



9. PRAKTIKERKONFERENZ  
“WASSERKRAFT / TURBINE / SYSTEME”



# RODUNDWERK I

UMBAU UND UPGRADE EINER HORIZONTALTEN FRANCIS TURBINE

HYDRAULISCHE RESONANZ BEIM STARTVORGANG

ARNO GEHRER; ALEXANDER OBERMANN

16. SEPTEMBER 2025

**ANDRITZ**





**01** Projektübersicht

---

**02** Hydraulische Entwicklung,  
Modellversuch

---

**03** Projektumsetzung

---

**04** Hydraulische Resonanz beim  
Startvorgang

---

**05** Problemlösung



# PROJEKTÜBERSICHT

# RODUNDWERK I



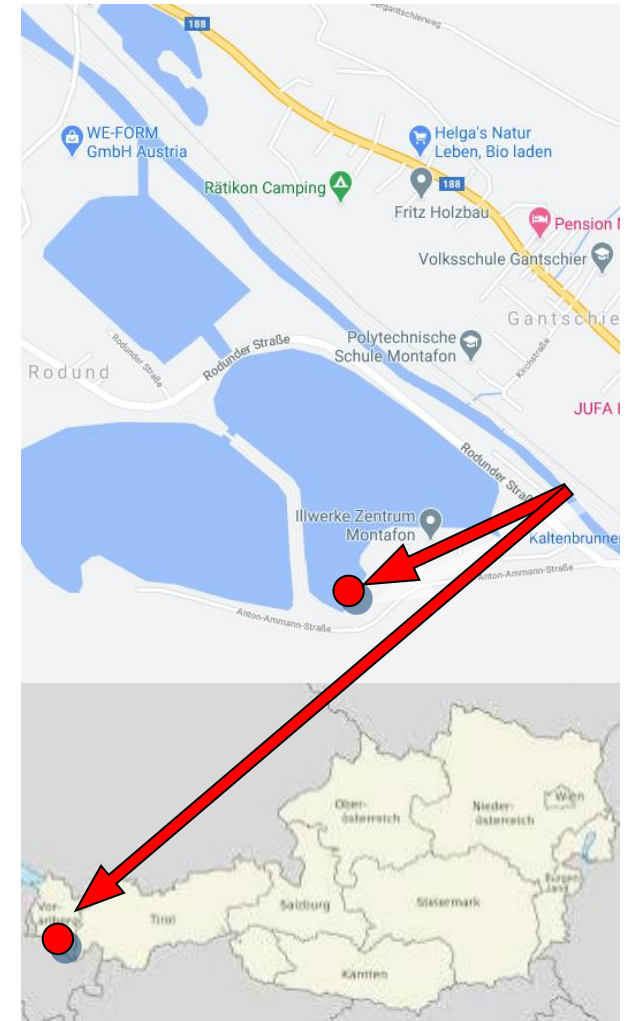
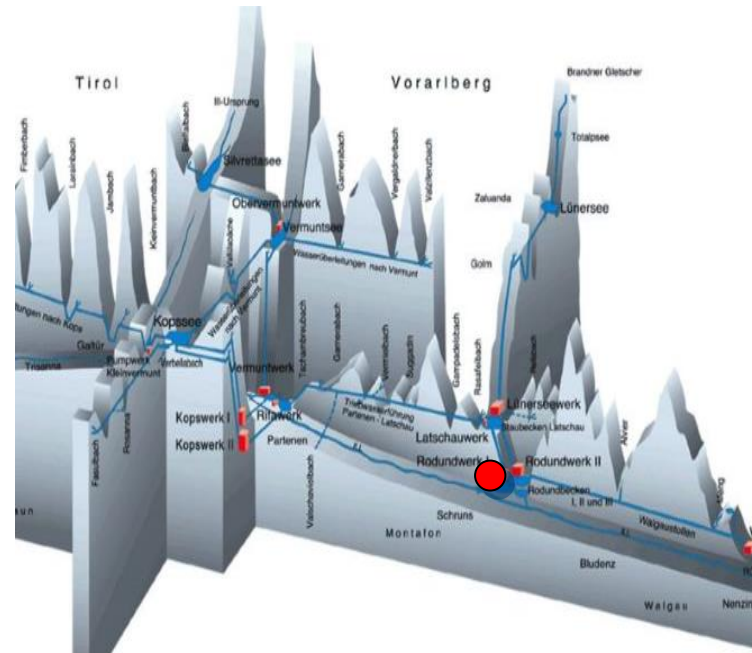
## Umbau und Upgrade einer horizontalen Francis Turbine

### • Francisturbine:

Anzahl	4 Stk.
Einbaulage	Horizontal
Bemessungsdruck	46 bar
Nenn Drehzahl	500 U/min
Durchfluss je Turbine	15 m <sup>3</sup> /s
Nennleistung je Turbine	49,5 MW

### • Pumpe:

Durchfluss Pumpe	10 m <sup>3</sup> /s
Nennleistung Pumpe	41 MW
Bemessungsdruck	46 bar



# RODUNDWERK I



## Beschreibung des Vorhabens

Im Rodundwerk I wird in den Jahren 2023 bis 2026 eine Generalüberholung aller 4 Turbinen, der Pumpe von M2 sowie den Nebenanlagen durchgeführt. Wesentliche Ziele dieses Umbaues sind sowohl eine deutliche Steigerung des Turbinenwirkungsgrades als auch hydraulisch stabiler Betrieb von Vollast bis hin zur Nullast im ganzen Betriebsbereich.

## Laufradersatz und Generalüberholung

- Hydraulischer vollhomologer Modellversuch nach IEC 60193
- Neuteile: Stützschaufelring, Laufrad, Spaltringe, Leitschaufeln inkl. Schutzbüchsen und Trägerringe, TU-Welle, Schutzwände und Schutzhauben an TU-Deckel, Verschraubungen, Wellendichtung
- Sanierungen: Spirale, TU-Deckel (Kuppel- und Saugseite), Leitapparat inkl. Reguliererring, Leitradring, Saugrohrkonus, Leitradservozyylinder
- Hydraulischer und Digitaler Turbinenregler
- De- und Remontage





**02**

**HYDRAULISCHE  
ENTWICKLUNG,  
MODELLVERSUCH**

# RODUNDWERK I



## Hydraulische Entwicklung / Modellversuch

Vollhomologer Modellversuch nach IEC 60193

- Neues Laufraddesign
- Verbessertes Labyrinthdesign
- Exzentrisches Leitschaufelprofil
- Leitschaufel Dichtungen
- Neues Stützschaufelringdesign

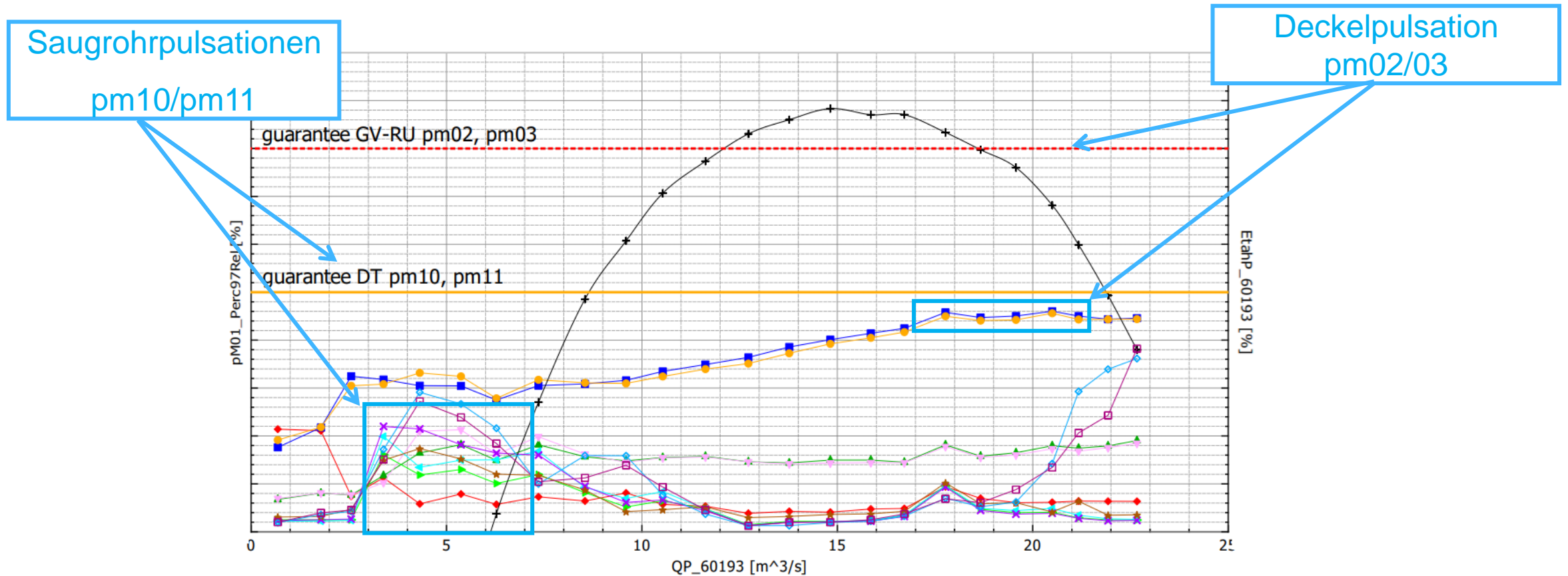


# RODUNDWERK I



## Hydraulische Entwicklung / Modellversuch

Es wurden alle Garantien bezüglich Wirkungsgrad, Kavitation und Pulsation erreicht.





**03**

# PROJEKTUMSETZUNG

## Projektumsetzung

1. Fertigung Neuteile
2. Fingerprintmessung
3. Demontage
4. Vermessung und Sanierung der Bauteile
5. Montage
6. Inbetriebnahme



- Terminplan (kurze Durchlaufzeit Sanierung)
- Engineering (Anpassungen an den Bestand)
- Zustand Bestandteile
- Anpassungen Neuteile zu Bestand
- Qualitätsanforderungen

# RODUNDWERK I



## Andritz Hydro Ravensburg Fertigung

### 1. Fertigung Neuteile

- **Stützschaufelring**

Material: 1.4313+QT780 nach EN 10250-4

Stützschaufeln aus dem Vollen gefräst, mit Traversenflansch verschweißt

- **Laufrad**

Material: 1.4313+QT780 nach EN 10250-4

Laufrad in 2 Teilen aus dem Vollen gefräst

Geschweißt, geschliffen, mechanisch bearbeitet und gewuchtet



# RODUNDWERK I



Andritz AG Graz  
Fertigung

## 1. Fertigung Neuteile

- **Leitschaufeln**

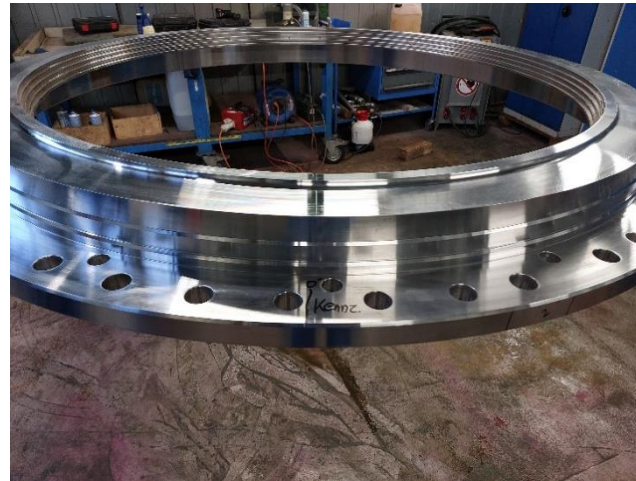
Material: 1.4313+QT780 nach EN 10250-4

Gesenk geschmiedet, bearbeitet und geschliffen

- **Labyrinthringe**

Material: 1.4313+QT650 nach EN 10250-4

Geschmiedet und bearbeitet



# RODUNDWERK I



## 2. Fingerprintmessung vor dem Umbau – **Andritz Hydro Kriens**

- Die radialen Turbinen-Wellenschwingungen liegen innerhalb der Zone A gemäß DIN ISO 7919-5.
- Die radialen Lagergehäuseschwingungen liegen innerhalb Zone A gemäß DIN ISO 10816-5.
- Die Laufruhe der Maschine kann allgemein als sehr gut befunden werden.

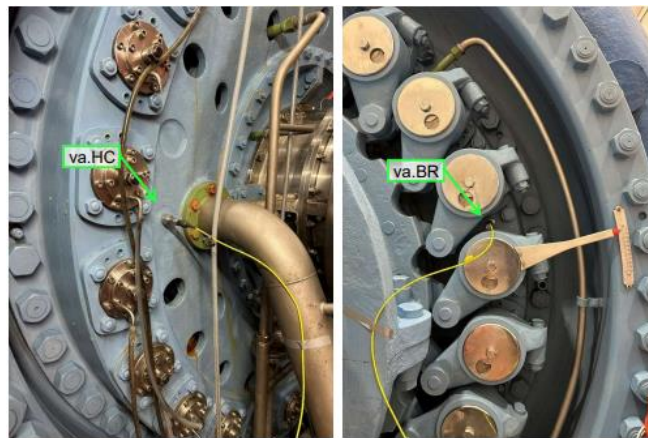


Abb. 5: Schwinggeschwindigkeitssensor am Head Cover (va.HC - links) und Bottom Ring (va.BR - rechts)



Abb. 4: Sensoren am Generatorlager Erregerseitig

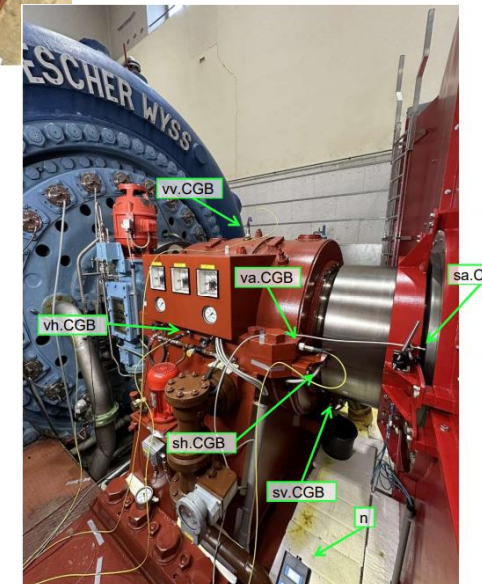
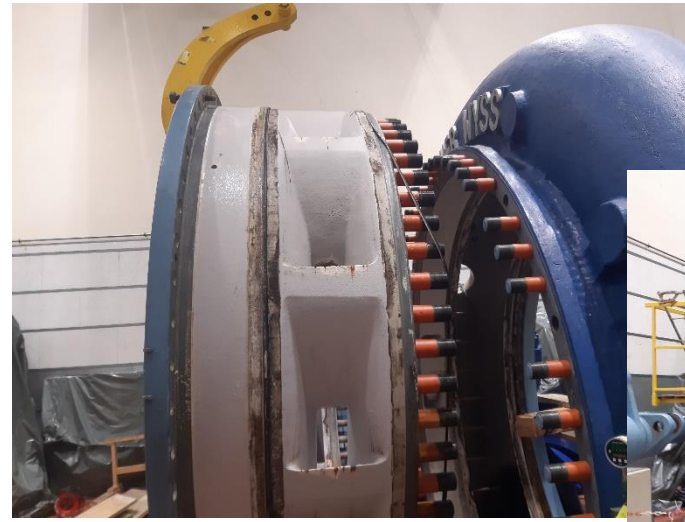


Abb. 3: Sensoren am antriebsseitigen Generatorlager

# RODUNDWERK I



## 3. Demontage



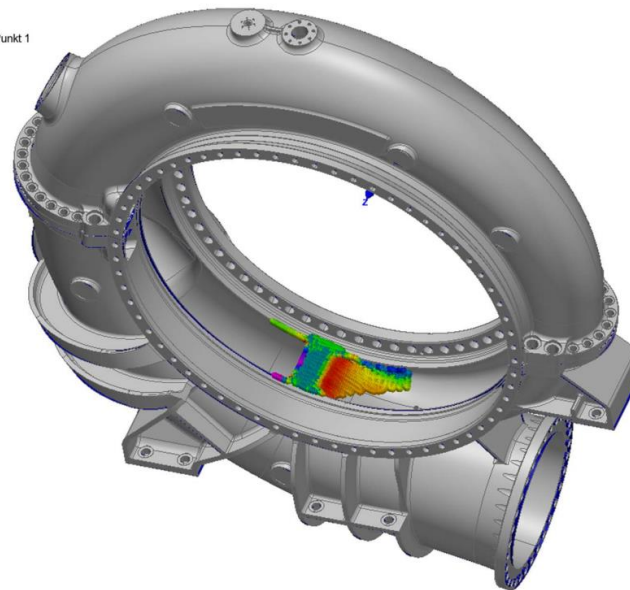
## 4. Vermessung im Kraftwerk

IST-Maßaufnahme:

- Position Spirale zu Generator-Welle
- Parallelität, Ebenheit
- Lochkreis
- Rundheit
- Position des Sporns

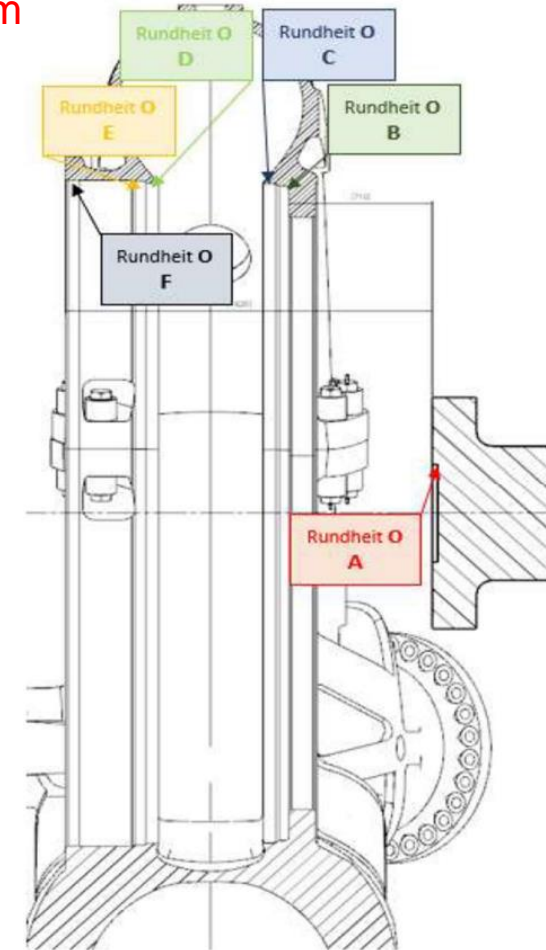
Formabweichung, bzw. Position des Sporns

Koordsys 1  
Ebene, Linie, Punkt 1



Rundheitsmessungen:

Ovalitäten bis zu 2 mm



### 4. Sanierung Bestandteile

- **Turbinendeckel Kuppel- und Saugseite**

Demontage der bestehenden Schutzwände und Labyrinth

Befundung, ggf. Sanierung und mechanische Bearbeitung

Montage neuer Schutzwände, Schutzhauben und Labyrinth

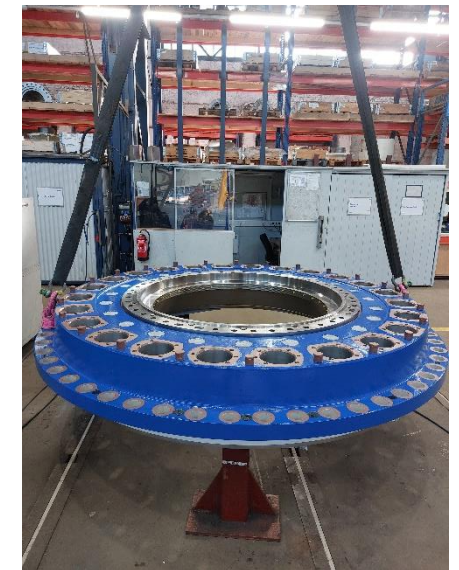
- **Einsatzring zum Saugrohr**

Mechanische Bearbeitung und Neufertigung Einsatzring

- **Leitradservozyylinder**

Demontage, Adaption Anschlag, Montage, Dichtheitsprüfung

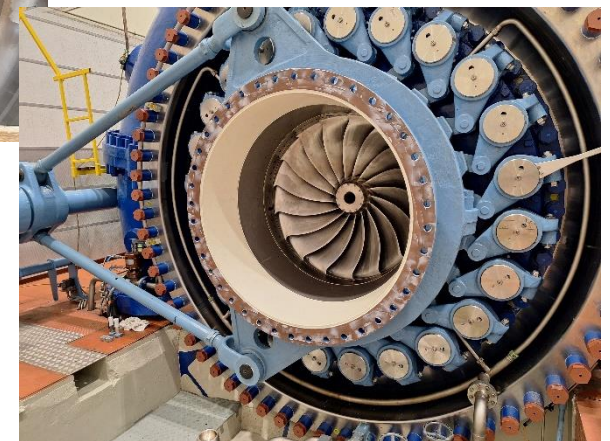
### Andritz AG Graz



# RODUNDWERK I



## 5. Montage



## 6. Inbetriebnahme

**ROW I IBN - Lagerschwingungsproblematik beim Anfahren**





# 04

## HYDRAULISCHE RESONANZ BEIM STARTVORGANG

# RODUNDWERK I



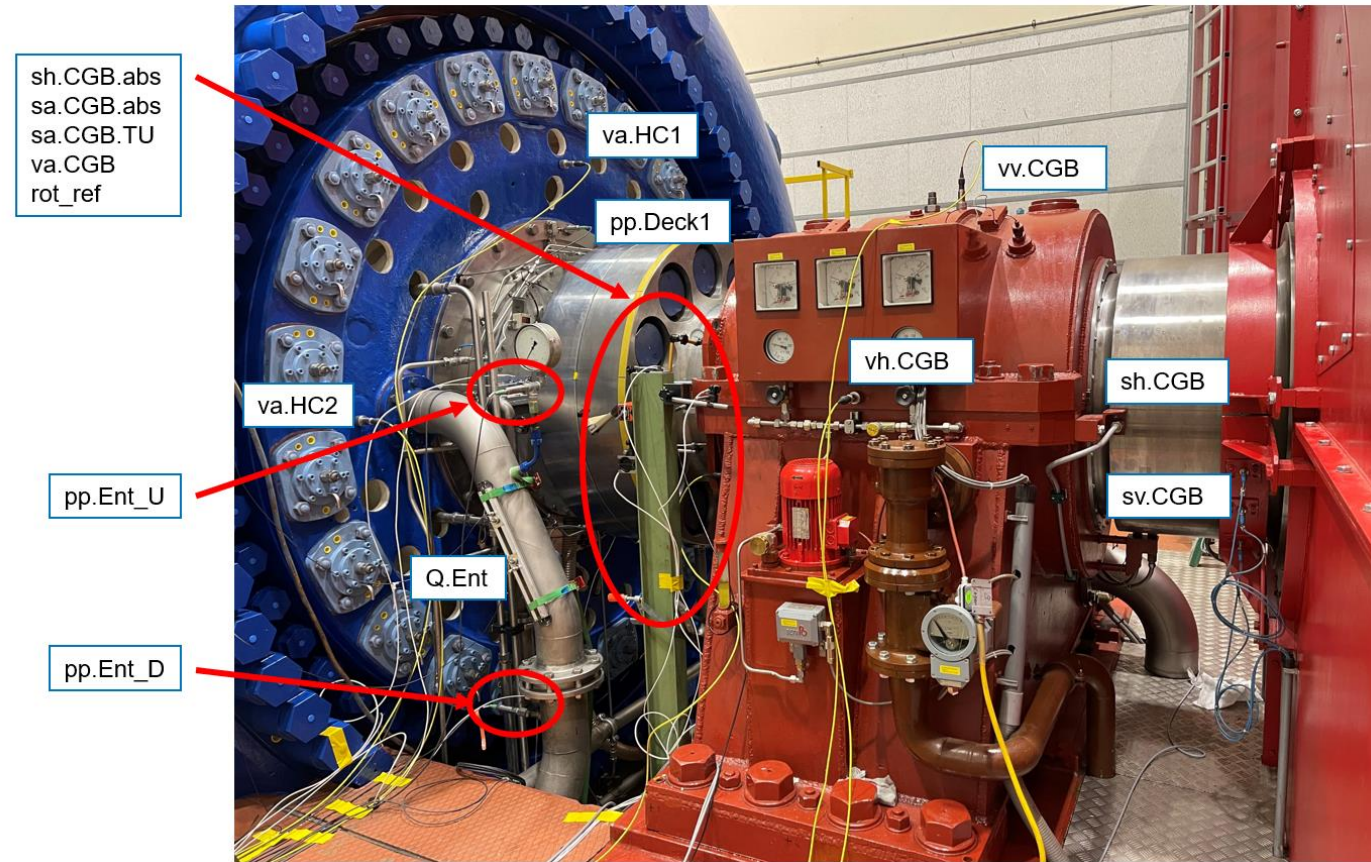
## IBN - Lagerschwingungsproblematik beim Anfahren

- **Inbetriebnahme**

- Bei der Inbetriebnahme der ersten umgebauten Maschine traten unerwarteterweise beim Anfahren unzulässige axiale Schwingungen bei subsynchronen Drehzahlen auf

- **Anlagenmessungen**

- Druckpulsationen
- Vibrationen
- Drehzahl
- Leitschaufelöffnung



## IBN - Lagerschwingungsproblematik beim Anfahren

- **Anlagenmessungen**

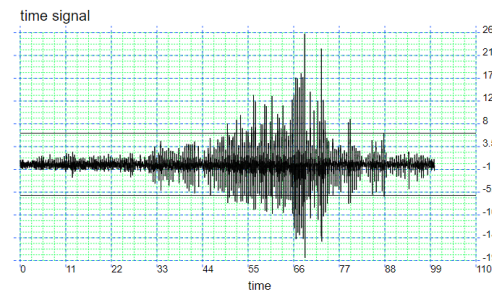
- Mit zunehmender Drehzahl  $n$  steigen sowohl die Vibrationen als auch die Pulsationen
  - Maximum bei etwa 70 % der Synchrondrehzahl (Notabschaltung)

- Wavelets zeigen Frequenzen von etwa  $\sim 2.36$  Hz + Harmonische
  - Anstieg der Schwingungsamplitude mit der Drehzahl

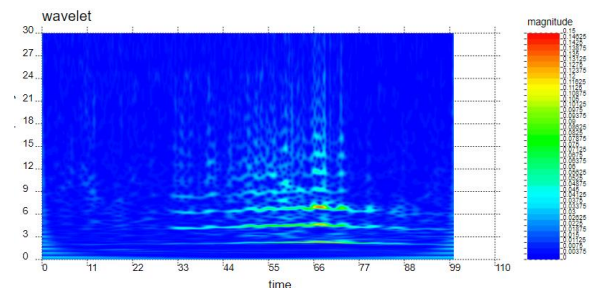
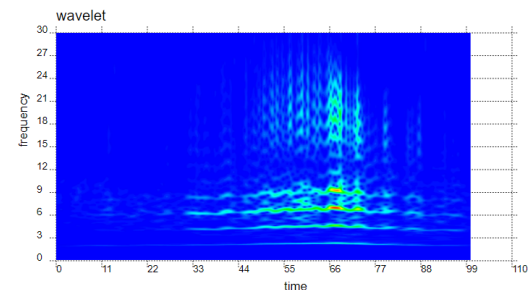
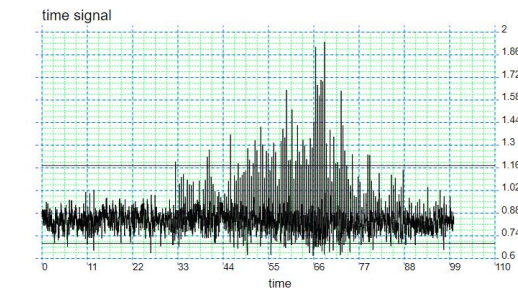
**Drehzahl (rpm)**



**va.CGB**



**pp.DT**



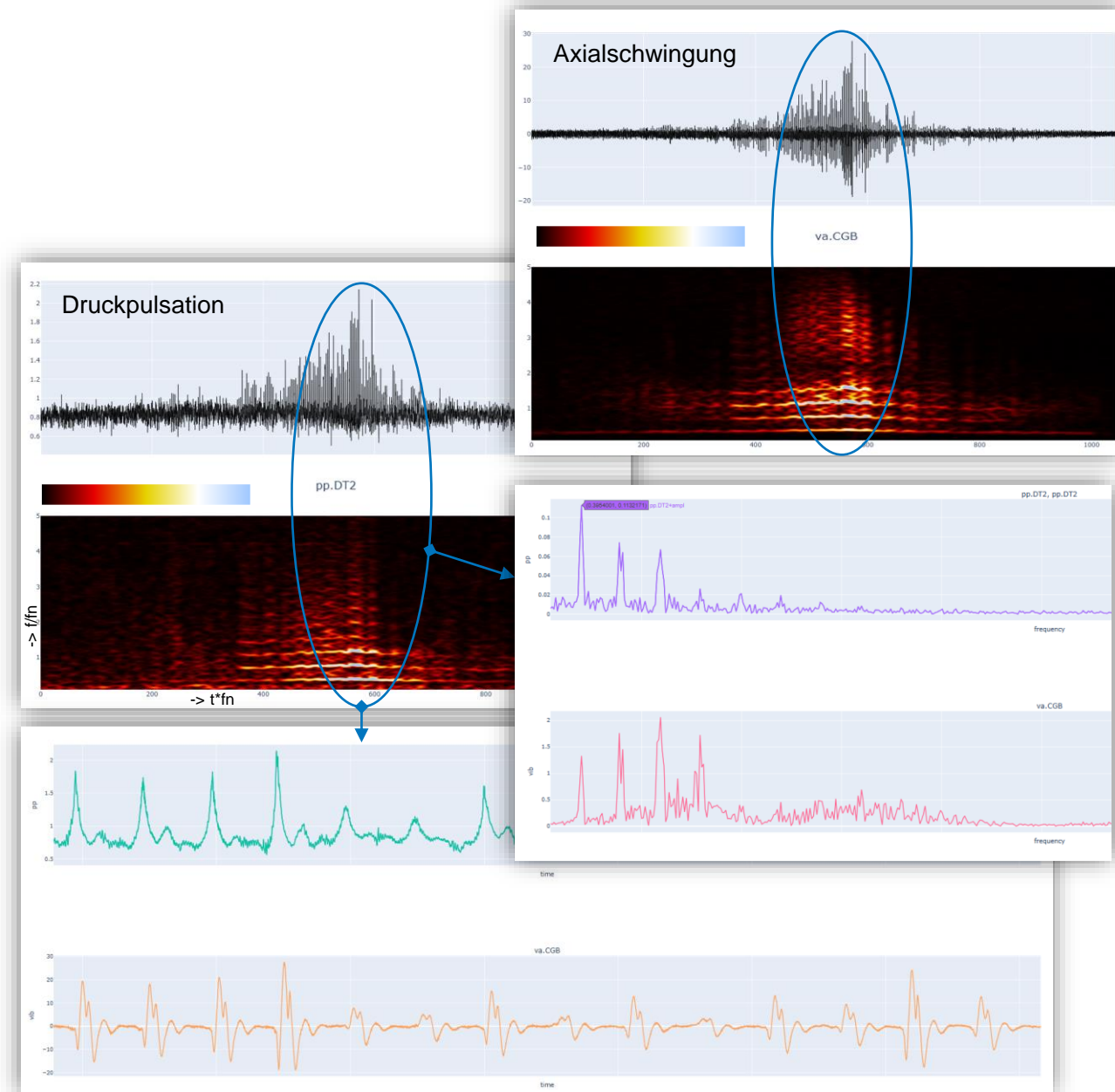
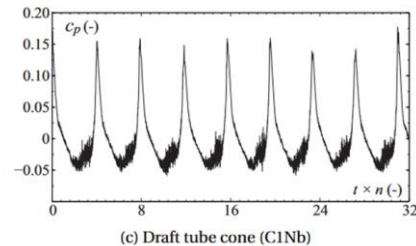
# RODUNDWERK I

## Lagerschwingungsproblematik beim Anfahren

- **Signale bei max. Vibration**
  - Charakteristische Spitzen in den Saugrohrdruckpulsationen (Implosionen von Kavitationsvolumen)
- FFT: Peaks bei 2.3 Hz, 4.6 Hz, 6.9 Hz, 9.2 Hz ( $f_n \sim 5.8$  Hz)  
**0.4, 0.8, 1.2, 1.6 \*  $f_n$**
- Hypothese: Resonanz
  - Anstieg der Schwingungsamplitude mit der Drehzahl
  - Das Kavitationsvolumen kann als nichtlineare Elastizität wirken



"Müller, Andres. *Physical mechanisms governing self-excited pressure oscillations in Francis turbines*. No. THESIS. EPFL, 2014."

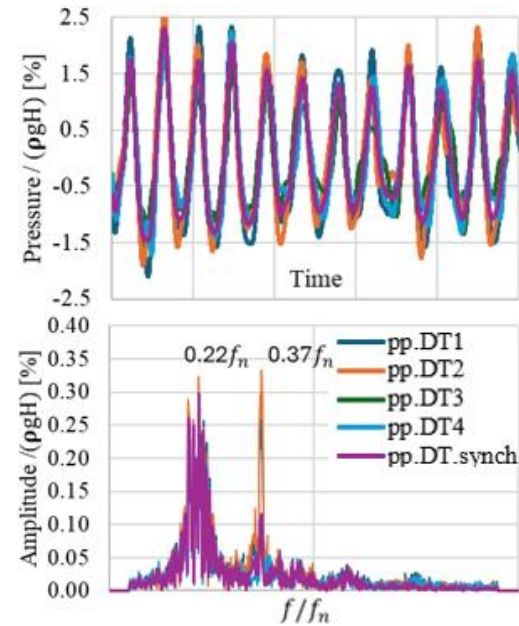
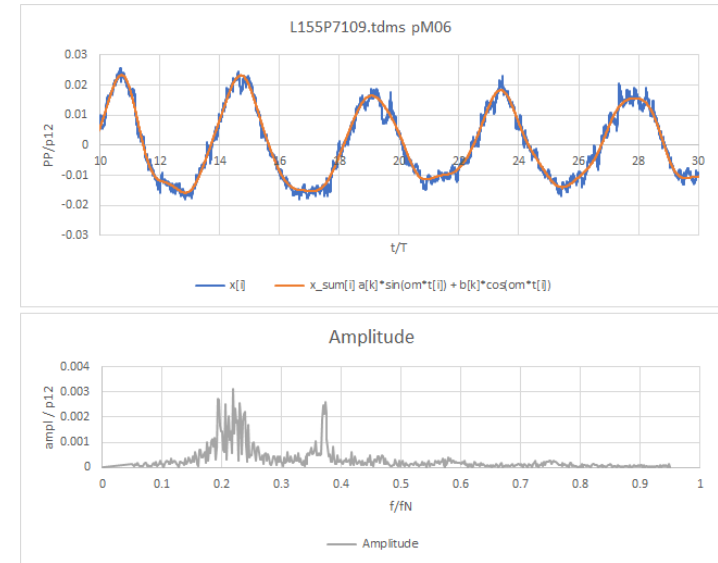


# RODUNDWERK I



## Modellversuch, Druckschwankungen im Saugrohrkonus

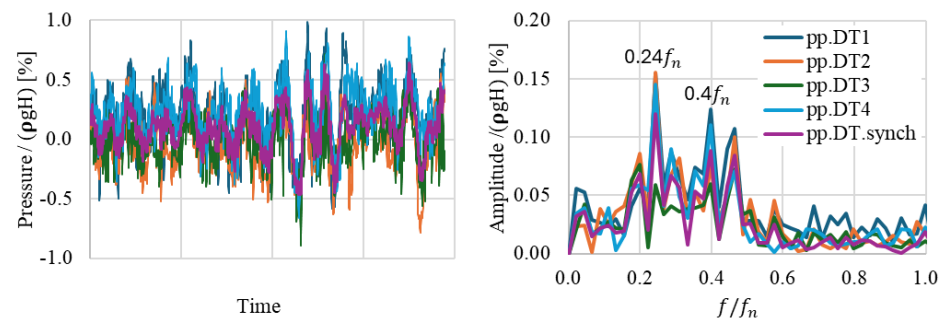
- **PP-Daten wurden neu bewertet**
  - Tiefpassbandfilterung
  - Dekomposition synchron/asynchron
- **Druckpulsationen im Saugrohr**
  - Peaks bei  $0.37 f_n$  und  $0.22 f_n$
  - Kavitationsvolumen unter dem Laufrad



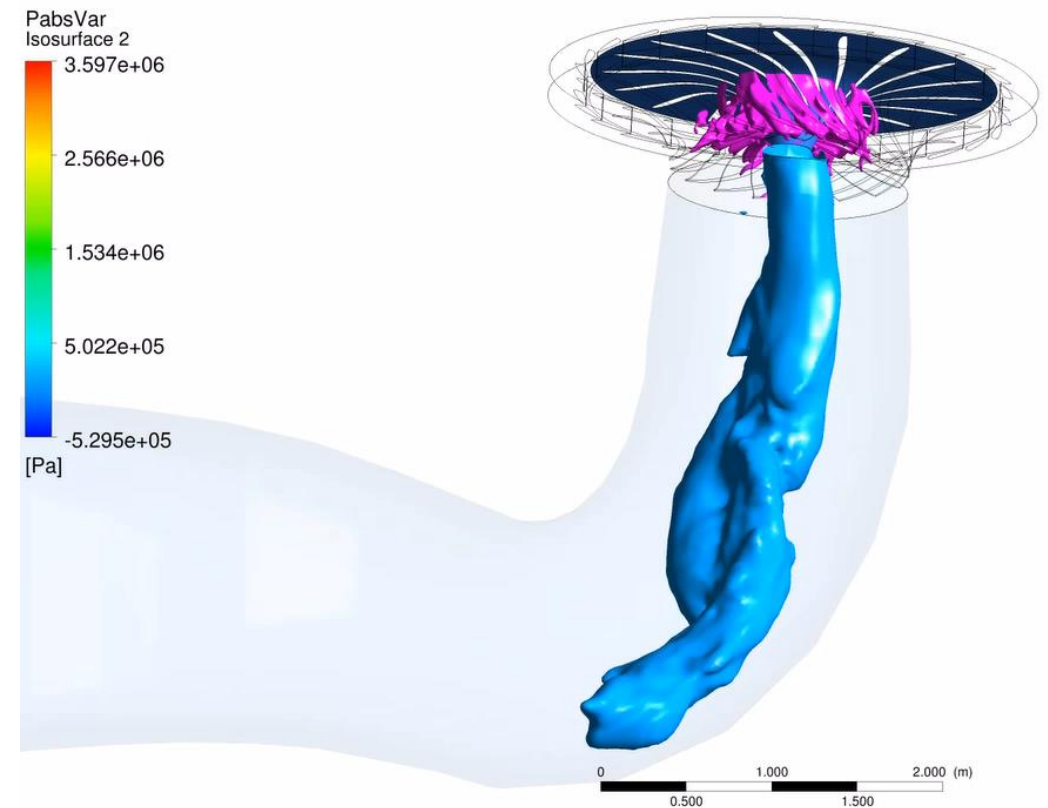
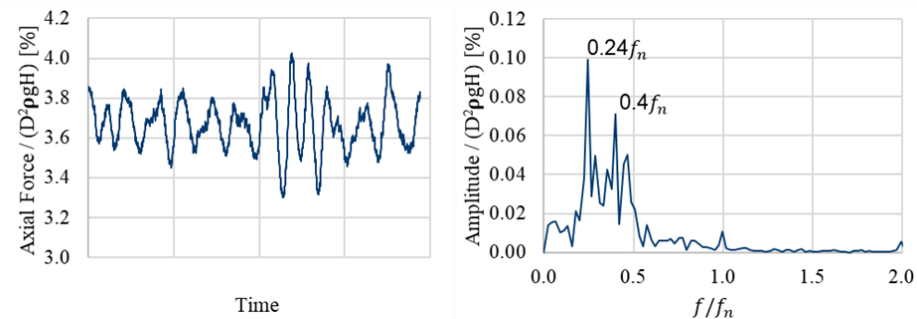
## Numerische Strömungssimulationen (CFD)

### • Saugrohrdruckpulsation

- Peaks bei  $0.4 f_n$  und  $0.24 f_n$
- Gute Übereinstimmung mit Modellversuch



### • Axialkraft

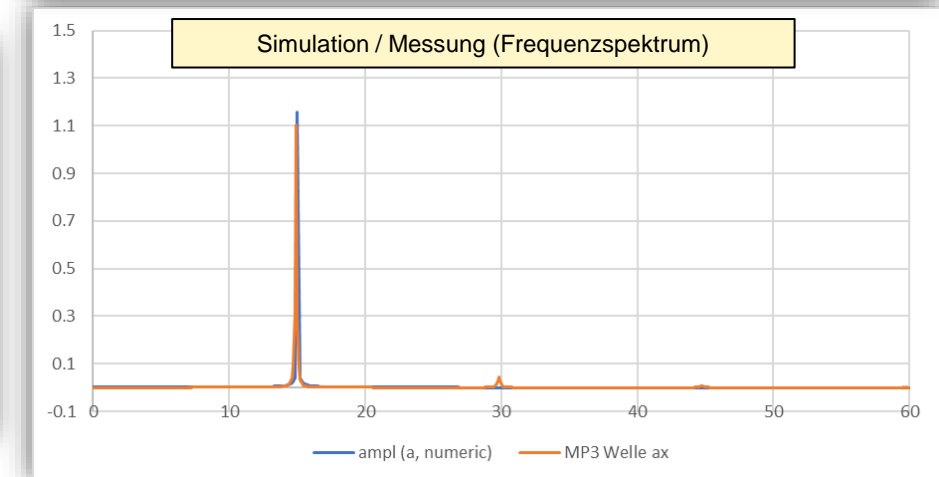
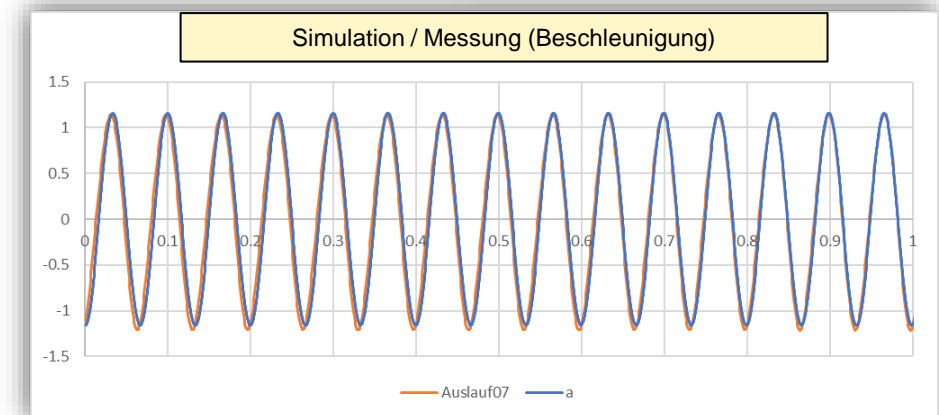
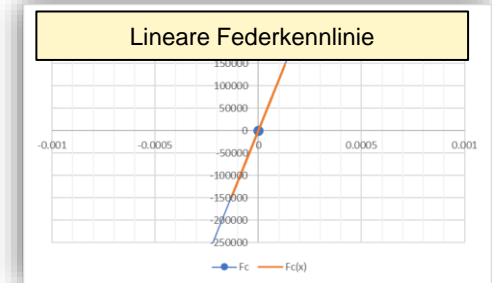
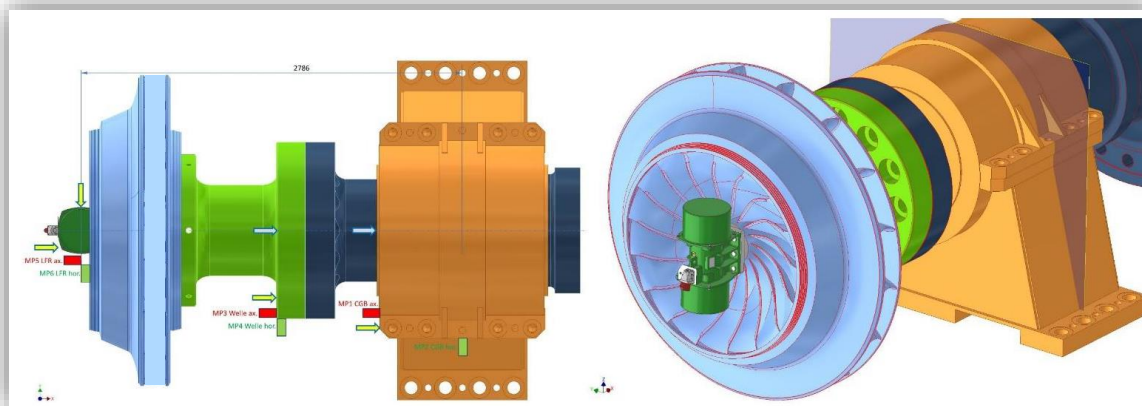


# RODUNDWERK I



## Mech. Eigenfrequenzen - Shaker- und Impulshammertests

- **Fall 1:**
  - Eigenfrequenz des Systems ~15Hz (kleine Amplituden)
    - Bestimmung der Axialsteifigkeit
- Vergleich mit einem **linearen** Schwingungsmodell
  - $M \cdot x'' + F_C(x) + F_D(x') = A \cdot \cos(\Omega \cdot t) + B \cdot \sin(\Omega \cdot t)$

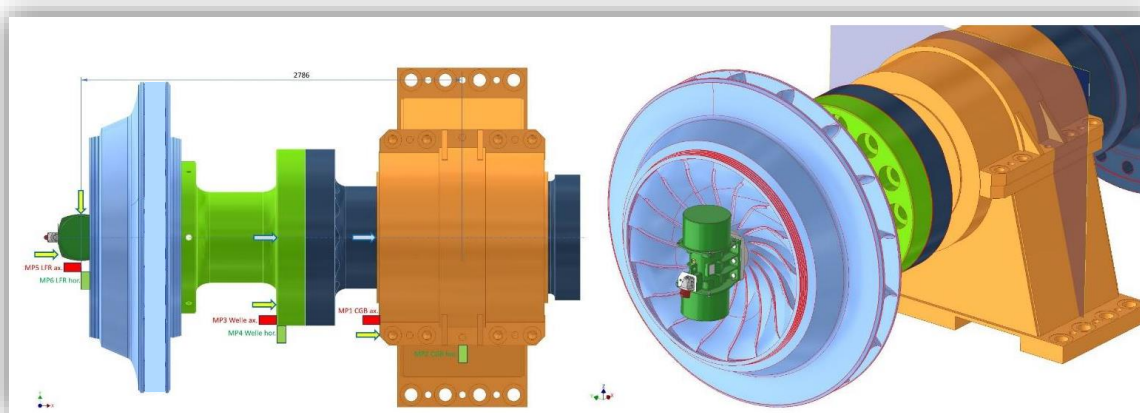
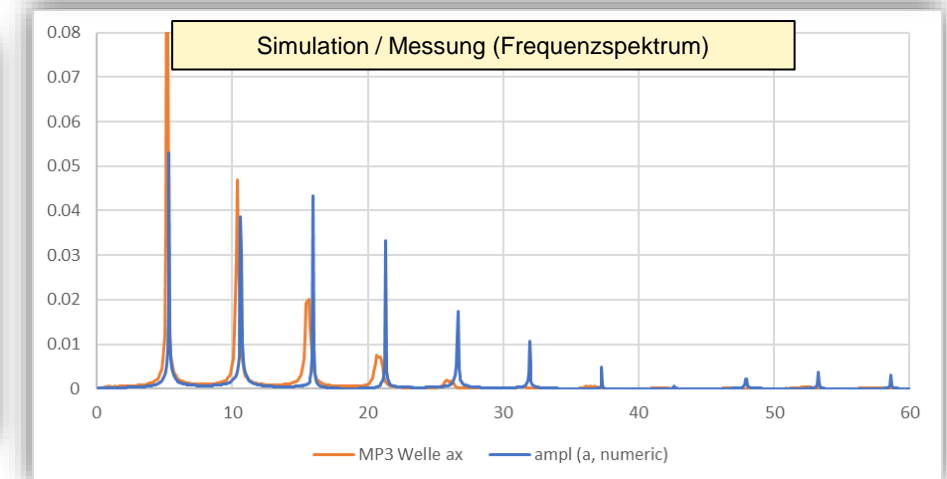
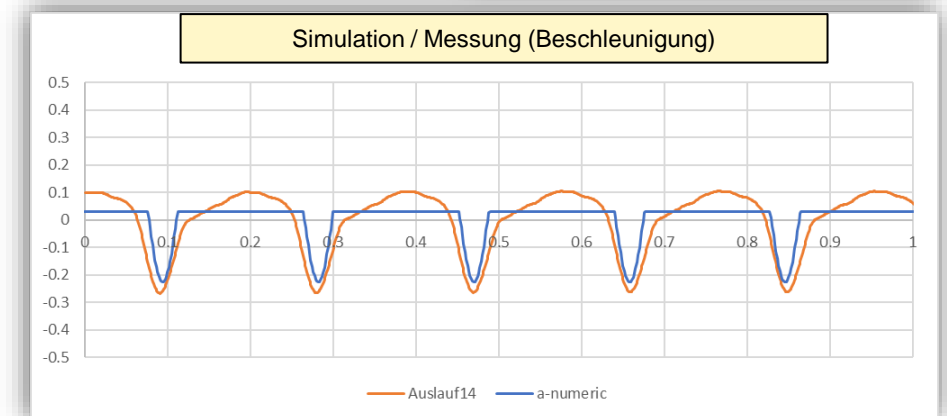
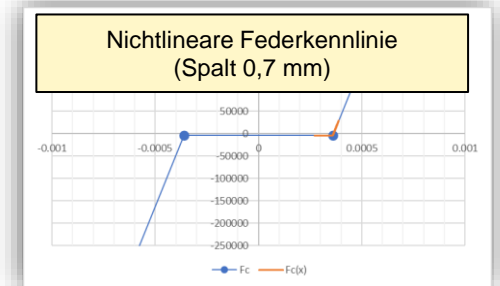


# RODUNDWERK I



## Mech. Eigenfrequenzen - Shaker- und Impulshammertests

- **Fall 2:**
  - Eigenfrequenz des Systems ~5Hz (große Amplituden)
    - **Übereinstimmung mit der 2. harmonischen der hydr. Anregung**
- Vergleich mit einem **nichtlinearen** Schwingungsmodell (Axialspalt)
  - $M \cdot x'' + F_C(x) + F_D(x') = A \cdot \cos(\Omega \cdot t) + B \cdot \sin(\Omega \cdot t)$



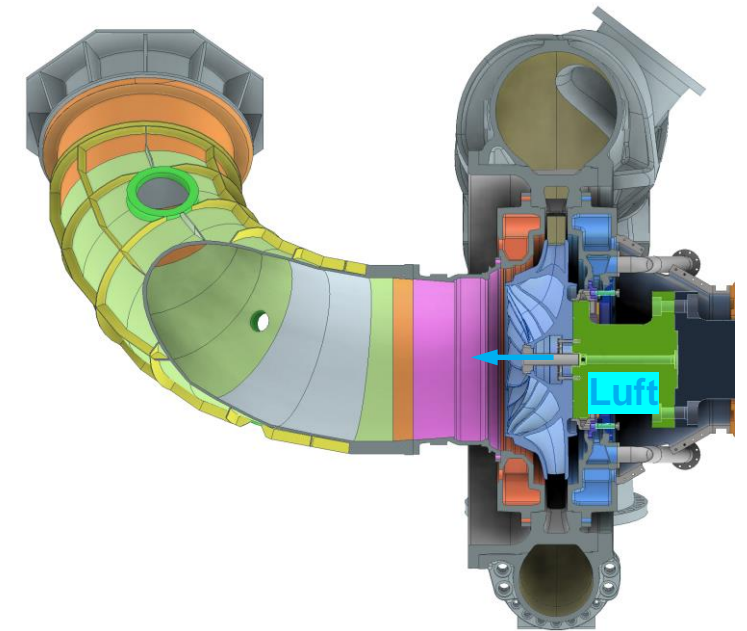


**05**

# PROBLEMLÖSUNG

## Zentralbelüftung: Durchgeführte Tests

- Abschaltung ohne Luft
  - Die Maschine wurde mit Belüftung auf die jeweilige Leistung gebracht
  - Stationärer Betrieb für ca. 5 Minuten
  - Luft wurde abgestellt
  - Geordnetes Herunterfahren
- Leitsungsrampen mit verschiedenen Luftmengen
  - Die Maschine wurde mit Belüftung auf die jeweilige Leistung gebracht
  - Stationärer Betrieb für ca. 5 Minuten
  - Kontinuierliche Reduktion der Leistung mit ca. 1 MW / Minute

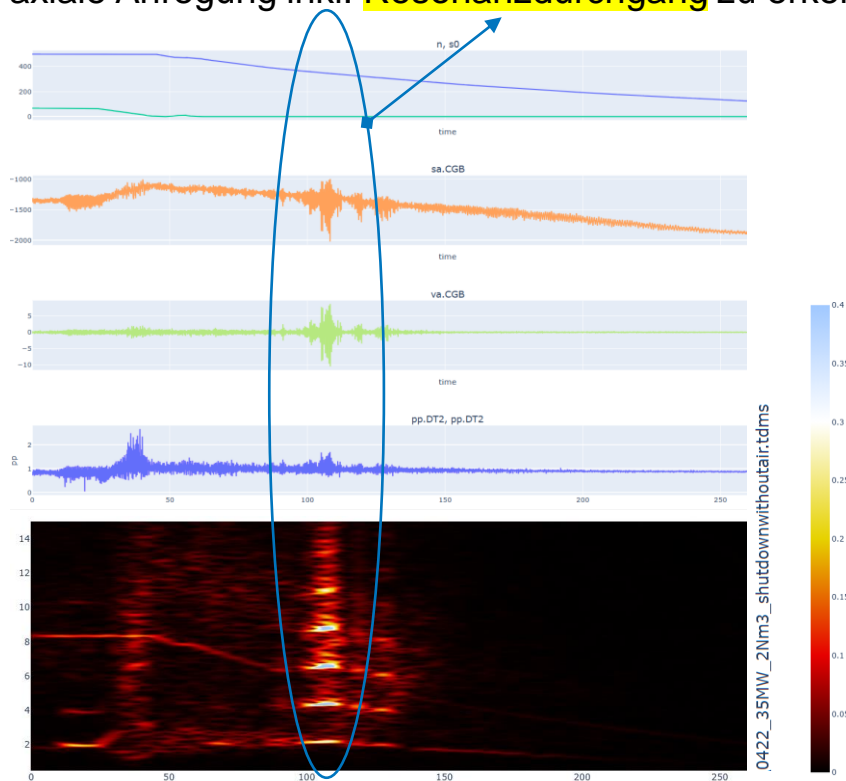


# RODUNDWERK I

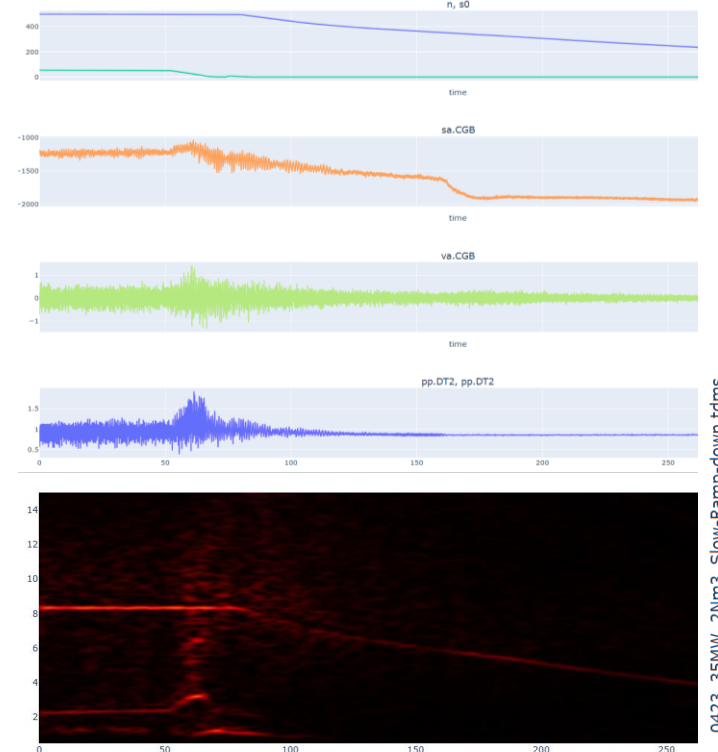


## Zentralbelüftung: Rampe / Abschaltung ab 35MW

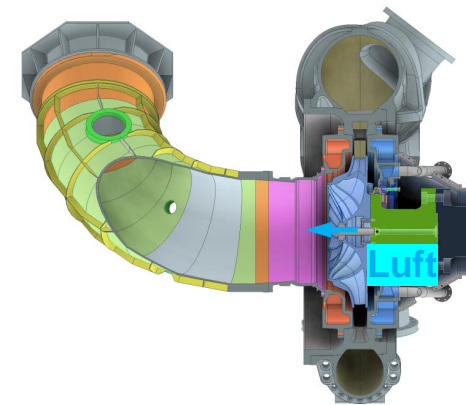
- Vergleich **ohne** Zentralbelüftung (links) und **mit** Zentralbelüftung (rechts, 2 Nm3)
  - Ohne Belüftung ist bei ca. 340 rpm die axiale Anregung inkl. **Resonanzdurchgang** zu erkennen
  - Mit Zentralbelüftung ist beim Auslaufen der Maschine kein Resonanzdurchgang sichtbar



0422\_35MW\_2Nm3\_shutdownwithoutair.tdms



0423\_35MW\_2Nm3\_Slow-Ramp-down.tdms

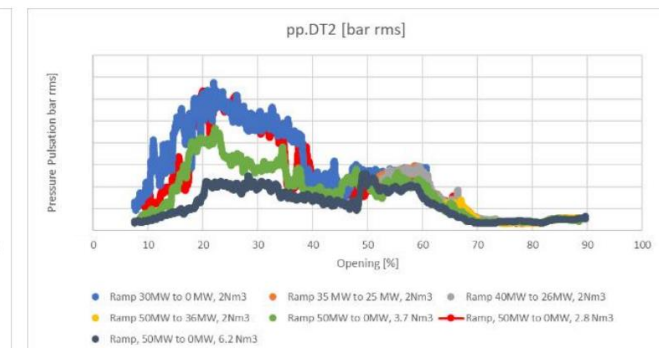
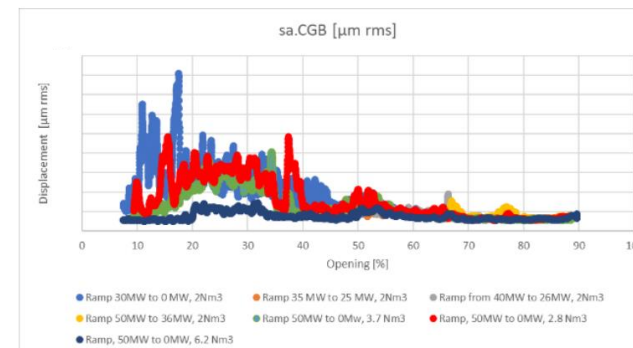
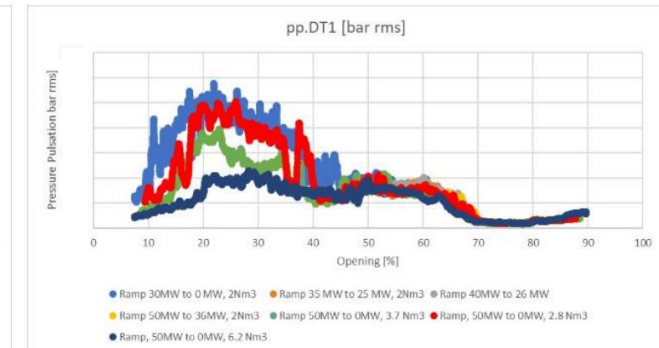
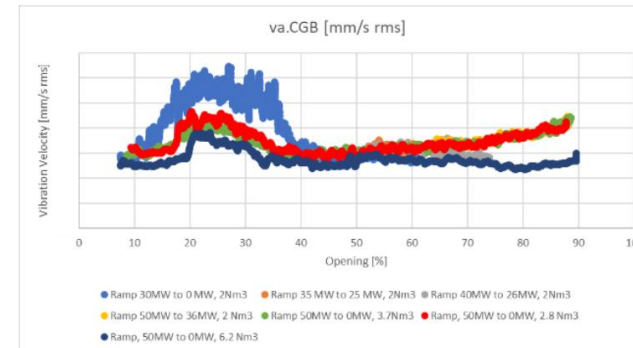
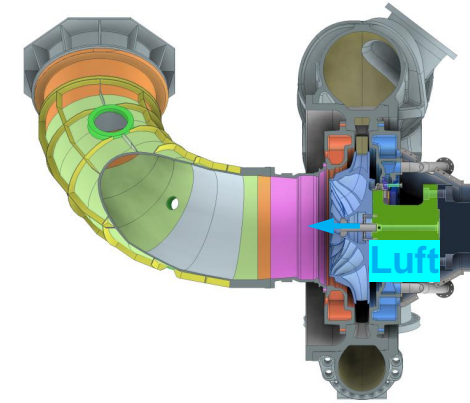


# RODUNDWERK I



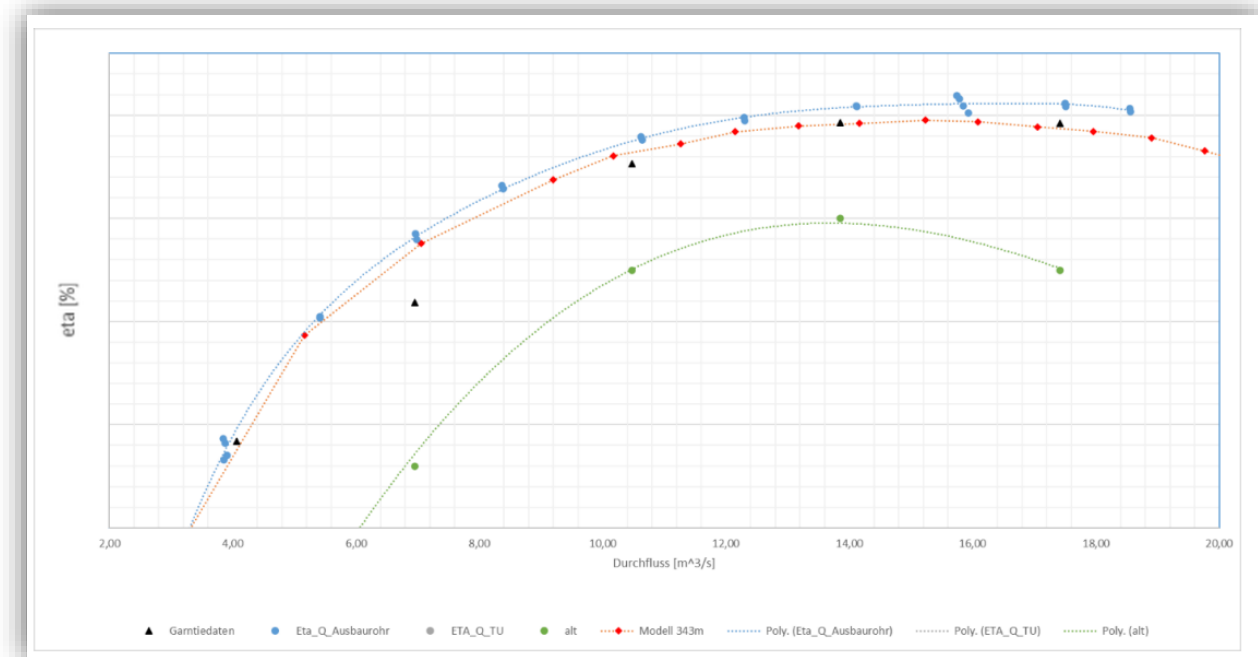
## Zentralbelüftung: Leistungsrampen mit verschiedenen Belüftungsmengen

- Umso größer die Luftmenge, umso tiefer die Pulsations- und Vibrationswerte
- Bereits mit 2Nm<sup>3</sup> läuft die Maschine relative ruhig, mit guten Druckpulsations- und Vibrationswerten
- Ab 40% LA-Öffnung (ca. 18 MW Leistung) ist der Einfluss der Luftmenge gering.



## Zusammenfassung

- Durch das Zusammenspiel einer hydraulischen Resonanz im Saugrohr mit dem nichtlinearen Schwingungsverhalten der axialen Lagerungssituation traten beim Anfahren der Maschine bei 70% der Nenndrehzahl unzulässig hohe axiale Schwingungswerte auf
- Durch das Einbringen von Stabilisierungsluft mit Hilfe einer entsprechend optimierten Zentralbelüftung konnte die hydraulische Anregung erfolgreich unterdrückt werden, sodass nun die Maschine im ganzen Betriebsbereich stabil betrieben werden kann
- Durch eine weitere Anlagenmessung wurde das Wirkungsgradniveau der neuen Maschinen und damit auch die Modellmessung bestätigt.





## DANKSAGUNG



ENGINEERED SUCCESS

Standorte:

Linz

Graz

Kriens

Montreal

Ravensburg





**ANDRITZ.  
FOR GROWTH  
THAT MATTERS.**

# LEGAL DISCLAIMER



© ANDRITZ AG 2025

This presentation contains valuable, proprietary property belonging to ANDRITZ AG or its affiliates (“the ANDRITZ Group”), and no licenses or other intellectual property rights are granted herein, nor shall the contents of this presentation form part of any sales contracts which may be concluded between the ANDRITZ Group companies and purchasers of any equipment and/or systems referenced herein. Please be aware that the ANDRITZ Group actively and aggressively enforces its intellectual property rights to the fullest extent of applicable law. Any information contained herein (other than publicly available information) shall not be disclosed or reproduced, in whole or in part, electronically or in hard copy, to third parties. No information contained herein shall be used in any way either commercially or for any purpose other than internal viewing, reading, or evaluation of its contents by recipient and the ANDRITZ Group disclaims all liability arising from recipient’s use or reliance upon such information. Title in and to all intellectual property rights embodied in this presentation, and all information contained therein, is and shall remain with the ANDRITZ Group. None of the information contained herein shall be construed as legal, tax, or investment advice, and private counsel, accountants, or other professional advisers should be consulted and relied upon for any such advice.

All copyrightable text and graphics, the selection, arrangement, and presentation of all materials, and the overall design of this presentation are © ANDRITZ Group 2025. All rights reserved. No part of this information or materials may be reproduced, retransmitted, displayed, distributed, or modified without the prior written approval of Owner. All trademarks and other names, logos, and icons identifying Owner’s goods and services are proprietary marks belonging to the ANDRITZ Group. If recipient is in doubt whether permission is needed for any type of use of the contents of this presentation, please contact the ANDRITZ Group at [welcome@andritz.com](mailto:welcome@andritz.com).