

Widerstandsmessung



Programm
zur *digitalen* Frühjahrssitzung der DGM / DVM - AG Materialermüdung
am 13. Mai 2022, 10:15 bis 14:15 Uhr

10:15 – 10:30

U. Krupp (RWTH Aachen), G. Biallas (HAW Hamburg)

Begrüßung

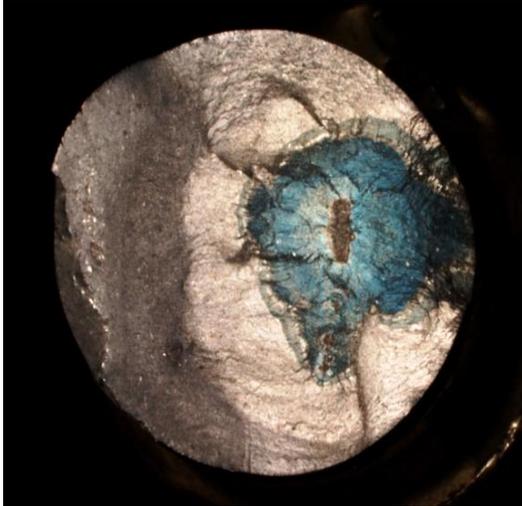
10:30 – 11:00

„Duplex-Potentialsonde, Ermüdungsanrissbildung und Risswachstum“

Klaus Stärk / Staerk Erdwärme/ Untersiggentahl (Schweiz)

Bei Ermüdungsproblemen und Untersuchungen ist die Kenntnis der Anrissentstehung und des Risswachstums von Wichtigkeit.

Für beides wurde eine elektrische Methode entwickelt, die sog. Duplex-Potentialsonde als Kombination einer Widerstandsmessung mit Gleichstrom und einer Umpolung, also etwa eine Art DC/AC-Messung mit einer guten Auflösung von etwa 1/100stel mm. Es wird über die Messtechnik und Anwendungen in der Ermüdungsprüfung von Proben und Bauteilen berichtet. Der Temperaturbereich reicht von -50 °C bis +1000 °C. Stromquelle, Messwerterfassung und Auswertung sind rechnergesteuert unter LabView.



Widerstandsmessung



Duplex-Potentialsonde

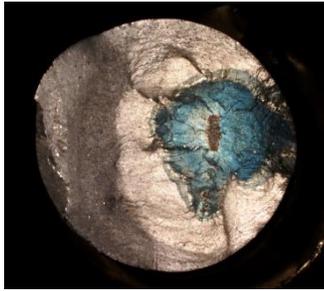
Anriss und Risswachstum

AK Materialermüdung 13. April 2022

Prof. Biallas, Prof. Krupp

Dr.-Ing. Klaus F. Stärk

Untersiggenthal/Schweiz



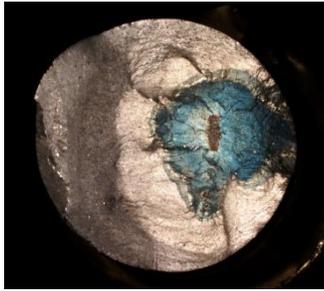
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

1. Messtechnik



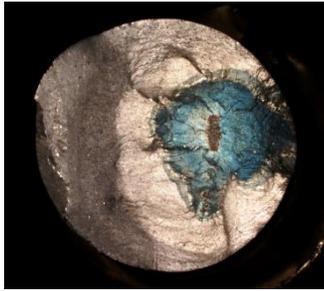
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

1. Messtechnik
2. Risswachstum
 - zyklisch (Ermüdung)
 - zyklisch (Korrosionsermüdung)



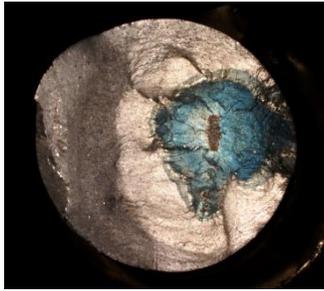
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

1. Messtechnik
2. Risswachstum
 - zyklisch (Ermüdung)
 - zyklisch (Korrosionsermüdung)
3. Anrissbildung
 - glatt (thermal fatigue)
 - glatt (thermal gradient fatigue)
 - gekerbt
 - an Fehlstellen



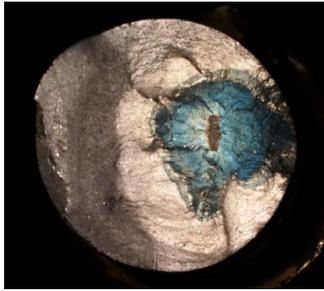
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

1. Messtechnik
2. Risswachstum
 - zyklisch (Ermüdung)
 - zyklisch (Korrosionsermüdung)
3. Anrissbildung
 - glatt (thermal fatigue)
 - glatt (thermal gradient fatigue)
 - gekerbt
 - an Fehlstellen
4. «Zusammenfassung»



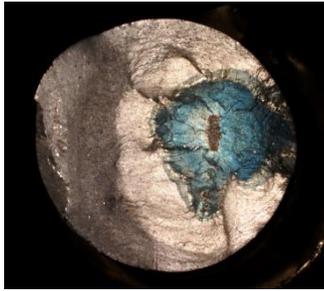
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

1. Messtechnik



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



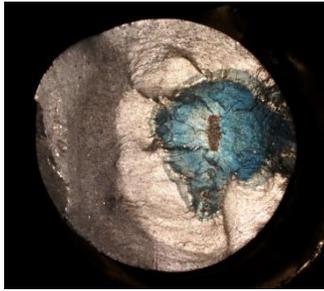
Zielsetzung

- Ermüdungsrisswachstumsmessung
 - Bei -50 °C bis +1000 °C
 - Auflösung **Ziel** ± 0.01 mm
- Widerstands- und Temperaturmessung

= Duplex-Potentialsonden-Entwicklung

1990: Einkanal DUPLEX (Quick-Basic)

2005: Vierkanal Adv. DUPLEX (LabView)



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum

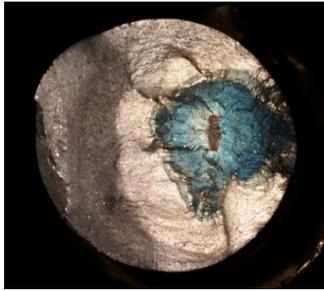


Zielsetzung

Duplex-Potentialsonde

Vorverstärker + AD-Wandler + Umpolung

2000-fach x **16 Bit** x **2** ≈ **28 Bit**



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Zielsetzung

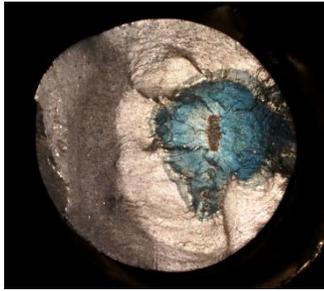
Duplex-Potentialsonde

Vorverstärker + AD-Wandler + Umpolung

2000-fach x **16 Bit** x **2** ≈ 28 Bit

Messwertanalyse (LabView):

- Ca. 1000 Messungen in jeder Stromrichtung
- Strommessung und Korrektur mit shunt
- Temperaturmessung und Korr. mit TE Typ K
- Statistik (Streuung, Ausreisser eliminieren)



Duplex-Potentialsonde

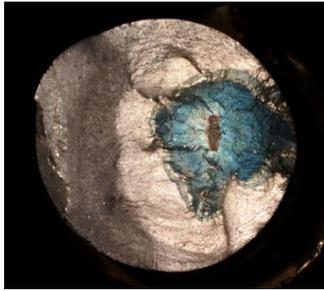
Anriss und Risswachstum



DUPLEX Potentialsonde mit Stromumkehr (DC/AC)

→ Widerstandsmessung

- $R = f$ (Risslänge) → Ziel
- $R = f$ (Probengeometrie) → kalibrieren
- $R = f$ (Material) → $R/R_0 = f(a/W)$
- $R = f$ (Temperatur) → $R/R_0 = f(T)$
- $R = f$ (Spannungsverteilung) → eliminieren
- $R = f$ (Rissflächenkontakte) → bewerten



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum

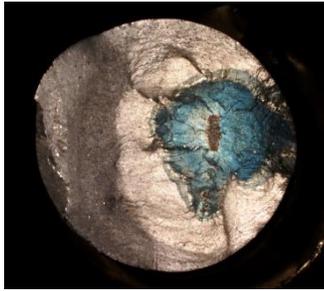


DUPLEX Potentialsonde mit
Stromumkehr (DC/AC)

→ **Widerstandsmessung**

- $R = f(\text{Risslänge})$ → Ziel
- $R = f(\text{Probengeometrie})$ → kalibrieren
- $R = f(\text{Material})$ → $R/R_0 = f(a/W)$
- $R = f(\text{Temperatur})$ → $R/R_0 = f(T)$
- $R = f(\text{Spannungsverteilung})$ → eliminieren
- $R = f(\text{Rissflächenkontakte})$ → bewerten

Mit elektrisch isolierten Einspannungen der (bzw. aller)
Belastungseinrichtungen !!



Duplex-Potentialsonde

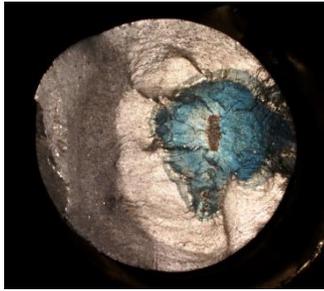
Anriss und Risswachstum



DUPLEX Potentialsonde mit
Stromumkehr (DC/AC)

→ **Widerstandsmessung**

- → Umpolung= gleicher Strom in beiden Richtungen
- → Umpolung= gleicher magnetisch/elektrischer Zustand
- → Umpolung= gleicher thermischer Zustand
- → Umpolung= halbe Strombelastung Probe und Leitungen
- → Präzisionswiderstand (shunt) zur Strommessung
- → Kontaktierung z.B. mit Bolzenschweissungen M3 bzw. M5

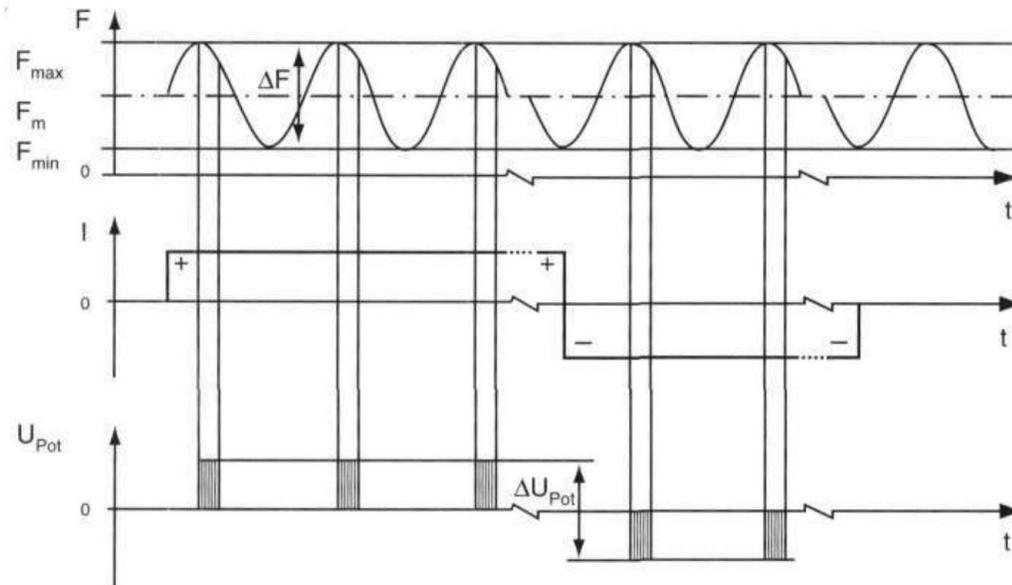


Duplex-Potentialsonde

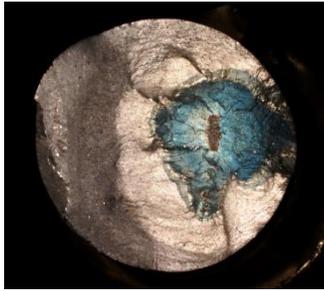
Anriss und Risswachstum



Duplex-Potentialsonde
DC/AC-Sonde



- Gleichstrom DC (1÷15 A)
- Umpolung "AC"
- Triggern= f (Kraftsignal)
(bei max. Rissöffnung)
- Messungen (100÷2000)
(auf Resonanzpulser 1x/Zyklus)



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



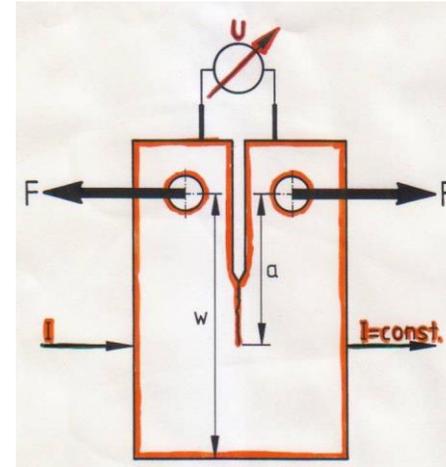
A/D-Wandler
D/A-Wandler
Relais

Modulares
Interface-
System
(MIS)

ABB-Spezial-
Vorverstärker
(2000x)



Konstant-
stromquelle
(Kepco)



DUPLEX 1-Kanal 1990

DMS-Clip CT1-Probe

mit shunt
(Messwiderstand)

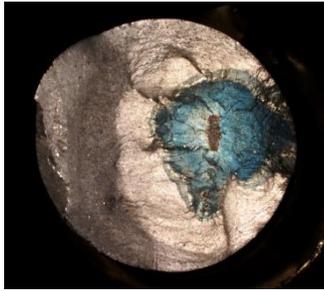
mit LabView
heute digital
steuerbar



Bild 4: Die bipolare Stromquelle BOP 20-20M von Kepco

DCB-Probe
(double cantilever beam)

- ➔ Ermüdungsrisswachstum
- ➔ Spannungsrisskorrosion

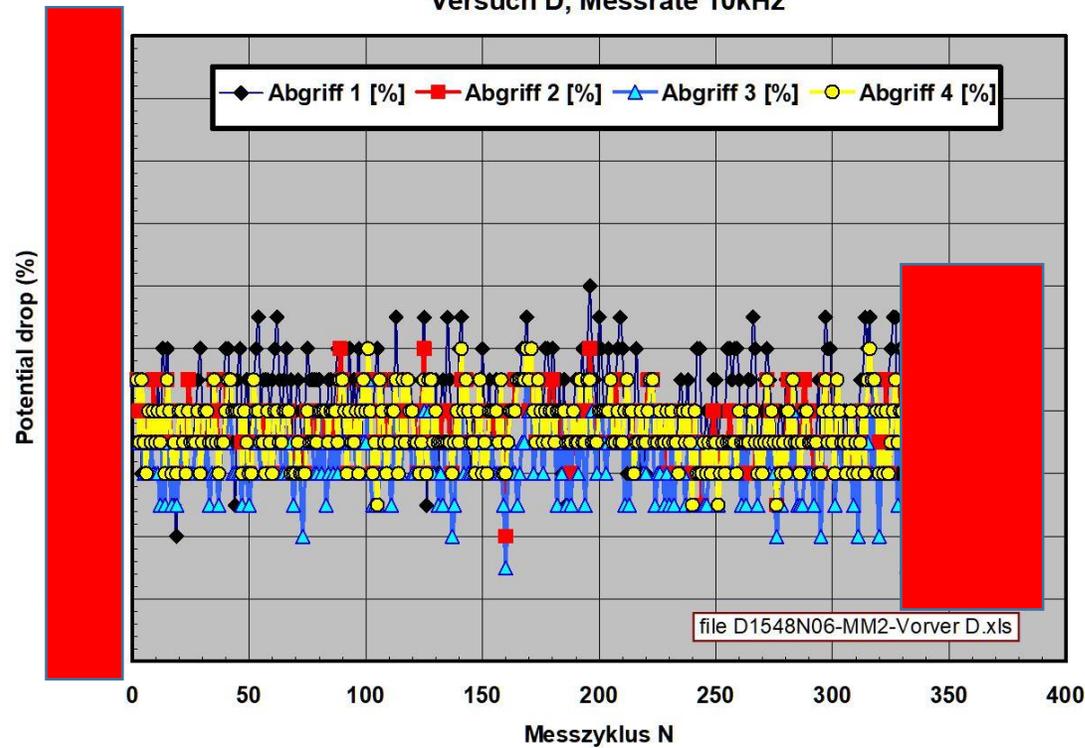


Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Potentialstreuung Adv. Pot. Drop
4-fach Messverstärker Nr. 5, Probe MM2
Versuch D, Messrate 10kHz

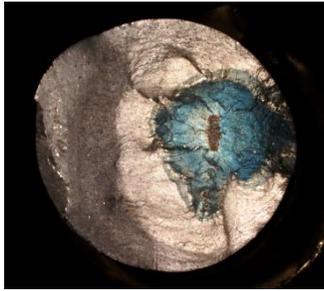


Streuungs-messung mit Advanced Potentialsonde an Probe MM2

Streuung ?

- 4 Kanal DUPLEX
- Achsen !

Advanced DUPLEX 2005
4-Kanal und LabView

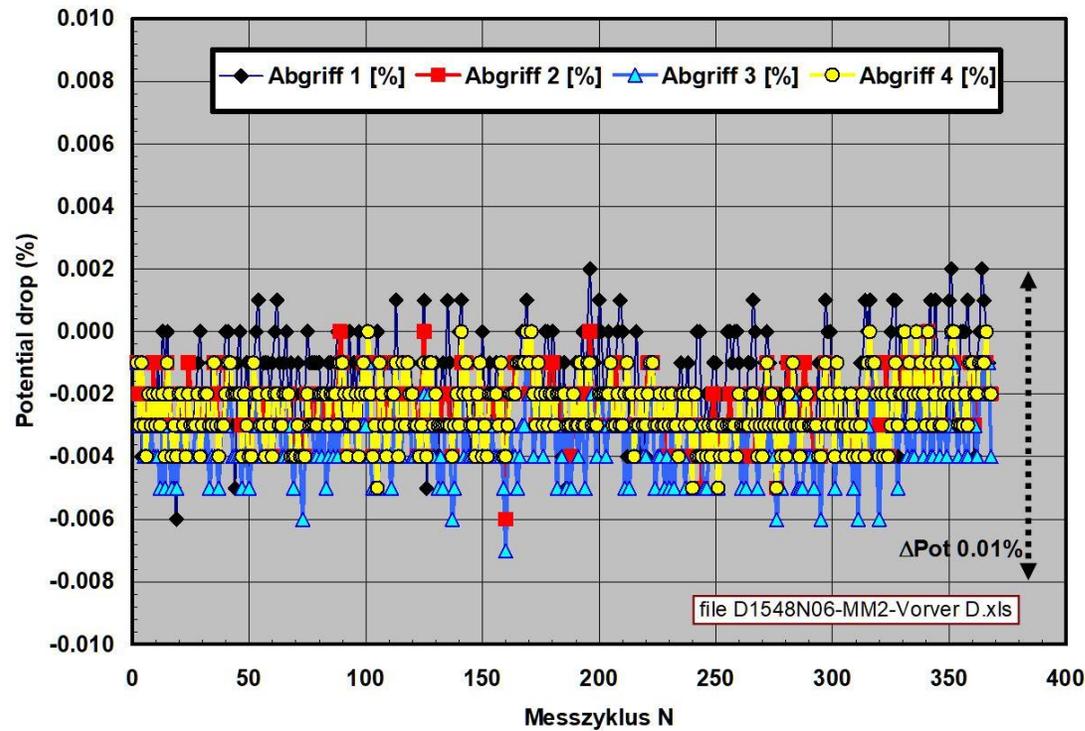


Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Potentialstreuung Adv. Pot. Drop
4-fach Messverstärker Nr. 5, Probe MM2
Versuch D, Messrate 10kHz



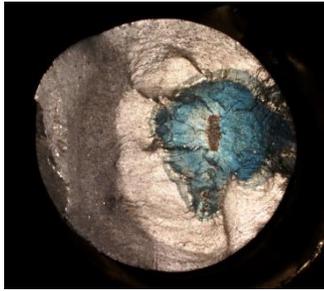
Streuungs-messung mit Advanced Potentialsonde an Probe MM2

Streuung !

- 4 Kanal DUPLEX

- Achsen !

Advanced DUPLEX 2005
4-Kanal und mit LabView



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum

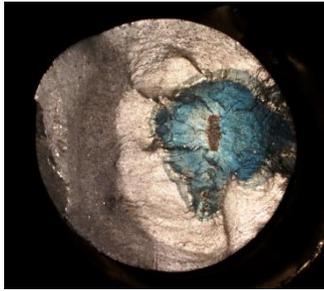


Gliederung

1. Messtechnik

2. Risswachstum (Anwendungen)

- zyklisch (Ermüdung)
- zyklisch (Korrosionsermüdung)



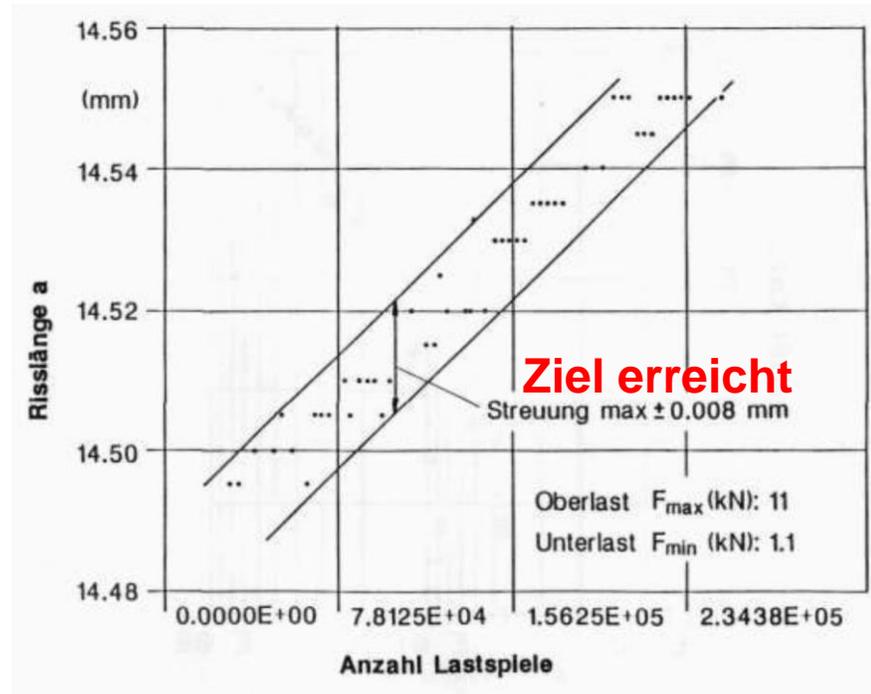
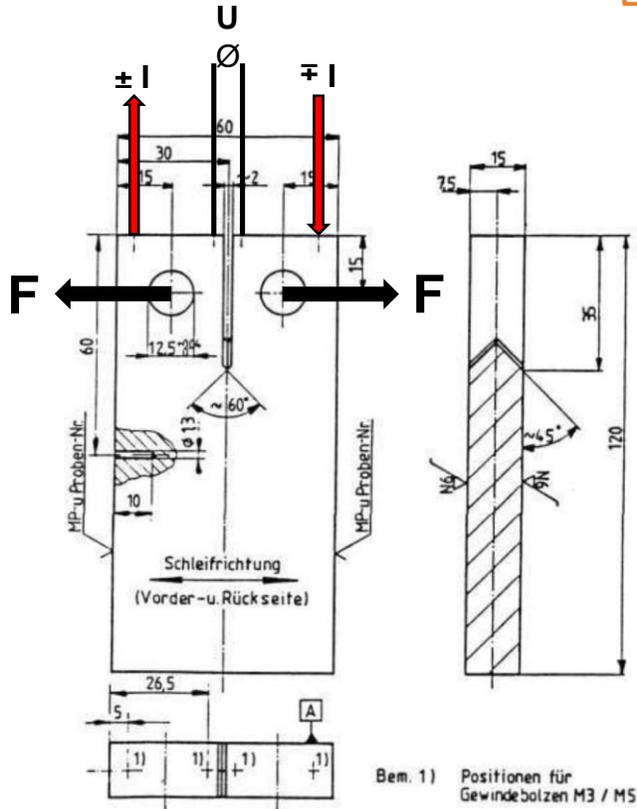
Duplex-Potentialsonde

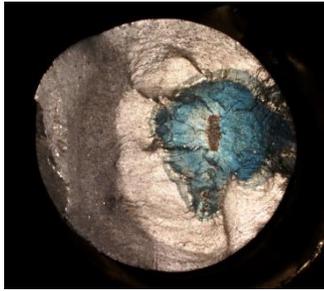
Anriss und Risswachstum



DCB-Probe
(double cantilever beam)

Ermüdungsrisswachstum
-40°C bis 900°C





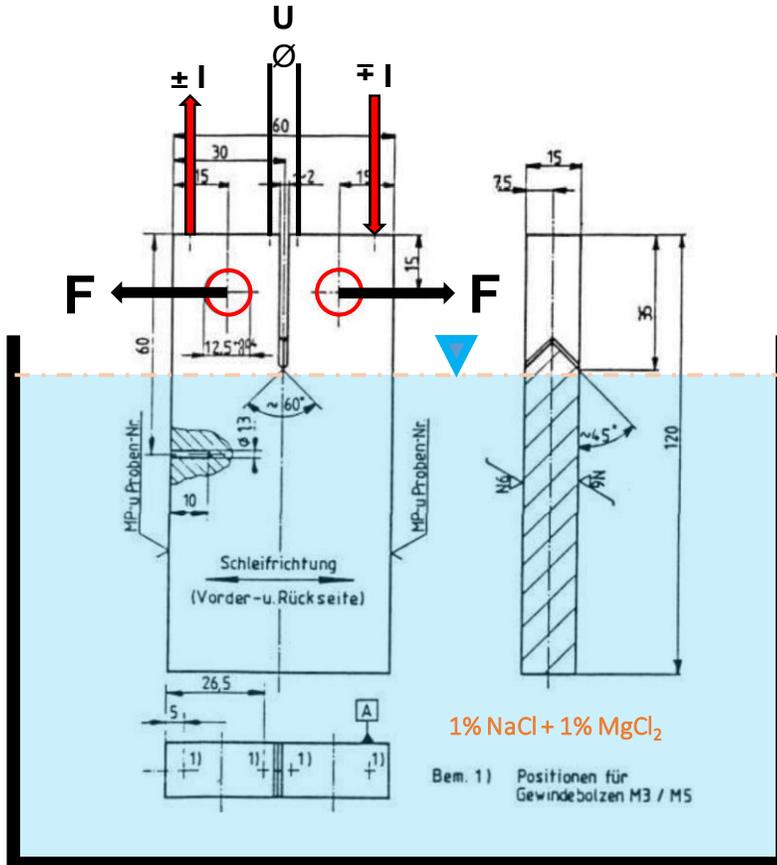
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



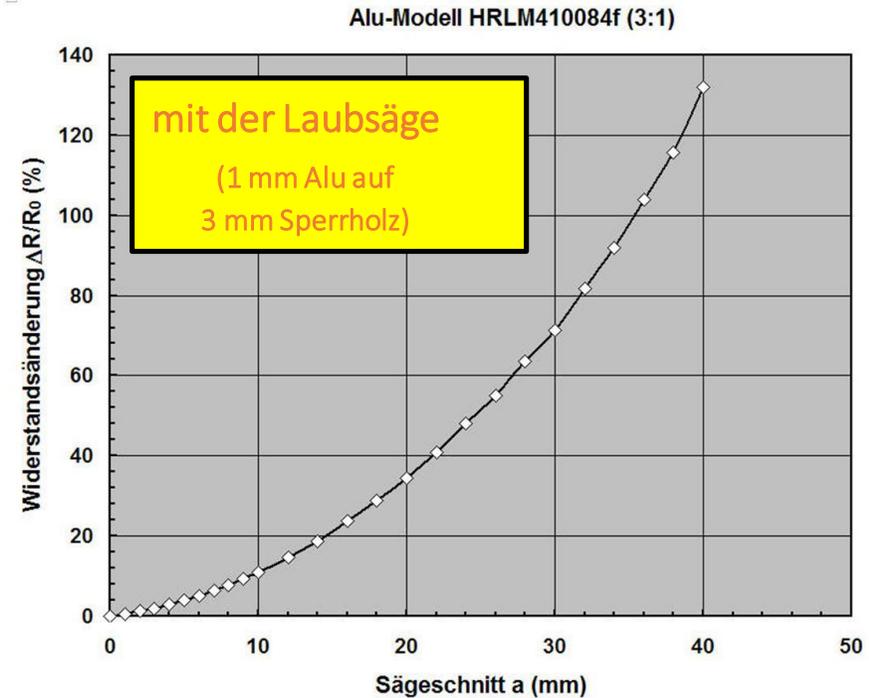
DCB-Probe
(double cantilever beam)

Korrosionsermüdung

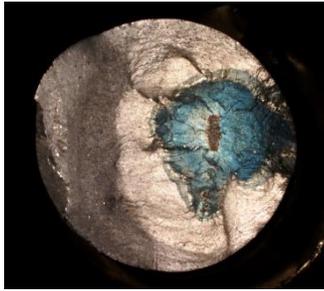


Ermüdungsrisswachstum

Probenkalibrierung $\Delta R/R_0 = f(a)$



: Change of specimen resistance over saw cut length (scale 3:1)

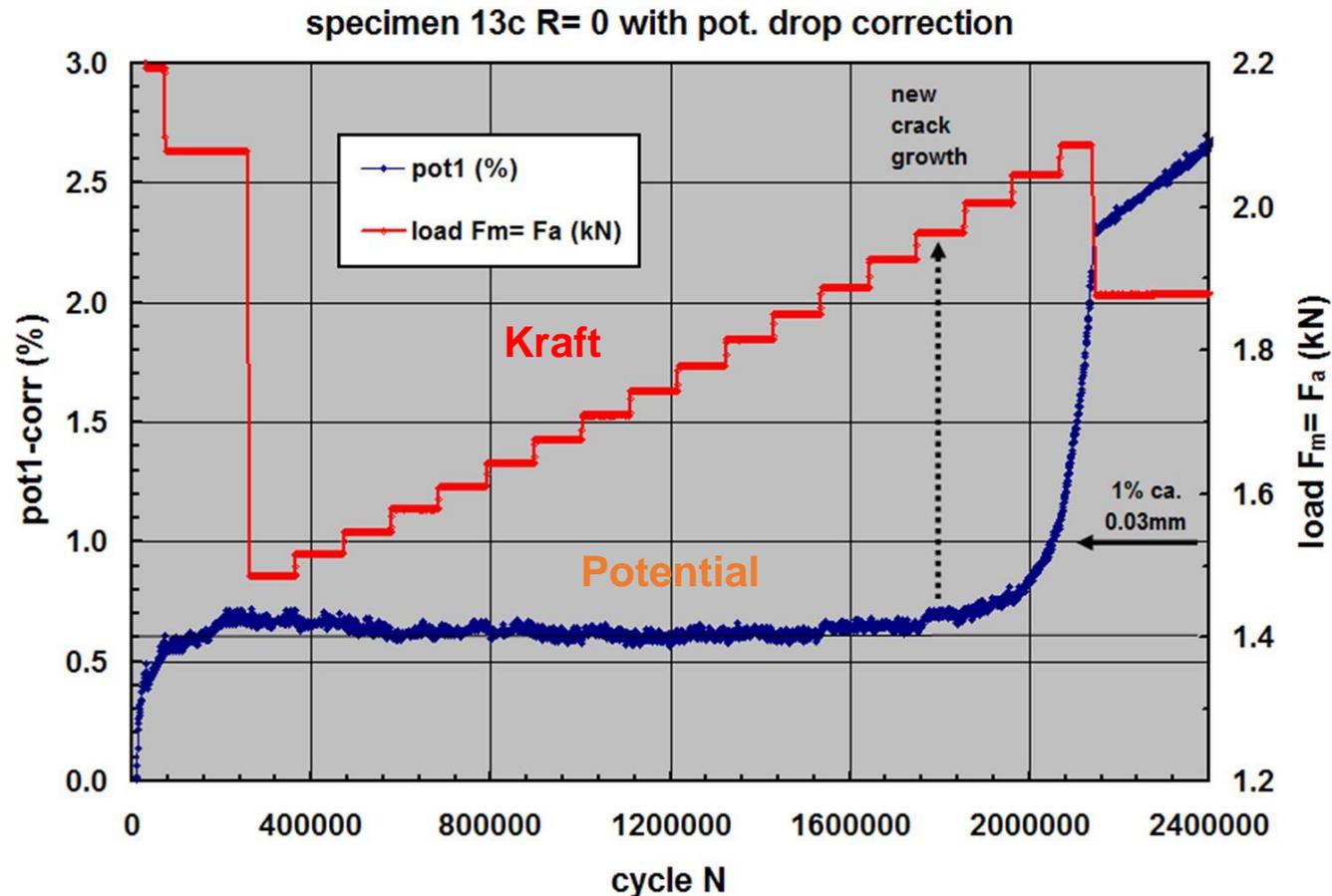


Duplex-Potentialsonde

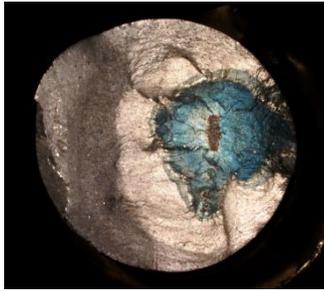
Anriss und Risswachstum



Ermüdungsprüfung auf Resonanzpulser



Laststeigerungs-
verfahren
(LSV= LIT)
an einer Probe mit
Anriss und hoher
Vorbe-lastung (R= 0)



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

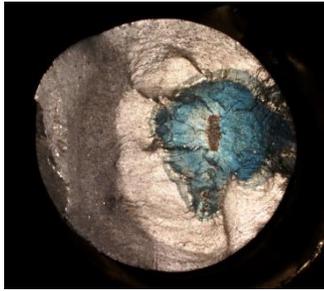
1. Messtechnik

2. Risswachstum

- zyklisch (Ermüdung)
- zyklisch (Korrosionsermüdung)

3. Anrissbildung (Anwendungen)

- glatt (thermal fatigue)
- glatt (thermal gradient fatigue)
- gekerbt
- an Fehlstellen



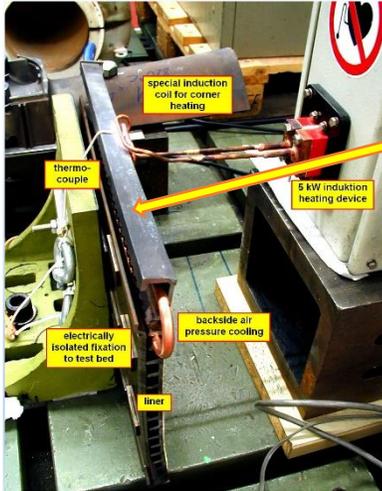
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum

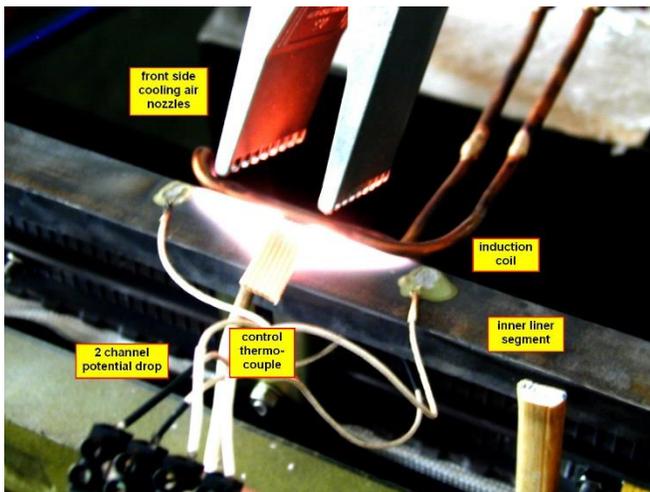


Anrissbildung thermal fatigue TF

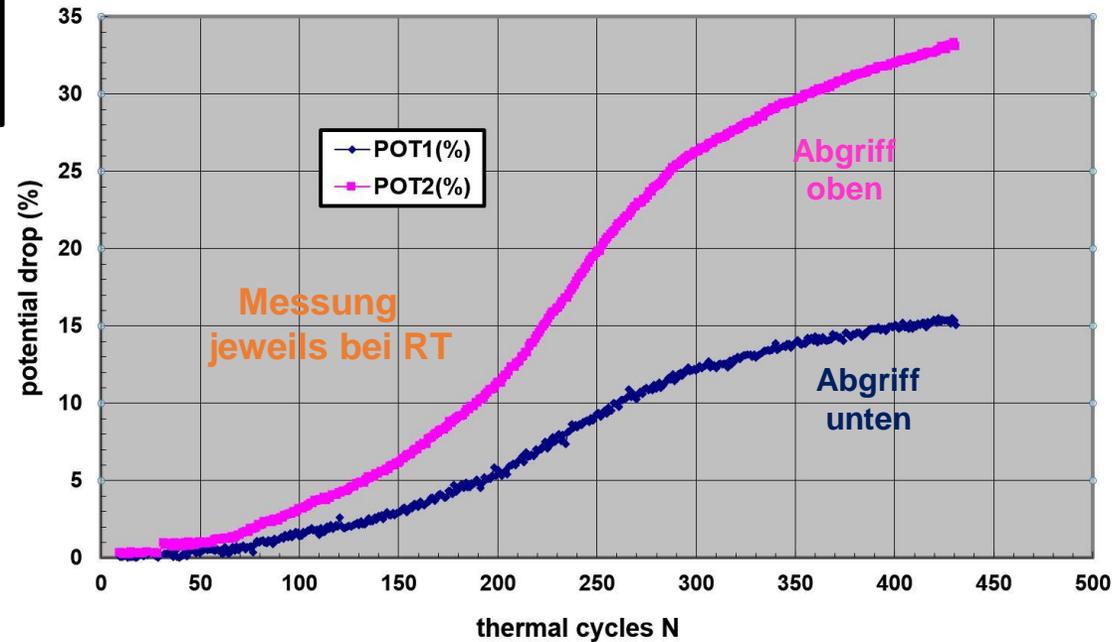
Hitzeschutzschild GT-Liner (Nickel-Basis-Guss)
 RT ÷ 900 °C, Induktionsheizung + Pressluftkühlung

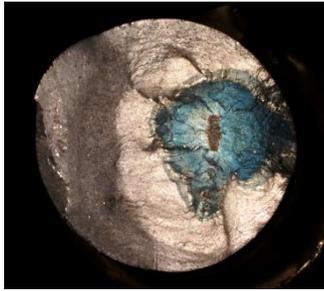


Vergleich:
 - neu
 - aus Betrieb
 - reparatur-geschweisst



pretest TF liner with induction heating and forced air cooling
 potential drop measurements at side strip





Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum

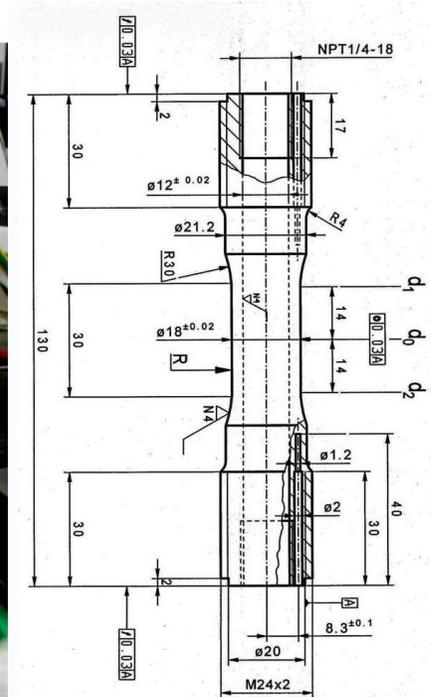
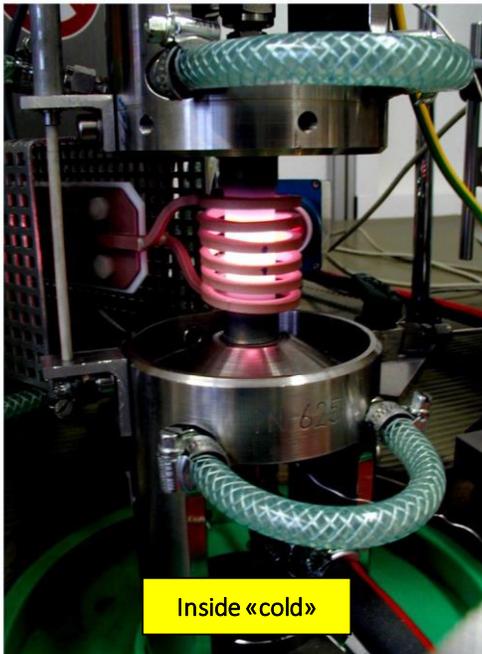


Anrissbildung thermal gradient fatigue TGF

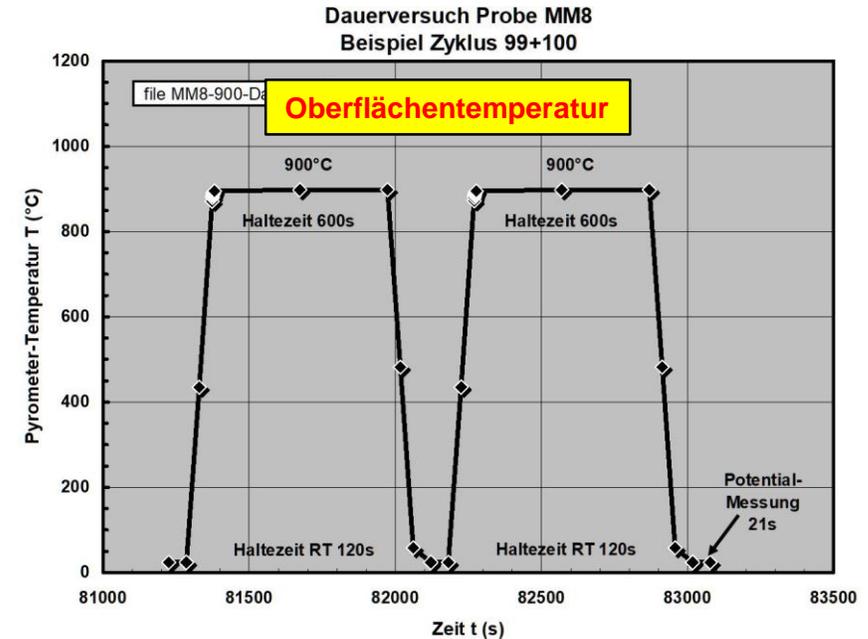
HF-Induktionsheizung
+
Wasserkühlung

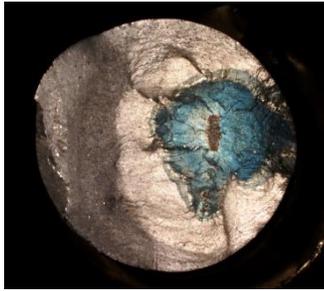
➔ Radialer Gradient

Hohlprobe (Nickel-Basis-Guss)
mit innerer Deionat-Kühlung
Temperaturgradient ca. 200 K/mm
(3-Jahres-Entwicklungsprojekt)



RT - 900 °C, HZ 10 min





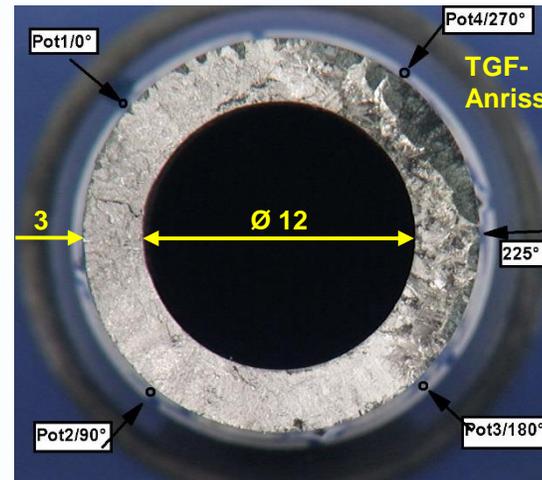
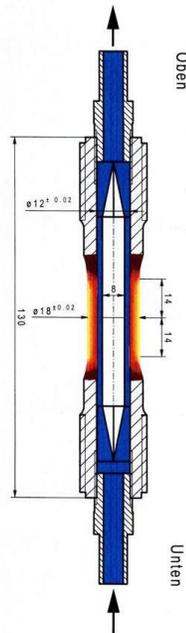
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



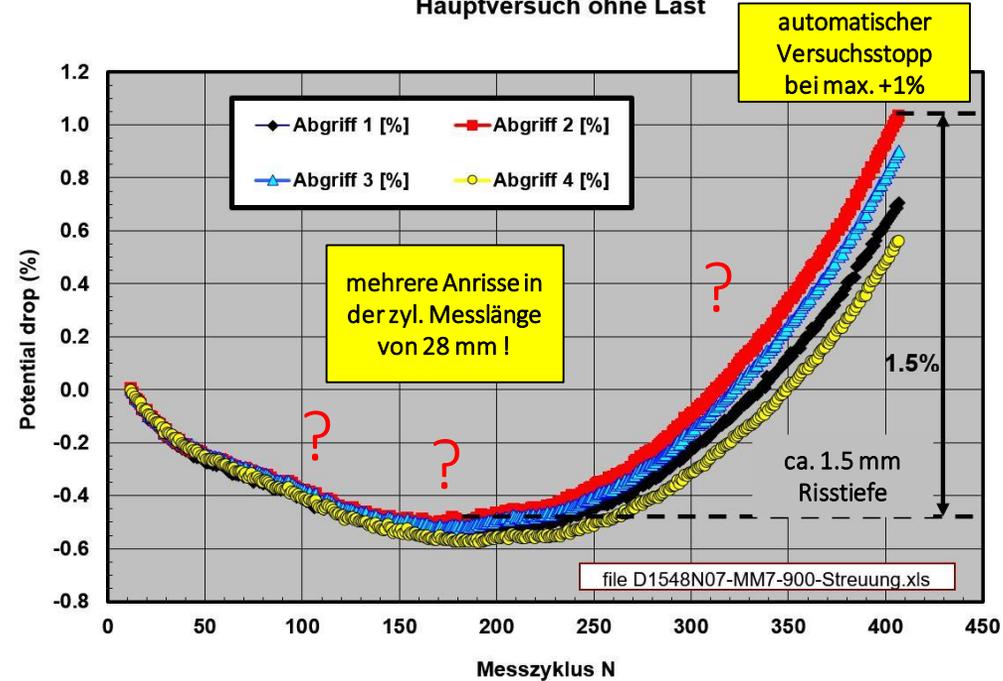
Anrissbildung thermal gradient fatigue TGF

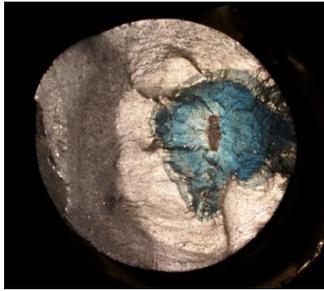
Hohlprobe mit Insert «Torpedo»
 Deionat-Strömung mit 17 l/min
 4 Potentialsondenabgriffe a.d.U.
 Messungen bei RT !!
 Kein Durchriss erlaubt !!



Inside "cold"
 Kein Durchriss !!

Potentialstreuung Adv. Pot. Drop
 4-fach Messverstärker Nr. 1, Probe MM7
 Hauptversuch ohne Last





Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



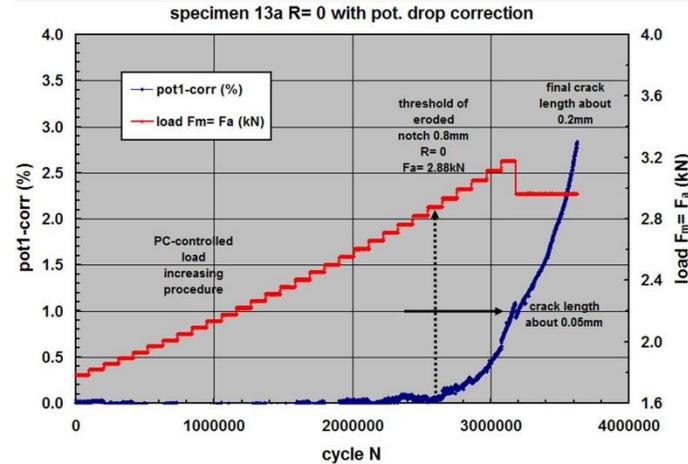
Anrissbildung an Kerben

LCF-Prüfung mit
Doppelkerbprobe und
Kerbradien 0.5 bis 4 mm

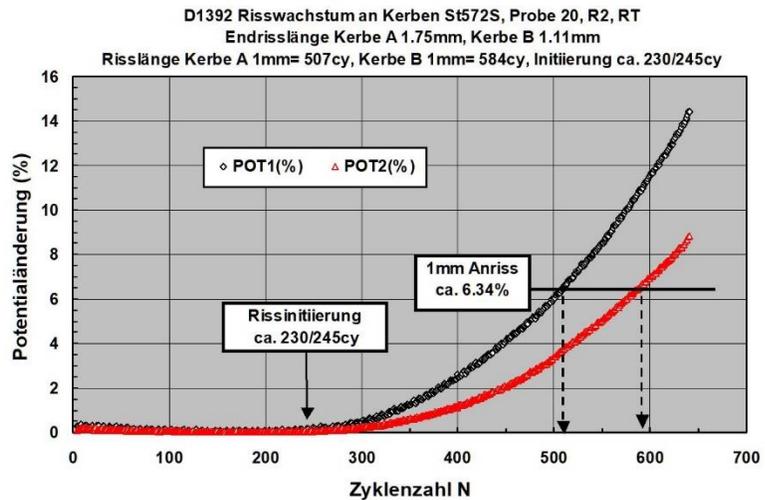
- Nennquerschnitt A = 54 mm²
 - Die evtl. notwendigen Zentrierbohrungen sollen DIN 532-A-2.5x5.3 sein
 - Kerbfertigung: 1. ø20 drehen, 2. Kerbe als Umfangskerbe drehen (Profilstahl), 3. bei Kerbform C Kanten brechen, 4. Einsteiche R0.1 drehen, 5. R15 fräsen oder erodieren.
 - Rohling 23 mm x 23 mm x 135 mm oder ø23 x 135mm (notfalls 115mm Länge)
 - 1) Probennummerierung durch Schlagzahlen 2mm beidseitig auf den Stirnseiten zwischen ø6 und ø11
 - Fertigung der beiden Gewinde und ø20 in einer Aufspannung, dann Einspannende abstechen

Kerbform	A	B	C	D
Kerbradius R [mm]	0.5	1	2	4
Kerbfaktor Kt (3D)	3.26	2.08	1.84	1.51
Position Einstich [mm]	2.5	3	4	6

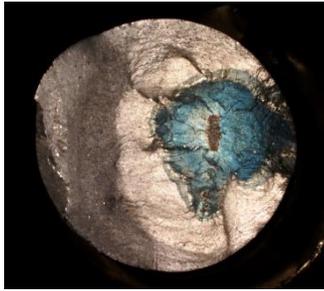
Bemerkungen:
 ALSTOM LCF - Kerbprobe M22x1 mit Zusatzeinstichen HRLM 410 084a



HCF-Prüfung mit
Laststeigerungs-
verfahren LSV



LCF-Prüfung
Probe mit
Doppelkerbe

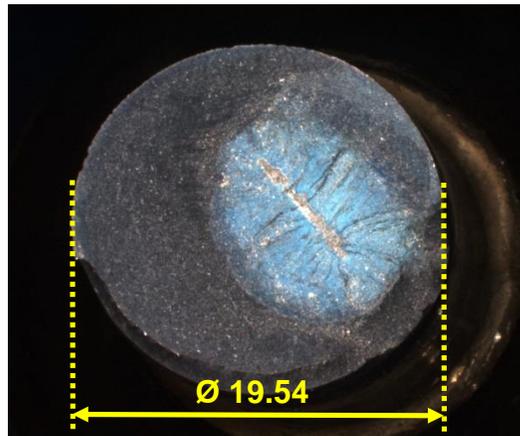


Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



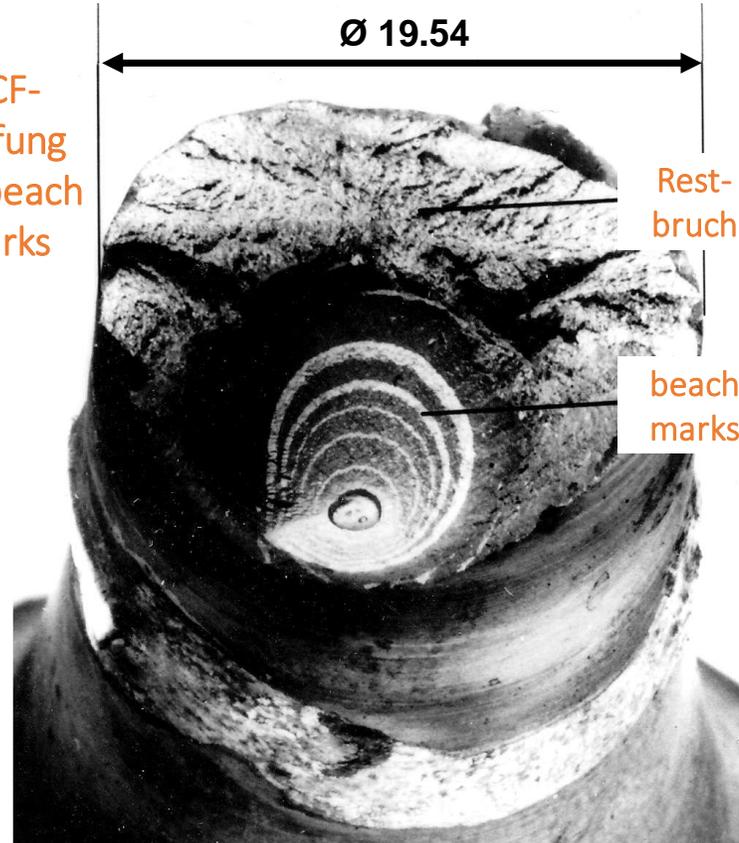
Anrissbildung an künstlichen Fehlstellen



HCF-
Prüfung
mit heat
tinting

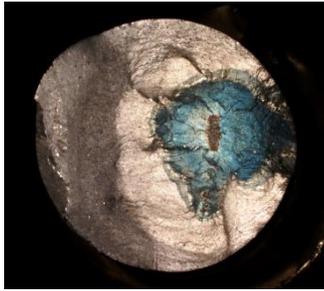
HCF-
Prüfung
mit beach
marks

Grossproben
M52x2 aus
Versuchs-
schweissung
300 mm²



HCF-
Prüfung an
Schweiss-
poren

Leider keine Messungen
mehr zugänglich ☹



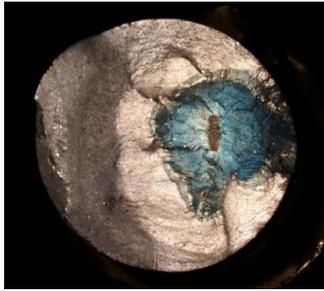
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



Gliederung

1. Messtechnik
2. Risswachstum
 - zügig (Bruchzähigkeit)
 - zyklisch (Ermüdung)
 - zyklisch (Korrosionsermüdung)
3. Anrissbildung
 - glatt (thermal fatigue)
 - glatt (thermal gradient fatigue)
 - gekerbt
 - an Fehlstellen
4. «Zusammenfassung»



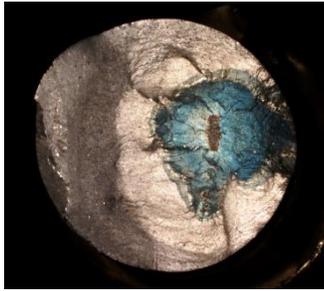
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



«Zusammenfassung»

- ☹ Habe leider keinen Zugriff mehr auf PCs, Datenbanken von BBC, ABB und Alstom
- ☹ DUPLEX-Entwicklung war um 1990



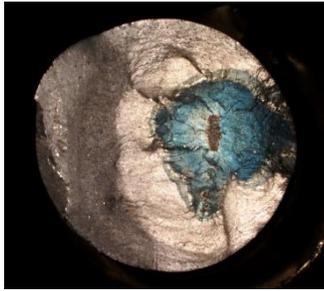
Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



«Zusammenfassung»

- ☹️ Habe leider keinen Zugriff mehr auf PCs, Datenbanken von BBC, ABB und Alstom
- ☹️ DUPLEX-Entwicklung war um 1990
- ☹️ Gemessen werden Widerstandsänderungen
- ☹️ Geht heute besser!
- 😊 Königsdisziplin ist die Bauteilprüfung!



Duplex-Potentialsonde

Anriss und Risswachstum



«Zusammenfassung»

- ☹ Habe leider keinen Zugriff mehr auf PCs, Datenbanken von BBC, ABB und Alstom
- ☹ DUPLEX-Entwicklung war um 1990
- ☹ Gemessen werden Widerstandsänderungen
- ☹ Geht heute besser!
- ☺ Königsdisziplin ist die Bauteilprüfung!

Mehr zum Thema: s. Hobby-Homepage

www.staerk-erdwaerme.ch

unter «Berufliches» Vorträge und Veröffentlichungen [8-11, 17, 22-25, 27, 32, 39]

S. vollständiger Vortrag unter [43a ppt] und [43b online]