

Wintersemester 2015/2016

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Hydraulische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

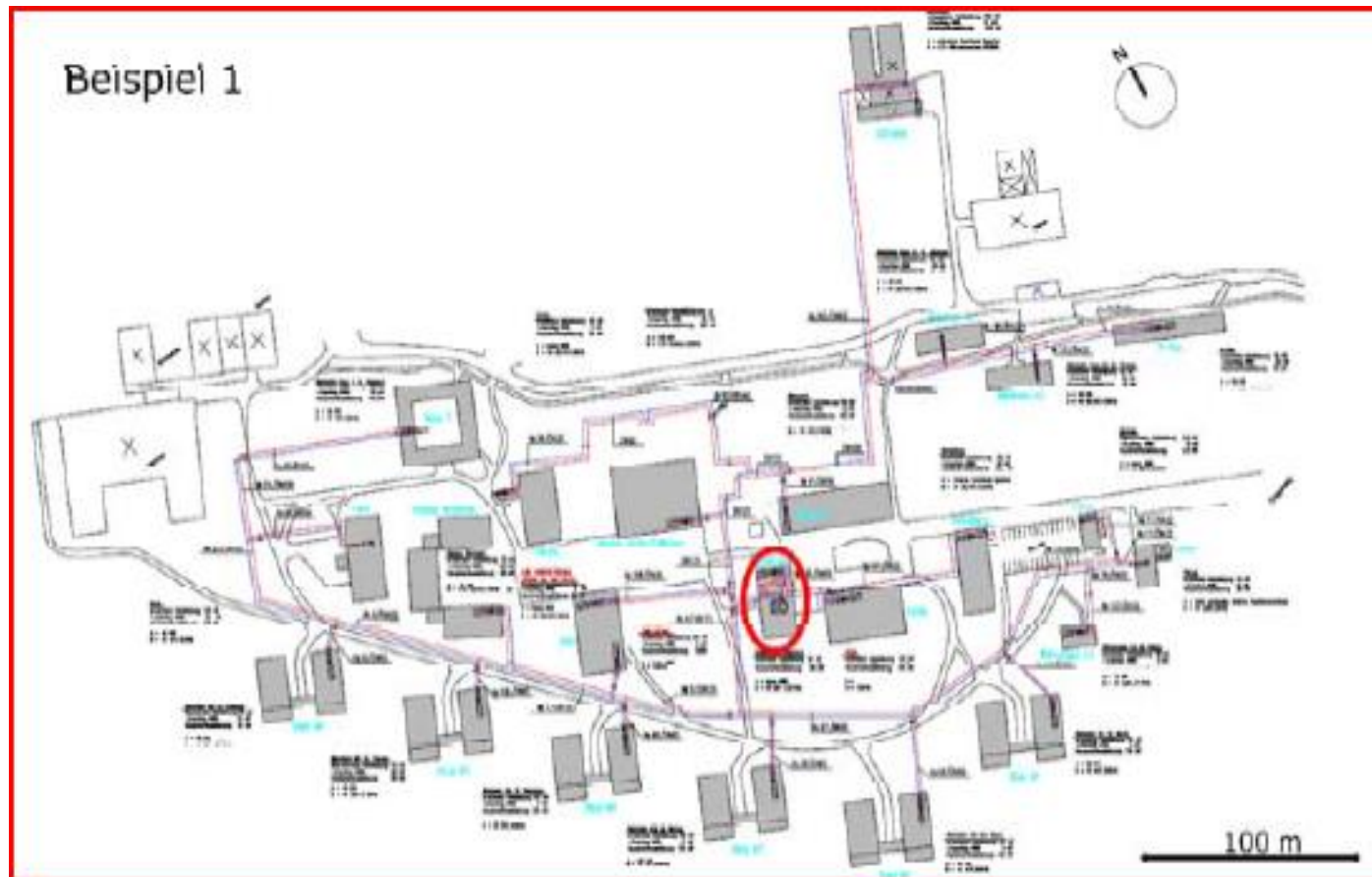


- ▶ Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)
- ▶ Strömungstechnische Grundlagen (Vorlesung 2)
 - Navier-Stokes-Gleichungen, Kontinuitätsgleichung
 - Turbulenzmodellierung
 - Grenzen der verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten
- ▶ Kavitation (Vorlesungen 3,4)
- ▶ **Strömungsmaschinen mit Gehäuse (Entwurf, Kennlinien, Regelung)**
(Vorlesung 5,6,7,**8**)
- ▶ Strömungsmaschinen ohne Gehäuse (Entwurf)
(Vorlesung 9)

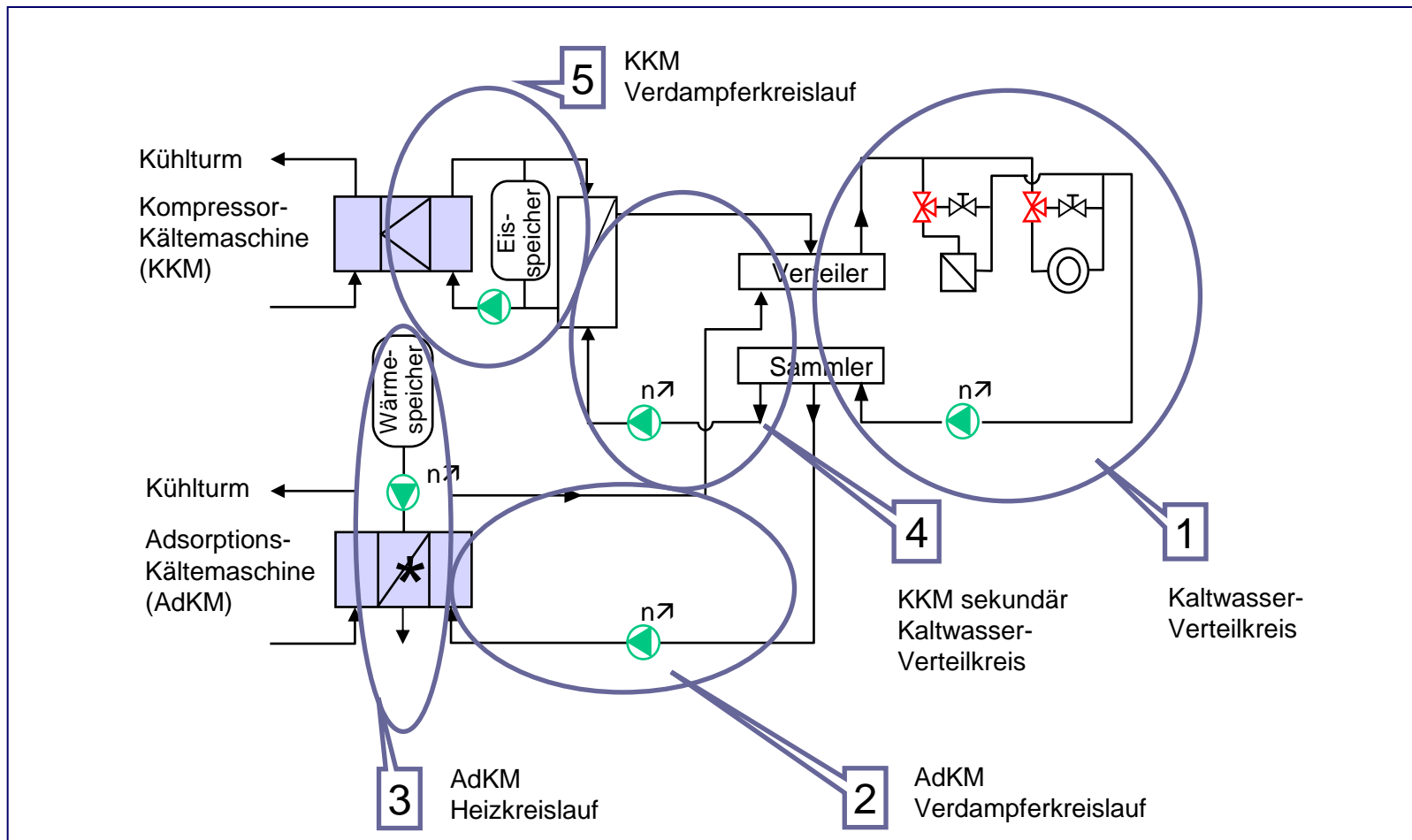
- ▶ Strömungstechnische Optimierung mit numerischen Methoden (Vorlesung 10)
- ▶ Strömungswandler (Vorlesung 11)
- ▶ spezielle Bauformen – Seitenkanalpumpen, Schraubenspindelpumpen (Vorl. 12)
- ▶ spezielle Bauformen – Voith-Schneider-Propeller (Vorlesung 13)
- ▶ Anwendung bionischer Methoden und Herzunterstützungssysteme (Vorl. 14)

- Industrie
- Heizung / Klimatechnik
- Energietechnik
- Wasserversorgung
- Abwasserentsorgung
- Kraftfahrzeuge

Beispiel: Heizkreisläufe eines Mischgebietes



Quelle: WILO SE



- offene Systeme
- geschlossene Systeme



Municipal water management.

Quelle: WILO SE

- | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|--|--|--|---|---|--|
|  <p>1
Wilo-EMU KM</p> |  <p>2
Wilo-ASP</p> |  <p>3
Wilo-Vero Norm-NPG</p> |  <p>4
Wilo-Comfort COR-6 MVI/C</p> |  <p>5
Wilo-EMUPORT</p> |  <p>6
Wilo-DrainLift WS</p> |  <p>7
Wilo-EMU FA 08.52</p> |  <p>8
Wilo-EMU Megaprop</p> |  <p>9
Wilo-EMU RZ</p> |  <p>10
Wilo-EMU FA</p> |  <p>11
Wilo-EMU KP</p> |  <p>12
Wilo-CC-System</p> |
|--|---|---|---|---|---|--|--|--|---|---|--|

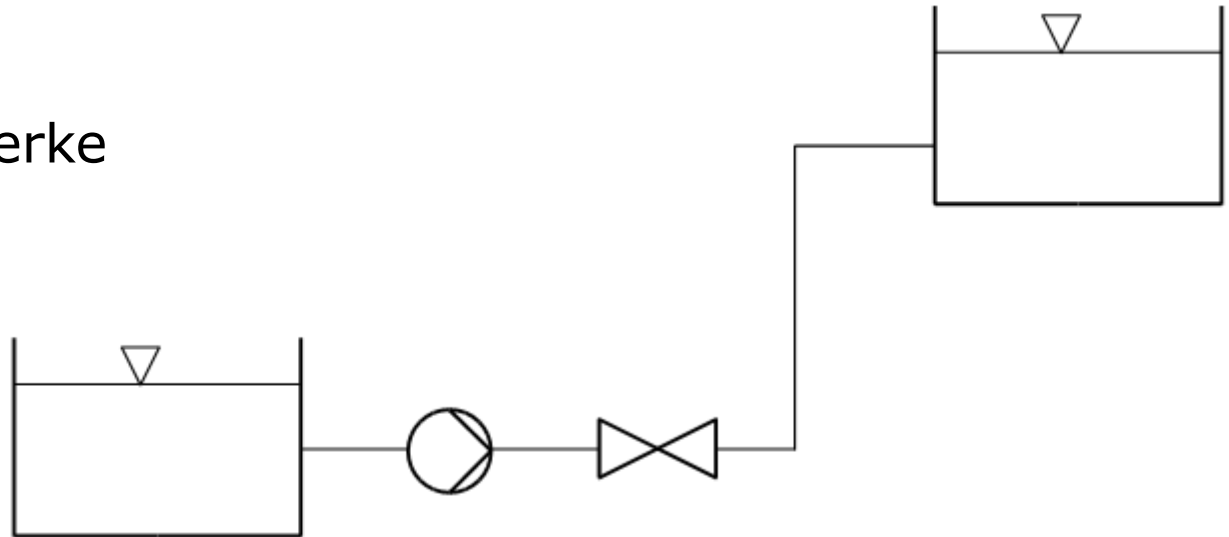
Wasserversorgung

Abwasserentsorgung

Bewässerung

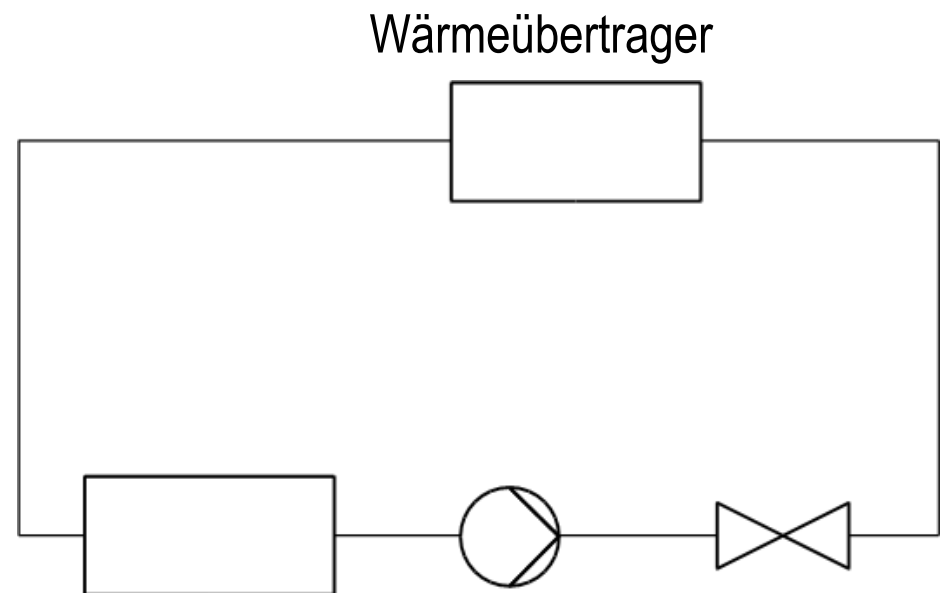
Substanzzuführung

Hochwasserpumpwerke

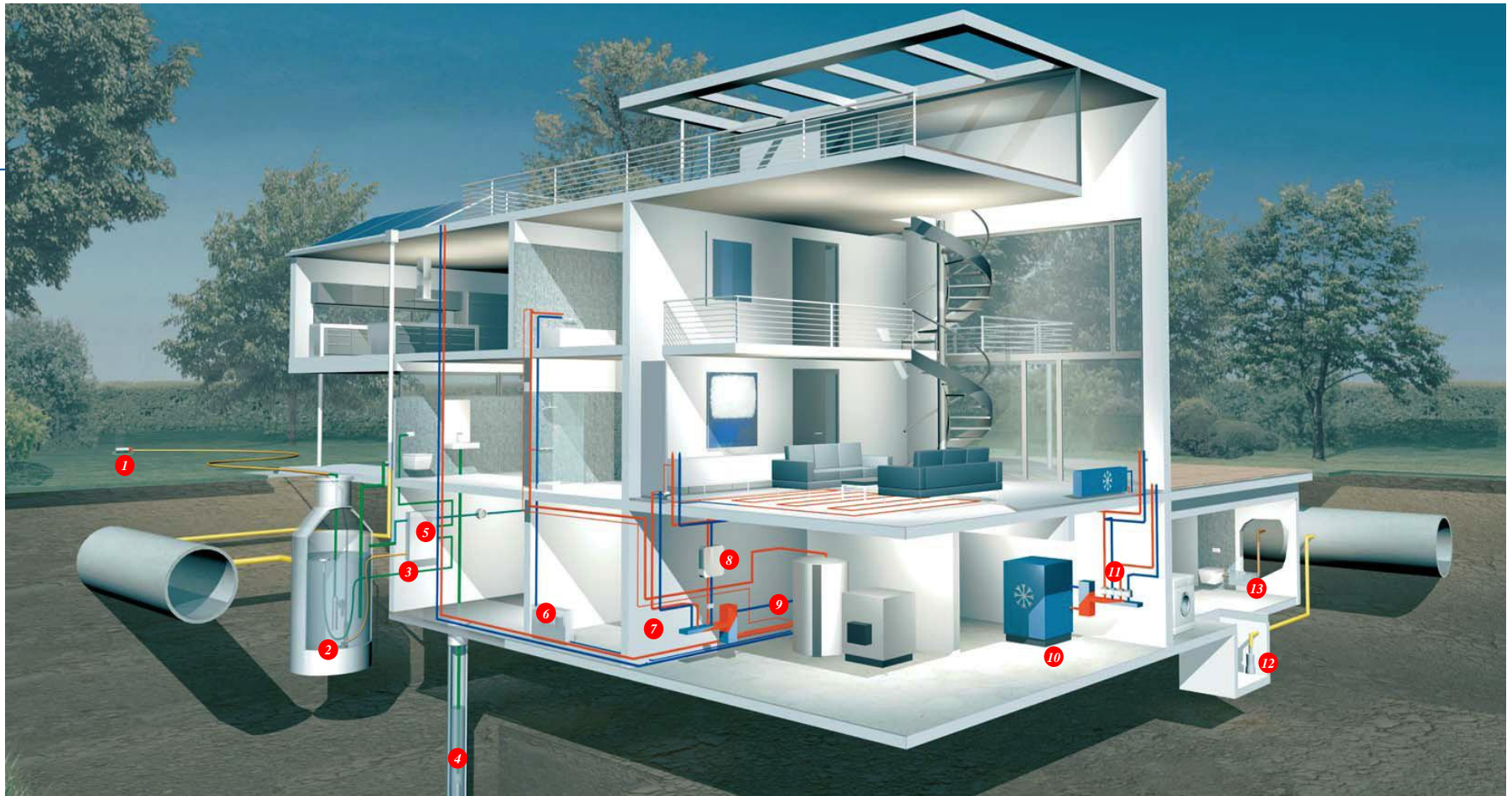


$$H = H_{\text{Stat}} + H_{\text{Verluste}}$$

Blutkreislauf
Heizkreislauf
Kühlkreislauf



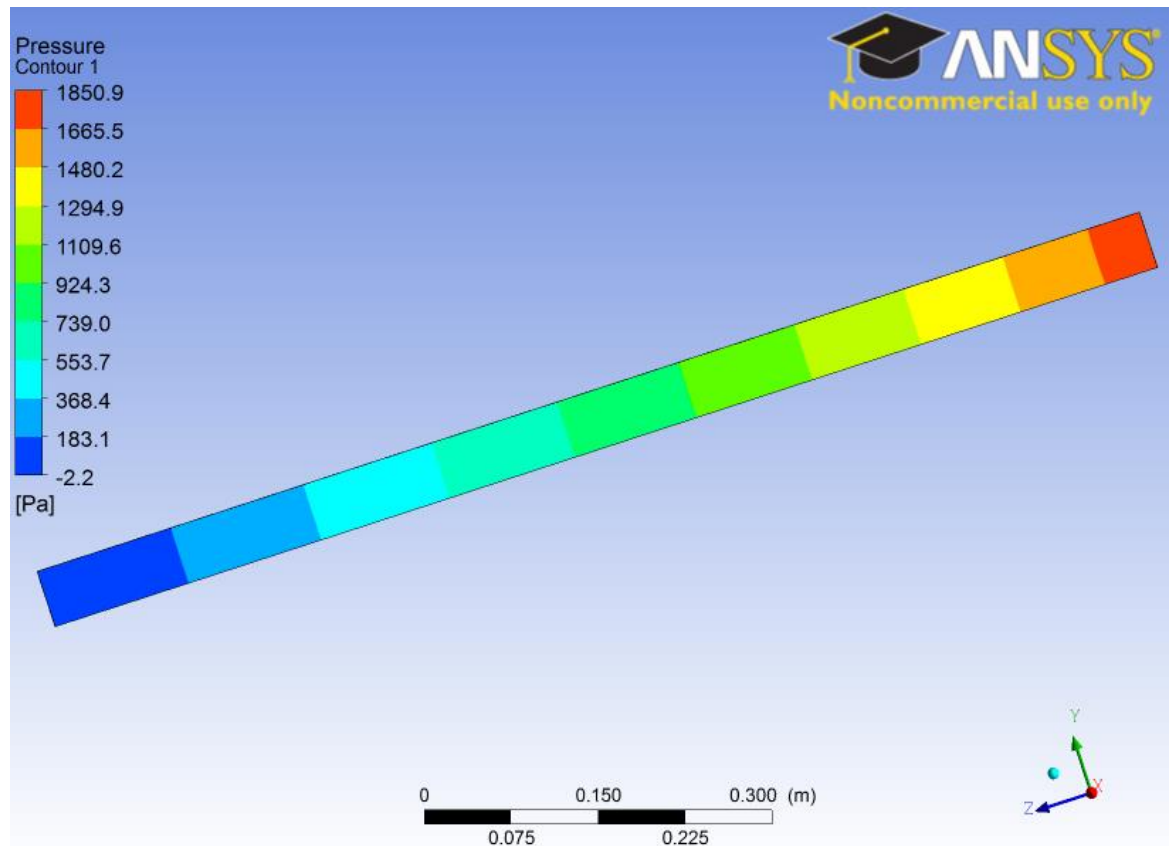
$$H = H_{\text{Verluste}}$$



Building service.

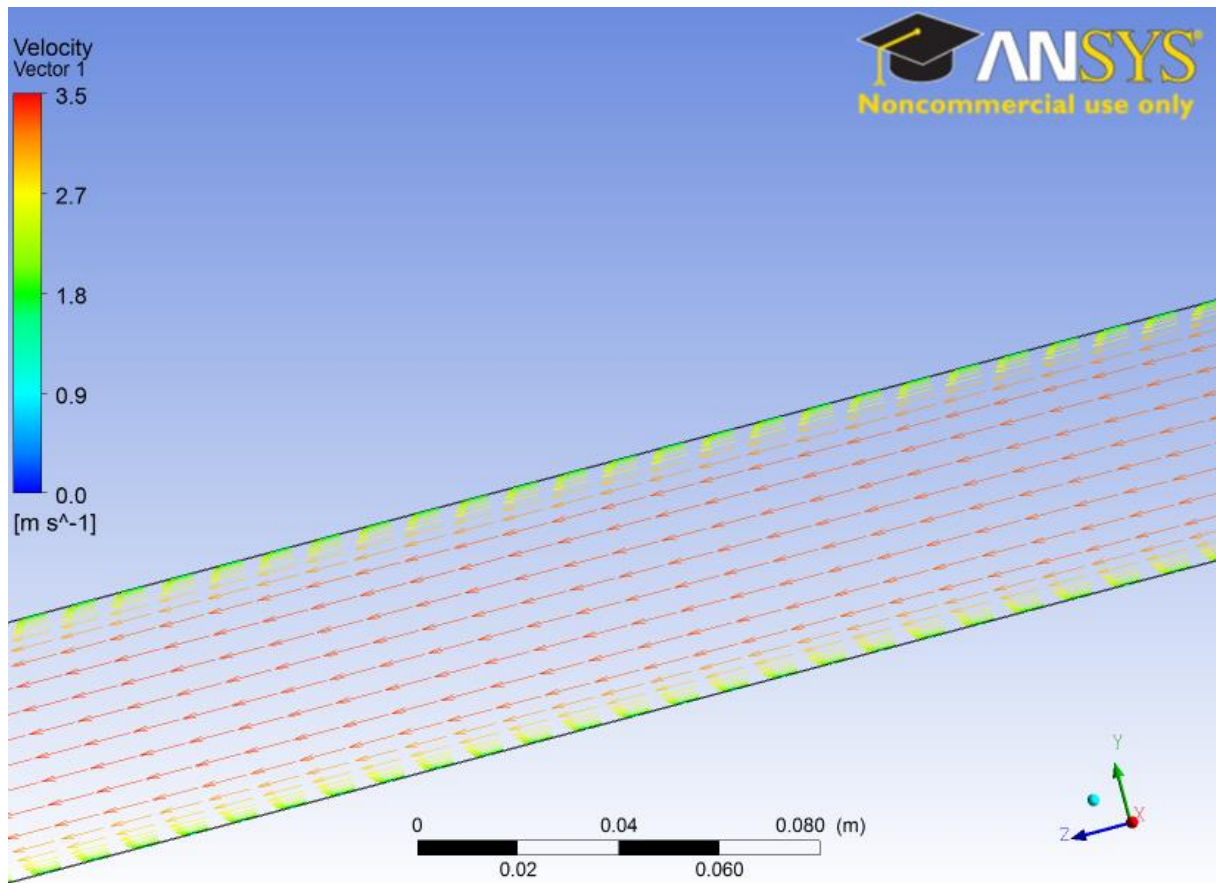
Quelle: WILO SE

- **Reibungsverluste** (abhängig von Durchmesser und Länge der Rohrleitung, Strömungsgeschwindigkeit, Reibungszahl)
- **Druckverlust in Einbauten** (Krümmer, Drosseln, Klappen, Abzweigungen, Filter)
- **Stoßverlust durch plötzliche Querschnittsänderungen**

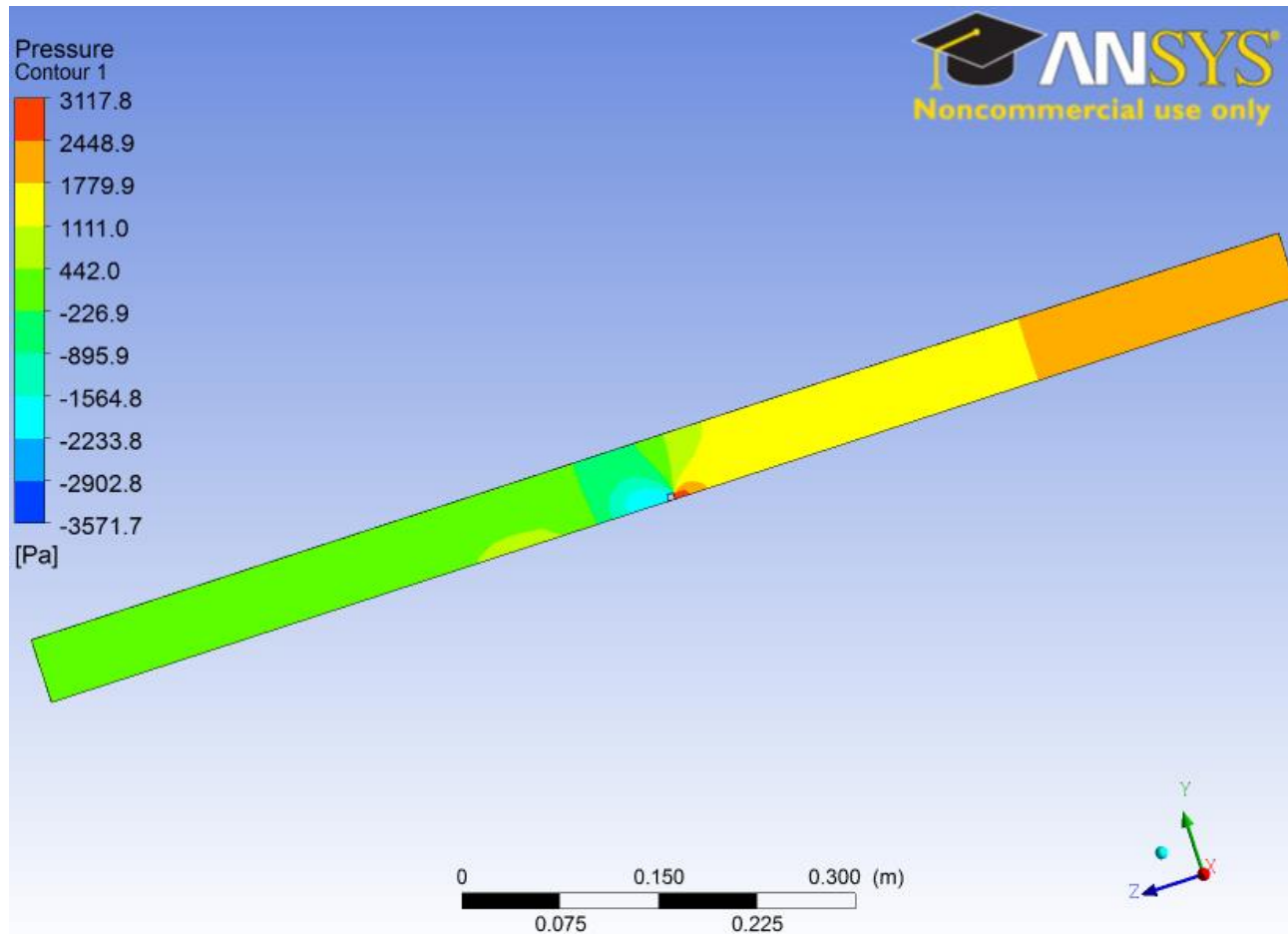


statische Druck
ohne Schieber $dp = 1826.2 \text{ Pa}$

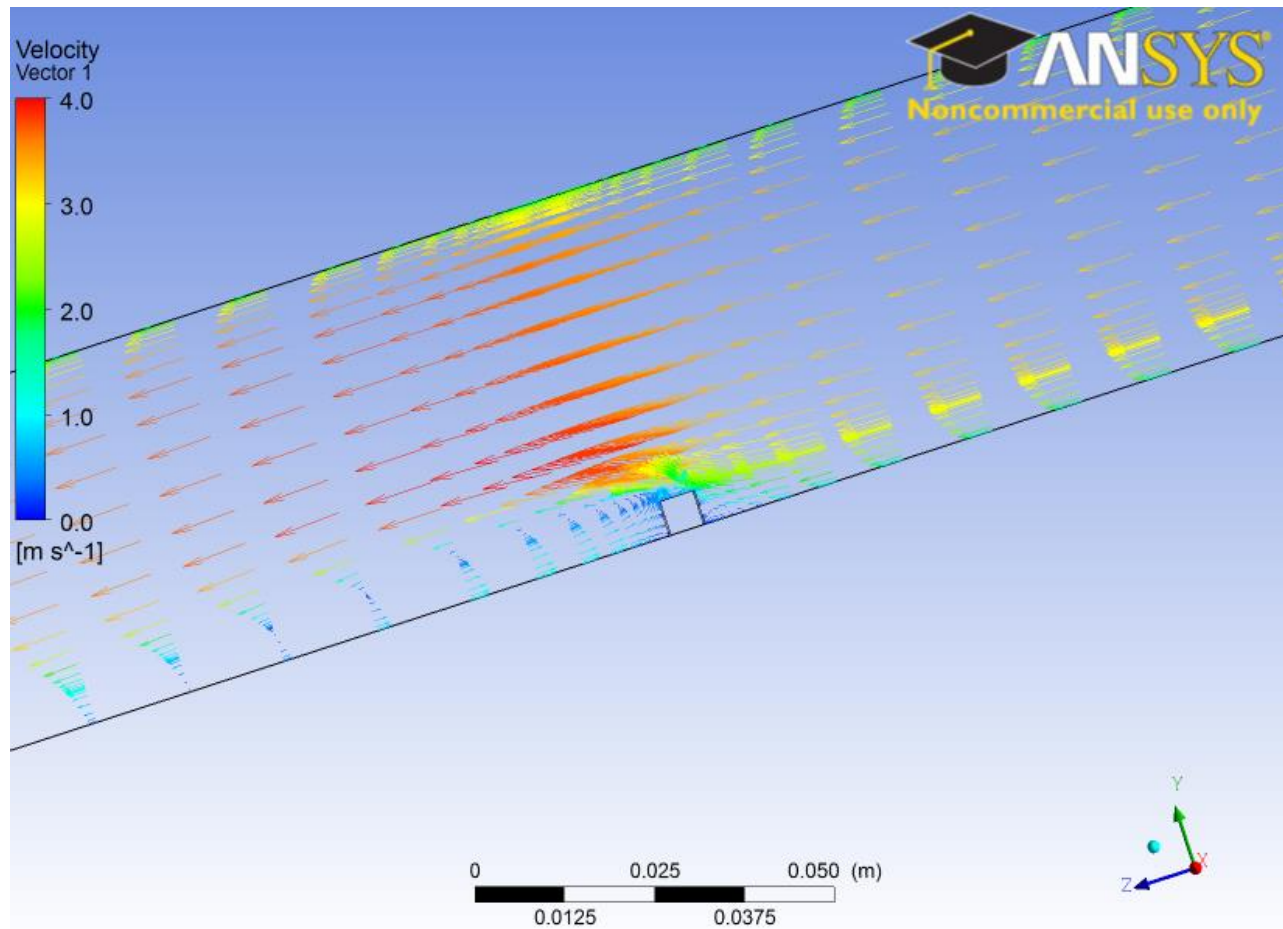
$L = 1 \text{ m}$; $h = 5 \text{ cm}$; $c = 3 \text{ m/s}$ für alle
Rechnungen



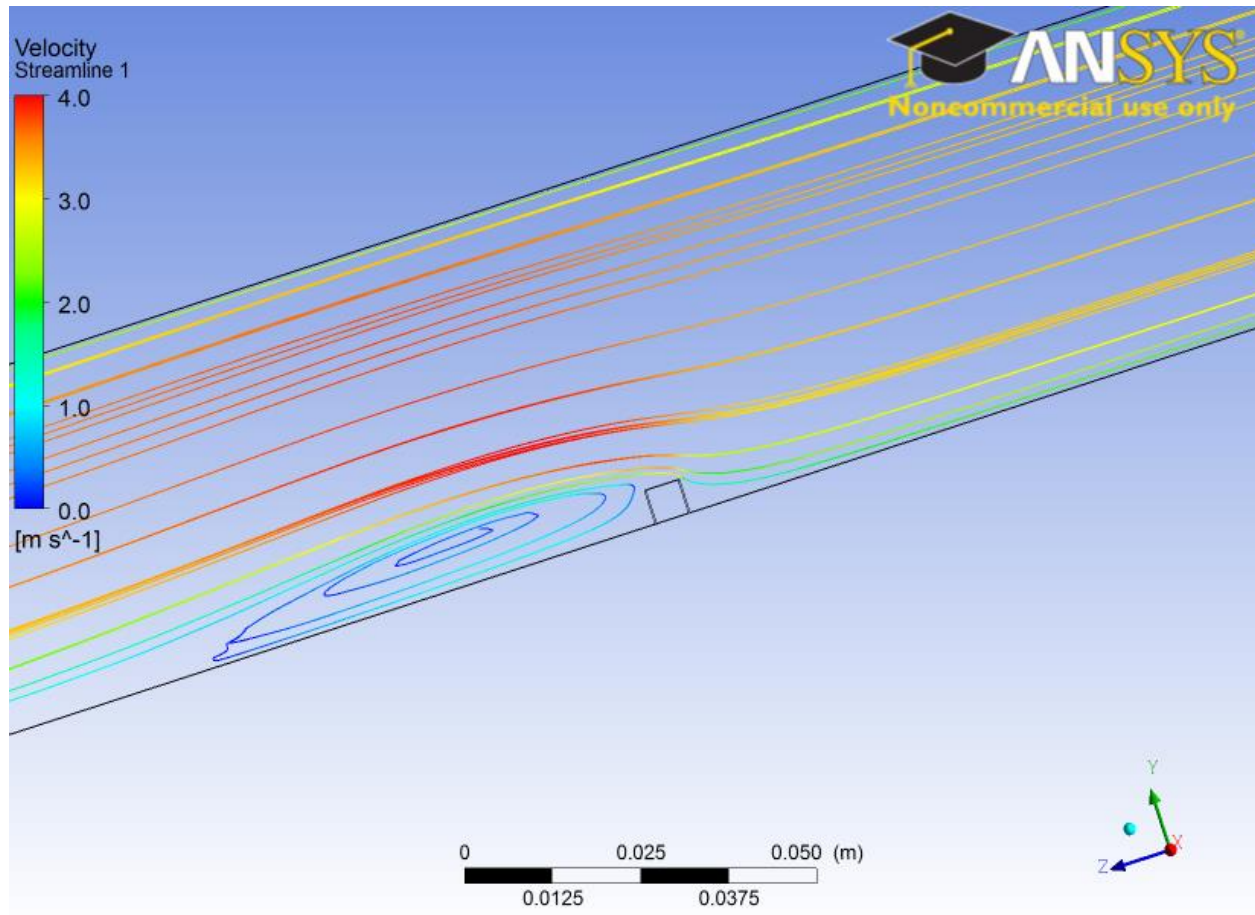
Vektoren ohne Schieber



statische Druck
mit 10%, d.h. 5mm Schieber $dp = 2303.7 \text{ Pa}$

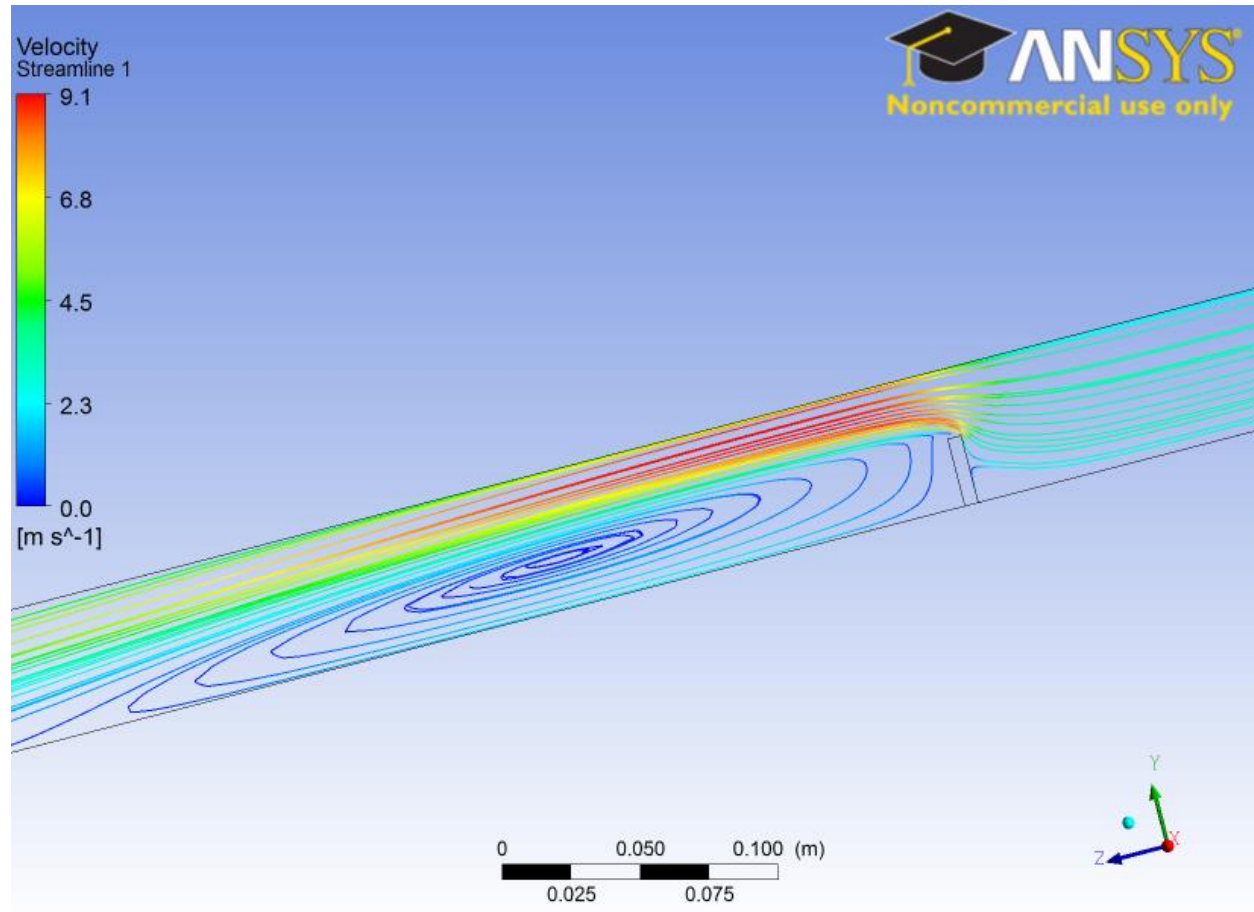


Vektoren
mit 10%, d.h. 5mm Schieber $dp = 2303.7 \text{ Pa}$

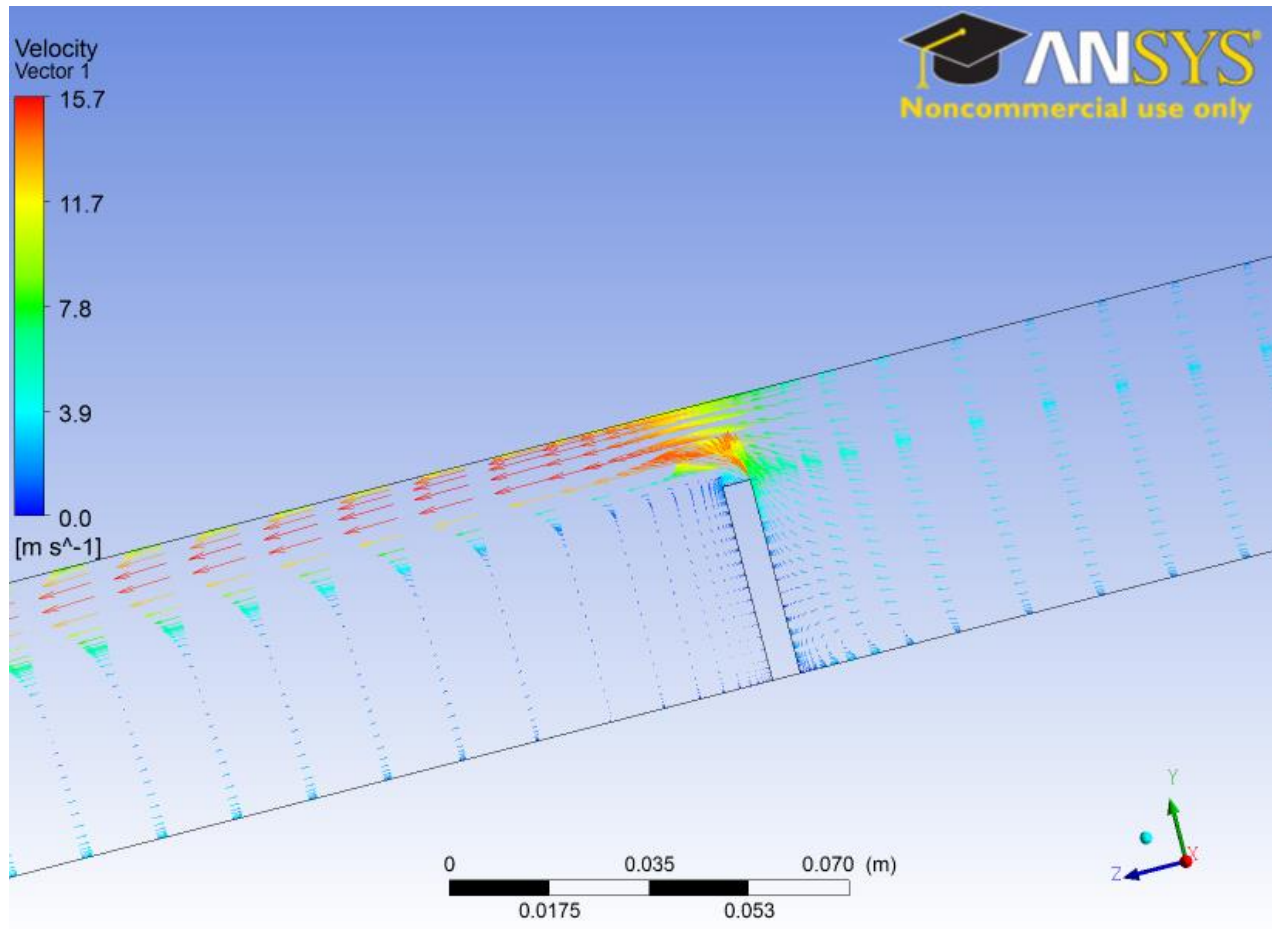


Stromlinien

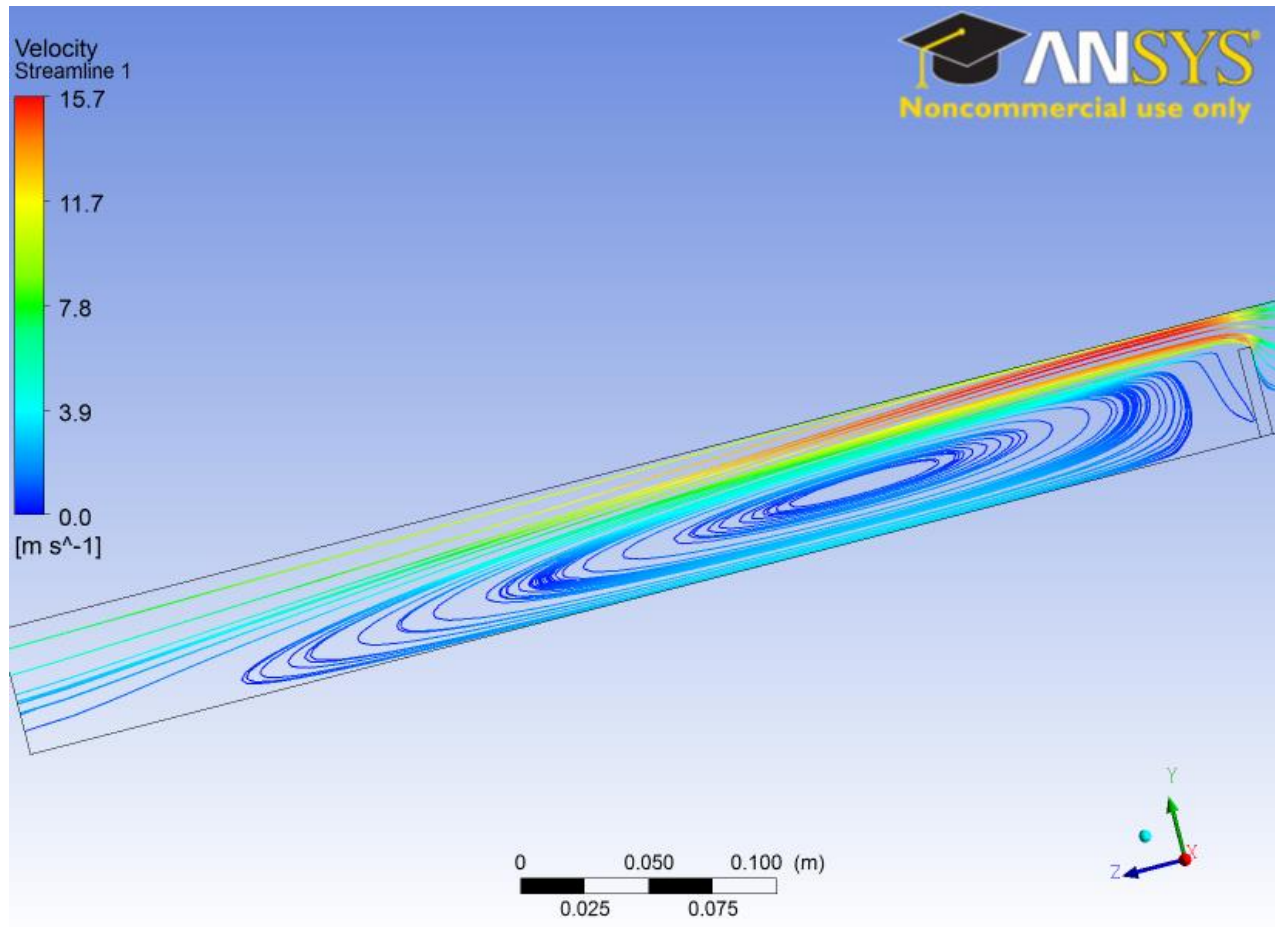
Mit 10%, d.h. 5mm Schieber $dp = 2303.7 \text{ Pa}$



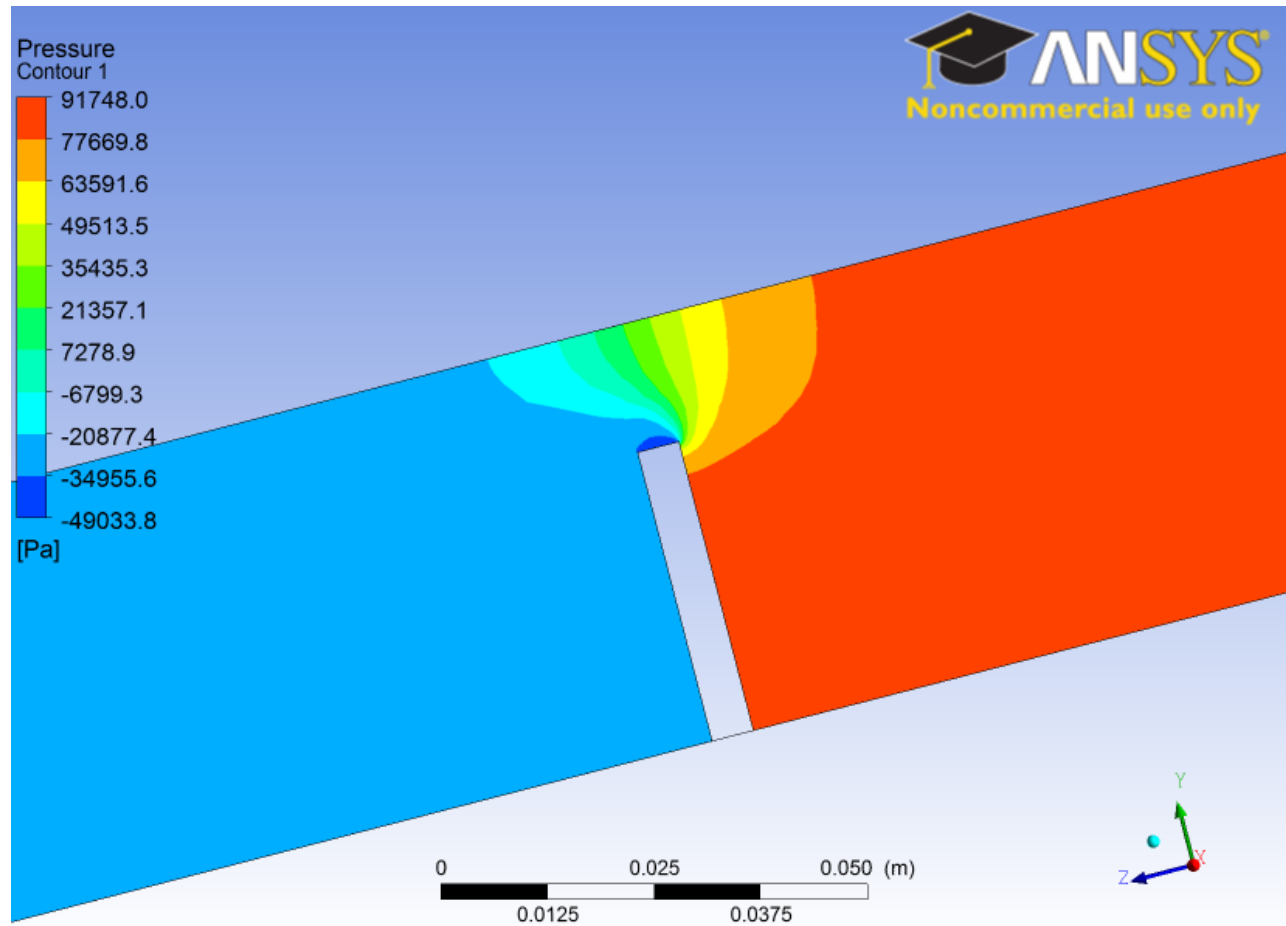
Stromlinien
mit 50%, d.h. 25mm Schieber $dP = 22568.8 \text{ Pa}$



statische Druck
mit 70%, d.h. 35mm Schieber $dp = 87852.2 \text{ Pa}$



Stromlinien
mit 70%, d.h. 35mm Schieber $dp = 87852.2$ Pa



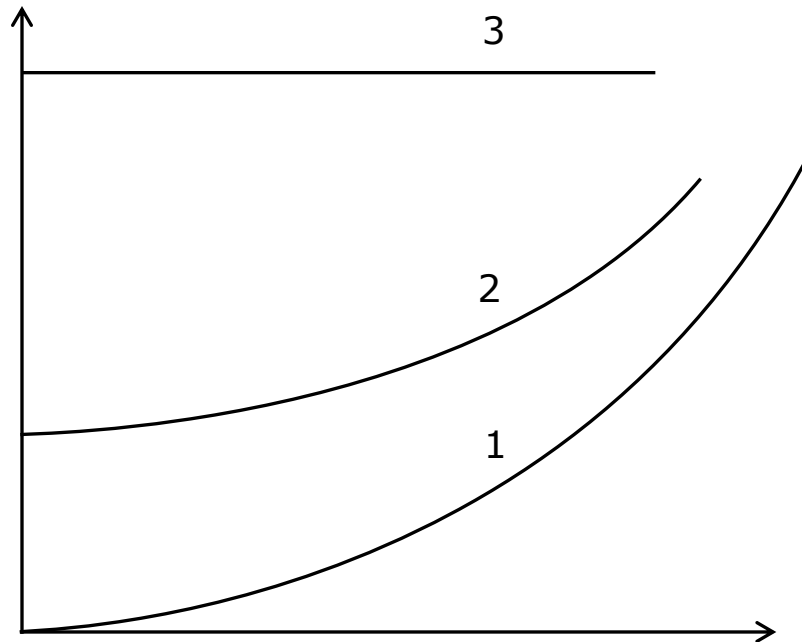
statische Druck
mit 70%, d.h. 35mm Schieber $dp = 87852.2 \text{ Pa}$

$$\Delta p_v = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{D_i} \frac{\rho}{2} \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i^2} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \zeta_j \frac{\rho}{2} \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_j^2} \right)^2$$

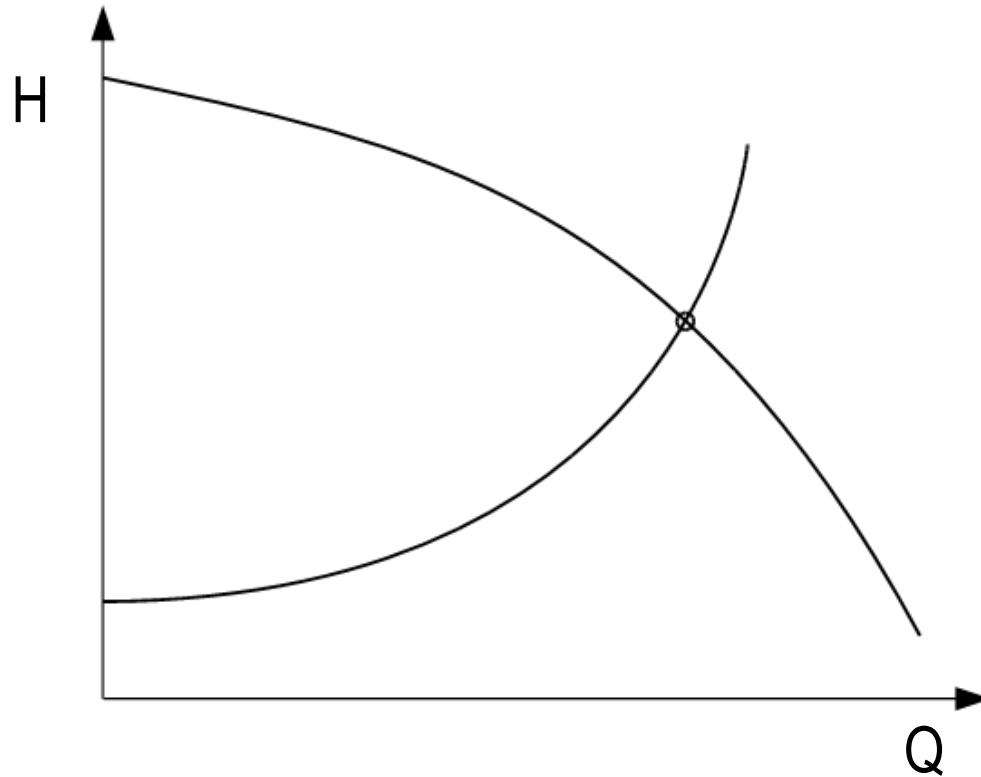
λ - Reibkoeffizient

ζ - Verlustbeiwert

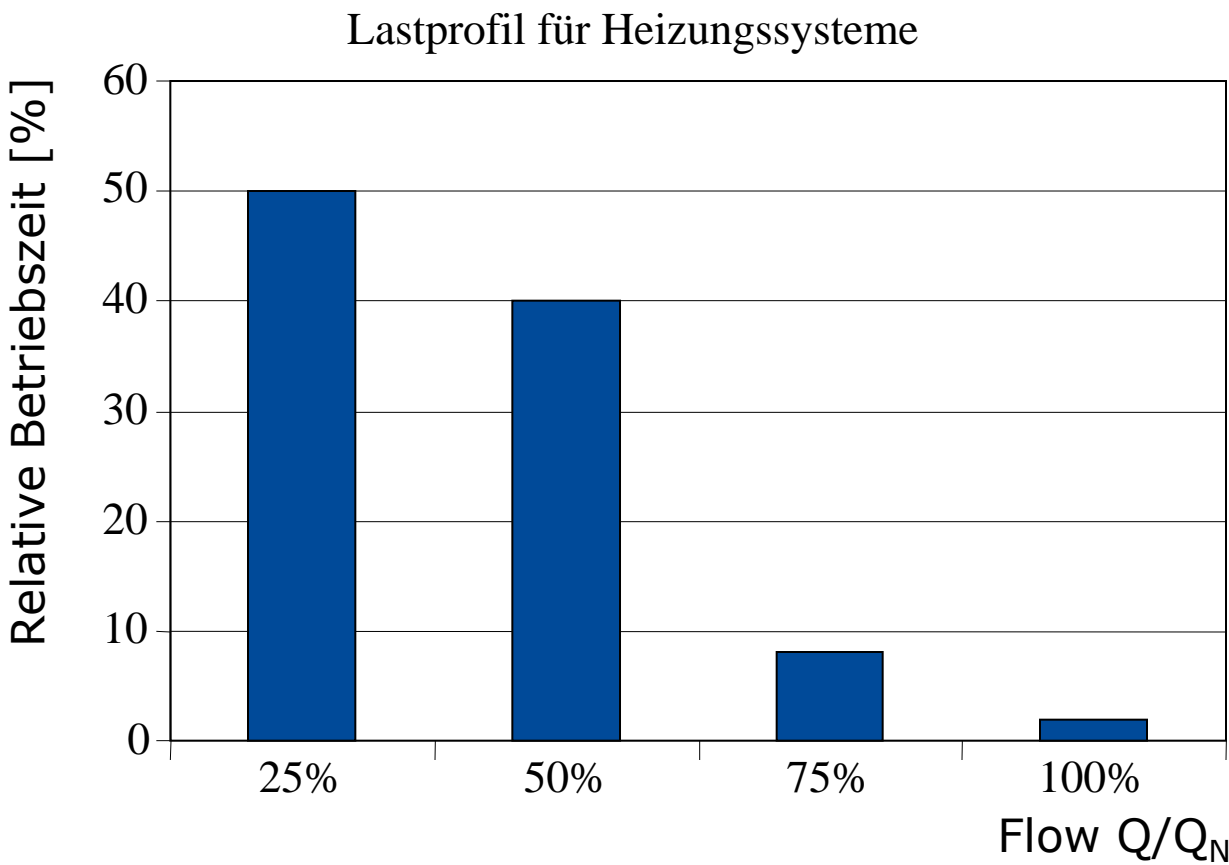
$$H_{\text{Verluste}} = \frac{\Delta p_v}{\rho \cdot g}$$



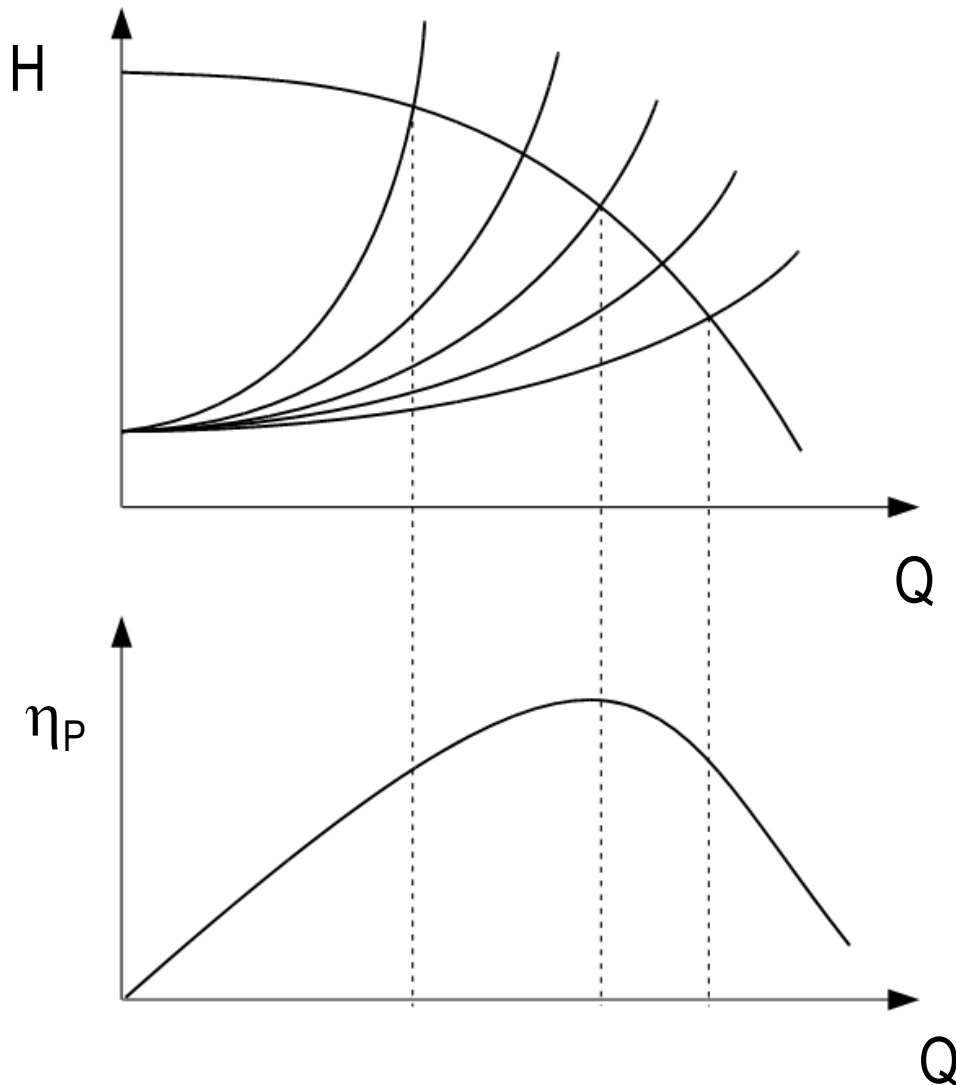
- 1- Förderhöhe: nur dynamischer Anteil
- 2- Förderhöhe: statischer und dynamischer Anteil
- 3- Förderhöhe: nur statischer Anteil



europaweit standardisiertes Lastprofil für Heizungsanlagen in Gebäuden



Dynamischer Anlagenbedarf





- Drehzahlregelung
- Start – Stop – Ansteuerung der Pumpe
- Drosselregelung
- Bypass- Regelung

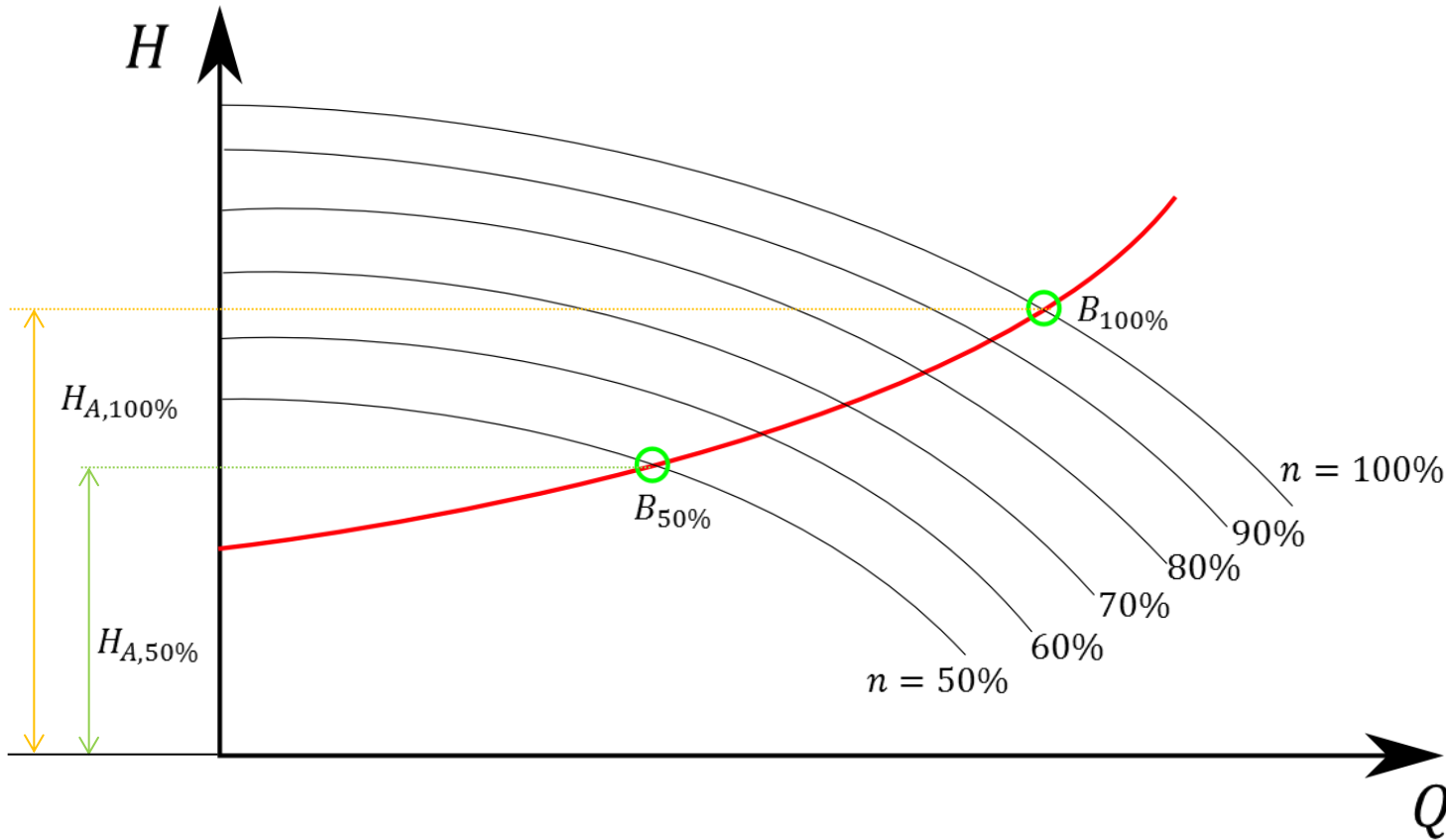
- Reihenschaltung von Pumpen
- Parallelschaltung von Pumpen

- – Kennlinien einer Pumpe bei verschiedenen Drehzahlen sind über Ähnlichkeits-/Affinitätsgesetze miteinander verbunden
- Affinitätsgesetze:

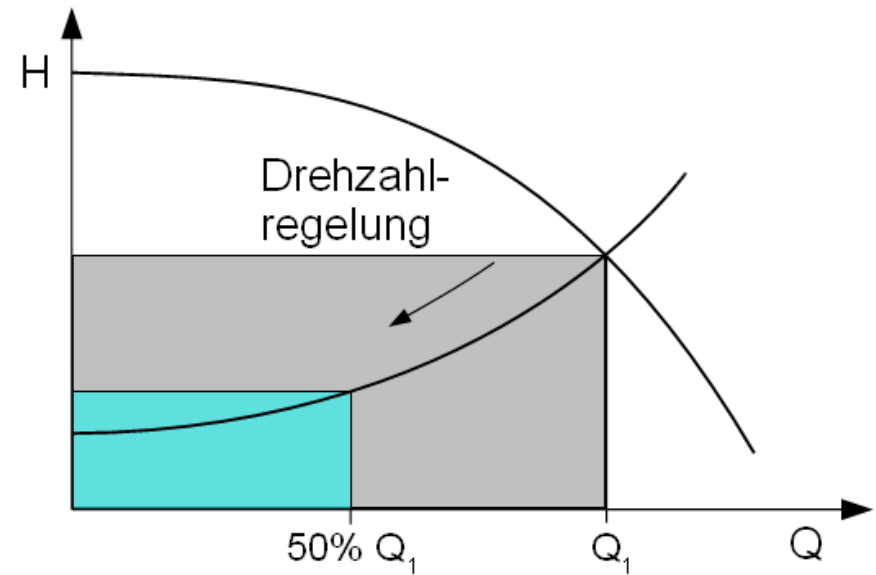
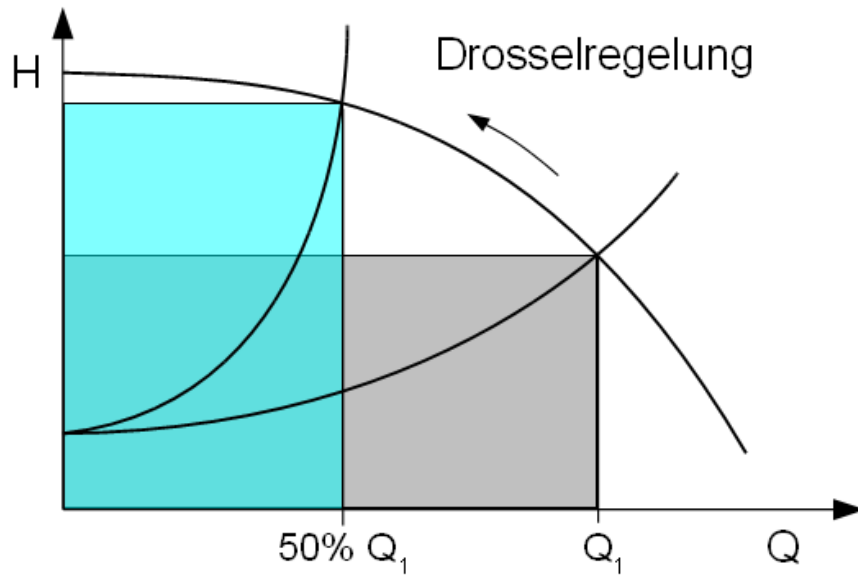
- Förderstrom:
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Förderhöhe:
$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

- Leistung:
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3, \text{ wenn: } \eta_i(n) = \text{const.}$$



Gegenüberstellung Drossel- und Drehzahlregelung

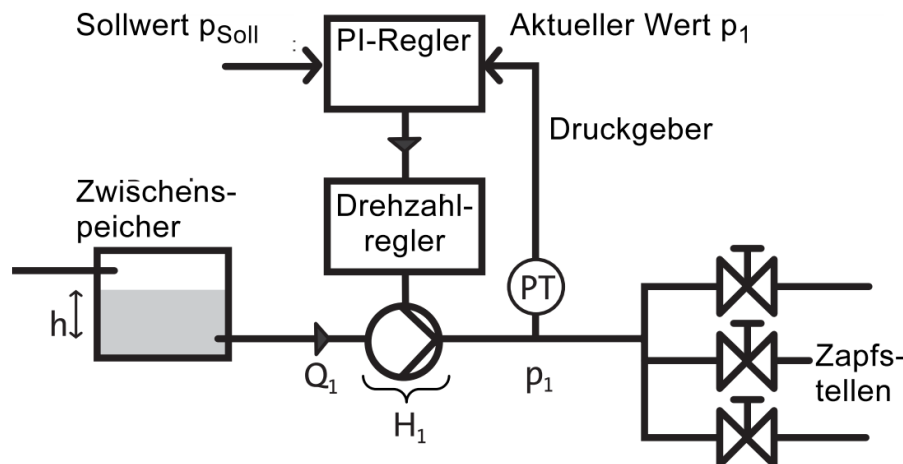


Ziel: 50% von Q_1

- Möglichkeiten der Drehzahlregelung in Anlagen mit PI-Regler und Sensormesssystem anhand der Anlagenkennwerte:
 - $p = const.$ – Regelung (Konstantdruckregelung)
 - ΔT – Regelung (konstante Temperaturregelung)
 - Δp – Regelung
 1. $\Delta p - c$ (konstanter Differenzdruck)
 2. $\Delta p - cv$ (förderstromgeführte Differenzdruck)

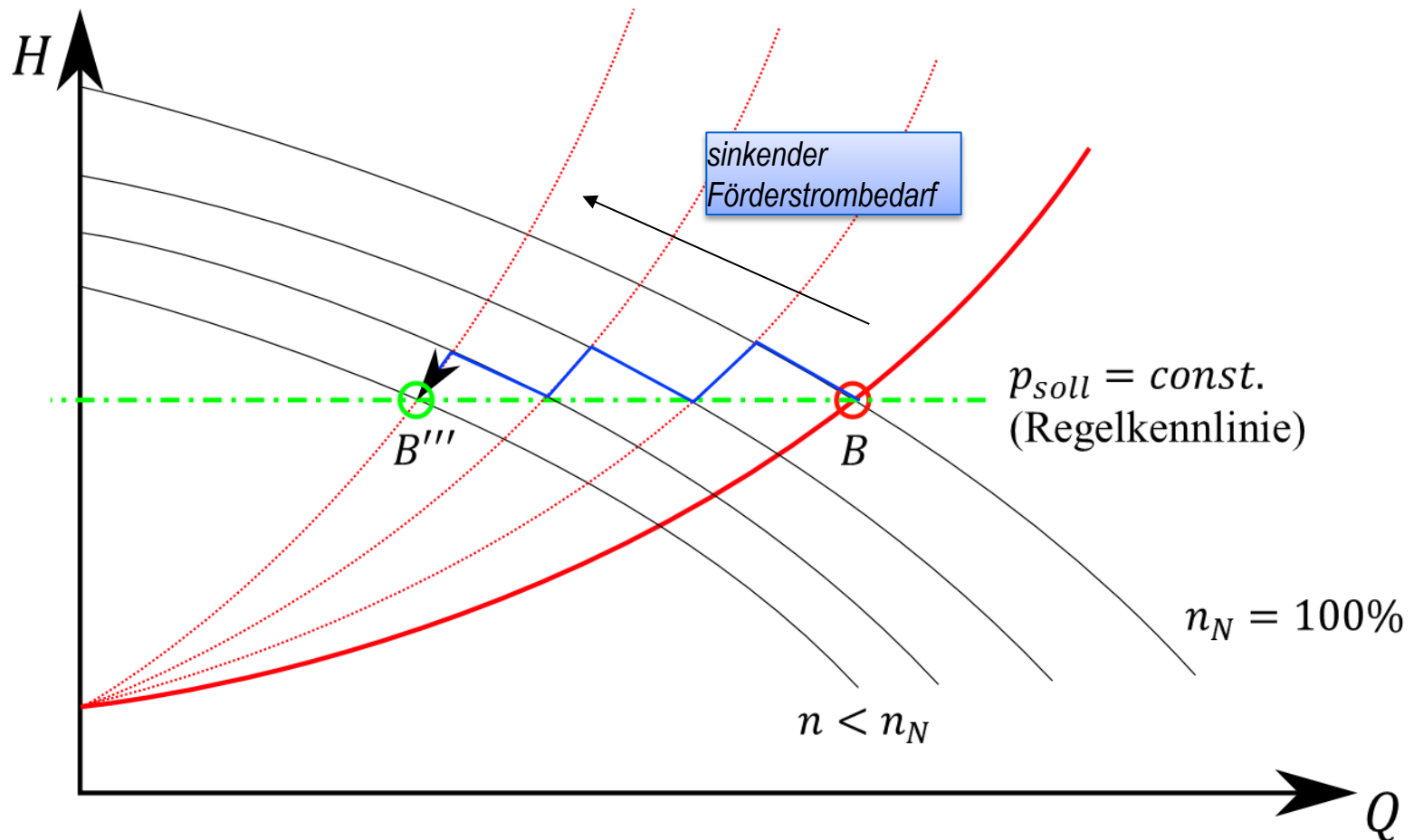
- **Konstantdruckregelung**

- **Beispiel:** Wasserversorgung von Haushalten
- **Problem:** schwankender Bedarf an Leitungswasser führt zu Veränderungen der Anlagenkennlinie gemäß des erforderlichen Förderstroms
- **Anforderung:** $p = const.$ in der Druckleitung



Quelle: Grundfos E-Pumpen -
Pumpen mit eingebautem
Frequenzumrichter 50/60 Hz,
www.grundfos.com

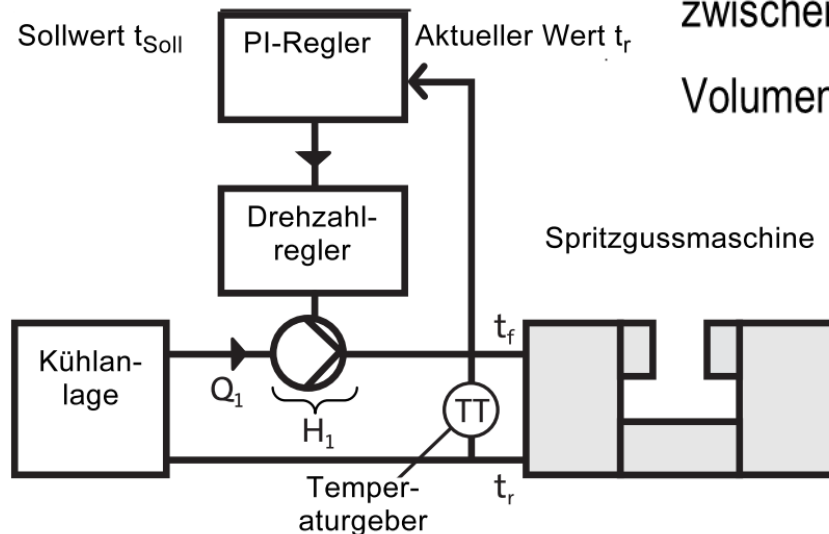
● Konstantdruckregelung - Ablauf



- *konstante Temperaturregelung*

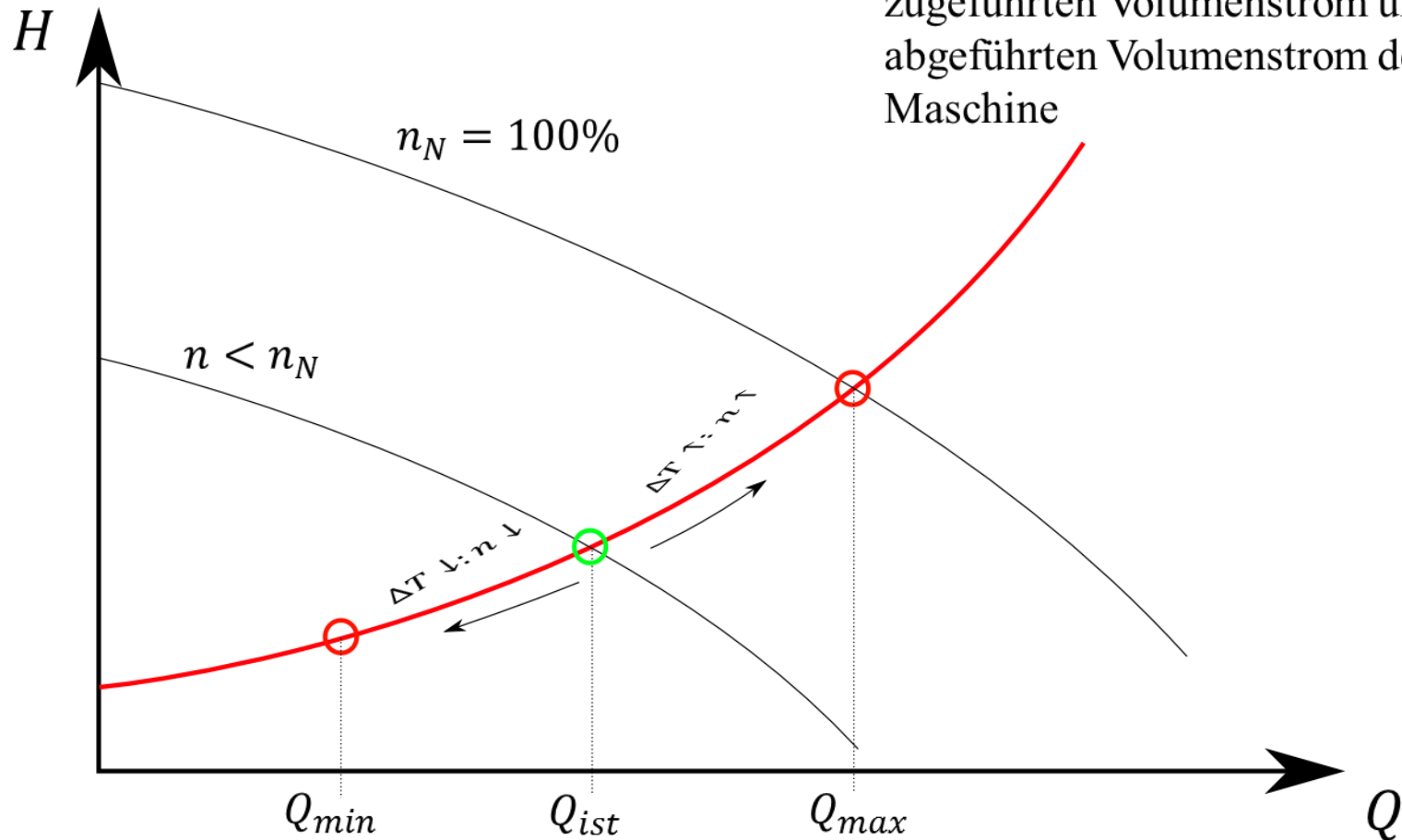
- **Beispiel:** konstante Kühlung von Werkzeugmaschinen
- **Problem:** für die Fertigung qualitativ hochwertiger Teile wird eine konstante Kühlung des verwendeten Werkzeugs benötigt
- **Anforderung:** $\Delta T = T_{Q_i} - T_{Q_a} = \text{const.}$ Temperaturdifferenz

zwischen zugeführten Volumenstrom und abgeführten Volumenstrom der Maschine



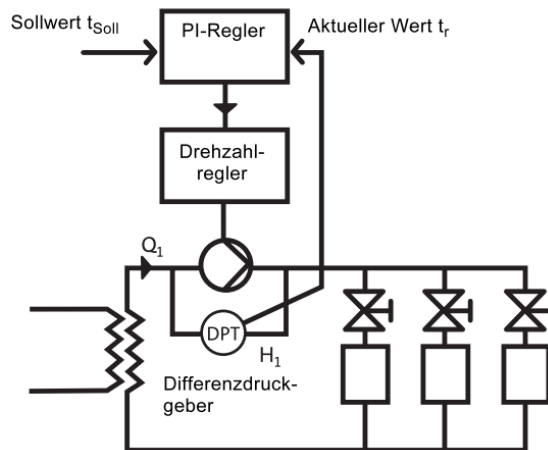
Quelle: Grundfos E-Pumpen -
Pumpen mit eingebautem
Frequenzumrichter 50/60 Hz,
www.grundfos.com

- konstante Temperaturregelung – Ablauf

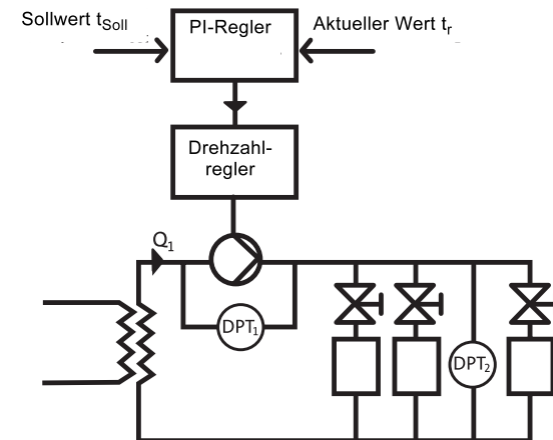


● Differenzdruckregelung

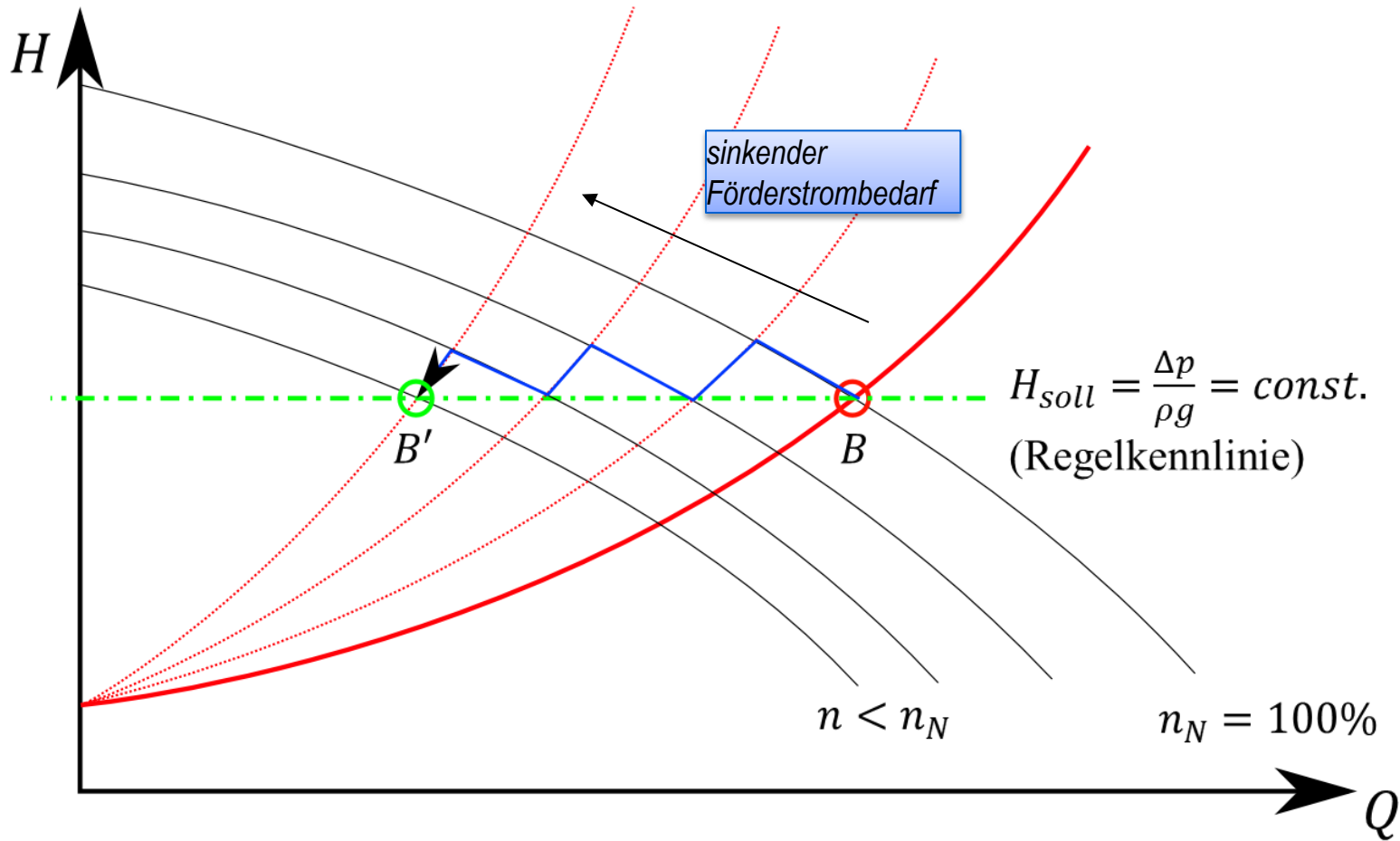
- **Beispiel:** Umwälzsysteme (geschlossene Anlagen)
bspw.: Heizungsanlage
- **Problem:** Förderstromregelung entsprechend des Wärmebedarfs der angeschlossenen Verbraucher
- **Regelung:** $\Delta p - c$ oder $\Delta p - cv$ - Regelung



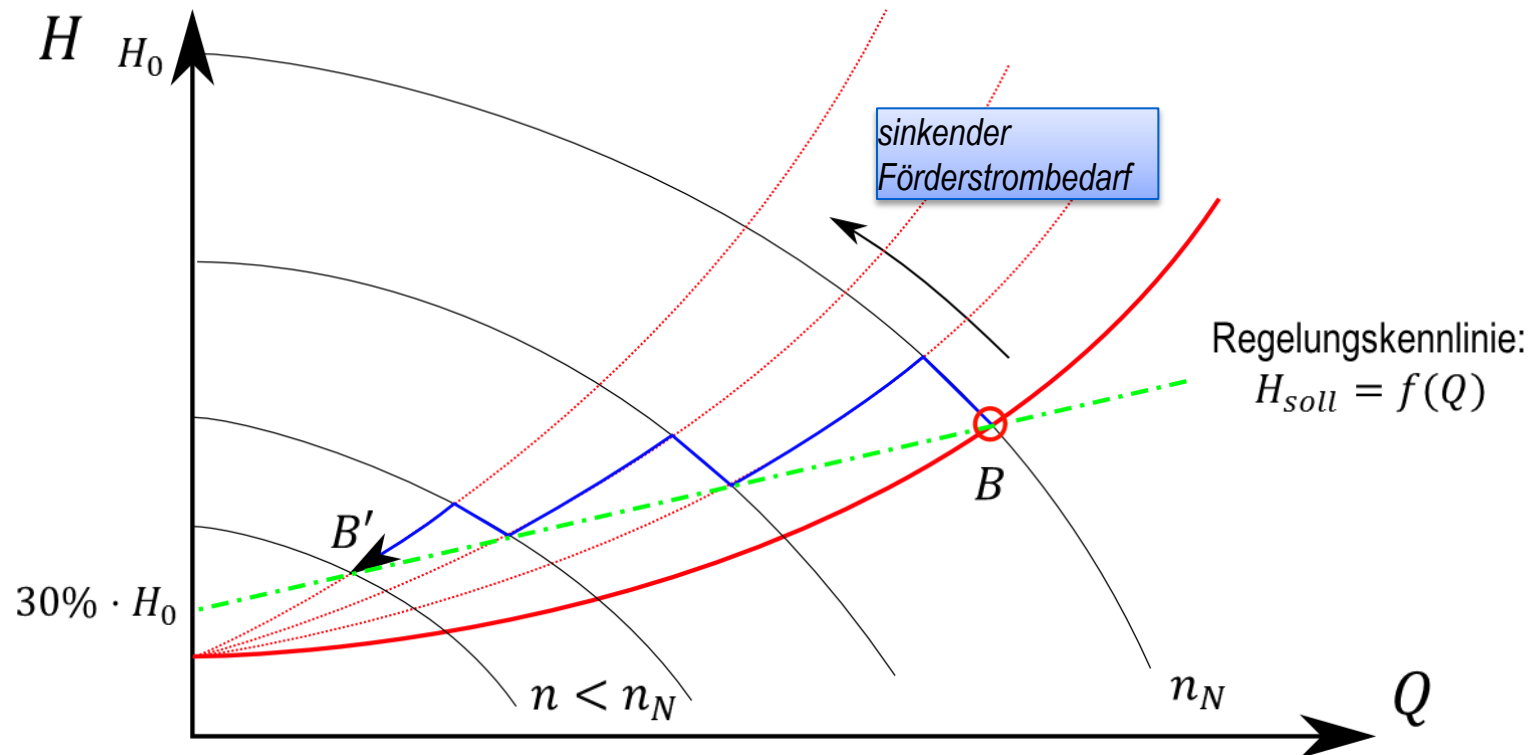
Quelle: Grundfos E-Pumpen -
Pumpen mit eingebautem
Frequenzumrichter 50/60 Hz,
www.grundfos.com



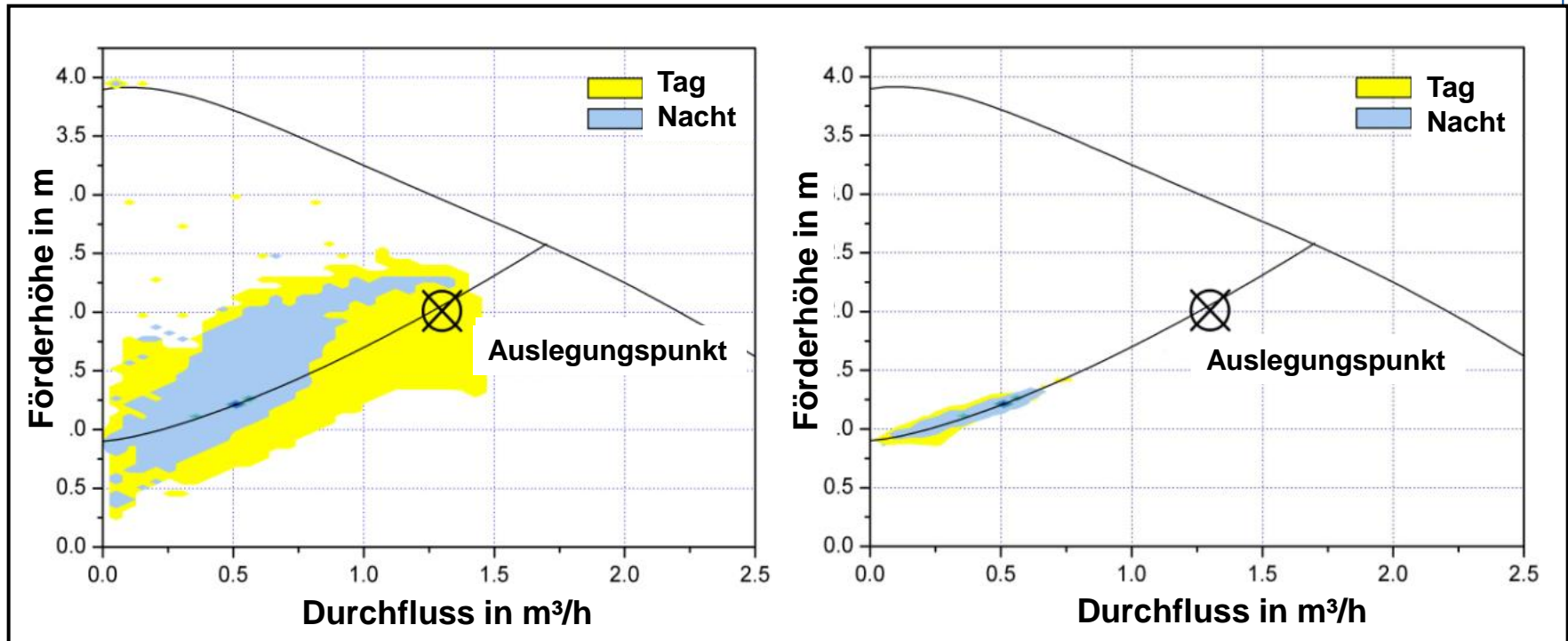
● $\Delta p - c$ (konstante Differenzdruckregelung) - Ablauf



- $\Delta p - cv$ (Volumenstromgeführte Differenzdruckregelung oder Proportionaldruckregelung)
 - **Idee:** Druckverlust steigt proportional zum Quadrat des Förderstroms
 - **Regelung:** Soll-Förderhöhe steigt/sinkt in Abhängigkeit des Förderstroms



Analyse der Betriebspunkte der Heizungsumwälzpumpe in einem Heizungssystem



Mögliche Messgrößen – direkte Erfassung

- Druck p oder Differenzdruck dp
- Volumenstrom

Mögliche Messgrößen – direkte Erfassung

- Druck p oder Differenzdruck dp – möglich, aber teuer
- Volumenstrom – möglich, aber teuer

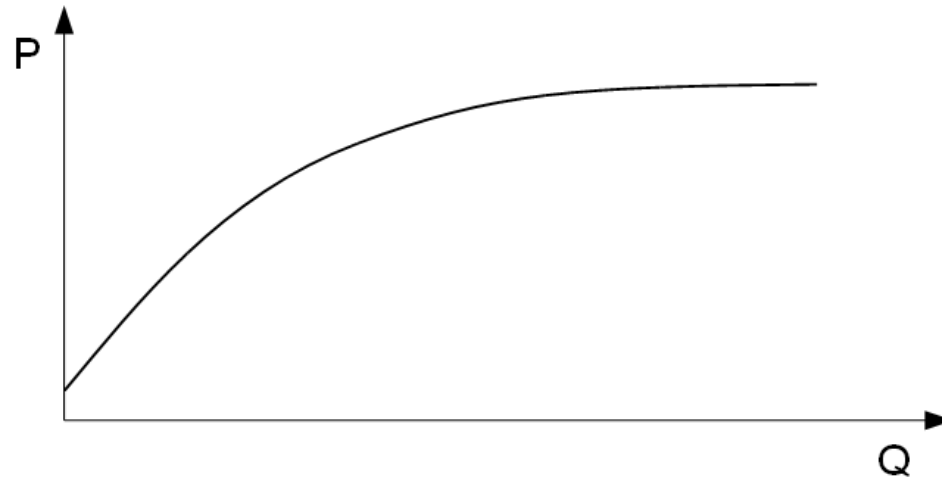
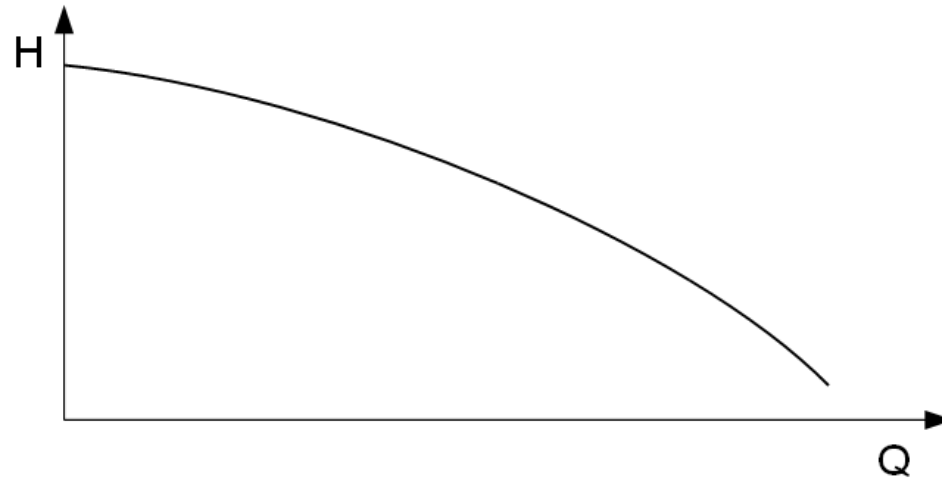
Ziel für „Standardpumpen“ ist: Kosten für die Messtechnik der Erfassung der benötigten Größen, die für die Regelung benötigt werden betragen max. 5% der Produktkosten.

Mögliche Messgrößen – indirekte Erfassung

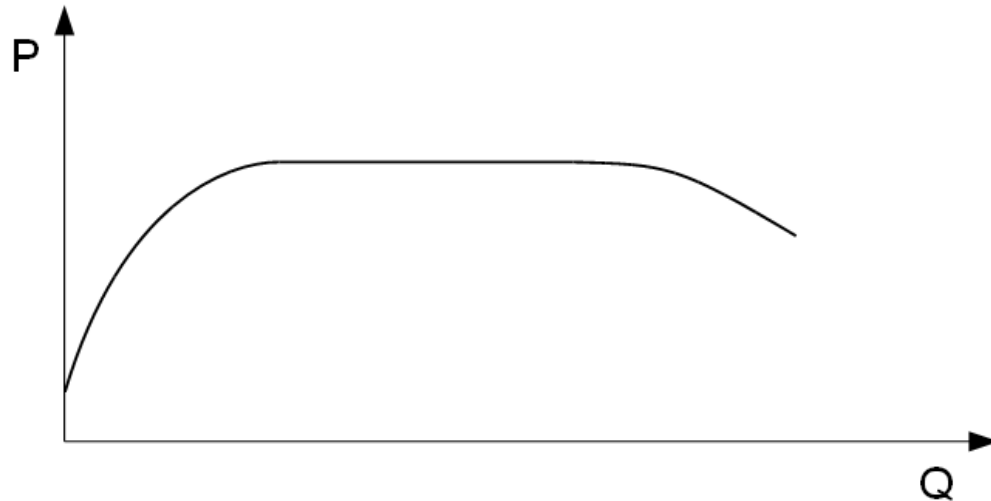
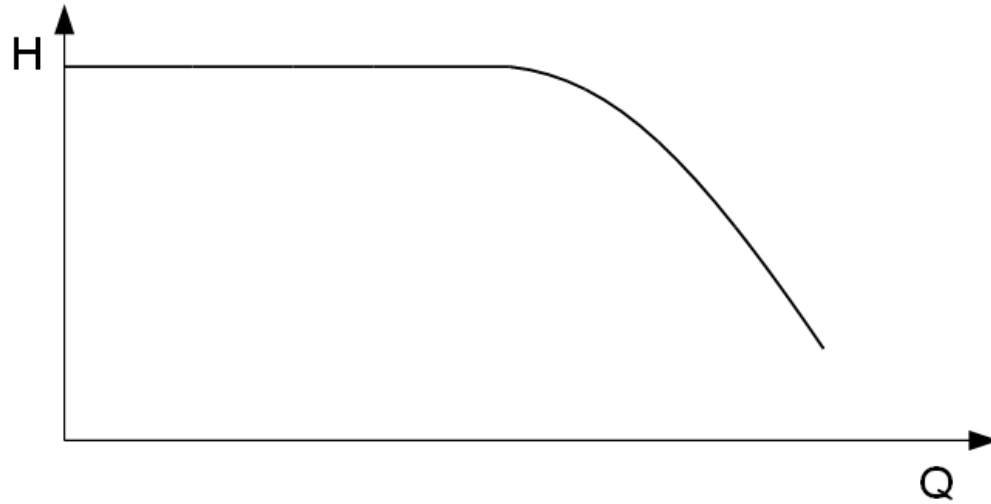


- Motorleistung, Motordrehmoment
- Pumpenleistung
- Verschiebung von Spannungs- und Stromsignal im Motor
- andere indirekte Größen und Kombinationen

Zusammenhang P - Q - H



Problem der Doppeldeutigkeit



- Schaufelzahl
- Austrittswinkel
- Austrittsbreite b_2

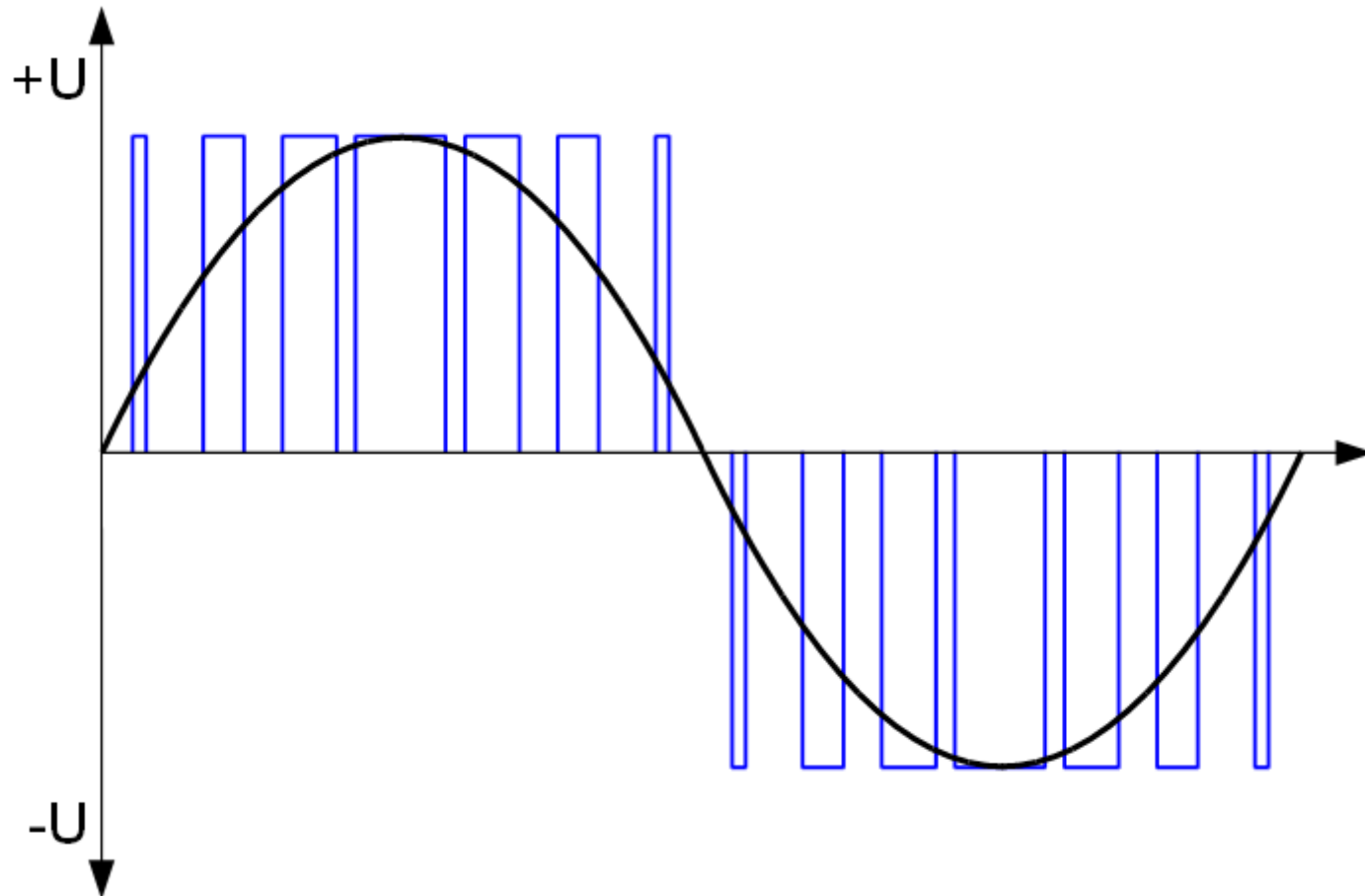
Stabile Leistungskennlinien erreicht man tendenziell bei kleiner Schaufelzahl, kleinem Austrittswinkel und kleiner Austrittsbreite.



- für Massenprodukte > 1 Mio. Stück/a indirekte Messung (Bestimmung von Motorstrom und –spannung – Berechnung der Leistung – Rückrechnung auf Volumenstrom)
- bei kleineren Stückzahlen i.d.R. Messung des Differenzdruckes direkt am Pumpenflansch



- unregelter Motor: Ansteuerung der Spulen mit 3~ Netzspannung
- geregelter Motor: Umwandlung der 3~ Netzspannung in Gleichspannung – Glättung – Erzeugung eines variablen Spannungssignals mit variabler Frequenz – mit dieser werden dann die Motorwicklungen gespeist



Modulation der Pulsbreite

- Drehzahlregelung
- **Start – Stop – Ansteuerung der Pumpe**
- Drosselregelung
- Bypass- Regelung

- Reihenschaltung von Pumpen
- Parallelschaltung von Pumpen



- Takten der Pumpe entsprechend des Bedarfs

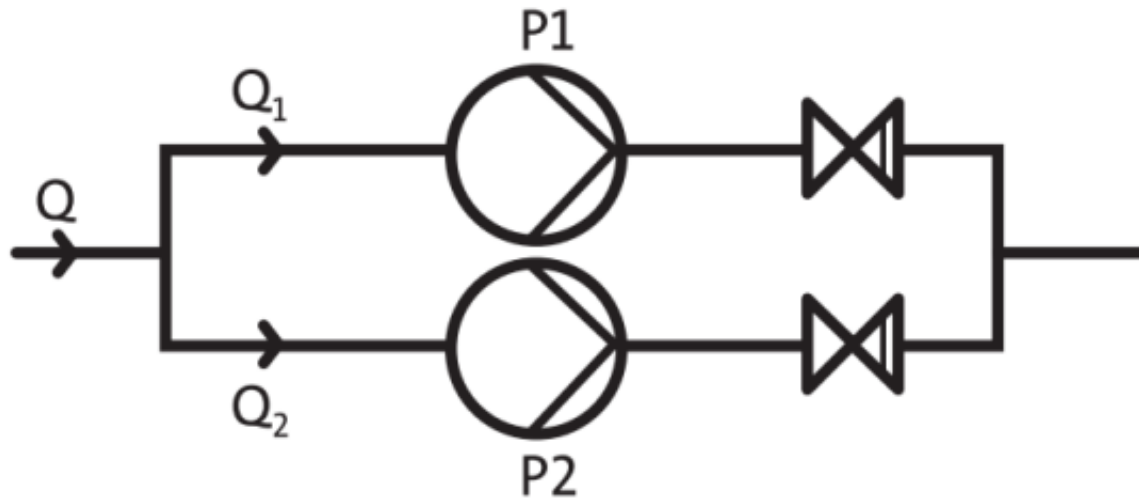


Tafelbild

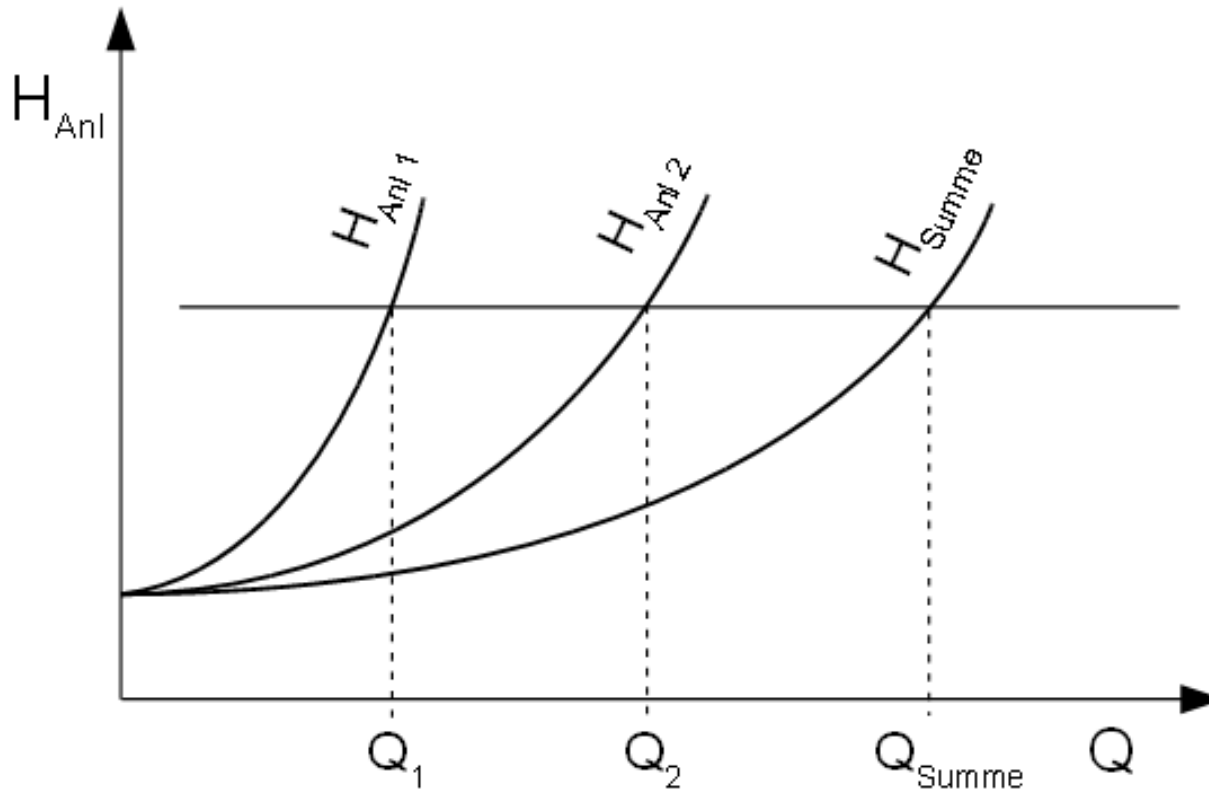
- Drehzahlregelung
- Start – Stop – Ansteuerung der Pumpe
- Drosselregelung
- Bypass- Regelung

- **Reihenschaltung von Pumpen**
- **Parallelschaltung von Pumpen**

Parallelschaltung von Pumpen



Förderung in zwei parallele Rohrleitungen

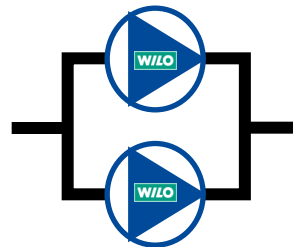


- Single-, Doppel- oder Trippelbetrieb in Abhängigkeit der vorliegenden Last
- Reparatur und Austausch von Pumpen im Betrieb möglich

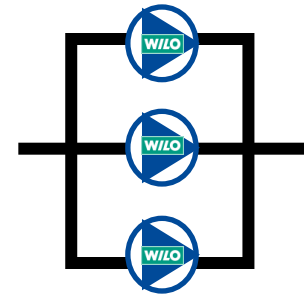
Einzelbetrieb



Doppelbetrieb



Trippelbetrieb



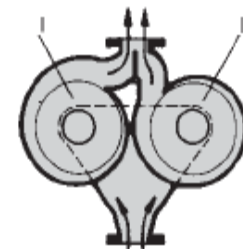
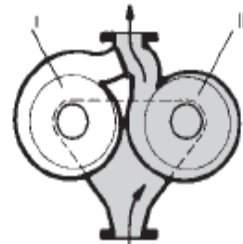
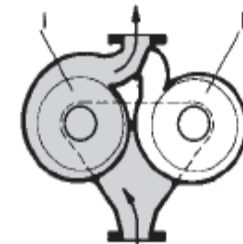
- **Haupt/Reserve:**

Es erfolgt alle 24h ein Betriebswechsel der Pumpen, um einen gleichmäßigen Verschleiß zu gewährleisten.

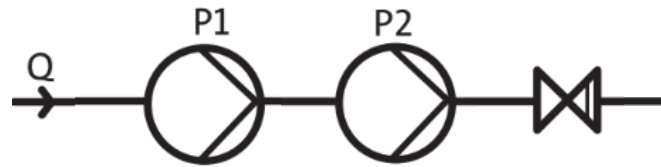
→ redundantes System

- **Haupt/Spitzenlast:**

Betrieb beider Pumpen bei Spitzenlast



Reihenschaltung von Pumpen





Förderung in eine Rohrleitung in Reihe

