

Untersuchung akustischer Phänomene an Francis-Turbinen im Pumpspeicherkraftwerk (PSKW) in Luxemburg

Dipl.- Ing. Gilles Nosbusch
SEO, Luxemburg

Dr.-Ing. Johann Lenz
KÖTTER Consulting Engineers, Deutschland





1. Überblick SEO und Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Betrieb

1.2 Instandsetzung

1.3 Kurzvorstellung KÖTTER Consulting Engineers

2. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Einleitung

2.2 Literaturrecherche

2.3 Technische Daten und Messstellenplan

2.4 Messdurchführung und Rückschlüsse

2.5 Weitere Erkenntnisse

3. Fazit und geplante Vorgehensweise

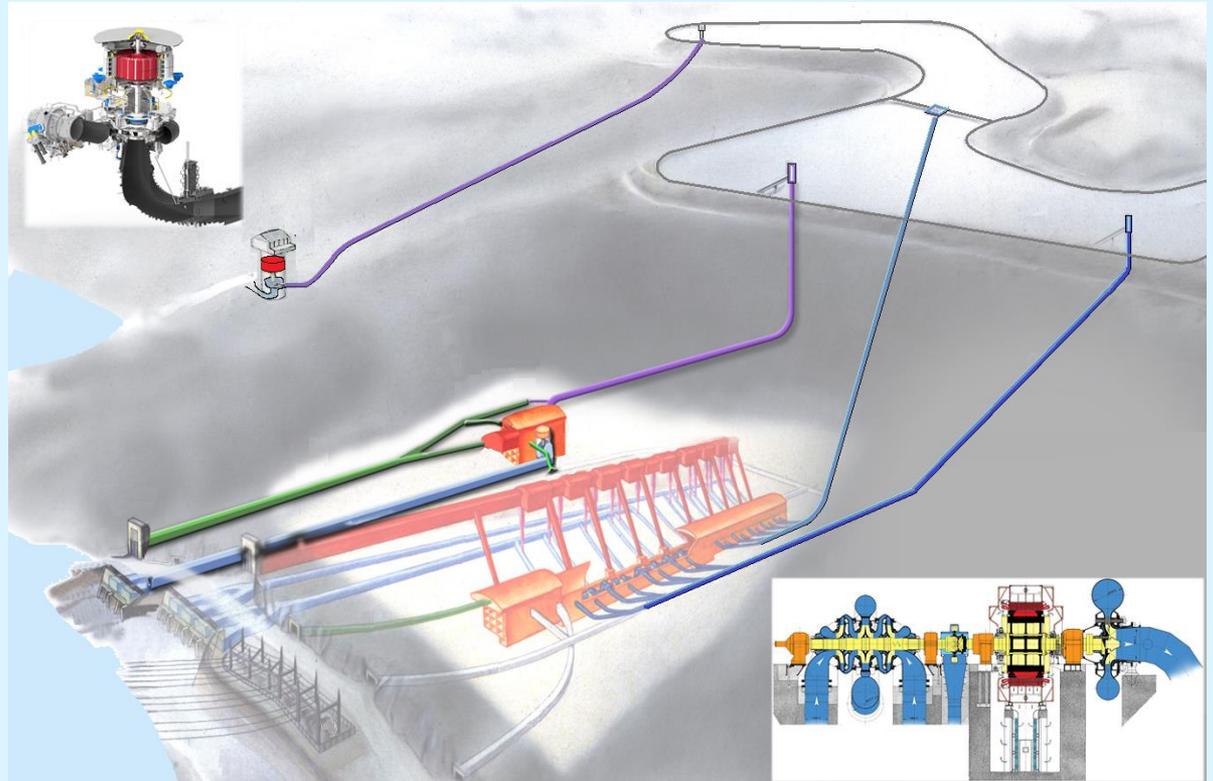
PSW Vianden



SEO

Société Electrique
de l'Our

- 2 Oberbecken
- Volumen 7,34 Mio. m³
- Energieinhalt 4.984 MWh
- 4 Einläufe und Druckrohre
- 9 ternäre Maschinensätze
- 2 vertikale Pumpturbinen
- Gesamtleistung
 - TU 1.296 MW
 - PU 1.040 MW



PSW Vianden

- 2 Hauptabteilungen
 - Planungen & Neubau
 - Betrieb & Instandhaltung
- 148 Mitarbeiter (Vianden)
- Werkstätten
 - mechanisch
 - elektrisch
 - Korrosionsschutz
 - Gerüstbau
- Tauchermannschaft

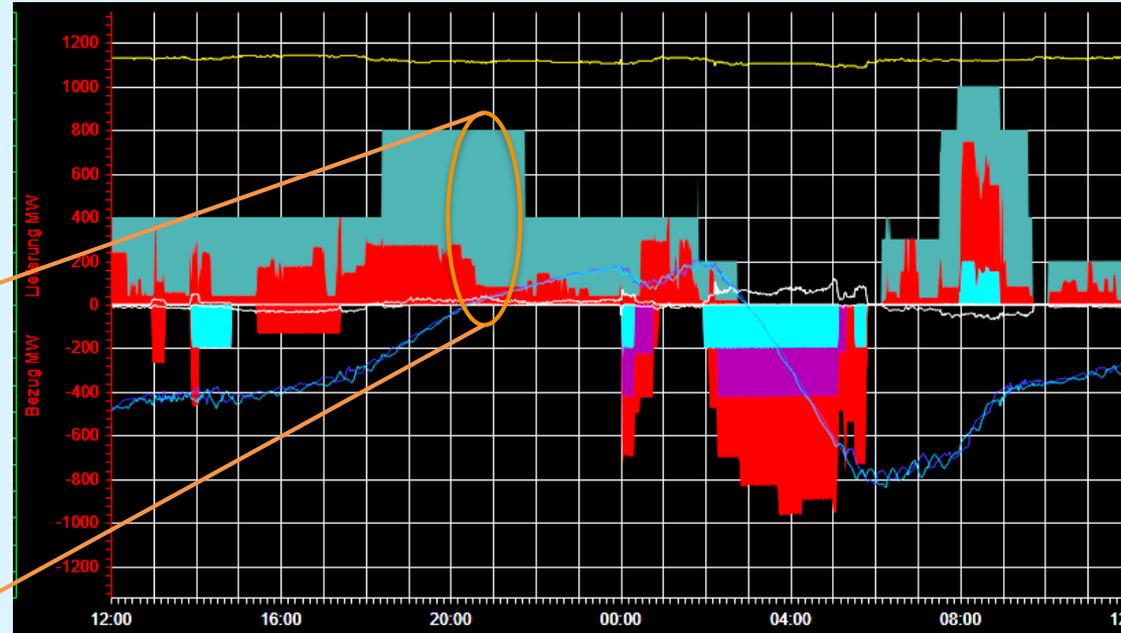


■ Aktuelle Betriebsweise

- hydraulischer Kurzschluss
- viele Betriebsstunden bei tiefer Teillast

Drehende Reserve 800 MW

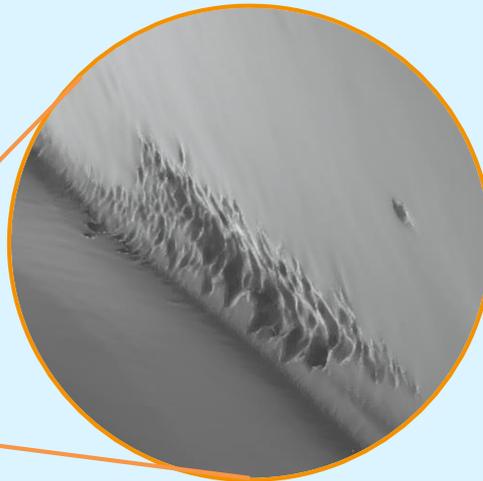
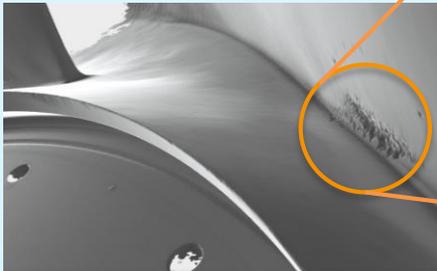
8 Turbinen mit 10 % Last
Lieferung: 80 MW



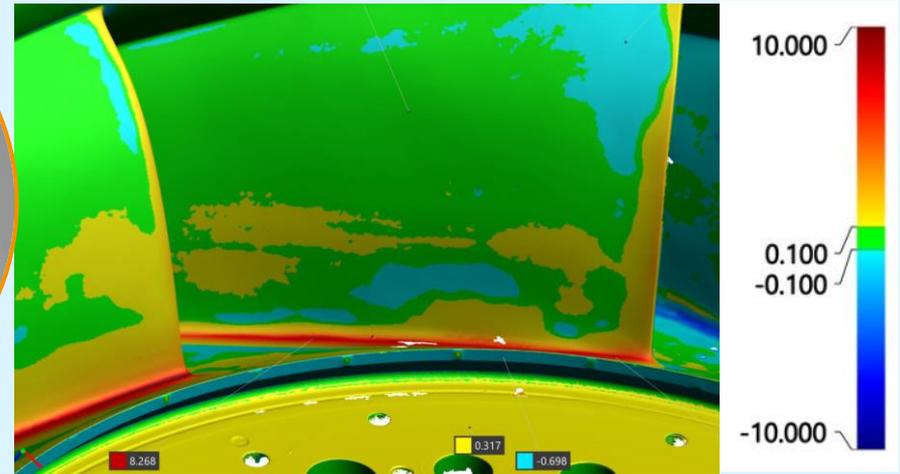
■ Zeitbasierte Instandsetzung

- 2-3a Kurzrevision
- 12-15a Generalrevision

3D-Vermessung vor
Sanierung



Vergleich vorher-nachher Schweiß-Sanierung Laufrad
während einer Generalrevision



- Betriebsweise
 - Kavitation „messen“
 - schädigende Lastbereiche vermeiden
- Instandhaltung
 - Zustandsbasierte Intervalle
 - Kavitations-„Zähler“ als Maß für den aktuellen Zustand



Kurzvorstellung KÖTTER Consulting Engineers

Das ganze Spektrum der Schall- und Schwingungstechnik.

- Unabhängiges beratendes Ingenieurunternehmen
- Gegründet 1978, 60 Mitarbeiter in Rheine und Berlin ⓘ
- Erfahrungen aus weltweit über 18.000 Projekten

Messung • Planung • Berechnung • Beratung • Gutachtenerstellung • Troubleshooting

Kurzvorstellung KÖTTER Consulting Engineers

Das ganze Spektrum der Schall- und Schwingungstechnik

- Maschinendynamik
- Technische Akustik
- Strömungstechnik
- Erschütterungen
- Pulsationsstudien
- Immissionsschutz

Messung • Planung • Berechnung • Beratung • Gutachtenerstellung • Troubleshooting



Maschinendynamik

MASCHINENDYNAMIK

Schwingungen an Maschinen und Anlagen.

UNSERE LEISTUNGEN ⓘ

■ Troubleshooting

Ingenieurtechnische Lösungsfindung bei Schall- und Schwingungsproblemen

■ Ursachenanalyse

Detailliertes Engineering auch zur Auslegung von effektiven Minderungsmaßnahmen

■ Umfassende Schwingungsberechnungen

Struktur- und Rotordynamik, Torsions- und Lateralschwingungen usw.





1. Überblick SEO und Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Betrieb

1.2 Instandsetzung

1.3 Kurzvorstellung Fa. KÖTTER

2. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Einleitung

2.2 Literaturrecherche

2.3 Technische Daten und Messstellenplan

2.4 Messdurchführung und Rückschlüsse

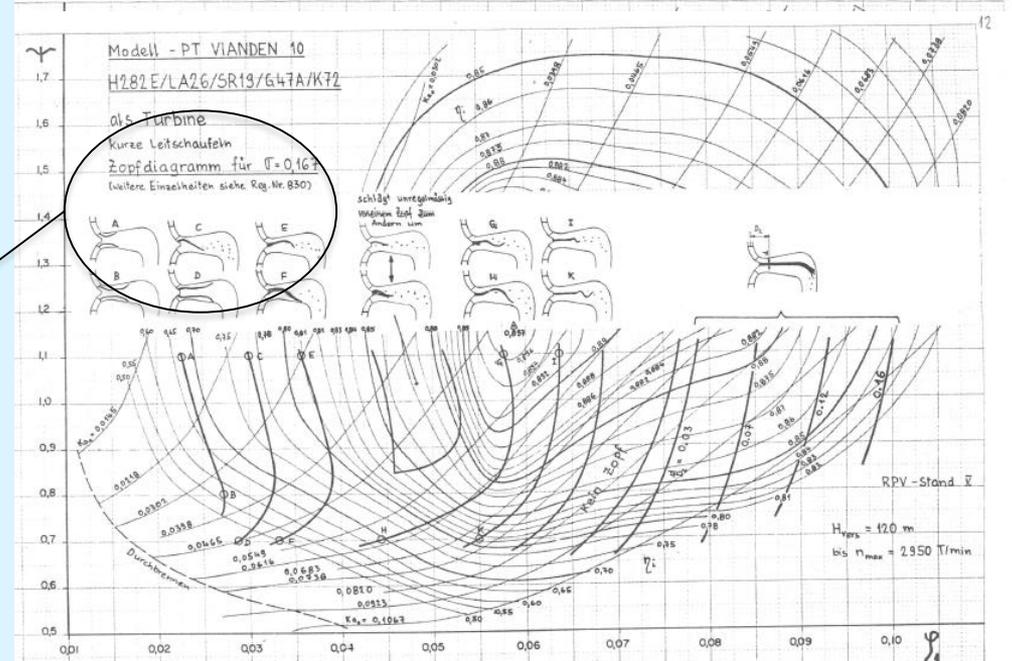
2.5 Weitere Erkenntnisse

3. Fazit und geplante Vorgehensweise

2.1 Einleitung

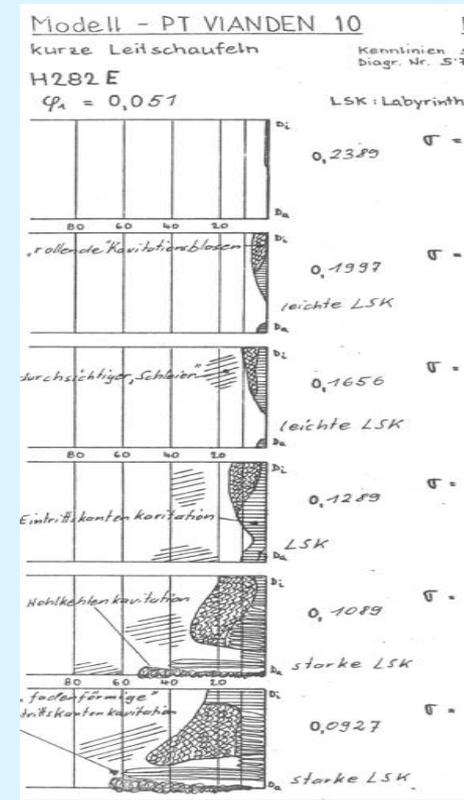
- Kavitationsuntersuchung an Maschine 10 (1972)

1. Modellbau im abgestimmten Maßstab
2. Erfassung des Modellkennfeldes
3. Umfassende Modelluntersuchung
4. Übertragung auf die neue Maschine



2.1 Einleitung

- Kavitationsuntersuchung an Maschine 10 (1972)
- 5. Interpretation der Fotos im Modellversuch
- 6. Ermittlung der verschiedenen Kaviationsstufen und angreifenden Kaviationsarten
 - Labyrinthspaltkavitation
 - Eintrittskantenkavitation
 - Hohlkehlkavitation
 - Flächenkavitation
- 7. Gezielte messtechnische Untersuchung im Betrieb der Francis turbine



2.1 Einleitung

Gewählte Vorgehensweise an M1 bis M9:

- Ziel der durchgeführten Untersuchung ist, mögliche akustischen Phänomene vor allem im Teillastbereich im Saugrohr zu detektieren.
- Übergeordnet soll ein Zusammenhang zu den auftretenden Kavitationsschäden an den Laufrädern hergestellt werden.
- Dazu wird eine rein messtechnische Schwingungsuntersuchung durchgeführt da keine Modellversuche oder sonstige Informationen vorlagen.
- Hierbei konnte auf bestehende Sensorik (Absolut- und relative Wellenschwingungen) sowie auf mobile Sensorik (Beschleunigungen, Druckpulsationen, Luftschall) zurückgegriffen werden.



Mobile Datenerfassung 24 Bit:

Abgriff der bestehenden Sensorik:





1. Überblick SEO und Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Betrieb

1.2 Instandsetzung

1.3 Kurzvorstellung Fa. KÖTTER

2. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Einleitung

2.2 Literaturrecherche

2.3 Technische Daten und Messstellenplan

2.4 Messdurchführung und Rückschlüsse

2.5 Weitere Erkenntnisse

3. Fazit

2.2 Warum das Rad neu erfinden? – Literaturrecherche -

1.....

2.....

3.....

4. Detection of Hydraulic Phenomena in Francis Turbines with Different Sensors (2019), David Valentin, et.al., Center for Industrial Diagnostic and Fluid Dynamics UPC Barcelona, Spain

5.....

6.....

7.....

8. On the physical mechanisms governing self-excited pressure surge in Francis turbines (2014), Andreas Müller, et. al., EPFL Laboratory for Hydraulic Machines, Lausanne, Switzerland

Literaturrecherche1: ‚Detection of Hydraulic Phenomena in Francis Turbines‘

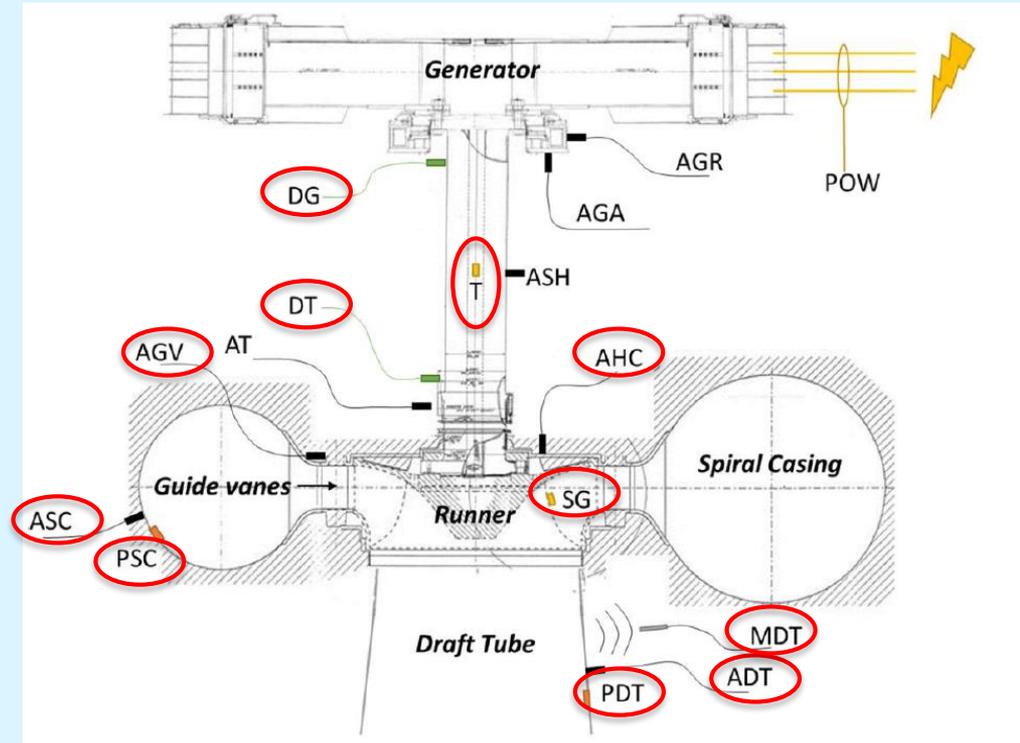
Ergebnisübersicht:

Verwendete Sensorik:

- Beschleunigungsaufnehmer A..
- Wellenschwingungssensoren DT,DG
- Mikrophon MDT
- Drucksensoren PDT,PSC
- Dehnungsmesstreifen SG,T

Verwendete Auswertetechnik:

- FFT
- RMS-Werte
- Demodulation



Literaturrecherche1: ‚Detection of Hydraulic Phenomena in Francis Turbines‘

Folgende Phänomene wurden in Abhängigkeit vom Lastzustand detektiert (Auszug):

1. Deep Part Load (Tiefe Teillast bis 30 % Last)

- Turbulenzen im Bereich des Saugrohres regen

$$n_{ED} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{g \cdot H}} \quad \text{und} \quad Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}}$$

2.

Wobei:

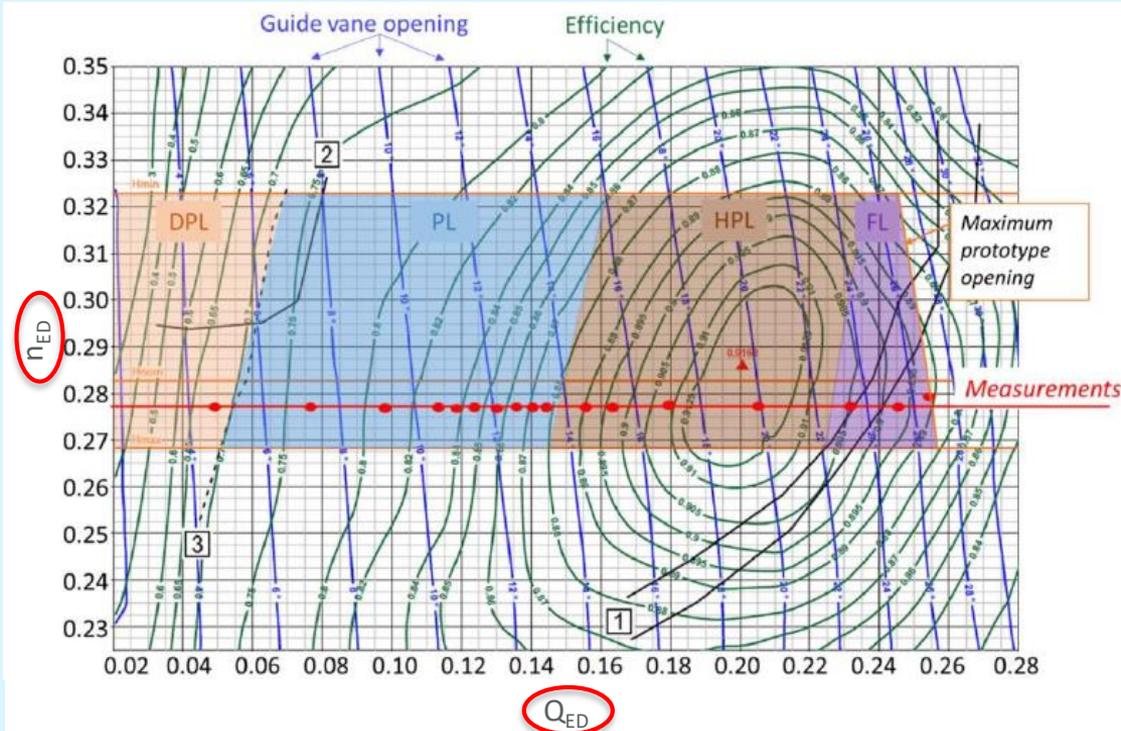
D - Laufraddurchmesser

3. n - Drehzahl

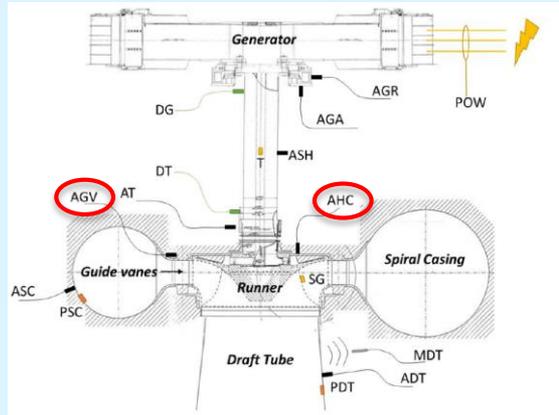
g - Erdbeschleunigung

4. H - Fallhöhe

Q - Volumenstrom

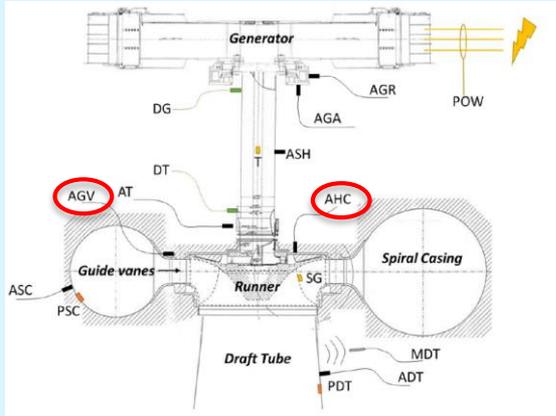


Literaturrecherche1: „Detection of Hydraulic Phenomena in Francis Turbines“



Betriebs regime	Phänomen	Erkennungstechnik	Sensoren																			
			Beschleunigung							Verdrängung			Druck			Strom		Ton		Drehbarer Rahmen		
			AT	AG	AGA	ADT	ASC	AHC	AGV	DT	DG	PDT	PSC	POW	MDT	Drehmoment T	Stimme SG	ASH				
Tiefe Teillast	Turbulenz erregender rotierender Trag natürlich Frequenz	FFT	(2-6) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	Nein	Nein	(2-6) _f	(4-10) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	(2-6) _f	Nein				
		RMS	(2-6) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	Nein	(1-6) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	(2-6) _f	Nein	Nein	Nein	Nein	(2-6) _f	Nein				
		Demodulation	Nein			Nein		(2-6) _f	Nein									Nein				
Teillast	Wirbelteil- asynchrones Bauteil	FFT	Nein	(0,2-0,4) _f	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,4) _f	(0,2-0,4) _f	(0,2-0,4) _f	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	(0,6-0,8) _f				
		RMS	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,8) _f	(0,2-0,8) _f	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,8) _f				
		Demodulation	Nein			Nein		Nein	>19 kHz									Nein				
	Vortexteil- synchron Komponente	FFT	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,4) _f	(0,2-0,4) _f	(0,2-0,4) _f	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,4) _f	(0,6-0,8) _f	Nein								
		RMS	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,8) _f	(0,2-0,8) _f	(0,2-0,8) _f	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,8) _f	Nein	Nein								
		Demodulation	>13 kHz			>13 kHz	>13 kHz	>13 kHz	Nein									>6 kHz				
0,59	Hydraulische Resonanz	FFT	Nein	Nein	Nein	0,3 _f	0,3 _f	0,3 _f	Nein	Nein	Nein	0,3 _f	Nein									
		RMS	Nein	Nein	Nein	(0,2-0,8) _f	(0,2-0,8) _f	(0,2-0,8) _f	(0,2-0,8) _f	Nein	Nein	(0,2-0,8) _f	Nein									
		Demodulation	>13 kHz			>13 kHz	>13 kHz	>13 kHz	Nein									>6 kHz				
Hohe Teillast	0,5405-0,8915	Kavitation	FFT	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	(3-200) _f	Nein											
			RMS	>200 _f	>200 _f	>200 _f	>200 _f	>200 _f	>200 _f	Nein	(200-500) _f											
			Demodulation	Nein			Nein		Nein	>13 kHz									>6 kHz			
	0,7815	Resonanz der Läufer	FFT	± _s	± _s	± _s	(60-65) _f	Nein	± _s	± _s	Nein	± _s										
			RMS	(50-70) _f	(50-70) _f	(50-70) _f	Nein	(50-70) _f	(50-70) _f	(50-70) _f	Nein	Nein	Nein	(50-70) _f	Nein	Nein	(50-70) _f	(50-70) _f	Nein			
			Demodulation	Nein			Nein		Nein	>13 kHz									Nein			
0,9499	Hydraulische Resonanz	FFT	1,3 _f	Nein	1,3 _f	1,3 _f	1,3 _f	Nein	1,3 _f	1,3 _f	Nein	1,3 _f										
		RMS	Nein	Nein	(1-1,5) _f	(1-1,5) _f	(1-1,5) _f	Nein	(1-1,5) _f	Nein	Nein	(1-1,5) _f										
		Demodulation	>13 kHz			>13 kHz	>13 kHz	>13 kHz	Nein									>6 kHz				
Überlastung	1,0856	Überlastungsinstabilität	FFT	Nein	Nein	Nein	0,4 _f	0,4 _f	0,4 _f	Nein	Nein	Nein	0,4 _f	0,4 _f	0,4 _f	Nein	0,4 _f					
			RMS	Nein	Nein	0,4 _f	Nein	0,2-0,4 _f	0,2-0,4 _f	Nein	Nein	Nein	0,2-0,4 _f	0,2-0,4 _f	0,2-0,4 _f	Insgesamt	0,2-0,4 _f					
			Demodulation	>13 kHz			>13 kHz	>13 kHz	>13 kHz	Nein								>6 kHz				
Anzahl der entdeckten Phänomene (es werden nur die Phänomene mit guter Entdeckung gezählt)		FFT	1	1	2	3	3	4	4	2	2	4	5	4	0	4	4	0				
		RMS	3	3	2	2	4	5	5	3	2	4	4	4	4	4	5	4				
		Demodulation	4	-	-	4	-	5	6	-	-	-	-	-	-	-	-	5				
		Insgesamt	7	3	4	5	5	7	7	3	2	4	5	4	4	4	5	7				

Literaturrecherche1: „Detection of Hydraulic Phenomena in Francis Turbines“



Kernaussage:

- Gute Erkennungen mit Körperschallsensorik
- Keine grundlegende Eindeutigkeit

Betriebsregime	P _{Hub}	Phänomen	Erkennungstechnik	Stationärer Rahmen	
				AHC	AGV
Tiefe Teillast	0.286	Turbulenz erregender rotierender Zug natürlich Frequenz	FFT	(2-6) f	(4-10) f
			RMS	(1-6) f	(2-6) f
			Demodulation	(2-6) f	Nein
Teillast	0.3874-0.6081	Wirbelseil- asynchrones Bauteil	FFT	Nein	Nein
			RMS	Nein	Nein
			Demodulation	Nein	>19 kHz
	0.59	Hydraulische Resonanz	FFT	(0,2-0,4) f	Nein
			RMS	(0,2-0,8) f	Nein
			Demodulation	>13 kHz	Nein
0.59	Hydraulische Resonanz	FFT	0,3 f	Nein	
		RMS	(0,2-0,8) f	(0,2-0,8) f	
		Demodulation	>13 kHz	>13 kHz	

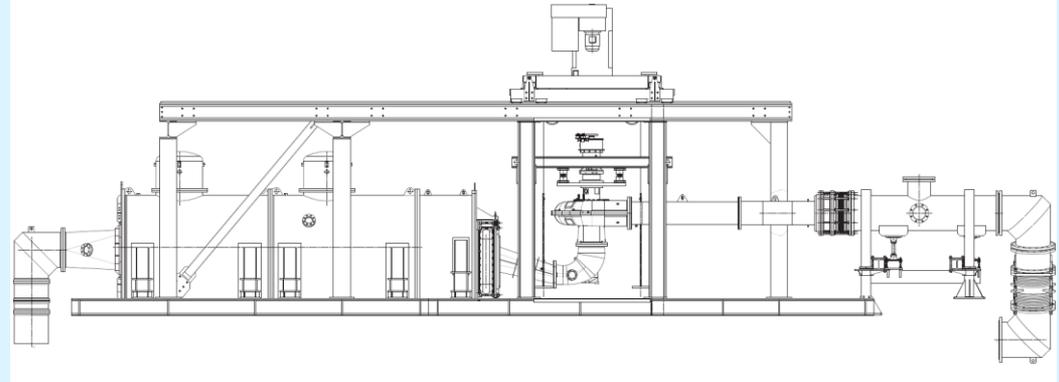
Betriebsregime	P _{Hub}	Phänomen	Erkennungstechnik	Stationärer Rahmen	
				AHC	AGV
Hohe Teillast	0.5405-0.8919	Kavitation	FFT	Nein	(3-200) f
			RMS	>200 f	>200 f
			Demodulation	Nein	>13 kHz
Hohe Teillast	0.7815	Resonanz der Läufer	FFT	Nein	Nein
			RMS	(50-70) f	(50-70) f
			Demodulation	Nein	>13 kHz
Hohe Teillast	0.9459	Hydraulische Resonanz	FFT	Nein	1,3 f
			RMS	Nein	(1-1,5) f
			Demodulation	>13 kHz	>13 kHz
Überlastung	1.0856	Überlastungsinstabilität	FFT	0,4 f	Nein
			RMS	0,2-0,∞	0,2-0,∞
			Demodulation	>13 kHz	>13 kHz

Anzahl der entdeckten Phänomene (es werden nur die Phänomene mit guter Entdeckung gezählt)	FFT	3	4
	RMS	5	3
	Demodulation	5	6
	Insgesamt	7	7

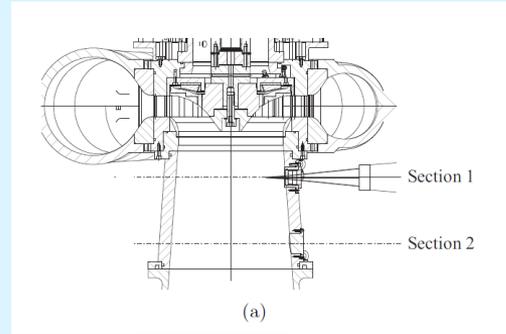
Schlechte Erkennung

Literaturrecherche2: *„On the physical mechanisms governing self-excited pressure surge...“*

1:16 Modell reduzierte Francis-Turbine installiert im Labor für Hydraulik an der EPFL in Lausanne

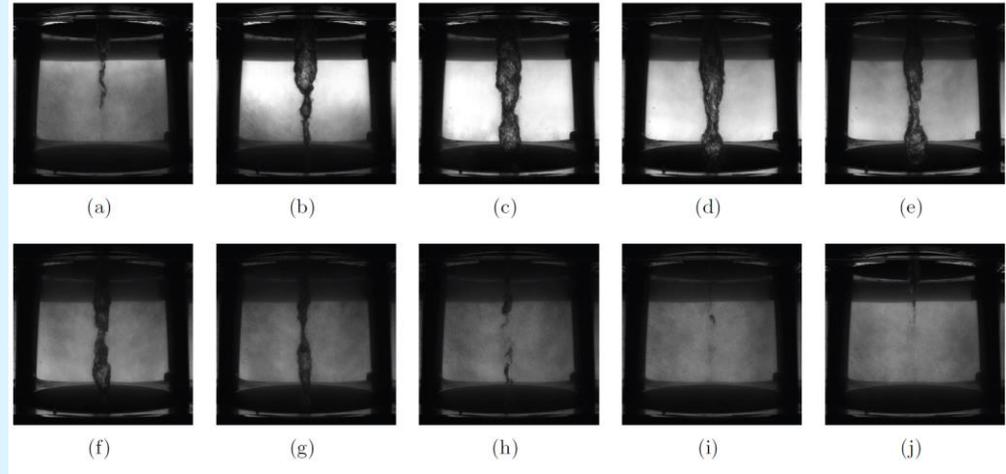


Zweiphasenströmung mittels wanddrucksynchronisiertem Laser-Doppler-Verfahren (LDV) und (PIV)-Messungen

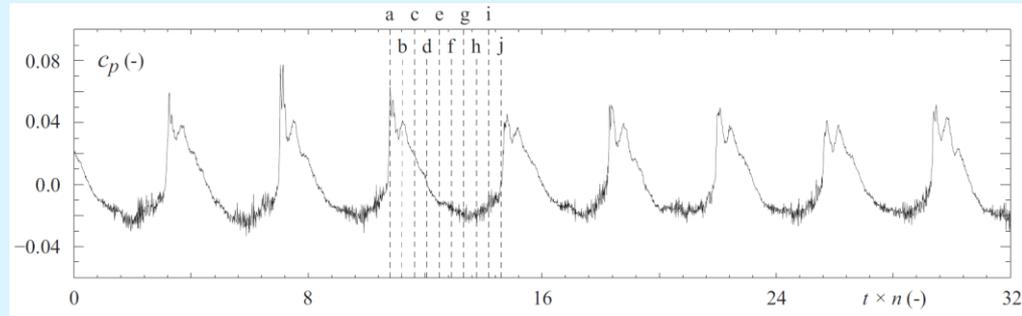


Literaturrecherche2: „On the physical mechanisms governing self-excited pressure surge...“

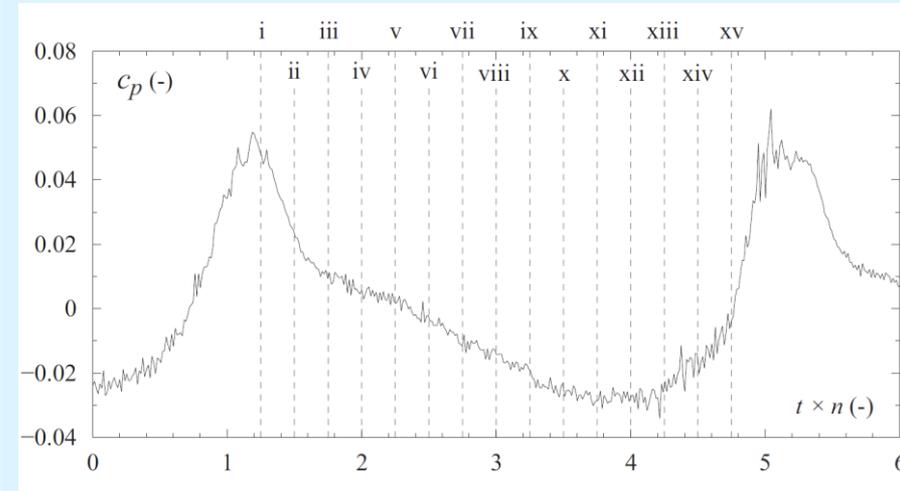
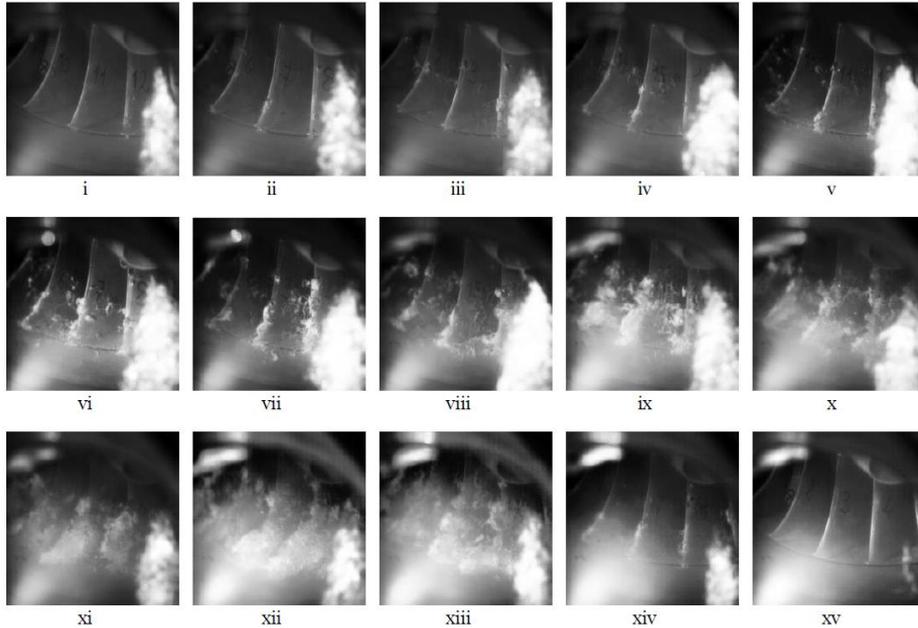
Hochgeschwindigkeitsvisualisierung der Wirbelzopfschwingung im Saugrohr.



Wanddruckbeiwert c_p in Abhängigkeit von der Anzahl der Läuferumdrehungen. Bilder des Wirbelzopfs, aufgenommen bei (a) ... (j), sind in der oberen Abbildung dargestellt.



Literaturrecherche2: „On the physical mechanisms governing self-excited pressure surge...“



Kavitation an den Laufradschaufeln während einer Periode der Druckschwingung

Wanddruckfaktor c_p als vollständiger Zyklus in Abhängigkeit von den Läuferumdrehungen.



1. Überblick SEO und Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Betrieb

1.2 Instandsetzung

1.3 Kurzvorstellung Fa. KÖTTER

2. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Einleitung

2.2 Literaturrecherche

2.3 Technische Daten und Messstellenplan

2.4 Messung und Ergebnisse

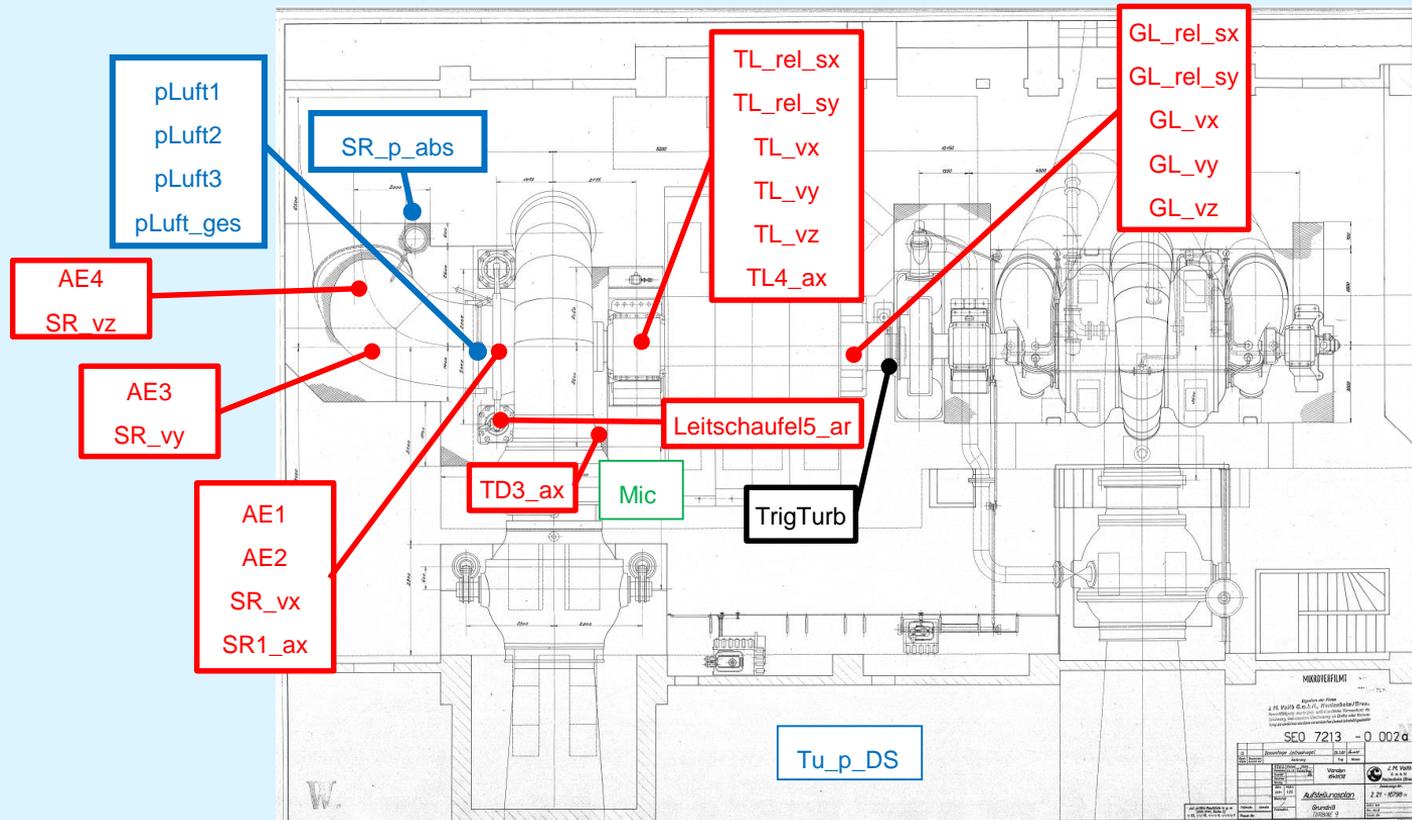
2.5 Weitere Erkenntnisse

3. Fazit und geplante Vorgehensweise

Technische Daten der Horizontalmaschinen

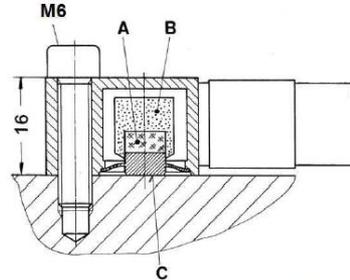
	M1, M3	M2,M4,M5,M6,M7	M8,M9
Hersteller	Neyrpic_Alsthom	Escher Wyss	J.M. Voith GmbH Heidenheim (Brenz)
Baujahr	1961	1962/63	1963
Fallhöhe	287,8 m	270,2 m 280,0 m 287,8 m	270,2 m
Wassermenge	40 m ³ /s	40,50 m ³ /s 41,45 m ³ /s 42,25 m ³ /s	38 m ³ /s
Leistung	135.050 PS	94.300 kW 100.000 kW 104.700 kW	122.000 PS
Drehzahl	428.6 U/min	428.6 U/min	428.6 U/min
Laufschaufelanzahl	15	17	13
Leitschaukelanzahl	24	24	20

Messstellenplan



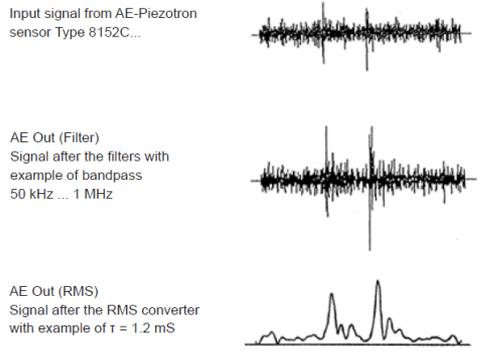
Zusätzliche Sensorik

Akustik-Emission Sensor (AE)



-> Befestigung mit Kontaktgel

Figure 10. AE sensor Kistler type 8152C. Item A denotes the piezoelectric transducer element, B is the backing, and C is the diaphragm.



-> Originalsignal AE Signal

-> AE Ausgang 50 bis 400 KHz

-> AE Ausgang über Hüllkurve als RMS Signal (T = 1.2 ms)

Demodulation



1. Überblick SEO und Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Betrieb

1.2 Instandsetzung

1.3 Kurzvorstellung Fa. KÖTTER

2. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Einleitung

2.2 Literaturrecherche

2.3 Technische Daten und Messstellenplan

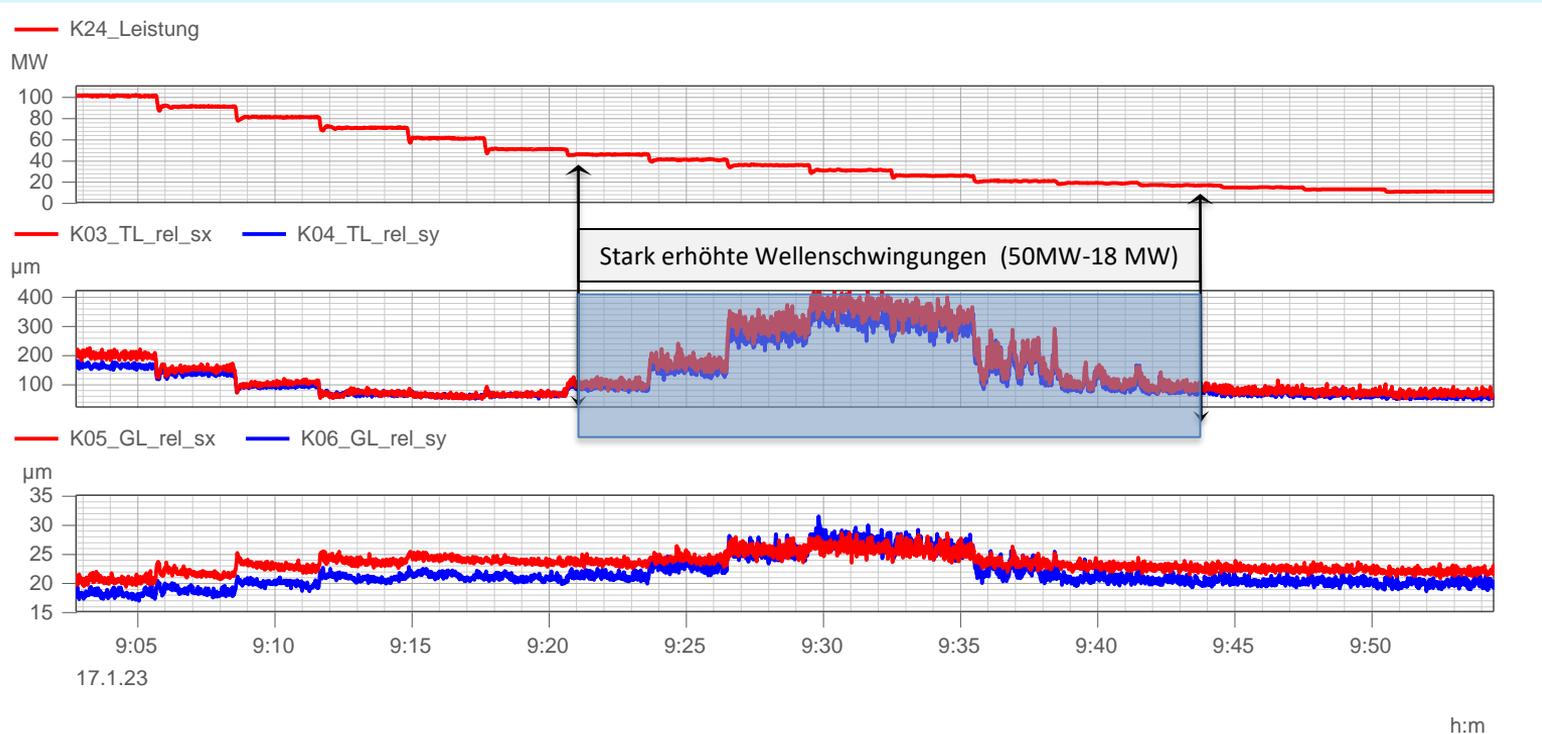
2.4 Messung und Ergebnisse

2.5 Weitere Erkenntnisse

3. Fazit und geplante Vorgehensweise

Messung und Ergebnisse Teil1: Lastvariation

1. Festinstallierte Sensorik Wellenschwingungen (Relativschwingungen Schwingweg Spitze-Spitze Werte)

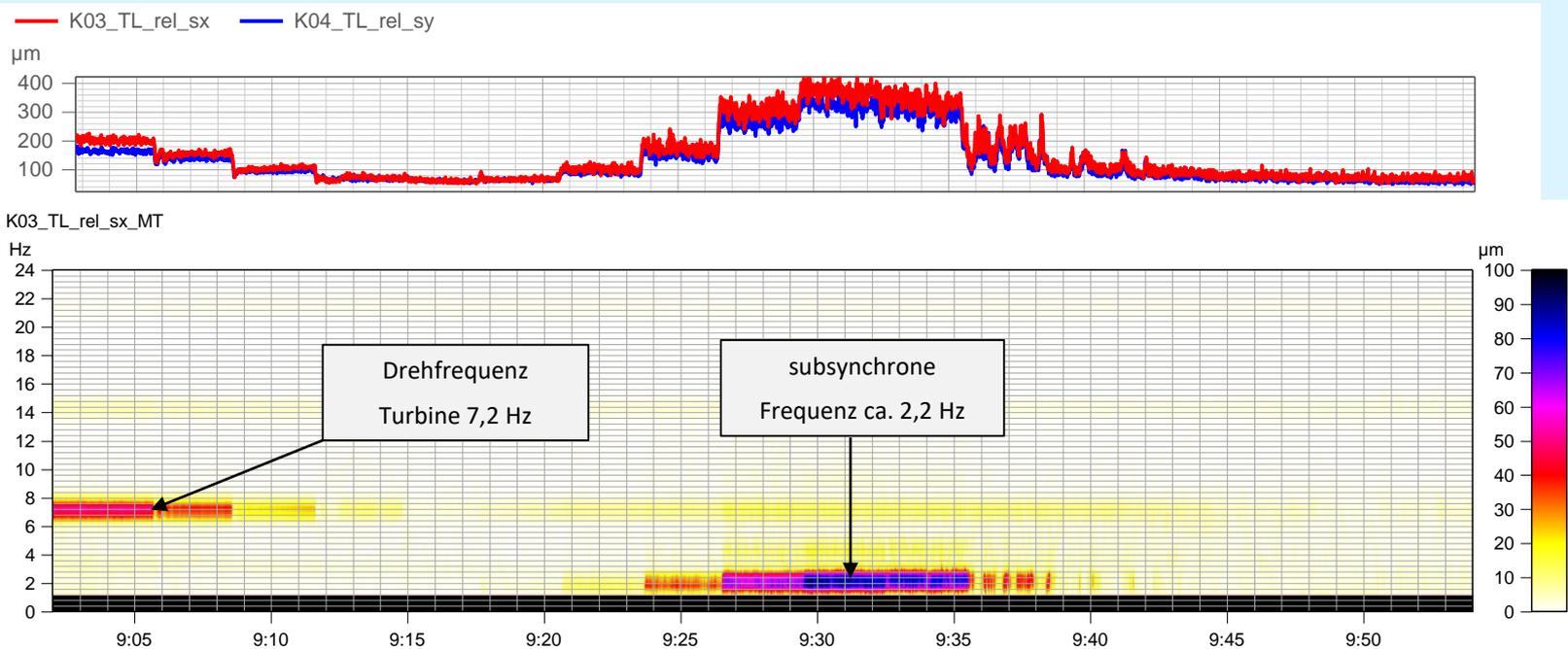


Wellenschwingungen
Turbine

Wellenschwingungen
Generator

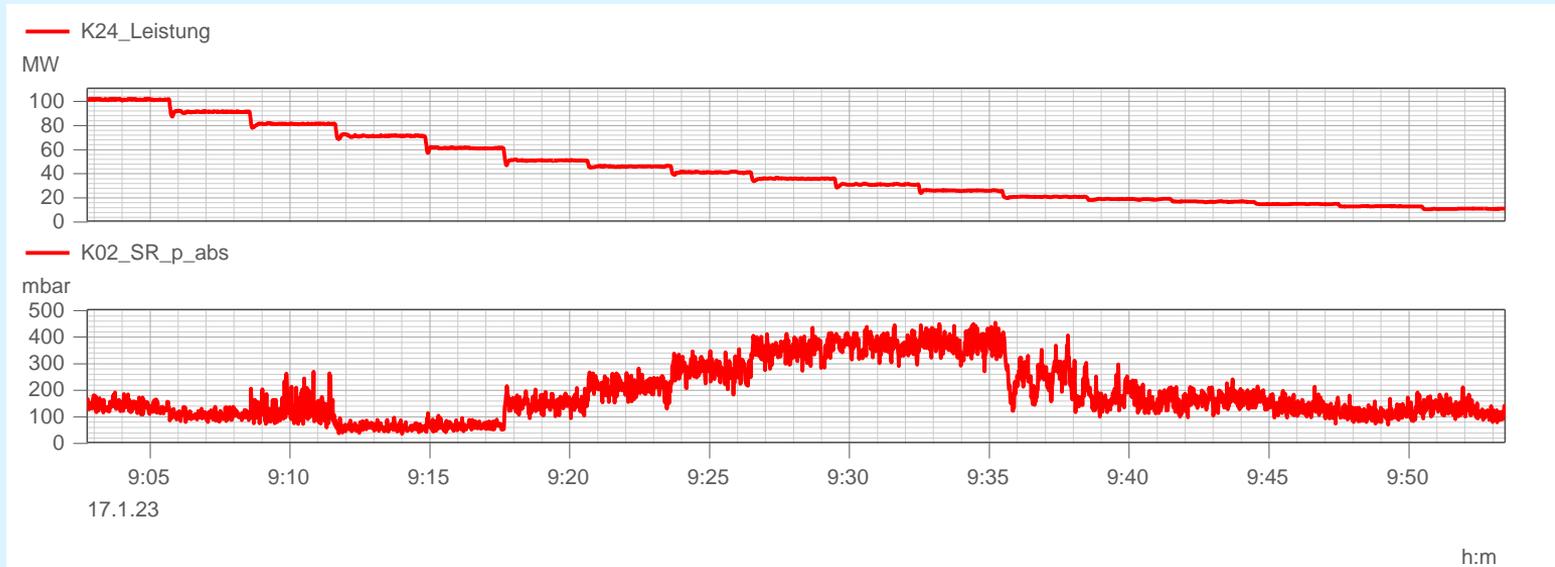
Messung und Ergebnisse Teil1:Lastvariation

1. Festinstallierte Sensorik (Amplitudenspektrum als Farbkarte)



Messung und Ergebnisse Teil1: Lastvariation

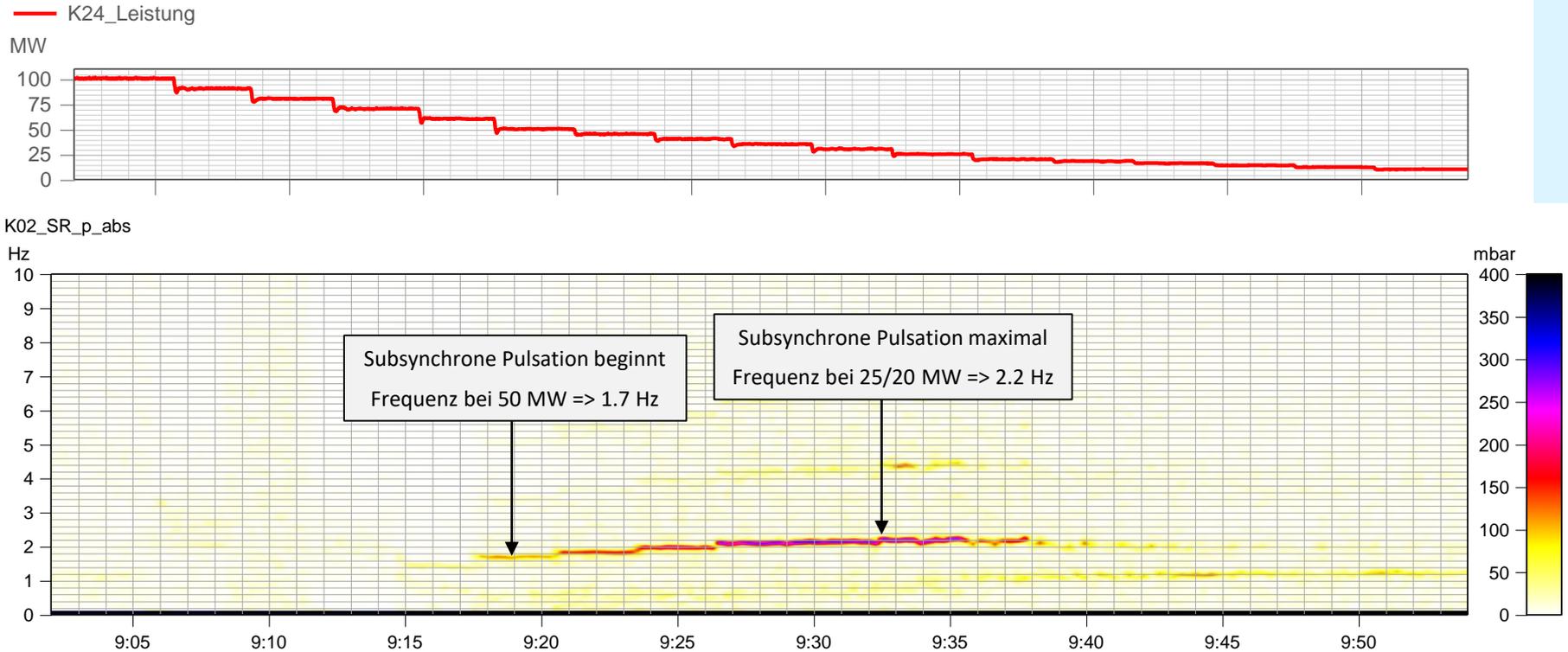
1. Mobile Sensorik Druckschwankungen im Saugrohr (mbar eff.)



Saugrohranschluß

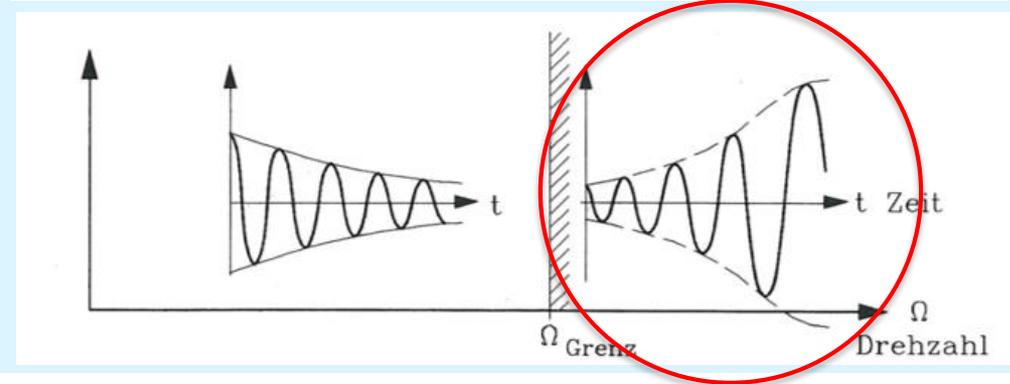
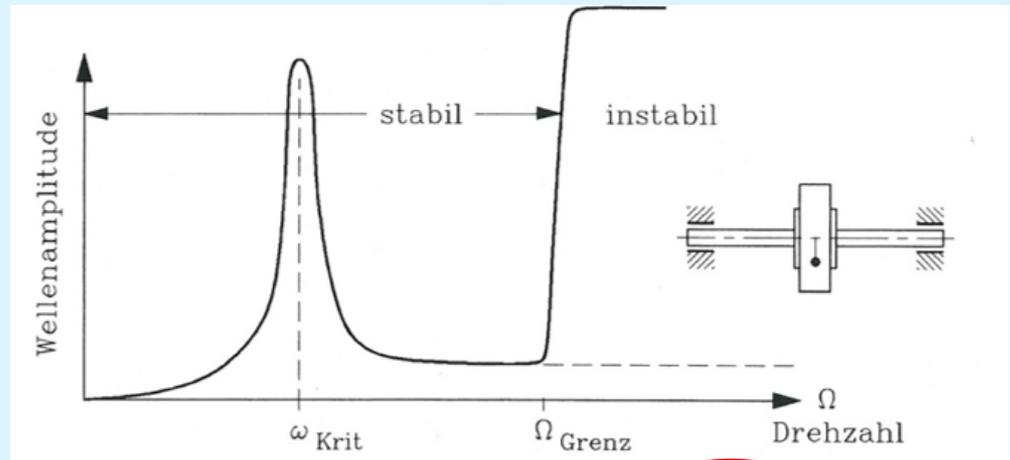


Messung und Ergebnisse Teil1: Lastvariation



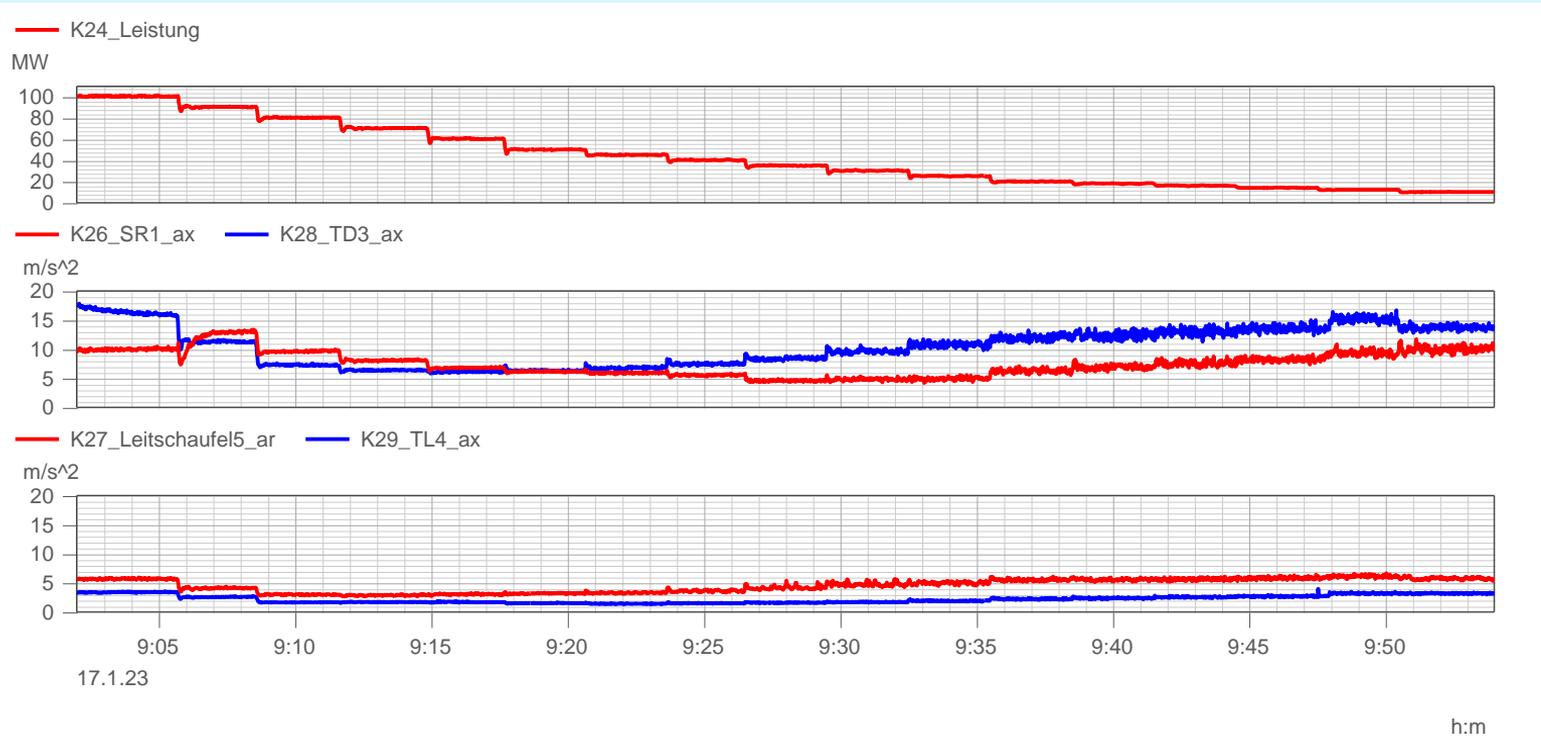
Kurzfasit: Subsynchroner Schwingungen/Pulsationen

- Phänomen: Schwingungsinstabilitäten
 $m\ddot{x} + \underbrace{d}_{\text{Dämpfung}}\dot{x} + cx = f(t) \Rightarrow$ Ein Freiheitsgradschwinger
- Selbsterregte Schwingungen können entstehen, wenn Kräfte den Dämpfungskräften entgegenwirken.
- Falls diese anregenden Kräfte die Wirkung der dämpfenden Kräfte aufheben, tritt eine Instabilität (Aufschaukeln) auf.
- Mögliche Anregung durch Spaltströmung, Reibung am Lager oder auch durch Dichtungsspalte.



Messung und Ergebnisse Teil1: Lastvariation

1. Zusätzliche Beschleunigungssensoren (Positionen laut Literatur-Studie gesetzt)



Saugrohr



Turbinendeckel



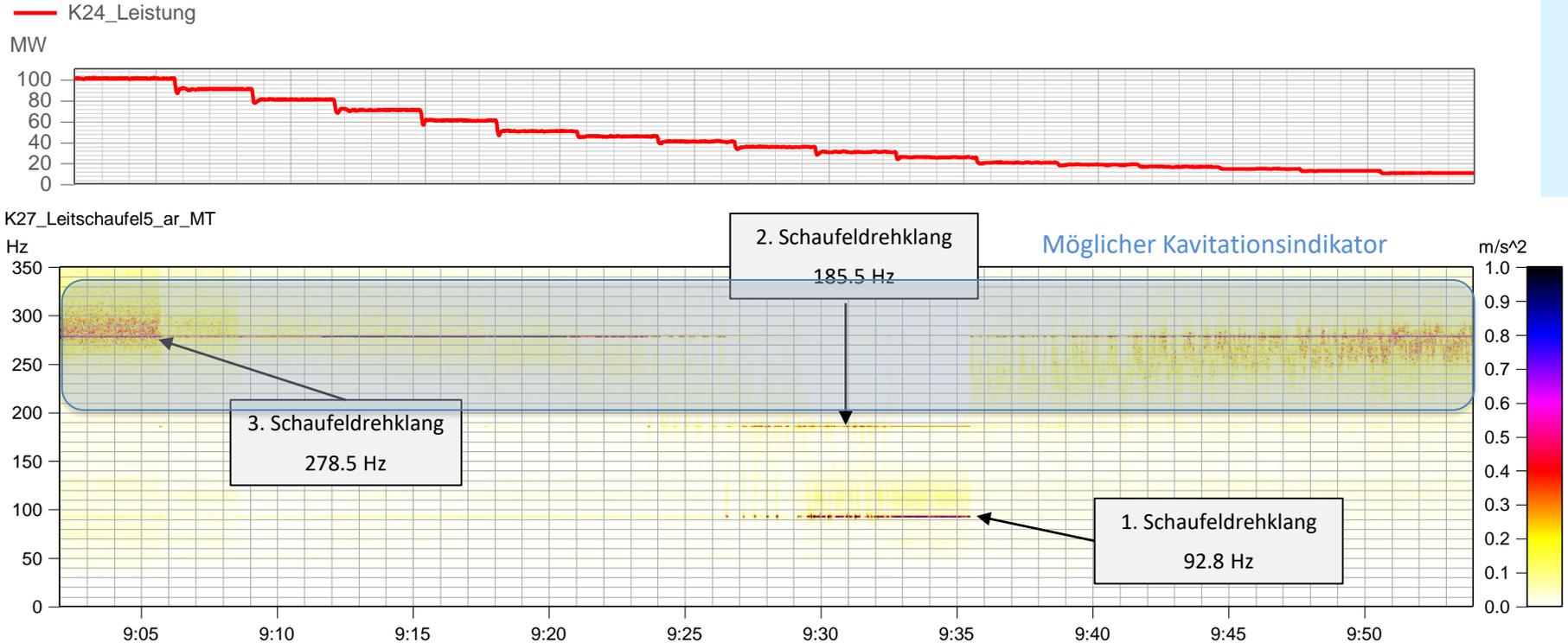
Leitschaufel



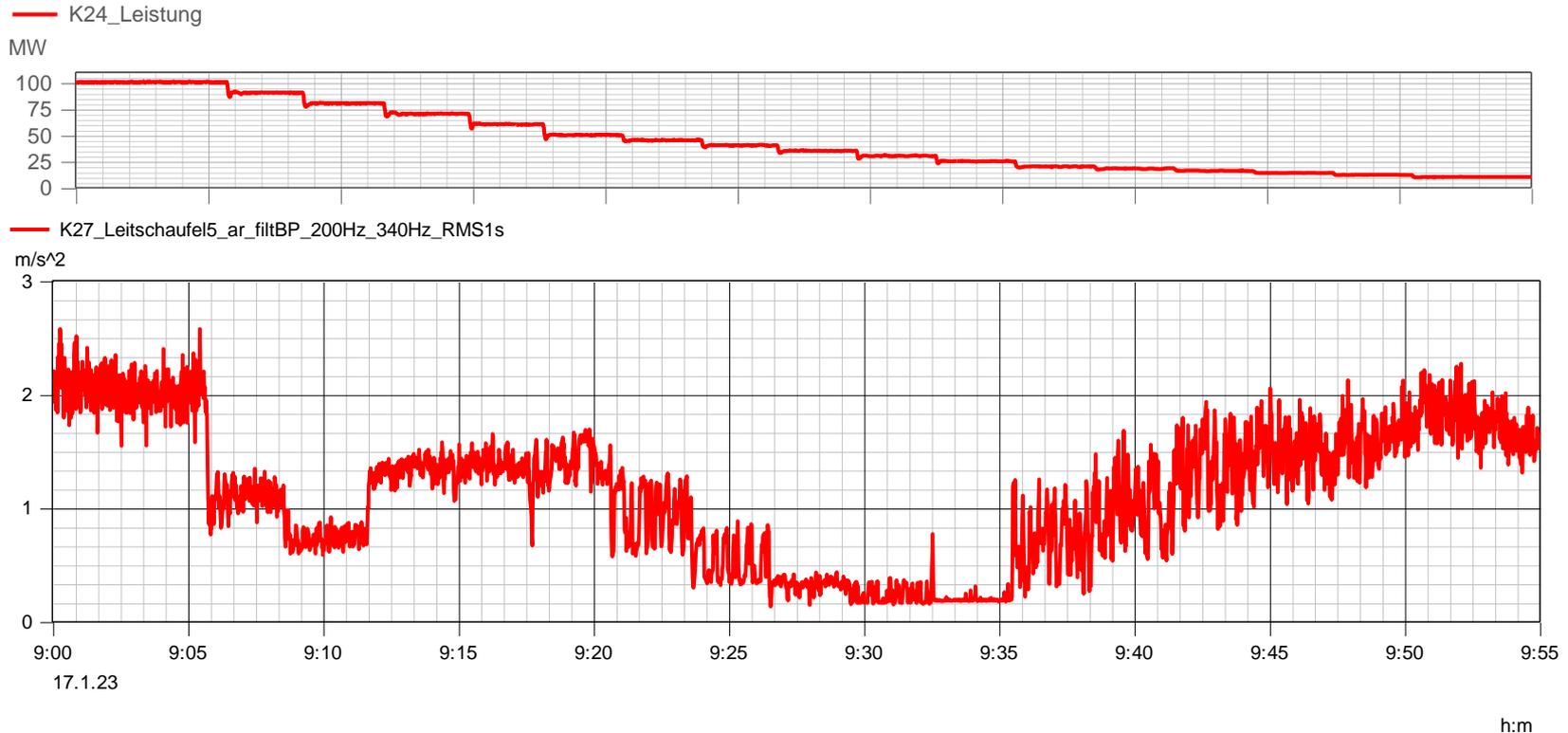
Turbinenlager



Messung und Ergebnisse Teil1: Lastvariation



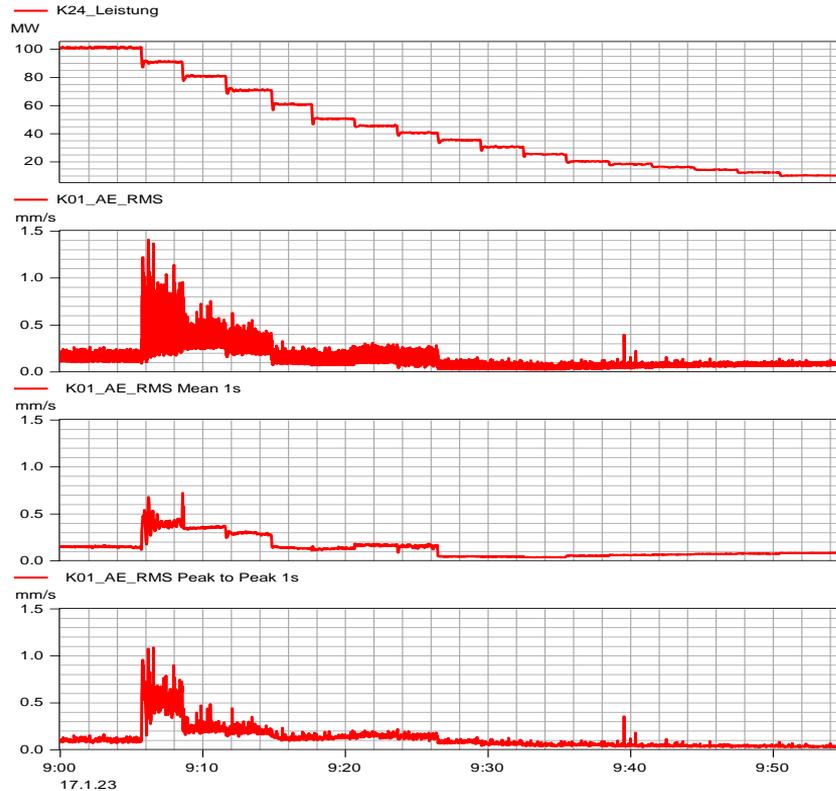
Messung und Ergebnisse Teil1: Lastvariation



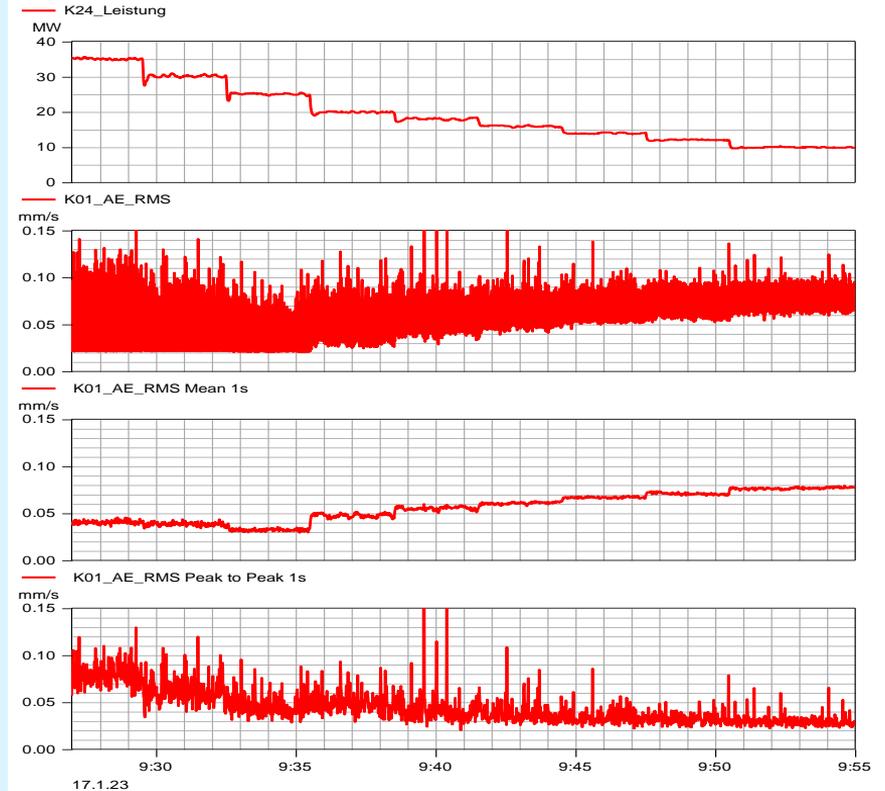
h:m

Messung und Ergebnisse Teil1 – AE-Sensor

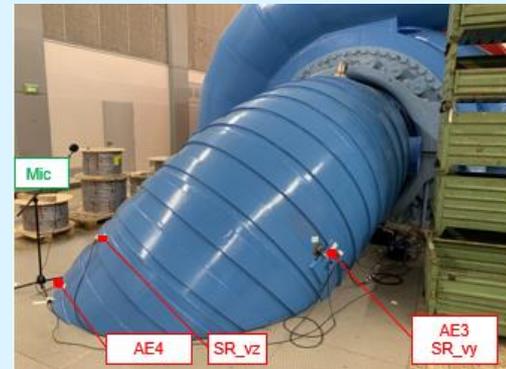
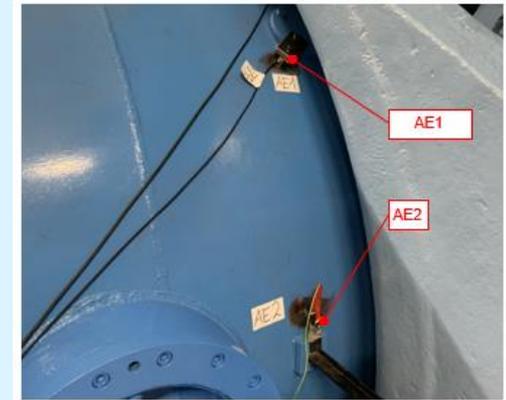
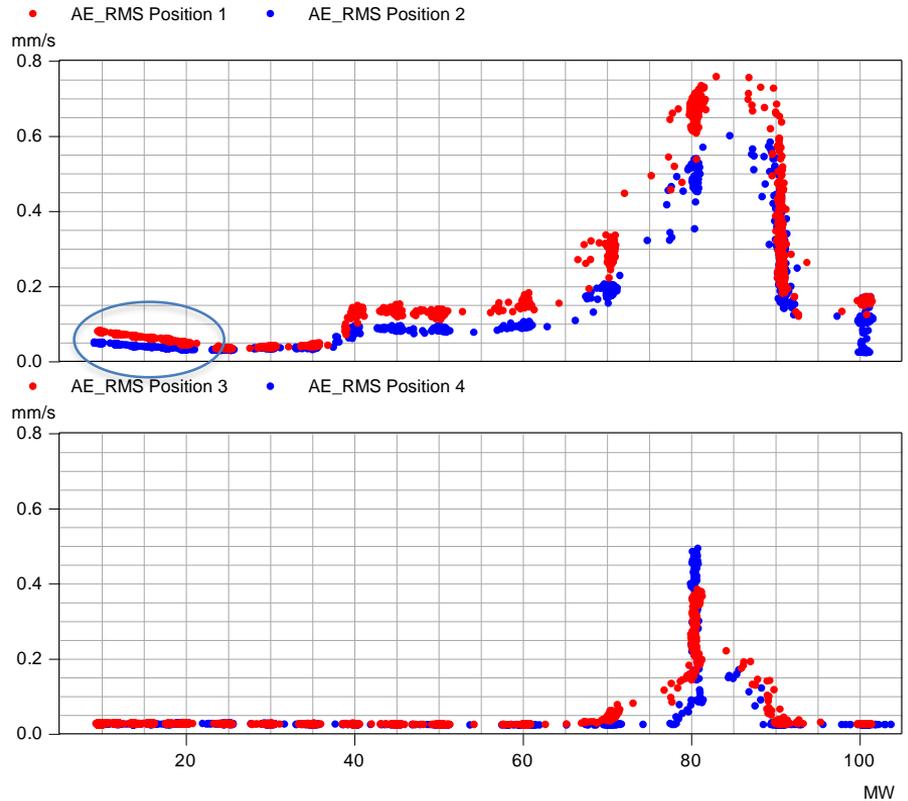
Gesamter Lastbereich



Unterer Lastbereich



Messung und Ergebnisse Teil1 - Position AE-Sensor

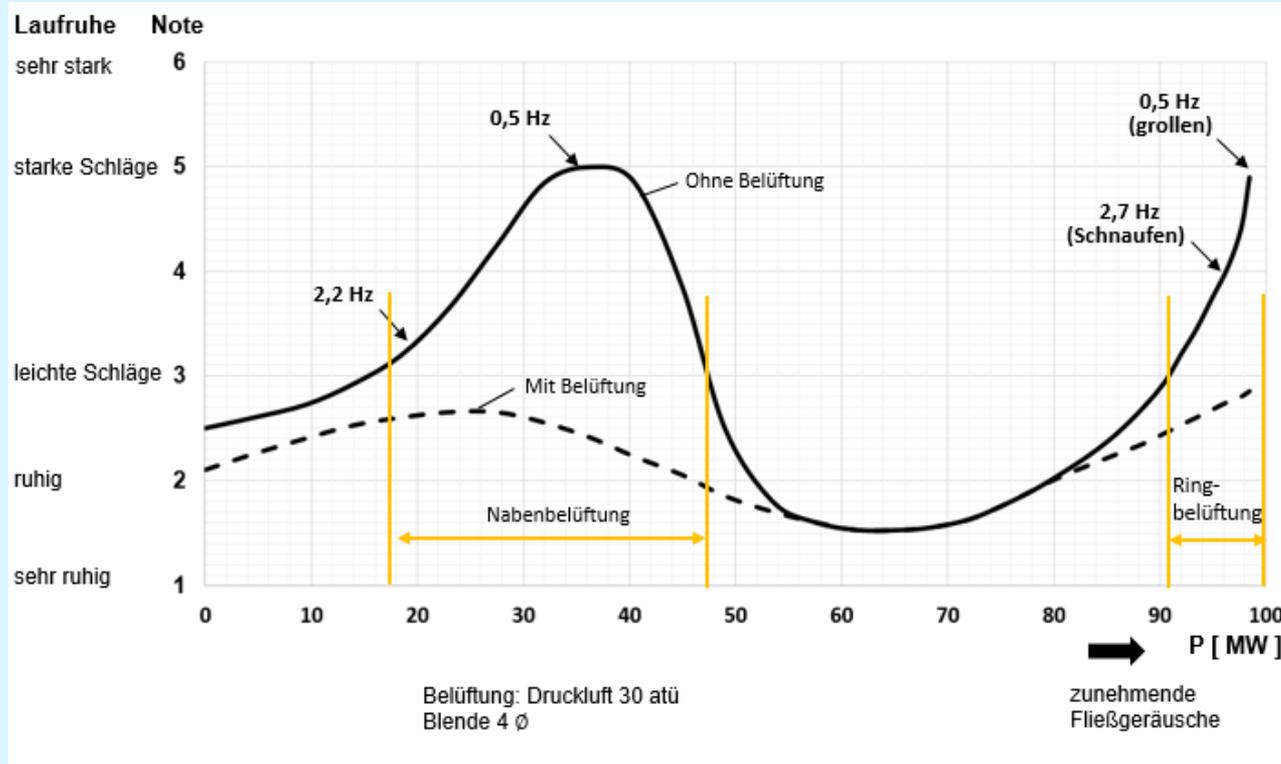


Messung und Ergebnisse Teil1 - Erkenntnisse

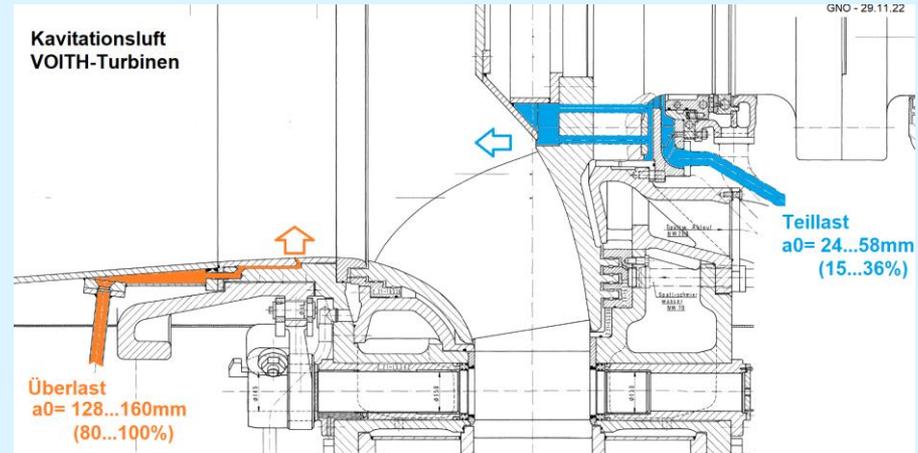
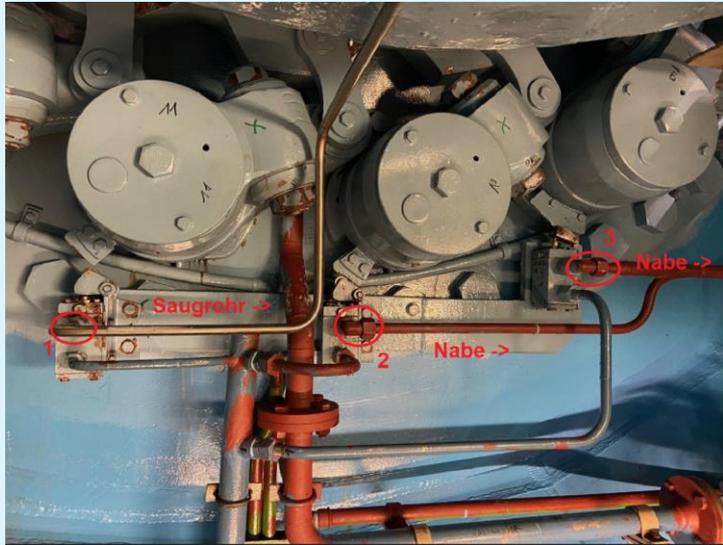
- Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass im Teilastbereich zwischen 20 und 50 MW subsynchrone Druckschwankungen bzw. Wellenschwingungen als Folge des Teillastwirbelzopf auftreten.
- Aus der Vielzahl der verwendeten Sensoren zeigt der Beschleunigungssensor an der Leitschaufel eine gute Sensitivität hinsichtlich der Kavitation, da bei der Demodulation insbesondere RSI-Frequenzen zu beobachten sind. Mit abnehmender Last ergibt sich im gefilterten Signalverlauf eine ansteigende Tendenz.
- Der AE-Sensor zeigt sehr hohe RMS-Werte im oberen Lastbereich. Mit zunehmendem Abstand zum Laufrad auf dem Saugrohr fällt die Signalstärke deutlich ab. Mit abnehmender Last ab ca. 20 MW steigt das AE-Signal, ähnlich wie der Beschleunigungssensor an der Leitschaufel, wieder an.

Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation

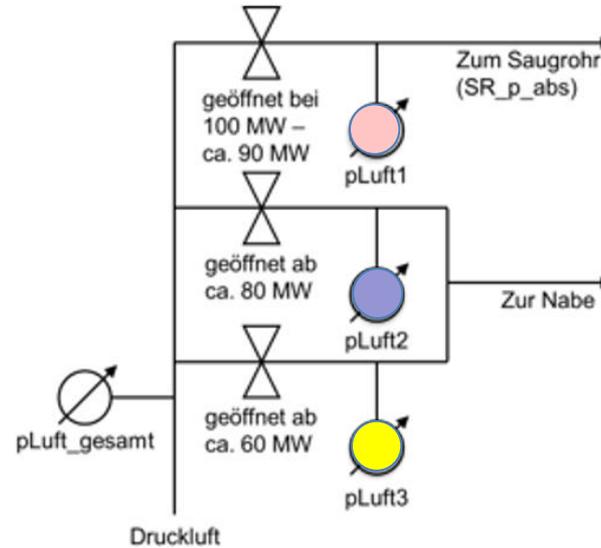
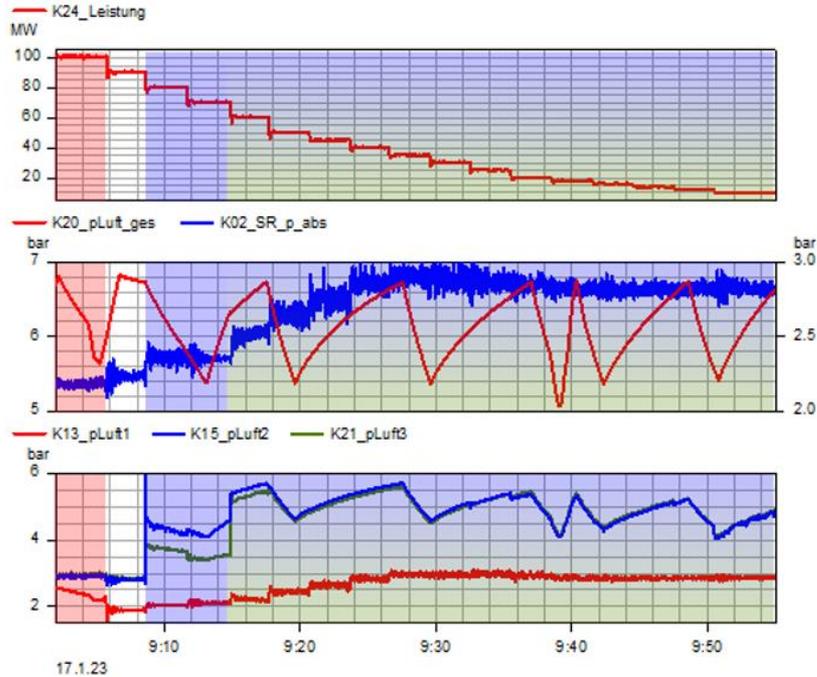
Auszug
aus Bericht von 1966:



Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation

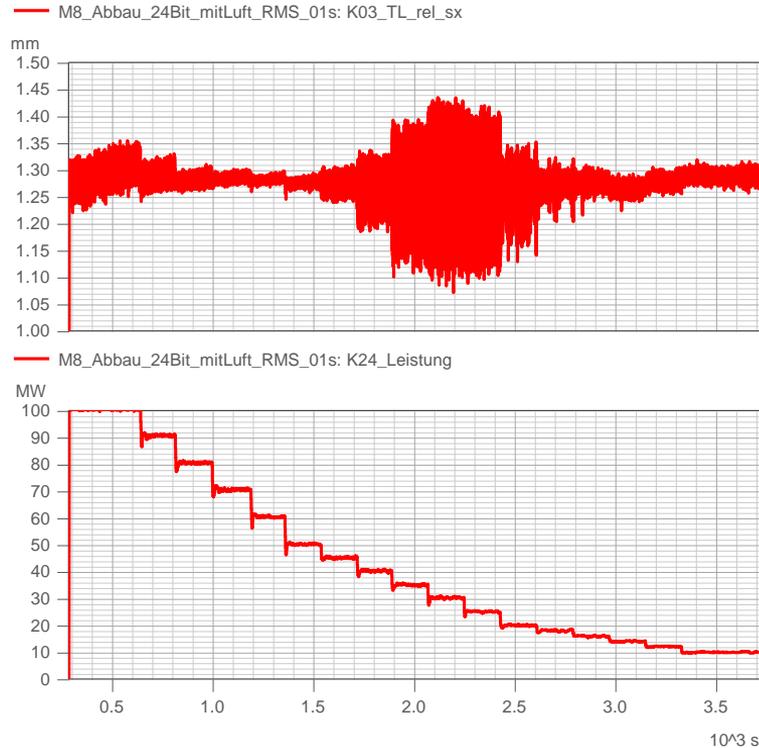


Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation

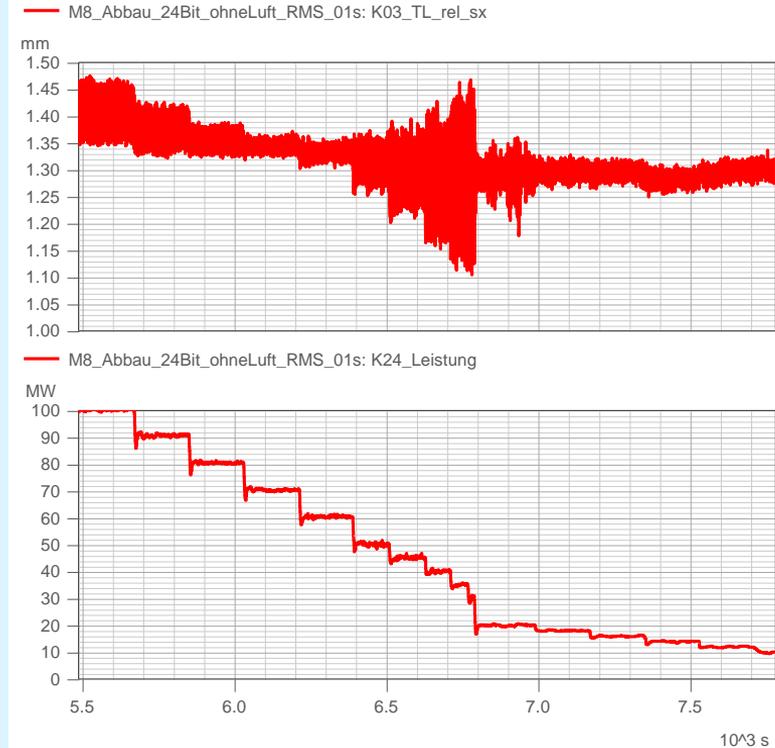


Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation

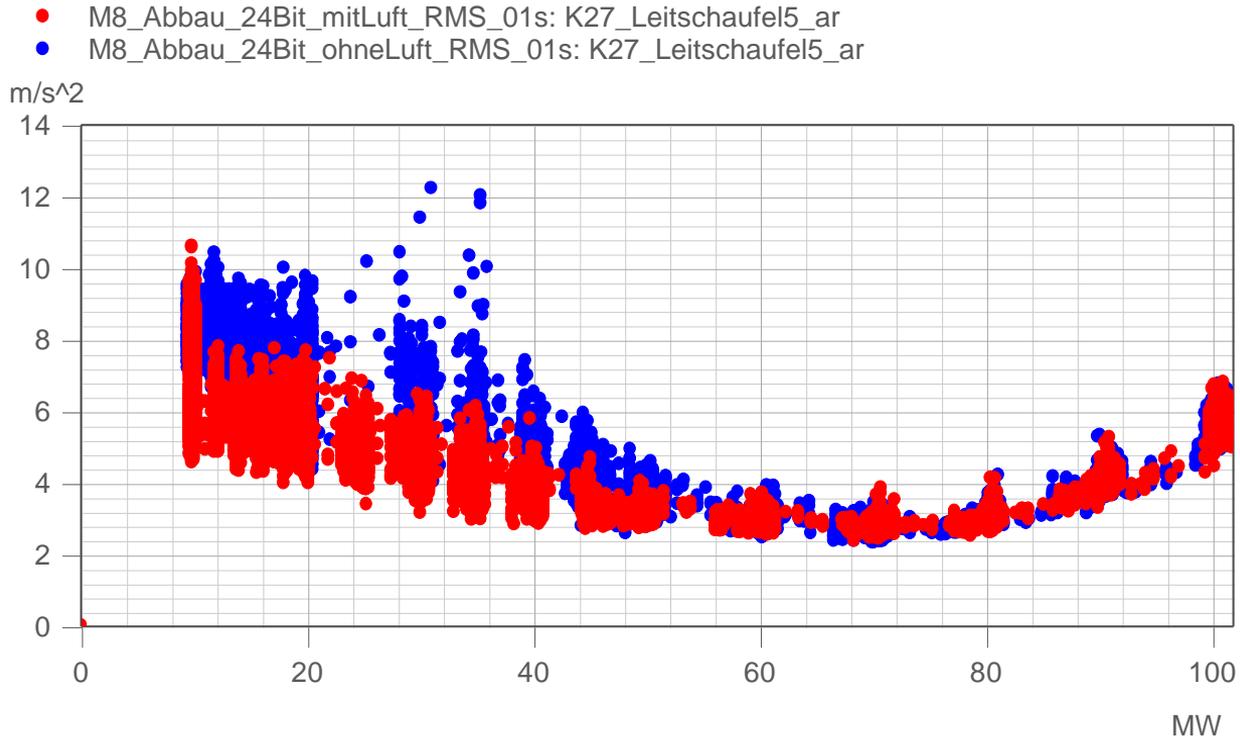
Mit Luft



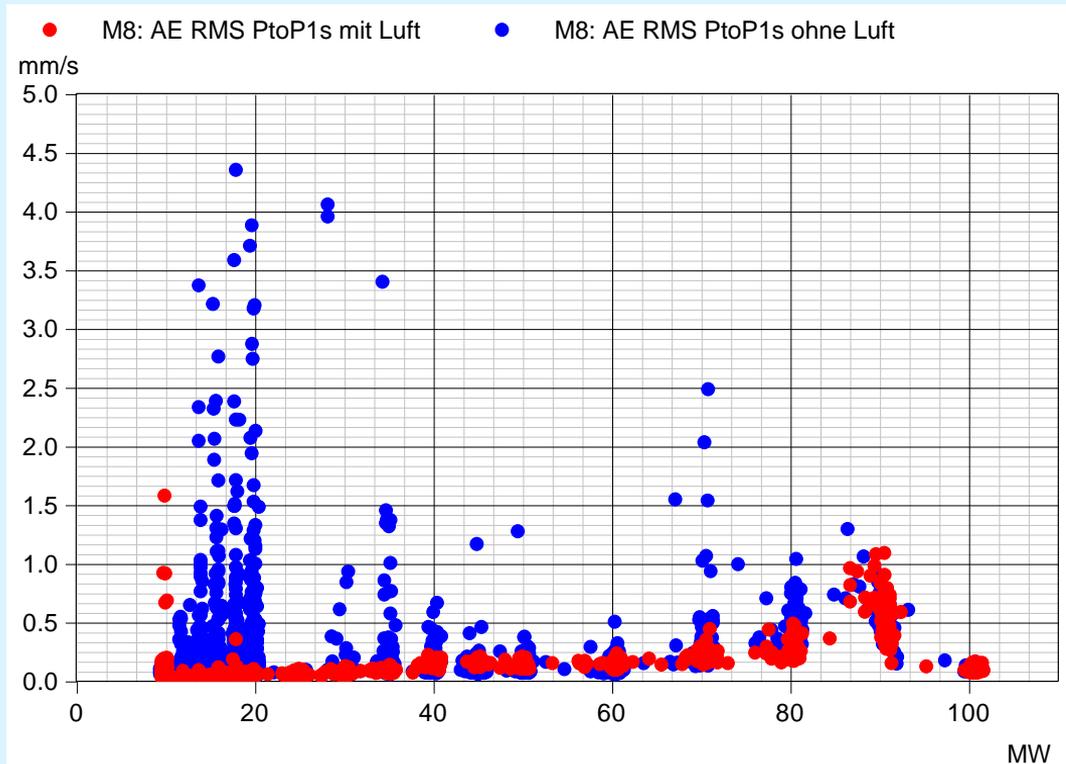
Ohne Luft



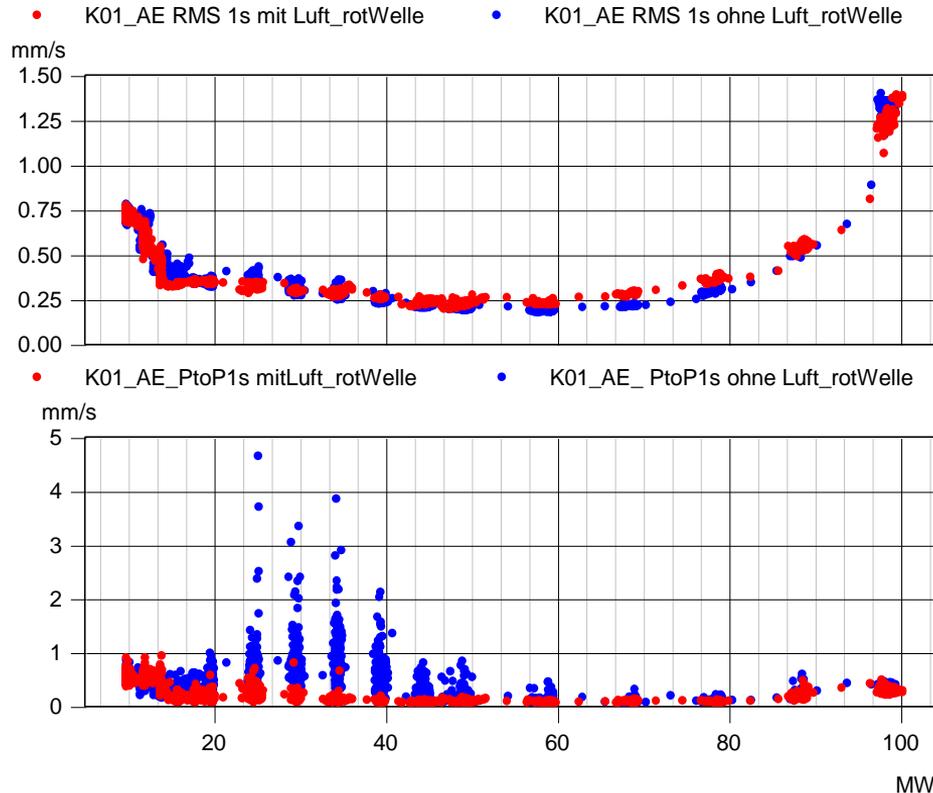
Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation



Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation –AE-Sensor



Messergebnisse Teil2: Kavitationsluftvariation –AE-Sensor



AE-Sensor appliziert auf rotierender Welle (Telemetrie)



Messung und Ergebnisse Teil2 - Erkenntnisse

- Das Einblasen der Kavitationsluft zeigt keinen Einfluss auf das Auftreten der Wellenschwingungen und Druckschwankungen.
- Das bandpassgefilterte Beschleunigungssensor an der Leitschaufel zeigt einen Signalverlauf, der zum einen mit abnehmender Last ansteigt und zum anderen den Einfluss der Kavitationsluft wie erwartet wiedergibt.
- Der AE-Sensor als alleinige Indikationsanzeige für Kavitation lässt einige Interpretationslücken offen.



1. Überblick SEO und Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Betrieb

1.2 Instandsetzung

1.3 Kurzvorstellung Fa. KÖTTER

2. Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Einleitung

2.2 Literaturrecherche

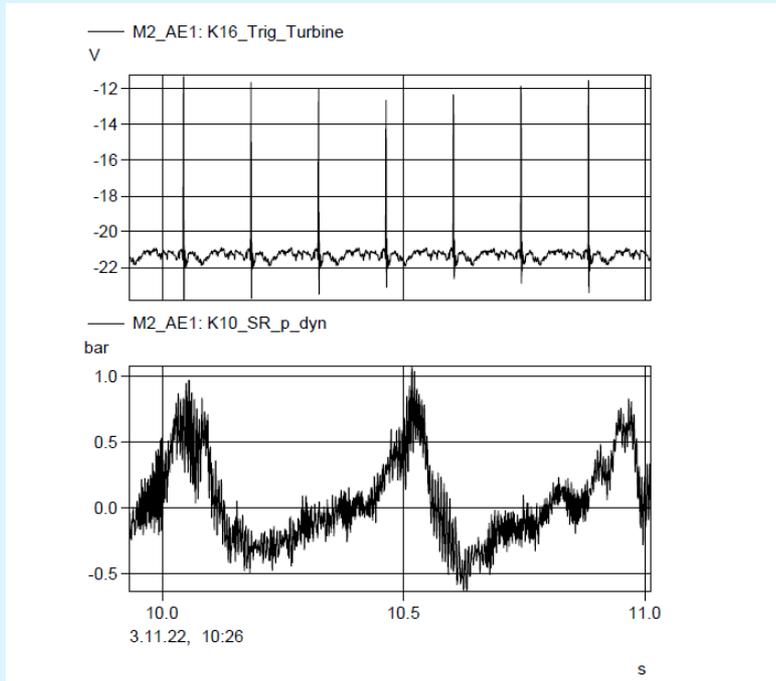
2.3 Technische Daten und Messstellenplan

2.4 Ergebnisse und Rückschlüsse

2.5 Weitere Erkenntnisse

3. Fazit und geplante Vorgehensweise

2.5 Weitere Erkenntnisse



Dynamische Druckmessung am Saugrohr

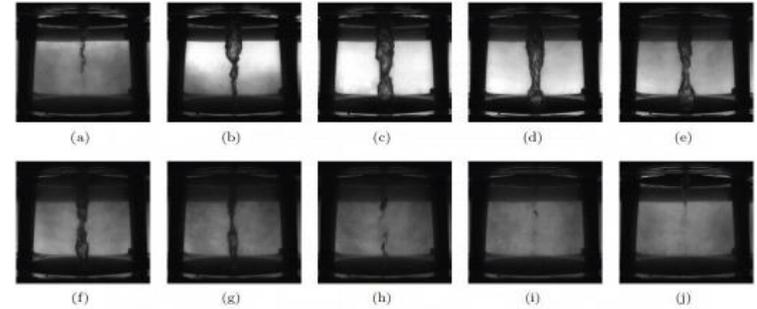


Figure 4: High speed visualization of the vortex rope oscillation in the draft tube cone.

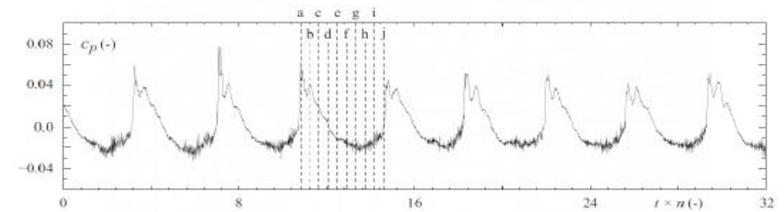


Figure 5: Wall pressure factor c_p as a function of the number of runner revolutions. Images of the vortex rope taken at (a) ... (j) are shown in figure 4.

Vergleich mit Literaturangabe 2

Detailanalyse Vergleich Messwerte M2 Literatur

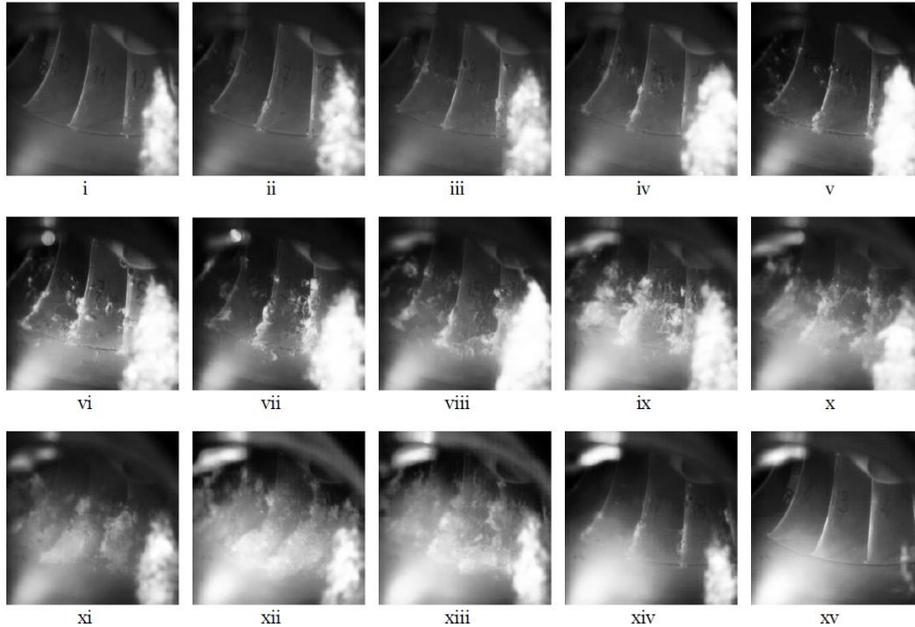
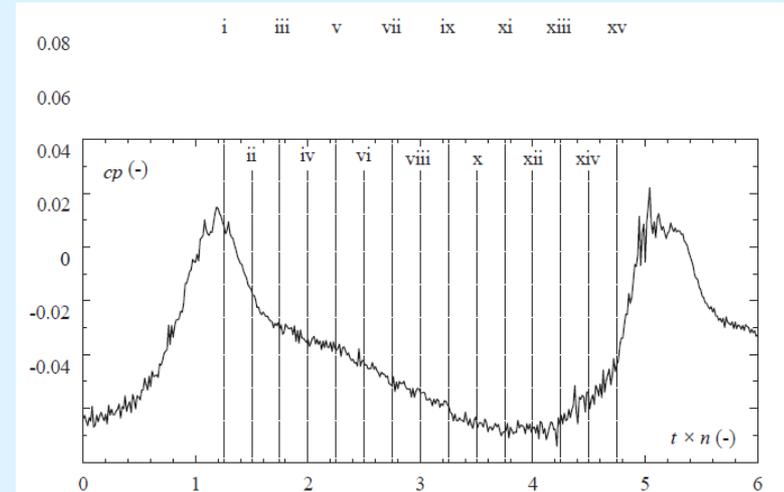


Abbildung 6: Kavitation an den Laufradschaufeln während einer Periode der Druckschwingung.



These: Die relativ gute Übereinstimmung der Druckverläufe beim Auftreten von subsynchronen Druckschwankungen deuten auf das zeitgleiche Auftreten von Kavitation an den Schaufeln.

3. Fazit und geplante Vorgehensweise

- Die Hoffnung, mit einem AE-Sensor auf dem Saugrohr einen eindeutigen Indikator zur Erkennung von Kavitation am Laufrad zu erlangen, konnte nicht bestätigt werden.
- Es ist geplant, mit den Ergebnissen dieser Untersuchung an einer Maschine ausgewählte Teillastbereiche über längere Laufzeiten anzufahren.
- Dazu gehört der Teillastbereich unterhalb von 20 MW und der Leistungsbereich bei dem subsynchrone Druckschwankungen auftreten. In beiden Fällen lassen die Messergebnisse eine ansteigende Kavitation vermuten.
- In Kombination mit dem vorgestellten optischen Verschleißerkennungsverfahren können dann direkte Korrelationen zu der kavitationsbedingten Erosion hergestellt werden.

Das Ganze sehen.



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

Dr.-Ing. Johann Lenz
Tel. +49 5971 9710.47

j.lenz@koetter-consulting.com

Dipl.-Ing. Gilles Nosbusch (SEO)
Tel. +35 228273700

Gilles.Nosbusch@seo.lu

Das ganze Spektrum der Schall- und Schwingungstechnik