



Untersuchung fluiddynamischer  
Effekte in Rohrleitungssystemen

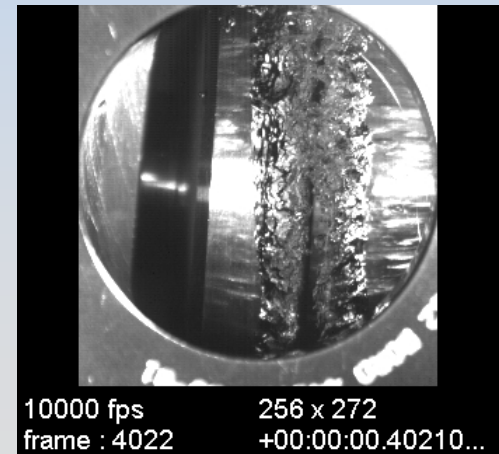
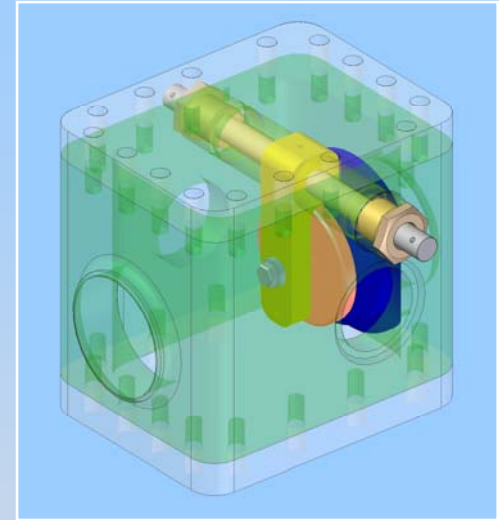
Unbefugten  
Zutritt verboten

Lehrstuhl für Prozessmaschinen  
und Anlagentechnik, Erlangen  
Dipl.-Ing. A. Ismaier  
Prof. Dr.-Ing. E. Schlücker

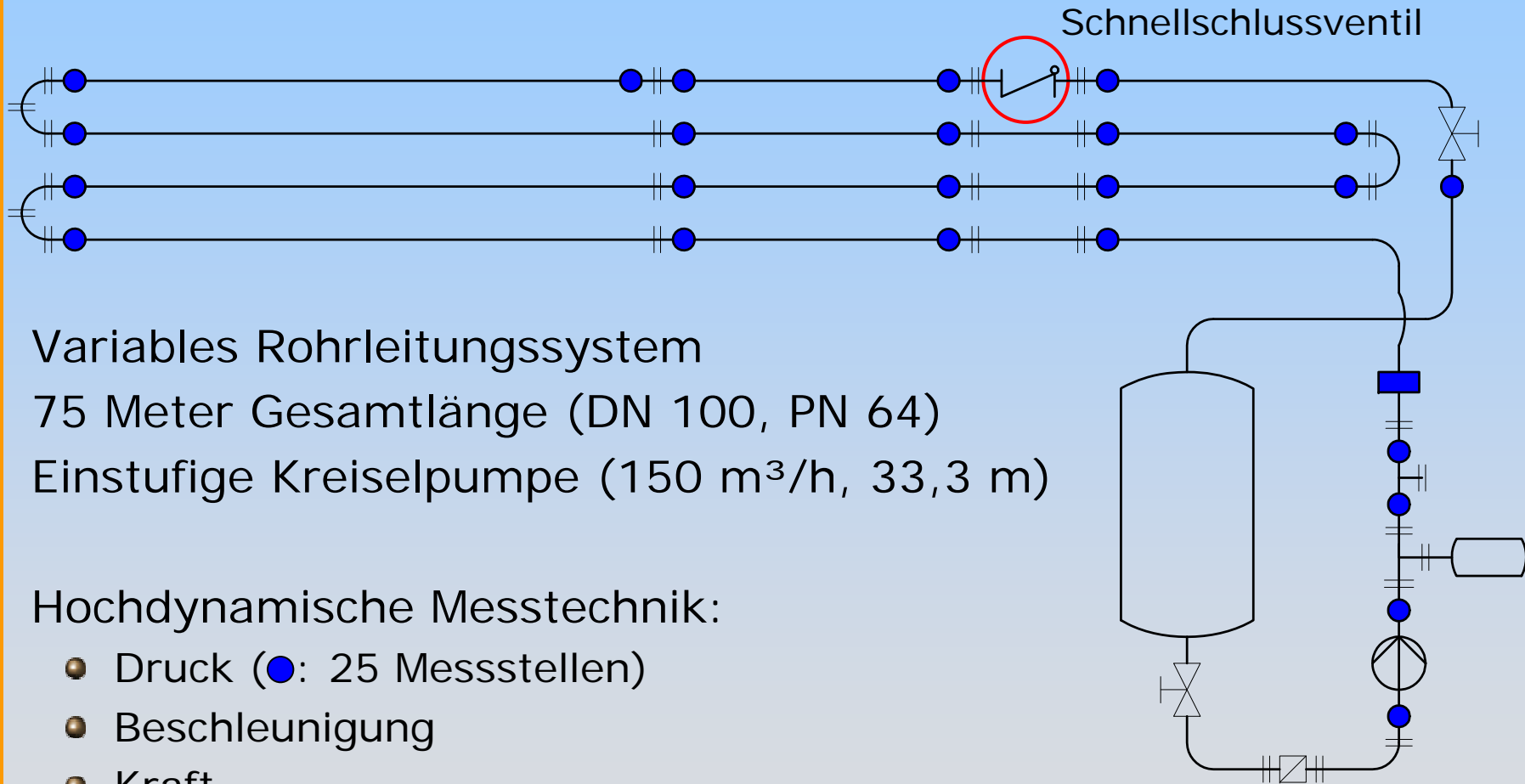


# Inhalt des Vortrages

- Versuchsanlage am iPAT
- Druckpulsation von Kreiselpumpen
- Der Joukowsky-Stoß und seine Grenzen
- Film mit einer Hochgeschwindigkeitskamera
- Wechselwirkung zwischen Druckstoß und Kreiselpumpe
- Zusammenfassung und Ausblick



# Versuchsanlage am iPAT



- Variables Rohrleitungssystem

- 75 Meter Gesamtlänge (DN 100, PN 64)

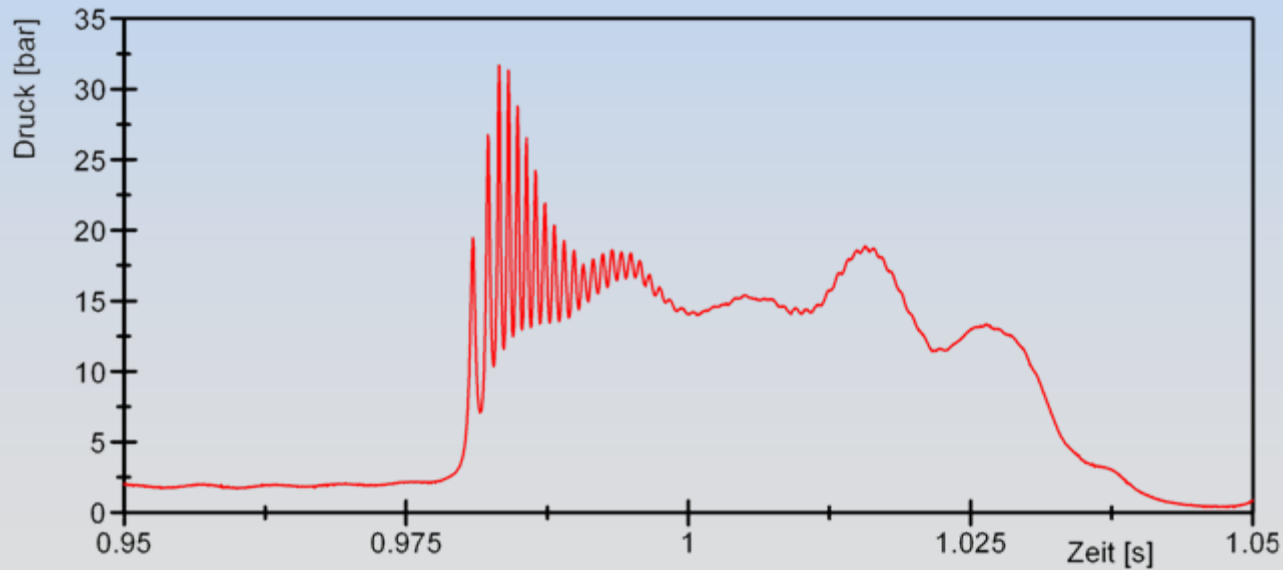
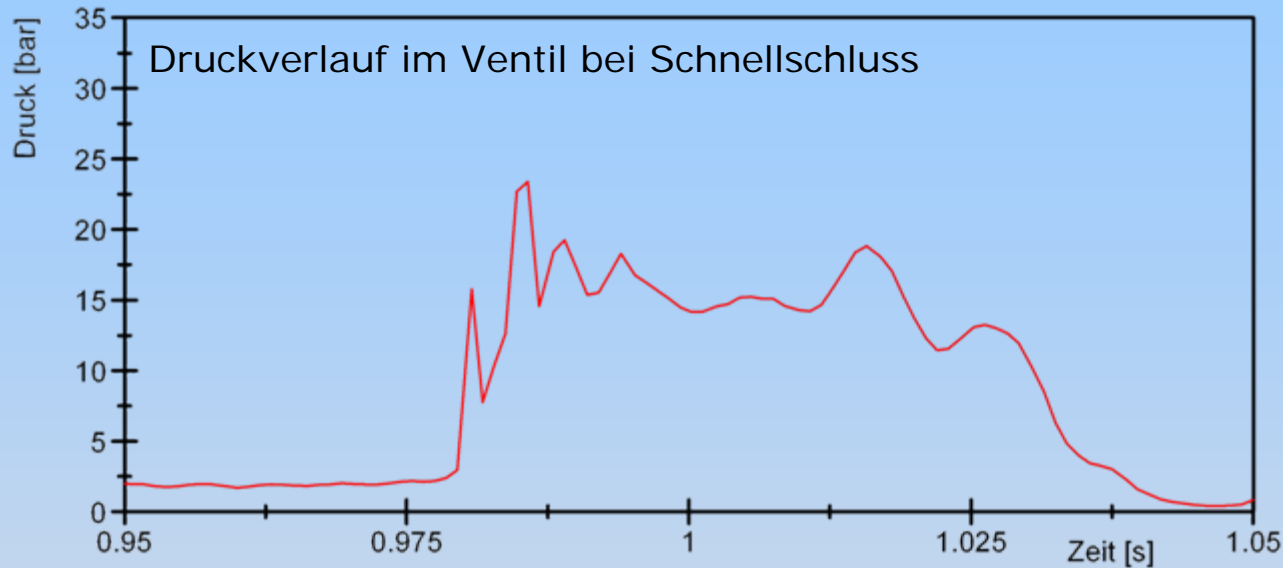
- Einstufige Kreiselpumpe (150 m<sup>3</sup>/h, 33,3 m)

- Hochdynamische Messtechnik:

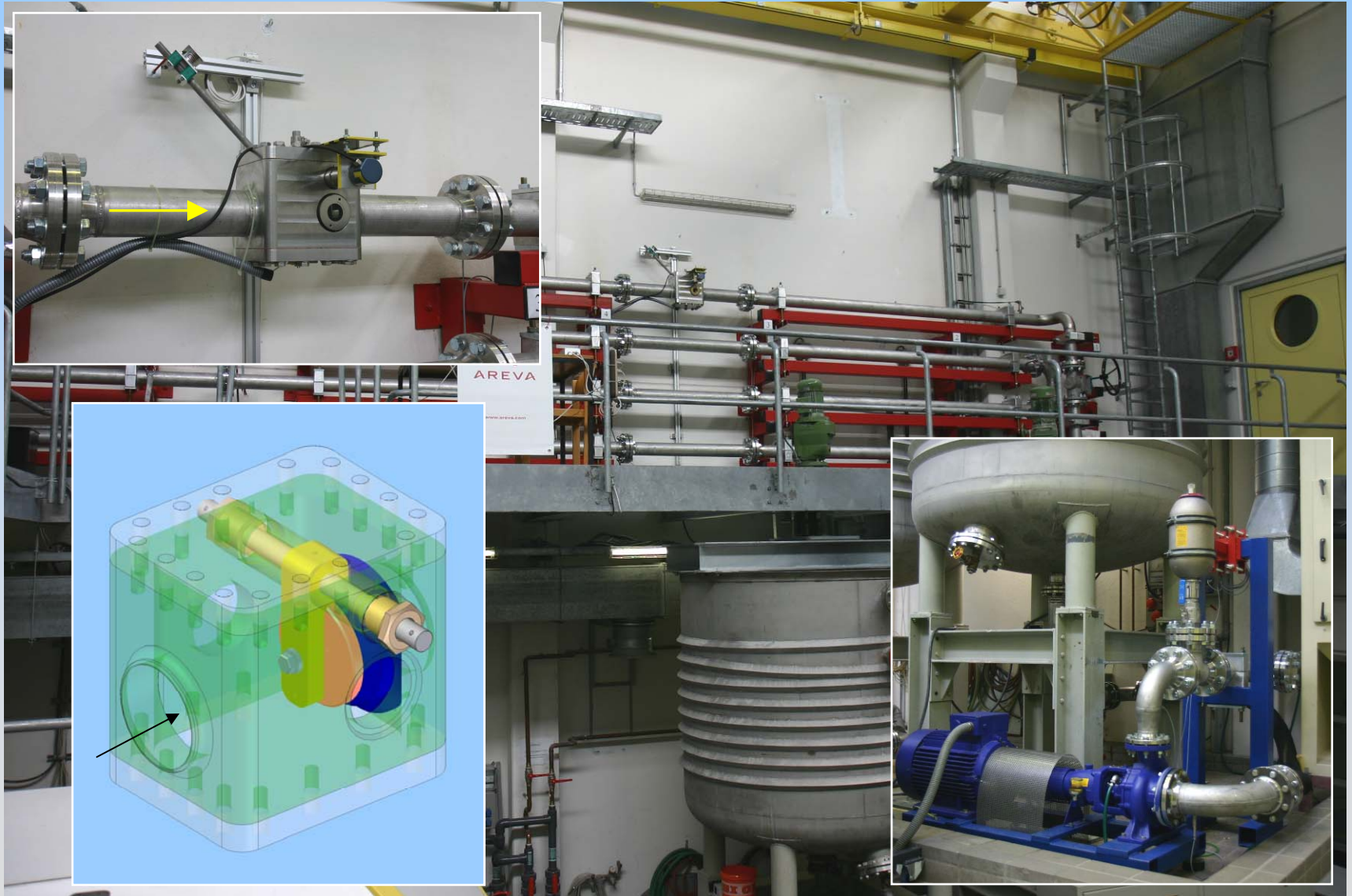
- Druck (●: 25 Messstellen)
- Beschleunigung
- Kraft

→ Messfrequenz min. 20.000 Hz

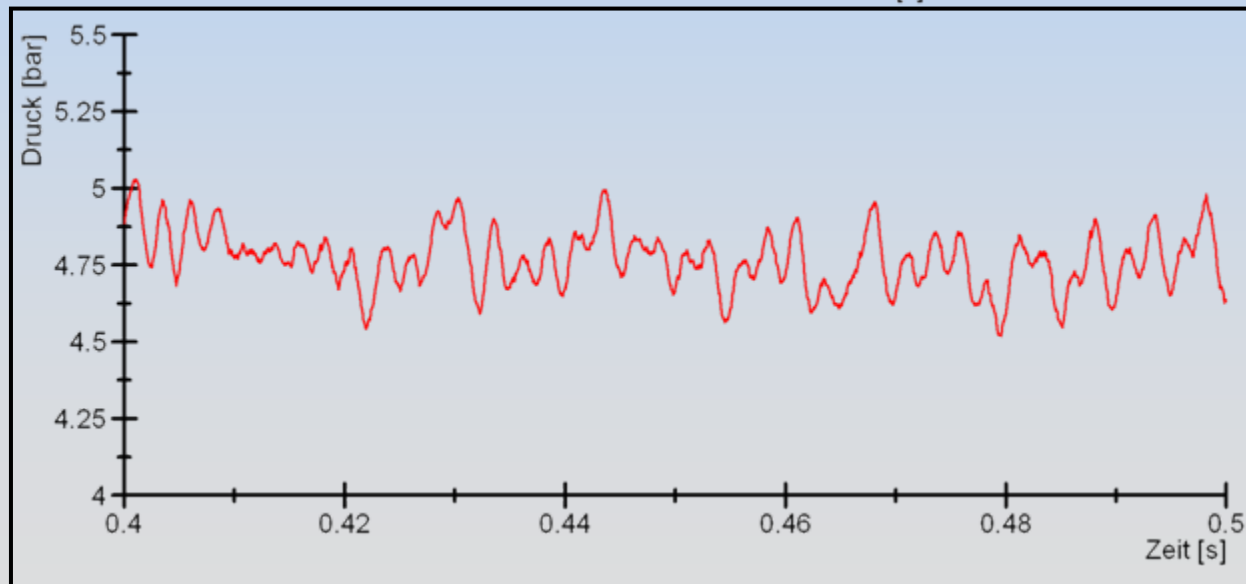
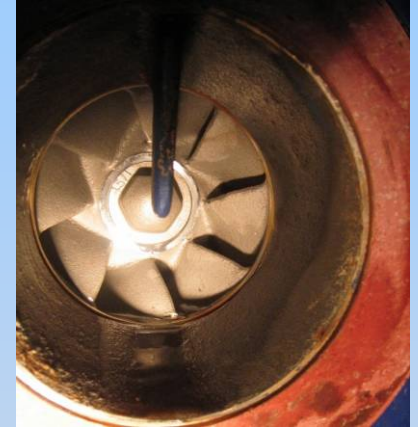
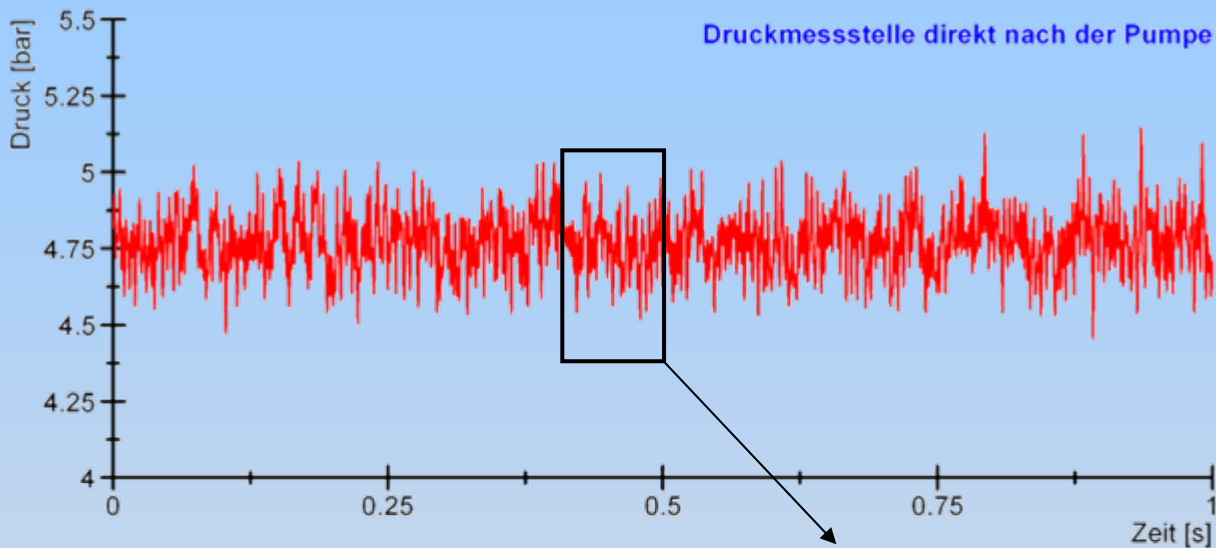
# Warum hochdynamische Messtechnik?



# Versuchsanlage am iPAT

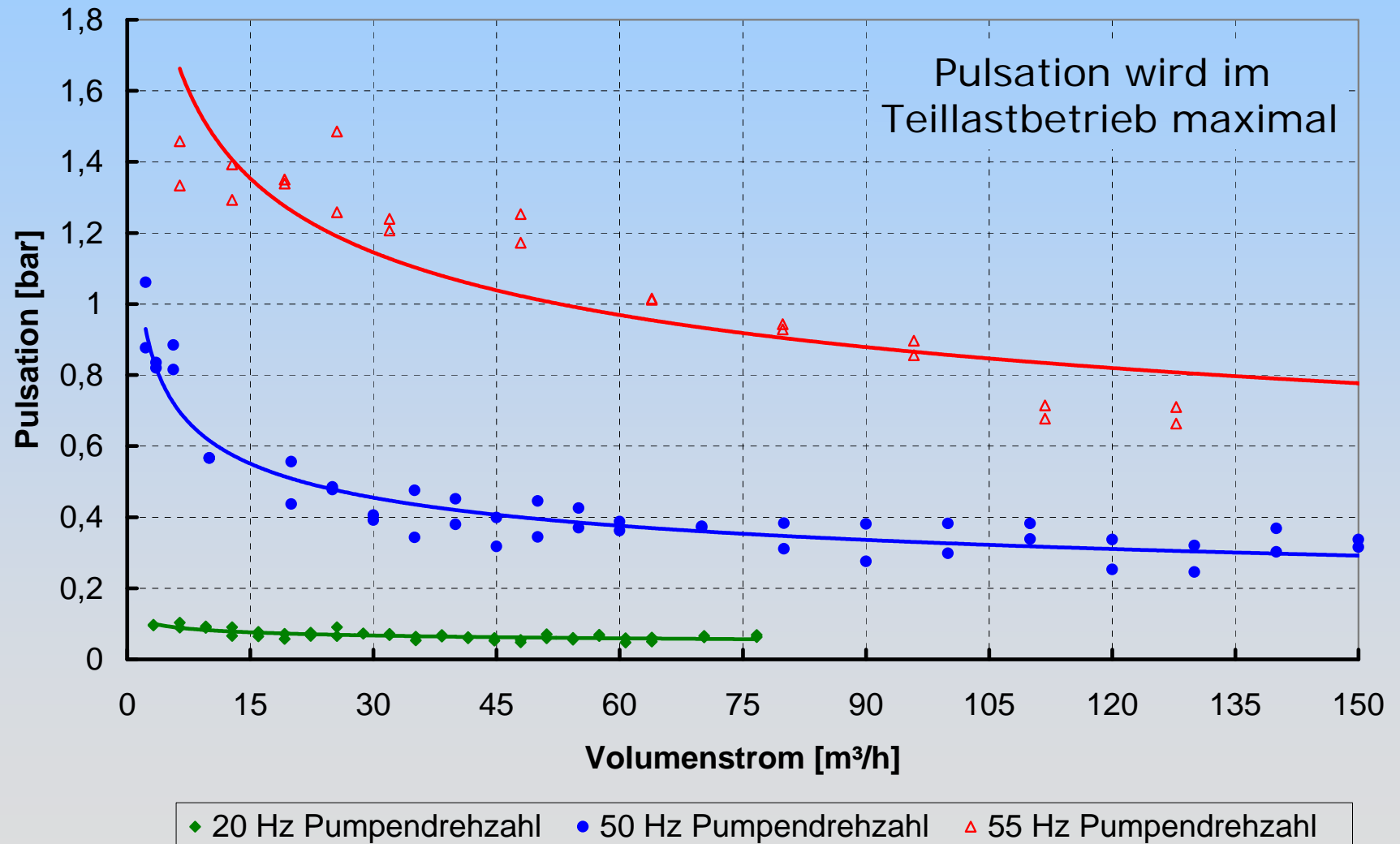


# Druckpulsation von Kreiselpumpen



# Pulsation ist vom Betriebspunkt abhängig

Einstellung des Volumenstroms durch Drossel



# Entstehung von Druckstößen

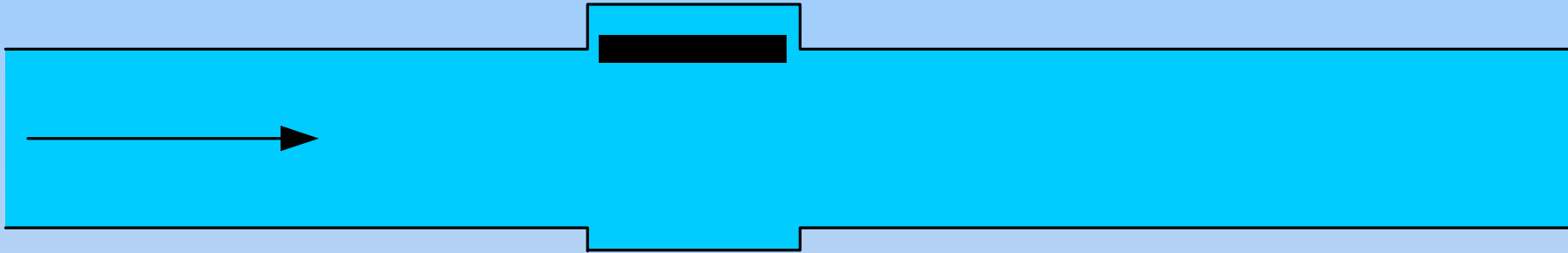
---

Grundsätzlich führt jede schnelle Änderung des stationären Betriebszustandes zu Druckstößen:

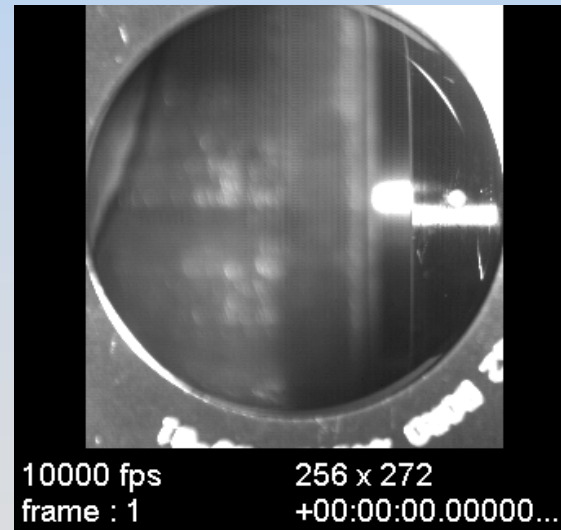
- Regel- und Stellvorgänge
- An- und Abfahrprozesse
- Schnellschluss von Ventilen
- Ausfall von Pumpen
  - Strömungsabriss
  - Schließen von Rückschlagklappen
- Normaler Betrieb von Pumpen
  - Massenstrompulsation bei Verdrängerpumpen
  - Druckpulsation bei Kreiselpumpen



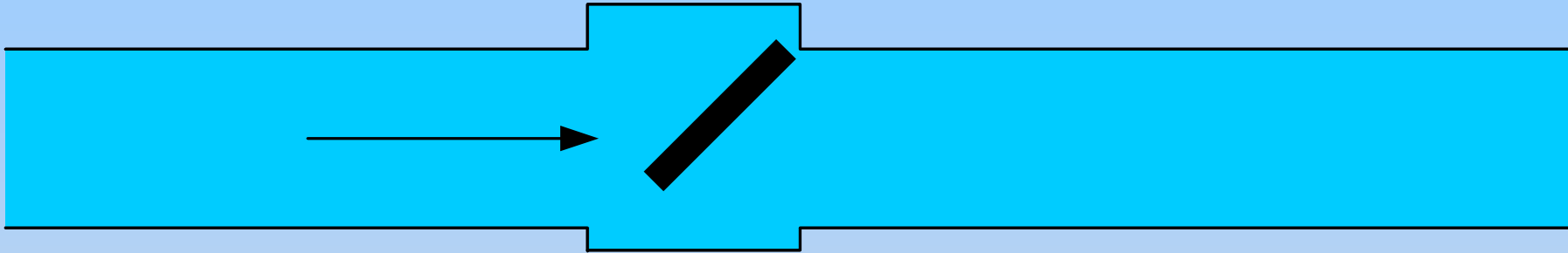
# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil



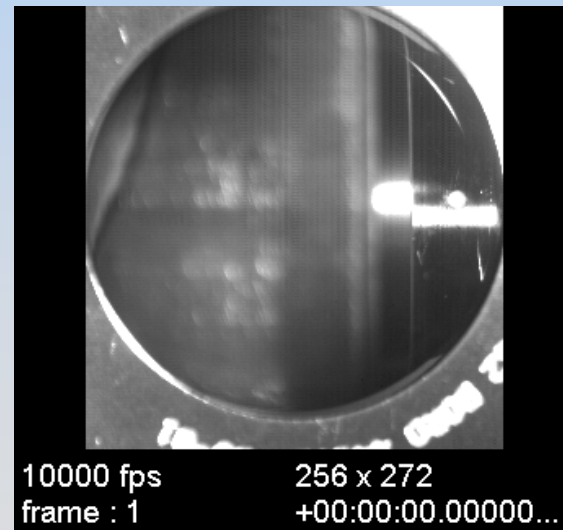
Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



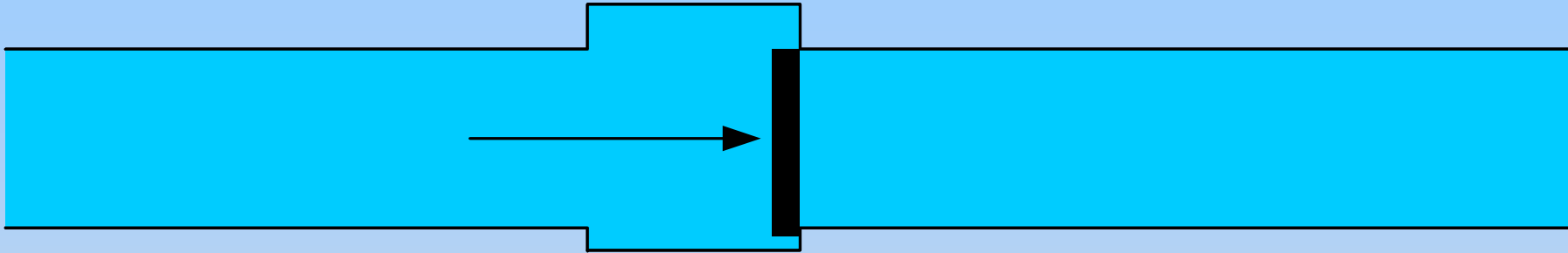
# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil



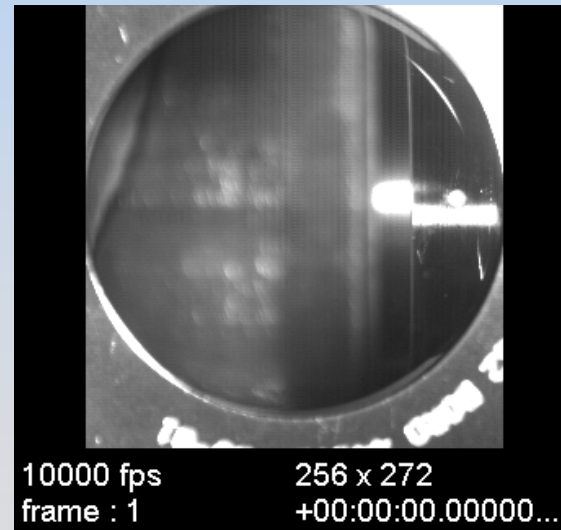
Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



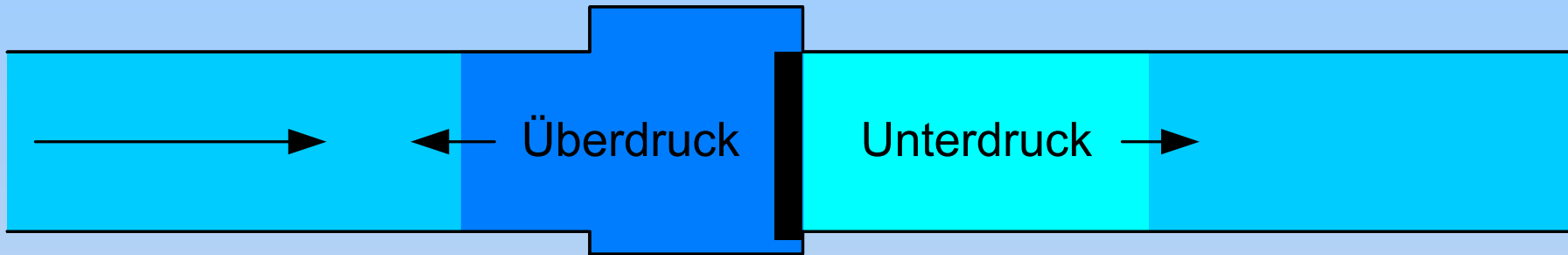
# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil



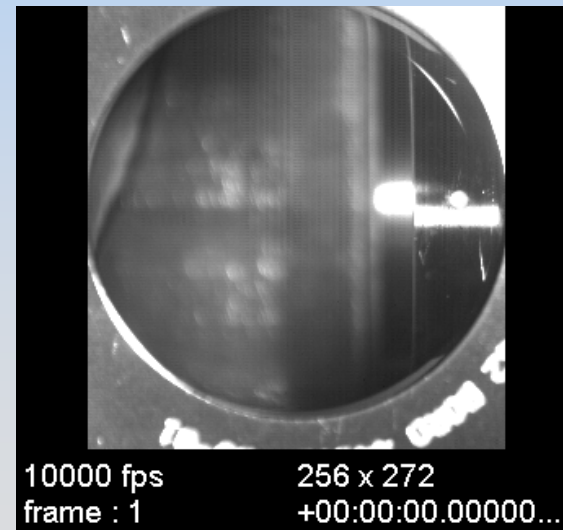
Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



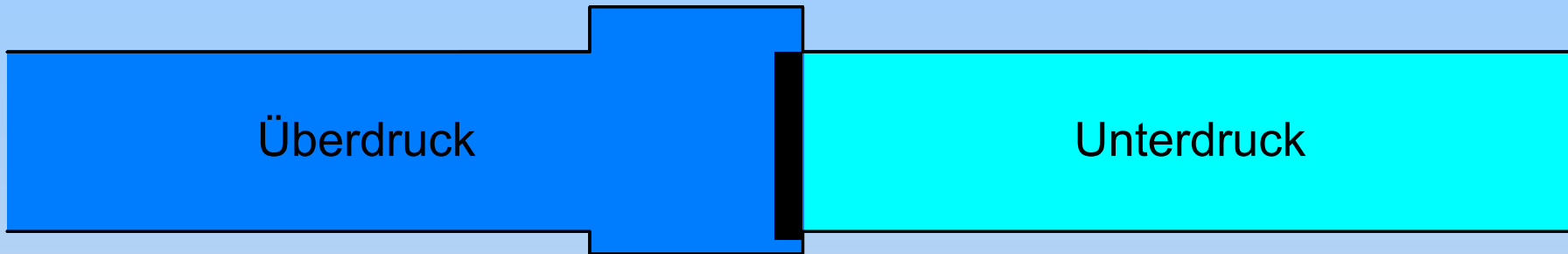
# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil



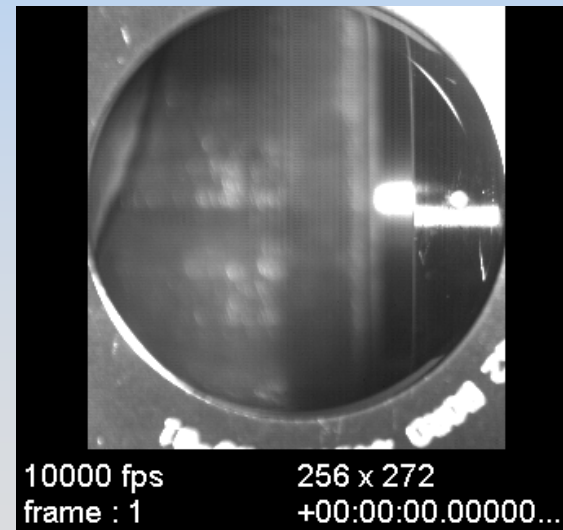
Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



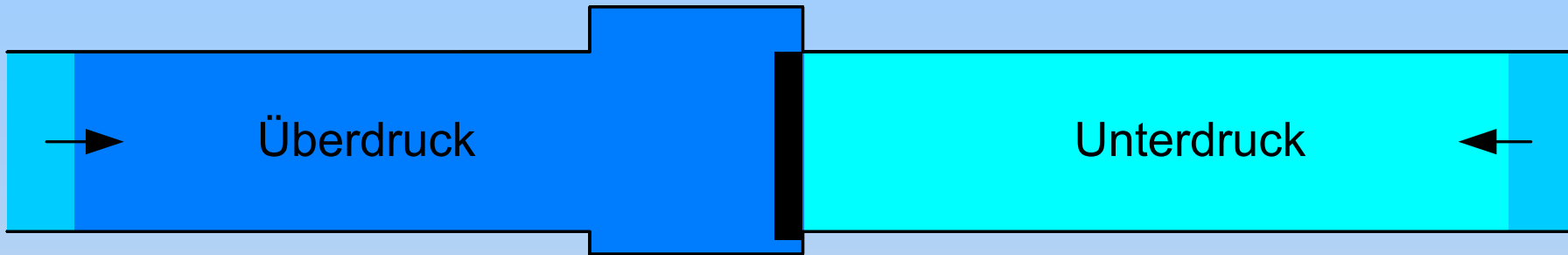
# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil



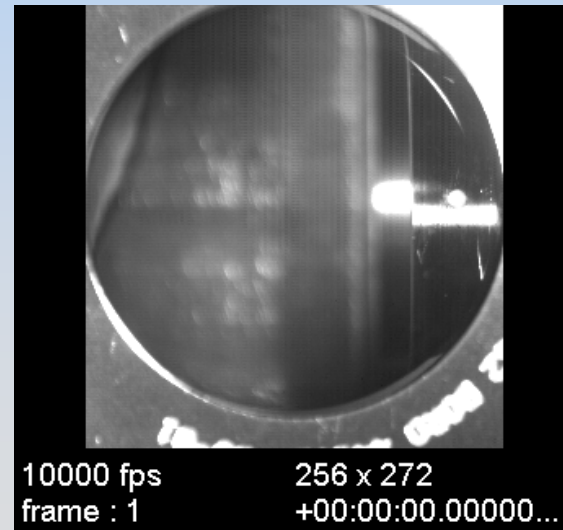
Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



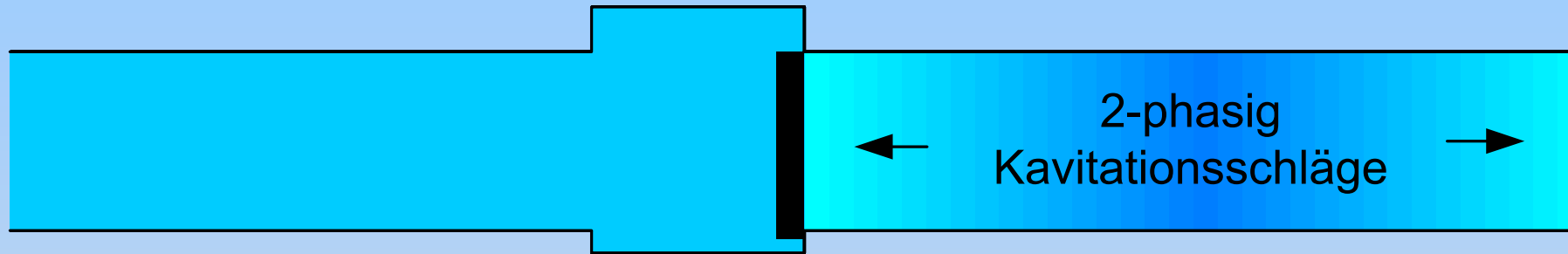
# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil



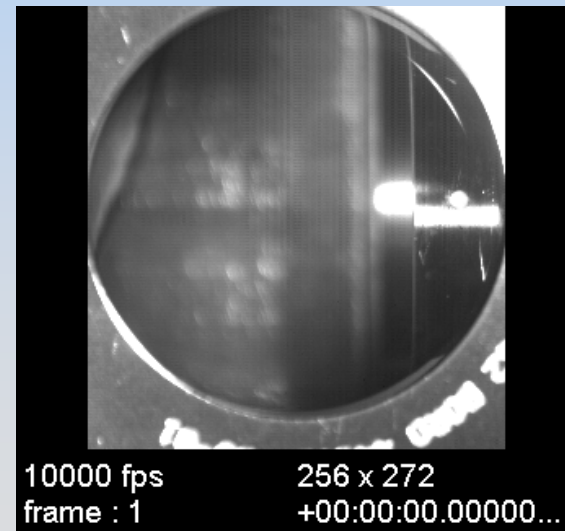
Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



# Detaillierte Vorgänge im Schnellschlussventil

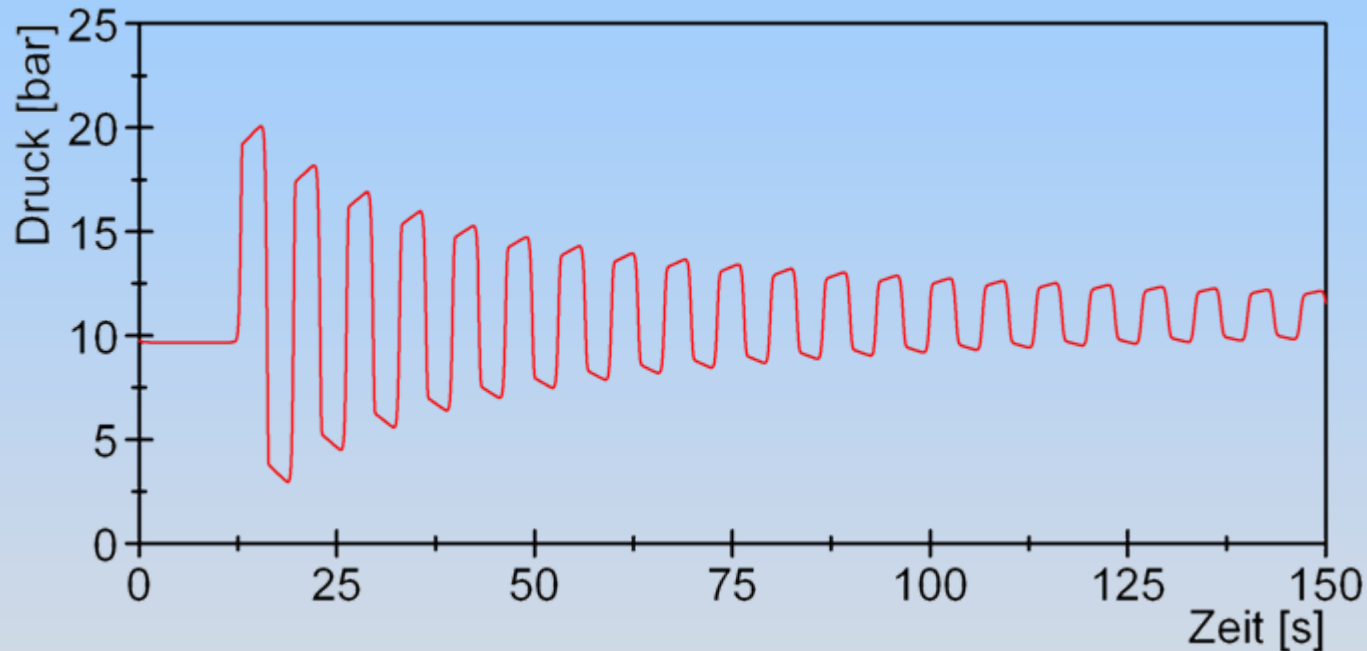


Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (10.000 fps):



# Der Joukowsky-Stoß

Joukowsky-Stoß:  $\Delta p_{\text{Jouk}} = \rho \cdot a \cdot \Delta v$



Harmlose Druckerhöhung oder gefährlicher Druckstoß?

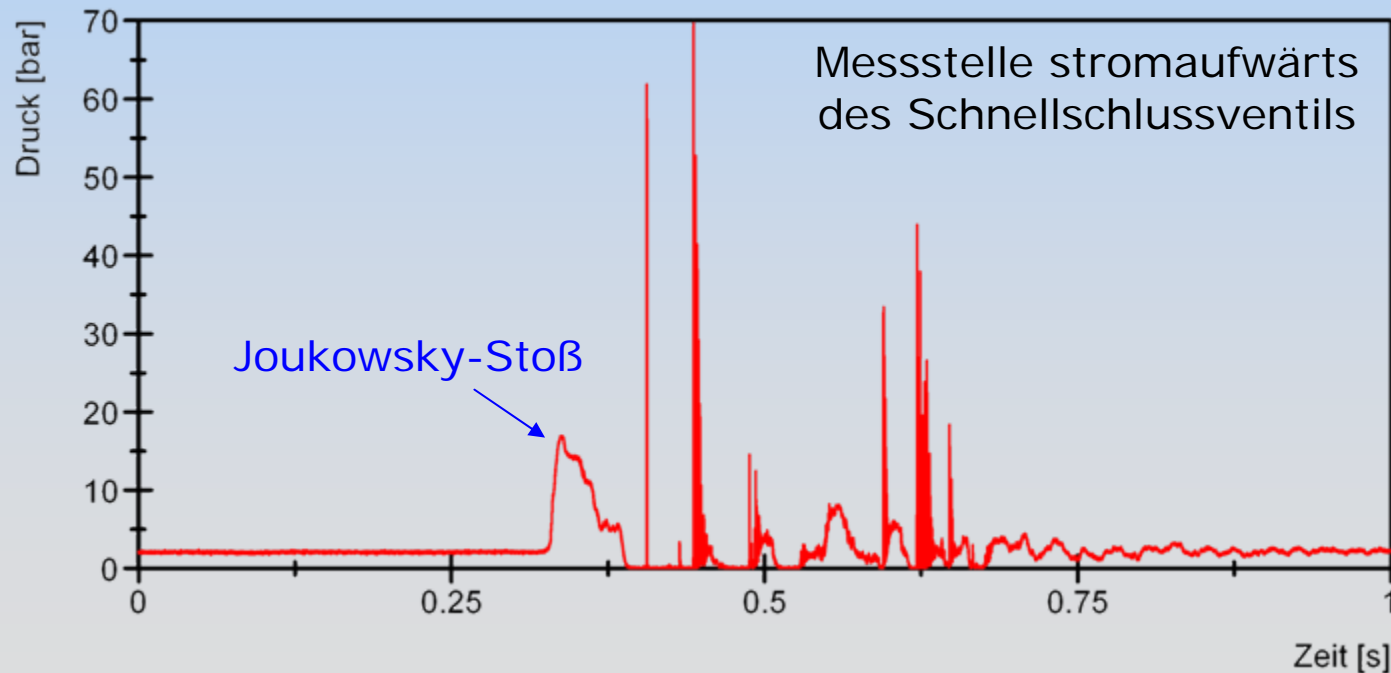
Abhängig vom System! Niederdrucksysteme bzw. große Nennweiten sind meist stärker gefährdet.



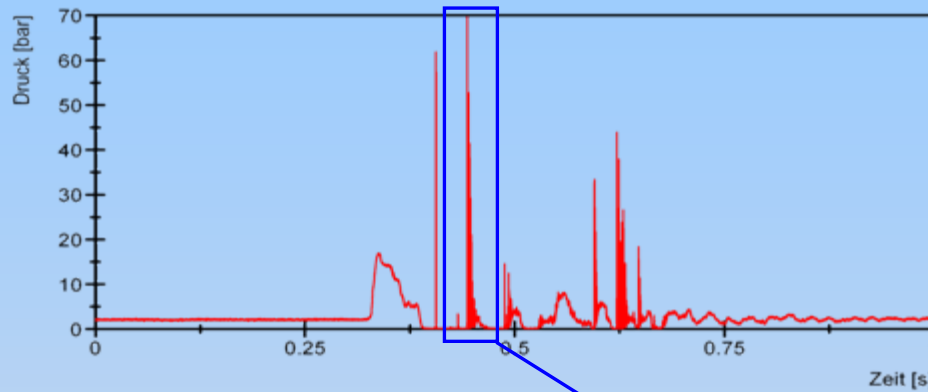
# Joukowsky-Stoß = worst case ?

Der Joukowsky-Stoß kann unter bestimmten Bedingungen deutlich überschritten werden:

- Reibung („line-packing“)
- Überlagerung von Druckwellen (Reflektionen, andere Schwingungserreger im System → Pumpen)
- Kondensationsschläge bzw. Kavitationsrückbildung

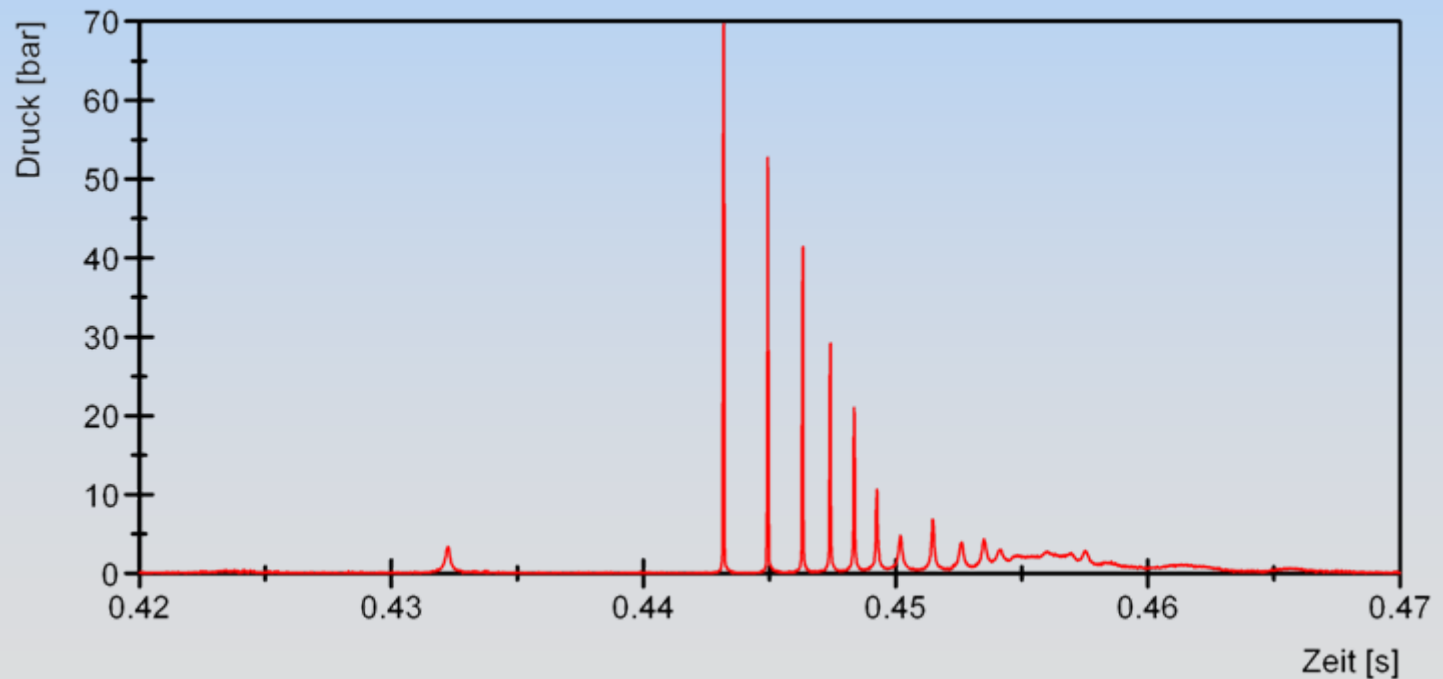


# Joukowsky-Stoß = worst case ?

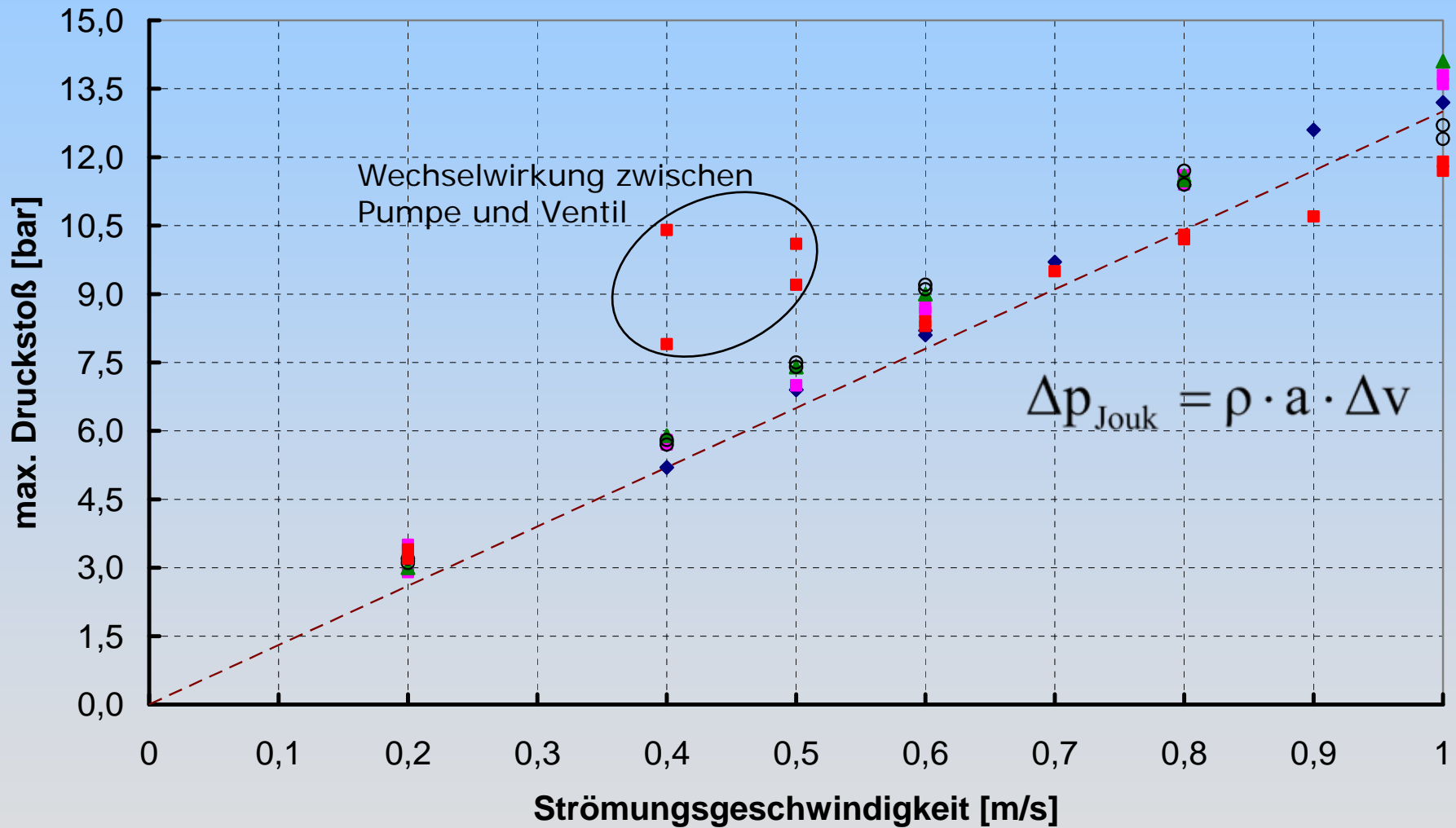


Lokale, extrem kurze  
Druckstöße (< 1 ms)

Besonders gefährdet  
ist Messtechnik



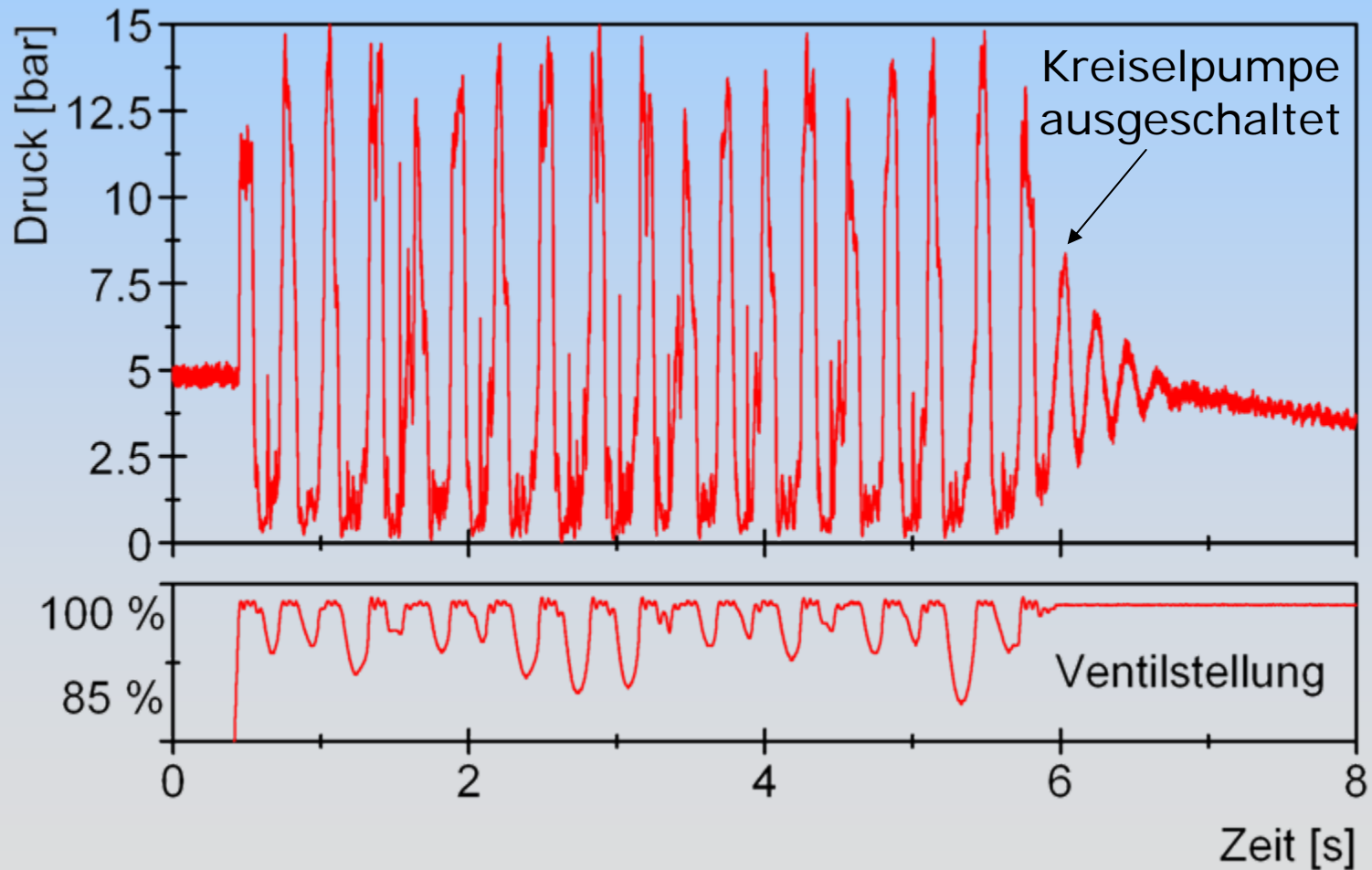
# Joukowsky – Theorie und Praxis



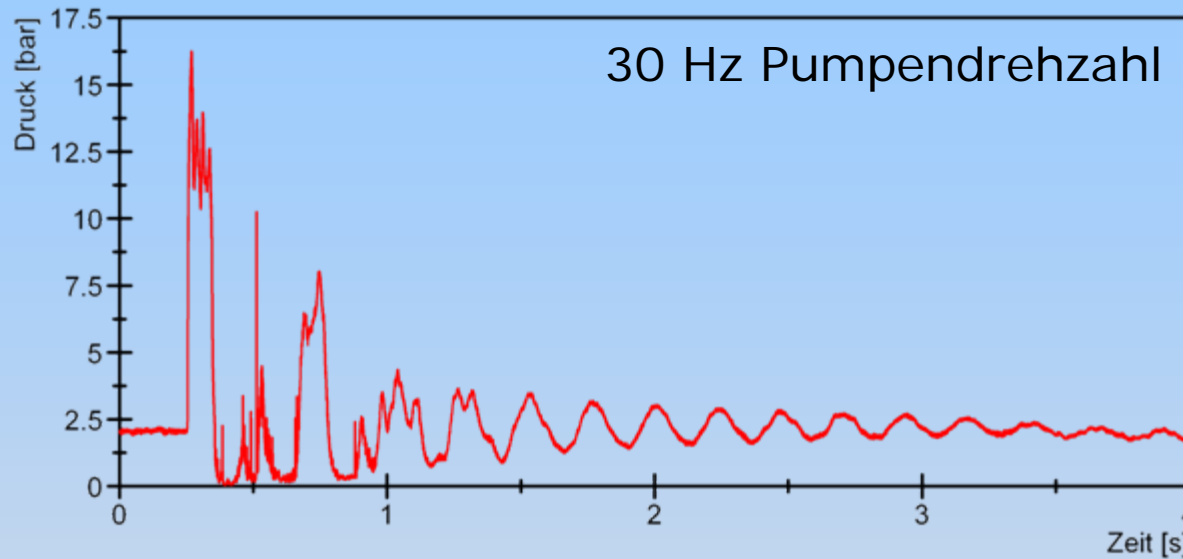
--- Joukowsky      Pumpendrehzahl:    ◆ 10 Hz    ■ 20 Hz    ▲ 30 Hz    ○ 40 Hz    ■ 50 Hz

# Wechselwirkung

Wechselwirkung zwischen Kreiselpumpe und frei beweglicher Rückschlagklappe

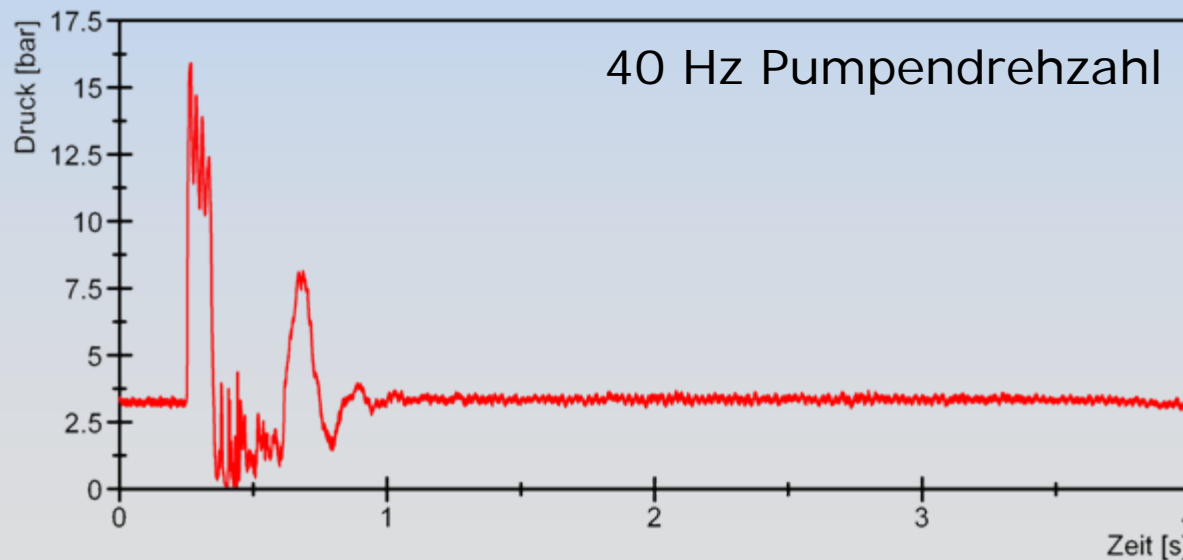


# Dämpfende Wirkung der Kreiselpumpe



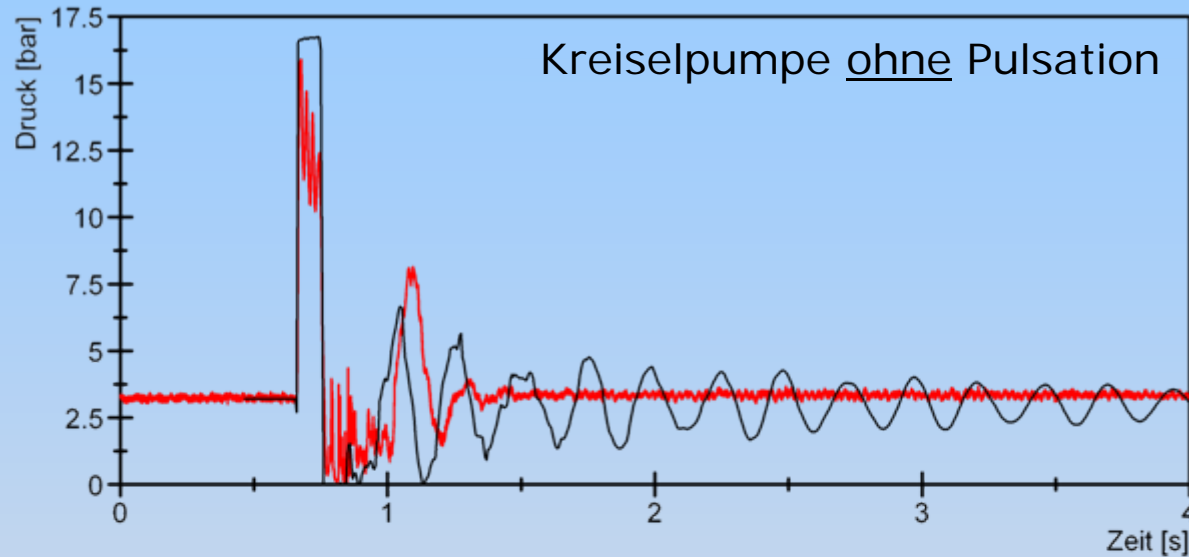
Jeweils 1,0 m/s  
Strömungsgeschw.

Unterschiedliche  
Pumpendrehzahl  
(Bei 40 Hz größere  
Pulsationsamplitude  
als bei 30 Hz)



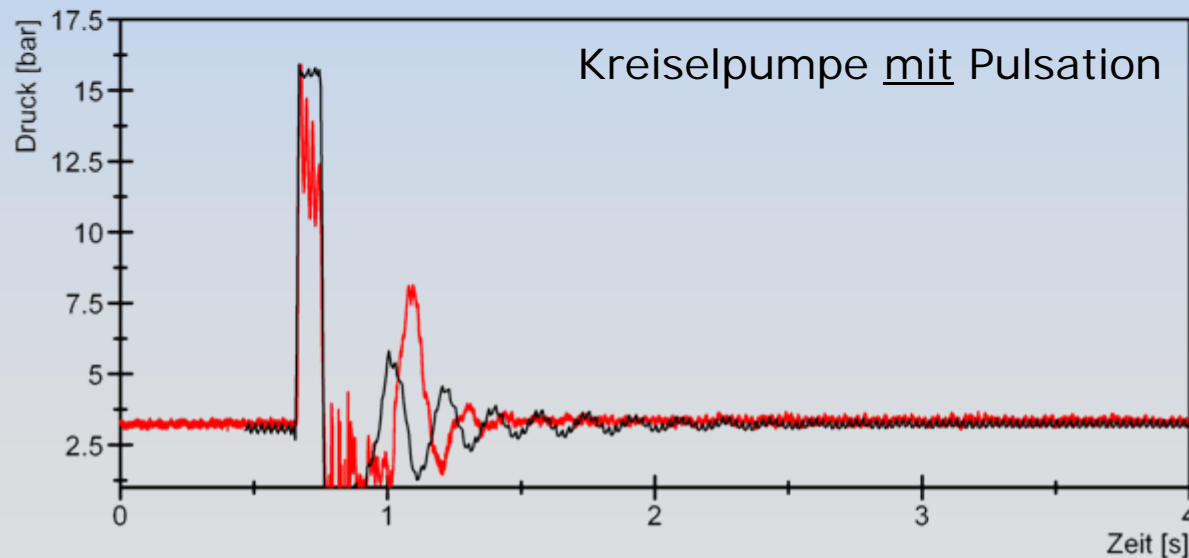
Druckpulsation der  
Kreiselpumpe kann  
Druckstöße dämpfen!

# Simulation (40 Hz Pumpendrehzahl)



Schwarz: Simulation  
Rot: Messung

Simulation mit 1-D  
Programm



Kreiselpumpen-  
pulsation wird mit  
einer Sinusfunktion  
beschrieben

# Druckwellenreflexion

## ● Idealisierte Extremfälle vollständiger Reflexion:

Negative Reflektion an **offenem** Rohrende



Beispiel: Offener Behälter

Positive Reflektion an **geschlossenem** Rohrende

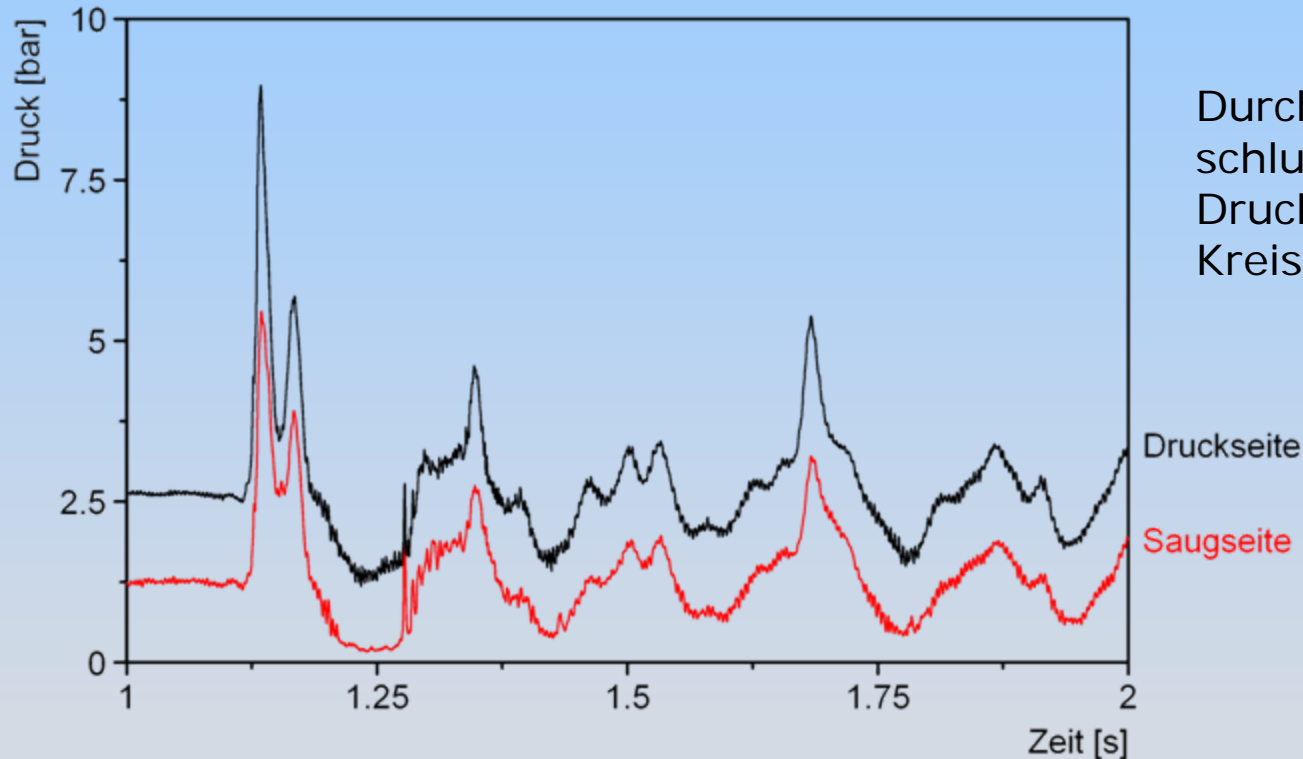


Beispiel: geschlossenes Ventil

**Wie interagiert ein Druckstoß mit einer Kreiselpumpe?**

# Druckstoß und Kreiselpumpe

● Kreiselpumpe offenes oder geschlossenes Ende?



Druckwelle läuft durch → offenes Rohrstück

Allerdings Abschwächung der Druckstoßamplitude

→ **Kreiselpumpe = Druckverlustbeiwert für Druckstöße**



# Zusammenfassung und Ausblick

---

- Auch Kreiselpumpen können ein System anregen  
→ Numerik: Kreiselpumpe sollte nicht als konstante Druckrandbedingung modelliert werden
- Joukowsky-Formel gut für erste Abschätzung,  $p_{\text{Jouk}}$  kann jedoch deutlich übertroffen werden
- Kreiselpumpe ist hydraulisch offen für Druckstöße
- Weitere Untersuchungen werden folgen: Einfluss von Blenden, Rohr-Bögen, dynamischer Reibung ...



Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!

Unbefugten  
Zutritt verboten

Lehrstuhl für Prozessmaschinen  
und Anlagentechnik, Erlangen  
Dipl.-Ing. A. Ismaier  
Prof. Dr.-Ing. E. Schlücker

