

# PRAKTIKER-KONFERENZ GRAZ

*Pumpen in der  
Verfahrens- und Abwassertechnik  
6. – 8. Mai 2025*

**Helmut Jaberg**  
o.Univ.-Prof. em. Dr.-Ing.



Prof. Dr.  
**Jaberg und Partner GmbH**  
Technologie und Strategie



## PUMPE IN DER ANLAGE

- Betriebspunkt und Energieverbrauch
- Anlagenauslegung für feststoffbeladene Medien
- Anlagenauslegung für steigend und fallend verlegte Rohrleitungen
- Pumpenregelung

Helmut Jaberg

o.Univ.-Prof.em. Dr.-Ing.

Kopernikusgasse 24

A-8010 Graz

+43 316 873 7570

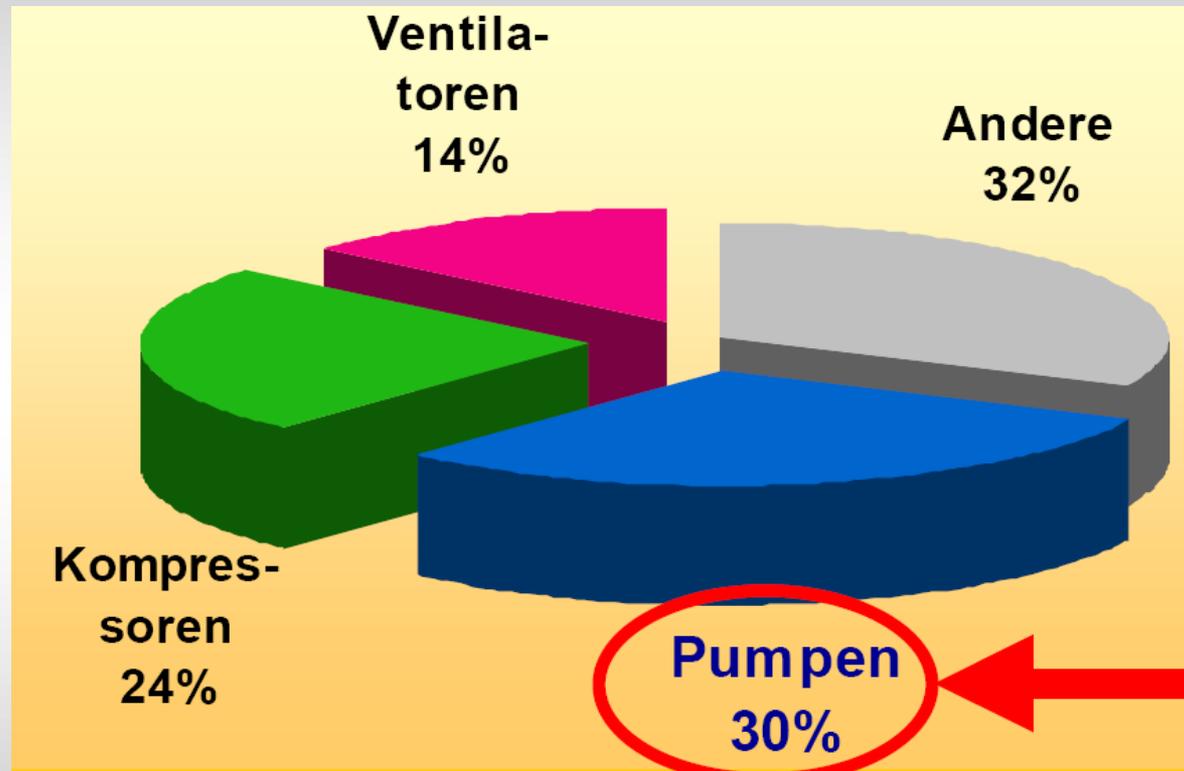
helmut.jaberg@tugraz.at



# Reduzierung des Energieverbrauchs

## Pumpen gelten als die größten Energieverbraucher

Verbrauch elektrischer Energie



Quelle: Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung

vgl.: Praktikerkonferenz 2011



**Energie wird in der Anlage verbraucht,  
nicht in der Pumpe.**

**Pumpen führen die Energie zu.**

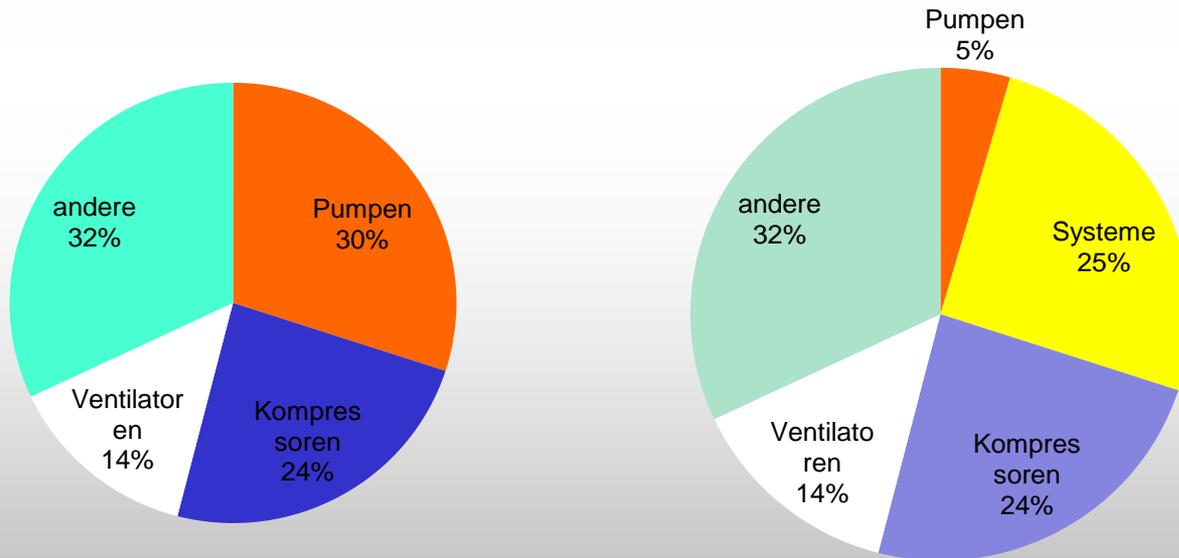


# Reduzierung des Energieverbrauchs

Annahme: durchschnittlicher **Pumpen** - Wirkungsgrad 85%

Von den 30 % der Gesamt-Energie verbraucht die **Pumpe** selbst nur  $0,15 \cdot 30 = 4,5\%$ .

Von den 30 % der Gesamt-Energie verbraucht das **System**  $0,85 \cdot 30 = 25,5\%$ .



Pumpenförderhöhe = Anlagenförderhöhe

$$H_A = H_{geo} + \frac{p_a - p_e}{\rho g} + \frac{v_a^2 - v_e^2}{2g} + \sum H_v$$

$$H_{vi} = \zeta_i \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \quad \text{Verlustansatz mit } \zeta_i \text{ Verlustbeiwert}$$

## Vier „Sicherheitsansätze“ :

- $\zeta$ -Werte zu groß gewählt
- Durchsatz  $Q$  zu groß gewählt: geht quadratisch in  $v_i$  ein
- $H_{geo}$  zu groß gewählt
- Pumpe eine Nummer größer gewählt



**Die Anlagenkennlinie wird rechnerisch viel höher und viel steiler als in Wirklichkeit!**



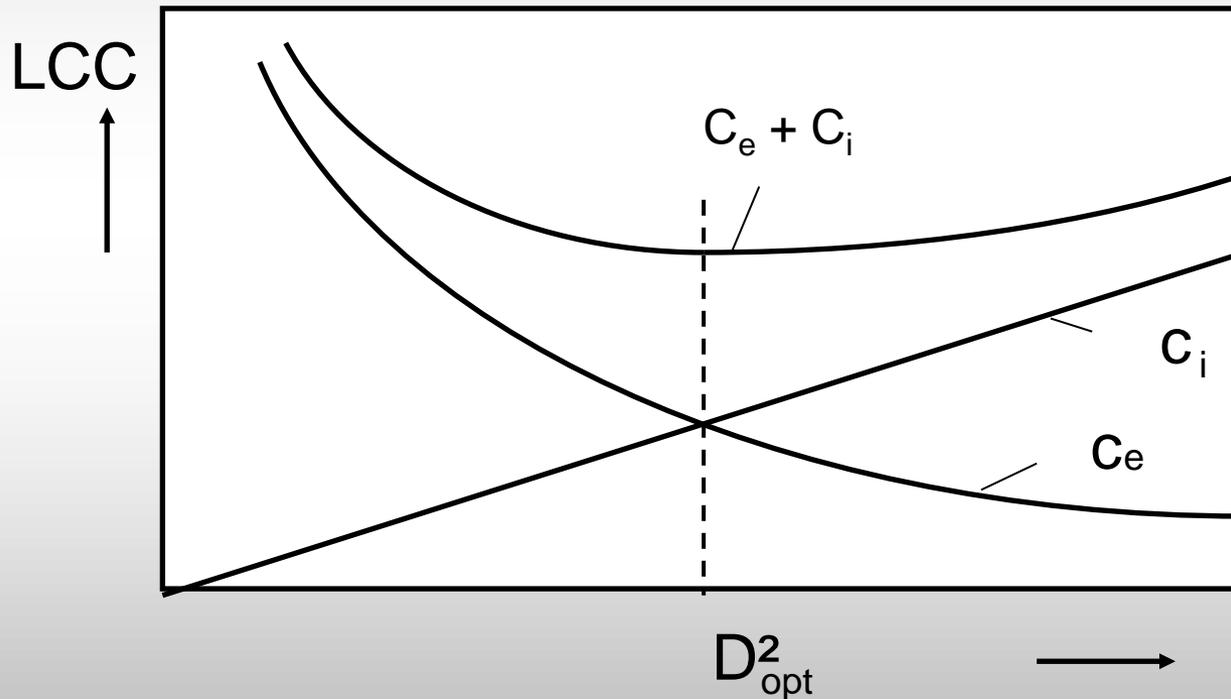
# Kostenbeurteilung

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_d + C_{env}$$

- Einstandskosten
- Montagekosten
- Energiekosten

- Betriebskosten
- Wartungskosten
- Stillstandskosten

- Demontage- und Entsorgungskosten
- Umweltkosten



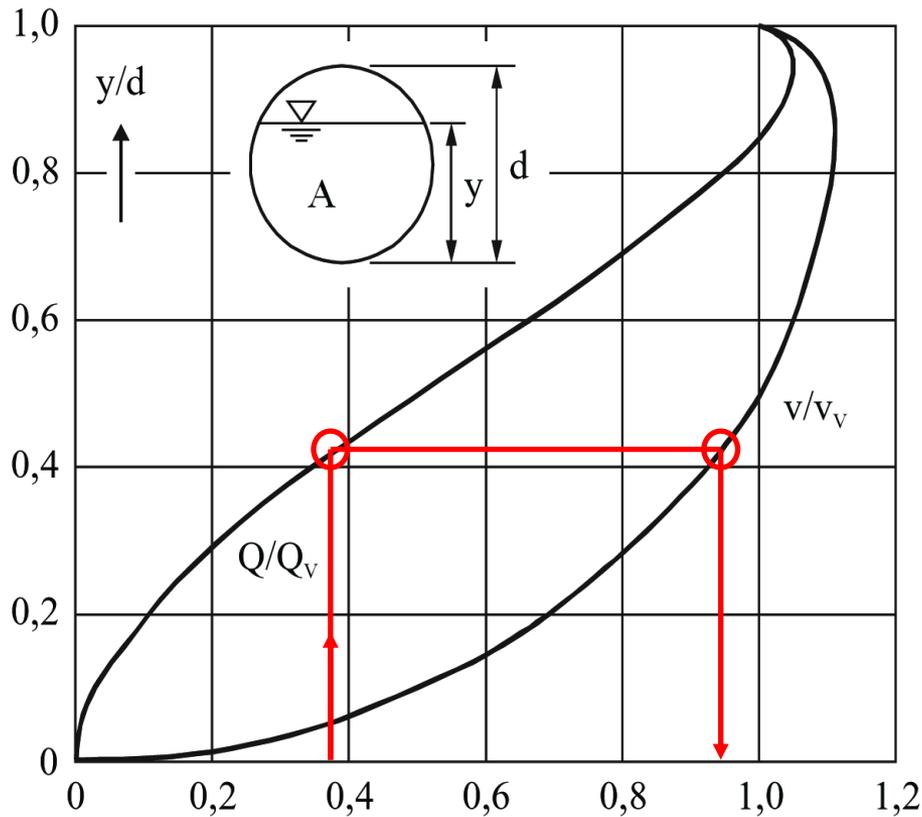
$$C_{heute} = \frac{C_{Zeitpunkt}}{\left[1 + \frac{(1-p)}{100}\right]^n}$$

Außerdem hat der Rohrlitungsdurchmesser  $D$  einen entscheidenden Einfluß auf die Leistung (d.h. Größe) der Pumpe und auf die elektrische Installation.



# teilbefüllte Rohrleitung

fallend: voll- oder teilbefüllt,  
je nach Gefälle und Wassermenge



$$Q_{voll} = v_{voll} \cdot A \quad \text{Schluckfähigkeit}$$

$$Q \leq Q_{voll} \quad \text{Teilbefüllung}$$

Q aus Einwohneranzahl, Regen-  
spende o.ä.

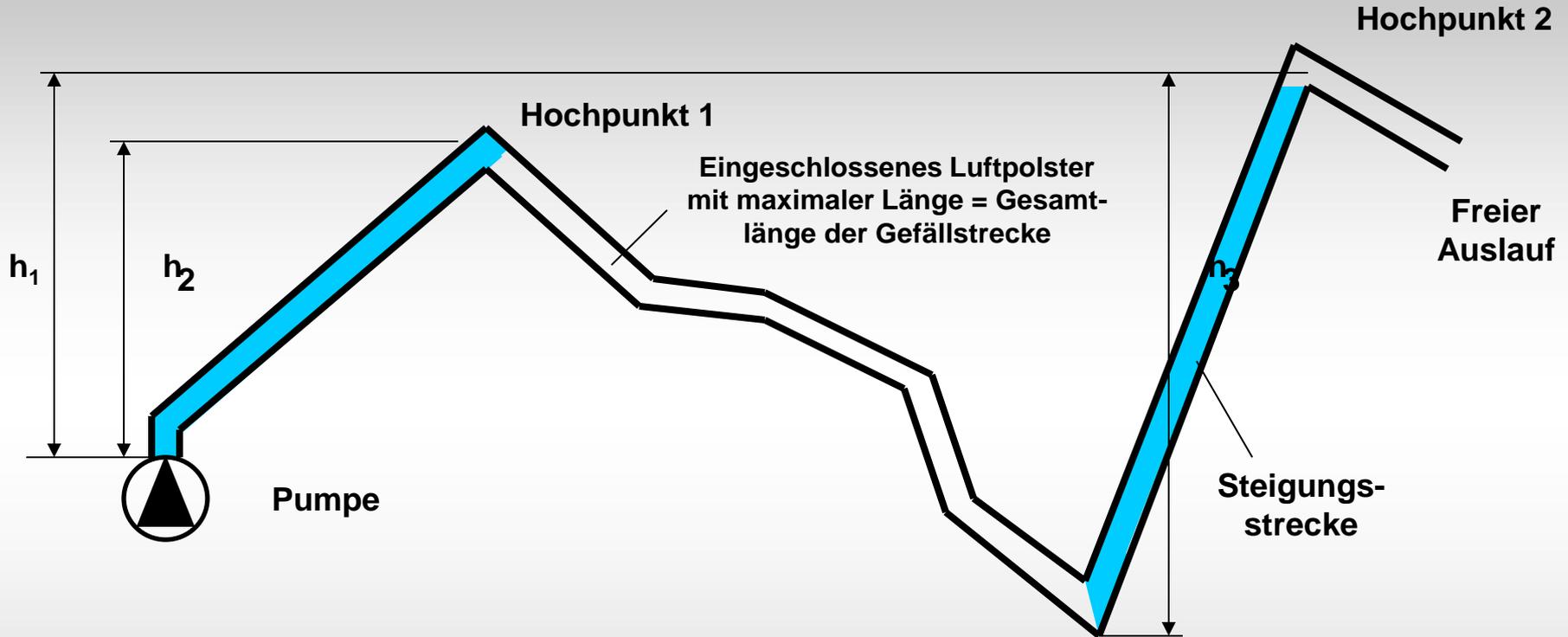
- Berechne  $Q_{voll}$   $v_{voll}$
- Berechne Q
- Lese aus Diagr.  $v / v_{voll}$
- Berechne v
- Absetzgefahr bei  $v < 1 \text{ m/s}$   
bzw.  $v < 0,7 \text{ m/s}$

$$Q \geq Q_{voll} : \text{Rückstau}$$



# Abhilfe gegen Absetzgefahr und Rückstau: Pumpen

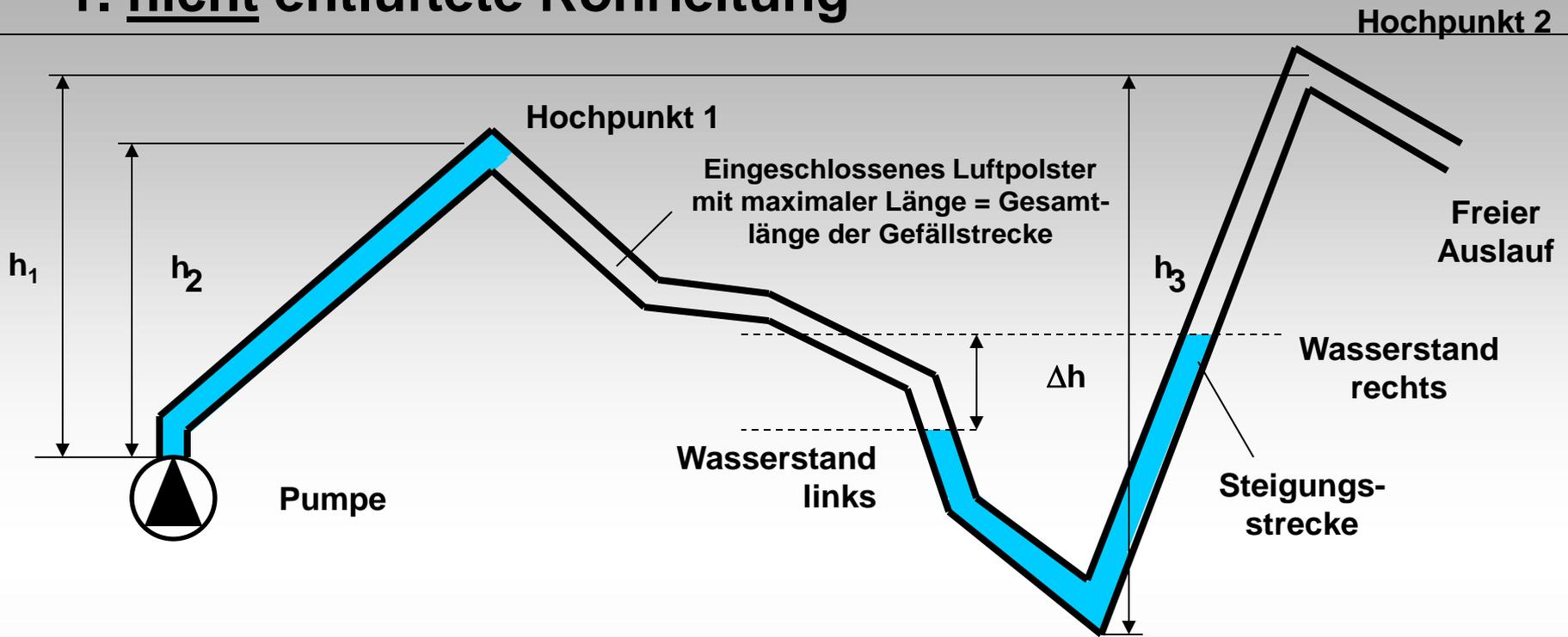
Bei steigend und fallend verlegten Rohrleitungen bilden sich Luftsäcke



- „Form“ des Luftsack hängt ab, ob Rohrleitung belüftet oder nicht
- Maximale Länge: Extremfall bei nicht entlüfteter Rohrleitung



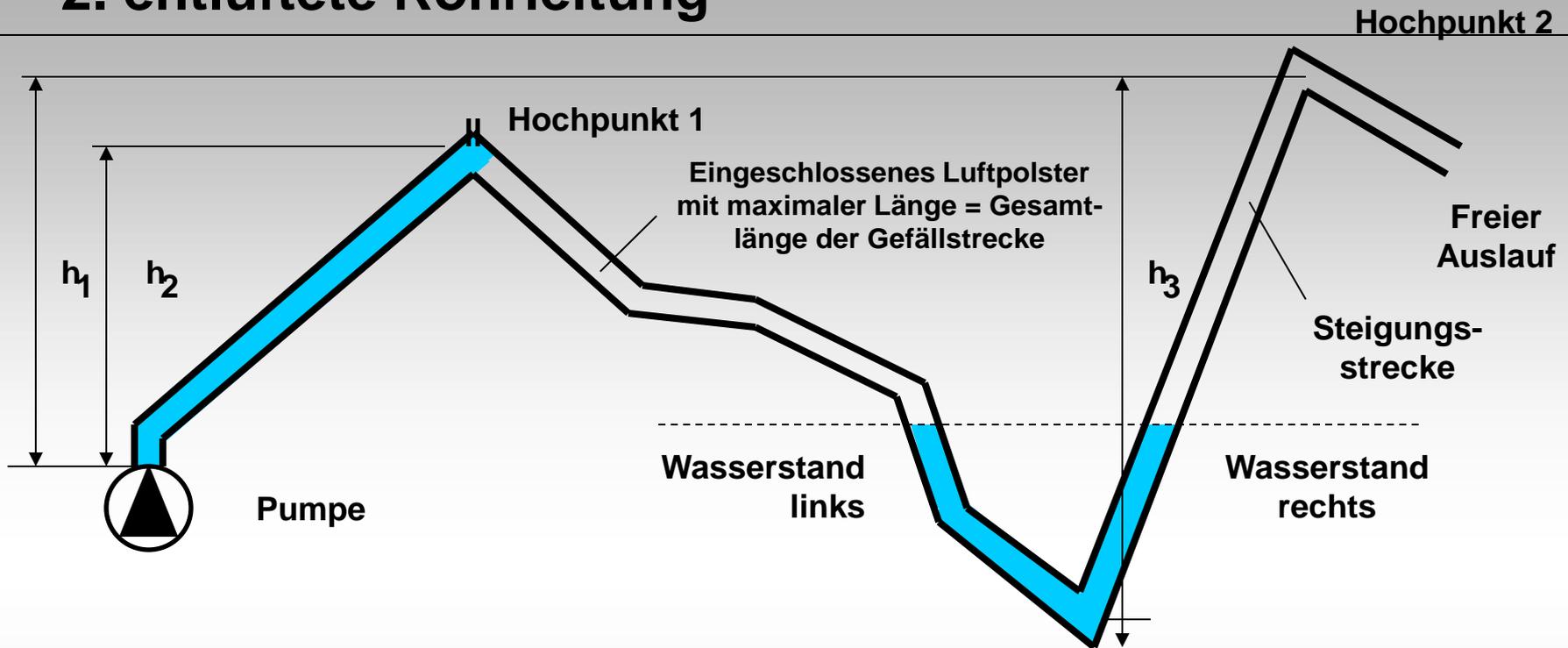
# 1. nicht entlüftete Rohrleitung



- Wasser sammelt sich im „U-Rohr“
- Überdruck = Höhendifferenz im U-Rohr
- Kompression des linken Luftpolsters
- $$p_{ii} = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad p_{ii,max} = \rho \cdot g \cdot h_3$$
- $$\Delta H_{max} = h_2 + h_3$$
- Unterschiedlichen Wasserstand
- Eventuell viele Steigungsstrecken



## 2. entlüftete Rohrleitung



- **Belüftung:** in allen luftgefüllten Abschnitten: Atmosphärendruck
- **Pumpe fördert auf  $h_2$  bis „U-Rohr“ bis zum Hochpunkt 1 gefüllt**
- **Förderung über Hochpunkt 2: Pumpe fördert auf  $h_1 > h_2$**
- **Achtung: Druck im Hochpunkt 1 steigt ebenfalls: Rückschlagventil Steigrohr**
- **Anfüllvorgang im U-Rohr: Abwasser verweilt im Rohr: Ablagerungen, Faulprozesse**
- **Im fallenden Abschnitt: evtl. Teilbefüllung**

$$\Delta H_{\max} = h_1$$



# Feststofftransport

Alle Pumpen sind grundsätzlich für den Transport von zähen oder feststoffbeladenen Medien geeignet.

Voraussetzung: Medium liegt als Suspension vor (Mischung kleiner und großer Körner (Sieblinie) und ist fließfähig (Rheologie).

- Beispiele:
- Sand und Abraum in Minen- und Baggerbetrieben
  - Asche in Kraftwerken
  - Schlamm und Abwasser
  - Rauchgasentschwefelung
  - Pasten und Zellulose
  - Glycerin und Honig

Suspension ist ein Fest – Flüssig – 2 – Phasen – Gemisch

Solange das Medium zum Saugstutzen der Pumpe kommt, wird es auch gefördert (Brückenbildung vermeiden).



# Abrasion

---

Feststoffe führen in allen strömungsführenden Komponenten  
zu Verschleiß  $\Rightarrow$  Abrasion  
mit typischen Verschleißbildern

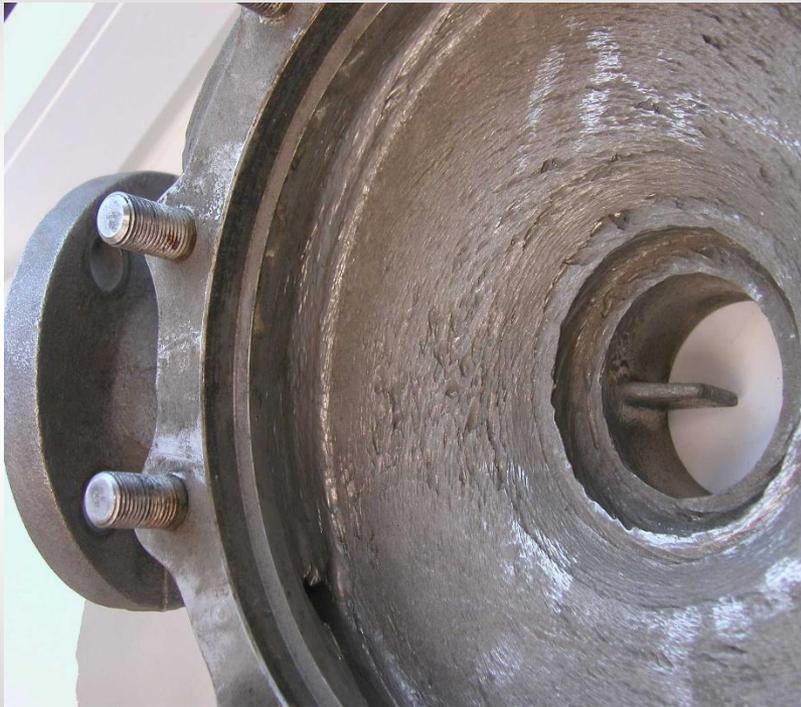
Geeignete Materialien:

- Duktile Metalle hoher Härte  
(CrMo – Stähle), Ni-Hart, Stellite, Ferro-Titanit
- Mineralguss
- Kunststoffe auf metallischem Träger: Gummi, PP, PE
- Oberflächenbeschichtung aus SiC, WC



# Beispiele für Abrasion

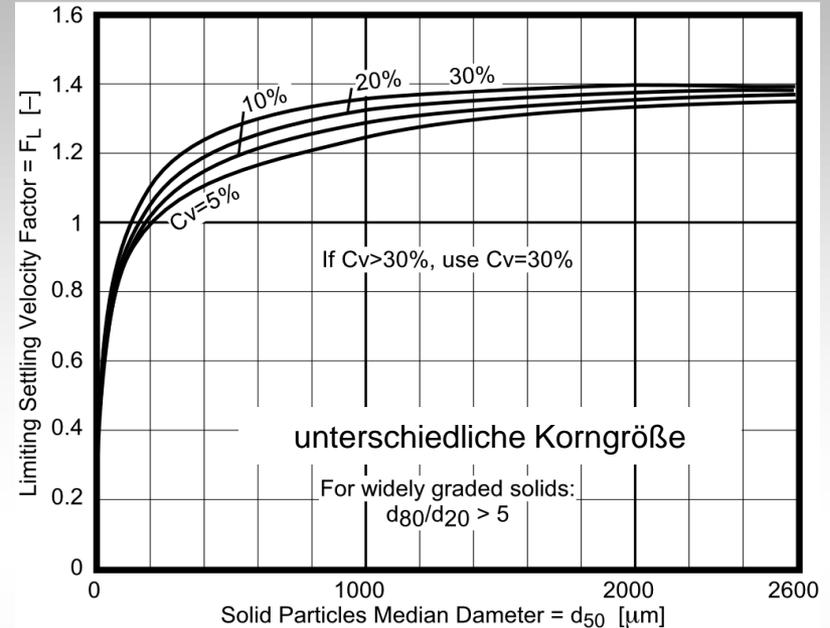
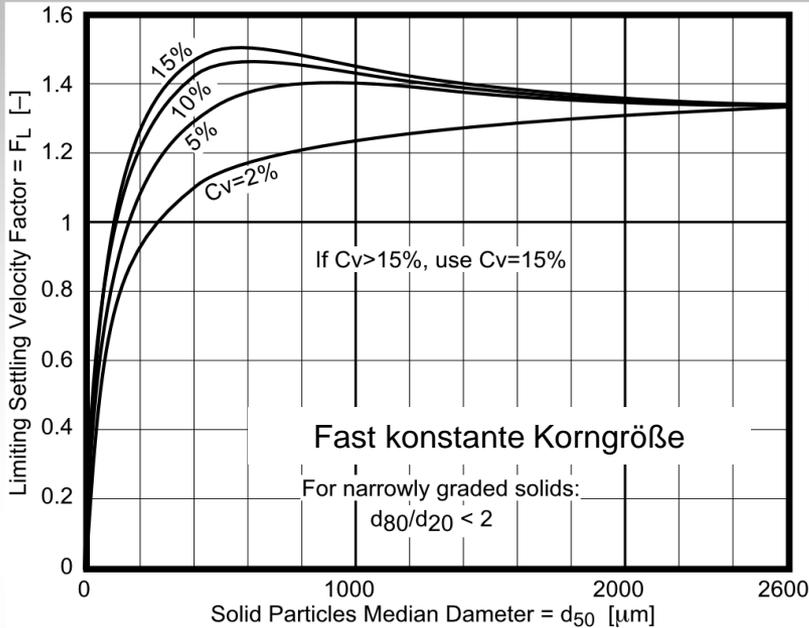
Saugseitiger Radseitenraum / Dichtspalt / Pumpeneinlauf



Quelle: Klikos, BASF



# Berechnungsverfahren für Feststofftransport



Absetzgeschwindigkeit

$$v_L = F_L \cdot \sqrt{2gD \left(1 - \frac{\rho_{fest}}{\rho_{Wasser}}\right)}$$

$D$ : Rohrdurchmesser,  $\rho$ : Dichte

Quelle: Weir Slurry Pumping Manual 2002

<http://services.eng.uts.edu.au/~johnd/MaterialsHandling/WeirSlurryPumpingHandbook.pdf>



# Berechnungsverfahren für Feststofftransport

Gegeben:

Feststoffmassenstrom  $m_{\text{fest}}$ , z.B. to/a oder kg/sec

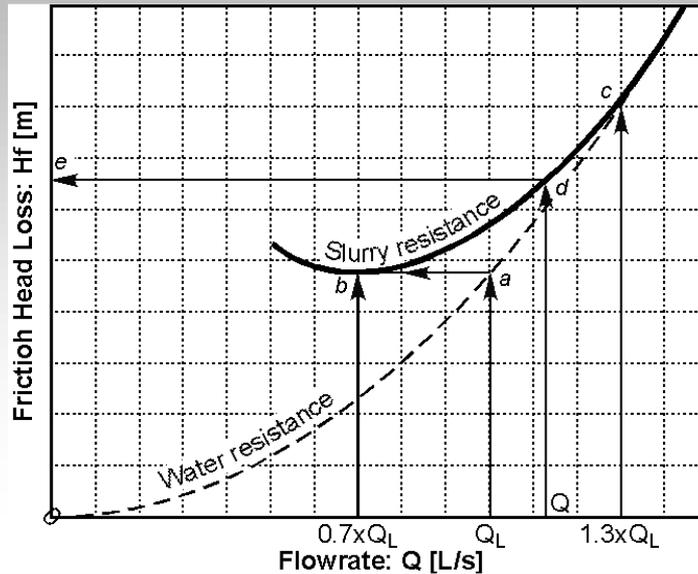
Dichte des Feststoffs  $\rho_{\text{fest}}$

Für gewünschten Feststoffmassenstrom  $m_{\text{fest}}$

- Wähle Feststoff-Volumenkonzentration  $c_v$  (an sich beliebig, z.B. 1 %)
  - Berechne  $Q = Q_{\text{fest}}/c_v = m_{\text{fest}}/(c_v \rho_{\text{fest}})$
  - Bestimme Absetzgeschwindigkeit  $v_L$
  - Bestimme Mindest-Volumenstrom  $Q_L = v_L A_{\text{Leitung}}$
- Falls  $Q > (110 \% - 115 \%) Q_L$  : Rohrdurchmesser **korrekt**
- Falls  $Q < (110 \% - 115 \%) Q_L$  : Rohrdurchmesser oder Vol.-Konzentration **ändern**



# Berechnungsverfahren Feststofftransport: **Anlagenkennlinie**



Anlagenkennlinien von Suspensionsströmungen haben ein ausgeprägtes **Minimum**, das vom Bingham-Verhalten herrührt.

Störungsfreier Betrieb ist nur rechts von  $Q_L$  möglich!

## Vereinfachtes Verfahren für Feststoff**anlagenkennlinie**

- Ermittle, zeichne normale Wasserkennlinie
- Zeichne Senkrechte bei Absatz-Durchsatz  $Q_L$
- Zeichne Senkrechte bei  $0,7 Q_L$  und  $1,3 Q_L$
- Ziehe Horizontale von a nach b: **Minimum der Feststoff-Anlagenkennlinie**
- Zeichne Anlagenkennlinie: Parabel durch Mini-mum (b) und tangentialer Übergang bei  $1,3 Q_L$  (c)

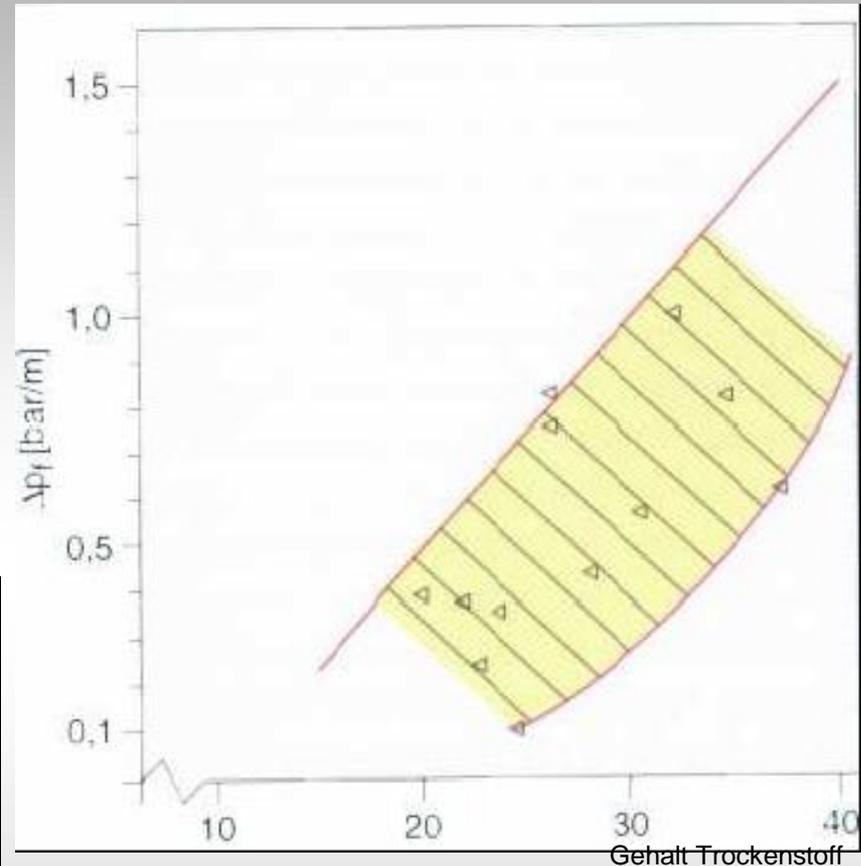
Quelle: Weir Slurry Pumping Manual 2002



# Berechnungsverfahren Feststofftransport: **Anlagenkennlinie**

Bei hohen Feststoffgehalten (Dredging) gibt es keine Gesetzmäßigkeiten, den Druckverlust im Voraus zu bestimmen.

Daraus resultiert die eigentliche Einsatzgrenze für Kreiselpumpen.



Quelle: Haubold, Praktikerseminar 2006

*Colorado School of Mines'*  
**Aufwertefaktoren für Reibungsverluste gegenüber Wasser bei hohen Feststoffgehalten (Dredging)**

Leichter Schlack, Schlamm oder Lehm, ohne Sandanteil	1.10
Schlamm, feiner Sand, weicher Lehm	1.15
Mittlerer Sand, Schlamm- und Lehm (gem.)	1.20
Zäher Lehm, grober Sand und/oder Kies	1.30
Korallen und Muscheln	1.40
Grober Kies und Geröll ohne Lehm	1.50

Quelle: Weir Slurry Pumping Manual 2002



# Auswahl der geeigneten Pumpe

1. Bestimme erforderlichen Förderstrom  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]

i.A. ist der Förderstrom gegeben: Wieviel will ich fördern?

2. Berechne Rohrleitungswiderstand  $H$  [m]  
Gesetzmäßigkeiten, Erfahrungswerte, Versuch

$$H = \frac{\Delta p_{\text{Gemisch}}}{\rho_{\text{Gemisch}} g}$$

3. Wähle Drehzahl  $n$  [1/s]  
Bei abrasiven Medien: Niedrige Drehzahl,  
sonst hoch, Kavitationsgefahr beachten

4. Berechne spez. Schnelläufigkeit  $n_q$  [1/s]

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Die spezifische Schnelläufigkeit ist  
die **Kenngroße für den Pumpentyp**



# Auswahl der geeigneten Pumpe

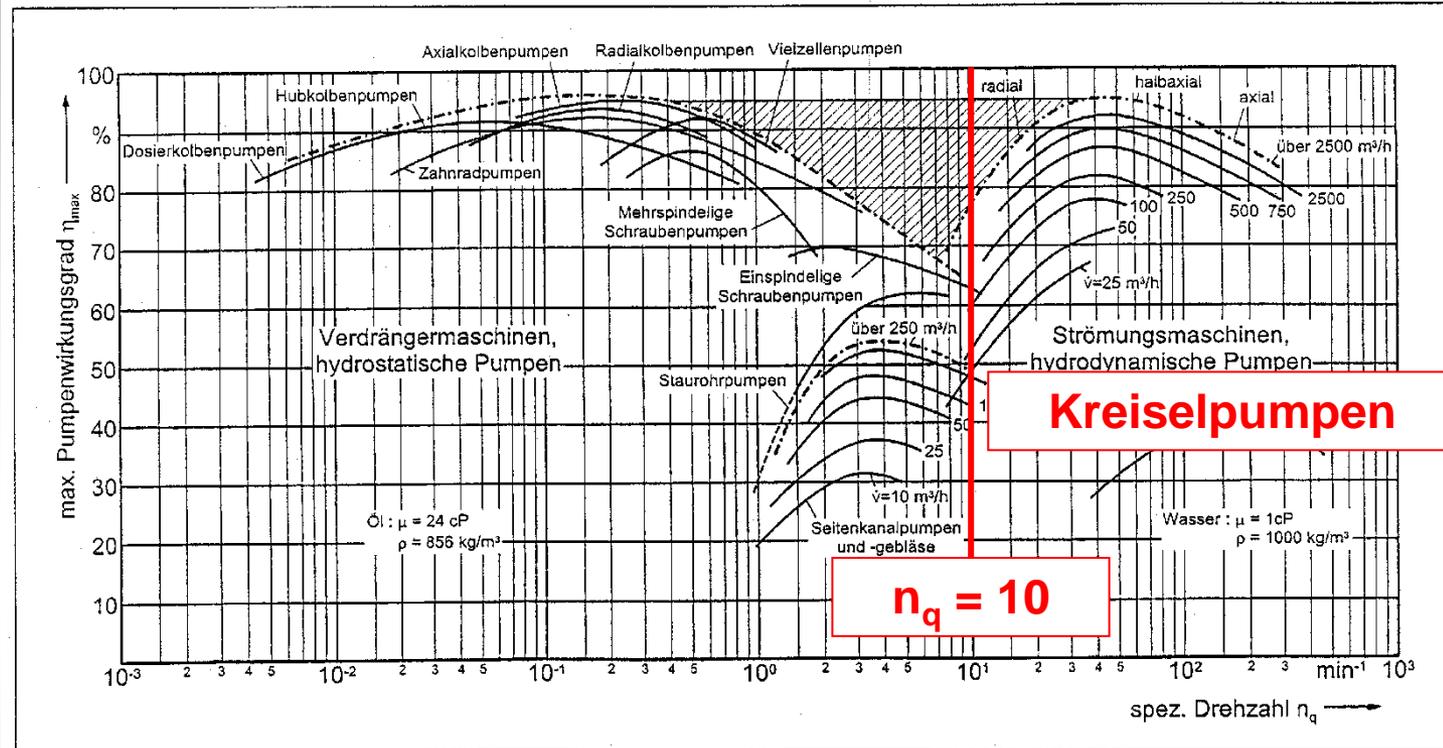


Bild 1: Bereiche des optimalen Wirkungsgrads für verschiedene Pumpenarten über der spezifischen Drehzahl  $n_q$

Der häufig hohe Widerstand  $H$  bei kleinem  $Q$  zwingt oft zu Verdrängerpumpen

$n_q > 7 - 10$ :  
Kreiselpumpe



# Auswahl der geeigneten Pumpe

Die Überprüfung der Pumpenauswahl bzw. des Pumpensystems erfolgt dann auf Basis der Lebenszykluskosten LCC

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_d + C_{env}$$

Diagramm zur Lebenszykluskosten (LCC) Gleichung:

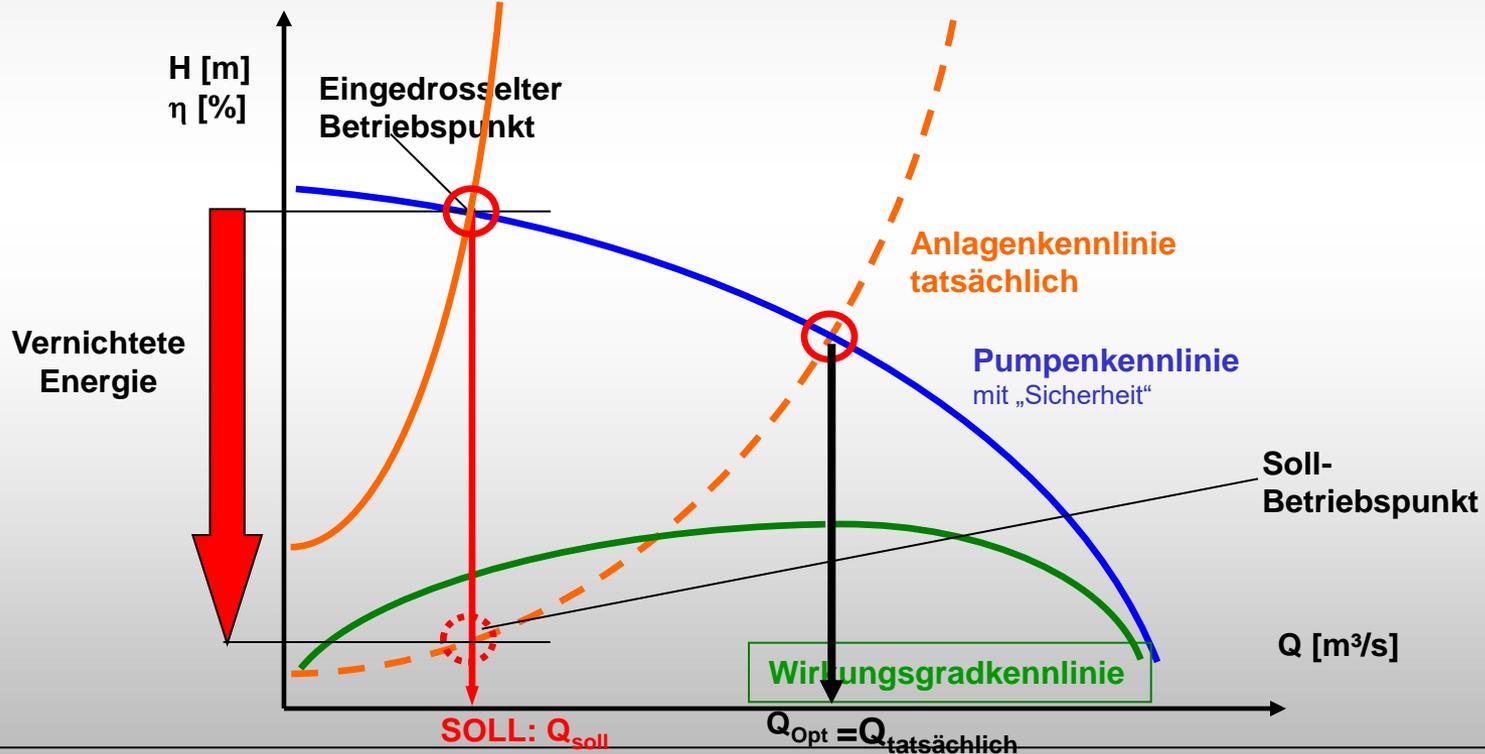
- $C_{ic}$ : Anschaffungskosten
- $C_{in}$ : Installationskosten
- $C_e$ : Energiekosten
- $C_o$ : Betriebskosten
- $C_m$ : Instandhaltungskosten
- $C_s$ : Stilllegungskosten
- $C_d$ : Ausfallkosten
- $C_{env}$ : Umweltkosten



# Einsparpotential : Massive Überdimensionierung

## Massive Überdimensionierung z.B. aufgrund von Sicherheitszuschlägen und Toleranzen

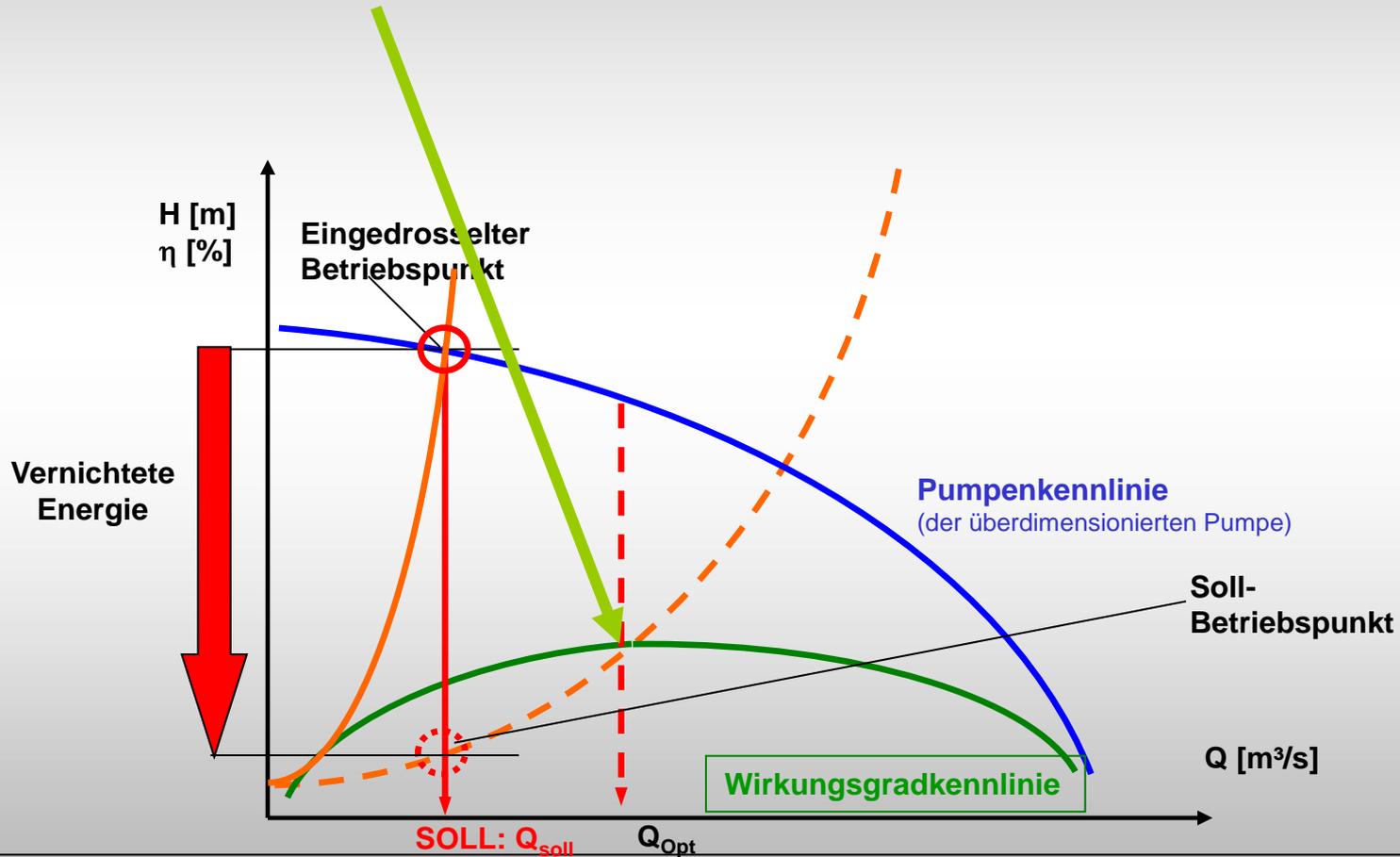
- ⇒ vernichtete Energie
- ⇒ schlechter Wirkungsgrad
- ⇒ zunehmende mechanische Belastung durch Radialkräfte ⇒ Schäden
- ⇒ Kavitationsschäden



# Einsparpotential : Massive Überdimensionierung

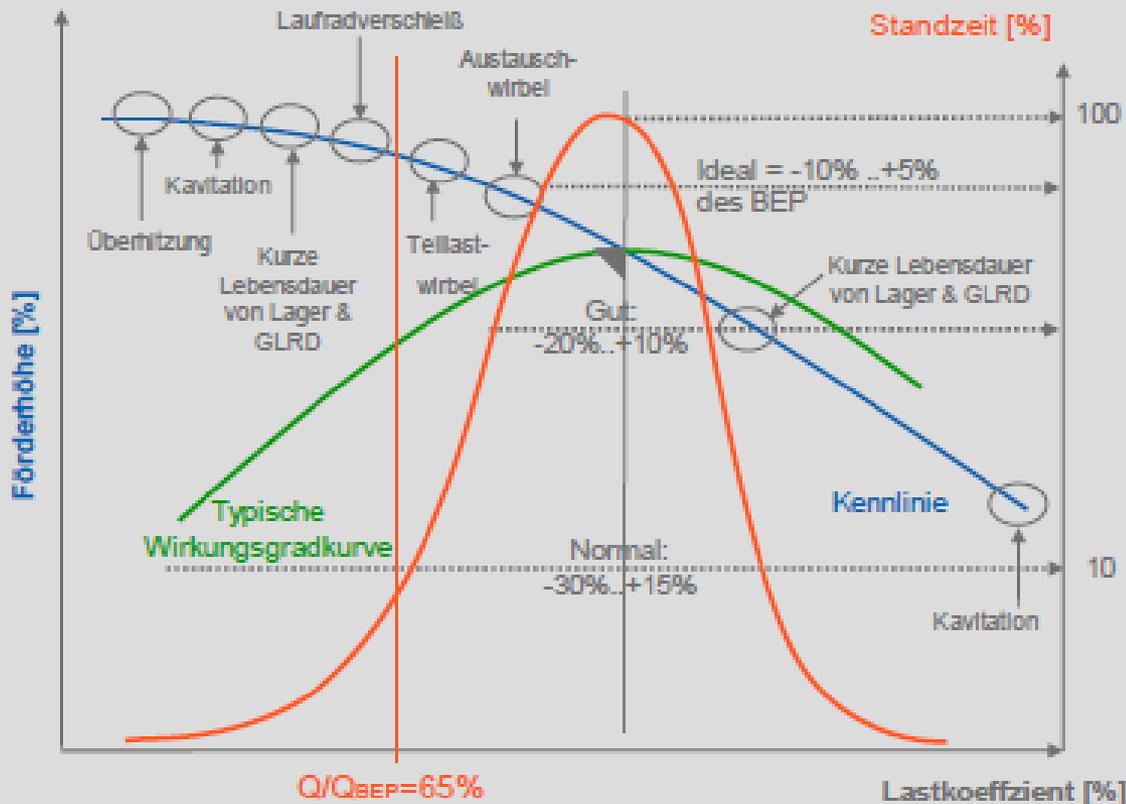
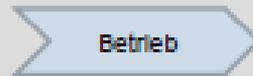
Massive Überdimensionierung z.B. aufgrund von Sicherheitszuschlägen

Der optimale Pumpenwirkungsgrad ist kein Einsparpotential!!!



# Überdimensionierung bewirkt UNSICHERHEIT

## Best Practice 3 @ Industrie 4.0



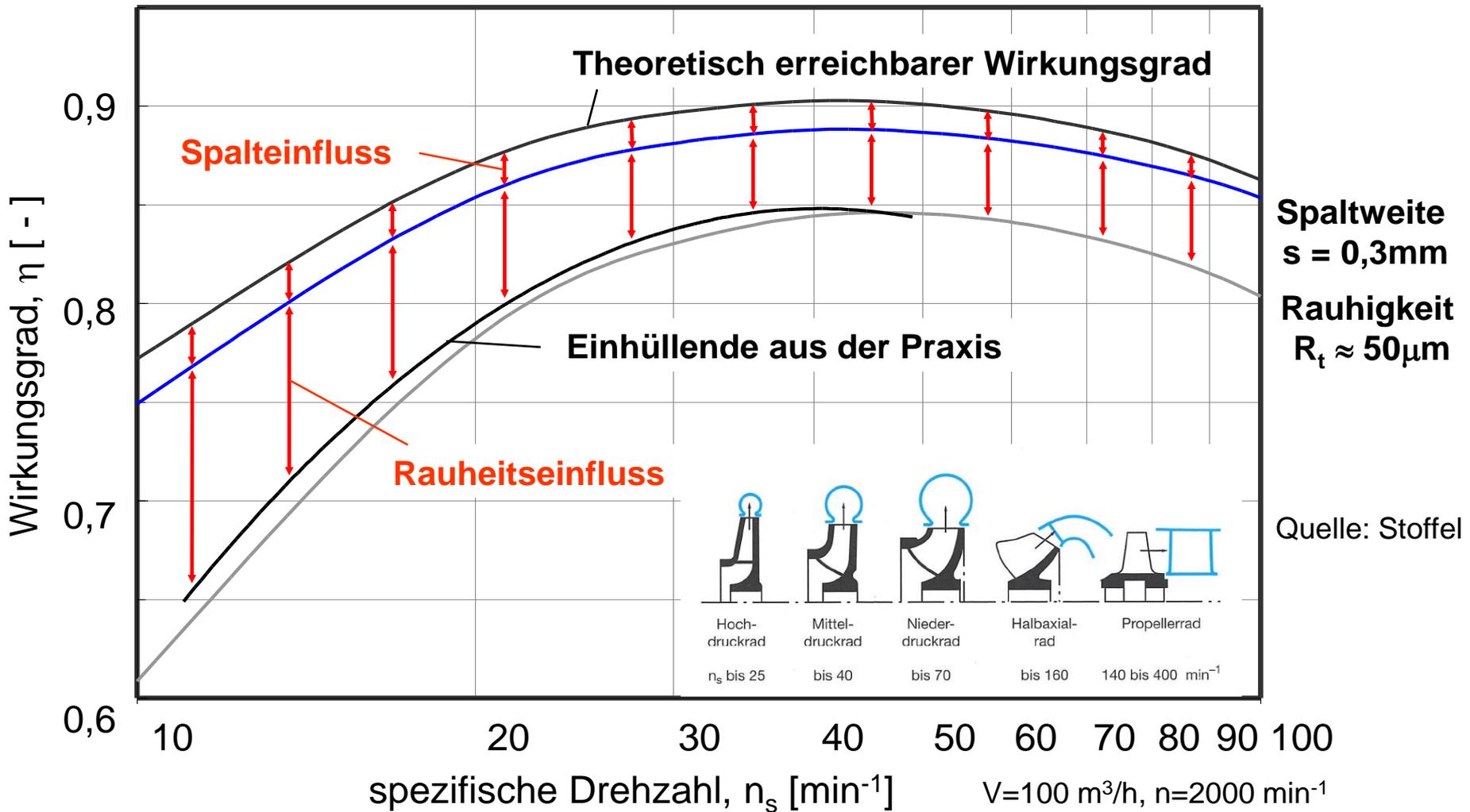
Source: Paul Bäringer, Bäringer & Associates, Inc.

Zitiert nach: Bross,  
Praktikerkonferenz 2015

Ballinger bezieht sich  
auf Judy Hodgson,  
Du Pont



# Ursachen für Wirkungsgradunterschiede (Theorie - Praxis)



# FAZIT

---

Die Energie-Einsparmaßnahmen bei Hydraulik und Antrieb sind absolut lobenswert.

An den volkswirtschaftlichen Zielen

- Reduktion des Energieverbrauchs
- Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes

gehen diese Maßnahmen aber glatt vorbei.

**Der Energieverbrauch kann praktisch NUR durch Optimierung der Anlage gesenkt werden.**

Der Betrieb im optimalen Wirkungsgrad steigert auch die Produktionssicherheit.

Pumpen werden aus

**falsch verstandenem Sicherheitsdenken**

**brutal über dimensioniert!**

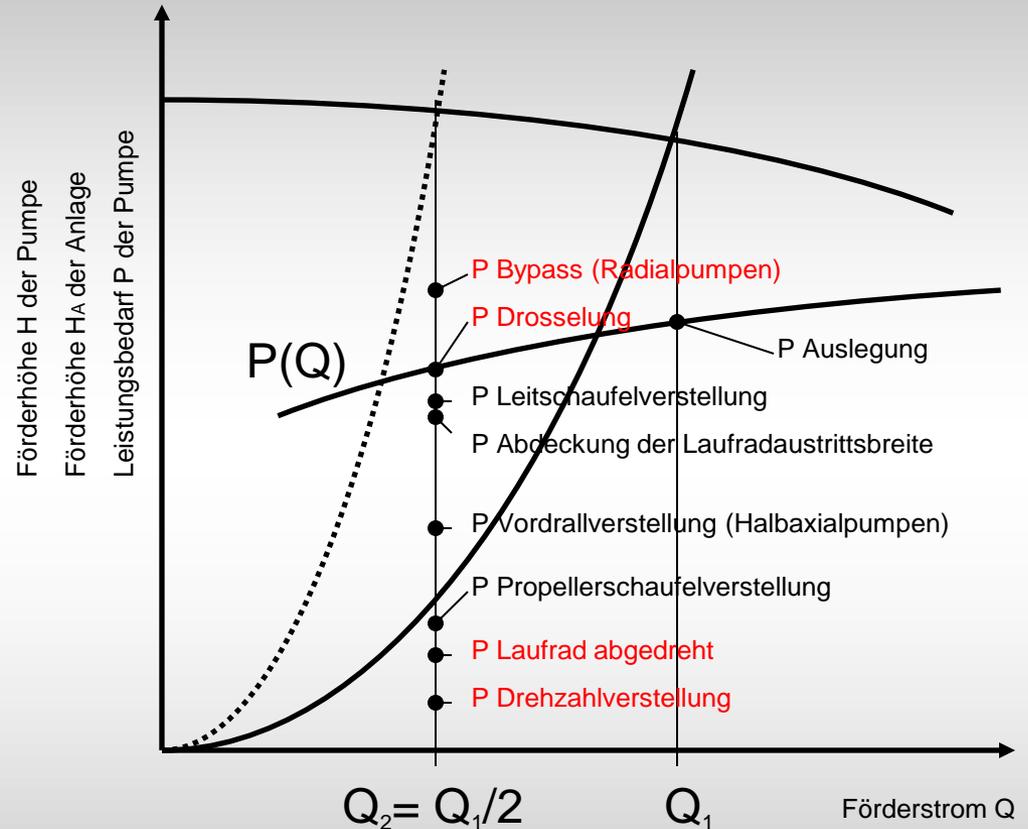


# Regelungsarten

## Leistungsbedarf verschiedener Regelungen

### Regelungsmöglichkeiten

- Zu/Abschalten von Pumpen
- **Bypass-Regelung**
- **Drosselung**
- Vordrallregelung
- Laufschaufelverstellung
- **Lauftradabdrehen**
- **Drehzahlregelung**
- Kavitationsregelung



Leistungsvergleich der verschiedenen Regelarten

(Quelle: KSB - Pumpenlexikon)

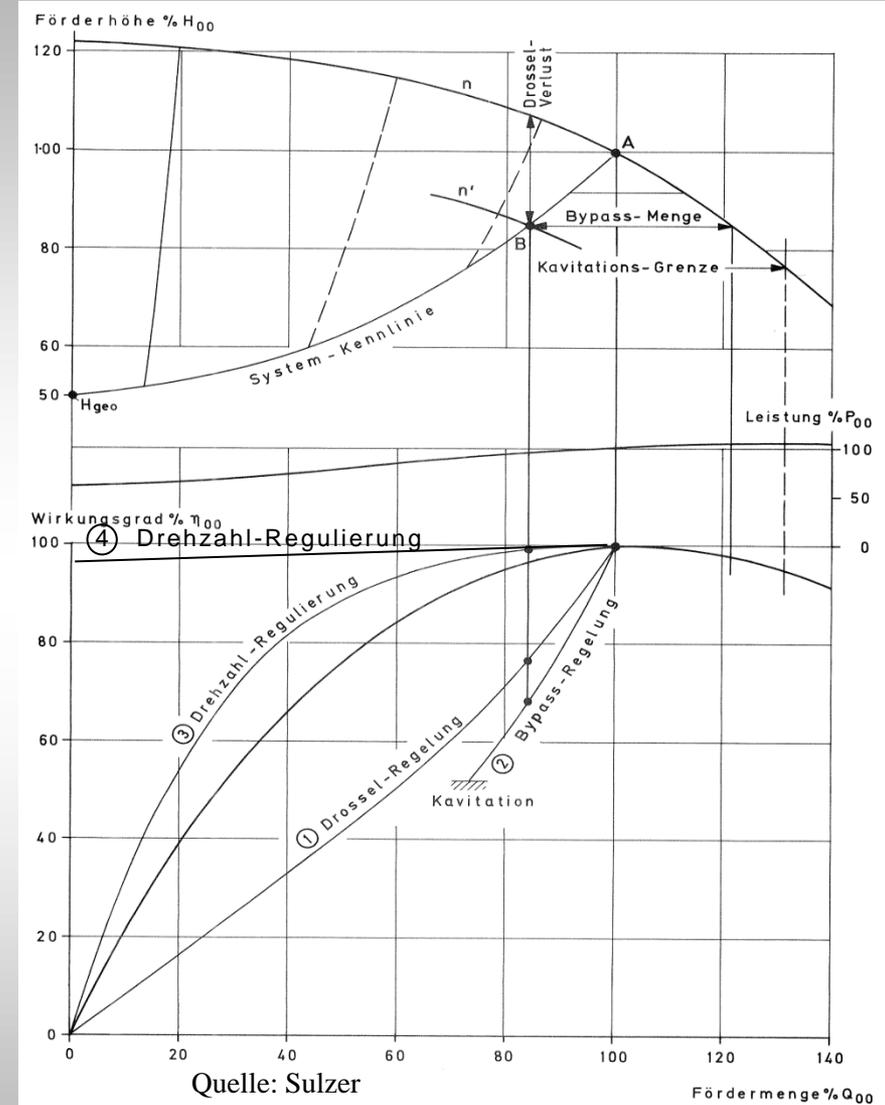


# Regelungsarten

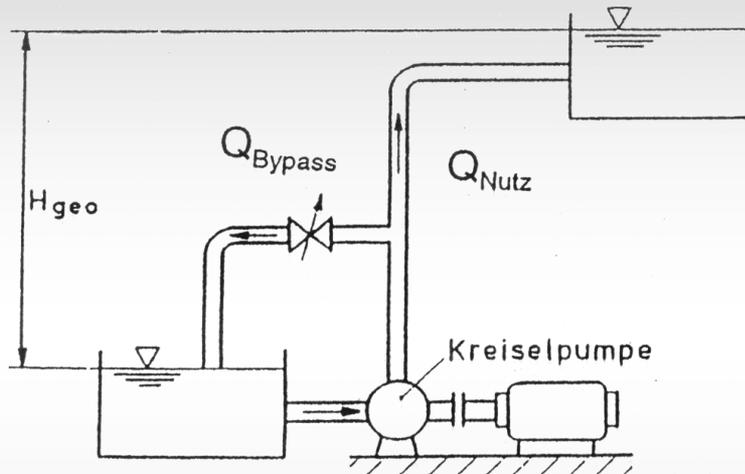
$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Drehzahlregelung ist immer die energiesparendste Lösung, entfaltet ihren **ganzen** Nutzen aber **nur** bei REIN dynamischer Anlagenkennlinie, d.h. ohne statischen Anteil.

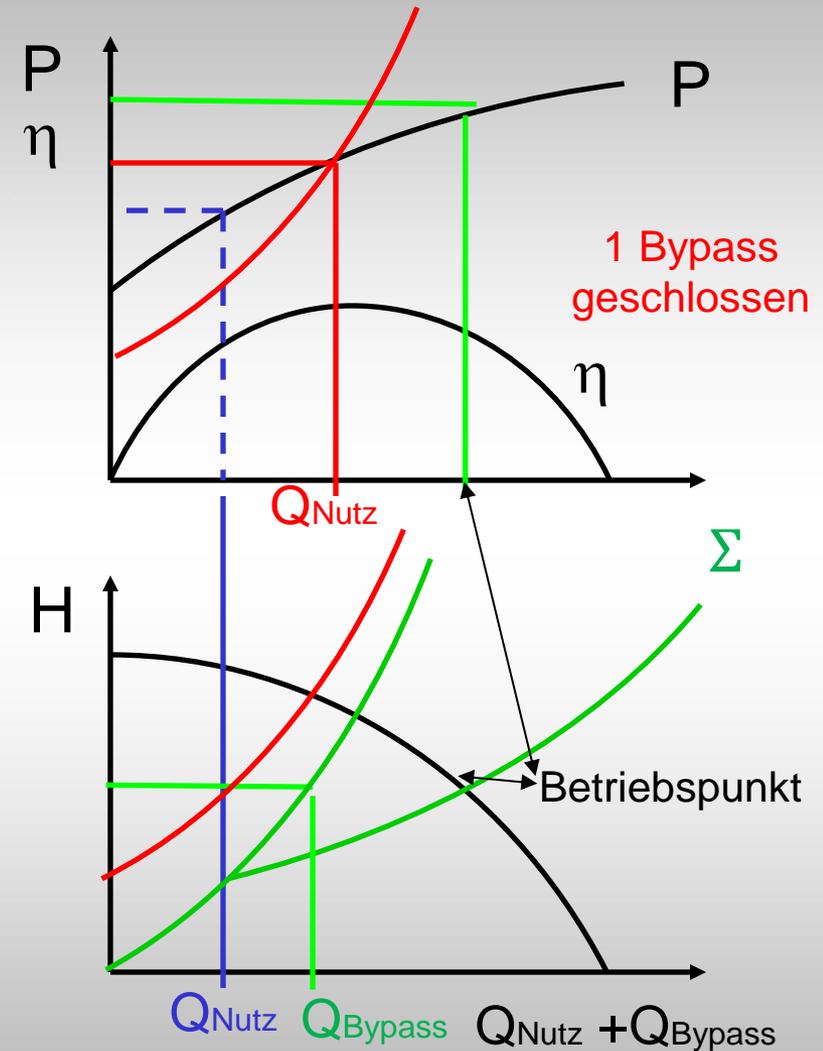
- ③ Drehzahl-Regulierung: Systemkennlinie mit hohem statischen Anteil  $H(Q=0) \gg 0$
- ④ Drehzahl-Regulierung: NUR dynamische Systemkennlinie  $H_{\text{Anlage}}(Q=0) = 0 \text{ m}$



# Bypass-Regelung

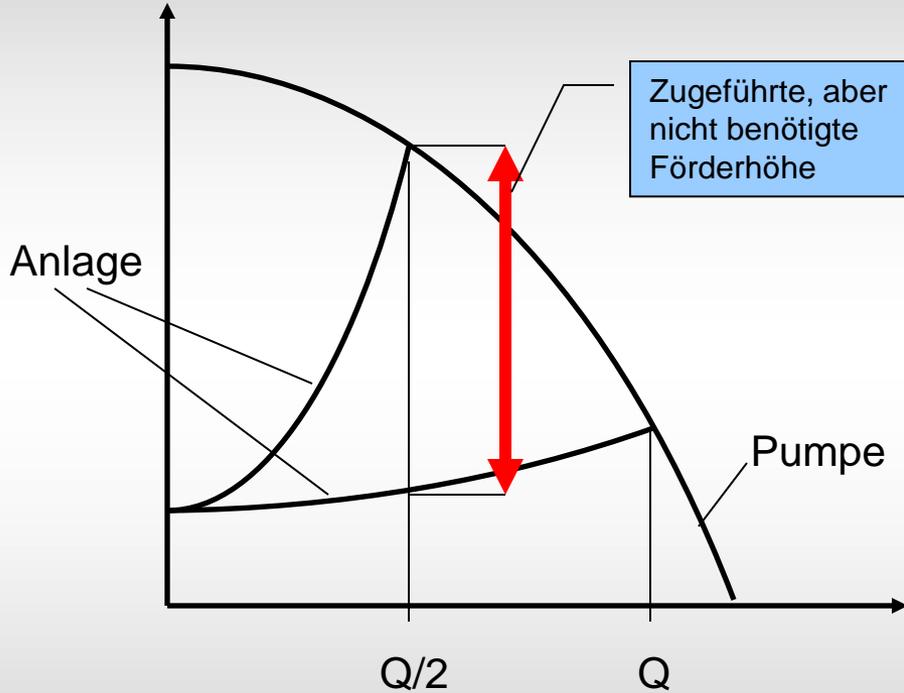


- Große Energieverschwendung, weil bei Drosselung von  $Q_{\text{Nutz}}$  die Abzweigmengung  $Q_{\text{bypass}}$  gefördert

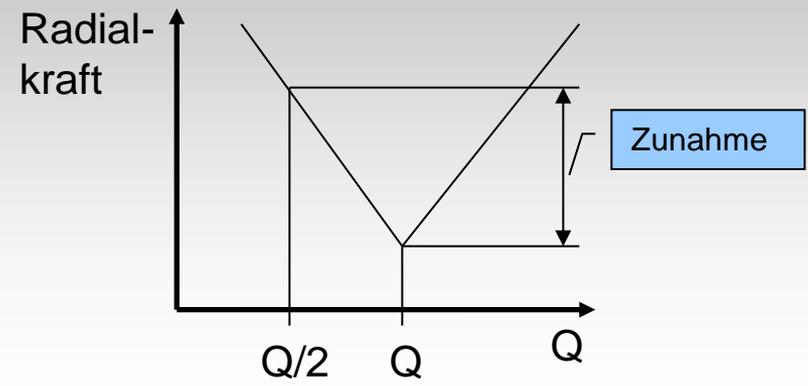


# Drosselung

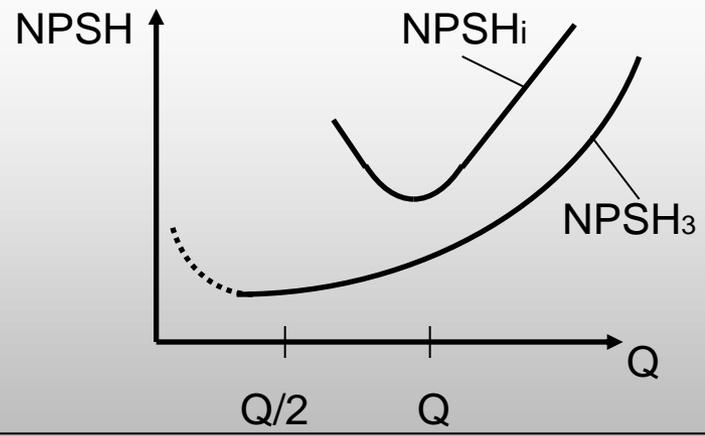
Die Drosselregelung verbraucht sehr viel Energie



Die Radialkräfte steigen (im "Tonnen"-Bereich!)



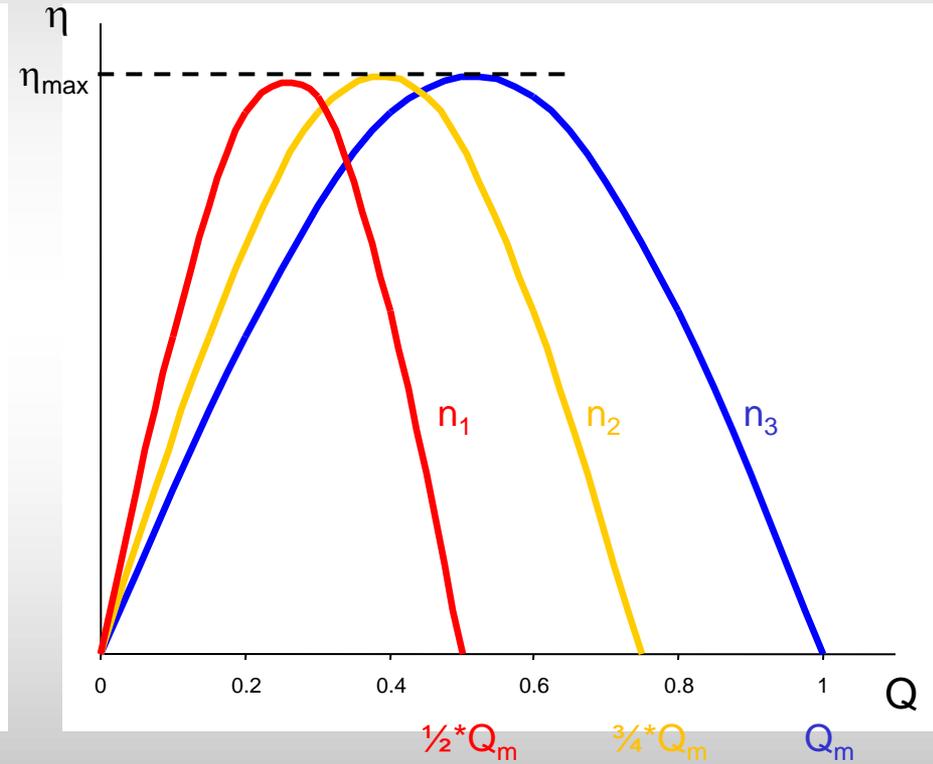
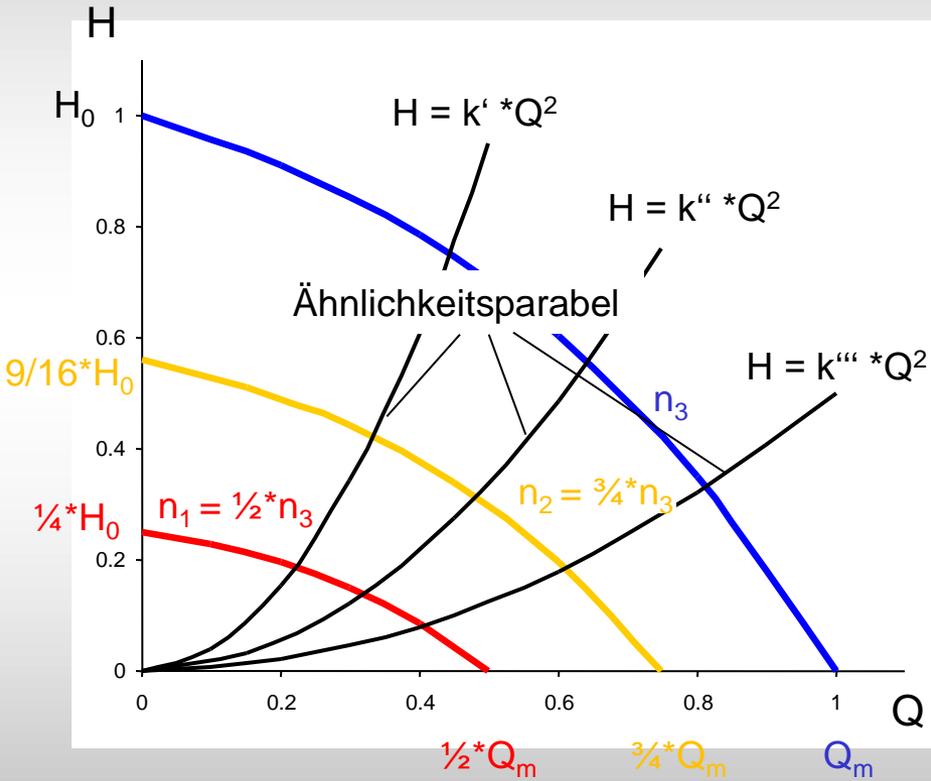
Die Pumpe läuft in Kavitation, ohne dass man es merkt!



# Drehzahlregelung : Ähnlichkeitsgesetz

$H = k \cdot Q^2$  : Bei Drehzahländerung verschiebt sich ein Punkt auf der Kennlinie entlang einer Parabel!

Die Wirkungsgrade bleiben praktisch gleich.



# Drehzahlregelung

Zur Ermittlung von  $n_2$  wendet man auf  $BP_{neu}$  ( $Q_{neu}, H_{neu}$ ) die Ähnlichkeitsbeziehungen an. Man ermittelt sich die rote Ähnlichkeitsparabel und sucht deren Schnittpunkt SP mit der  $n_1$ -Pumpenkennlinie. Man nimmt

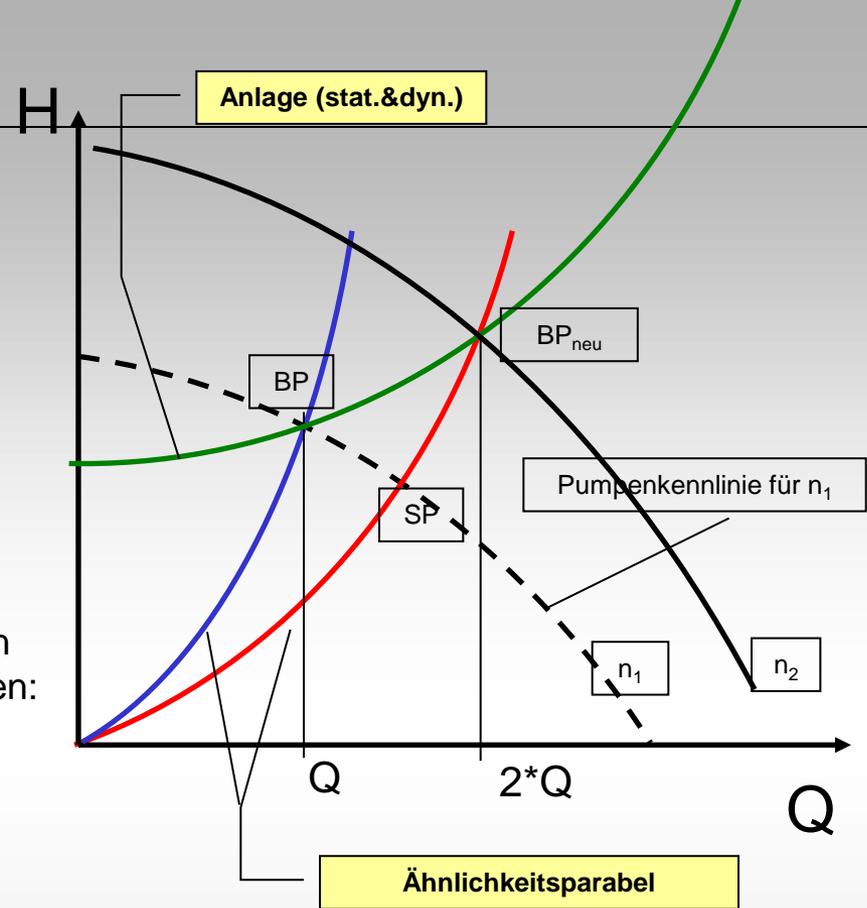
$$\frac{H_{neu}}{H_2} = \frac{Q_{neu}^2}{Q_2^2}$$

und löst sie auf nach  $H_2$ :

$$H_2 = \frac{H_{neu}}{Q_{neu}^2} Q_2^2$$

Da  $H_{neu}$  und  $Q_{neu}$  ja aus  $BP_{neu}$  bekannt sind, kann man eine Wertetabelle für die rote ÄP anschreiben:

$Q_2$	wähle	wähle	wähle	wähle
$H_2$	berechne	berechne	berechne	berechne



Man wählt beliebige  $Q_2$  und berechnet  $H_2$  und zeichnet damit die rote ÄP, die zwangsläufig durch  $BP_{neu}$  geht. Den Schnittpunkt dieser roten ÄP mit der  $n_1$ -Pumpenkennlinie liest man ab:  $Q_{SP}, H_{SP}$

Jetzt kann man die Drehzahl ausrechnen, die zu  $BP_{neu}$  bzw. zu der durch  $BP_{neu}$  gehenden  $n_2$ -Pumpenkennlinie gehört:

$$\text{Aus } \frac{Q_{SP}}{Q_{BPneu}} = \frac{n_1}{n_{neu}} \quad \text{folgt} \quad n_{neu} = n_1 \cdot \frac{Q_{neu}}{Q_1}$$

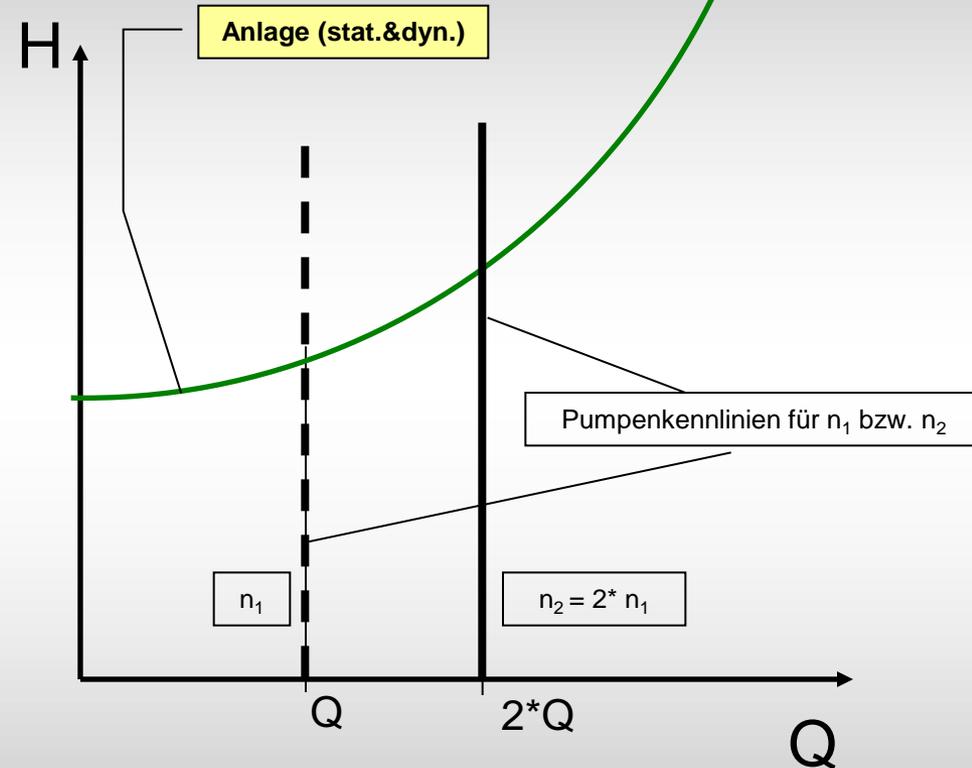


# Drehzahlregelung : Sonderfall Verdrängerpumpen

Eine Ähnlichkeitsparabel gibt es nicht, weil H durch den Gegendruck festgelegt wird. Es gilt also nur die Ähnlichkeitsbeziehung für den Förderstrom:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

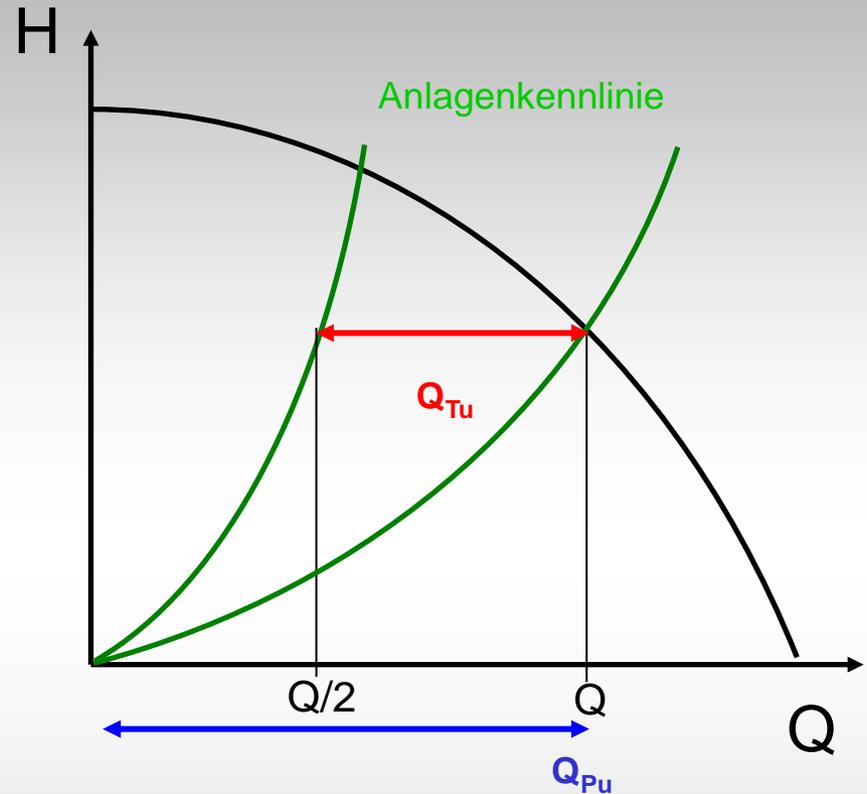
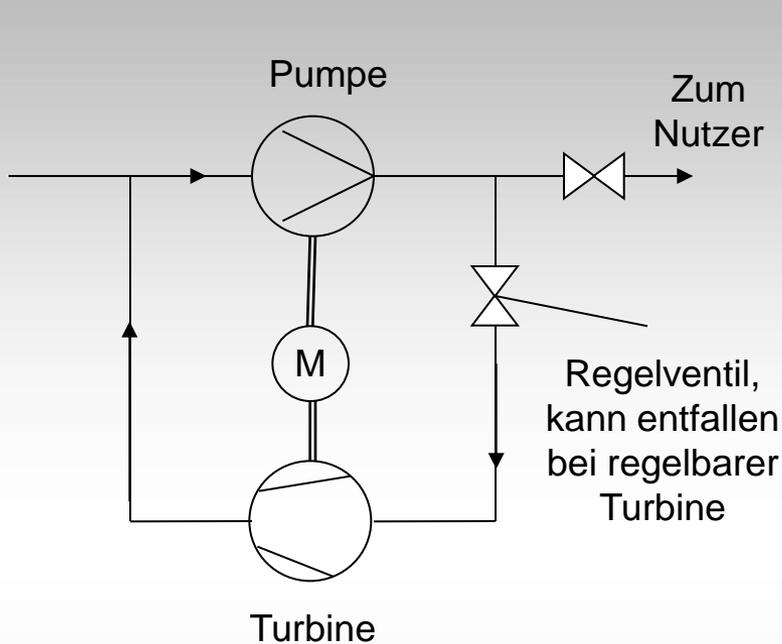
aus der sofort die jeweils gesuchte Größe, egal ob n oder Q berechnet werden kann.



**Hinweis:** Überdrucksicherung vorsehen!



# Regelung: Bypass - Hydraulischer Kurzschluss



Bei **variablem** Volumenstrom:

- Pumpe fährt **immer im optimalen Betriebspunkt**:
  - optimaler Wirkungsgrad, keine Radialkraft, minimales NPSH<sub>i</sub>
- **Förderhöhe bleibt** erhalten (im Unterschied zu Drehzahlregelung)



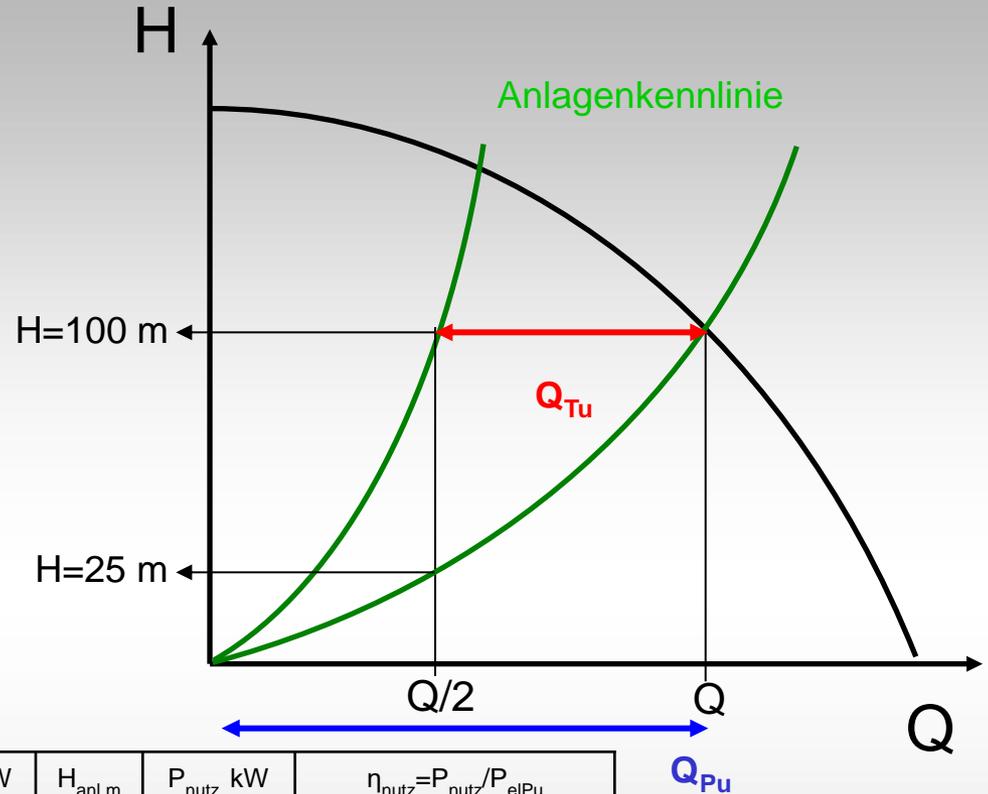
# Regelung: Bypass - Hydraulischer Kurzschluss

Beispiel :  $Q$  wird von  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  reduziert.

**Drosselung :**  
**Anlagenwirkungsgrad = 12% !**

**Hydraulischer Kurzschluss :**  
**Anlagenwirkungsgrad = 69% !**

**Drehzahlregelung:**  
**Anlagenwirkungsgrad = 85% !**  
 ...aber Förderhöhe geht zurück



	$Q_{Pu}$ m <sup>3</sup> /s	$H_{Pu}$ m	$\eta$	$P_{eIPu}$ kW	$H_{anl}$ m	$P_{nutz}$ kW	$\eta_{nutz} = P_{nutz} / P_{eIPu}$
Volllast	1,00	100	0,85	1.176	100	1000	0,85
50 % Drosselung	0,50	125	0,60	1.042	25	125	0,12
50 % Drehzahlregelung	0,50	25	0,85	149	25	125	0,85
50 % Turbinieren	1,00	100	0,85	1.176	100	500	
	$Q_{Tu}$	$H_{Tu}$	$\eta$	$P_{elTu}$			$\eta_{nutz} = P_{nutz} / (P_{eIPu} - P_{elTu})$
	0,50	100	0,90	450	100	500	0,69



# Nachträgliche Anpassung des Betriebspunkts

Bei der Inbetriebnahme der Anlage wird bemerkt, dass die Pumpe zu groß ist.

## WAS IST ZU TUN?

- Anpassung der Drehzahl
  - Gut, wenn ohnehin Drehzahlregelung vorgesehen ist.
  - Motor mit anderer Drehzahl einbauen.
  - Drehzahlgestuften Antrieb einbauen.
- Abdrehen des Laufraddurchmessers
  - Ähnlichkeitsgesetze
  - Durch Laufradtausch reversibel
- Pumpe ersetzen

