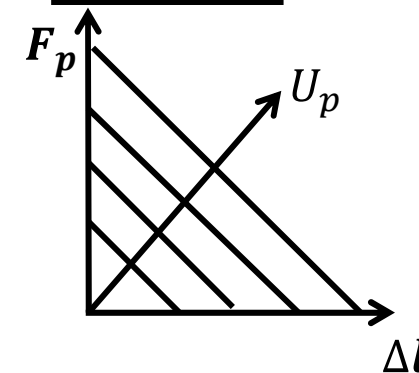
■ Eigenschaften eines Piezoaktuators:

- Krafterhöhung durch Querschnittsveränderung
- Hohe Kräfte/ geringe Auslenkung
- Spannung in Kraft + Weggewandelt

Aufbau:



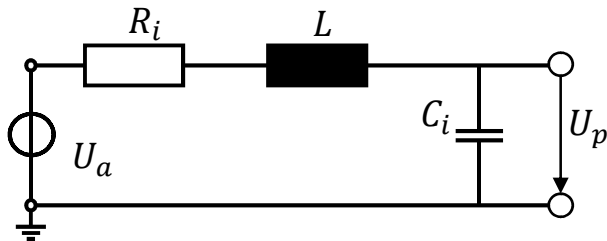
Kennlinie:



$$\Delta l = -\frac{F_p}{c_p} + U_p \cdot l_0 \cdot K_{Konst.}$$

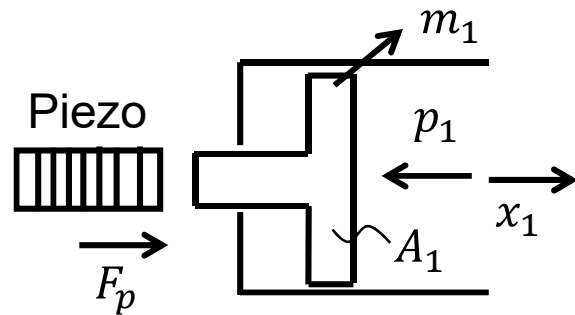
Aufgabe 2.1

1. Stellen Sie den Zusammenhang zwischen U_a und U_p mithilfe des elektrischen Ersatzschaltbildes her.



Aufgabe 2.2

2. Modellieren Sie den Kolben 1 und stellen Sie dessen Differentialgleichung auf.



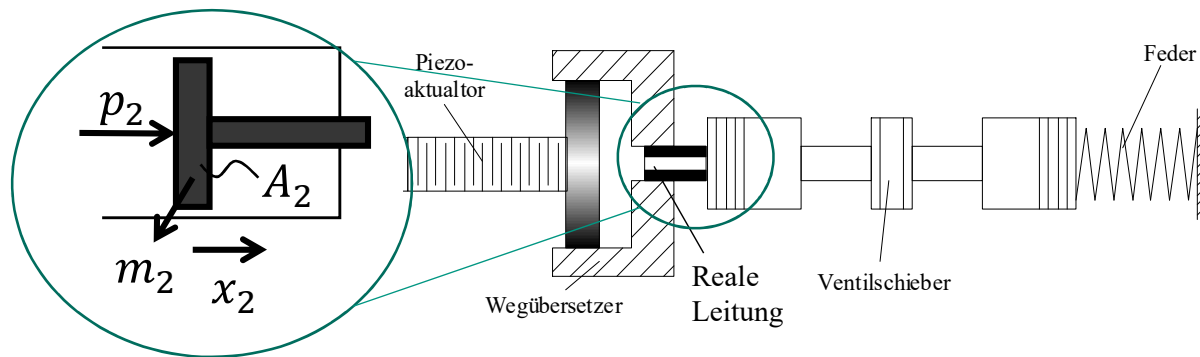
Aufgabe 2.3

3. Geben Sie nun die Gleichungen für die reale Leitung und deren Ersatzschaltbild an.

R_N L_H

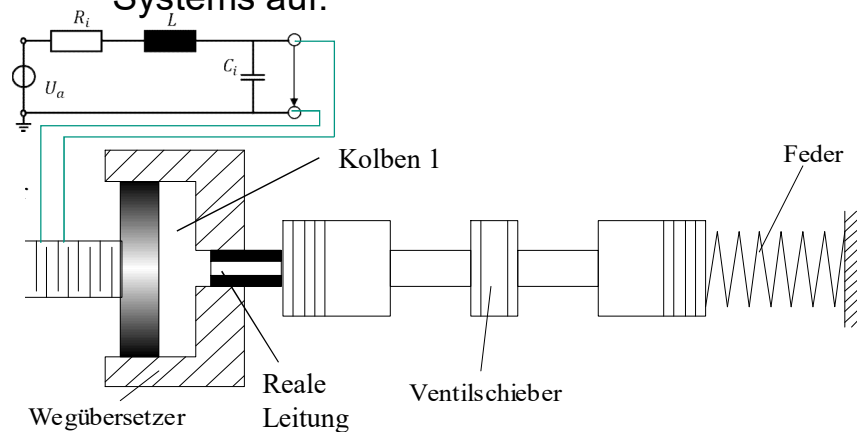
Aufgabe 2.4

4. Stellen Sie die Differentialgleichung des Ventilschiebers auf.



Aufgabe 2.5

5. Stellen Sie die Zustandsgleichung des Systems auf.



1. Festlegen der Teilsysteme
2. Festlegen der integrierten Stromgrößen
3. Aufstellen der Nebenbedingungen

Aufgabe 2.5

4. Auswahl der verallgemeinerten integrierten Stromgrößen
5. Zustandsgleichung aufstellen

Aufgabe 2.5

Aufgabe 2.5

Aufgabe 2.5

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ L_i l_0 K_{const} & -\frac{m_1}{c_p} & 0 \\ 0 & 0 & L_H A_2 + \frac{m_2}{A_2} \end{bmatrix} \begin{matrix} \ddot{s} \\ \ddot{q} \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{matrix} + \begin{bmatrix} R_i & 0 & 0 \\ R_i l_0 K_{const} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_H A_2 \end{bmatrix} \begin{matrix} \dot{s} \\ \dot{q} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{matrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{A_1^2}{c_p C_H} & -\frac{A_1 A_2}{c_p C_H} \\ 0 & \frac{-A_1}{C_H} & \frac{A_2}{C_H} + \frac{k}{A_2} \end{bmatrix} \begin{matrix} s \\ q \\ x_1 \\ x_2 \end{matrix} = \begin{pmatrix} U_a \\ U_a l_0 K_{const} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Inhalt

- Grundlagen Hydraulik
- Übersicht Prozesselemente
- Spezielle Wandler
- Aufgabe 1.1-1.2
- Zustandsgleichungen aufstellen
 - Aufgabe 1.3
- Aufgabe 2.1-2.5
- Co-Simulation
 - Aufgabe 2.6

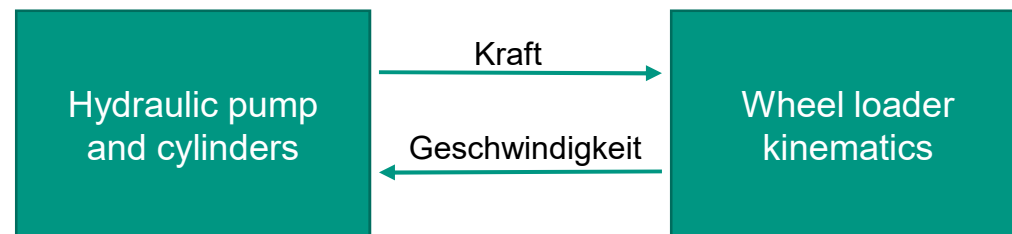
In dieser Übung wird
ausschließlich die
Potenzial-Strom-
Darstellung verwendet.

Co-Simulation

- Kombinieren mehrerer einzelner Simulationen.
- Austausch zwischen den Einzelsimulationen
 - Stromgrößen
 - Potenzialgrößen
- Pfeilrichtung des Potentials:
 - In Richtung des Systems ohne Potenzialquellen
 - In Richtung von passiven mechanischen Systemen



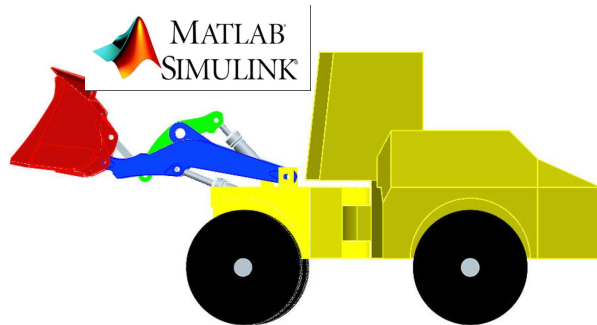
- Beispiel: Radlader



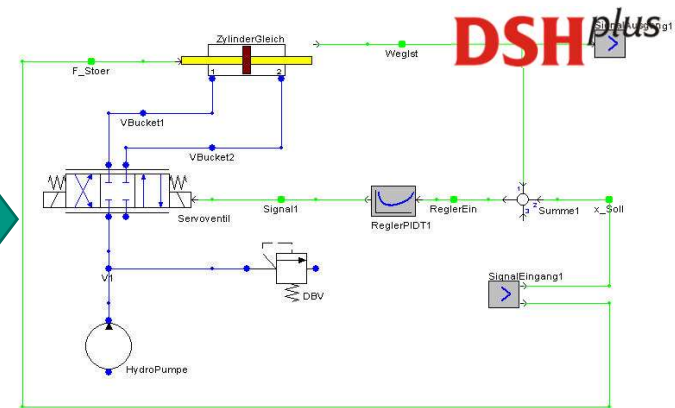
Co-Simulation

■ Beispiel Radlader:

- Simulation des mechanischen Systems in Simscape MATLAB.
- Simulation des hydraulischen Systems in DSHplus.
- Verbindung über Kräfte und Geschwindigkeiten.



■ Weiterführende Vorlesung „Simulation gekoppelter Systeme“



Aufgabe 2.6

6. Sie würden gerne das gesamte Ventil in einer Co-Simulation simulieren, bei der jede Disziplin in einem speziellen Programm umgesetzt wird. Teilen Sie das System in Blöcke auf, verbinden Sie diese mit Pfeilen für die Potenzial- und Stromgrößen, die zwischen den Blöcken ausgetauscht werden. Achten Sie auf die richtige Richtung der Pfeile.

Modellbildung und Simulation

Kontakt:

M.Sc. Alexander Stein
alexander.stein@kit.edu
0721 608-41824

