



# Hydronauten

Technologie für ruhigere und effizientere  
Pumpen- und Rohrleitungssysteme

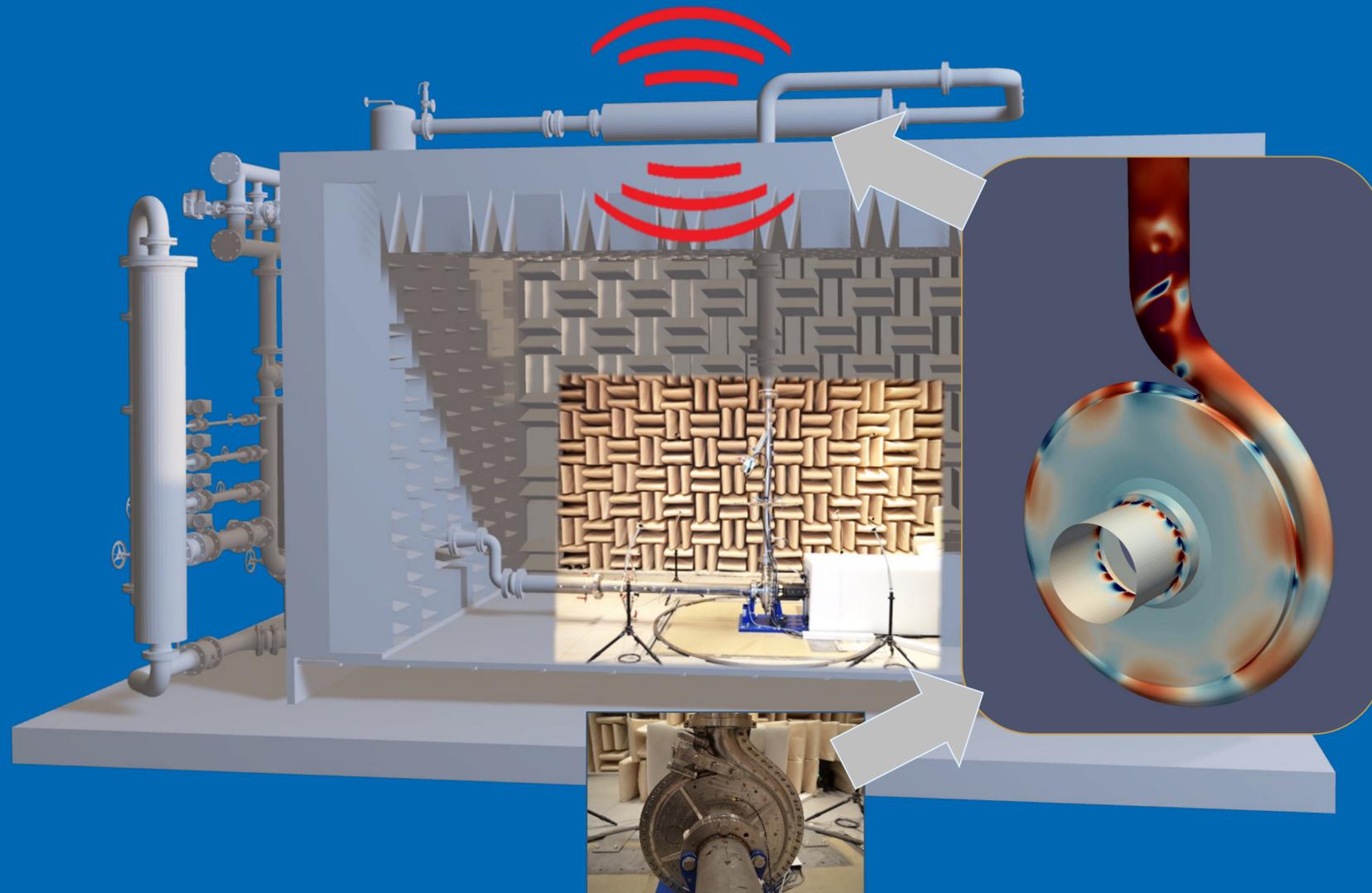


# Aktive und adaptive Reduktion von Druckpulsationen und Rohrleitungsschwingungen in einem Abwasserpumpwerk

- + Motivation & Problembeschreibung
- + Analyse des Ausgangszustandes
- + Beschreibung des Lösungsansatzes
- + Erzielte Ergebnisse



## Druckpulsationen sind Ursache für zahlreiche Probleme

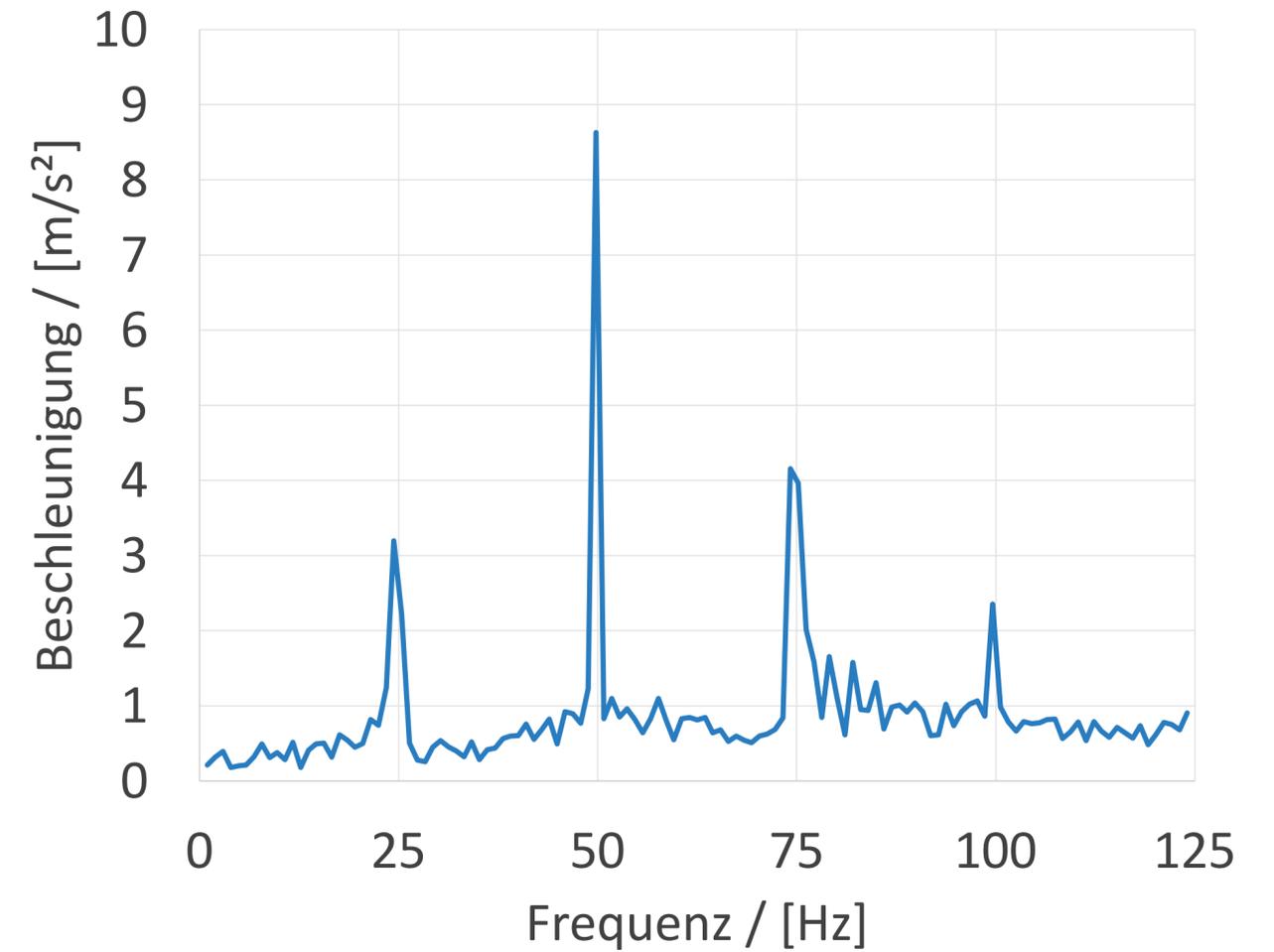
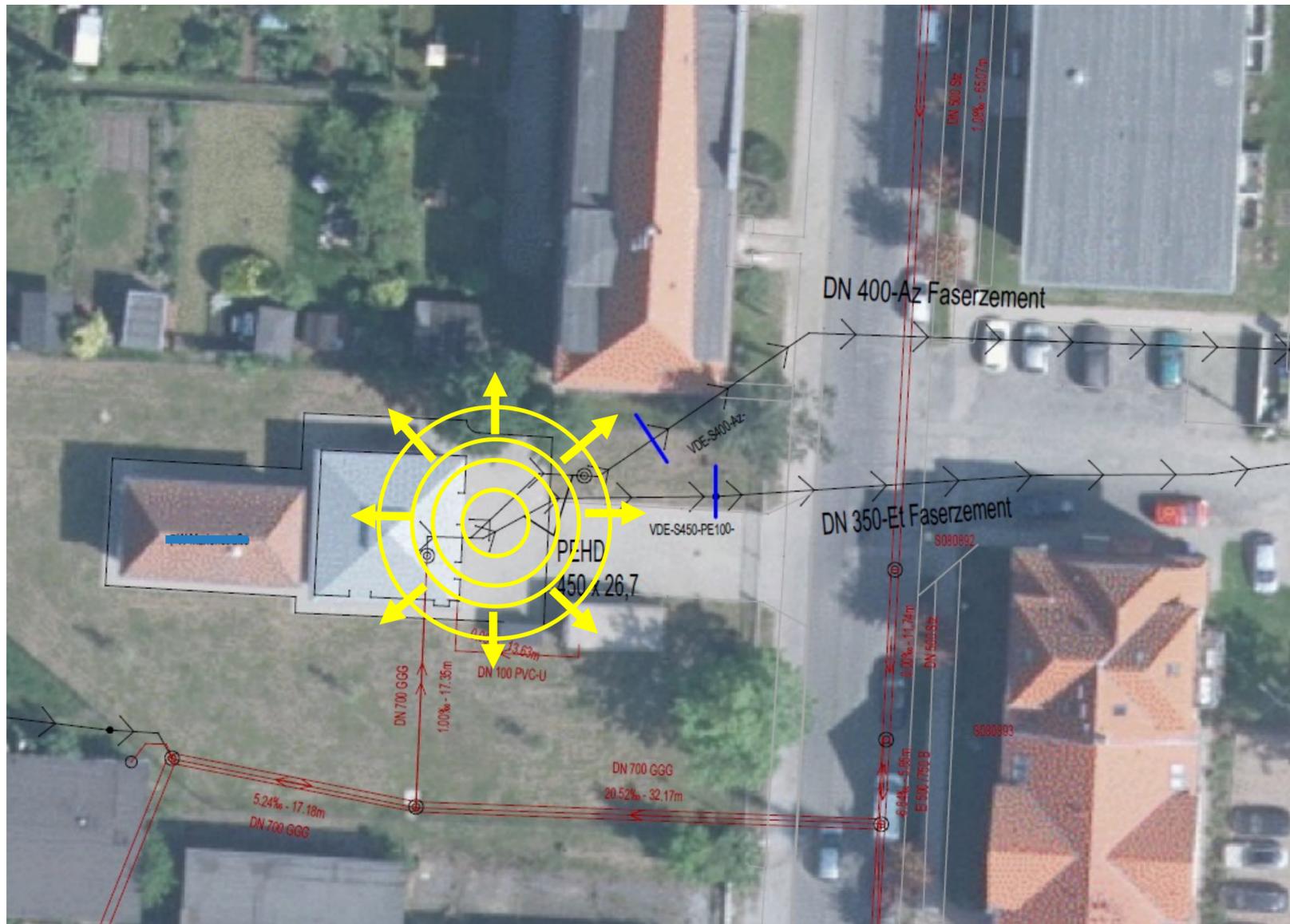


- + Vibrationen → Lebensdauer sinkt
- + Lärm → psychische Erkrankungen/Stress
- + Drehzahlgeregelte Pumpen → Resonanzgefahr
- + Ungeregelte Pumpen → hoher Energieverbrauch
- + Druckpulsationen → Qualität von Fertigungsprozessen beeinträchtigt



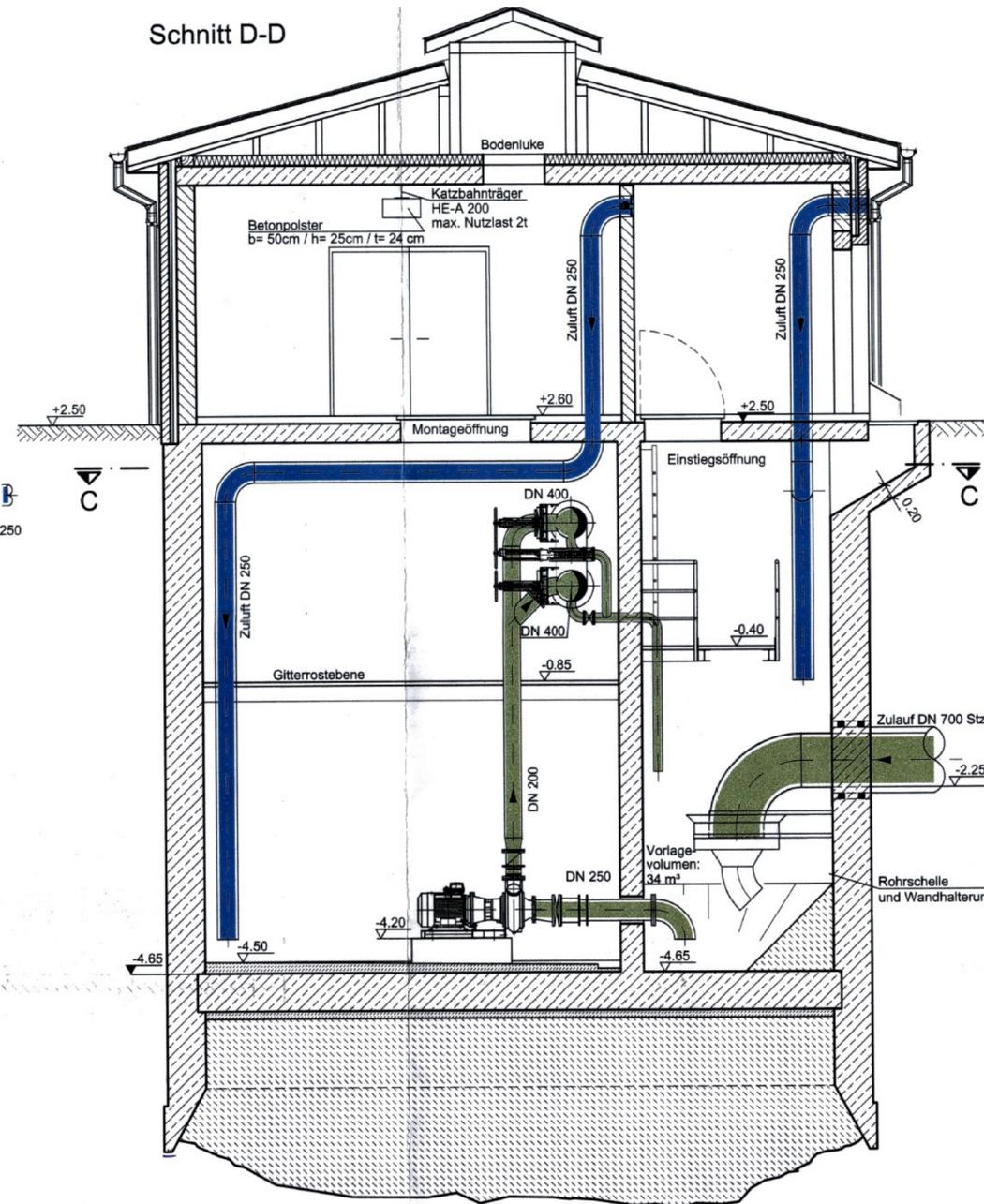
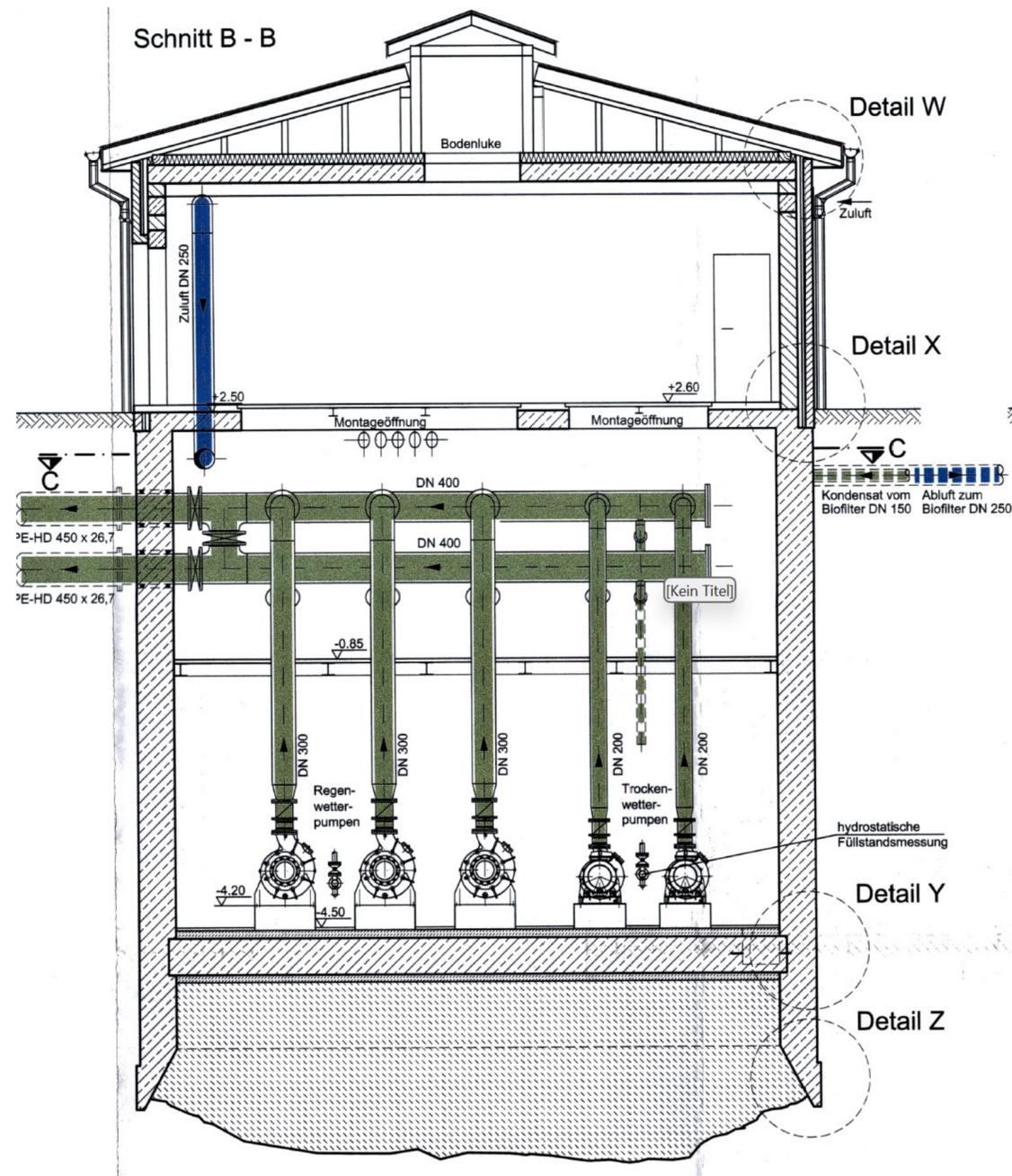
## Problembeschreibung

- + deutlich wahrnehmbare Vibrationen im Umfeld des Abwasserpumpwerkes → Beschwerden von Anwohnern
- + insbesondere entlang der erdverlegten Rohrleitungen → dominante Frequenzen 25, 50 und 75 Hz





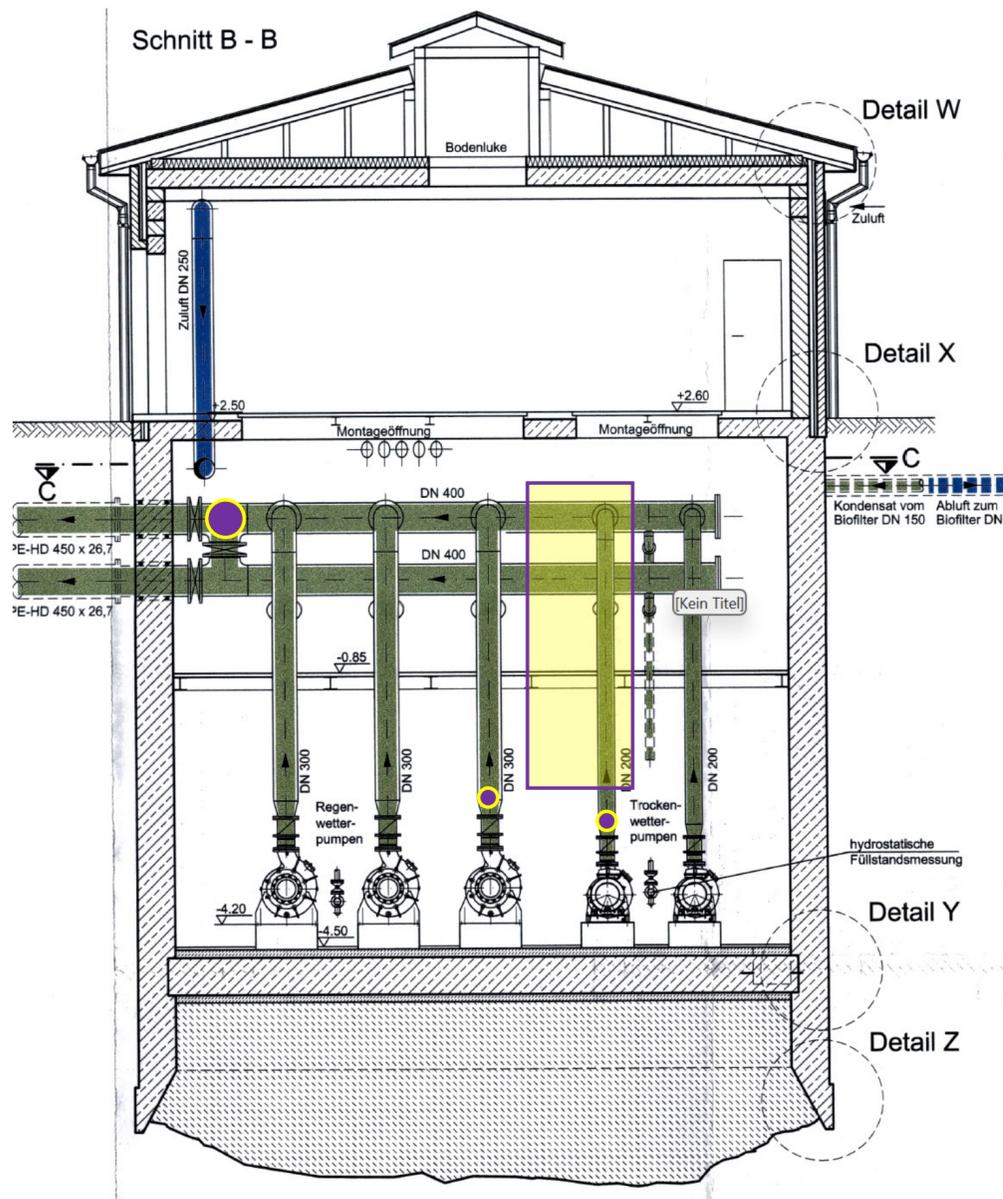
## Problembeschreibung



- + Jeweils eine Trocken- und Regenwetterpumpe fördert in die obere bzw. untere Sammelleitung
- + Start-Stopp-Regelung aufgrund von Schwingungsproblemen bei bestimmten Drehzahlen
- + Alle Pumpen werden bei konstanter Drehzahl von ca. 1450 1/min betrieben
- + Pumpen mit Einschaufelrad: Blattpassierfrequenz entspricht der Drehzahl



## Analyse des Ausgangszustandes



- Druckmessstellen
- Betriebsschwingungen

### Messung der Druckpulsationen:

- + piezoelektrische Sensoren:  
PCB S112A22 (beschleunigungskompensiert)

### Messung der Beschleunigungen:

- + dreiachsige-Beschleunigungssensoren:  
Brüel & Kjaer TYPE 4535-B-001

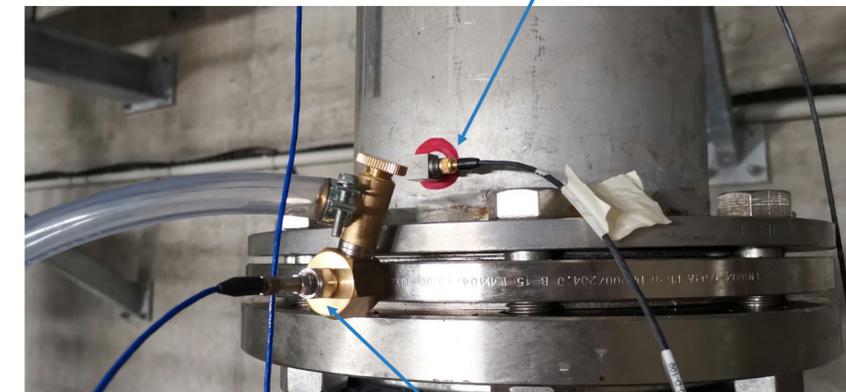
### Erfassung aller Messdaten:

- + Brüel & Kjaer LAN-XI Messsystem  
mit Messkarten (3050-A-060)
- + Abtastrate: 16384 Hz

### Messtellen:

- + **RWP:** hinter Regenwetterpumpe (DN300)
- + **TWP:** hinter Trockenwetterpumpe (DN200)
- + **SL oben:** obere Sammelleitung nahe Pumpwerksausgang

### Beschleunigungen

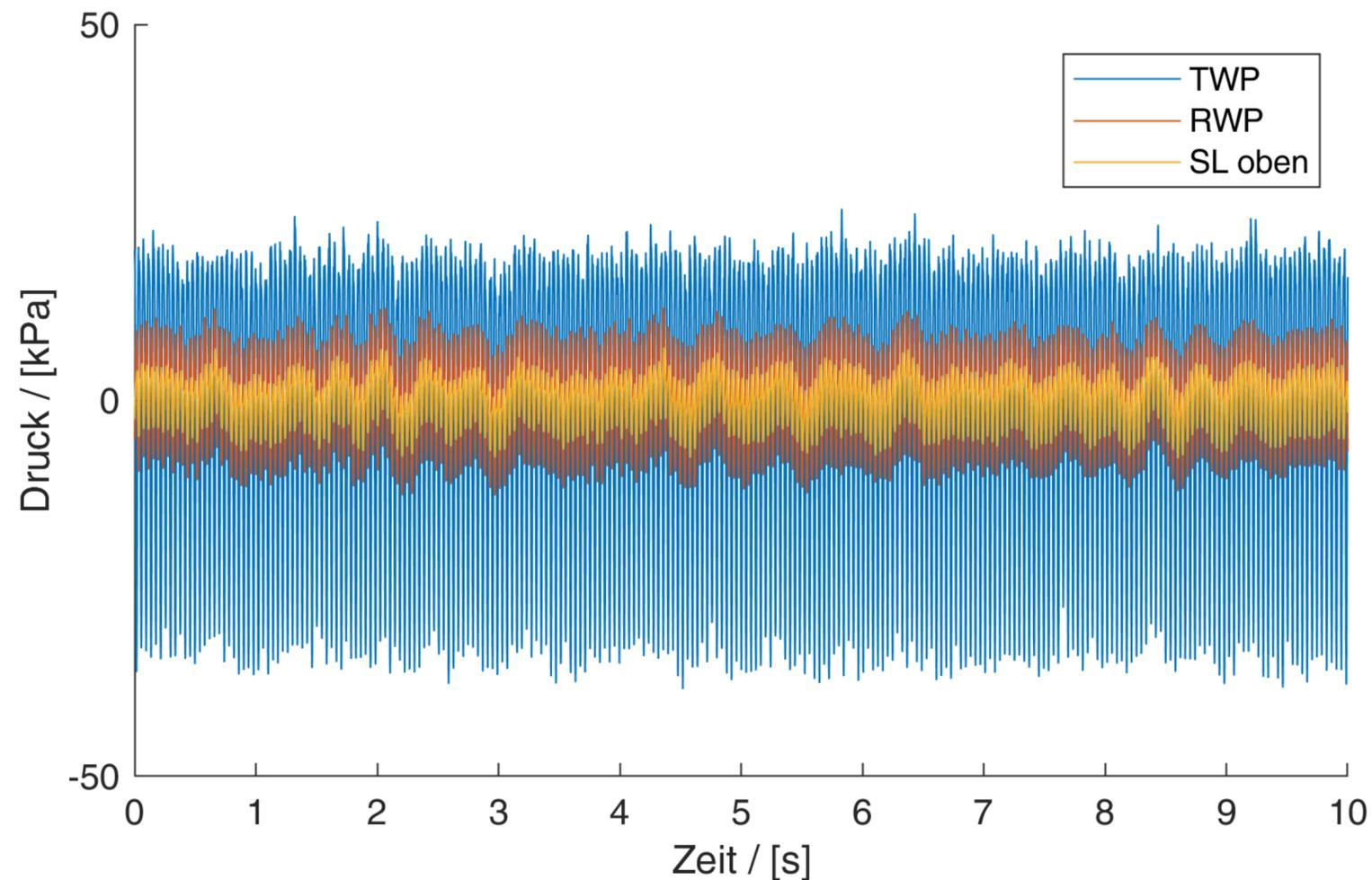


### Änderungen des statischen Drucks



## Druckpulsationen

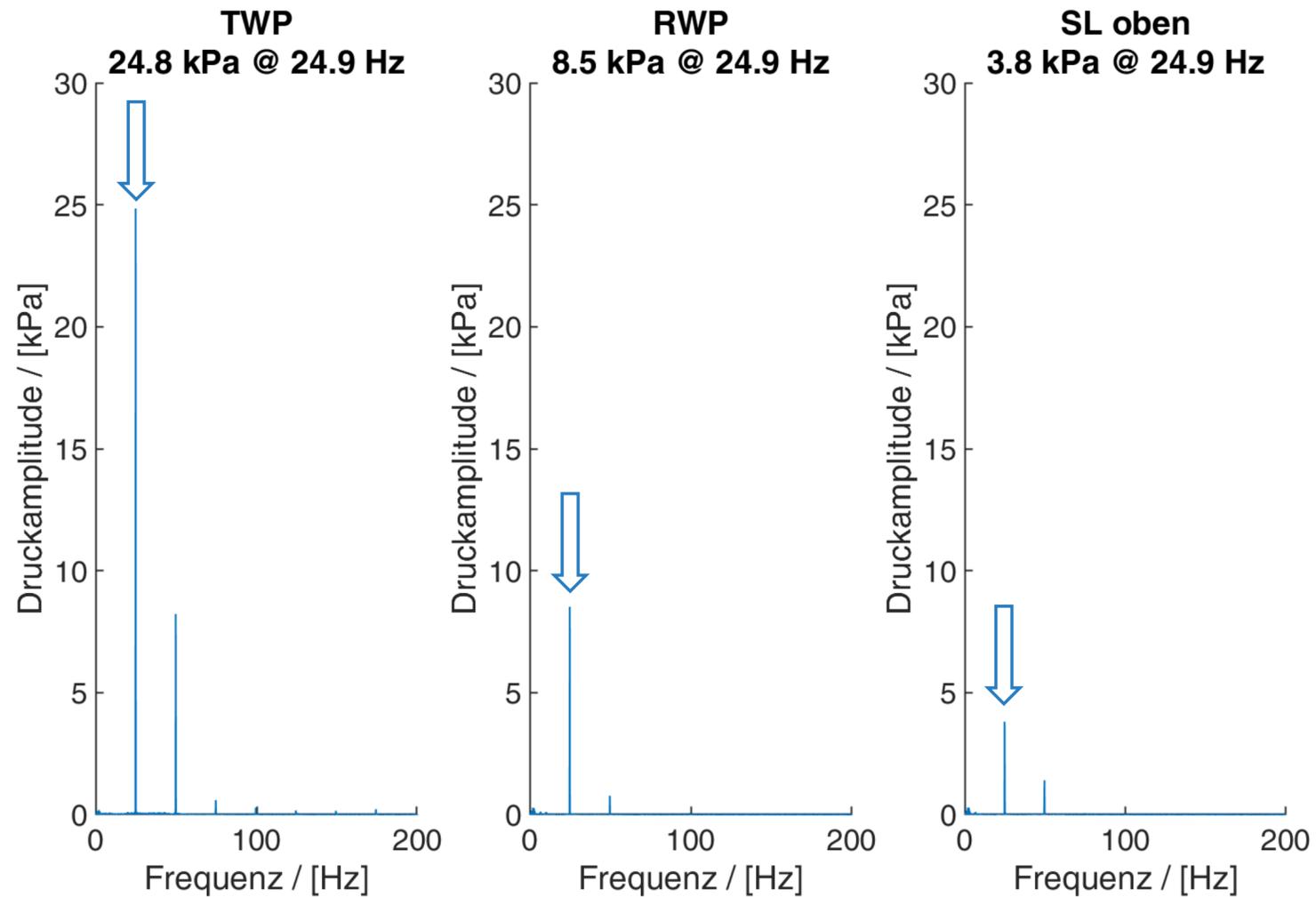
gemessene Drücke



- + Die Höhe der Druckpulsationsamplituden hängt vom Durchmesser des Rohres und der Entfernung zur Quelle ab
- + Scheinbare Reduktion durch:
  - + größerer Rohrquerschnitt → Wirkung auf größere Zylinderfläche
- + Reale Reduktion durch:
  - + Energieübertragung auf Struktur → Schwingungsanregung



## Druckpulsationen



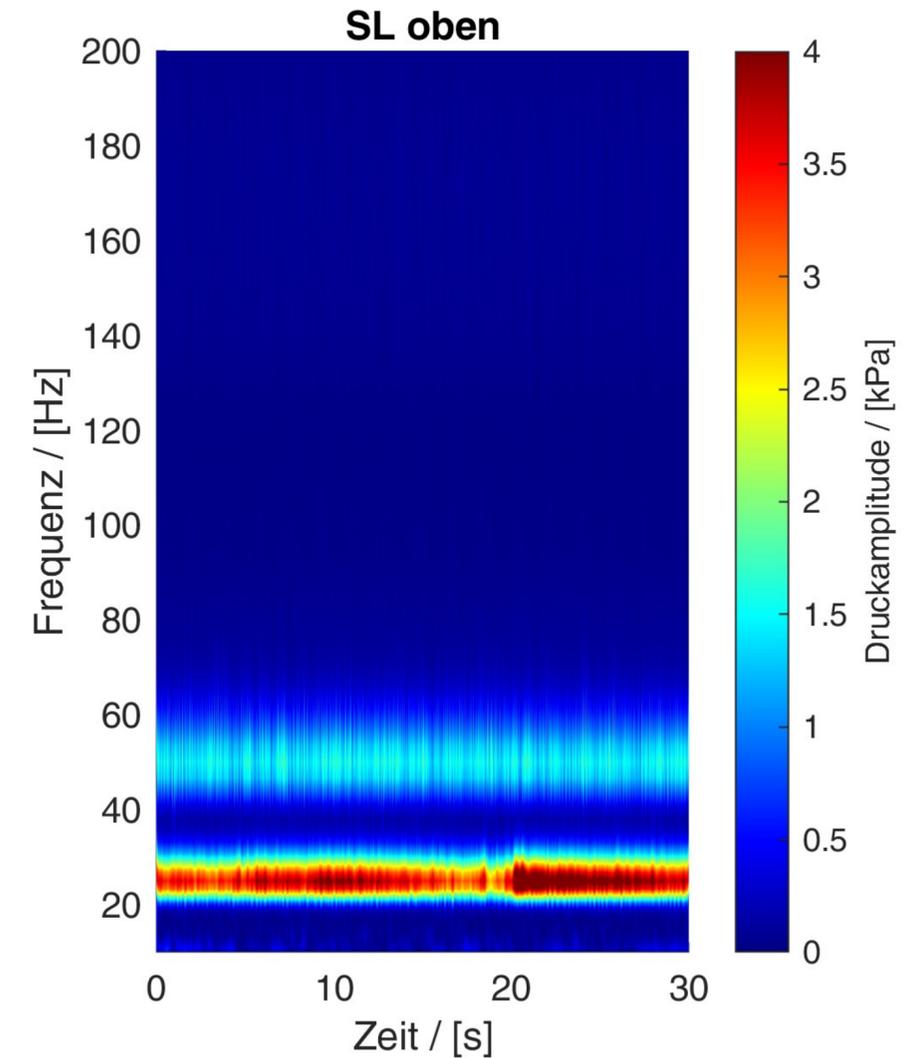
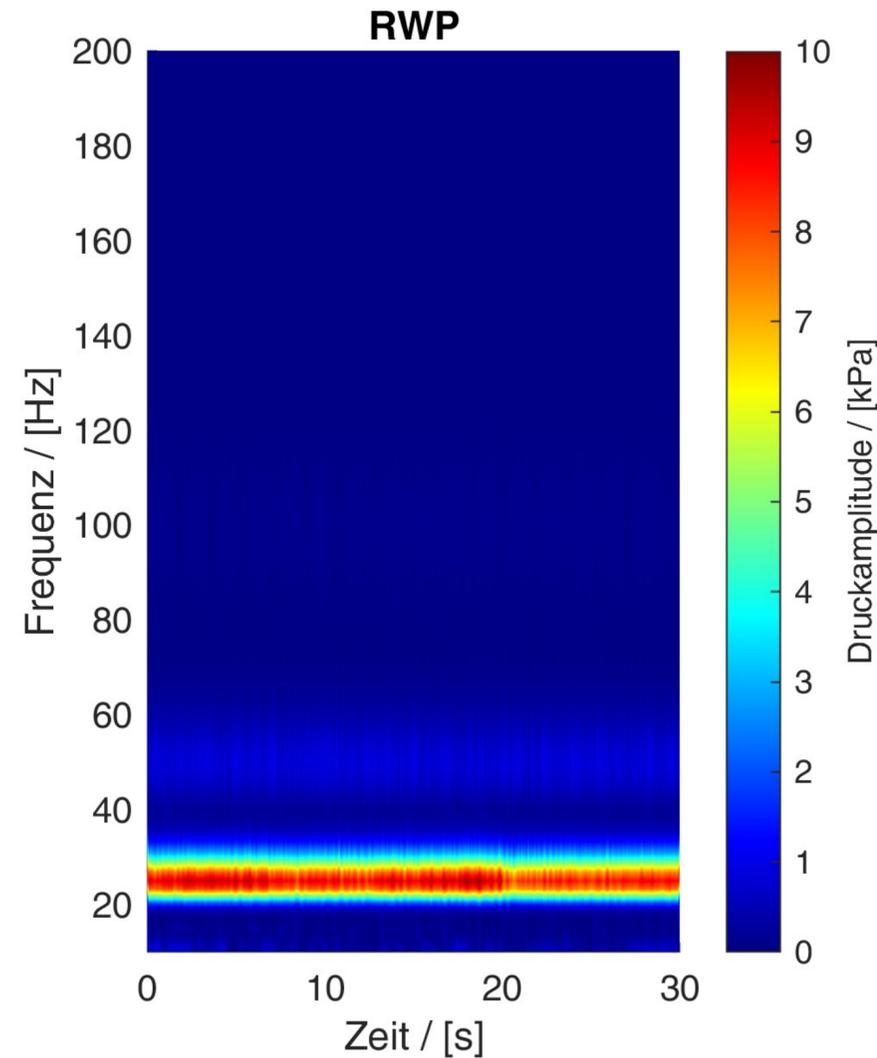
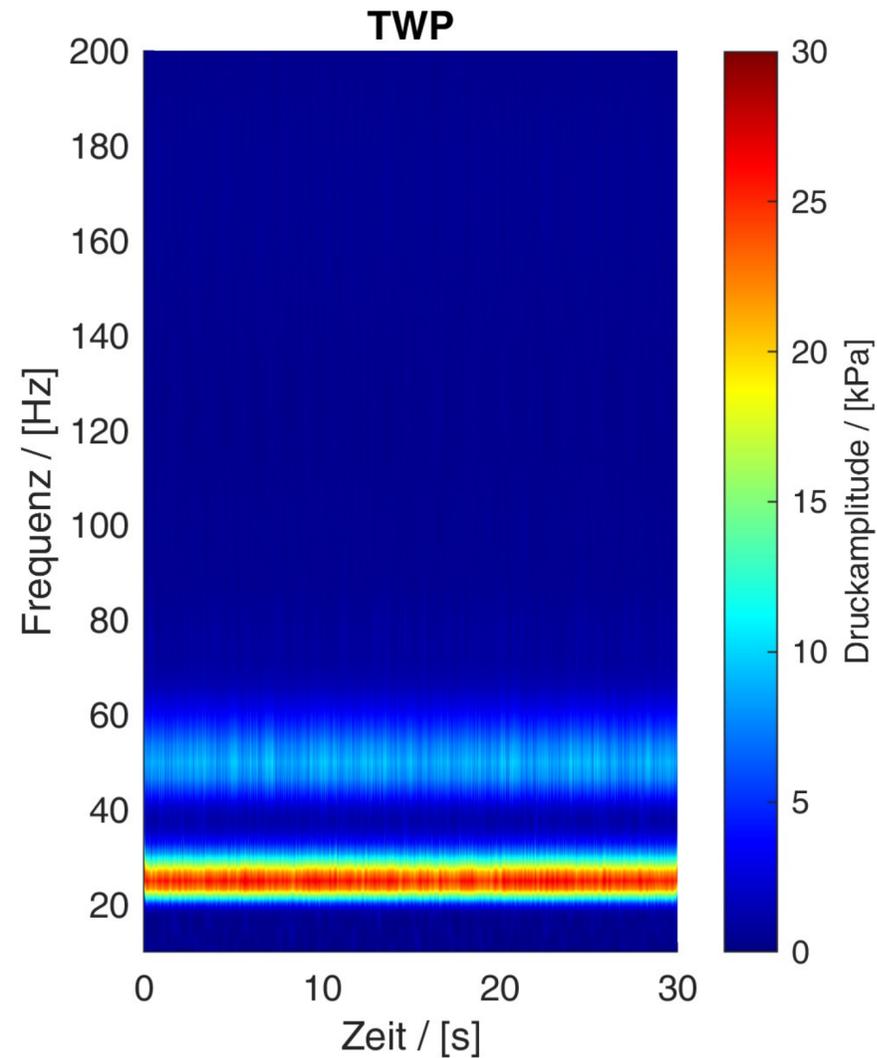
— aktive Pumpe

- + Druckpulsationen sinken mit steigendem Umfang des Rohres, da sich die Energie der Druckpulsation auf eine größere Querschnittsfläche verteilt
- + Frequenzspektren der Druckpulsationen werden von Blattpassierfrequenz und deren Harmonischen dominiert



## Druckpulsationen

— aktive Pumpe

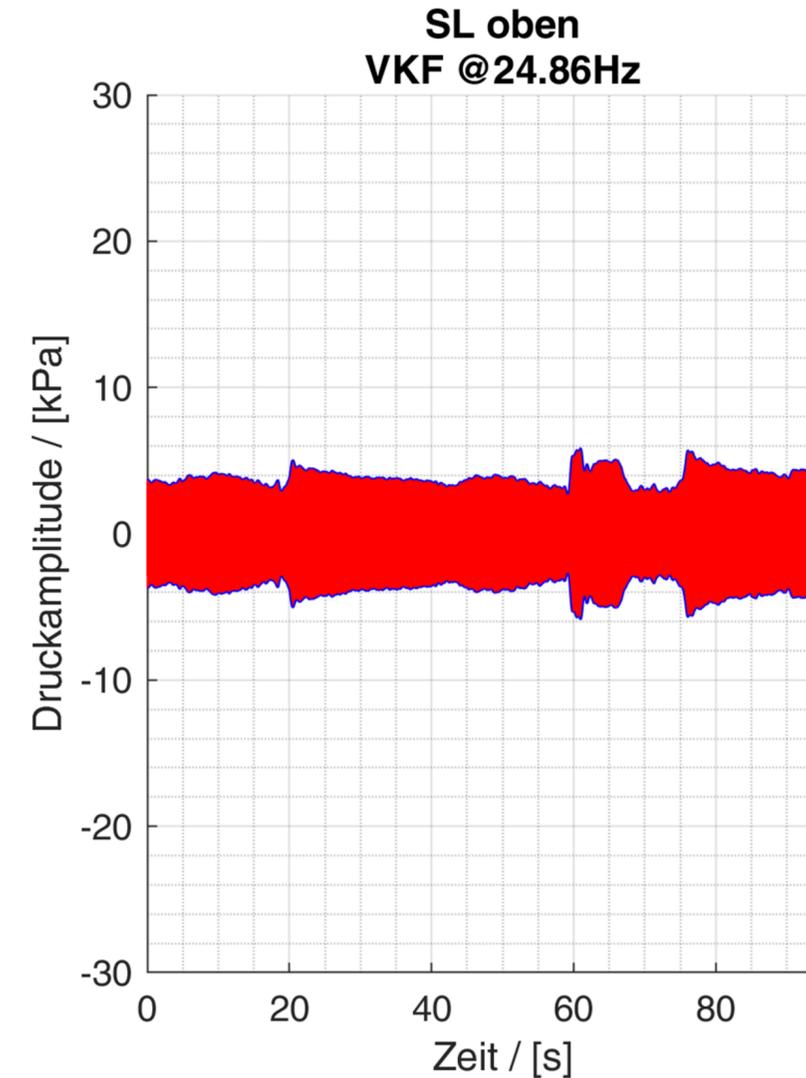
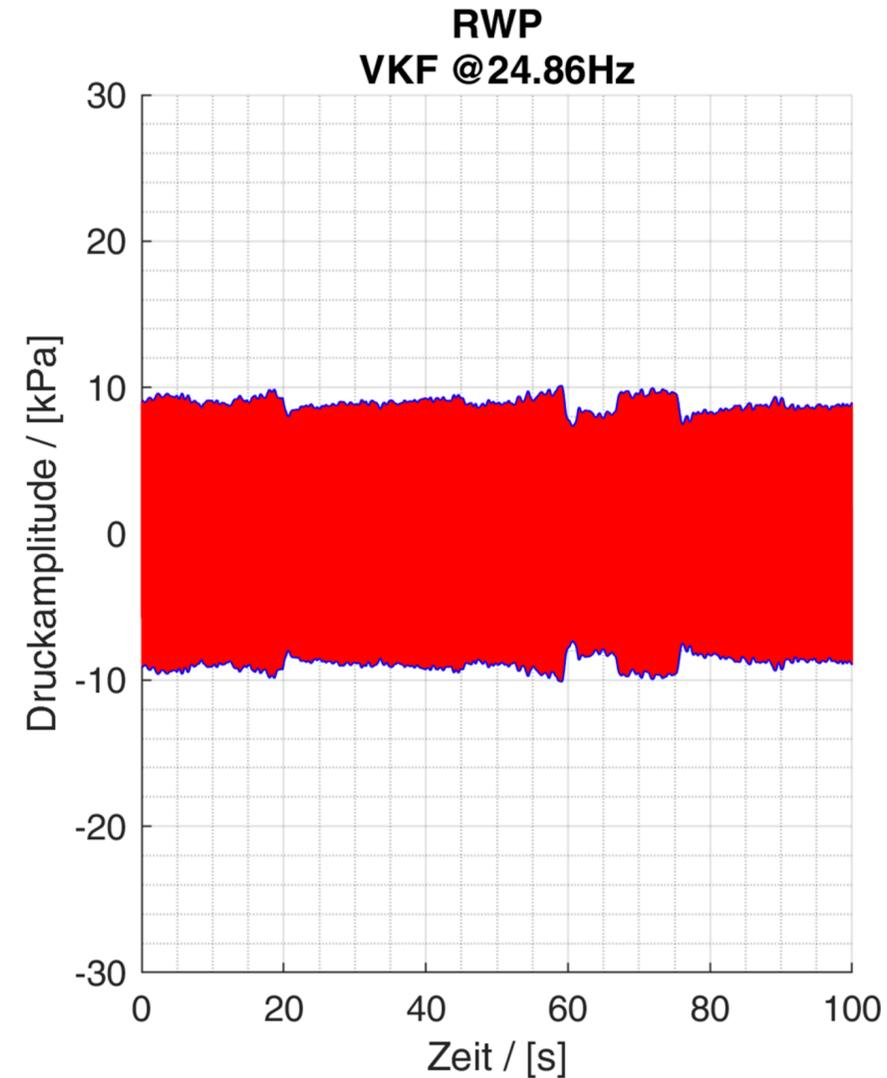
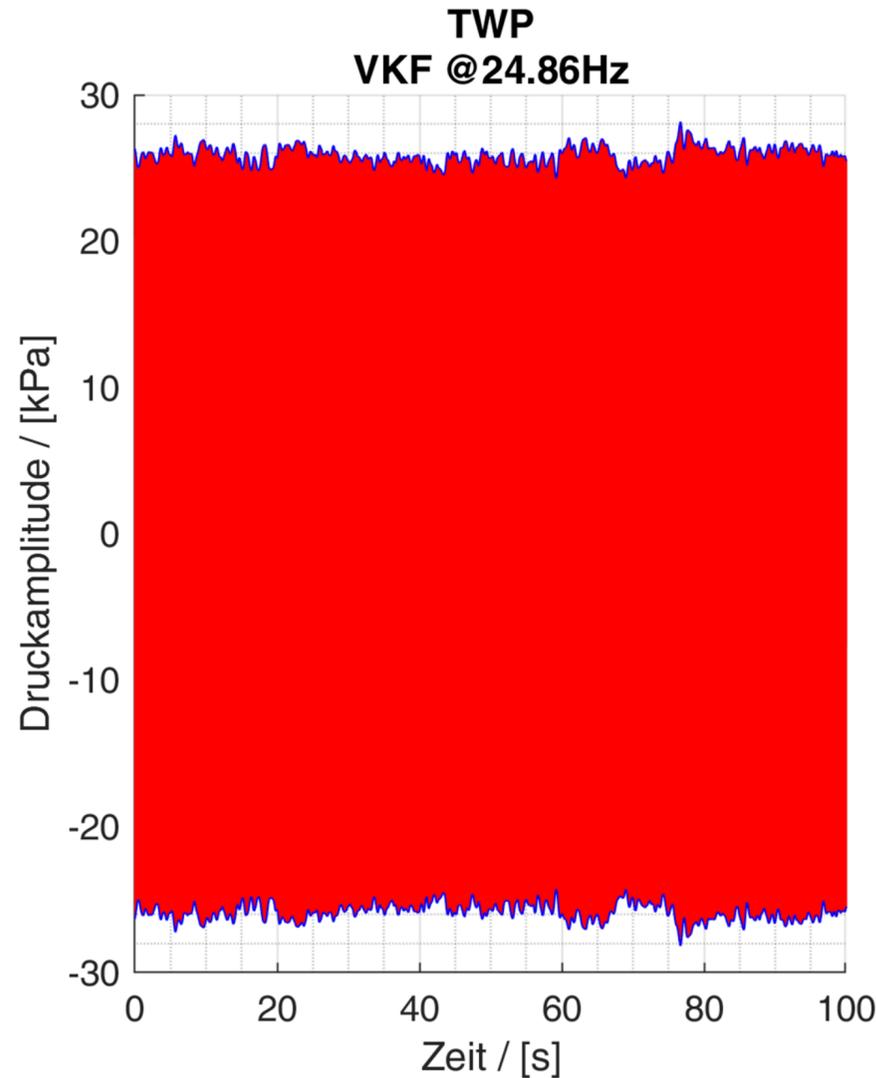


+ maximaler Pegel variiert leicht im zeitlichen Verlauf > Einzelauswertung mittels Ordnungsanalyse



## Druckpulsationen

aktive Pumpe



+ maximaler Pegel variiert leicht im zeitlichen Verlauf > Einzelauswertung mittels Ordnungsanalyse



## Druckpulsationen

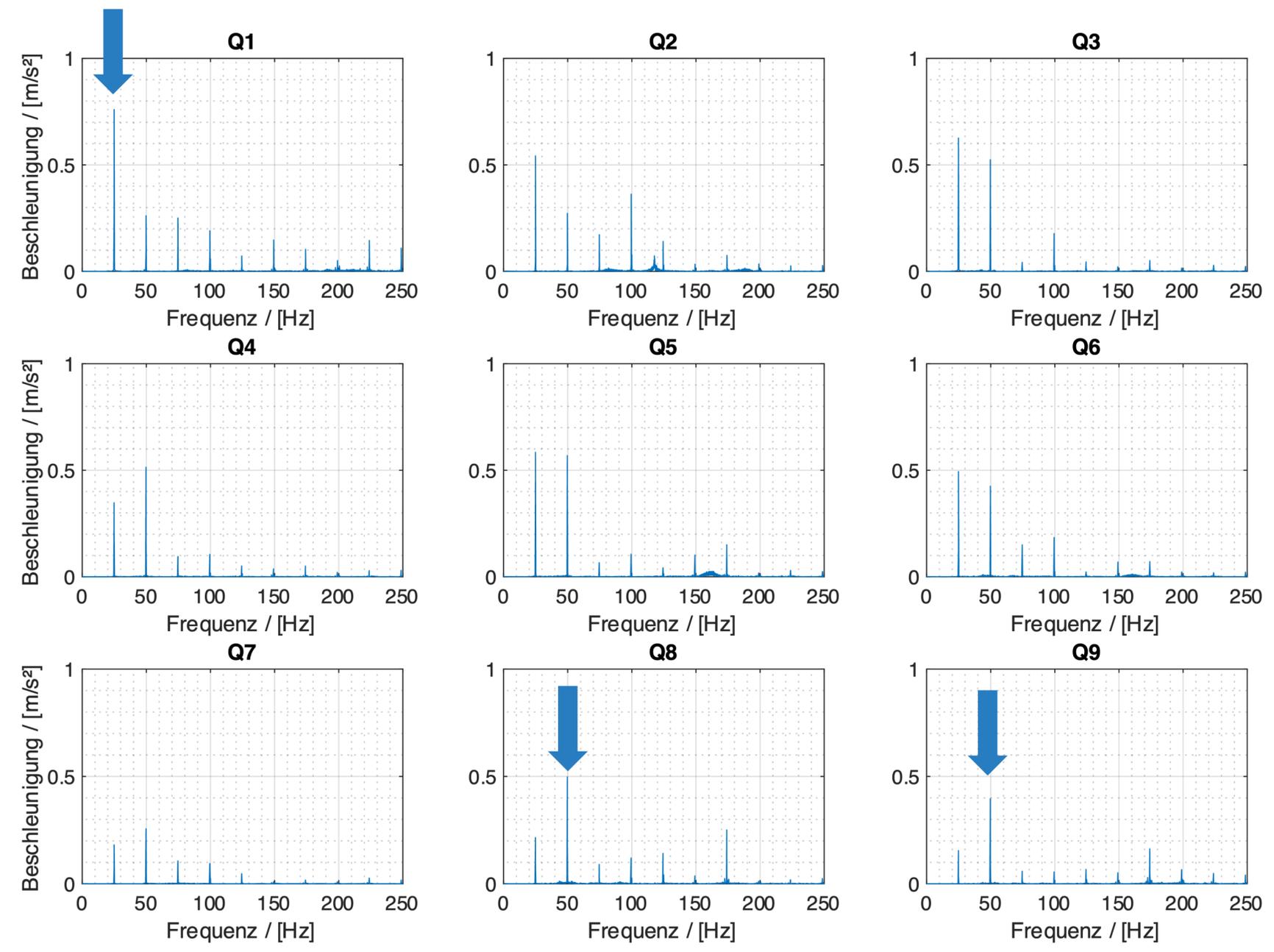
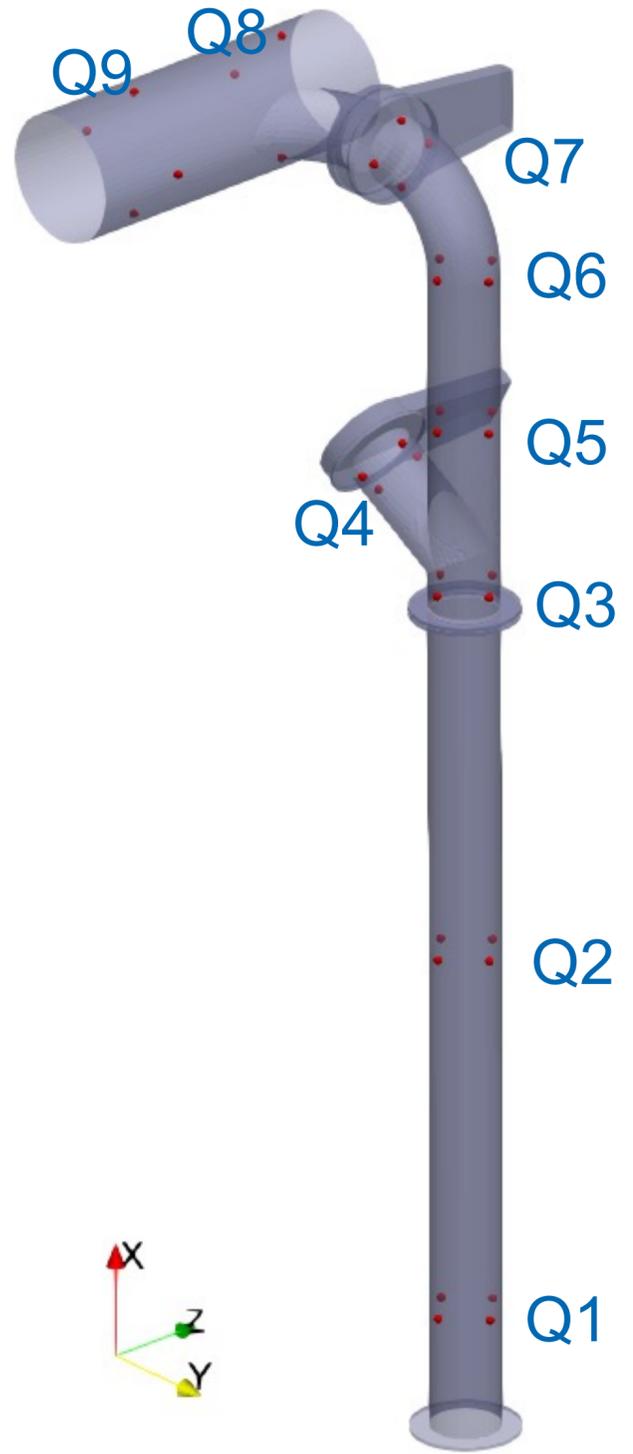
Eigenschaften der Einhüllenden ausgewählter Frequenzen basierend auf Vold-Kalman-Filterung des zeitlichen Verlaufs der Druckmessung

VKF-Frequenz	Parameter	Einheit	TWP	RWP	SL oben
25 Hz	Minimum	kPa	24.31	7.34	2.69
	Mittelwert	kPa	25.92	8.94	3.96
	Maximum	kPa	28.17	10.14	5.88
	Standardabweichung	kPa	0.59	0.48	0.57
	<b>Effektivwert (RMS)</b>	<b>kPa</b>	<b>25.92</b>	<b>8.96</b>	<b>4.00</b>
50 Hz	Minimum	kPa	8.23	0.57	1.3
	Mittelwert	kPa	9.34	0.89	1.62
	Maximum	kPa	10.84	1.57	2.14
	Standardabweichung	kPa	0.48	0.07	0.13
	<b>Effektivwert (RMS)</b>	<b>kPa</b>	<b>9.36</b>	<b>0.89</b>	<b>1.63</b>

aktive Pumpe



# Beschleunigungen

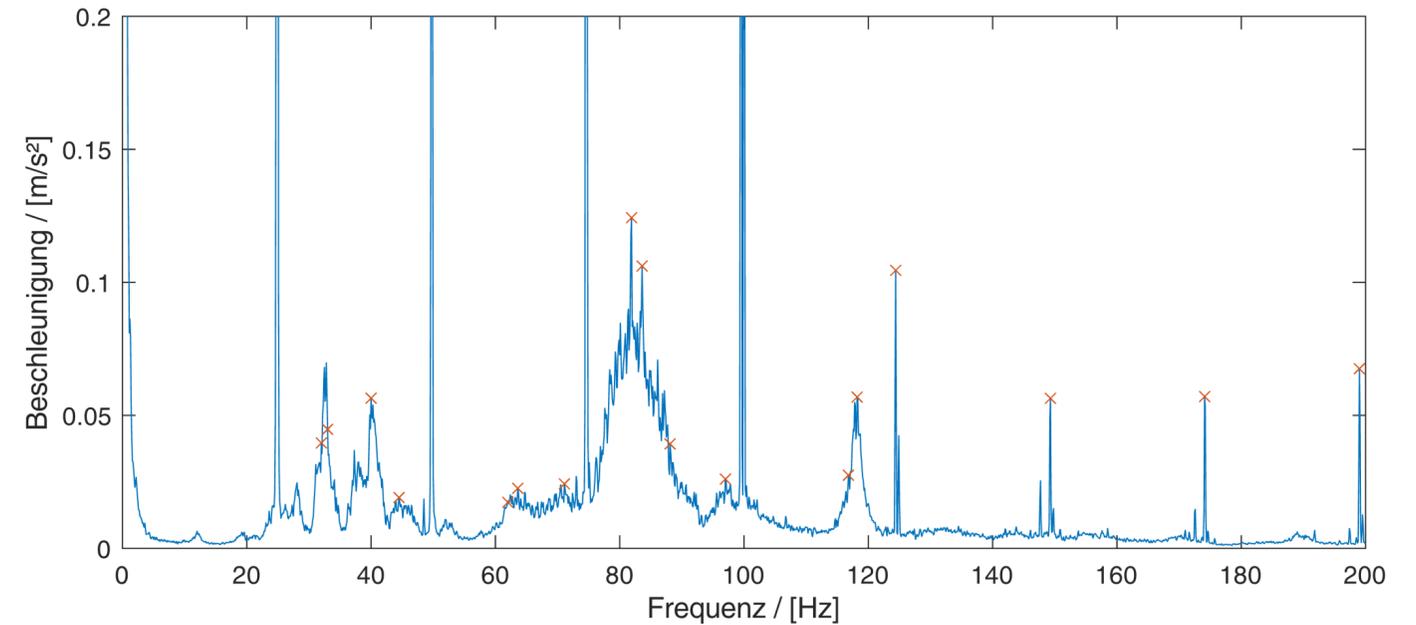
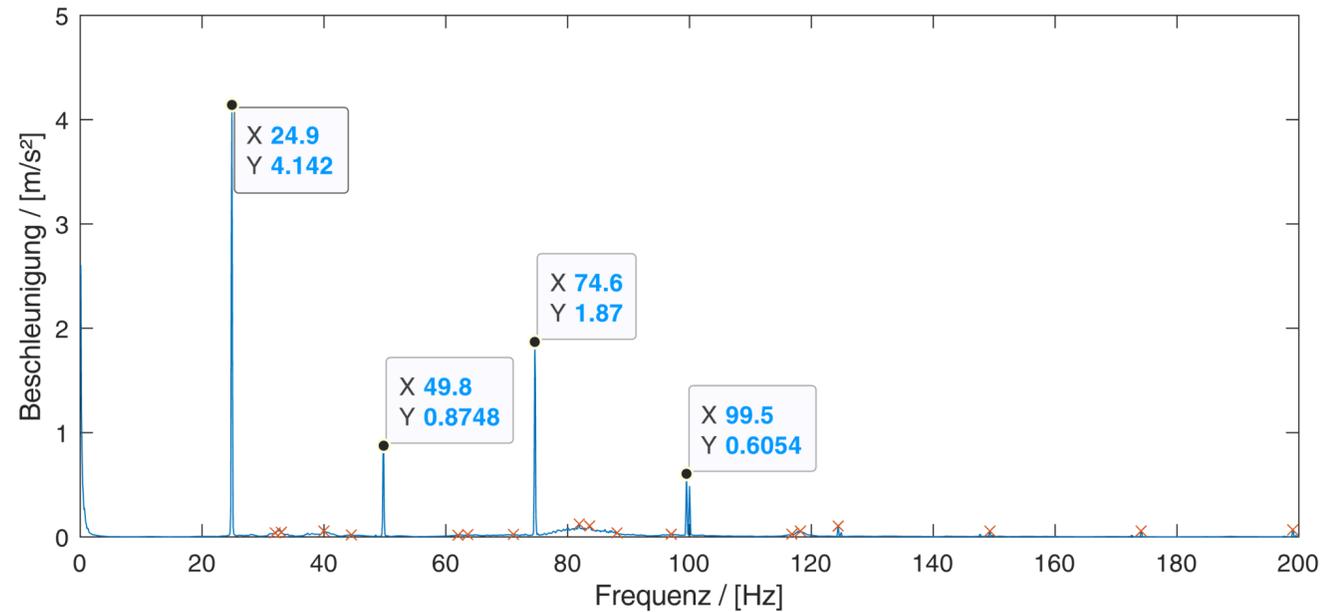


+ Verlagerung der maximalen Beschleunigungsamplitude von 24.9Hz auf 49.8Hz bei zunehmendem Abstand zur Trockenwetterpumpe (TWP)

Frequenzspektren der oberflächennormalen Beschleunigung gemittelt über die Messstellen des jeweiligen Querschnittes



## Beschleunigungen



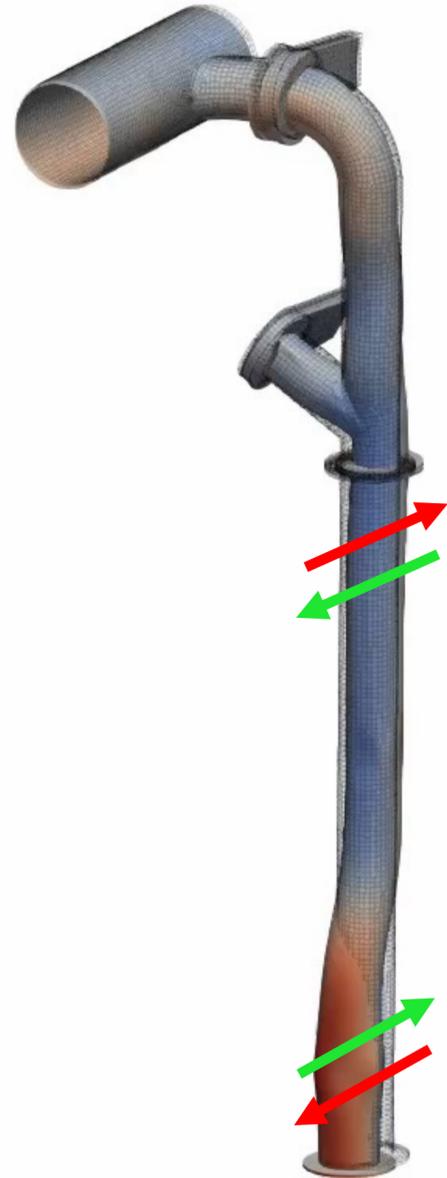
- + Das Gesamtspektrum wird aus dem Mittelwert der Spektren aller Beschleunigungssensoren und -richtungen gebildet
- + im Gesamtspektrum treten die erste Blattpassierfrequenz (BPF) sowie deren 2.-4. Harmonische deutlich als Anregungsfrequenzen hervor
- + Schwingung werden bei maßgeblich durch Druckpulsationen erzwungen

- + das Spektrum im Bereich kleinerer Amplituden weist weiterer Amplitudenspitzen auf → akustische und/oder strukturelle **Eigenfrequenzen des Pumpensystems**

# Dominante Betriebsschwingung

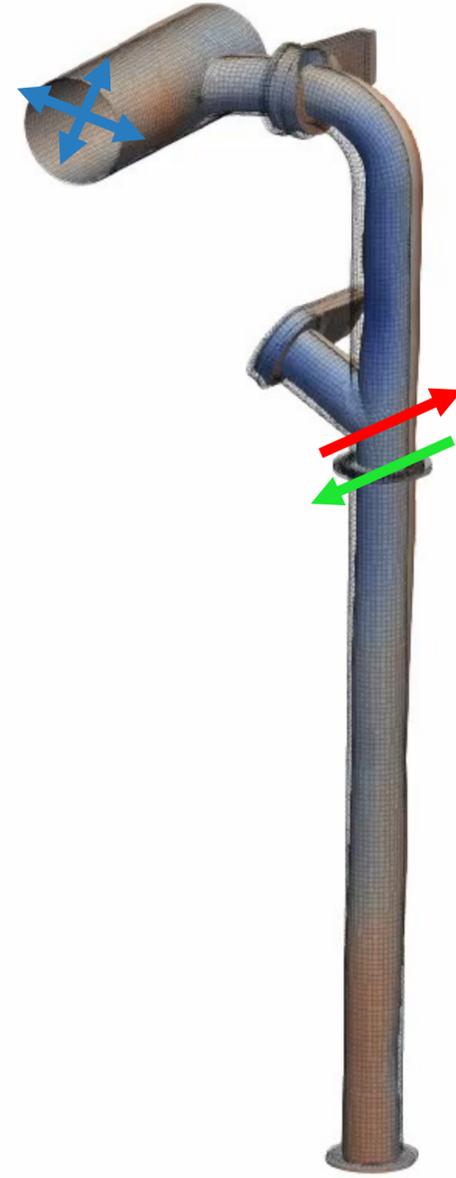


24.9 Hz



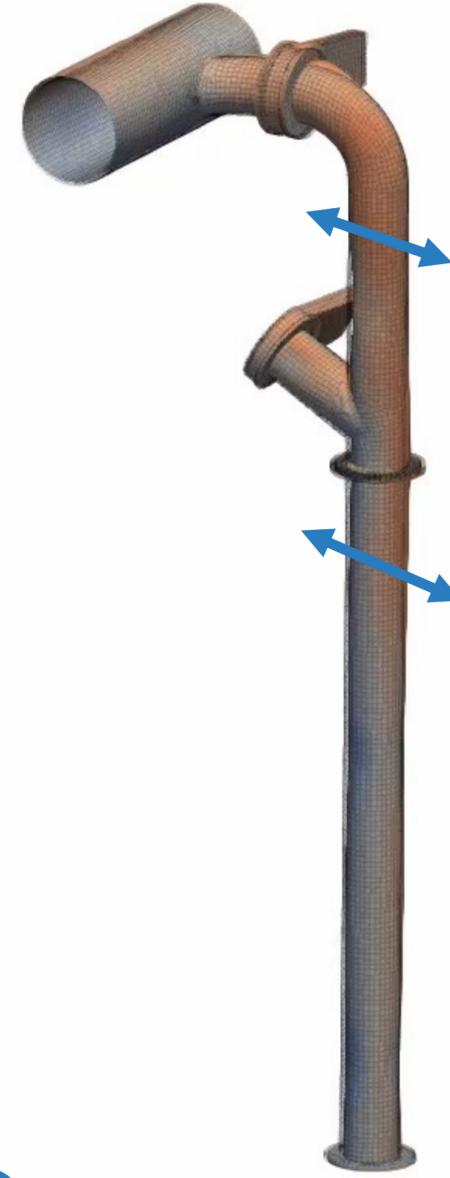
A

47.8 Hz



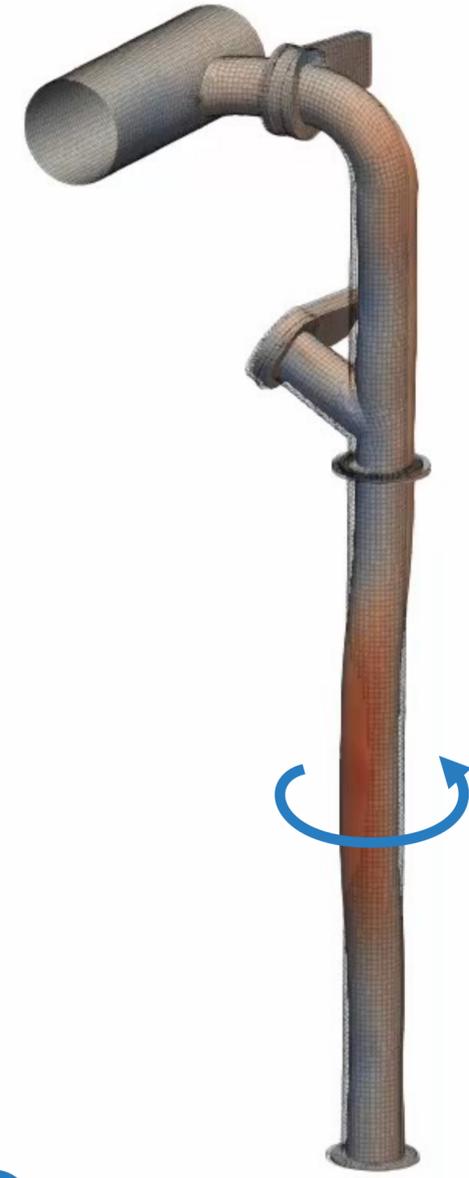
B

74.6 Hz



C

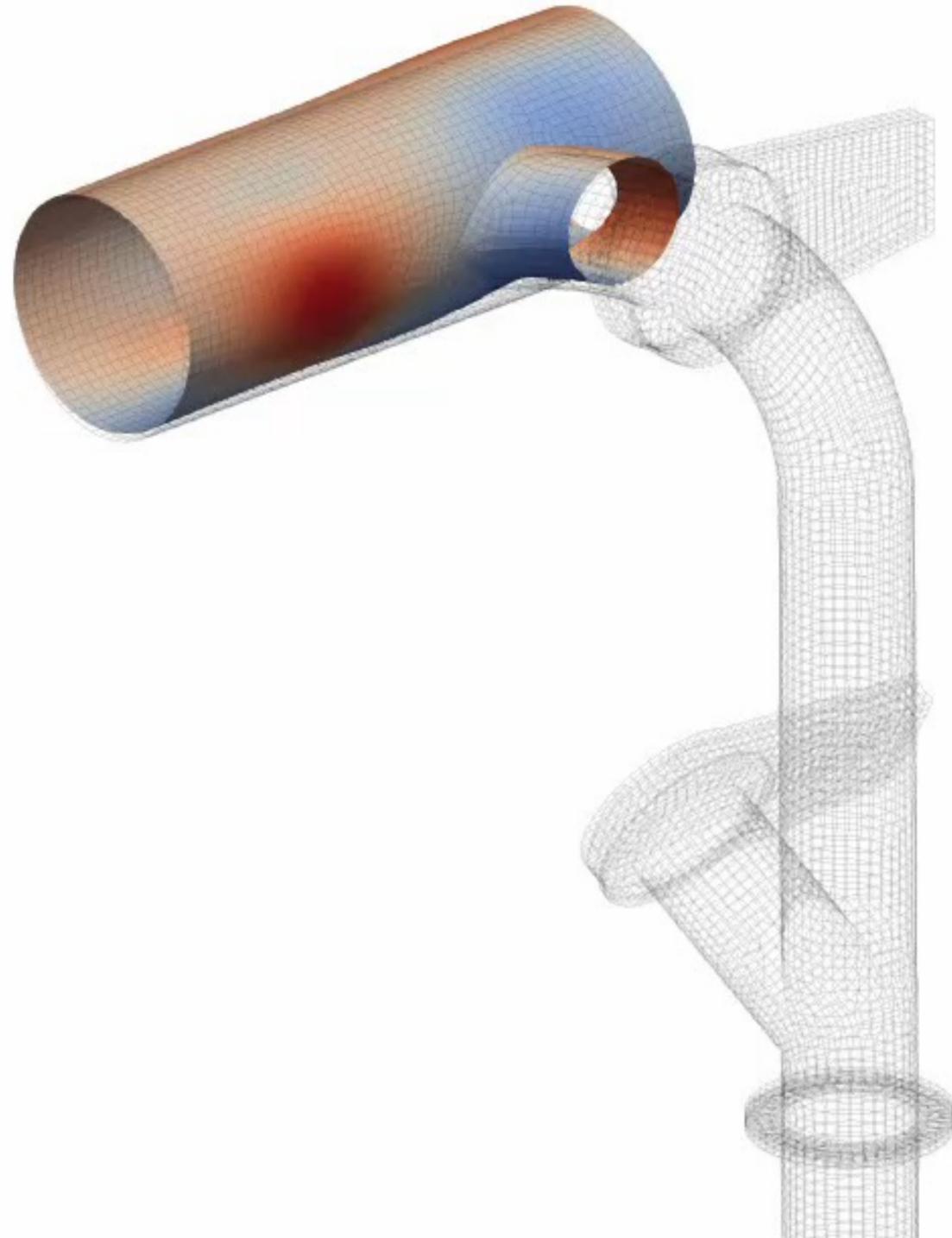
99.5 Hz



D

Konturfarbe = oberflächennormale Beschleunigung

+ Animation der Schwingformen bei Anregung mit der Blattpassierfrequenz und deren Harmonischen



### Hinweise auf Dehneigenfrequenz der Sammelleitung:

- + bei einer Anregungsfrequenz von 49.8Hz, welche der ersten Harmonischen der Blattpassierfrequenz entspricht, beginnt die obere Sammelleitung zu „atmen“
- + Beschleunigungen der Sammelleitung bei 49.8 Hz höher als bei dominanter Druckpulsationsfrequenz (BPF: 24.9 Hz)
- + Erschütterungsmessungen im Umfeld des Hauptpumpwerkes deuten ebenfalls auf eine Überhöhung bei der 1. Harmonischen der BPF hin



## Zusammenfassung der Ausgangssituation

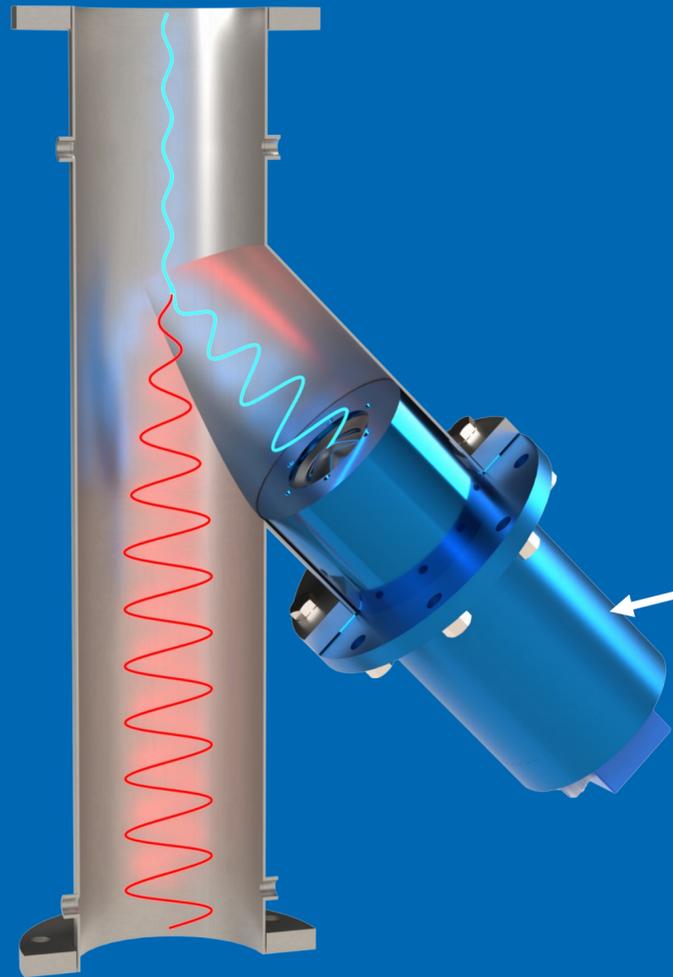
- + Beschwerden durch naheliegende Anwohner aufgrund von Vibrationen während des Pumpenbetriebs
- + Pumpen erzeugen Druckschwankungen, die sich wellenförmig in den Rohrleitungen ausbreiten
- + Druckwellen geben ihre Energie an die Struktur ab und erzwingen Strukturschwingungen
- + Abwasserpumpen erzeugen je nach Anzahl der Laufradschaufeln und der Drehzahl deutlich niederfrequente Druckwellen und Vibrationen (1 - 250 Hz)

**Was können wir dagegen tun?**



## Unsere Lösung: die QuietHydro-Technologie

↑ Anlage



↑ Pumpe

Aktuator



QH-200



Leistungs- und  
Regelungselektronik

### Die Vorteile von QuietHydro

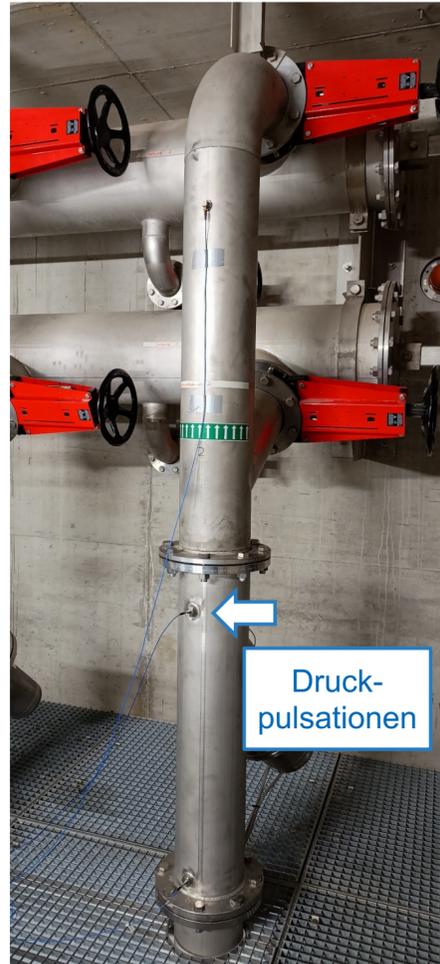
- + Ultrakompakte Bauweise
- + Aktives und adaptives System
- + Plug-and-Play
- + Schlüsseltechnologie für „smart-grid“ geregelte Pumpensysteme
- + Einziges System seiner Art

### Ausblick was mit QuietHydro möglich

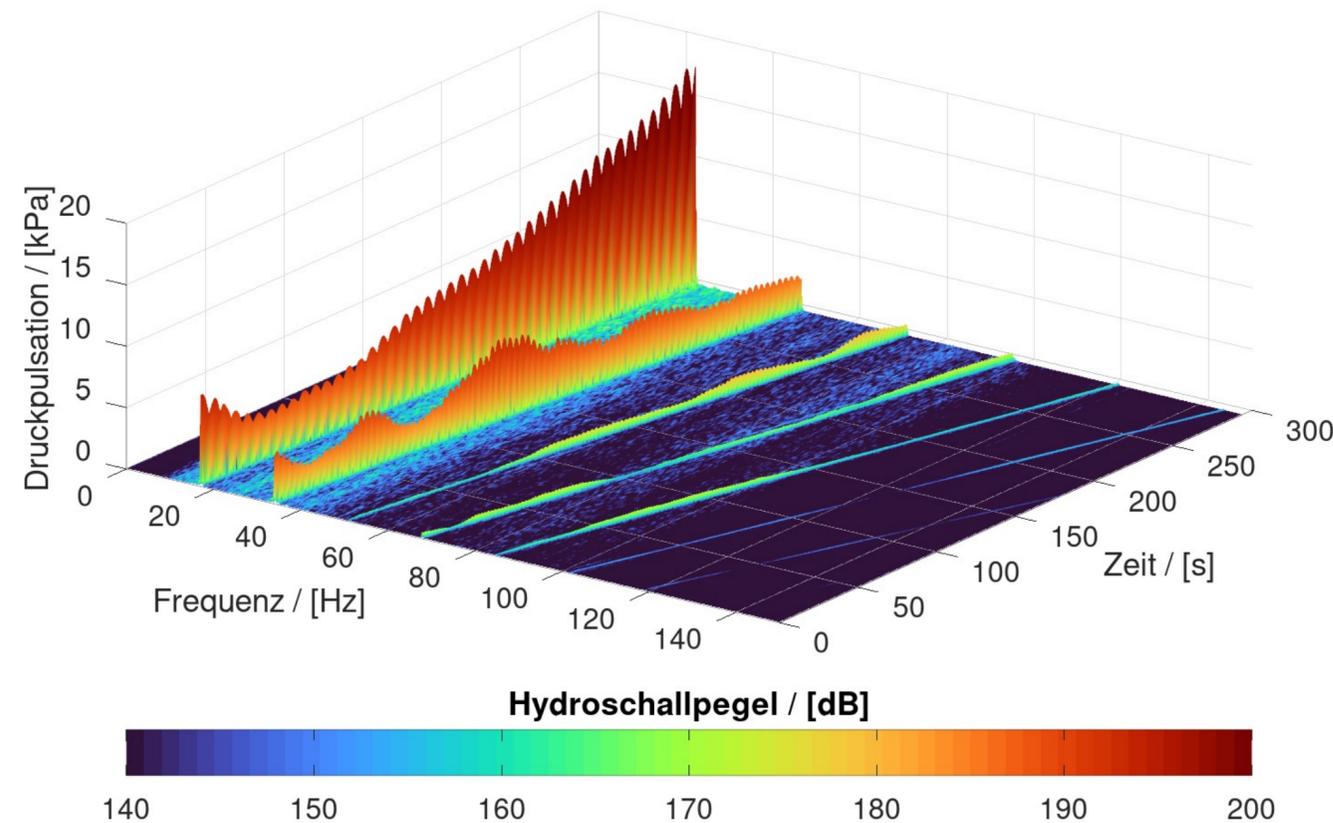
- + Effiziente Regelung von Pumpen durch KI
- + IoT-Anbindung
- + Condition Monitoring



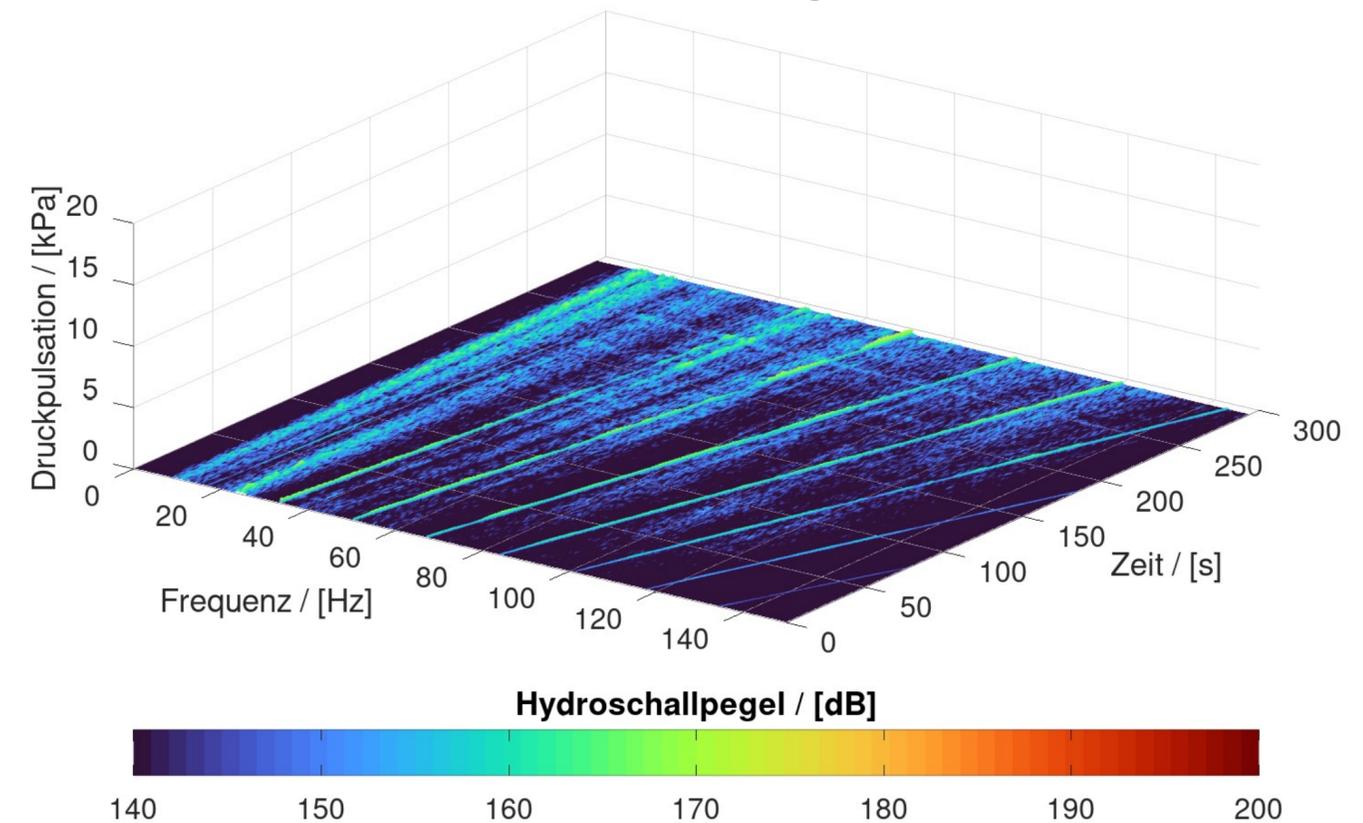
## Druckpulsationen



ohne QH-Technologie



mit QH-Technologie



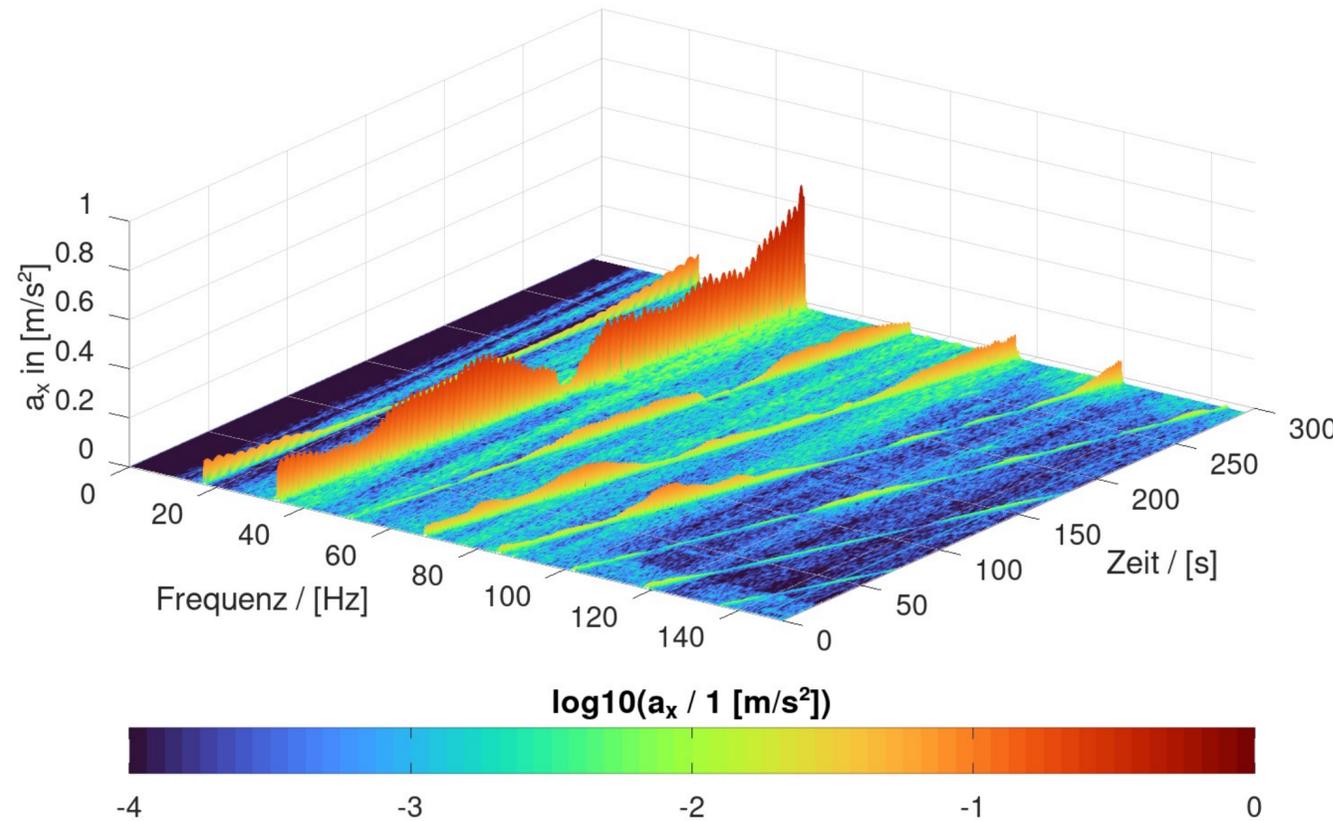
- + Drehzahlrampe zwischen  $1020 \text{ min}^{-1}$  und  $1460 \text{ min}^{-1}$
- + Leichte Überhöhungen bei bestimmten Frequenzen  $\rightarrow$  kritische Eigenfrequenz ca. 37 Hz
- + Signifikante Reduktion durch QH-Technologie ( $> 40 \text{ dB}$ )
- + effektive Druckpulsationen (RMS) sinken um  $>92\%$  bei max. Drehzahl



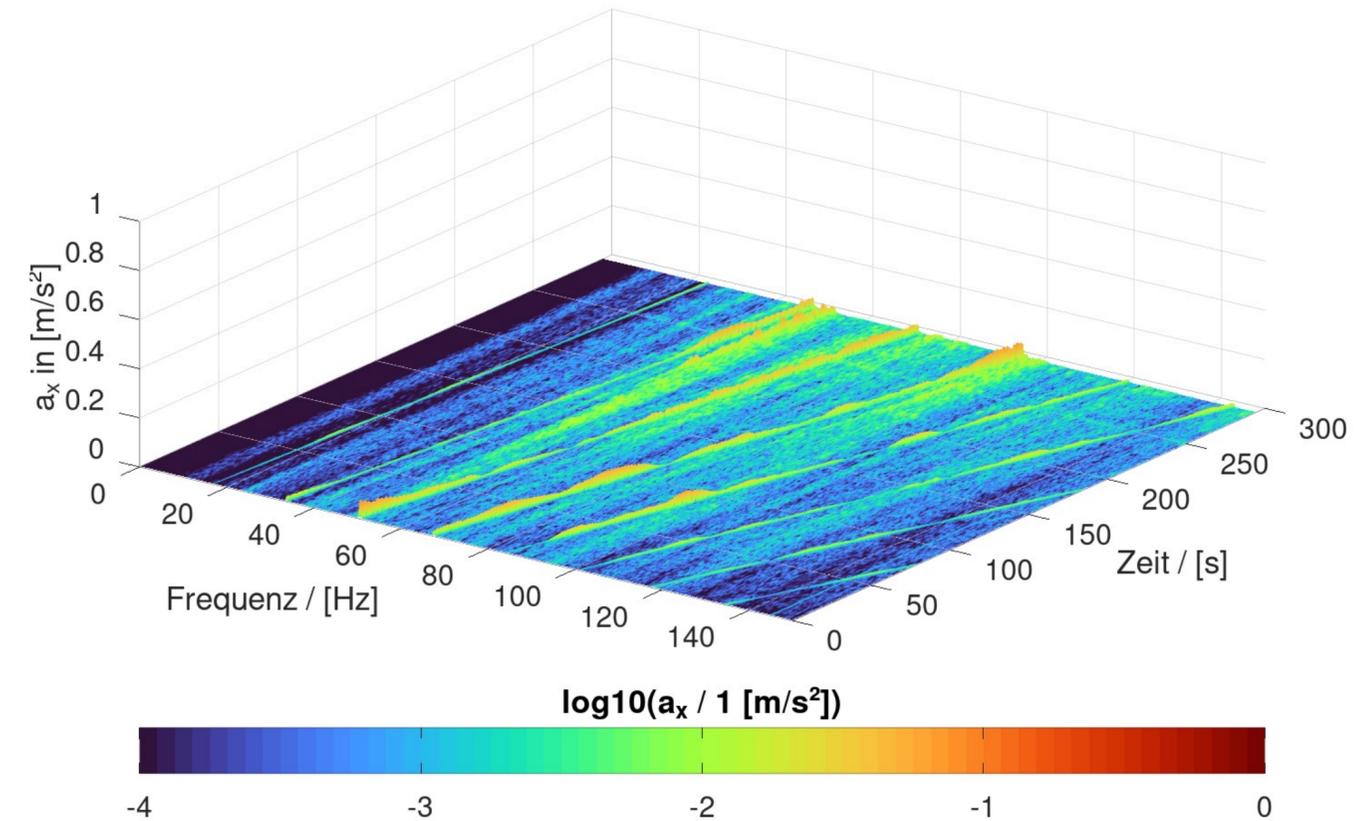
## Beschleunigungen



ohne QH-Technologie



mit QH-Technologie



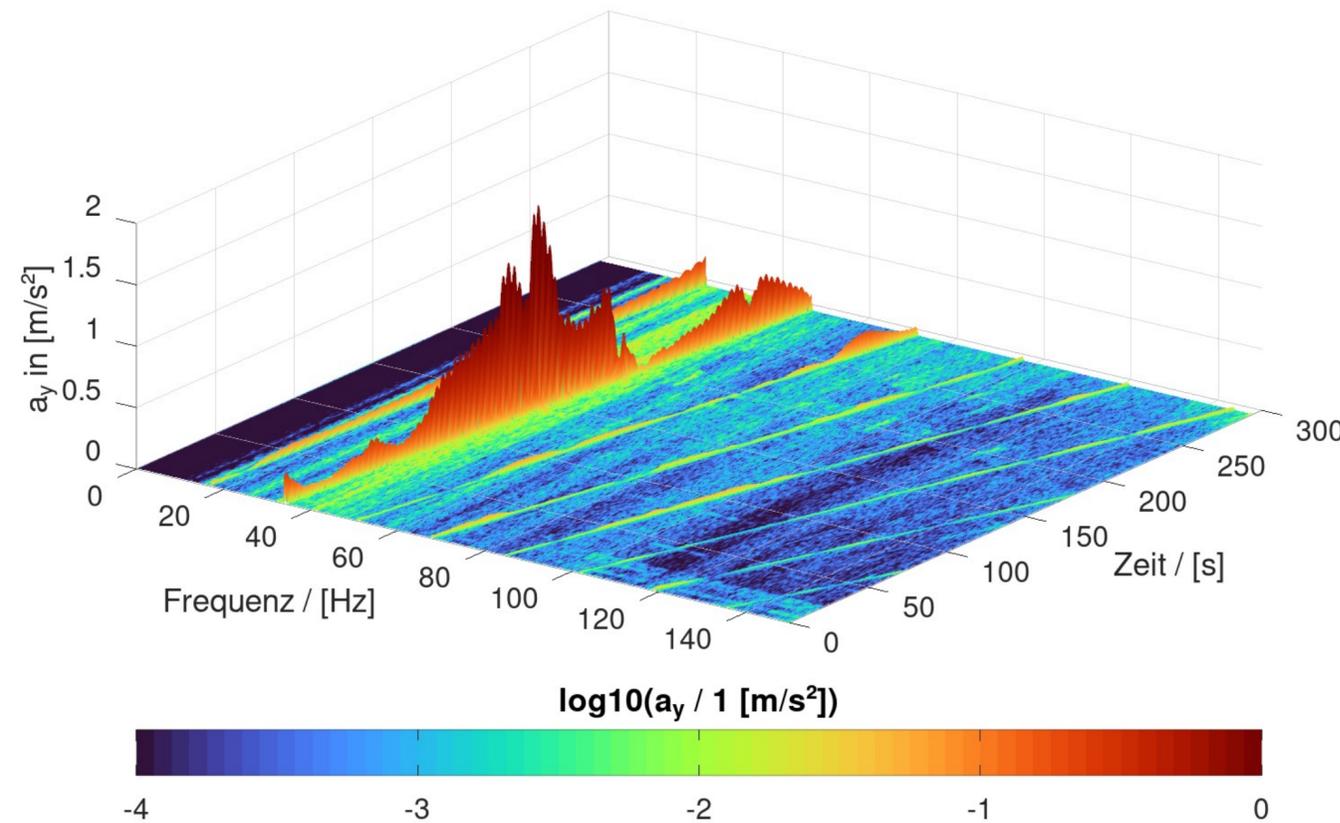
- + Drehzahlrampe zwischen  $1020 \text{ min}^{-1}$  und  $1460 \text{ min}^{-1}$
- + Überhöhungen bei 37 Hz, 78 Hz  $\rightarrow$  kritische Eigenfrequenzen
- + Deutliche Reduktion der Beschleunigungen in vertikale Richtung (x-Achse)  $\rightarrow$  70% bei max. Drehzahl



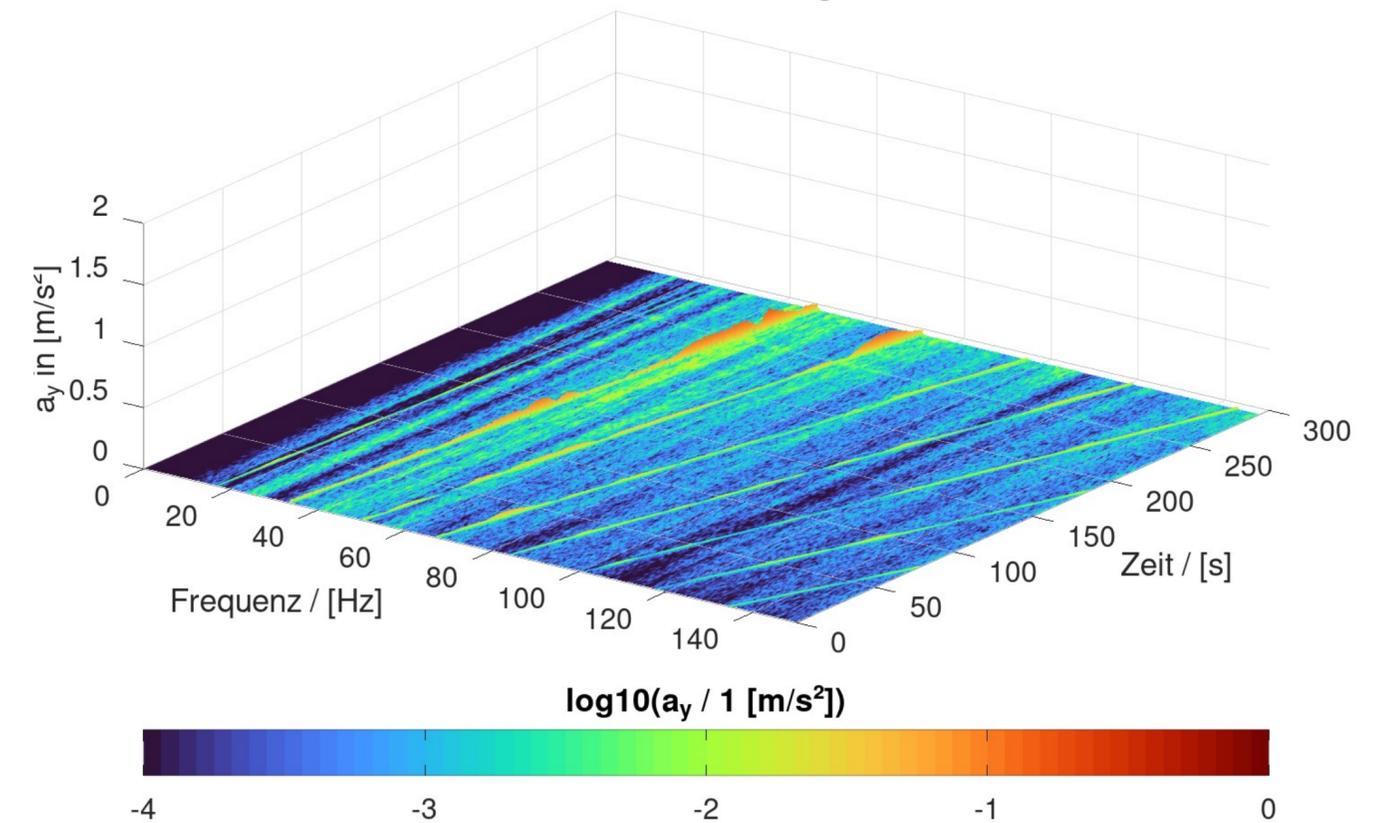
## Beschleunigungen



ohne QH-Technologie



mit QH-Technologie



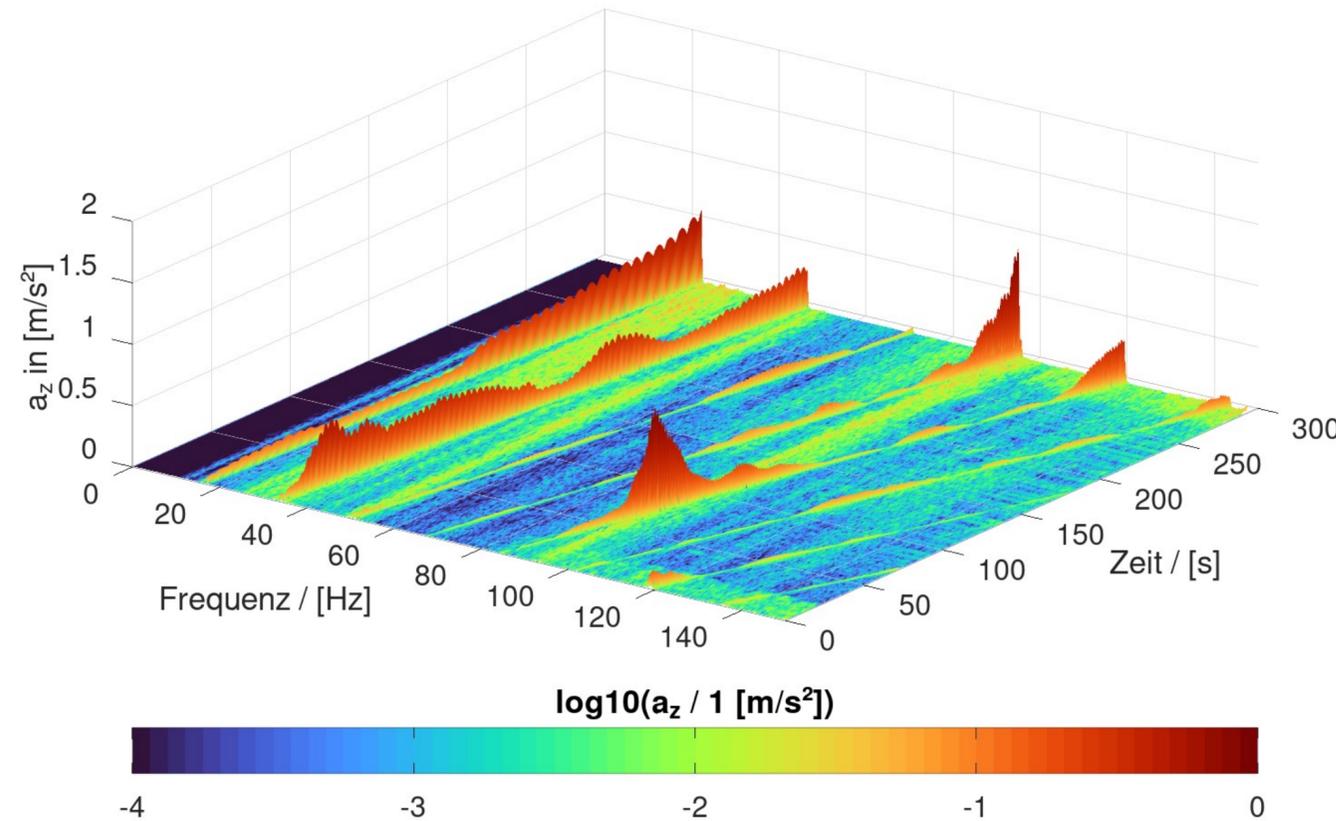
- + Drehzahlrampe zwischen  $1020 \text{ min}^{-1}$  und  $1460 \text{ min}^{-1}$
- + signifikante Überhöhungen bei ca. 37 Hz Frequenzlinie  $\rightarrow$  kritische Eigenfrequenz
- + Max. Reduktion im Resonanzbereich und ca. 76 % bei max. Drehzahl



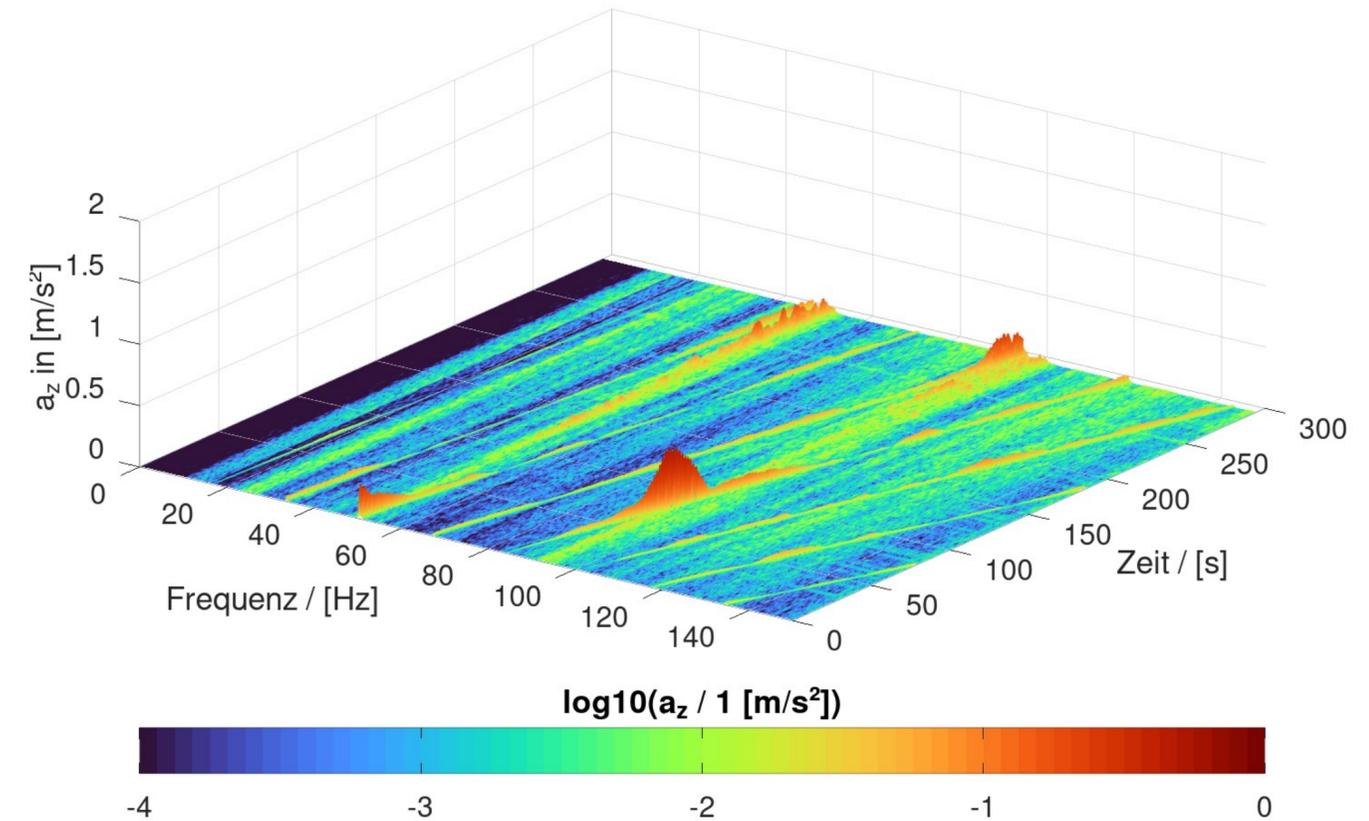
## Beschleunigungen



ohne QH-Technologie



mit QH-Technologie



- + Drehzahlrampe zwischen  $1020 \text{ min}^{-1}$  und  $1460 \text{ min}^{-1}$
- + Leichte Überhöhungen bei ca. 37 Hz, 50 Hz, 85 Hz → kritische Eigenfrequenzen
- + Reduktion von ca. 78 % bei max. Drehzahl



## Zusammenfassung der Ergebnisse

- + Die **QuietHydro**-Technologie reduziert die Amplituden der anregenden Druckwellen im gesamten Drehzahlbereich der Abwasserpumpe
- + Beschleunigungen der Rohrleitungen werden im gesamten Betriebsbereich spürbar verringert
- + Entspricht die Frequenz der Druckwelle einer Eigenfrequenz der Rohrleitung (akustisch oder strukturell) kommt es zur Resonanz und zu signifikant höheren Vibrationen
- + Die **QuietHydro**-Technologie reduziert Resonanzeffekte deutlich
- + bei maximaler Betriebsdrehzahl der Pumpe wurden folgenden Reduktionsgrade der effektiven Größen erreicht:  
→ Druckpulsationen 92%; Beschleunigungen in X-Richtung: 70%, in Y-Richtung: 76% in Z-Richtung: 78%
- + **Fazit: Keine weiteren Beschwerden der Anwohner seit Inbetriebnahme unseres Dämpfungssystems**

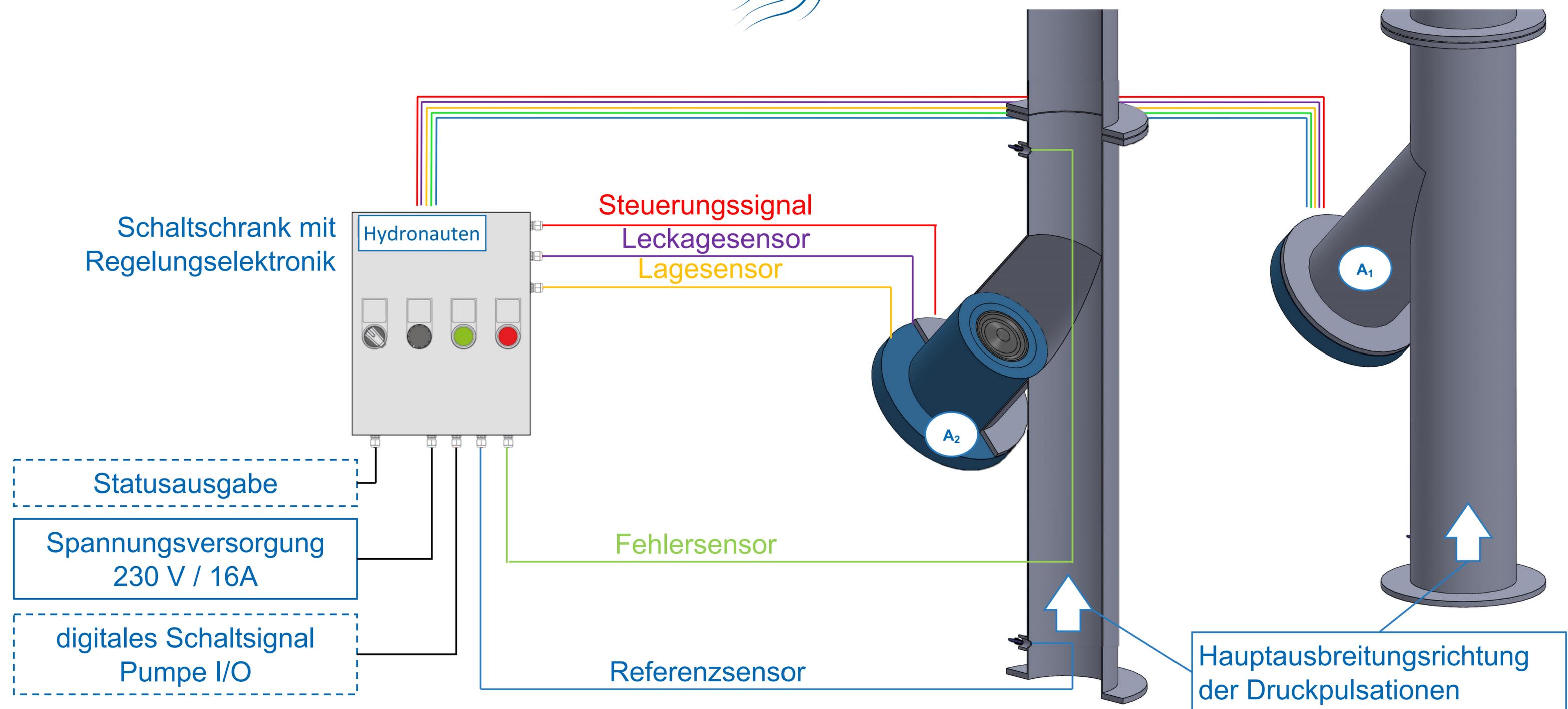
Als Ingenieure glauben wir an Technologien zur Lösung von Problemen. Doch eine Idee darf nicht bloß technische Verbesserungen mit sich bringen. Sie muss auch ökonomisch und ökologisch wertvoll für Menschen und Unternehmen sein. Aus diesem Grund haben wir unsere QuietHydro-Lösung entwickelt, die signifikant und nachhaltig Kosten, Energieverbrauch und Stress reduziert.



# Hydronauten

Dr.-Ing. Andre Laß

Dr.-Ing. Johannes Büker



Referenzsensor:  
Fehlersensor:

Erfassung der sich ausbreitenden Druckpulsationen  
Erfassung der Güte der ANC-Regelung