

Ermüdung -

(graue)
Theorie

(harte)
Praxis

und

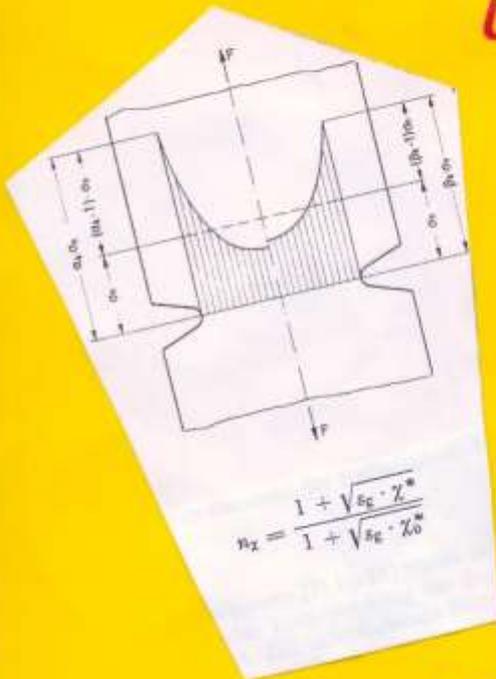


ABB
ABB BROWN BOVERI

Dr.-Ing. K.F. Stärk

ABB Kraftwerke AG, Abt. Materialtechnologie

CH 5401 Baden/Schweiz

Höchstleistungen

Gehirn

Intelligenz

Redun-
danz

Toleranz

Figur

Design

Kleidung

Ober-
flächen-
schutz

Bio-
masse

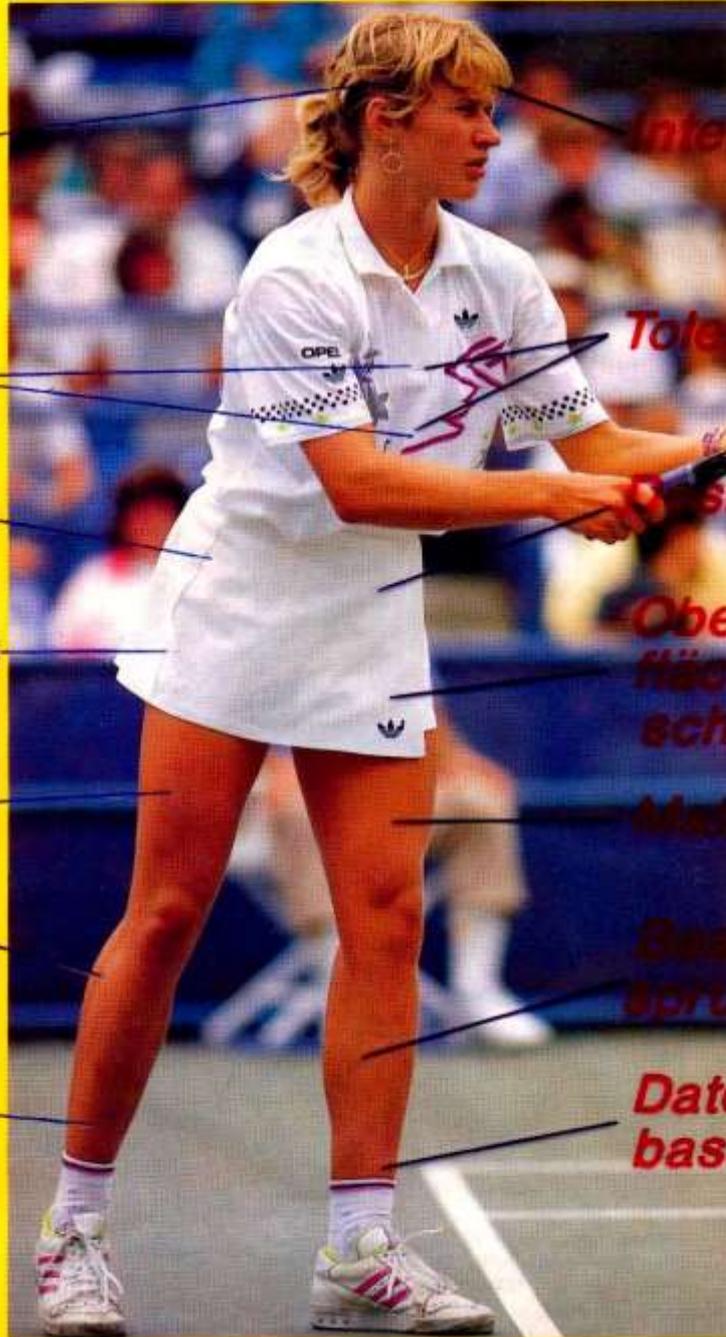
Material

Muskeln

Bean-
spruchung

Beine

Daten-
basis



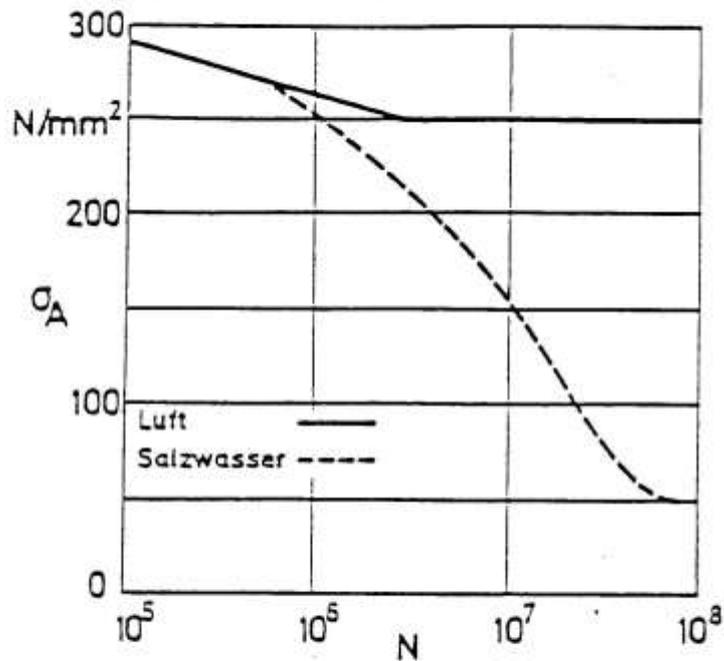
Beine / verfügbare Datenbasis

"Standicherheit"

- Theorie:
- Es ist alles vorhanden
 - Es wird alles Vorhandene genutzt
 - Was fehlt, wird kurzfristig ergänzt
 - Was fehlte, wird allen verfügbar gemacht
 - Die Daten-Sicherheit ist gewährleistet

- Praxis:
- Es ist nicht alles vorhanden
 - Es ist vorhanden aber nicht verfügbar
 - Es fehlt die Zeit zur Ermittlung
 - Es fehlt das Geld zur Ermittlung
 - Es wird nicht allgemein verfügbar gemacht
 - Un-Sicherheiten bleiben unabgeklärt

graue Theorie



Werkstoffkennwerte:

St 42: $R_e = 250 \text{ N/mm}^2$
 $R_m = 420 \text{ N/mm}^2$
 $A_5 = 22 \%$
 $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
 $\mu = 0,3$

St 50: $R_e = 300 \text{ N/mm}^2$
 $R_m = 500 \text{ N/mm}^2$
 $A_5 = 20 \%$
 $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
 $\mu = 0,3$

GG-25: $R_m = 250 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{Wm} = 45 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{Sch} = 67 \text{ N/mm}^2$
 $E = 100\,000 \text{ N/mm}^2$
 $\mu = 0,25$

} für die vorliegende Oberflächenbeschaffenheit

	Bezeichnung	R_m N/mm ²	σ_{bB} N/mm ²	σ_{dB} N/mm ²
Gußeisen mit Lamellengraphit (DIN 1691)	GG-10	100	250	500-600
	GG-15	110-230	270-340	550-700
	GG-20	160-280	330-410	600-830
	GG-25	210-330	390-460	700-1000
	GG-30	260-330	450-480	850-1200
	GG-35	310-380	510-540	950-1400
	GG-40	360-400	570-600	1100-1400

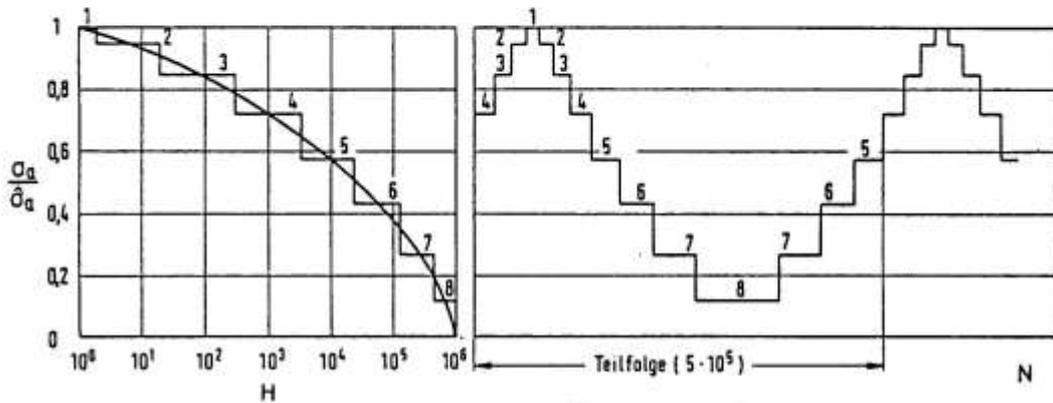
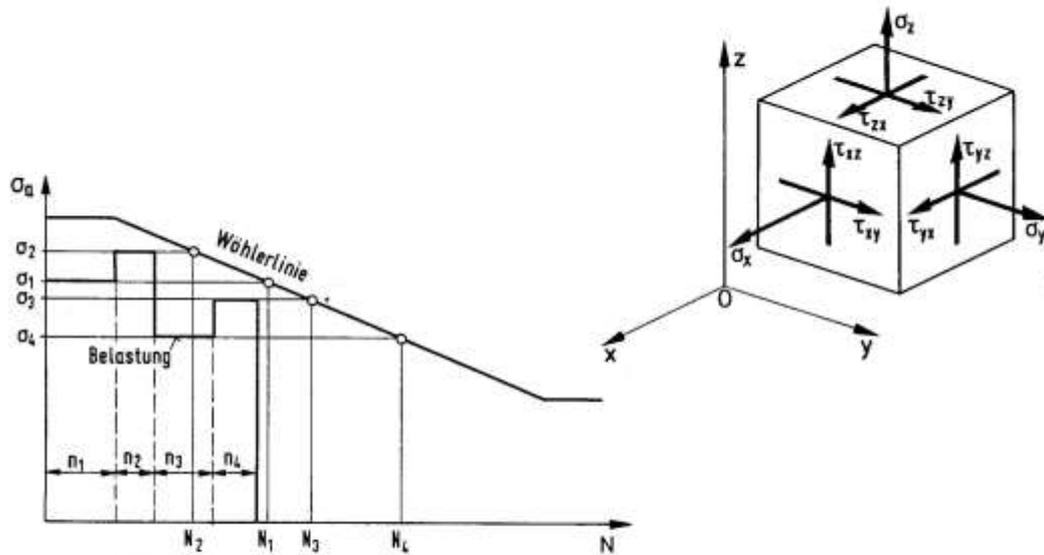
Muskeln/Beanspruchung

"stress and strain"

- Theorie:
- Die max. Beanspruchung ist bekannt
 - Die räumliche Verteilung ist bekannt
 - Die zeitlichen Änderungen sind bekannt
 - Die Bewertung kompl. Zustände ist bekannt (Hypothesen, Schadensakkumulation)

- Praxis:
- Die Beanspruchung wird "geschätzt"
 - FE-Rechnung mit groben Randbedingungen
 - Abschätzung dynamischer Einflüsse
 - Messung an der Komponente nicht möglich
 - Un-Sicherheitsfaktoren aus "Erfahrung" und abhängig vom "Katastrophenpotential"

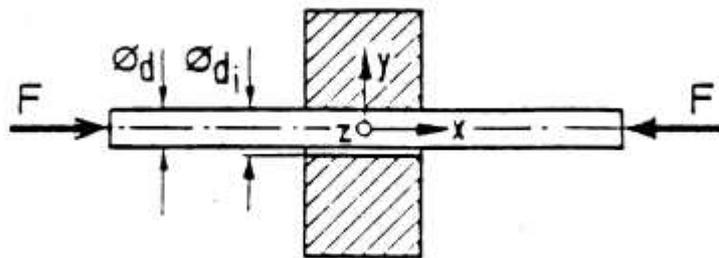
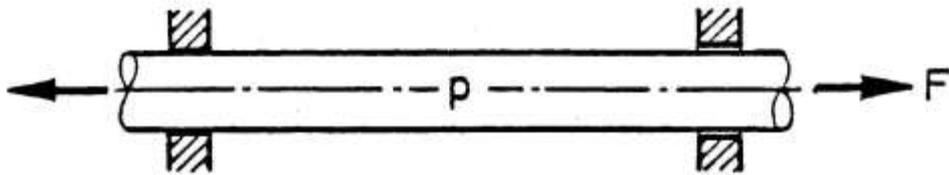
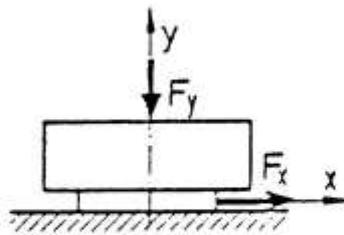
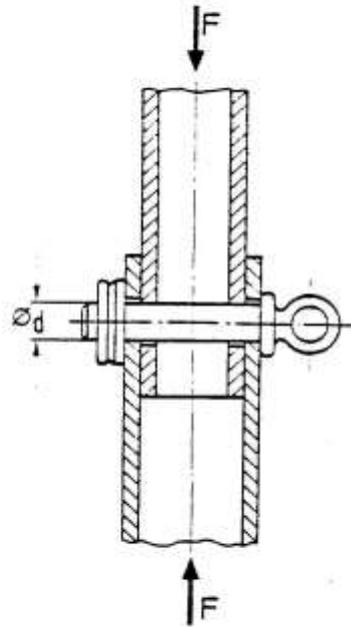
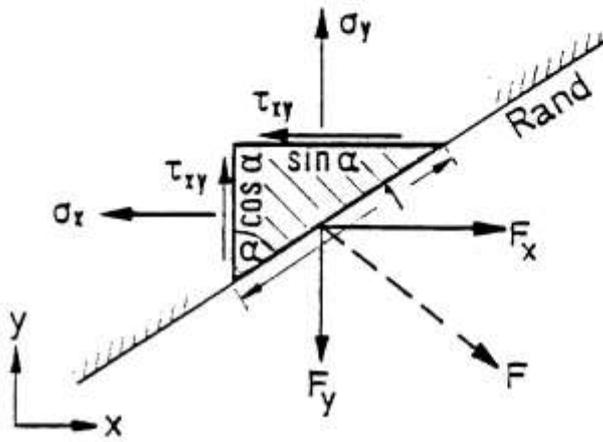
graue Theorie



Palmgren-Miner-Hypothese

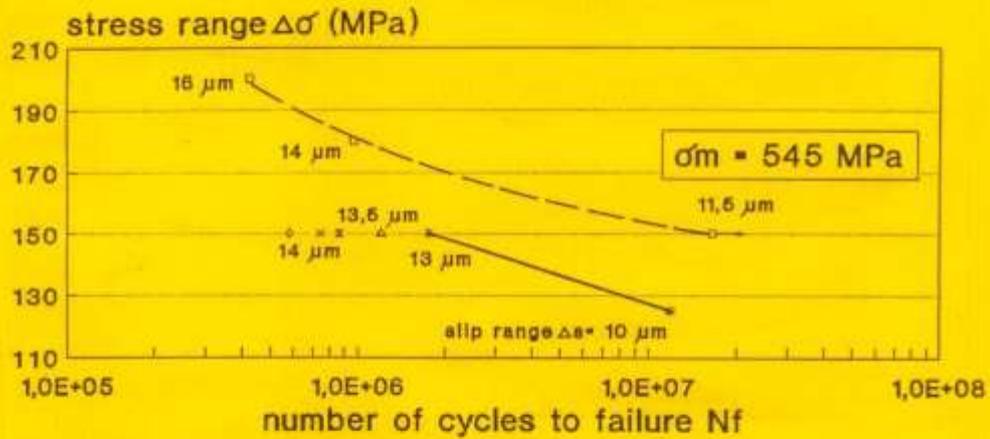
$$S = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$$

graue Theorie



harte Praxis

Fretting fatigue tests x21CrMoV 121/ 1CrMoV



- * without treatment
- shot peened
- △ MoS2 coated
- × CuNiIn coated
- T700 coated
- ⊠ T800 coated

$\sigma_p = 375$ MPa; RT; 30 Hz

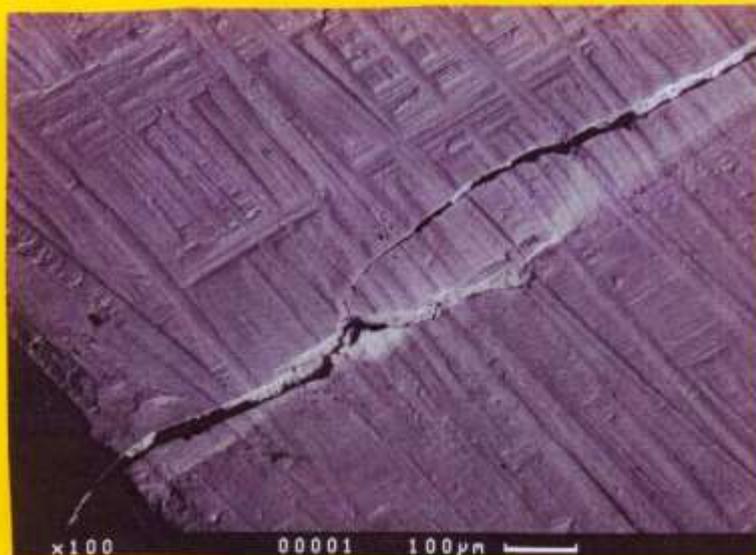


ABB
ABB BROWN BOVER

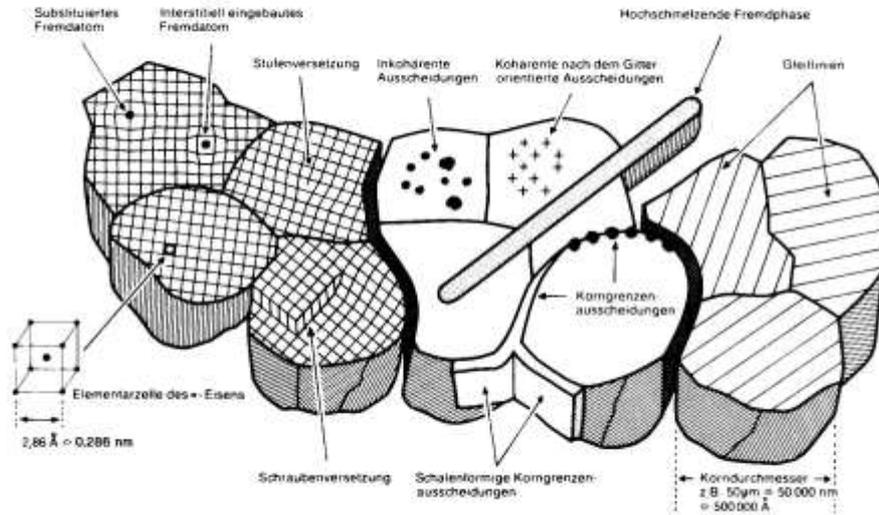
Biomasse / Material

"Werkstoffentwicklung"

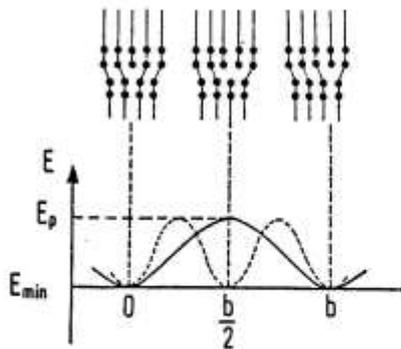
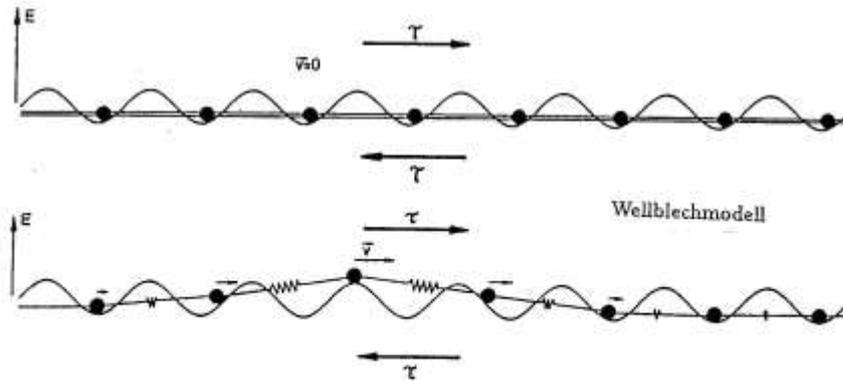
- Theorie:
- Der bestgeeignete Werkstoff ist entwickelt
 - Der bestgeeignete Werkstoff ist verfügbar
 - Die Datenbasis ist verfügbar (erforscht)
 - Eine Eigenschaft bestimmt den Einsatz

- Praxis:
- Der bestgeeignete Werkstoff ist zu teuer
 - Viele Eigenschaften bestimmen den Einsatz
 - Die Eigenschaften sind richtungsabhängig
 - Bauteil und Beanspruchungen sind komplex
 - Einflussfaktoren sind nicht alle bekannt
 - Keine Regenerierung wie bei Biosystemen
 - Umwelttolerante Werkstoffe gefordert

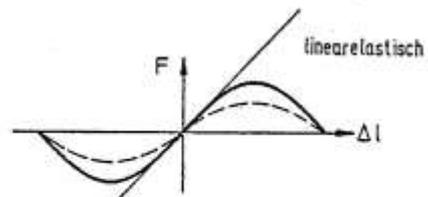
graue Theorie



Schematischer Aufbau eines vielkristallinen Metallgefüges



Energie einer sich bewegenden Versetzung



harte Praxis



ABB
ASEA BROWN BOVERI

harte Praxis

12 % Cr steels
1 % NaCl / 1 % MgCl₂; 80 °C
Mean stress 250 MPa

● metallic surface	✱ metallic surface
■ oxidized surface	✕ oxidized surface

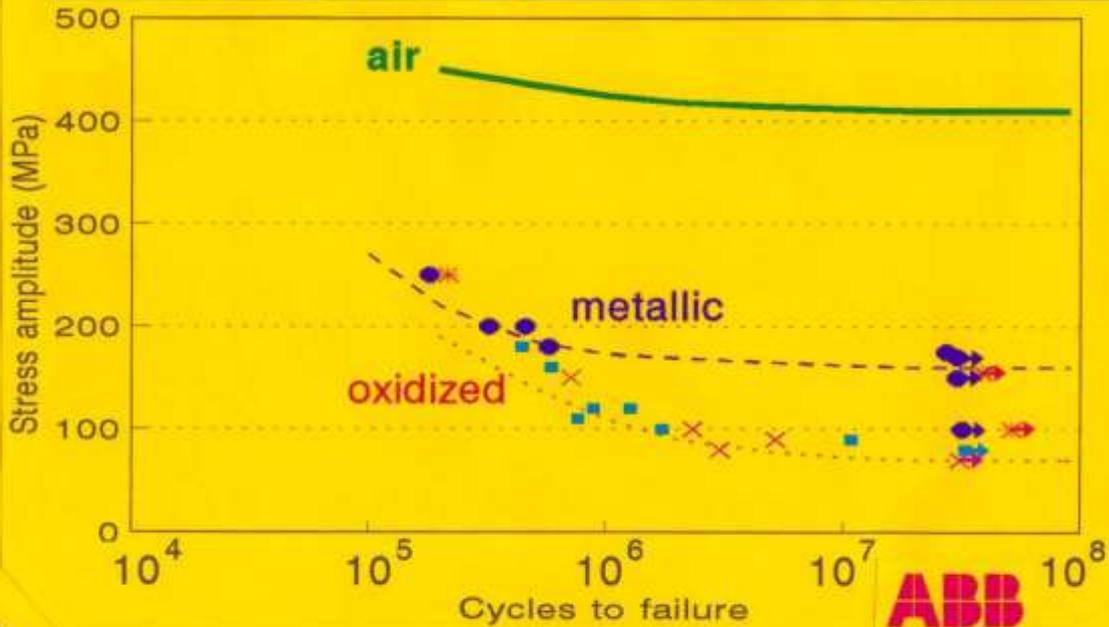


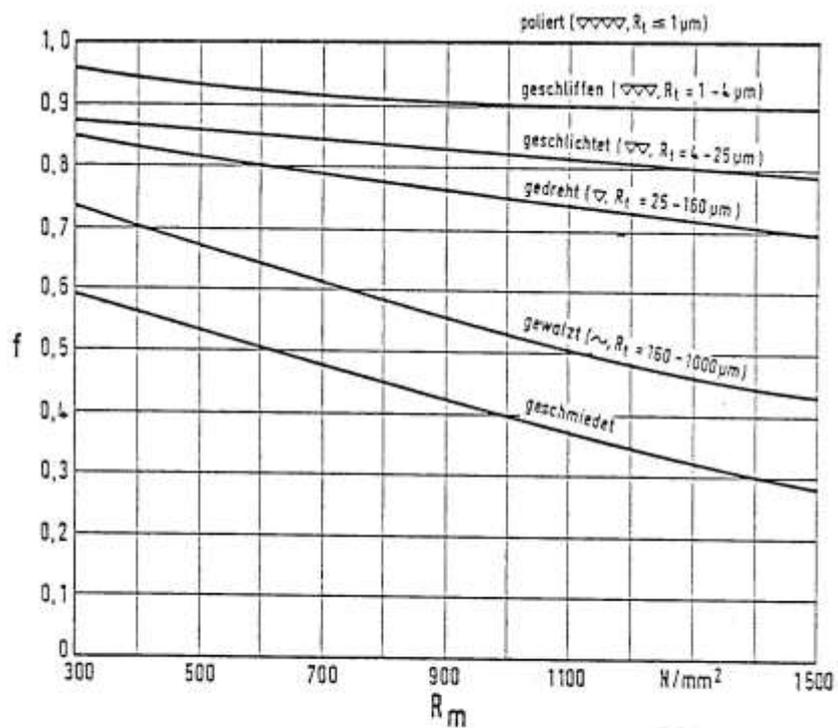
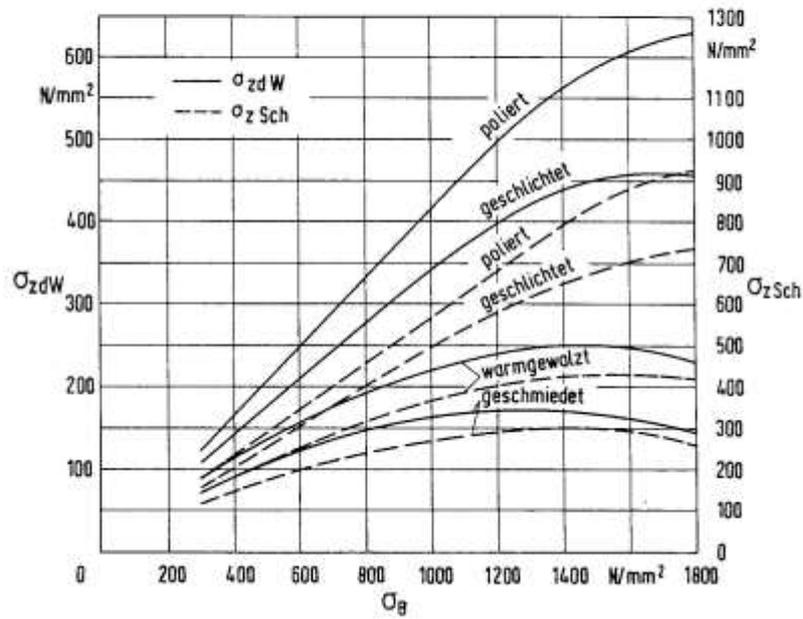
ABB
ASEA BROWN BOVERI

Kleidung / Oberflächenschutz *"Coating"*

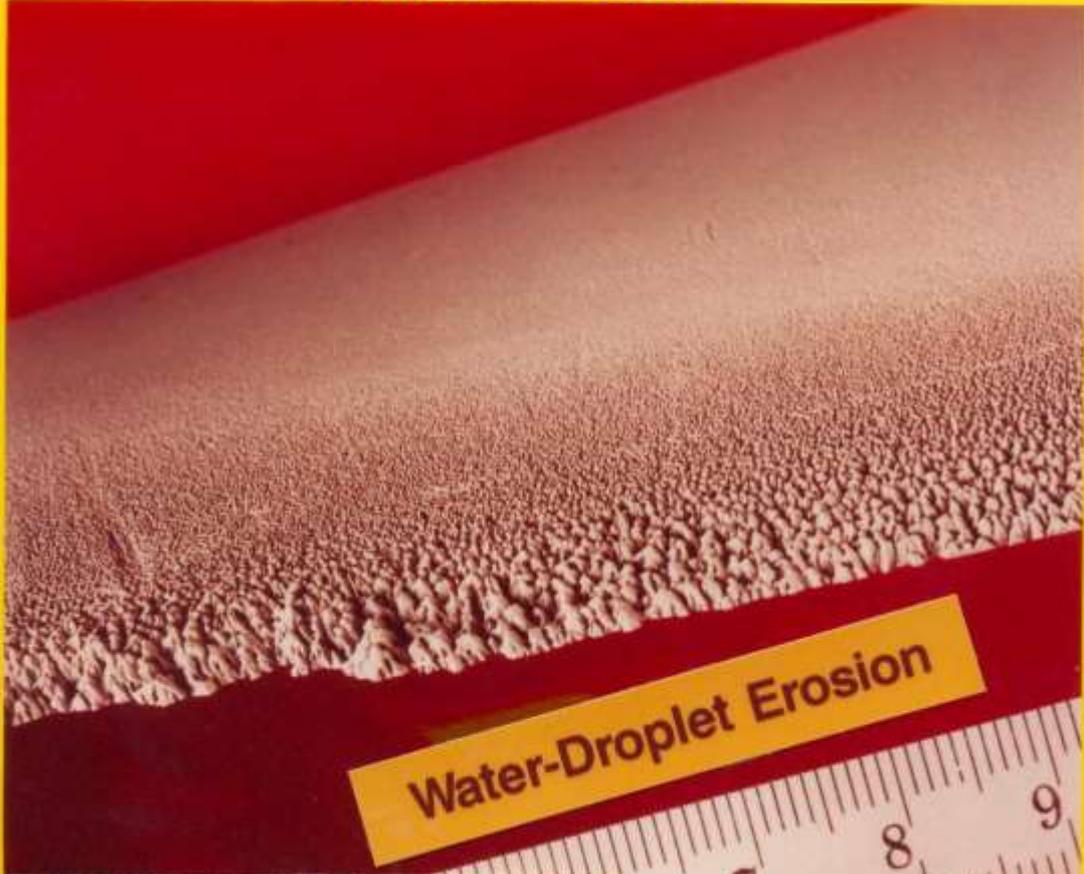
Theorie: - Einflüsse auf Ermüdung bekannt
- Un-Sicherheitsfaktoren bekannt

Praxis: - Korrosionssysteme unbekannt
- Vorhandene Messungen nicht relevant
- Versuche unter "worst case" Bedingungen
- Beschichtungssysteme komplex
(Haftung, Fehlertoleranz, HCF/LCF, Prozess)

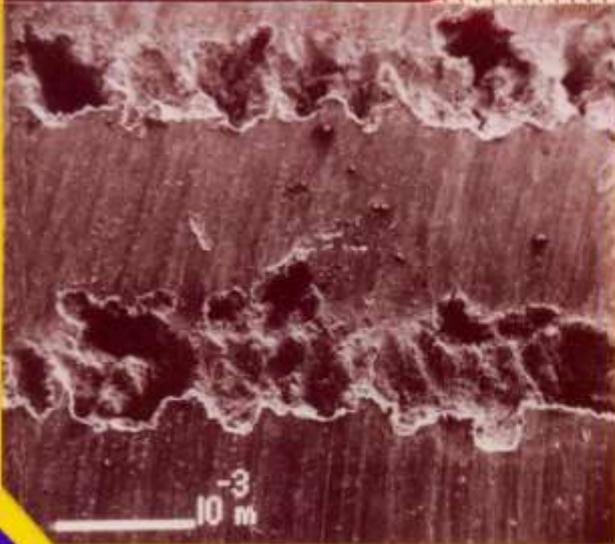
graue Theorie



harte Praxis



Water-Droplet Erosion



Dampfturbinenschaufel

ABB
ASEA BROWN BOVERI

harte Praxis



JET KOTE
Cr₃C₂ + 25 Ni-Cr

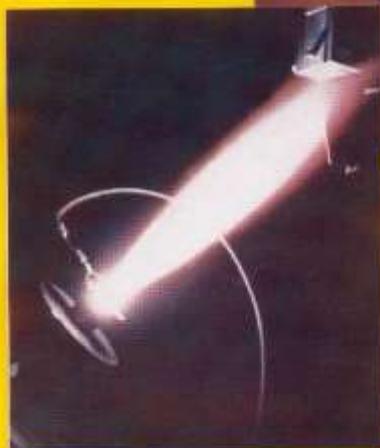
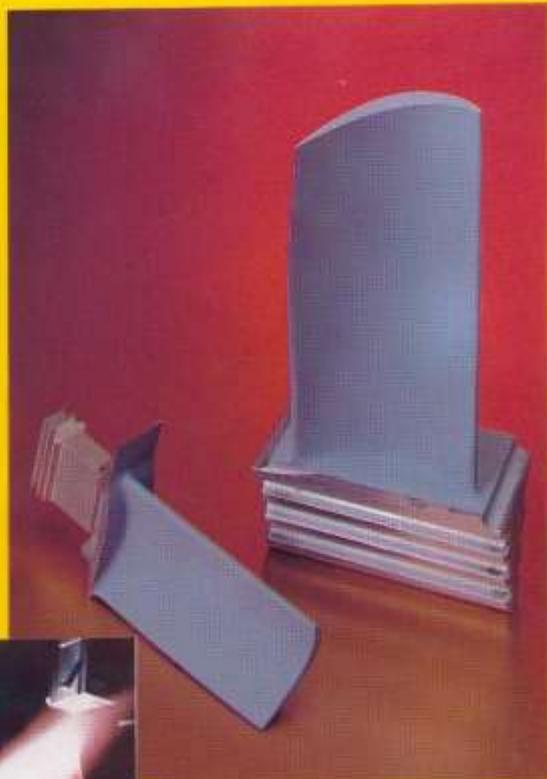


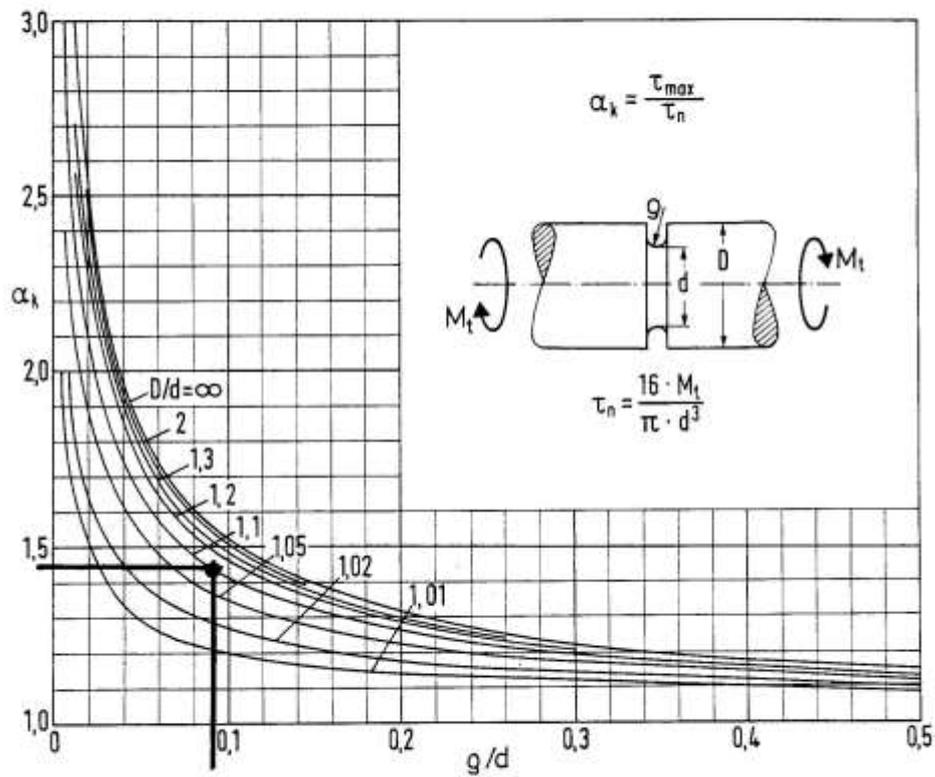
ABB
ABEA BROWN BOVERI

Figur /Design "Konstruktion"

- Theorie:
- Funktionalität entscheidet allein
 - Der Konstrukteur kennt den Werkstoff
 - Systemgenerierende Konstruktion

- Praxis:
- Was bisher gehalten hat, ist i. O.
 - Wenn etwas versagt, ist der Werkst. schuld
 - Messungen am Bauteil sind nicht vorhanden
 - Vorhandene Messungen sind Unikate
 - Optisches design entscheidet
 - Hohe Komplexität und Kopplung

graue Theorie

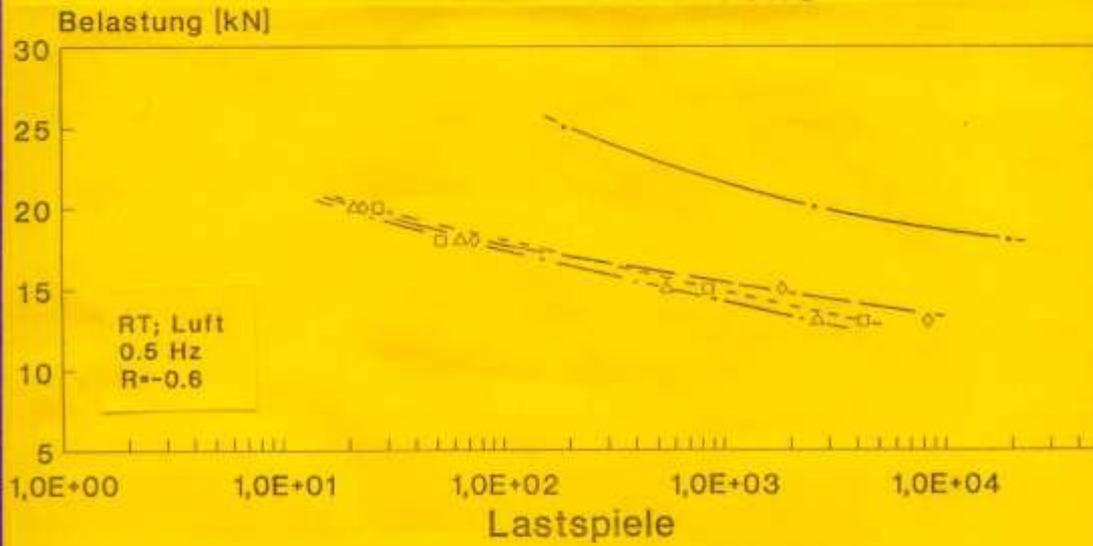


Biegung und Torsion		zweiachsig $\sigma_1 \neq 0$ $\sigma_2 = 0$ $\sigma_3 \neq 0$	
---------------------------	--	--	--

$$\text{Hauptspannung } \sigma_1 = \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

harte Praxis

LCF Schalterwelle



△ St330 teniferiert (original)

□ St330 nachgeschliff.

◇ St330 poliert

• Ck 45

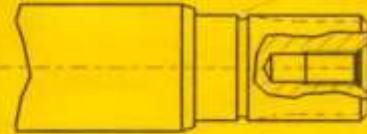
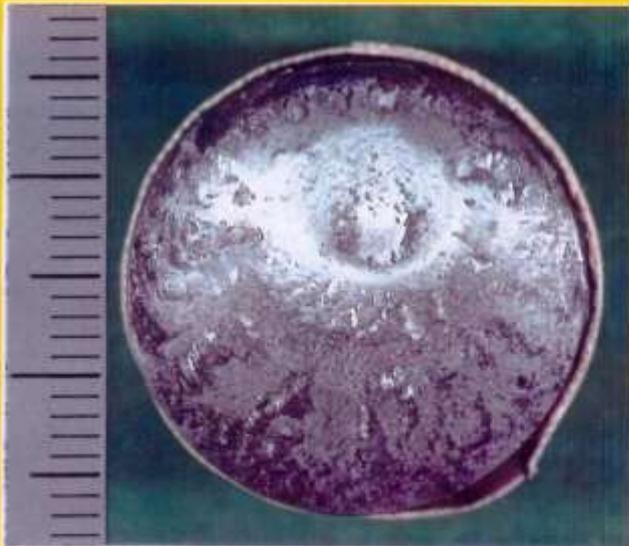


ABB
ASEA BROWN BOVERI

Redundanz / Toleranz

"Selbsthilfe"

- Theorie:
- versagenstolerante Systeme
 - fehlertolerante Systeme
 - überlastungstolerantes design
 - überlastungstolerante Werkstoffzustände
 - beschädigungstolerante Materialien

- Praxis:
- Problematik hochfest und zäh
 - Problematik kriechfest und kerbunempfindlich
 - Problematik ermüdungsfest und fehlertolerant
 - Problematik Kosten-Nutzen-Analyse

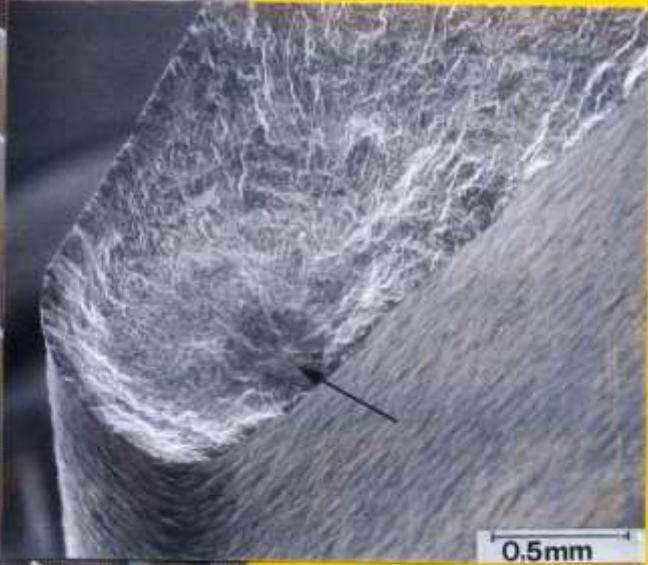
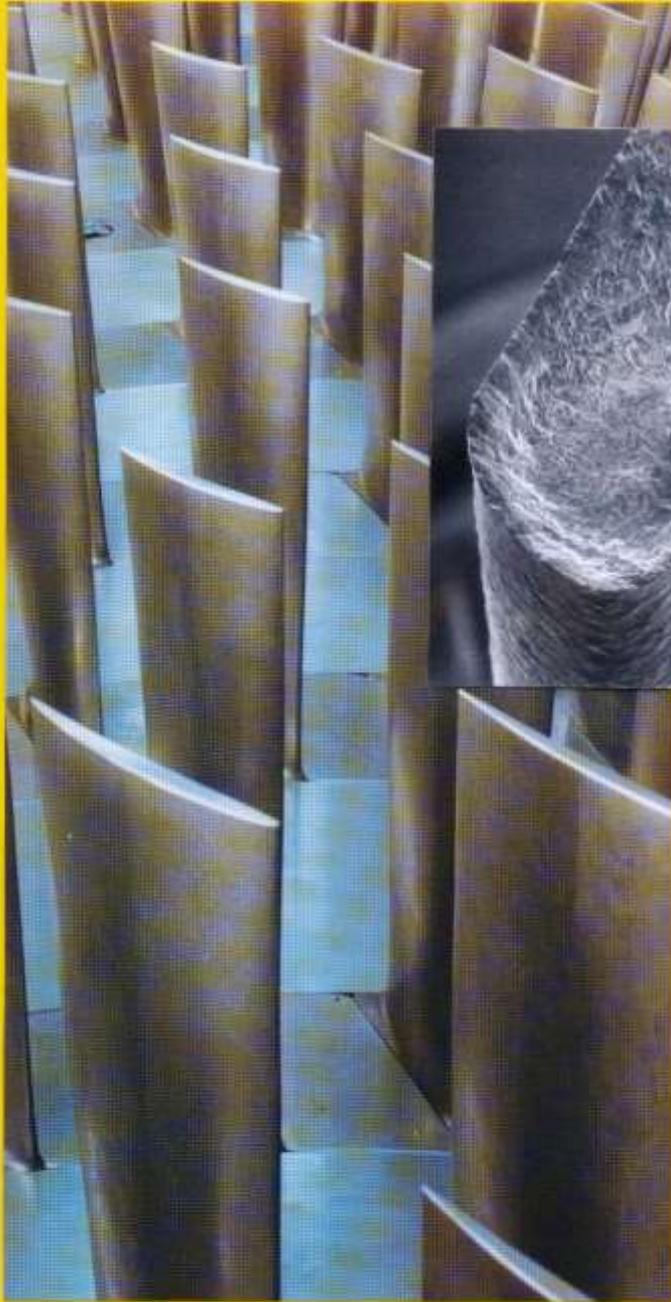
Gehirn/Intelligenz

"know how"

- Theorie:
- Fähigkeit vorhanden
 - Konstruktions-Intelligenz vorhanden
 - Werkstoff-Intelligenz vorhanden
 - EDV-Unterstützung vorhanden
 - Versagenshypothesen vorhanden
 - Schädigungshypothesen bekannt

- Praxis:
- Werkstoff-Intelligenz gefordert
 - Konstruktionsfähigkeit vorausgesetzt
 - Schädigungshypothesen unbekannt
 - Rückfluss aus Versagensanalysen notwendig

harte Praxis



Shot Peening

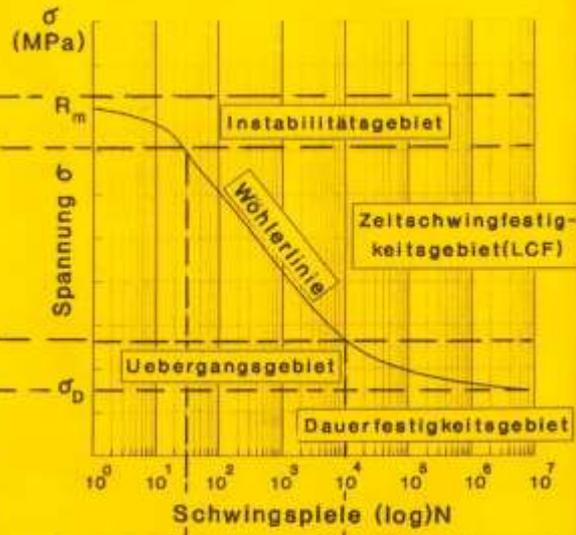
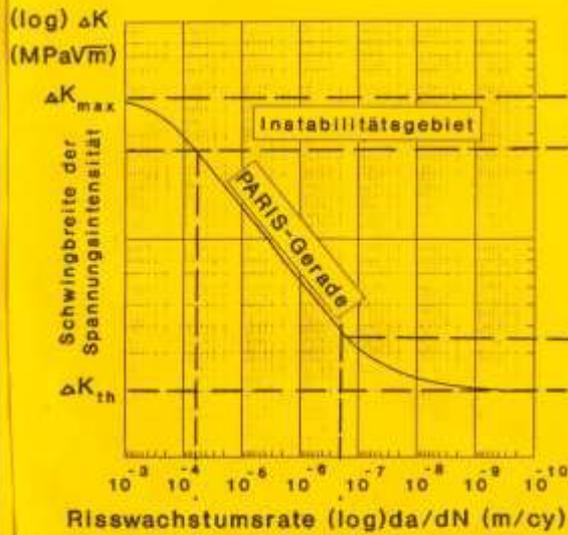
12% Cr-Steel

ABB
ASEA BROWN BOVERI

harte Praxis

da/dN-Kurve

Wöhlerlinie



Gewaltbruchbereich | hohe Risswachstumsrate | niedrige Risswachstumsrate

Gewaltbruchbereich | LCF-Bereich | HCF-Bereich



harte

Praxis

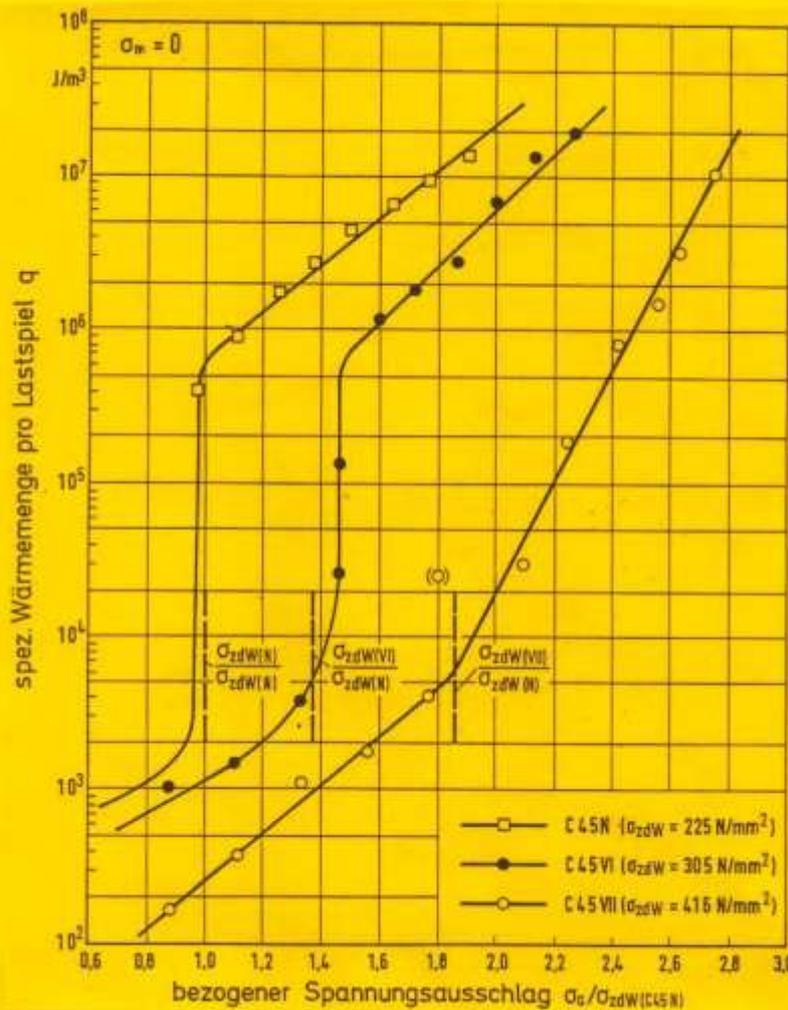
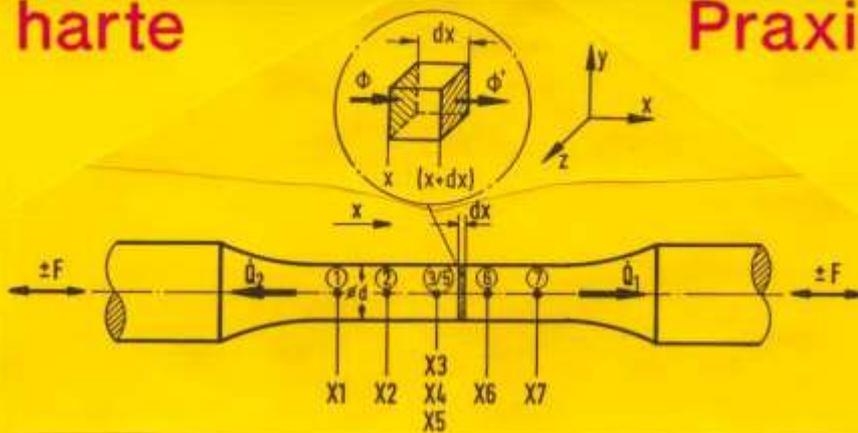


ABB
 ASEA BROWN BOVERI

Schlussfolgerungen

Intelligenz

Toleranz

Design

**Ober-
flächen-
schutz**

Material

**Bean-
spruchung**

**Daten-
basis**

mehr Hirn,
Schädigung

Zähigkeit,
Reinheit,
fehler tolerant

Folgekosten,
Konstruktions-
Intelligenz

System-
entwicklung

stress-
spezifisch,
Gradienten-
werkstoffe

EDV, FEM,
Messung

Datenbanken,
Experten-
systeme

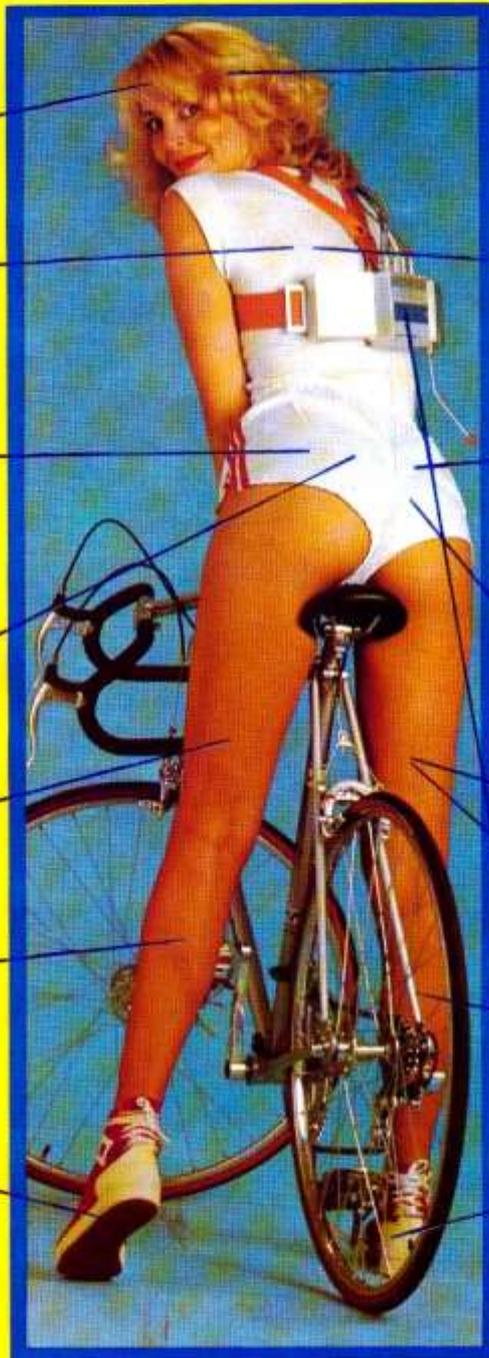


ABB
ASEA BROWN BOVERI