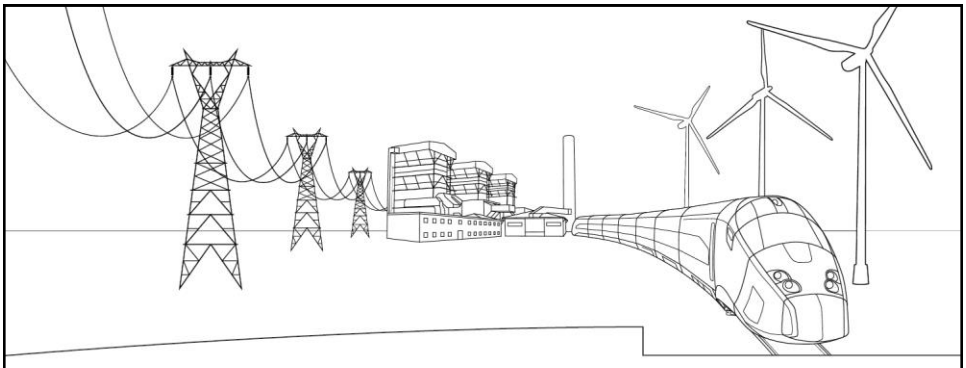


Bruchzähigkeitsmessung grobkörniger Ni-Basis-Legierungen im Hochtemperaturbereich bis 1000°C

Klaus F. Stärk, Carlo M. Maggi

47. Tagung DVM-Arbeitskreis Bruchvorgänge

Februar 2015 Freiberg

ALSTOM
Shaping the future

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung
- DUPLEX-Potentialsonde
- Bruchflächen und Auswertung
- Gültigkeitskriterien
- Streuung und Statistik
- Zusammenfassung

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- **Ni-Basis-Guss (MarM247cc)**

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Ni-Basis-Guss MarM247cc

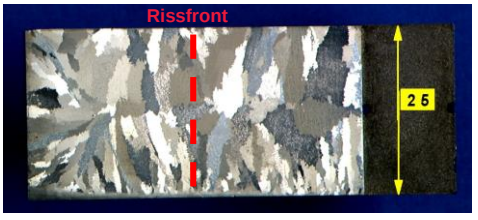
Schaufelfuss

Schaufelblatt

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Ni-Basis-Guss MarM247cc

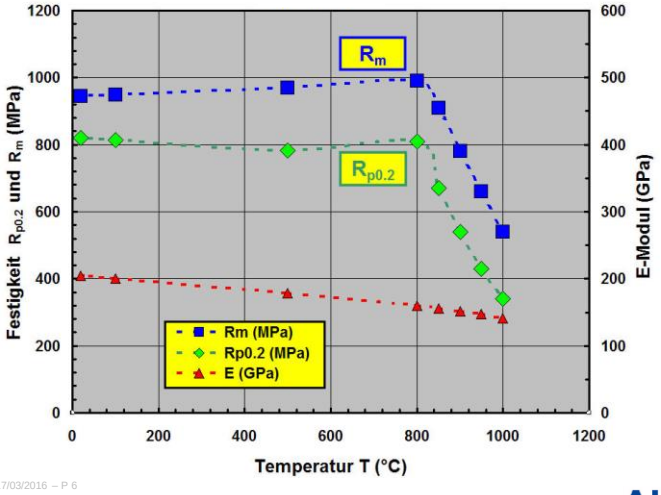
typische Gusserstarrung



Schliff durch
1”-CT-Probe

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Ni-Basis-Guss MarM247cc



Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

HT-Bruchzähigkeitsmessung

Rissverlängerung/Heizung	Widerstand	Strahlung	Induktion	Gas
Teilentlastungsverfahren	✓			
Potentialsondenverfahren	✓✓		✓	

☹ **schlecht**
😐 **machbar**
☺ **gut**

- **vorhandene Erfahrung**
- **vorhandene Ausrüstung**
- **vorhandene Mittel**

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

HT-Bruchzähigkeitsmessung

Rissverlängerung/Heizung	Widerstand	Strahlung	Induktion	Gas
Teilentlastungsverfahren	😐☹	☹	☹	😐☹
Potentialsondenverfahren	😐	😐☹	😐😐	☺☺

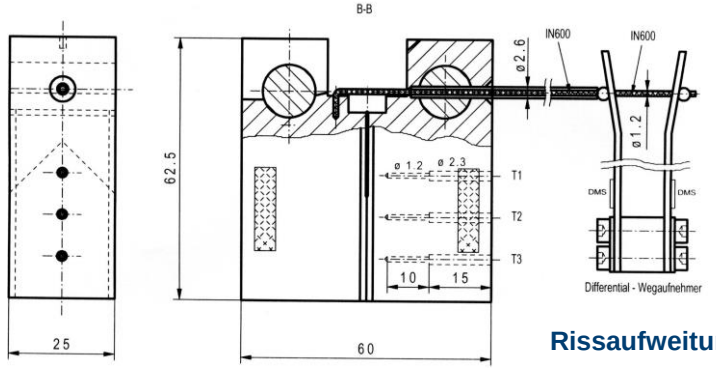
➔ **Potentialsonde + Gasheizung**

Gründe:

- kontinuierliche Messung mit PD
- konstante Temperatur
- gleichmässige und hohe Temperatur
- kurze Aufheiz- und Abkühlzeiten

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

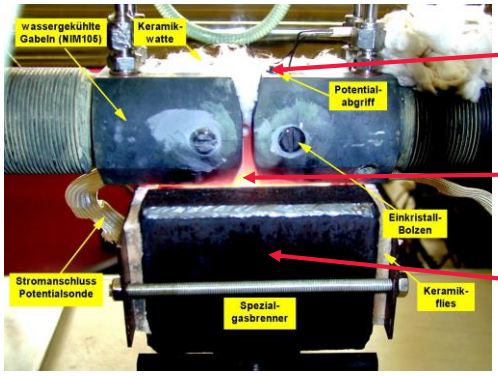
HT-Bruchzähigkeitsmessung



Rissaufweitung

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

HT-Bruchzähigkeitsmessung



Potential-abgriff

1”CT-Probe

Erdgas-Flächen-brenner (U-Form)

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung
- DUPLEX-Potentialsonde

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

DUPLEX Potentialsonde
mit Stromumkehr (DC/AC)
➔ Widerstandsmessung

- R= f (Risslänge)
- R= f (Probengeometrie)
- R= f (Material)
- R= f (Temperatur)
- R= f (Probenbeanspruchung)
- R= f (Rissflächenkontakte)

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

DUPLEX Potentialsonde
mit Stromumkehr (DC/AC)
➔ Widerstandsmessung

• R= f (Risslänge)	➔ Ziel
• R= f (Probengeometrie)	➔ Kalibrierung
• R= f (Material)	➔ R/R_0= f (a/W)
• R= f (Temperatur)	➔ R/R_0= f (a/W)
• R= f (Probenbeanspruchung)	➔ eliminieren
• R= f (Rissflächenkontakte)	➔ bewerten

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

DUPLEX Potentialsonde

Rohdaten Potentialsonde

„Muster“

Kraftsignal

Riss-öffnung

Riss-verlängerung

Potential-signal

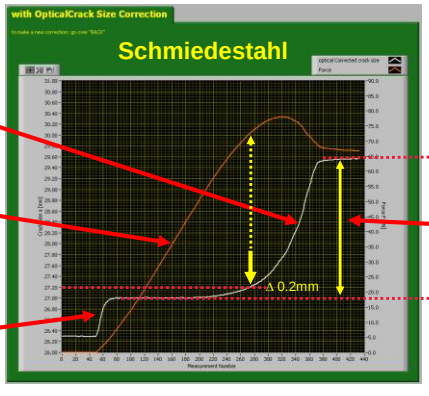
Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

DUPLEX Potentialsonde

Rohdaten Potentialsonde

„Muster“

optische Nachauswertung



Potential-signal

Kraftsignal

Riss-öffnung

opt. End-risslänge a_E

opt. Rissver-längerung Δa

opt. Anfangs-risslänge a_0

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung
- DUPLEX-Potentialsonde
- Bruchflächen und Auswertung

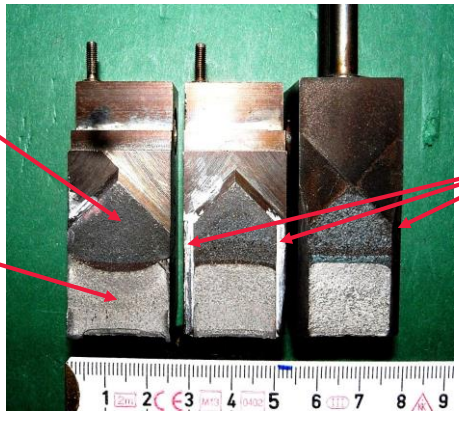
Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Bruchflächen und Auswertung

Bruch-zähigkeit | Bruch-zähigkeit | Kriechriss-wachstum

Chevron-kerbe

1”- CT ohne Seiten-kerben



1”- CT mit Seiten-kerben 2x10%

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Bruchflächen und Auswertung

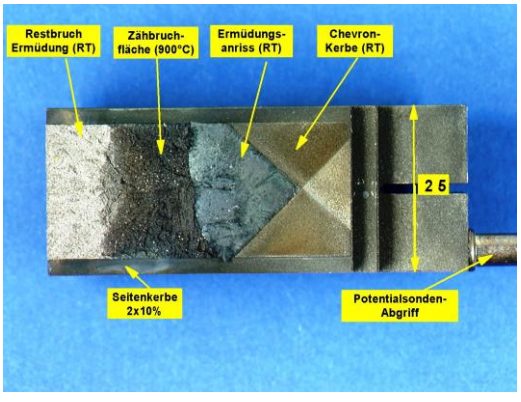
Nickel-Basis-Guss

optische Bruchflächen-Nachauswertung

(RT und 550°C mit heat tinting)

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Bruchflächen und Auswertung

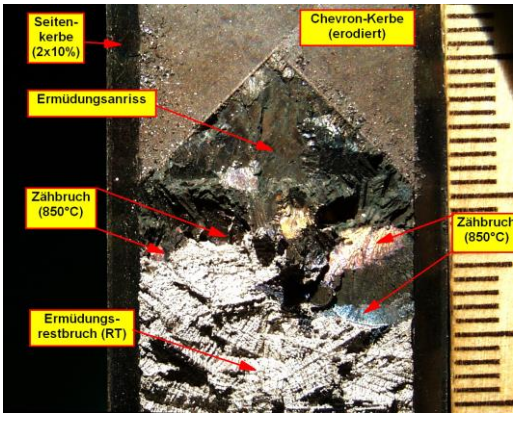


optische Bruchflächen-Nachauswertung

Ni-Basis-Guss

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Bruchflächen und Auswertung

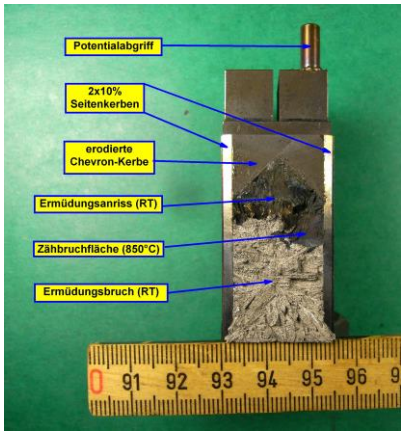


optische Bruchflächen-Nachauswertung

Ni-Basis-Guss

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Bruchflächen und Auswertung



optische Bruchflächen-Nachauswertung

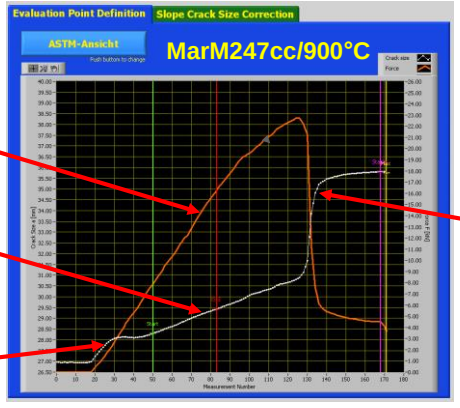
Ni-Basis-Guss

ungültige Rissgeometrie !!!
$a_i = a_m \pm 0.05B$
(±1.25 mm für 1”- CT)
Riss-Schräglage < ± 10°

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Auswertung

Rohdaten Potentialsonde



Kraftsignal

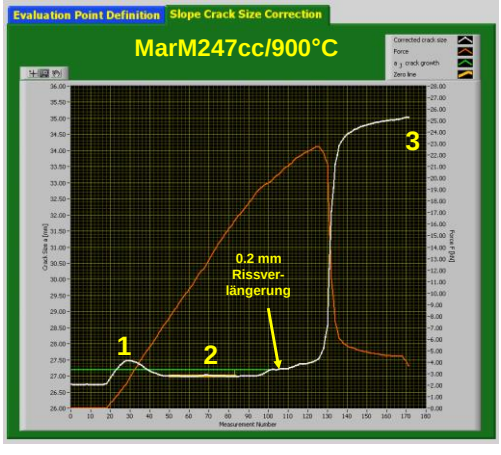
Potential-signal

Riss-öffnung

Riss-verlängerung

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Auswertung



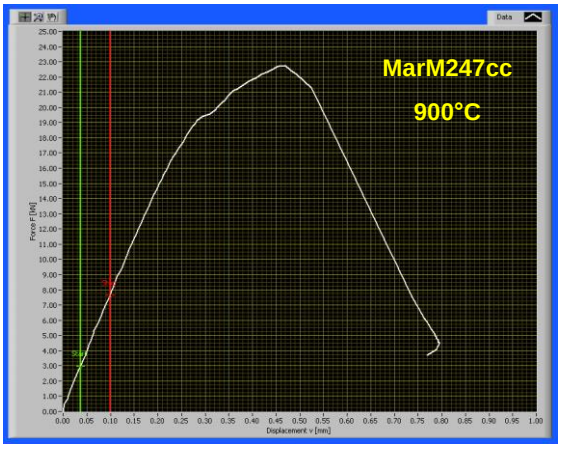
1 Korrektur Ende Rissöffnung

2 Korrektur Material-widerstand

3 Korrektur gemessene/ optische Rissverlängerung (opt. Nach-auswertung)

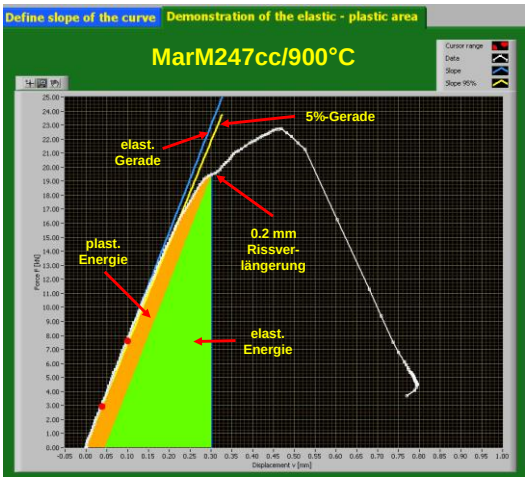
Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Auswertung



Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Auswertung



Berechnung

$K_{I5\%}$

K_{Jlc}

K_{Imax}

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung
- DUPLEX-Potentialsonde
- Bruchflächen und Auswertung
- Gültigkeitskriterien

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gültigkeitskriterien

ASTM E399

Required for valid K_{Ic}

		Lower Limit		Value		Upper Limit		Validity	Standard
F_{max}/F_Q Criterion:	$\frac{F_{max}}{F_Q}$ =			1.439	≤	1.10		hurt	E 1820 & E 399
Ligament Criterion:	W - a_0 =	13.70	<	21.000			mm	fulfilled	E 1820 & E 399
Crack Size Criterion:	$\frac{a_0}{W}$ =	0.45	≤	0.580	≤	0.55	mm	hurt	E 1820 & E 399
dK/dt Criterion:	$\frac{dK}{dt}$ =	0.55	≤	0.803	≤	2.75	$\frac{MPa\sqrt{m}}{s}$	fulfilled	E 399
Precrack K/E Criterion:	$\frac{K}{E}$ =			0.0002	≤	0.0003	$\sqrt{m}$	fulfilled	E 399
Precrack K Criterion:	K =			26.4	<	24	MPa $\sqrt{m}$	hurt	E 1820 & E 399

und ungültige Rissgeometrie !!!

$a_i = a_m \pm 0.05B$ (±1.25 mm für 1”-CT)

Riss-Schräglage < ± 10°

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gültigkeitskriterien

ASTM E1820

Required for valid K_{JIc}

		Lower Limit		Value		Upper Limit		Validity	Standard
Ligament Criterion:	W - a_0 =	0.3	<	21.00			mm	fulfilled	E 1820
Thickness Criterion:	B =	0.3	<	25.00			mm	fulfilled	E 1820
Δa Criterion:	Δa =	1.5	≤	11.93			mm	fulfilled	E 1820
Alstom Criterion:	Δa =	1.05	≤	11.931			mm	fulfilled	Alstom
Crack Size Criterion:	$\frac{a_0}{W}$ =	0.45	≤	0.580	≤	0.70		fulfilled	E 1820
Precrack K Criterion:	K =			26.4	<	33.3	MPa √m	fulfilled	E 1820 & E 399

aber ungültige Rissgeometrie !!!

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gültigkeitskriterien

Results with optical crack size calibration

Δa_{max}	12.00	mm	Crack elongation from the defined "Zero Crack Length" to the defined "Final Crack Length"
Δa_{stab}	11.95	mm	Crack elongation from the defined "Zero Crack Length" to the defined Stable Crack Length"
Δa_J	0.19	mm	Cracklenght for evaluating the J-values
F(Δa)	4.50	kN	Force at Δa stable
J_{pl}	0.004	MPa m	Plastic part of the J-integral for J_{Ic}
J_{el}	0.015	MPa m	Elastic part of the J-integral for J_{Ic}
J_{Ic}	0.019	MPa m	The plane-strain fracture toughness for slow rates of loading and substantial plastic deformation
J_{max}	0.040	MPa m	Fracture toughness of the material at an instability.
F_{max}	22.73	kN	The maximal force which the specimen sustained.
K_{max}	61	MPa √m	Stress intensity at the force F_{max}
F_Q	15.80	kN	Force at which K_Q is determined
K_Q	40	MPa √m	Conditional result to determine the validity of K_{Ic}
K_{Jmax}	81	MPa √m	K_{Jmax} is the fracture instability toughness

K_{Ic}	40	MPa √m	invalid
K_{JIc} plain strain	55	MPa √m	valid
K_{JIc} plain stress	53	MPa √m	valid

K_{Ic} : is the linear elastic, plain strain fracture toughness

K_{JIc} : is the fracture toughness for slow rates of loading and substantial plastic deformation

Notes

K_{JIc} : plain stress values should be used for conservative database issues.

ungültig

konservativ

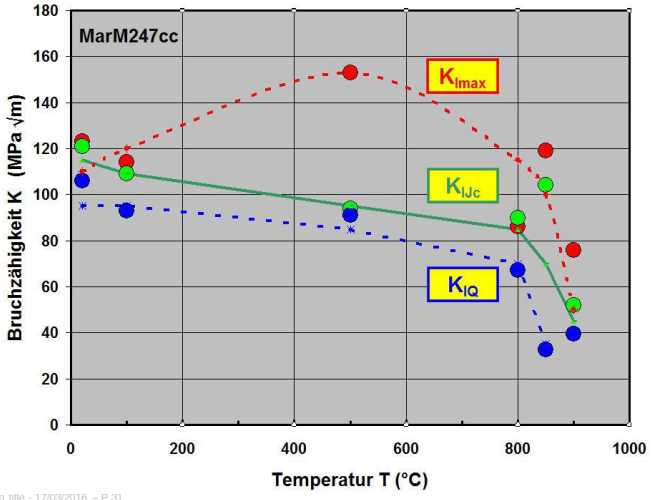
„gültig“

stark konservativ

ungültig

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Streuung und Statistik



ungültig

„gültig?“

konservativ

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung
- DUPLEX-Potentialsonde
- Bruchflächen und Auswertung
- Gültigkeitskriterien
- Streuung und Statistik

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

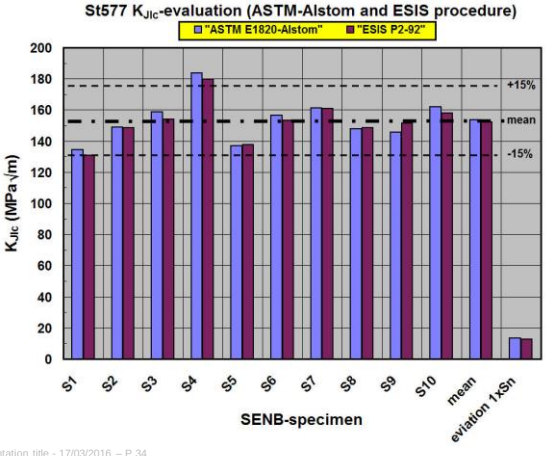
Streuung und Statistik

design data

- State of the art
- Nach bestem Wissen und Gewissen
- So genau wie möglich
- Konservativ
- Statistisch notwendige Probenzahlen

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Streuung und Statistik



Schmiedestahl

Chargen-einfluss

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Streuung und Statistik

empfohlene Probenzahl
für fein- und grobkörnige Werkstoffe

- Homogene Werkstoffe: 3 Proben pro Temperatur
- Homogene Werkstoffe: 3 Proben pro Charge (≥ 5)
- Einkristalline Werkstoffe: 3 Proben pro Orientierung (≥ 3)
- Grobkristalline Werkstoffe (grosse Proben):
  ≥ 5 Proben je Temperatur (mit Seitenkerben)
- Grobkristalline Werkstoffe (Kleinproben):
  ≥ 10 Proben je Temperatur (ohne Seitenkerben)

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

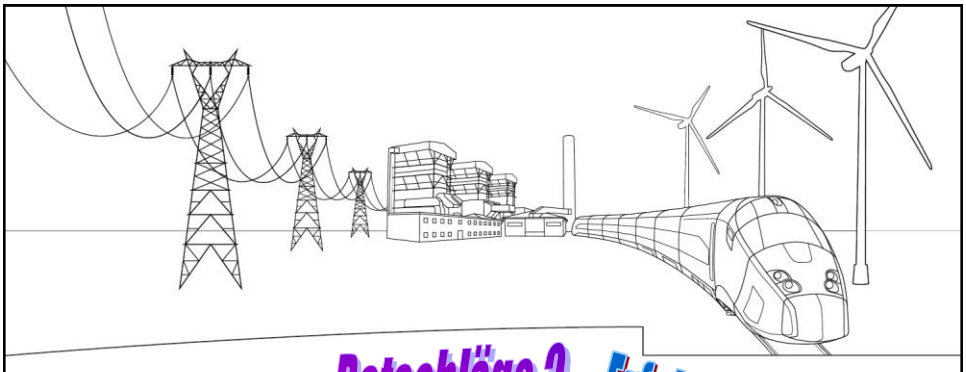
Gliederung

- Ni-Basis-Guss (MarM247cc)
- HT-Bruchzähigkeitsmessung
- DUPLEX-Potentialsonde
- Bruchflächen und Auswertung
- Gültigkeitskriterien
- Streuung und Statistik
- Zusammenfassung

Bruchzähigkeit grobkörniger Ni-Basislegierungen

Zusammenfassung

- Nickelbasis-Gusslegierungen (grobkörnig)
- Normen und Standards
- Schwierige Bruchzähigkeitsbestimmung
- Grosse lokale “Materialstreuung”
- Grosse Probenzahlen für Statistik erforderlich
- Proben so gross wie möglich mit Seitenkerben
  - ➔ “ Werkstoffkennwert ? ”
- Kleinproben mit Bauteilabmessung ohne Seitenkerben
  - ➔ “ Bauteilkennwert ? ”



Hilfe ? Ratschläge ? Erfahrungen ?

Danke

für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. Klaus F. Stärk

klaus.staerk@power.alstom.com

klaus.staerk@swissonline.ch

www.staerk-erdwaerme.ch

ALSTOM
Shaping the future
www.alstom.com