

## Einsatz von Modelica/Dymola in der Lehre am Fachgebiet Fluidsystemtechnik

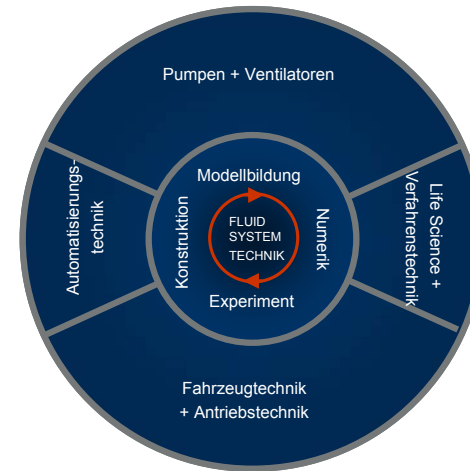
Modelica / Dymola Infotag  
Bausch-Gall / TU Darmstadt

Peter Pelz, Matthias Puff  
21.06.2007



## Unser Grundsatz

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



## Personal

## Versuchseinrichtungen

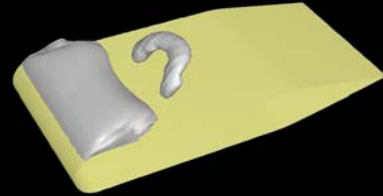
- Fachgebietsleitung + Sekretariat
- 11 wissenschaftliche Mitarbeiter
- 5 Werkstattmitarbeiter
- 2 Auszubildende
- 2 Akustikprüfstand:  
Axialmaschinen bis 600 mm  
Verdrängerpumpen
- 2 Ventilatorprüfstände  
Laufreddurchmesser  
250 mm, 1000 mm (im Aufbau)
- 4 Pumpenprüfstände
- 4 Kavitationsprüfstände
- 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**

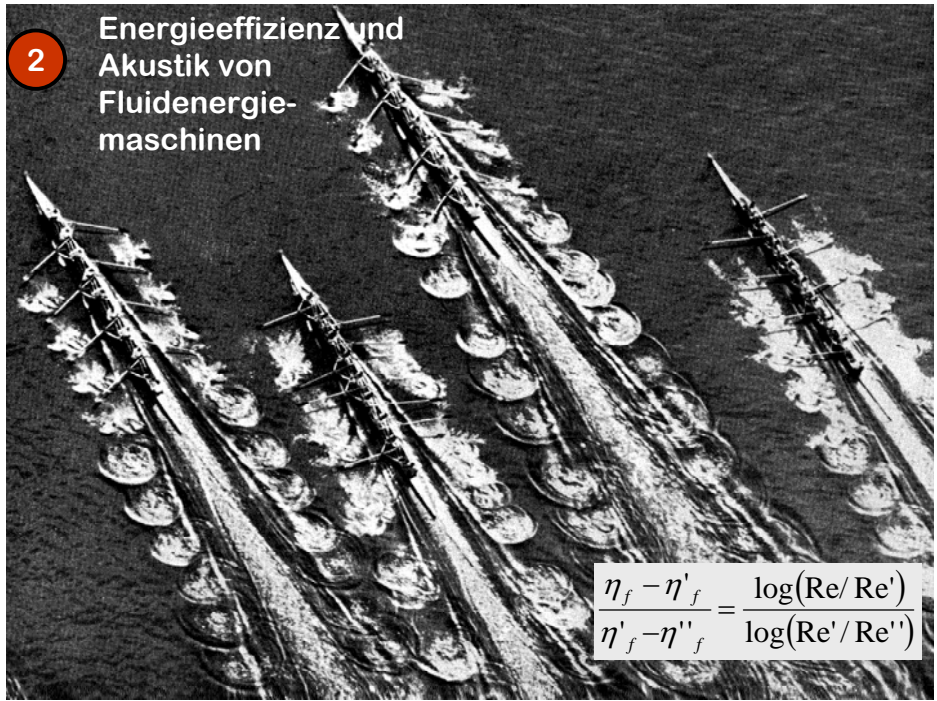


# 1 Entstehung, Erscheinung und Auswirkung von Kavitation



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

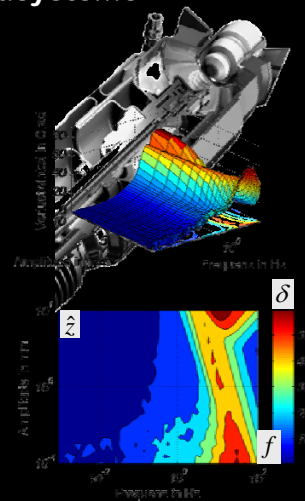
# 2 Energieeffizienz und Akustik von Fluidenergiermaschinen



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

# 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

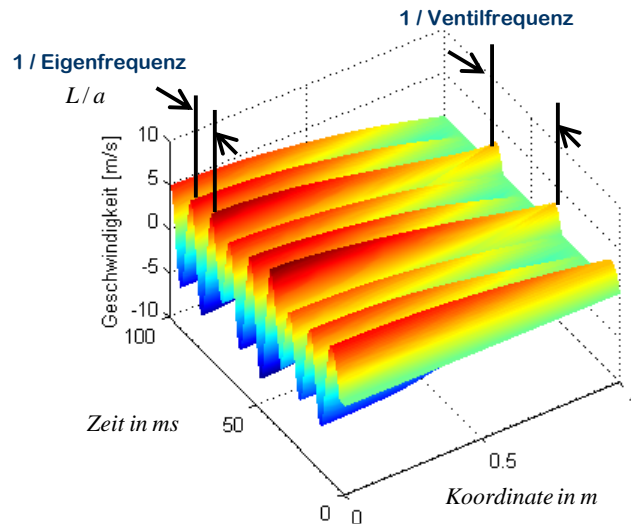
2D / 3D	Instationär, kompressibel bzw. nachgiebige Struktur	Numerischer oder praktische Versuche
1D	instationär kompressibel	Nichtlinear: Charakteristikenmethode Linear: Wellengleichung
1D	instationär inkompressibel	Bernoullische Gleichung
0D	instationär kompressibel	Energiegleichung + Kontinuitätsgleichung

partielle Differentialgleichungen (PDGL)

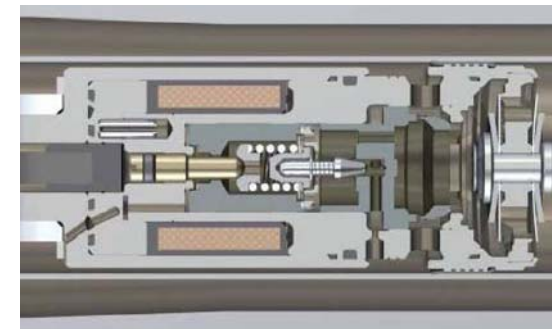
PDGL  
→ gewöhnliche Differentialgleichungen (DGL)

algebraische Gleichungen bzw.

DGL System



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



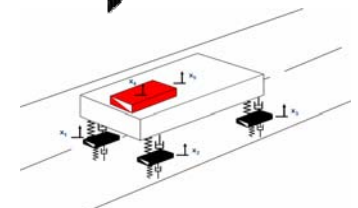
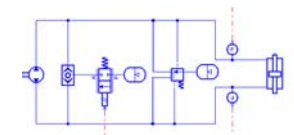
- Studenten sollen in der Lage sein, in der Vorlesung erlernte Methodik zur Modellbildung auf komplexe Systeme anzuwenden

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

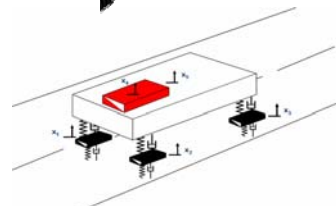
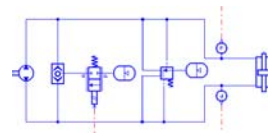
Lehre



Forschung

Lehre

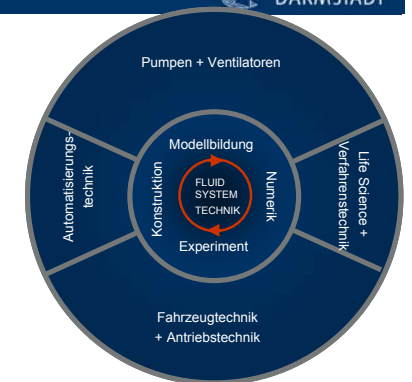
- Modellierung einer elektrohydraulischen Lenkung mit Direktantrieb (EHDS) für Pkw
- Simulation von Luft-Feder-Dämpfer für Pkw
- Erstellung eines 6-Körper-Fahrzeugmodells für Fahrdynamikuntersuchungen



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

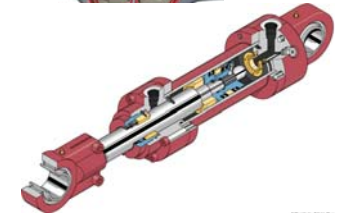
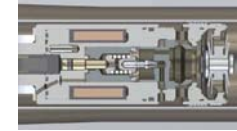
- Modellierung des Objektes (Krümmer, Blende, Laufrad, ...) durch Anwendung der Vorlesungsinhalte
- Planen und Aufbau eines Gesamtsystems (Hydraulischer Antrieb, Motorluftsystem, biologisches Fluidsystem, ...) in Modelica / Dymola

CFD

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

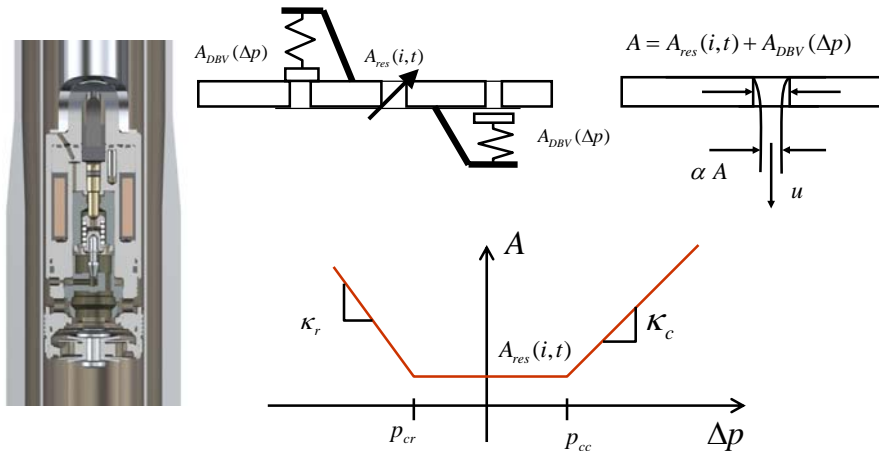
... mehr als CFD Berechnung

- 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

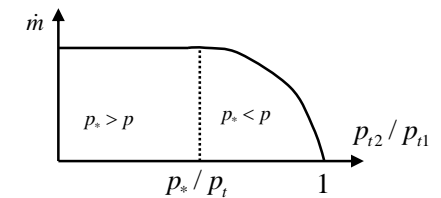
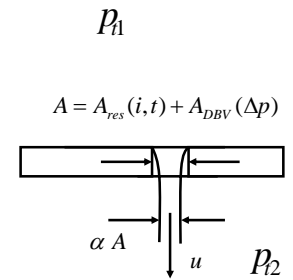


# 1 kompressible Ventilströmung

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

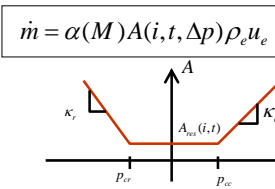
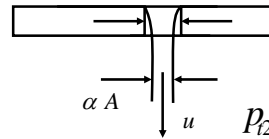
Kompresibler Bernoulli zur Berechnung der Ausströmgeschwindigkeit:

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

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

$P_{t1}$

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



Rechnerübung

```

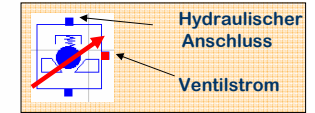
model Ventil
  Real mdot(unit="kg/s");
  Real rhoe(unit="kg/m^3");
  Real ue(unit="m/s");
  Real Ae(unit="m^2");
  Real Ares;
  Real i(unit="A");
  parameter Real T1(unit="K")=293;
  parameter Real rho1(unit="kg/m^3");
  parameter Real p1(start=500000, unit="Pa");
  parameter Real p2(unit="Pa")=1e5;
  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;

  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;
  
```

Variablen

Parameter

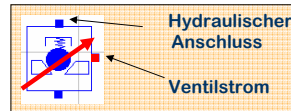
Hydraulischer und elektrischer Anschluss



Rechnerübung

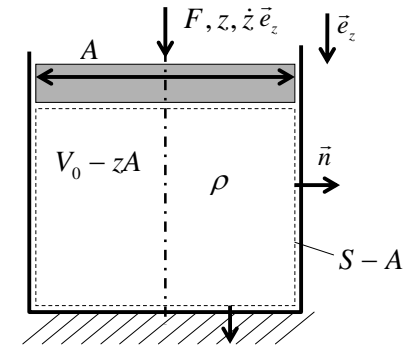
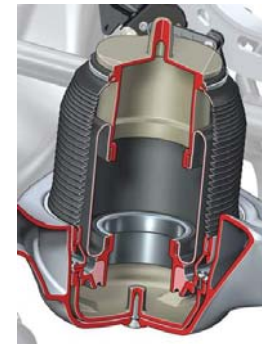
```

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

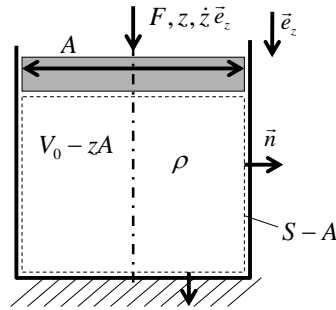
- Kontinuitätsgleichung:

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

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

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

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



## Vorlesungsinhalt

- Energiegleichung:

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

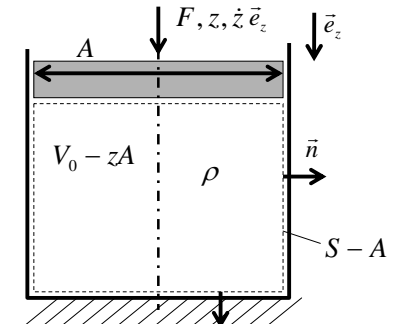
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_0-zA} \rho \left( e + \frac{u^2}{2} \right) dV + \int_A \rho \left( e + \frac{u^2}{2} \right) \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_S -\vec{q} \cdot \vec{n} dS + \int_A -p \vec{n} \cdot \vec{u} + \vec{n} \cdot \vec{P} \cdot \vec{u} dS$$

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

```

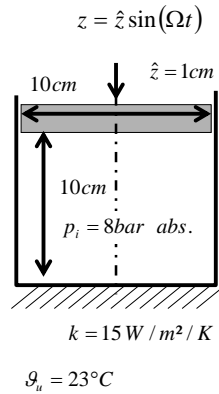
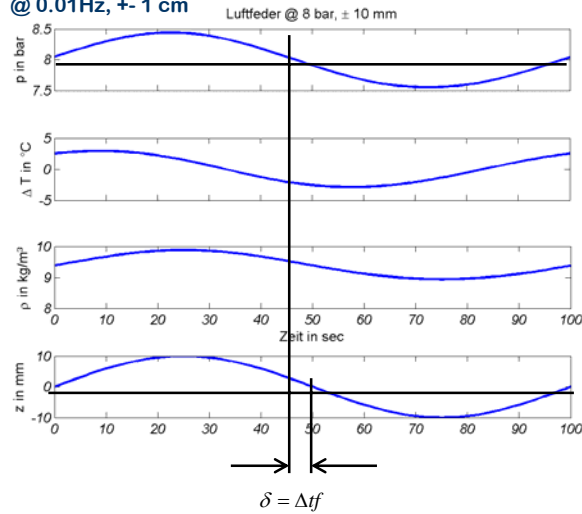
der(rho) = A*rho*der(z)/(V0-z*A);
der(p) = (A*der(z)*gamma*p - (gamma-1)*Av*k*(T-T0))/(V0-z*A);
p=rho*R*T;
F=p*A;
flange_a.f=-F;
flange_b.f=F;
z=flange_b.s-flange_a.s;

```

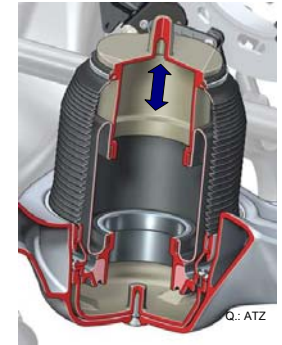
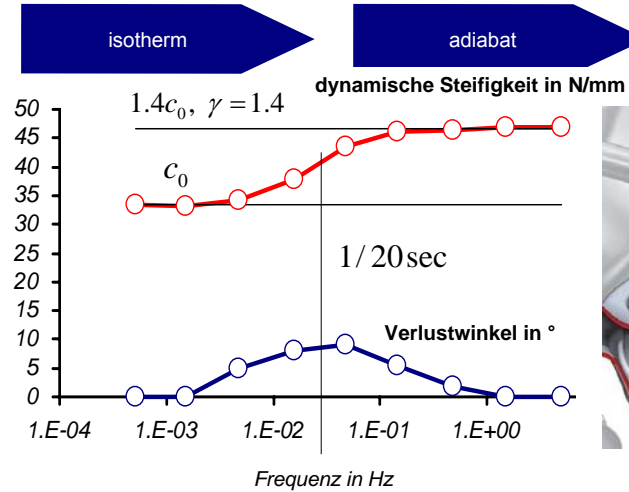
Einfache Handhabung von  
gewöhnlichen Differentialoperatoren

Rechnerübung

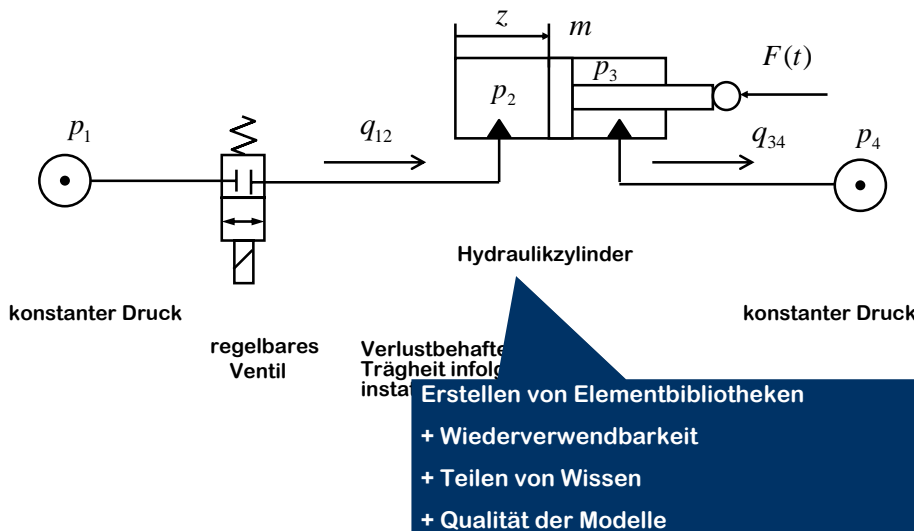
@ 0.01Hz, +- 1 cm



Rechnerübung

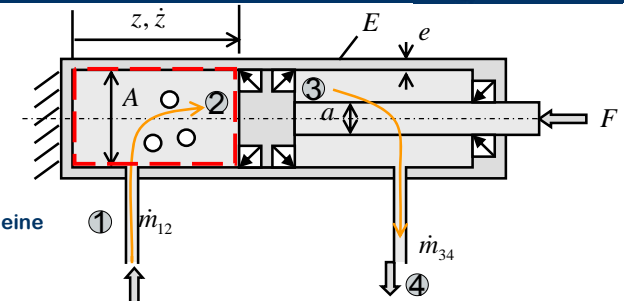


Vorlesung



Vorlesung

Element „Hydraulikzylinder“



- Kontinuitätsgleichung für eine Stromröhre:

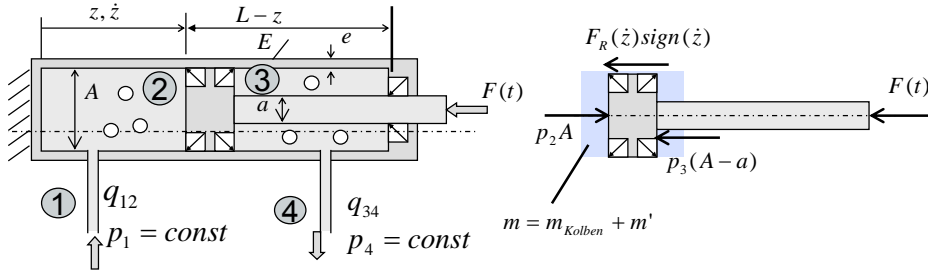
$$\int_0^l \frac{\partial \rho A}{\partial t} ds - \rho_1 u_1 A_1 + \rho_2 u_2 A_2 = 0$$

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

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

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

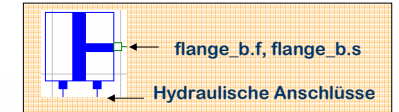
Impulssatz für den Kolben:  $m\ddot{z} = p_2A - p_3(A-a) - p_u a - F(t) - F_R(\dot{z})$

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;
    
```

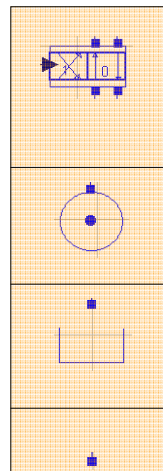
Zuweisung der mechanischen und hydraulischen Anschlüsse

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  $p_1$

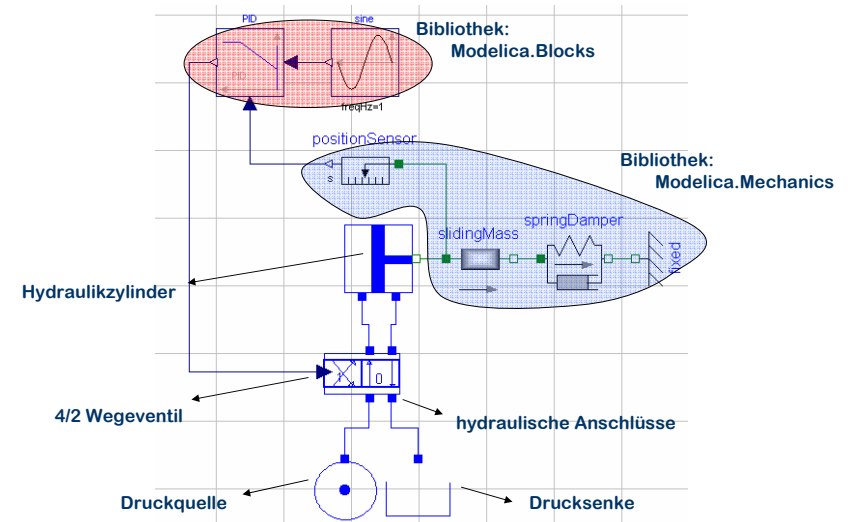
Drucksenke:

- 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!**