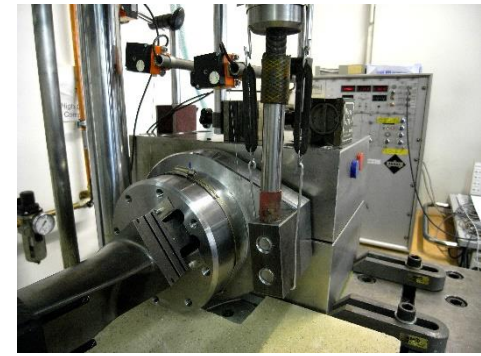


**Bauteilprüfung mit dem  
Resonanzpulser**



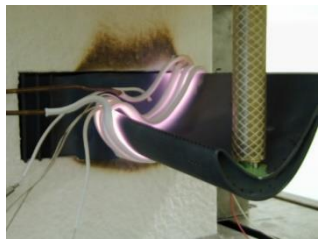
## **Frühjahrssitzung der DGM/DVM-AG Materialermüdung**

**Neuhausen am R(h)einfall (CH)**

**05./06. März 2020**

**Dr.-Ing. Klaus F. Stärk  
Untersiggenthal/Schweiz**

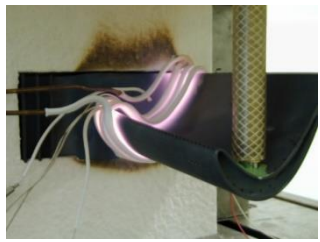
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



## Gliederung

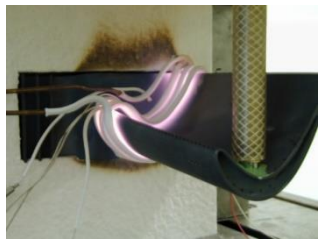
1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung  
Was ist wichtig?

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



## Gliederung

1. **Prüfsysteme**
2. **Beispiele mit Fazit**
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. **Zusammenfassung**  
Was ist wichtig?

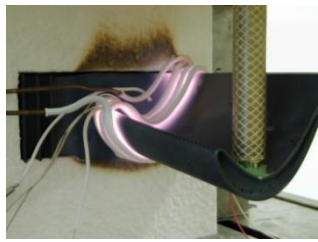


# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



## Prüfstände

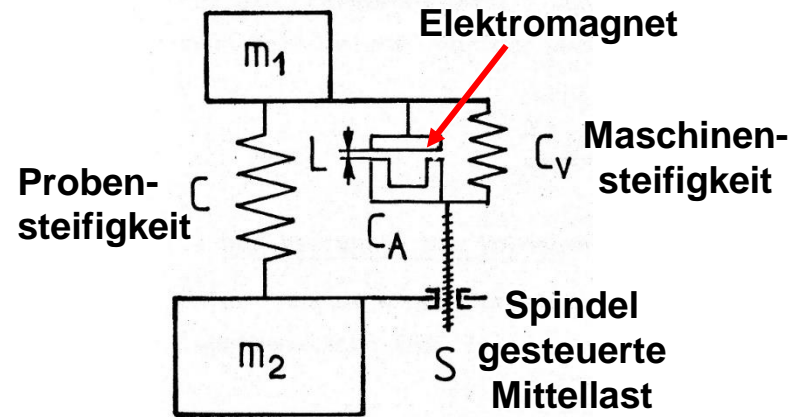
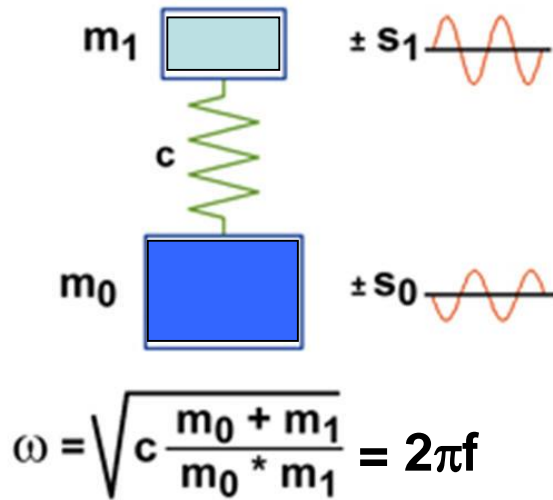
- **Mechanisch (Spindelantrieb, Exzenter, Unwucht)**  
günstig, niedriger Energieaufwand, niedrige Prüffrequenz  $< 30$  Hz
- **Hydraulisch (Servohydraulik, Druckluft)**  
teuer, hoher Energieverbrauch (etwa 100x Resonanzpulser)  
Kühlung, Frequenz  $< 50$  Hz, flexibel
- **Elektromagnetisch, Resonanz**  
teuer, geringer Energieverbrauch, keine Kühlung, kein Verschleiss,  
hohe Prüffrequenzen bis 200 (1000) Hz  $> f > 40$  Hz  
Bedingung: niedrige Proben- und Vorrichtungsdämpfung
- **Ultraschall-Ermüdung**  
geringer Energieverbrauch, Probenkühlung, kein Verschleiss,  
kleine Proben, hohe Prüffrequenz ca. 20 kHz



# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



## Resonanzpulser

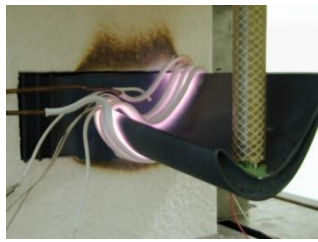


## Eigen-Frequenz

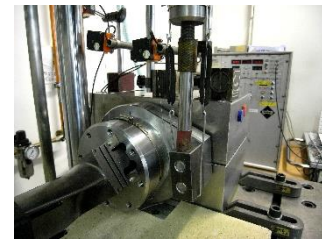
Abhängig von Massen  $m_1, m_2$

Maschinen- und Probensteifigkeit (Feder  $c$ )

Frequenzauflösung ca. 0.01 Hz



## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpuls



Prüffrequenz → eine Funktion der Bauteilsteifigkeit

Ein **Nach**-Teil?

**Frequenzänderung =  
Steifigkeitsänderung**

durch

- Anriss bzw. Risswachstum
- Temperaturänderung bzw. Eigenerwärmung
- Reibpartikel, Verschleiss, Schmierung

z.B.

Last-Steigerungs-  
Verfahren (LSV):

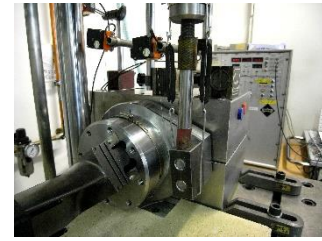
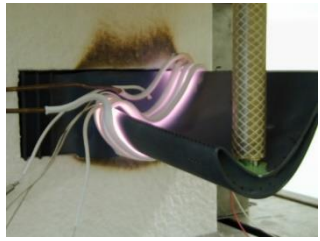
z.B. Block 200.000 cy

Laststeigerung 2%

→ Gute Näherung  
Dauerfestigkeit in

**Einem** Versuch

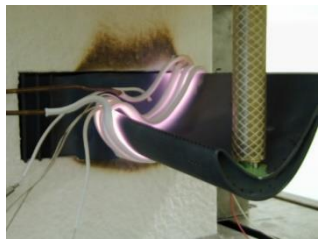
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



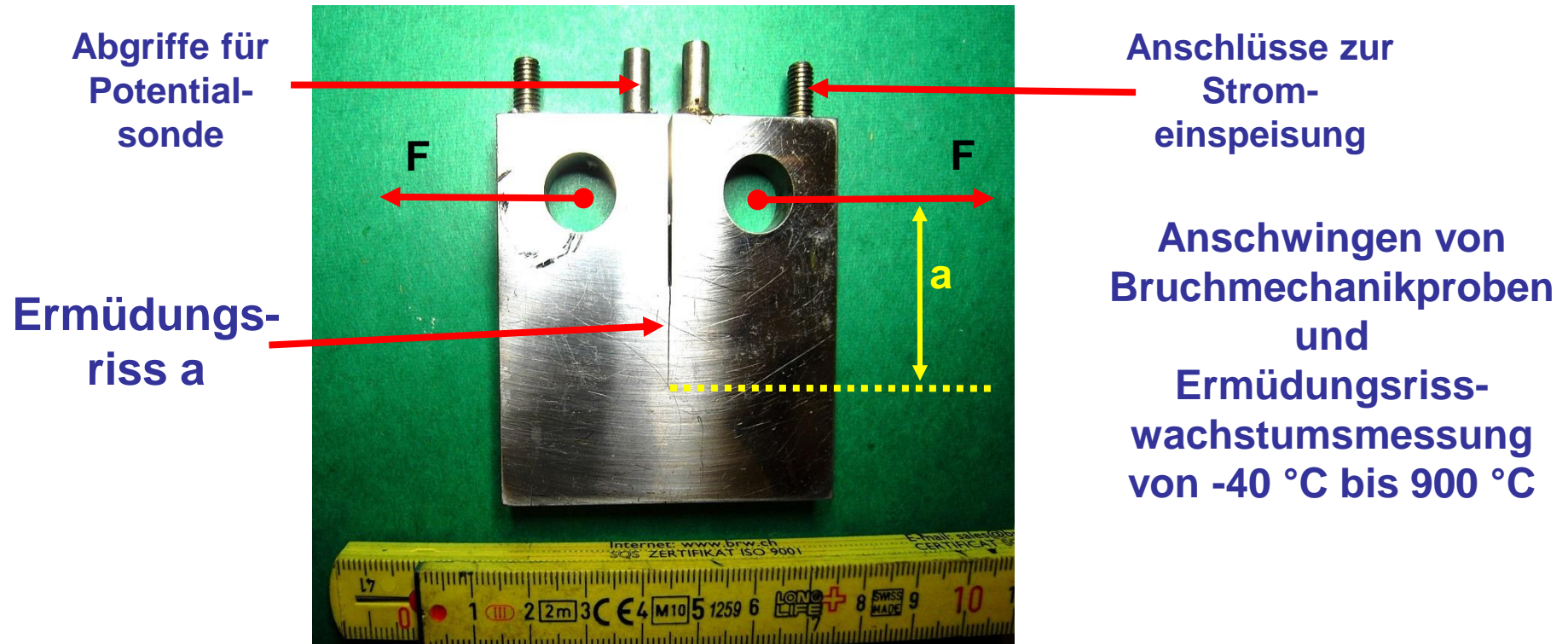
## Gliederung

1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung  
Was ist wichtig?

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

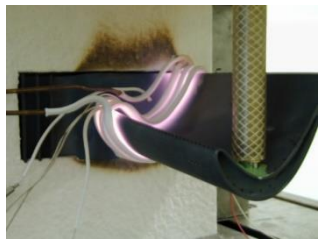


## Zugschwell an CT-Proben



**Der Riss ändert die Steifigkeit und damit die Prüffrequenz**

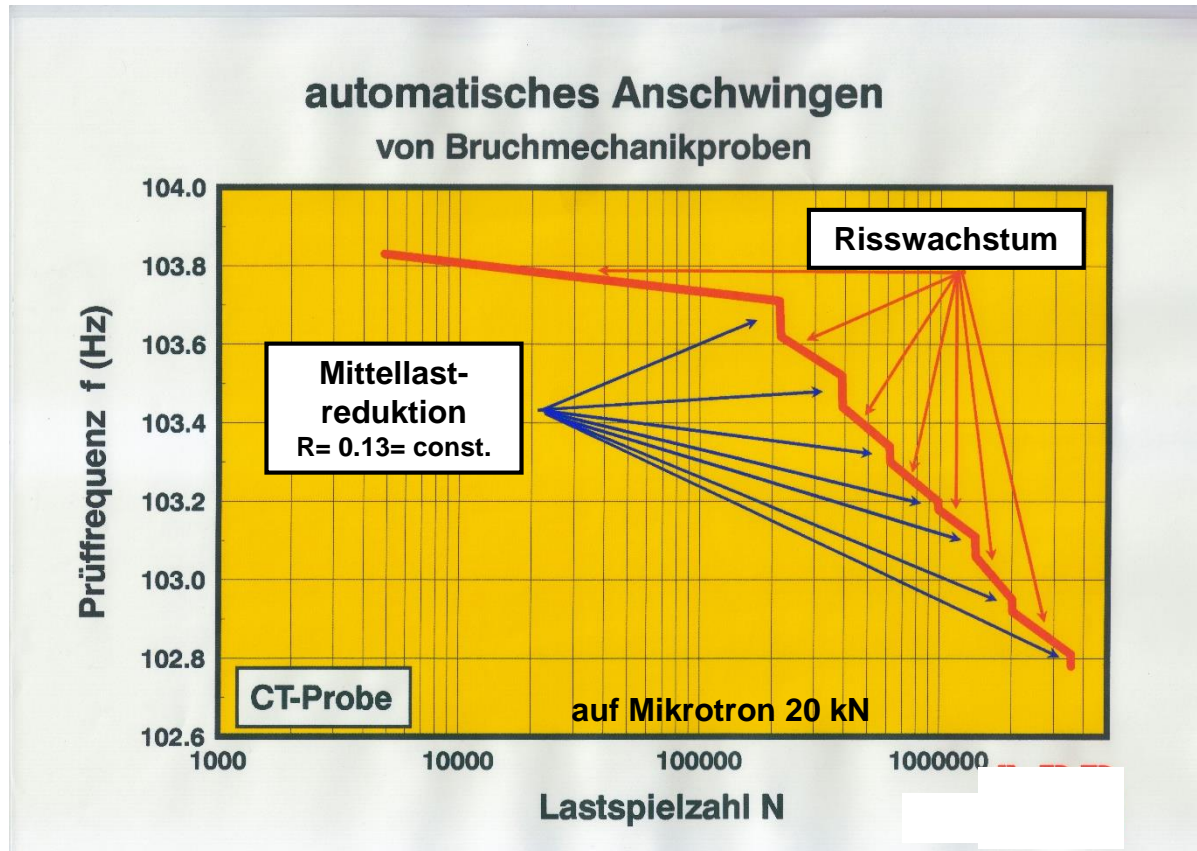




# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

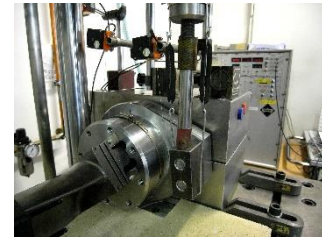
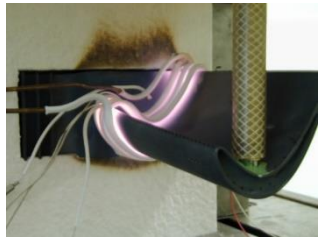


## Zugschwell an CT-Proben



**kontrollierte  
Frequenz-  
reduktion  
=  
vordefiniertes  
Risswachstum**

## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

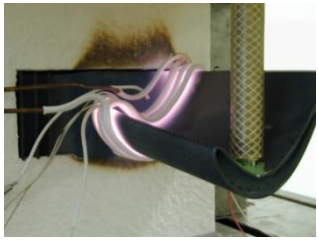


## Zugschwell an CT-Proben

### Fazit:

- Automatisiertes Lastabsenkungsverfahren in ca. 5-7 Stufen
- Vorbestimmte Endrisslänge nahe  $\Delta K_0$
- Prüffrequenz zur Risslängenbestimmung
- Je ein spezielles Blockprogramm für jede Probengeometrie

## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



## Probenprüfung

### Fazit:

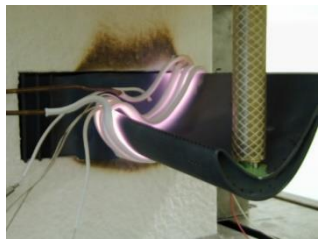
- **Einfache Rundprobenprüfungen sind langweilig**
- **Bauteilprüfung ist die Königsdisziplin**

Biegung

Torsion

Reibung/Verschleiss

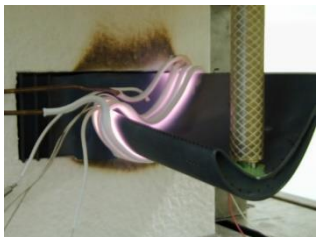
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



## Gliederung

1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung  
Was ist wichtig?

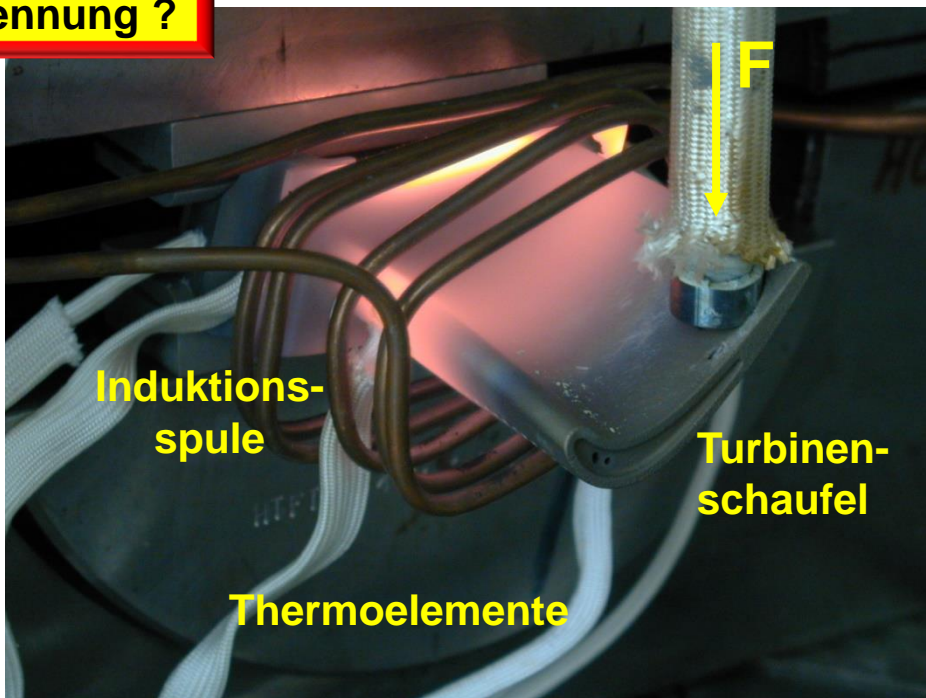
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



## Biegeschwell

Gasturbinenschaufel  
bei 900 °C bis 1000 °C  
Biegebeanspruchung

Optische  
Anriss-  
erkennung ?



Induktions-  
spule

Turbinen-  
schaufel

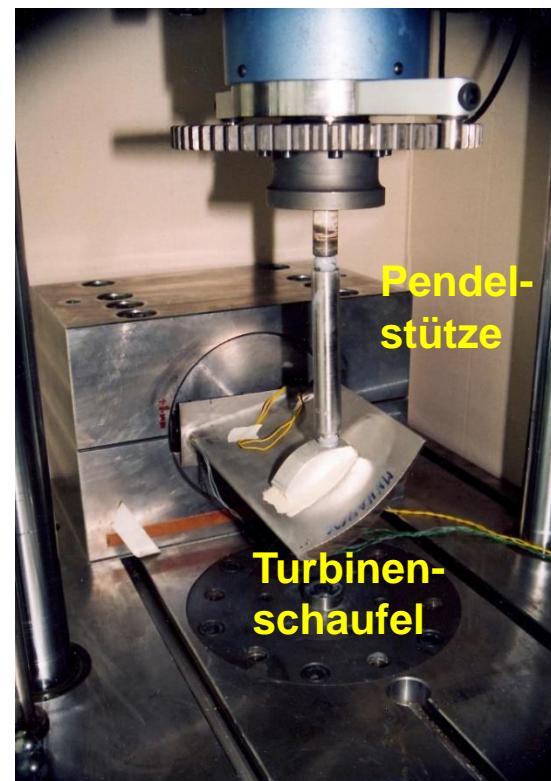
Thermoelemente

heiss

Bauteilprüfung

kalt

Verdichterschaufel mit  
Dehnungsmessstreifen  
auf Biegung

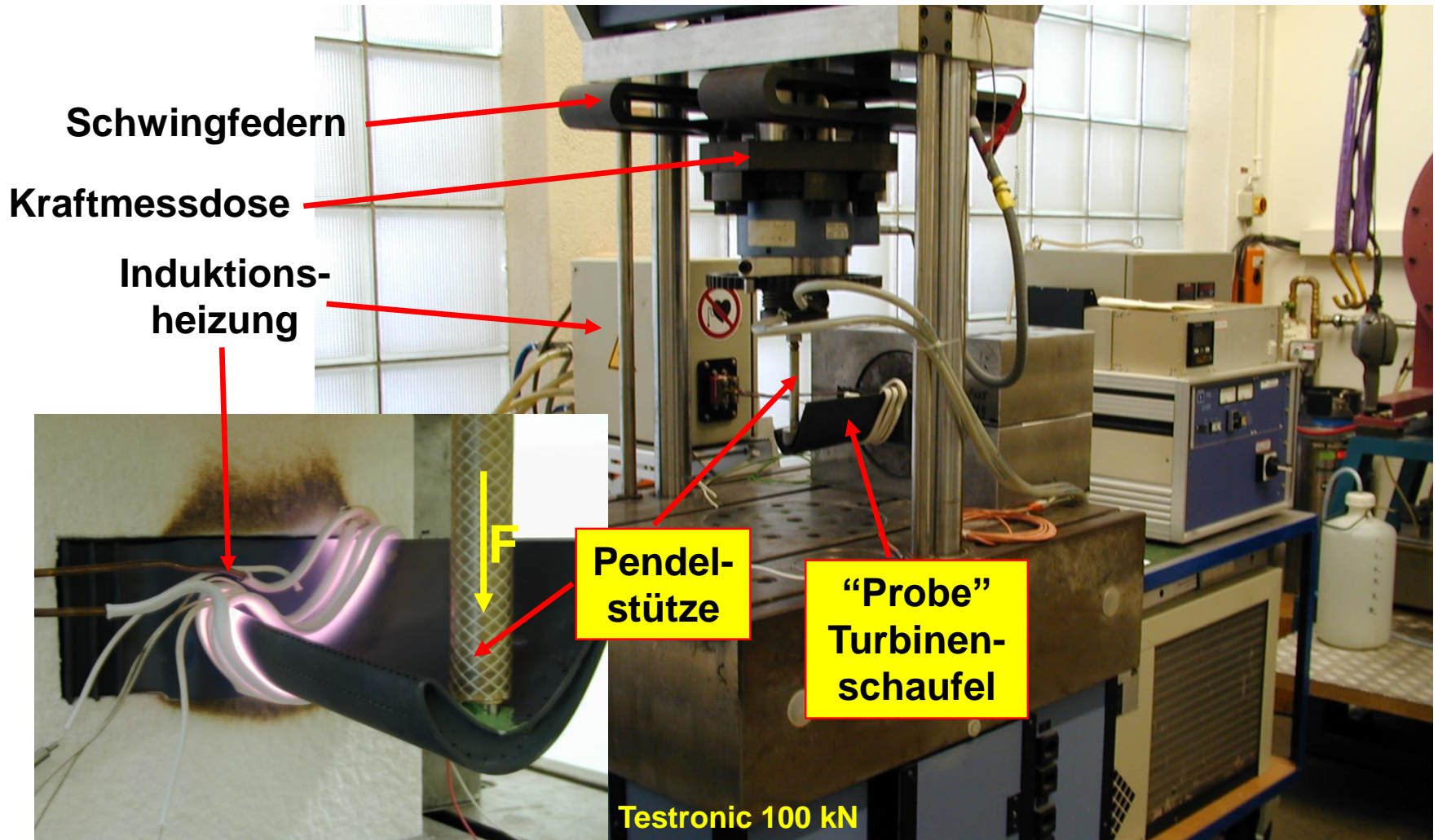
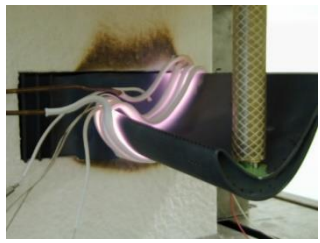


Pendel-  
stütze

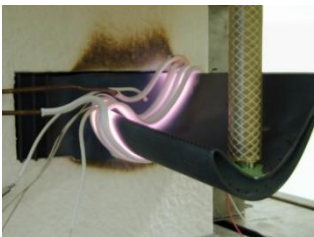
Turbinen-  
schaufel

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

## Biegeschwell

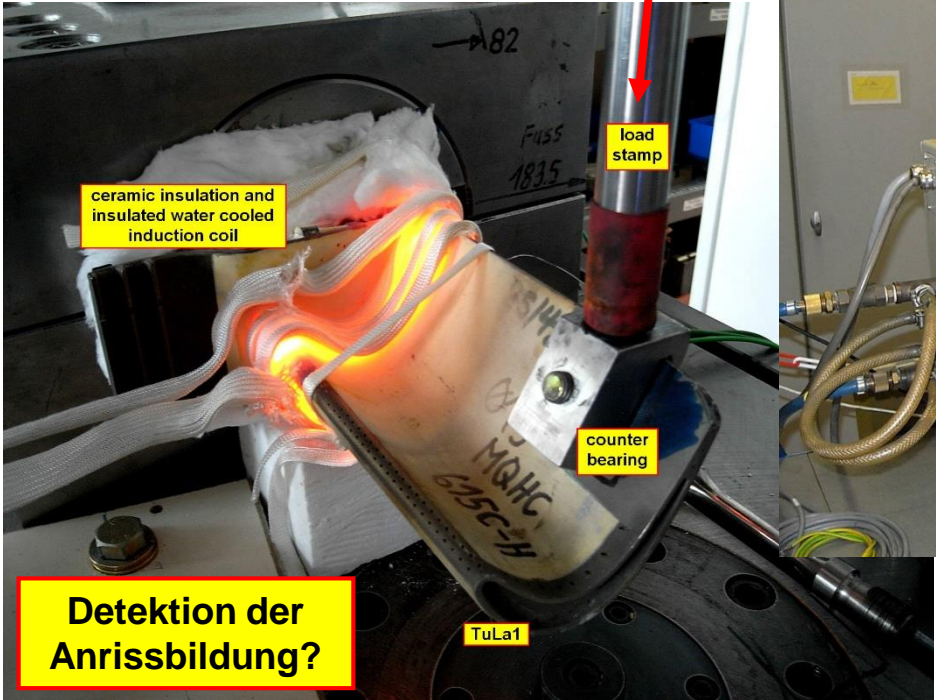


# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser

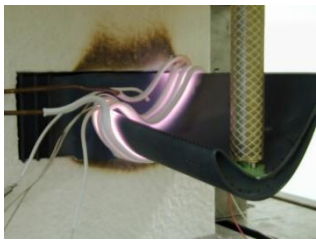


## Biegeschwell

lastkontrollierte  
Bauteilprüfung  
Turbinenschaufel bei 800 °C / F



LCF- HCF-Prüfung  
mit Induktionsheizung



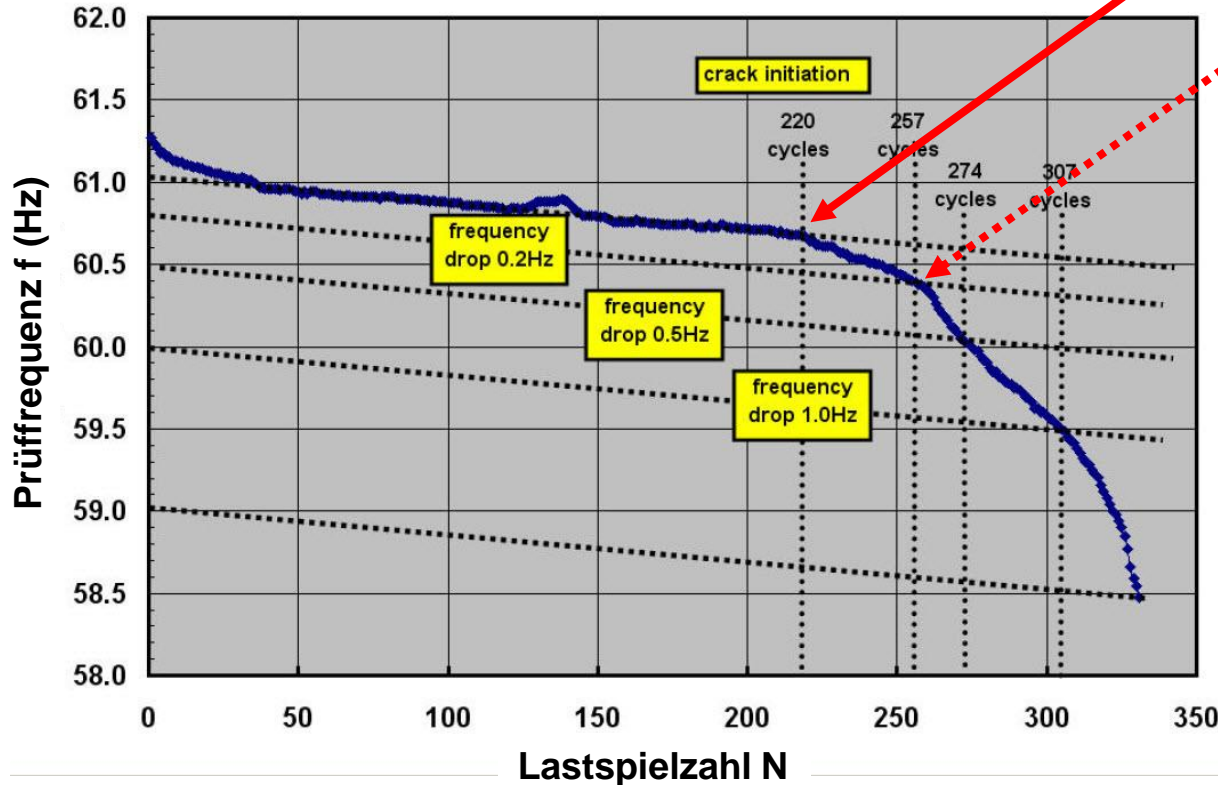
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



## Biegeschwell

### lastkontrollierte LCF-Biegebelastung mit Haltezeit bei 800 °C

Turbinenschaufel, Biegeschwellbelastung, 10 Minuten Haltezeit, 800 °C



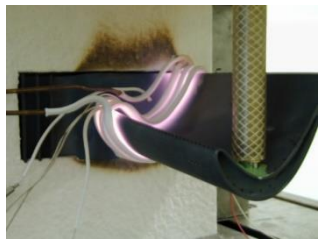
Rissinitiierung

Anrisslängendefinition  
(Frequenzabfall 0.2 Hz)

**und**

**Anriss-  
erkennung und  
Anrissdefinition  
durch kurze HCF  
Blöcke nach  
jedem LCF -  
Zyklus**





## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

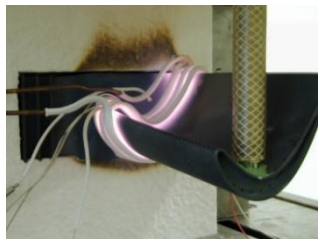


## Biegeschwell

### Fazit:

- Biegung bei 800 °C auf Resonanzpulsler
- Lastkontrollierter LCF-Zyklus und Haltezeit mit Mittellastantrieb (Spindel)
- Vermutliche Anrissstelle opt. nicht zugänglich
- Prüffrequenz zur Anrissdetektion durch kleinen und kurzen HCF-Block nach jedem Zyklus
- Alternative auf Hydraulikprüfstand:
- Anrissprüfung nur nach Abkühlung und vollständigem Ausbau möglich

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

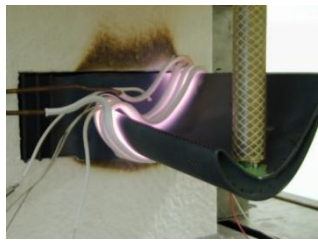


## Gliederung

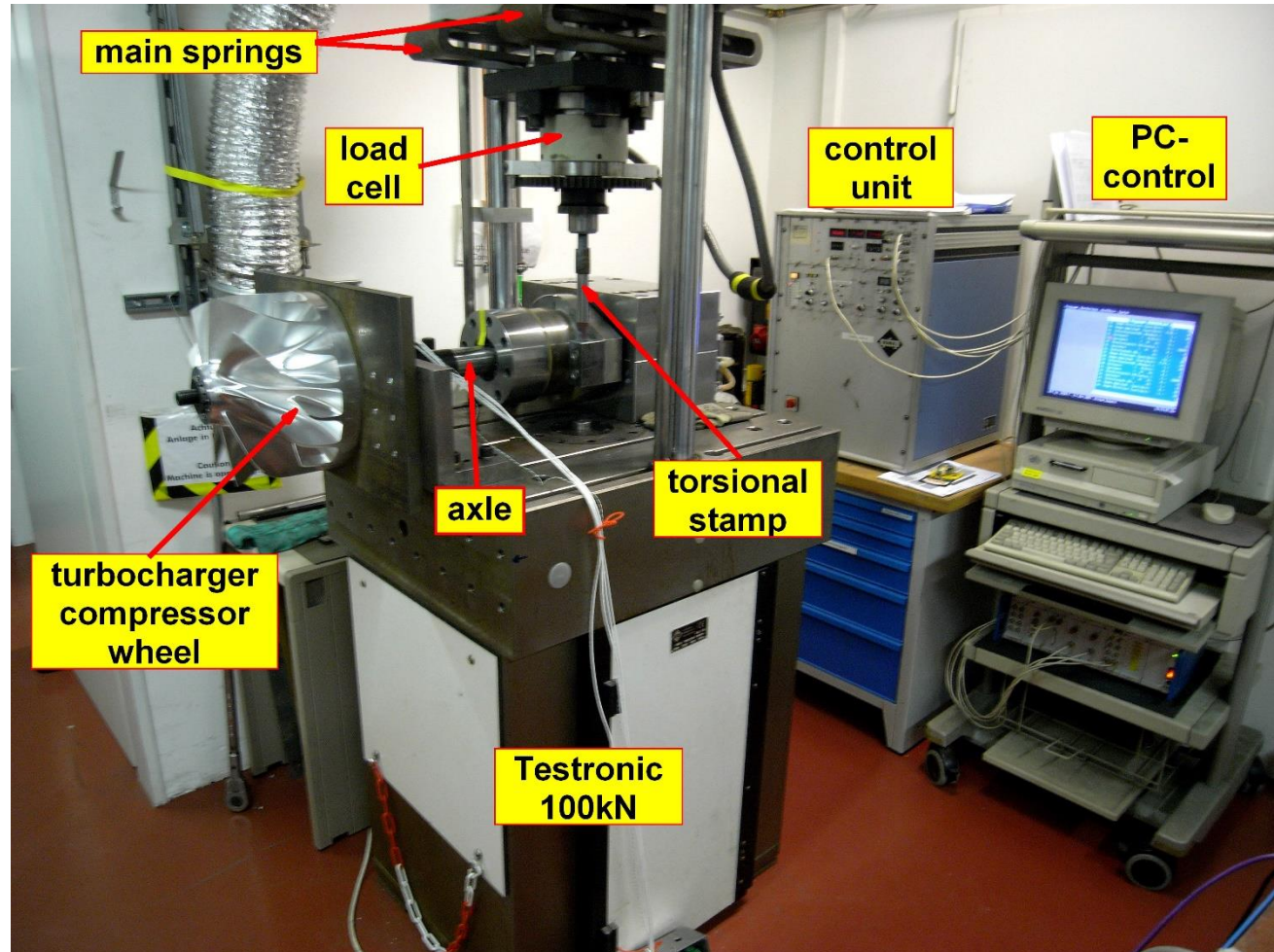
1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung  
Was ist wichtig?

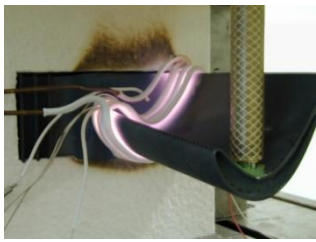
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

## Torsionsschwell



**Schiffsturboladerwellenverbindung**  
bis 6.000 Nm  
mit ca. 46 Hz  
(hier bei RT  
ohne Isolation)





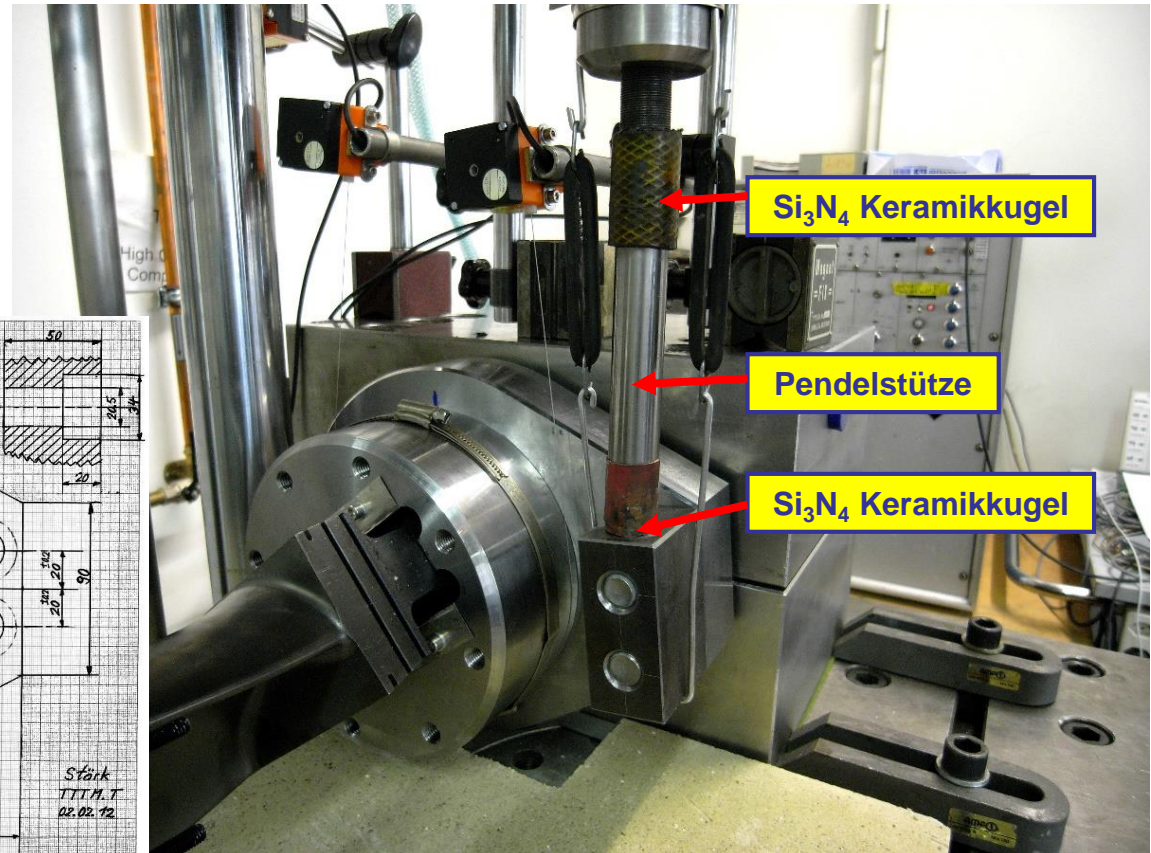
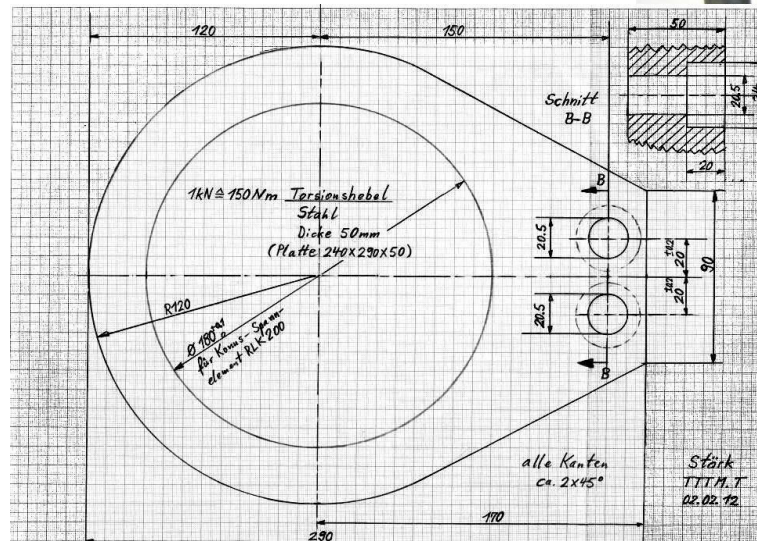
# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

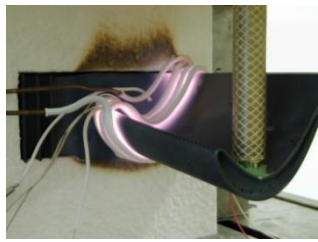


## Torsionsschwell

Torsionsvorrichtung bis 6.000 Nm  
auf 100 kN Testronic

Torsionshebel  
(Hebelarm 150 mm mit  
Pendelkugellager)





# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

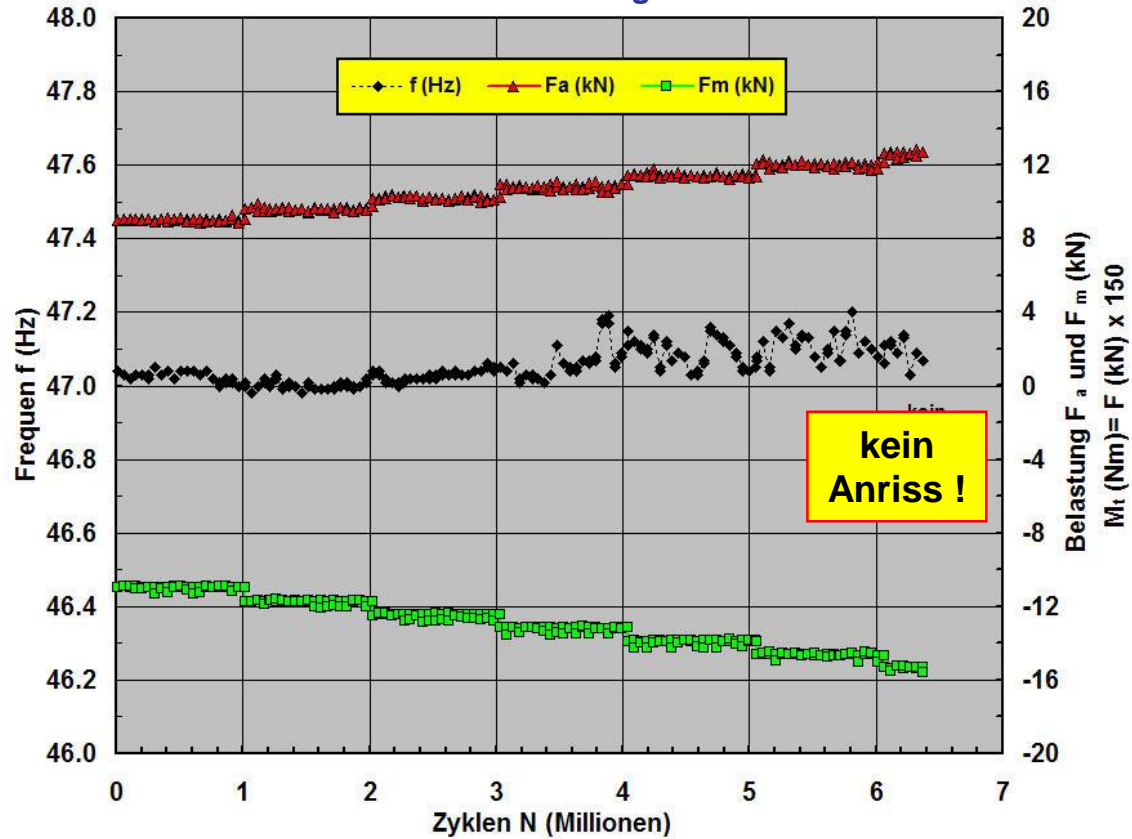


## Torsionsschwell

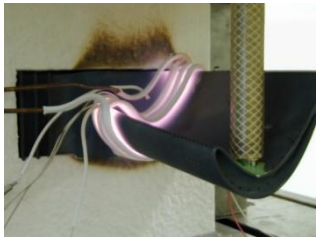
Laststeigerungs-  
Versuch (LSV)

Schiffs-  
turboladerwelle  
bis 6.000 Nm  
mit ca. 47 Hz

LSV Wellenverbindung bei 140 °C



## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

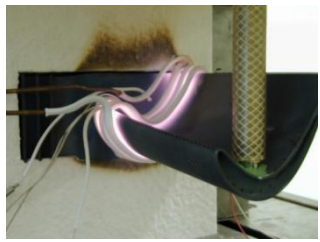


## Torsionschwell

### Fazit:

- Offerte Wettbewerber auf Hydraulikprüfstand
- → Torsion RT und 140 °C auf Resonanzpulsler
- Laststeigerungsverfahren (LSV)
- Wellenverbindung opt. nicht zugänglich
- Anrissprüfung nur nach vollständigem Ausbau und Bauteilerlegung möglich
- Prüffrequenz zur Anrissdetektion
- Frequenzmessung → kein Anriss bis  $M_{bmax}$

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

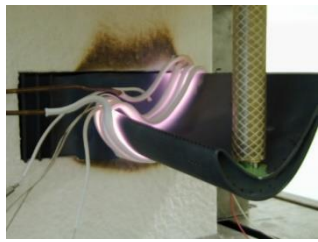


## Gliederung

1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung  
Was ist wichtig?

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

## Reibverschleiss



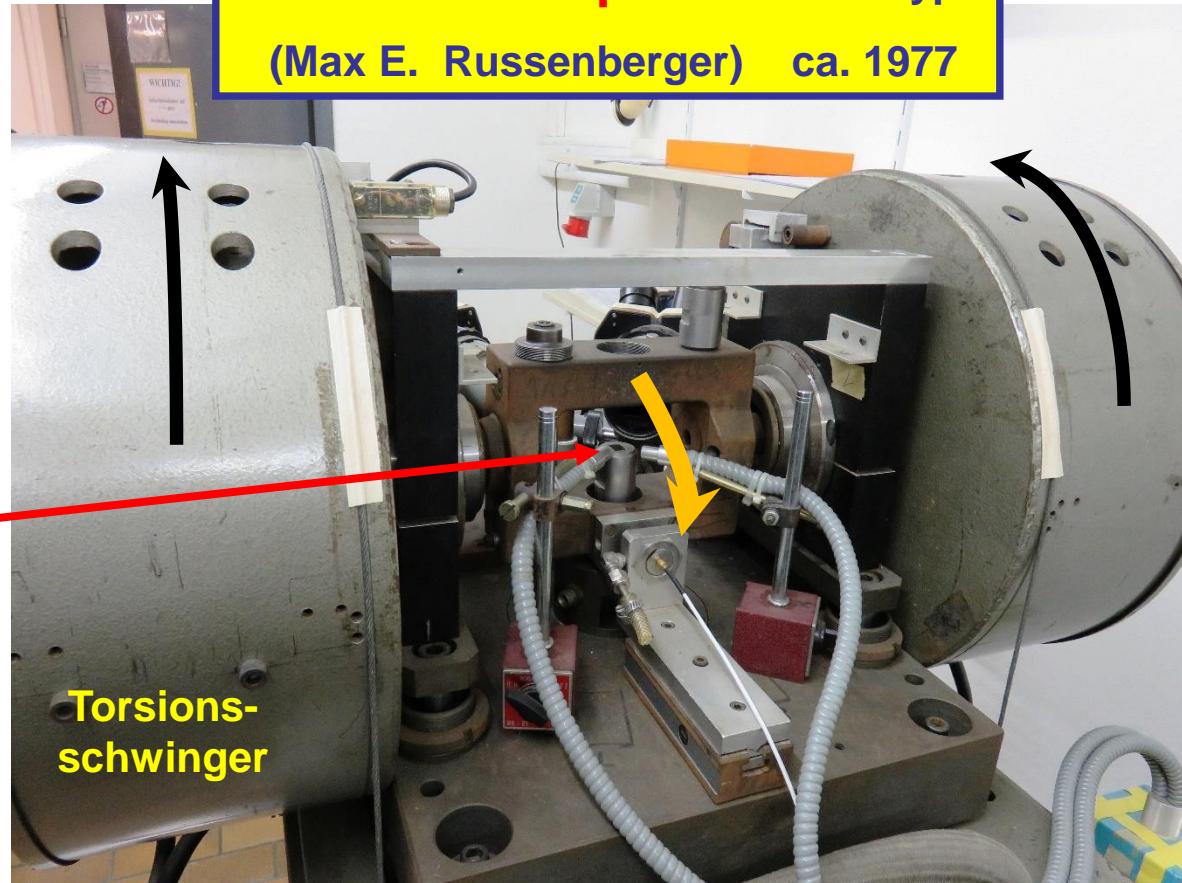
## Turbinenschaufelsimulation

- Zug= Fliehkraft 20 kN
  - stat. Biegung= Gaskraft
  - dyn. Biegung= Gaskraft (Vibration)
- Temperaturen bis 900 °C  
(mit Induktionsheizung)  
hohe Prüffrequenz ca. 420 Hz

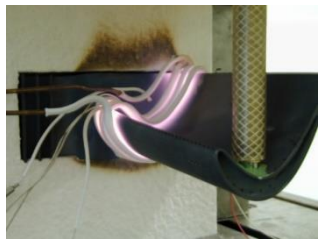
**HT-Resonanzpulsler Prototyp**  
(Max E. Russenberger) ca. 1977



**SENB-  
Kleinprobe**



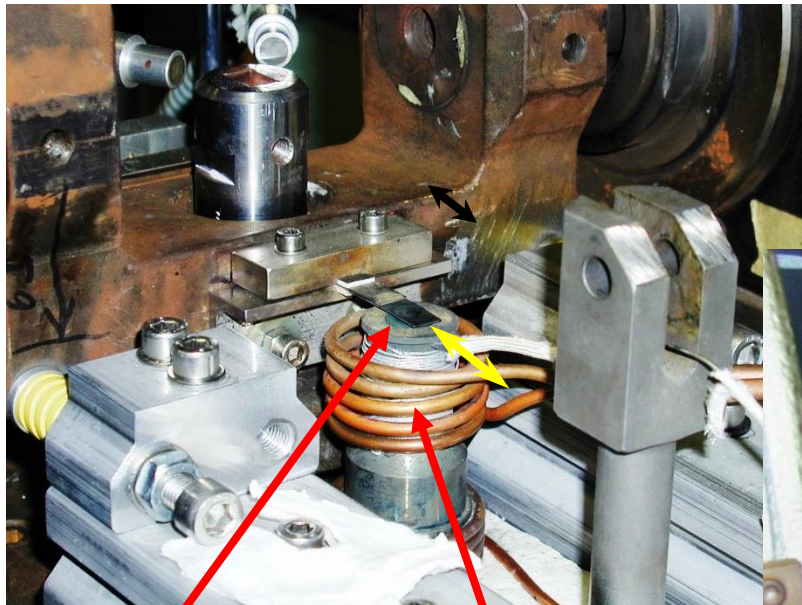




# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpuls



## Reibverschleiss

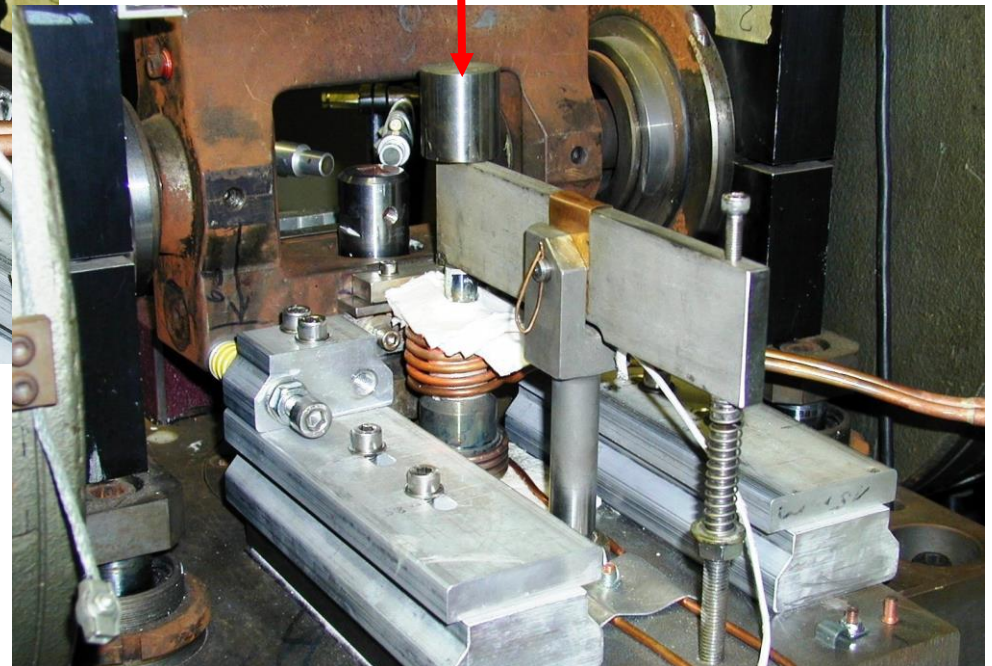


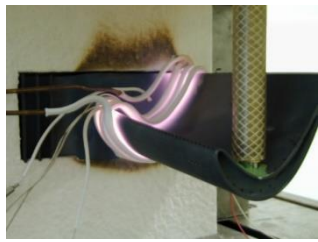
Prüfkörper  
(Dichtstreifen)

Induktions-  
heizung

HT-Pulsler  
(robuster Torsionsschwinger)

Gewichts-  
belastung





# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



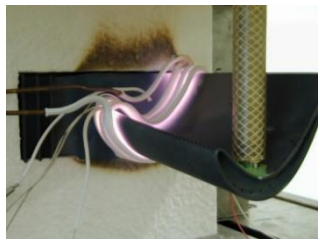
## Reibverschleiss

### Fazit:

- Praxisähnliche Prüfbedingungen
- Vibrations-Reibverschleiss
- RT bis 900 °C auf Resonanzpulsler
- Konstante Anpresskraft (Gewicht)
- Leistungsmessung
- Prüffrequenzmessung
- < 700 °C Verschleiss hoch
- > 800 °C Verschleiss gering !!
- Reibung und Reibverschleiss  
= System-Eigenschaft

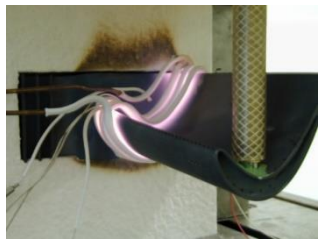
**→ so systemnah wie möglich !**

# Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



## Gliederung

1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
  - Zug (Bruchmechanikproben)
  - Biegung (Turbinenschaufel)
  - Torsion (Turboladerwelle)
  - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung  
Was ist wichtig?

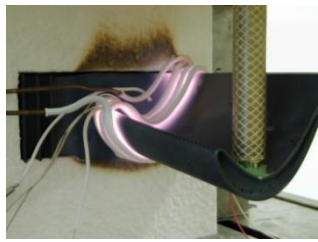


## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpuls



## Was ist wichtig für Qualitätskontrolle und Entwicklung?

- **Kostengünstige Prüfung**
- **Einfacher Prüfstand**  
(einfache Handhabung,  
kein Maschinenverschleiss,  
hohe Lebensdauer, genau)
- **Schnelle Prüfung,**  
d.h. hohe Prüffrequenz  
100 Hz= 2.8 Stunden für 1 Million Zyklen
- **Versagensdetektion**  
durch Analyse der Prüffrequenz  
und der Leistungsaufnahme



## Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



## Schlussfolgerung

Im Gegensatz zur Servohydraulik haben Resonanzpulser eine geringe **Leistung** und eine steifigkeitssensible **Eigenfrequenz**

→ also nutzen Sie es !

