

Einsatz von Modelica/Dymola in der Lehre am Fachgebiet Fluidsystemtechnik

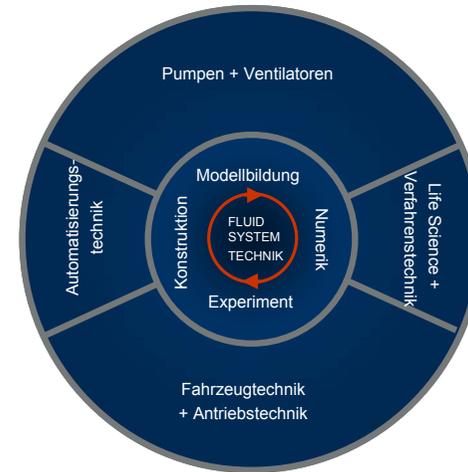
Modelica / Dymola Infotag
Bausch-Gall / TU Darmstadt

Peter Pelz, Matthias Puff
21.06.2007



Unser Grundsatz

... durch **Verständnis zum besseren System**



Personal

Versuchseinrichtungen

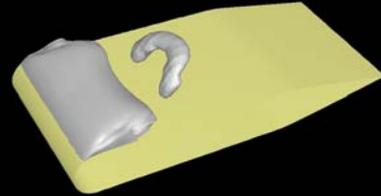
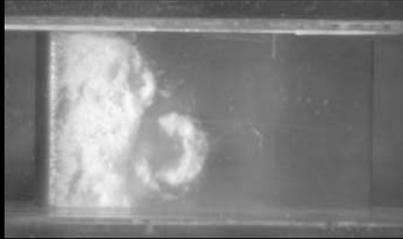
- Fachgebietsleitung + Sekretariat
- 11 wissenschaftliche Mitarbeiter
- 5 Werkstattmitarbeiter
- 2 Auszubildende
- 2 Akustikprüfstand:
Axialmaschinen bis 600 mm
Verdrängerpumpen
- 2 Ventilatorprüfstände
Laufreddurchmesser
250 mm, 1000 mm (im Aufbau)
- 4 Pumpenprüfstände
- 4 Kavitationsprüfstände
- HiL Lenkungsprüfstand
- Einaxialer 50 kN Hydropulsprüfstand
(12/06)
- dSpace AutoBox (12/06)
- Laser Doppler Velocimetry
- Particle Image Velocimetry

Forschungsschwerpunkte

- 1 Entstehung, Erscheinung und Auswirkung von **Kavitation**
- 2 **Energieeffizienz und Akustik** von Fluidenergiemaschinen
- 3 Technische und biologische **Fluidsysteme**

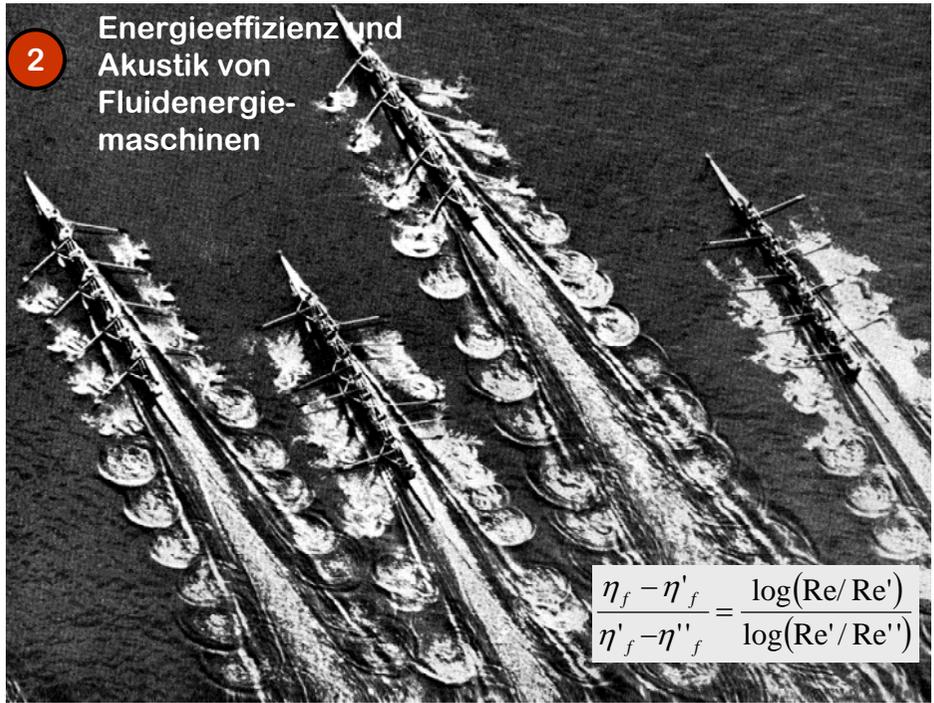


1 Entstehung, Erscheinung und Auswirkung von Kavitation



$$\frac{fU_1}{L} = fn(\text{Re}, \text{Geometrie})$$

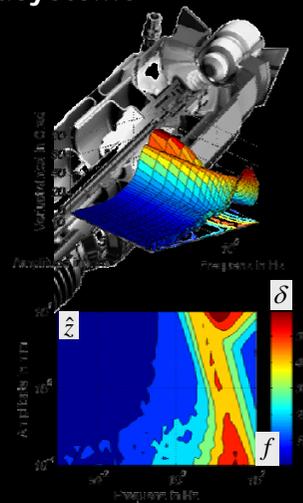
2 Energieeffizienz und Akustik von Fluidenergiermaschinen



$$\frac{\eta_f - \eta'_f}{\eta'_f - \eta''_f} = \frac{\log(\text{Re} / \text{Re}')}{\log(\text{Re}' / \text{Re}'')}$$

3 technische und biologische Fluidsysteme

- Integrierte, adaptive Fluidsysteme
- Modellbildung 1D, transiente, kompressible Strömung in Fluidsystemen
- Trägheitsverluste bei transienter Strömung
- Strömungen im Dichtspalt



$$\zeta = \zeta \left(\frac{UL}{v}, \frac{\dot{U}L^3}{v^2} \right)$$

Lehrangebot Fluidsystemtechnik



	Bachelor Mechanical + Process Engineering				Master Mechanical + Process Engineering					
	WS	SS	WS	SS	WS	SS	WS	SS		
	1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester	5. Semester	6. Semester	1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
1 CP										
2 CP										
3 CP										
4 CP										
5 CP										
6 CP										
7 CP										
8 CP										
9 CP										
10 CP										
11 CP										
12 CP										
13 CP										
14 CP										
15 CP										
16 CP										
17 CP										
18 CP										
19 CP										
20 CP										
21 CP										
22 CP										



2D / 3D	Instationär, kompressibel bzw. nachgiebige Struktur	Numerischer oder praktische Versuche
1D	instationär kompressibel	Nichtlinear: Charakteristikenmethode Linear: Wellengleichung
1D	instationär inkompressibel	Bernoullische Gleichung
0D	instationär kompressibel	Energiegleichung + Kontinuitätsgleichung

2D
Reynoldssche Gleichung (Schmiertheorie)

oder
3D Navier-Stokes-Solver

1D, 0D
Umsetzung in Modelica/Dymola

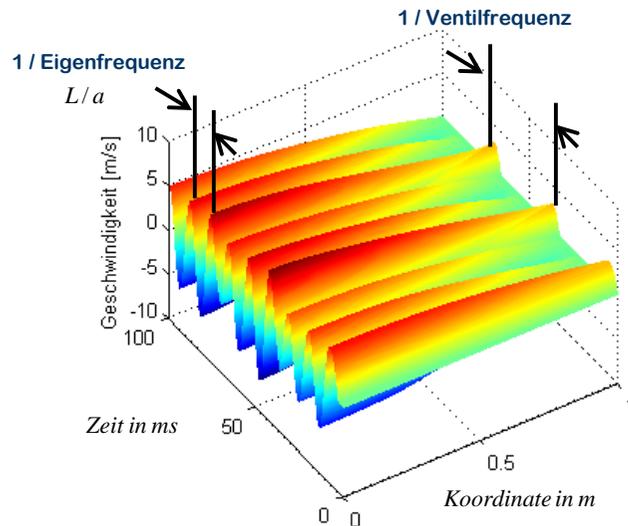
2D / 3D	Instationär, kompressibel bzw. nachgiebige Struktur	Numerischer oder praktische Versuche
1D	instationär kompressibel	Nichtlinear: Charakteristikenmethode Linear: Wellengleichung
1D	instationär inkompressibel	Bernoullische Gleichung
0D	instationär kompressibel	Energiegleichung + Kontinuitätsgleichung

partielle Differentialgleichungen (PDGL)

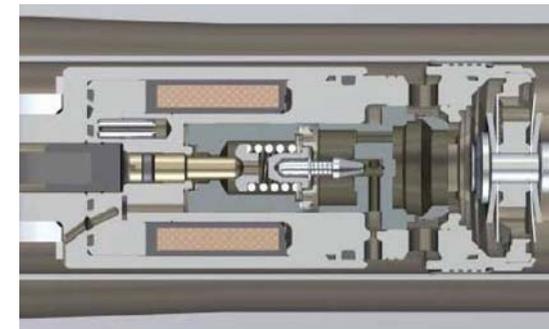
PDGL
→ gewöhnliche Differentialgleichungen (DGL)

algebraische Gleichungen bzw.

DGL System



- Methodik zur Modellbildung vermitteln
- Beispiel: Modellierung einer komplexen Ventilströmung



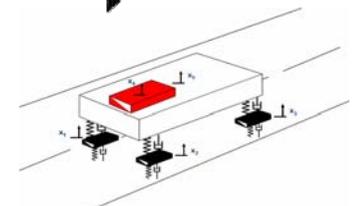
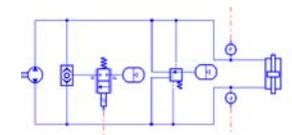
- Studenten sollen in der Lage sein, in der Vorlesung erlernte Methodik zur Modellbildung auf komplexe Systeme anzuwenden

Modelica/Dymola als Modellierungswerkzeug hervorragend geeignet, weil ...

- objektorientierter Ansatz.
- Beschreibung der Bauteile über physikalische Gleichungen → universell einsetzbar für Systeme der Mechanik, Pneumatik, Hydraulik, ...
- hohe Lesbarkeit der Differentialgleichungen
- größte Verbreitung im Vergleich der modelica-basierenden Simulationsprogrammen (Einsatz z.B. bei DaimlerChrysler, Audi, VW, ZF, ...)
- Kompatibel zu Matlab/Simulink

Forschung

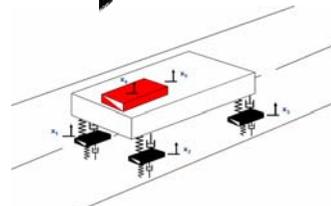
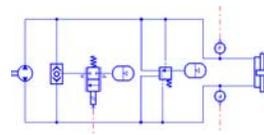
Lehre



Forschung

Lehre

- Modellierung einer elektrohydraulischen Lenkung mit Direktantrieb (EHDS) für Pkw
- Simulation von Luft-Feder-Dämpfer für Pkw
- Erstellung eines 6-Körper-Fahrzeugmodells für Fahrdynamikuntersuchungen



Forschung

Lehre

Ziel:
Methoden und Erfahrung bei der physikalischen Modellierung von Fluidsystemen vermitteln.



Vorlesungen

Rechnerübungen

Pneumatiktutorium

Methoden der 0D, 1D, 2D
Strömungsmechanik

Praktische Erfahrung und Anwendung der
erlernten Methodik

Modelica/Dymola

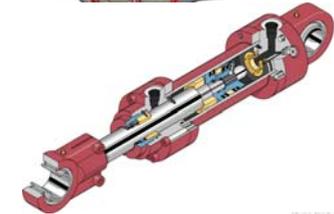
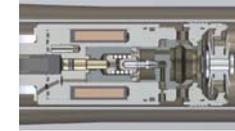
- Modellierung des Objektes (Krümmer, Blende, Laufrad, ...) durch Anwendung der Vorlesungsinhalte
- Planen und Aufbau eines Gesamtsystems (Hydraulischer Antrieb, Motorluftsystem, biologisches Fluidsystem, ...) in Modelica / Dymola

CFD

- Numerischen Versuche am System → Sammeln von Erfahrung über das System
- Nutzen des physikalischen Systems als Regelstrecke

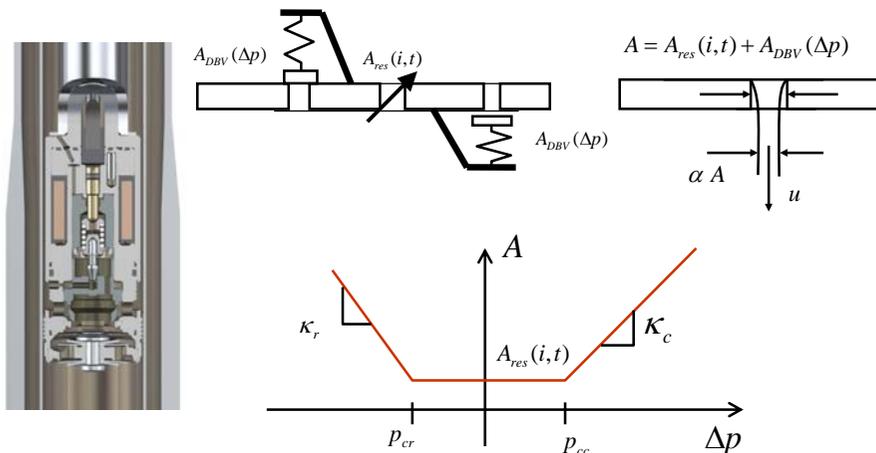
... mehr als CFD Berechnung

- 1 kompressible Ventilströmung**
(algebraische Gleichungen)
- 2 Übertragungsverhalten einer Luftfeder**
(System von nichtlineare DGLn und algebraischen Gleichungen)
- 3 Aufbau und Regelung eines Hydraulikzylinders**
(System von nichtlineare DGLn und algebraischen Gleichungen + Regler)



1 Kompressible Ventilströmung

Vorlesungsinhalt

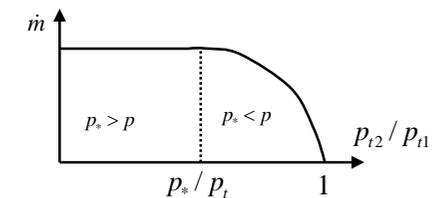
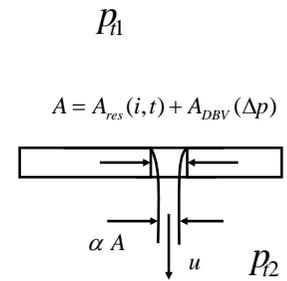


1 kompressible Ventilströmung

Vorlesungsinhalt

Isentrope, quasistationäre Strömung vom „Kessel“ bis zum engsten Querschnitt („kompressibler Bernoulli“)

- unterkritisches Druckverhältnis $\frac{p_{t2}}{p_{t1}} \geq 0.528$
- überkritisches Druckverhältnis $\frac{p_{t2}}{p_{t1}} < 0.528$



Vorlesungsinhalt

Unterkritisches Druckverhältnis

$$p_e = p_{t2}, \quad \rho_e = \rho_{t1} \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Überkritisches Druckverhältnis

$$p_e = 0.528 p_{t1}, \quad \rho_e = 0.634 \rho_{t1}$$

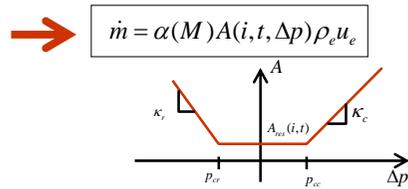
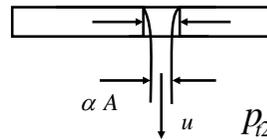
Kompressibler Bernoulli zur Berechnung der Ausströmgeschwindigkeit:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_{t1}}{\rho_{t1}} = \frac{u_e^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_{t1}}{\rho_{t1}} \left(\frac{p_e}{p_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\rightarrow u_e = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_{t1}}{\rho_{t1}} \left[1 - \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

 P_{t1}

$$A = A_{res}(i, t) + A_{DBV}(\Delta p)$$



Rechnerübung

model Ventil

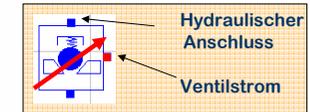
```

Real mdot (unit="kg/s");
Real rhoe (unit="kg/m^3");
Real ue (unit="m/s");
Real Ae (unit="m^2");
Real Ares;
Real i (unit="A");
parameter Real T1 (unit="K")=293;
parameter Real rho1 (unit="kg/m^3");
parameter Real p1 (start=500000, unit="Pa");
parameter Real p2 (unit="Pa")=1e5;
parameter Real V1 (unit="m^3")=1;
parameter Real R (unit="J/kg/K")=287;
parameter Real gamma=1.4;
parameter Real alpha=0.58;
parameter Real pgrenz=5e5;
parameter Real c (unit="m^2/A")=1e-5;
parameter Real kappa=100e-11;

```

Variablen

Parameter



Hydraulischer Anschluss

Ventilstrom

equation

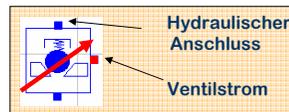
```

mdot=alpha*ue*Ae*rhoe;
rhoe= if p2/p1>0.528 then rho1*(p2/p1)^(1/gamma) else 0.634*rho1;
ue= if p2/p1>0.528 then (2*gamma/(gamma-1)*(p1/rho1)*(1-(p2/p1)^((gamma-1)/gamma)))^0.5 else ...
Ae= if p1 < pgrenz then Ares else Ares+(p1-p2)*kappa;
Ares= c*i;
p1=hydraulikanschluss1.p;
p2=hydraulikanschluss2.p;
i=pin.i;
end Ventil;

```

Hydraulischer und elektrischer Anschluss

Rechnerübung



Hydraulischer Anschluss

Ventilstrom

```

equation
mdot=alpha*ue*Ae*rhoe;
rhoe= if p2/p1>0.528 then rho1*(p2/p1)^(1/gamma) else 0.634*rho1;
ue= if p2/p1>0.528 then (2*gamma/(gamma-1)*(p1/rho1)*(1-(p2/p1)^((gamma-1)/gamma)))^0.5 else ...
Ae= if p1 < pgrenz then Ares else Ares+(p1-p2)*kappa;
Ares= c*i;
p1=hydraulikanschluss1.p;
p2=hydraulikanschluss2.p;
i=pin.i;
end Ventil;

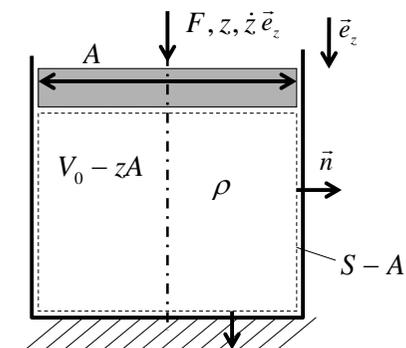
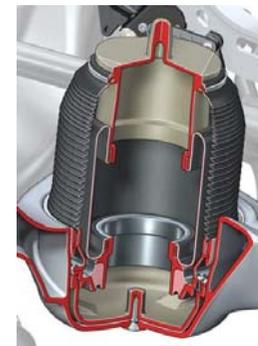
```

Vorteil von Modelica

gegenüber Matlab/Simulink:

Sehr gute Lesbarkeit der algebraischen Gleichungen

Vorlesungsinhalt



- Vernachlässigung des Luftfederbalges
- Homogener Zustand innerhalb des Bauteils

Vorlesungsinhalt

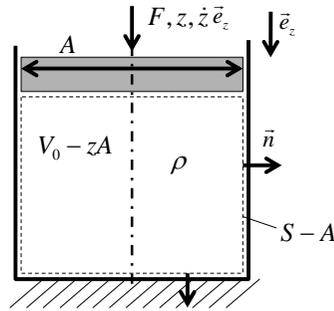
- Kontinuitätsgleichung:

$$m = \int_{V(t)} \rho dV$$

$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_0-zA} \rho dV + \int_S \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0$$

$$\frac{d\rho}{dt} (V_0 - zA) + \int_A \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dS + \int_{S-A} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0$$

$$\dot{\rho}(V_0 - zA) - A\rho\dot{z} = 0$$



Vorlesungsinhalt

- Energiegleichung:

$$\frac{D}{Dt} (E + K) = \frac{D}{Dt} \int_{V(t)} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) dV = \dot{Q} + P$$

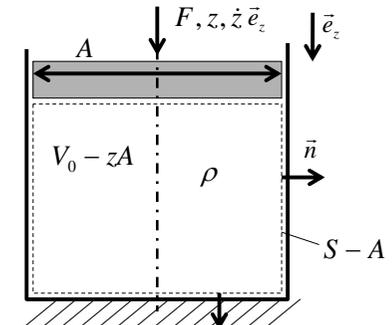
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_0-zA} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) dV + \int_A \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_S -\vec{q} \cdot \vec{n} dS + \int_A -p \vec{n} \cdot \vec{u} + \vec{n} \cdot \vec{P} \cdot \vec{u} dS$$

Newton $\approx -Sk(T - T_0)$

$$\left. \begin{aligned} e &= c_v T \\ h &= c_p T \end{aligned} \right\} \text{kalorische Zustandsgleichungen}$$

$$p = \rho R T \quad \text{thermische Zustandsgleichung}$$

$$(V_0 - zA) \frac{c_v}{R} \dot{p} - A z \rho c_p T = -Sk(T - T_0)$$



Rechnerübung

```

model Luftfeder
  Real rho (unit="kg/m^3");
  Real p (start=9.5e5, unit="Pa");
  Real z (unit="m");
  Real F (unit="N");
  Real T (start=T0, unit="K");
  parameter Real gamma=1.4;
  parameter Real A (unit="m^2")=0.007;
  parameter Real V0 (unit="m^3")=0.0018;
  parameter Real Av (unit="m^2")=0.09;
  parameter Real R (unit="J/(kg*K)")=0.09;
  parameter Real k (unit="W/(m^2*K)")=15;
  parameter Real T0 (unit="K")=296;

```

Variablen

Parameter

```

equation
  der(rho)=A*rho*der(z)/(V0-z*A);
  der(p)=(A*der(z)*gamma*p-(gamma-1)*Av*k*(T-T0))/(V0-z*A);
  p=rho*R*T;
  F=p*A;
  flange_a.f=-F;
  flange_b.f=F;
  z=flange_b.s-flange_a.s;

```

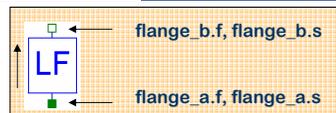
Gleichungen

mechanische Anschlüsse (connectors)

```

end Luftfeder;

```



Rechnerübung

equation

```

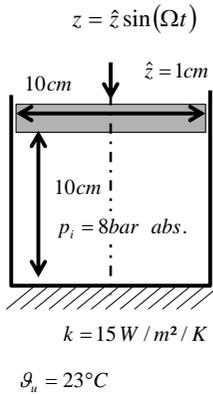
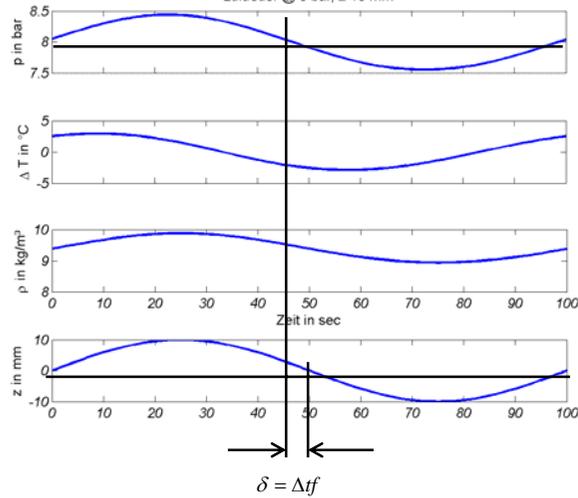
der(rho)=A*rho*der(z)/(V0-z*A);
der(p)=(A*der(z)*gamma*p-(gamma-1)*Av*k*(T-T0))/(V0-z*A);
p=rho*R*T;
F=p*A;
flange_a.f=-F;
flange_b.f=F;
z=flange_b.s-flange_a.s;

```

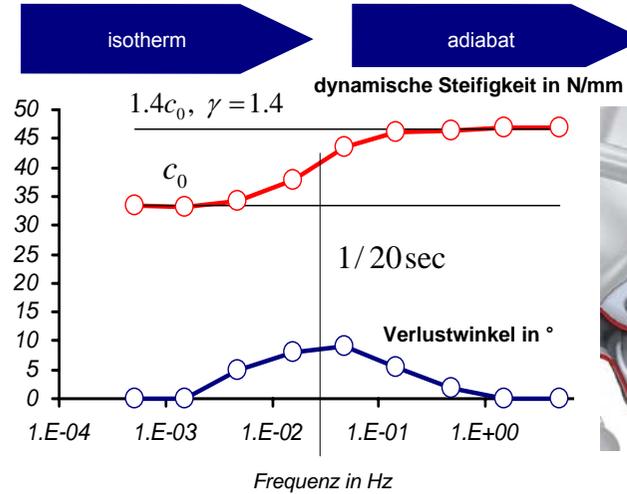
Einfache Handhabung von
gewöhnlichen Differentialoperatoren

Rechnerübung

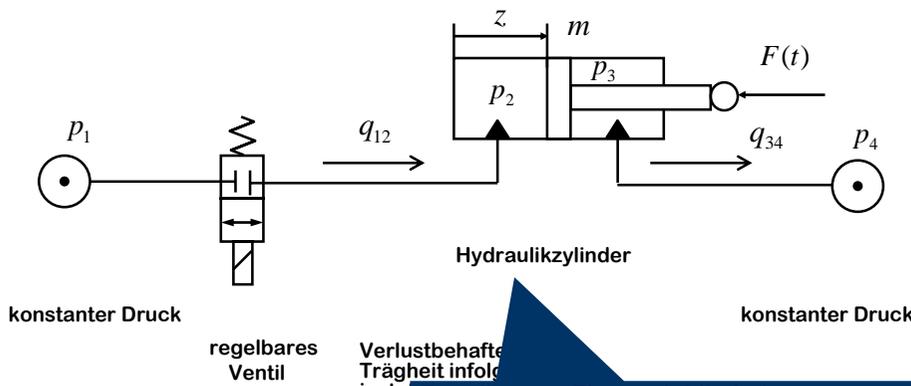
@ 0.01Hz, +- 1 cm



Rechnerübung



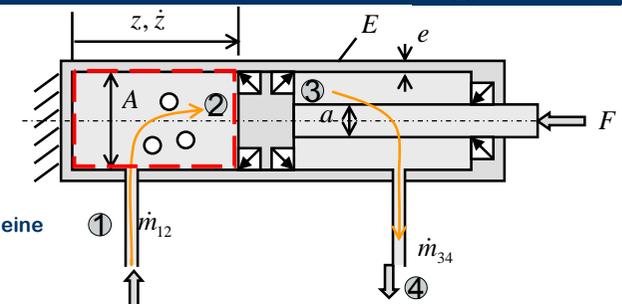
Vorlesung



Erstellen von Elementbibliotheken
+ Wiederverwendbarkeit
+ Teilen von Wissen
+ Qualität der Modelle

Vorlesung

Element „Hydraulikzylinder“



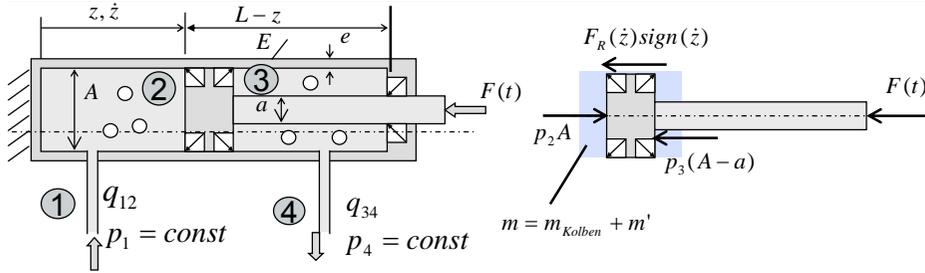
- Kontinuitätsgleichung für eine Stromröhre:

$$\int_0^l \frac{\partial \rho A}{\partial t} ds - \rho_1 u_1 A_1 + \rho_2 u_2 A_2 = 0$$

$$lA \frac{d\rho}{dt} + l\rho \frac{dA}{dt} - \dot{m}_{12} + \rho z A = 0 \quad (\text{hier ist } l = z)$$

$$V\kappa_{eff} \rho p - \dot{m}_{12} + \rho z A = 0 \quad \text{mit } \kappa_{eff} = \kappa_F + \kappa_A$$

Nachgiebigkeit von Fluid + Anlage



Kontigleichung für Raum (2): $zA\kappa_{eff}\dot{p}_2 - \underline{q}_{12} + \dot{z}A = 0$

Kontigleichung für Raum (3): $(z-L)A\kappa_{eff}\dot{p}_3 + \underline{q}_{34} - \dot{z}(A-a) = 0$

Impulssatz für den Kolben: $m\ddot{z} = p_2A - p_3(A-a) - p_u a - F(t) - F_R(\dot{z})$

Widerstandsgesetze:

$$p_1 - p_2 = \zeta \frac{\rho}{2} \frac{1}{a_{12}^2} q_{12} |q_{12}| + \dot{q}_{12} \frac{\rho l_{12}}{a_{12}}$$

$$p_3 - p_4 = \zeta \frac{\rho}{2} \frac{1}{a_{34}^2} q_{34} |q_{34}| + \dot{q}_{34} \frac{\rho l_{34}}{a_{34}}$$

Rechnerübung



```

model Hydraulikzylinder
  B;
  Hydraulikanschluss Druckanschluss1 B;
  Hydraulikanschluss Druckanschluss2 B;
  Modelica.Mechanics.Translational.Interfaces.Flange_b flange_bB;

  Variablen ...
  Parameter ...

  equation
    z_dot=der(z);
    m*der(z_dot)=p2*A-p3*(A-a)-pu*a-F-Fr;
    Fr=d*der(z);
    z*A*kabba*der(p2)-q12+der(z)*A=0;
    (z-L)*A*kabba*der(p3)-der(z)*(A-a)+q34=0;
    p1-p2=zeta*(rho/(2*a12^2))*q12*abs(q12)+der(q12)*rho*l12/a12;
    p3-p4=zeta*(rho/(2*a34^2))*q34*abs(q34)+der(q34)*rho*l34/a34;
    F=flange_b.f;
    flange_b.s=z;
    p1=Druckanschluss1.p;
    p4=Druckanschluss2.p;
  end Hydraulikzylinder;
    
```

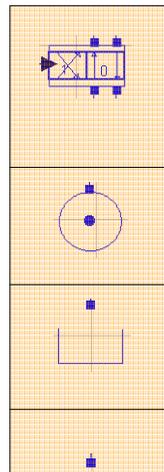
Zuweisung der mechanischen und hydraulischen Anschlüsse

Weitere Elemente

4/2 Wegeventil

- Ventilbeschreibung wie in Beispiel 1
- Unterschied: Ansteuerung über einen Real-Input aus der Bibliothek: Modelica.Blocks.Interfaces
- Signal = 1 → Zylinder fährt von rechts nach links
- Signal = 0 → Zylinder fährt von links nach rechts

Symbole



Druckquelle:

- Druckquelle mit konstantem Druck p_1

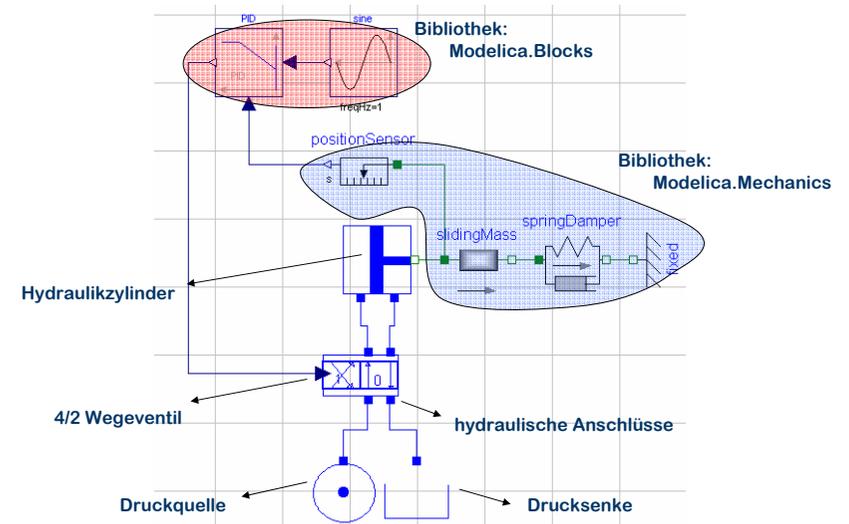
Drucksenke:

- Drucksenke mit konstantem Druck p_4

Hydraulischer Anschluss:

- Enthält alle Größen, welche das Systemverhalten beschreiben: $p, T, \rho, \dot{m}, q, \dots$

Modellierung des Gesamtsystems aus den Einzelementen



- **Direkte Eingabemöglichkeit linearer, nichtlinearer und partieller DGL-Systeme → hohe Effizienz und Übersichtlichkeit!**
- **Ideale Ergänzung zur Vorlesung → Modellierung, Systemverständnis, Regelstrecke**
- **Modelica / Dymola besitzt modelica-typisches White-Box Schema, d.h. 100% Zugriff auf den Quellcode!**
- **Gezeigt wurde die Wiederverwendbarkeit der Objekte durch Erstellung eigener Bibliotheken!**