

**Bauteilprüfung mit dem
Resonanzpulser**



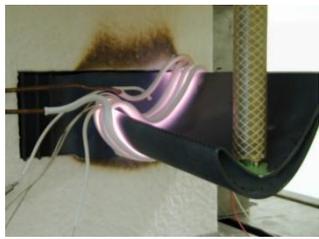
Frühjahrssitzung der DGM/DVM-AG Materialermüdung

Neuhausen am R(h)einfall (CH)

05./06. März 2020

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

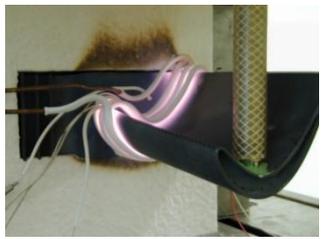
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



Gliederung

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

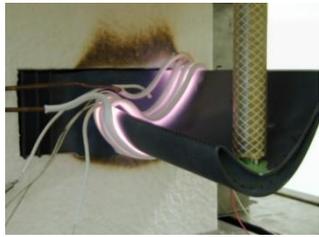
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



Gliederung

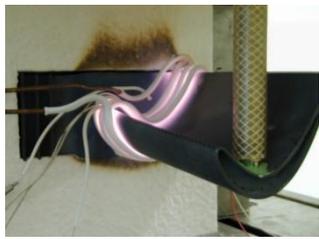
1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
 - Zug (Bruchmechanikproben)
 - Biegung (Turbinenschaufel)
 - Torsion (Turboladerwelle)
 - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung
Was ist wichtig?

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



Prüfstände

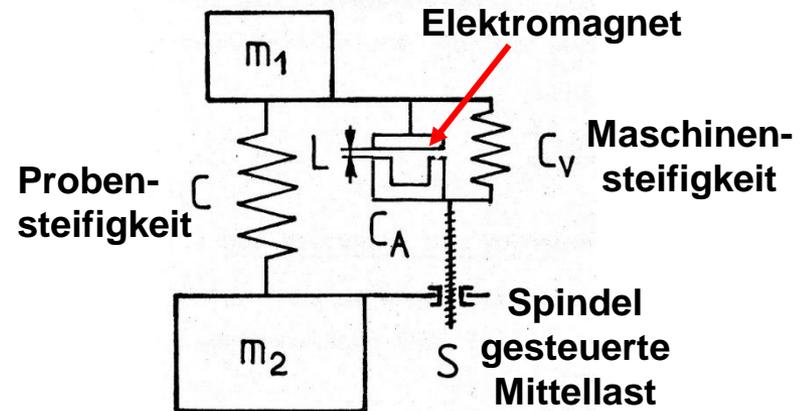
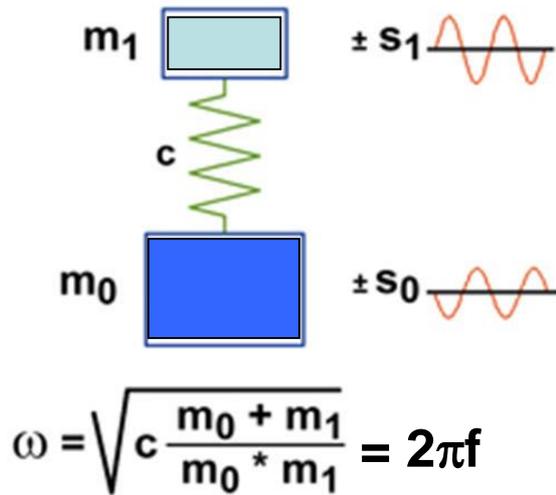
- **Mechanisch (Spindelantrieb, Exzenter, Unwucht)**
günstig, niedriger Energieaufwand, niedrige Prüffrequenz < 30 Hz
- **Hydraulisch (Servohydraulik, Druckluft)**
teuer, hoher Energieverbrauch (etwa 100x Resonanzpulser)
Kühlung, Frequenz < 50 Hz, flexibel
- **Elektromagnetisch, Resonanz**
teuer, geringer 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

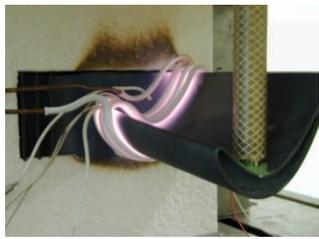


Eigen-Frequenz

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):

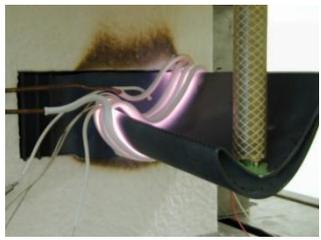
z.B. Block 200.000 cy

Laststeigerung 2%

→ Gute Näherung
Dauerfestigkeit in

Einem Versuch

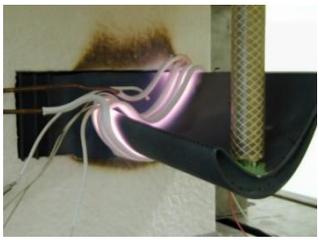
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



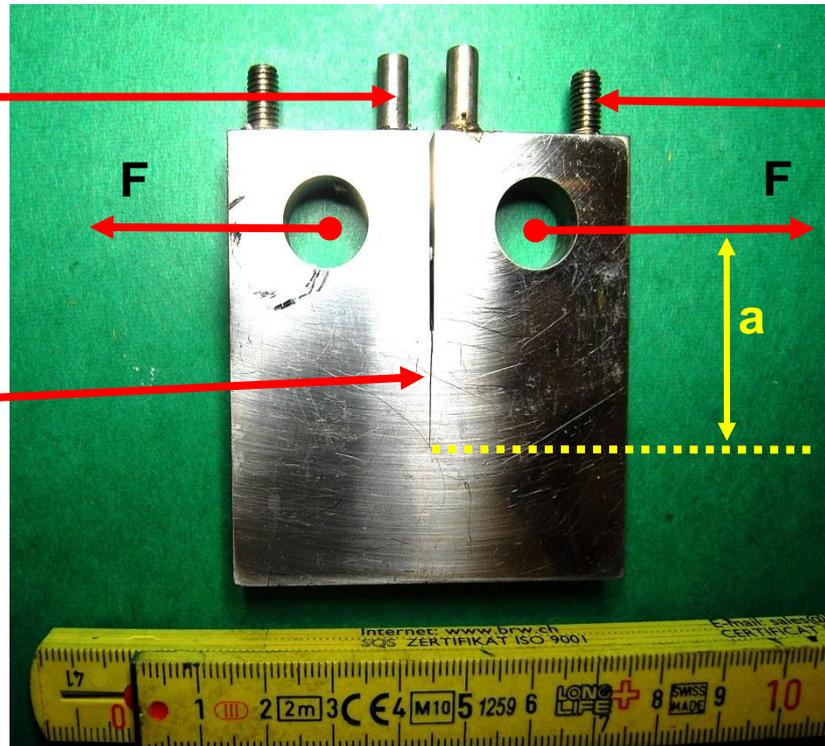
Gliederung

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



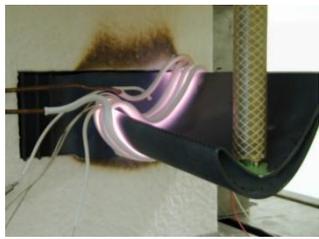
Abgriffe für
Potential-
sonde

Ermüdungs-
riss a

Anschlüsse zur
Strom-
einspeisung

Anschwingen von
Bruchmechanikproben
und
Ermüdungsriss-
wachstumsmessung
von -40 °C bis 900 °C

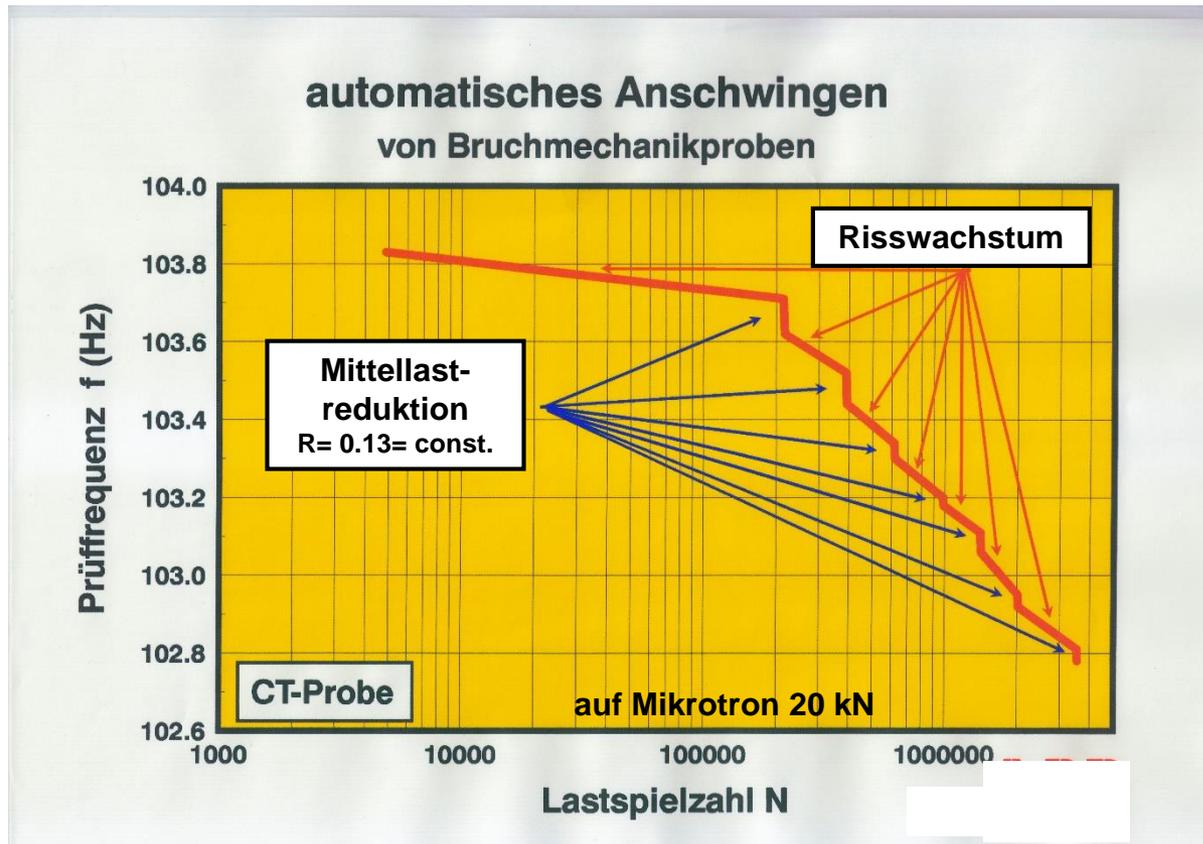
Der Riss ändert die Steifigkeit und damit die Prüffrequenz



Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

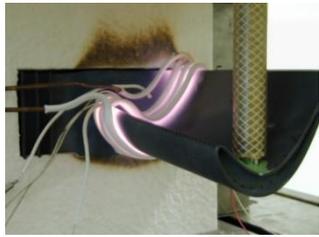


Zugschwell an CT-Proben



**kontrollierte
Frequenz-
reduktion
=
vordefiniertes
Risswachstum**

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

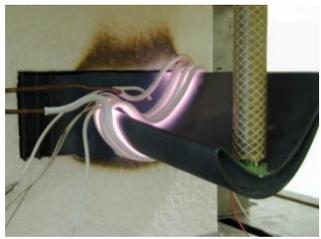


Zugschwell an CT-Proben

Fazit:

- Automatisiertes Lastabsenkungsverfahren in ca. 5-7 Stufen
- Vorbestimmte Endrisslänge nahe ΔK_0
- Prüffrequenz zur Risslängenbestimmung
- Je ein spezielles Blockprogramm für jede Probengeometrie

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



Probenprüfung

Fazit:

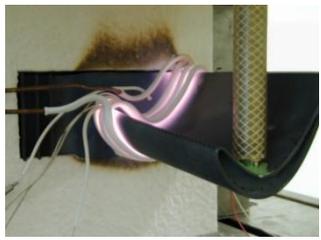
- **Einfache Rundprobenprüfungen sind langweilig**
- **Bauteilprüfung ist die Königsdisziplin**

Biegung

Torsion

Reibung/Verschleiss

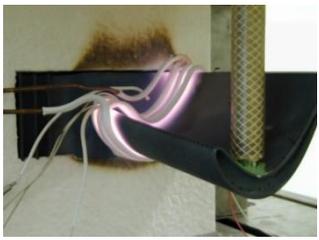
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



Gliederung

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

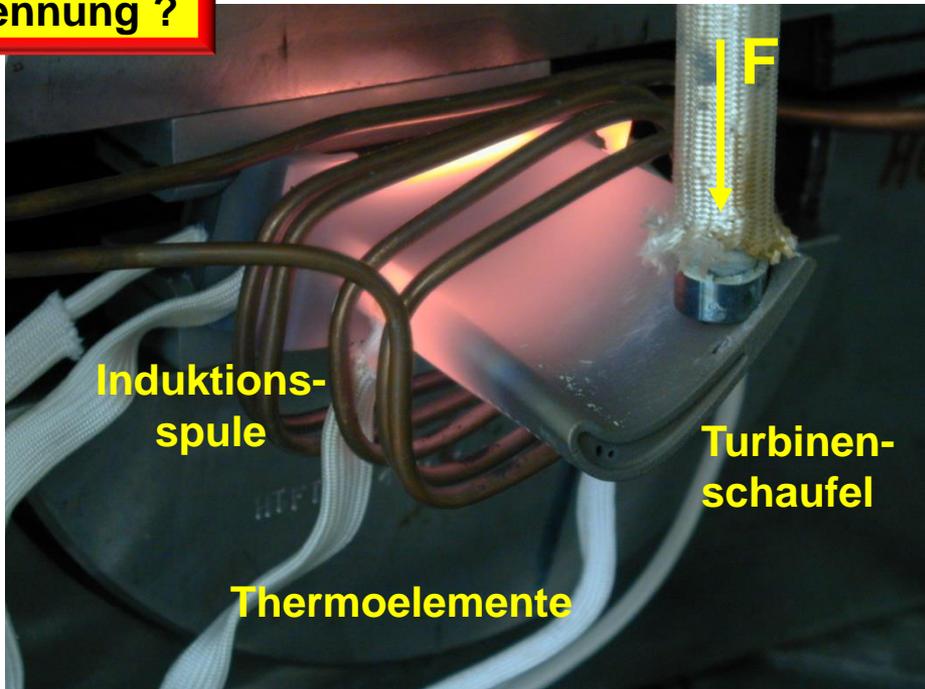
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



Biegeschwell

Gasturbinenschaufel
bei 900 °C bis 1000 °C
Biegebeanspruchung

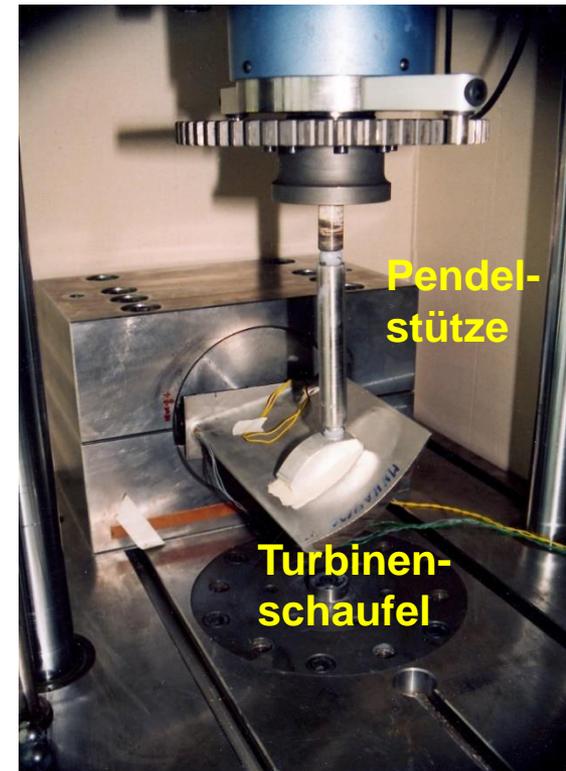
Optische
Anriss-
erkennung ?



heiss

Bauteilprüfung

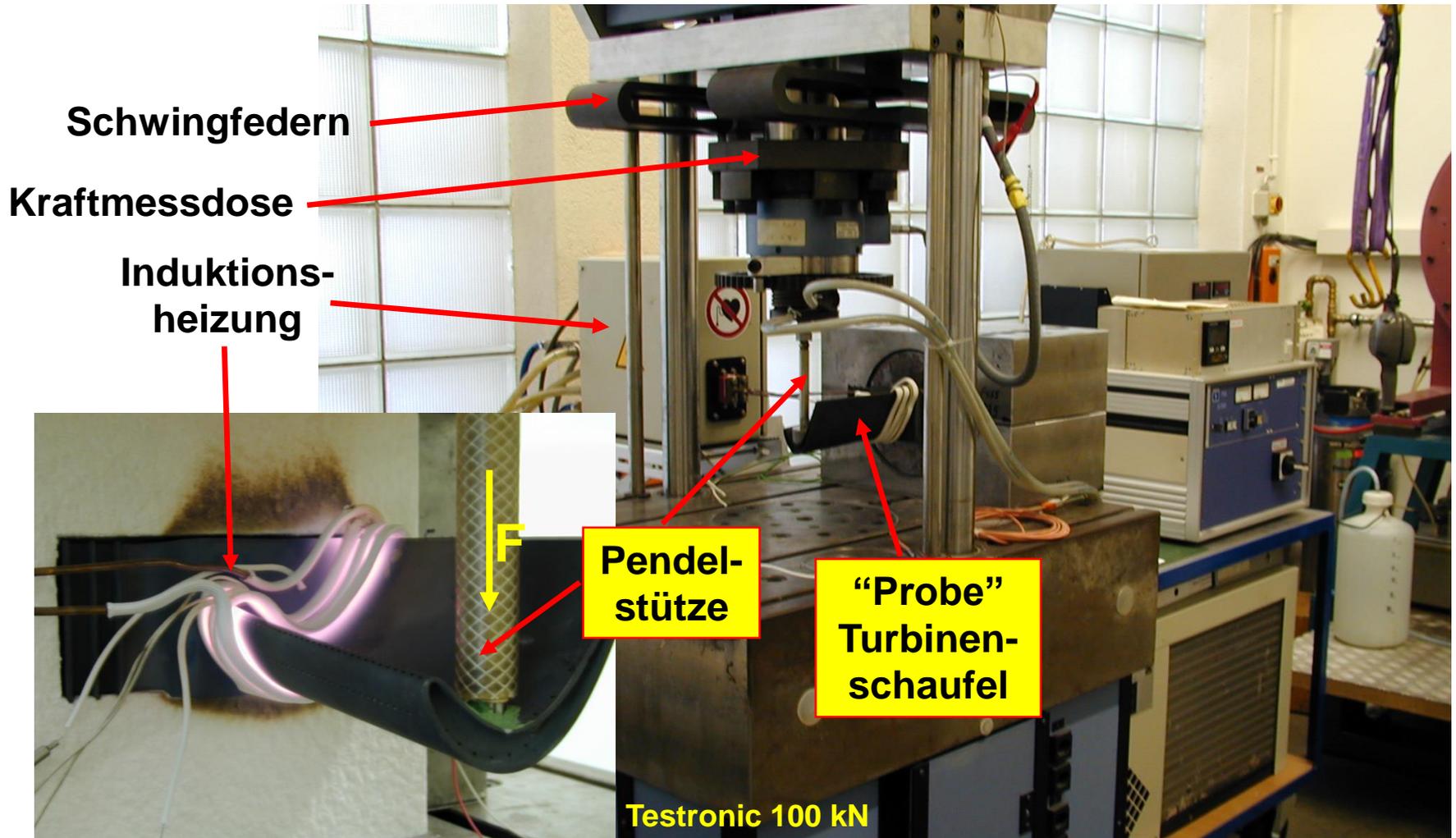
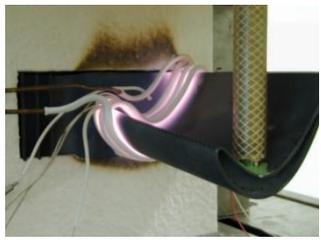
Verdichterschaufel mit
Dehnungsmessstreifen
auf Biegung



kalt

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

Biegeschwell



Schwingfedern

Kraftmessdose

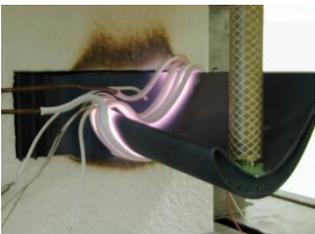
Induktions-
heizung

Pendel-
stütze

“Probe”
Turbinen-
schaufel

Testronic 100 kN

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser

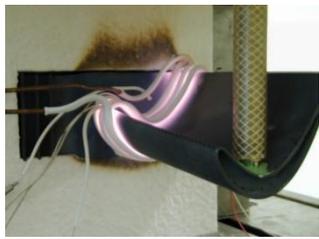


Biegeschwell

lastkontrollierte
Bauteilprüfung
Turbinenschaufel bei 800 °C / F



LCF- HCF-Prüfung
mit Induktionsheizung



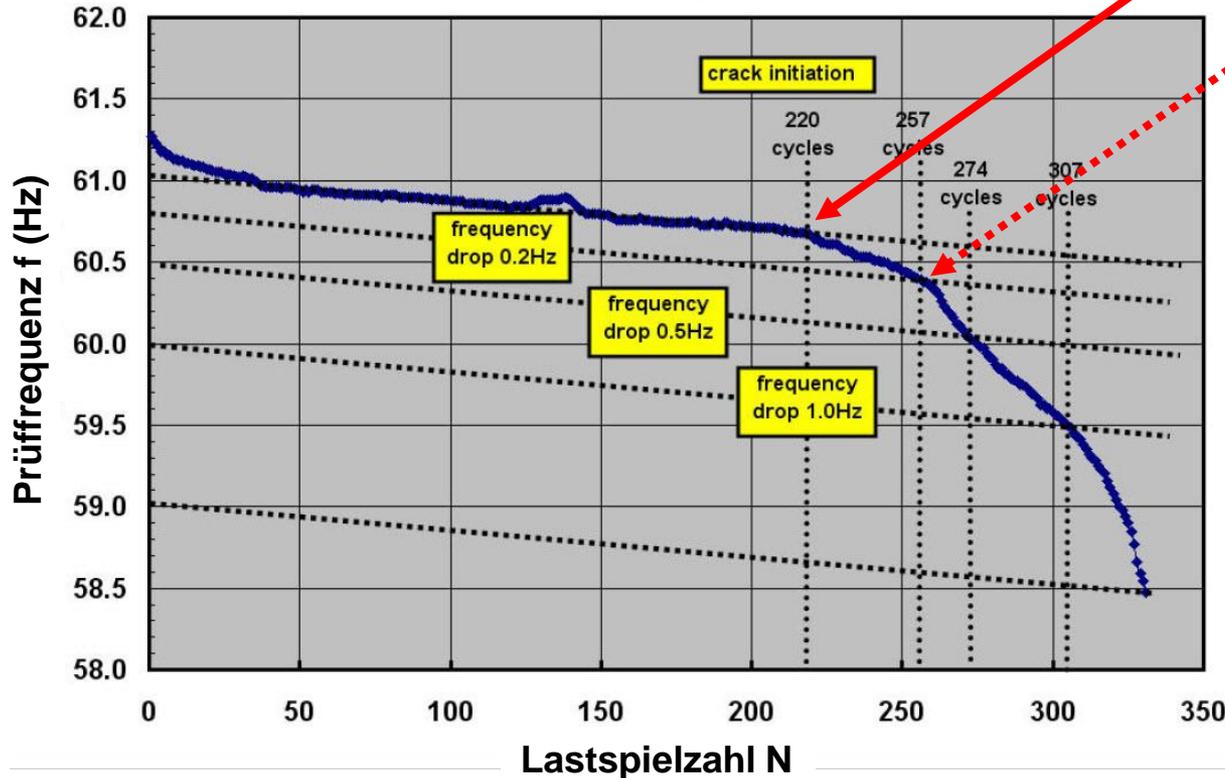
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



Biegeschwell

lastkontrollierte LCF-Biegebelastung mit Haltezeit bei 800 °C

Turbinenschaufel, Biegeschwellbelastung, 10 Minuten Haltezeit, 800 °C

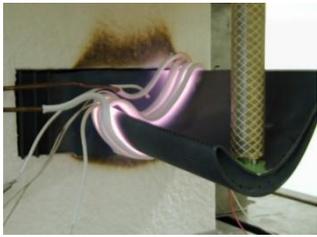


Rissinitiierung

Anrisslängendefinition
(Frequenzabfall 0.2 Hz)

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

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

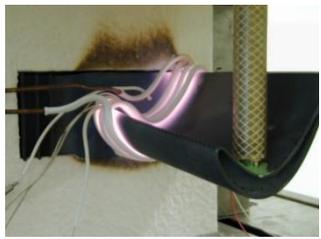


Biegeschwell

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

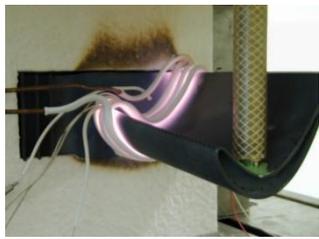


Gliederung

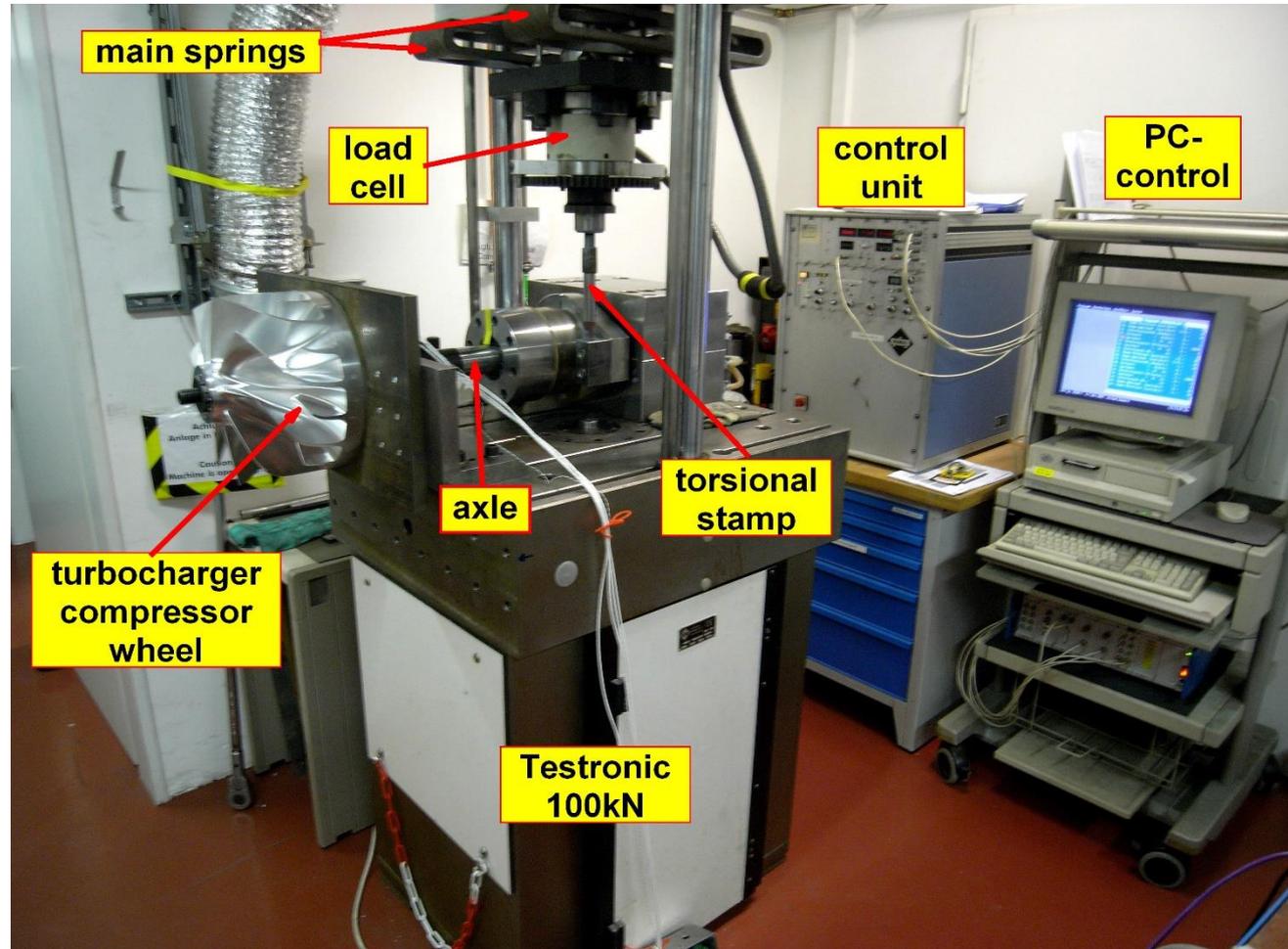
1. Prüfsysteme
2. Beispiele mit Fazit
 - Zug (Bruchmechanikproben)
 - Biegung (Turbinenschaufel)
 - Torsion (Turboladerwelle)
 - Verschleiss (Dichtstreifen)
3. Zusammenfassung
Was ist wichtig?

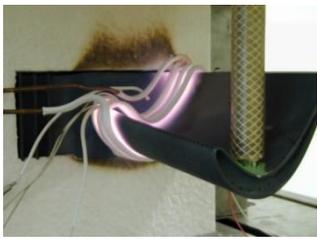
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

Torsionsschwell



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





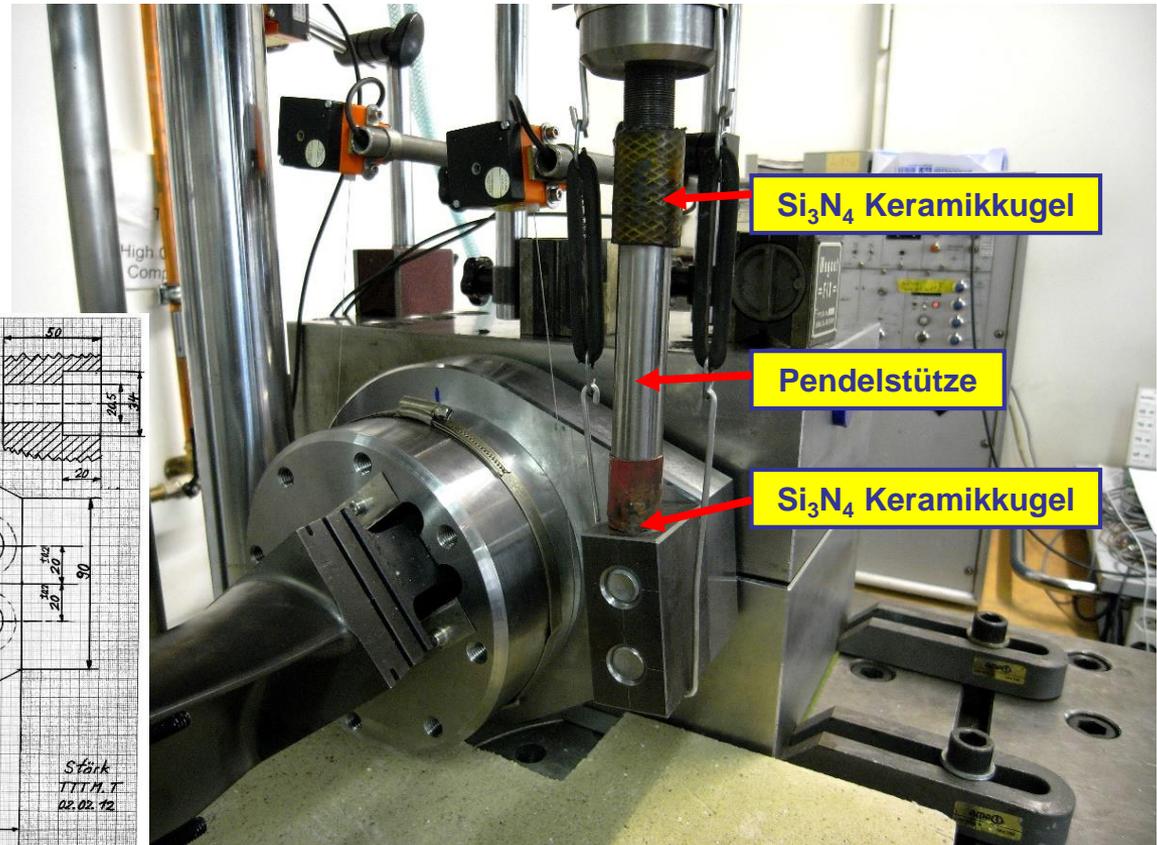
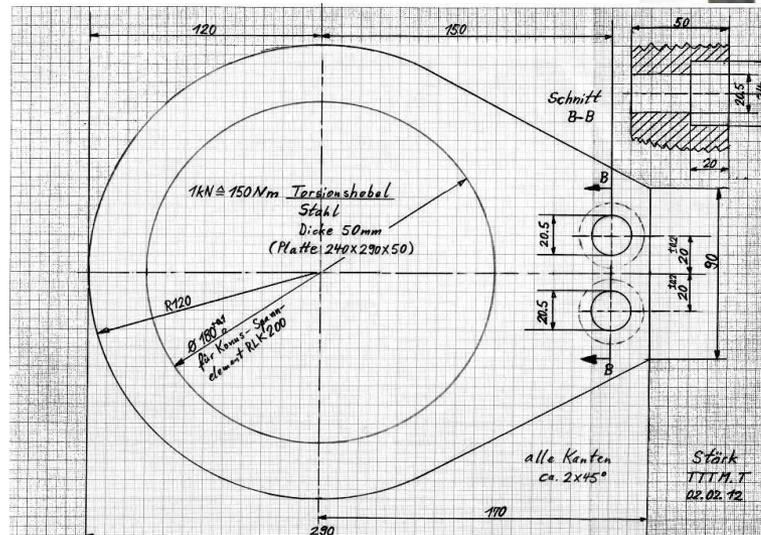
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

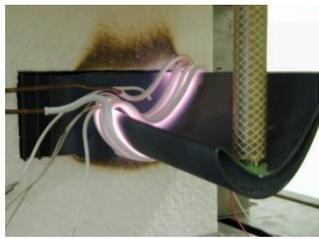


Torsionsschwell

Torsionsvorrichtung bis 6.000 Nm
auf 100 kN Testronic

Torsionshebel
(Hebelarm 150 mm mit
Pendelkugellager)





Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser

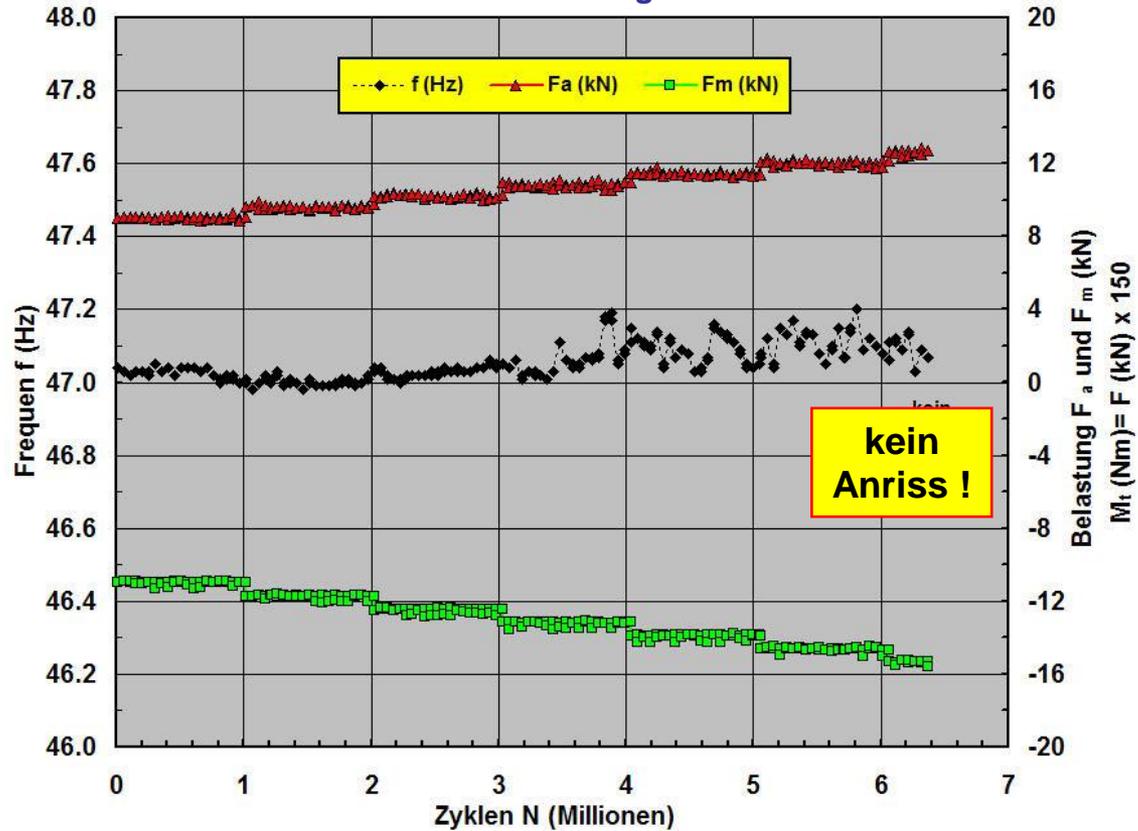


Torsionsschwell

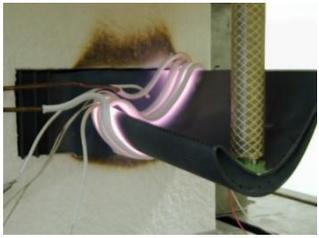
Laststeigerungs-
Versuch (LSV)

Schiffs-
turboladerwelle
bis 6.000 Nm
mit ca. 47 Hz

LSV Wellenverbindung bei 140 °C



Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

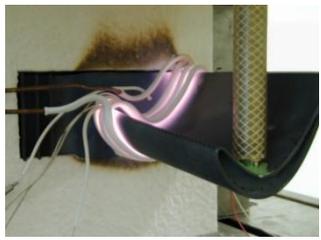


Torsionschwell

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

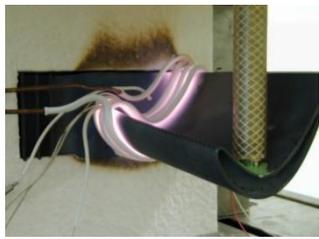


Gliederung

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

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

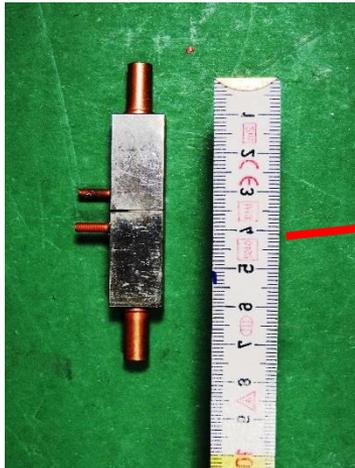
Reibverschleiss



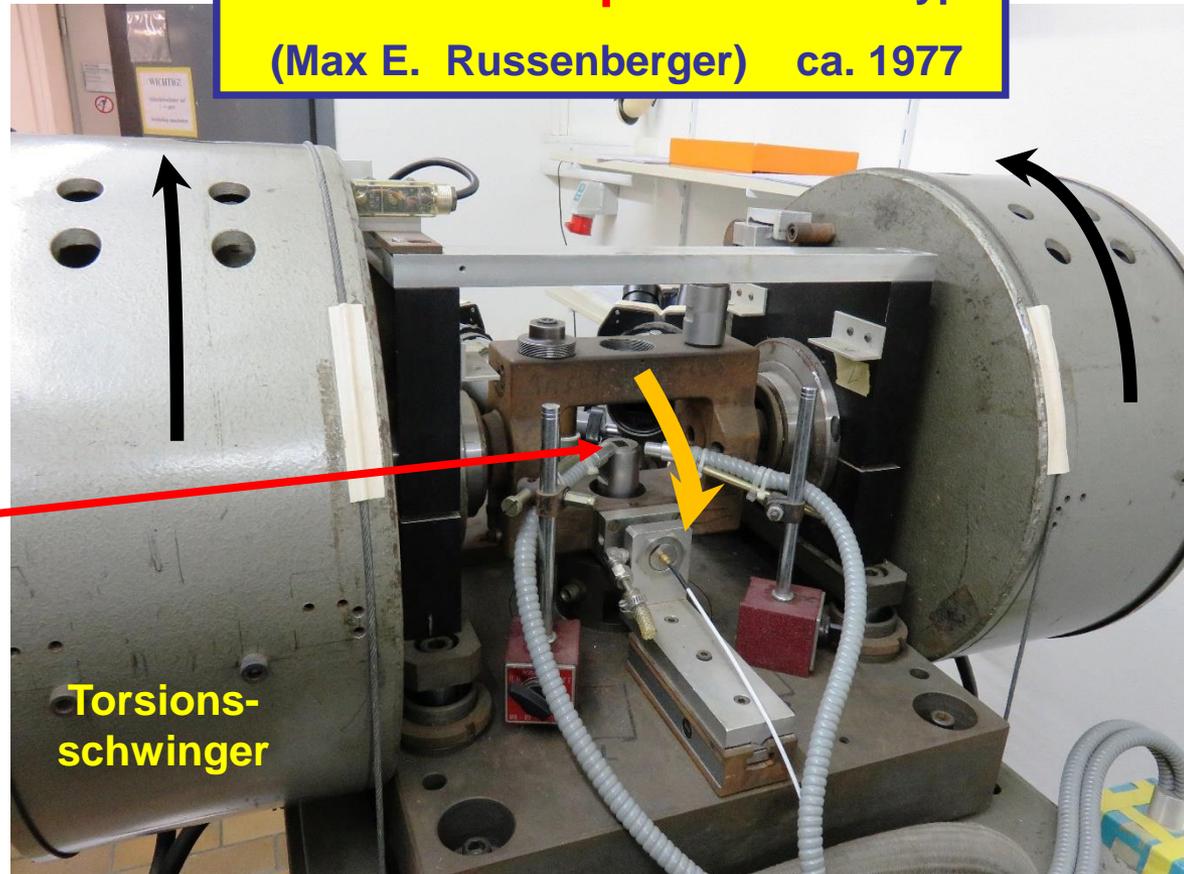
Turbinenschaufelsimulation

- 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



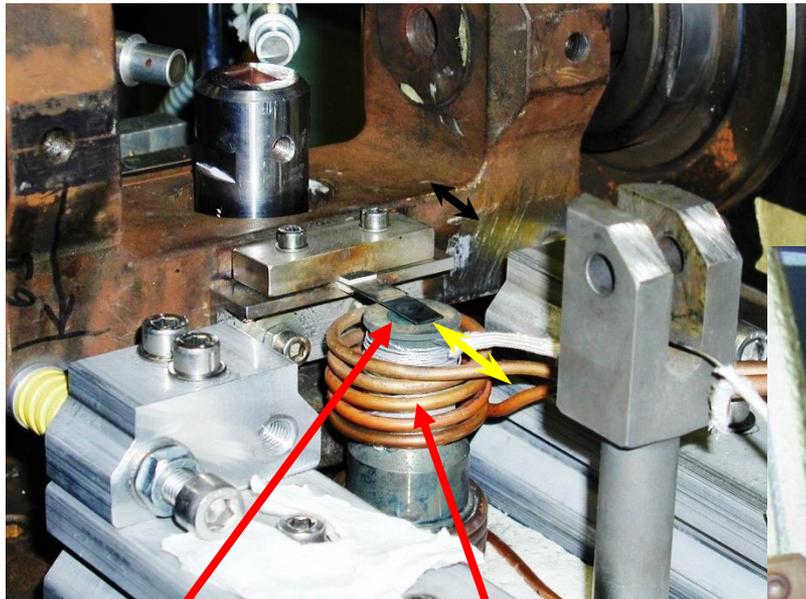
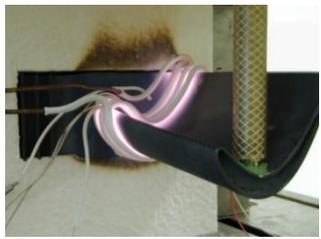
SENB-Kleinprobe



Torsionschwinger

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler

Reibverschleiss

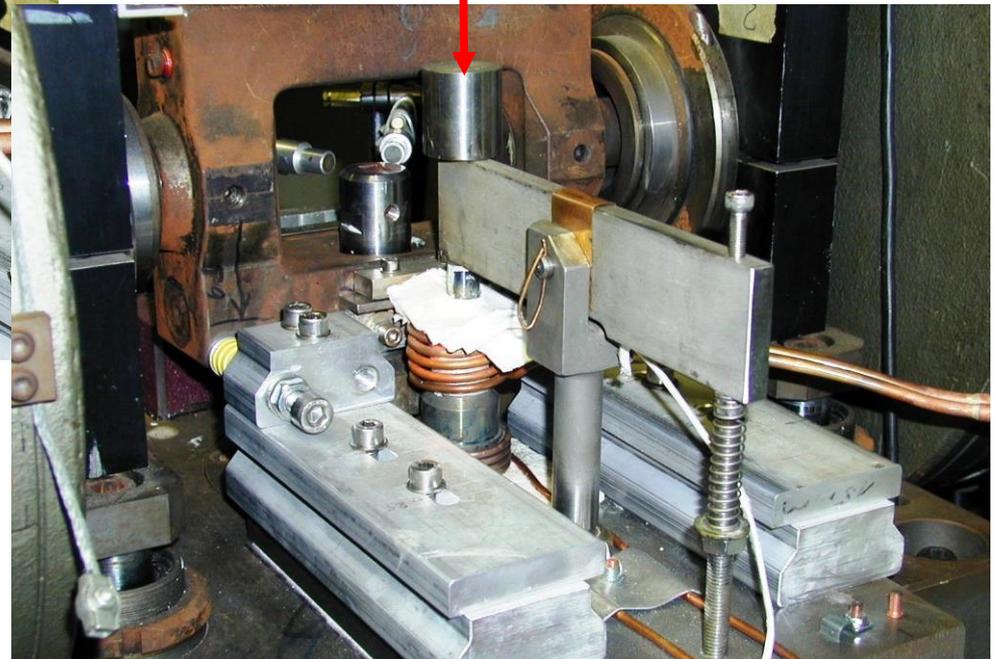


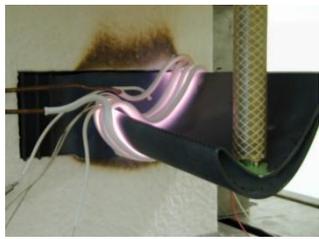
Prüfkörper
(Dichtstreifen)

Induktions-
heizung

HT-Pulsler
(robuster Torsionsschwinger)

Gewichts-
belastung





Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



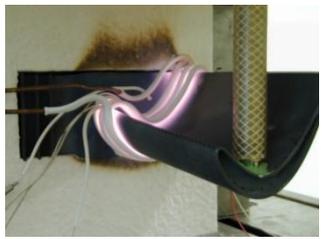
Reibverschleiss

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

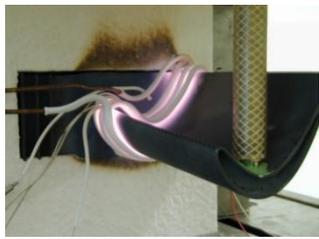
→ so systemnah wie möglich !

Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulsler



Gliederung

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

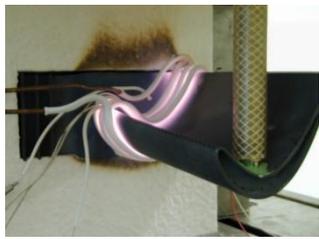


Bauteilprüfung mit dem Resonanzpuls



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



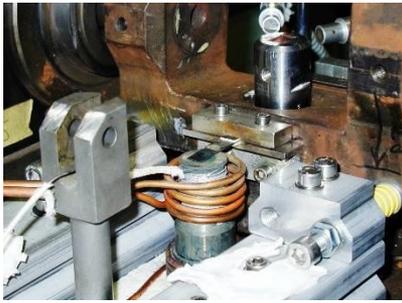
Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



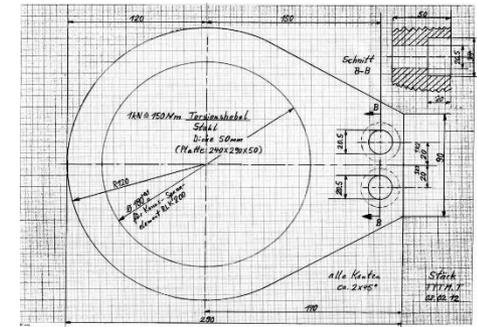
Schlussfolgerung

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

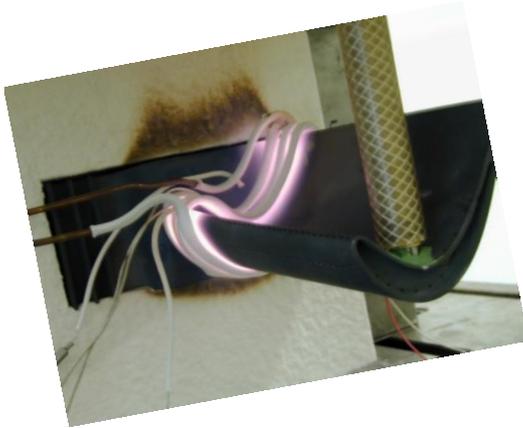
→ also nutzen Sie es !



Bauteilprüfung mit dem Resonanzpulser



Vielen Dank für Ihr Interesse !



Nun sind Sie dran !!



Wünsche Ihnen einen
schönen R(h)einflall 😊

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

klaus.staerk@swissonline.ch
www.staerk-erdwaerme.ch