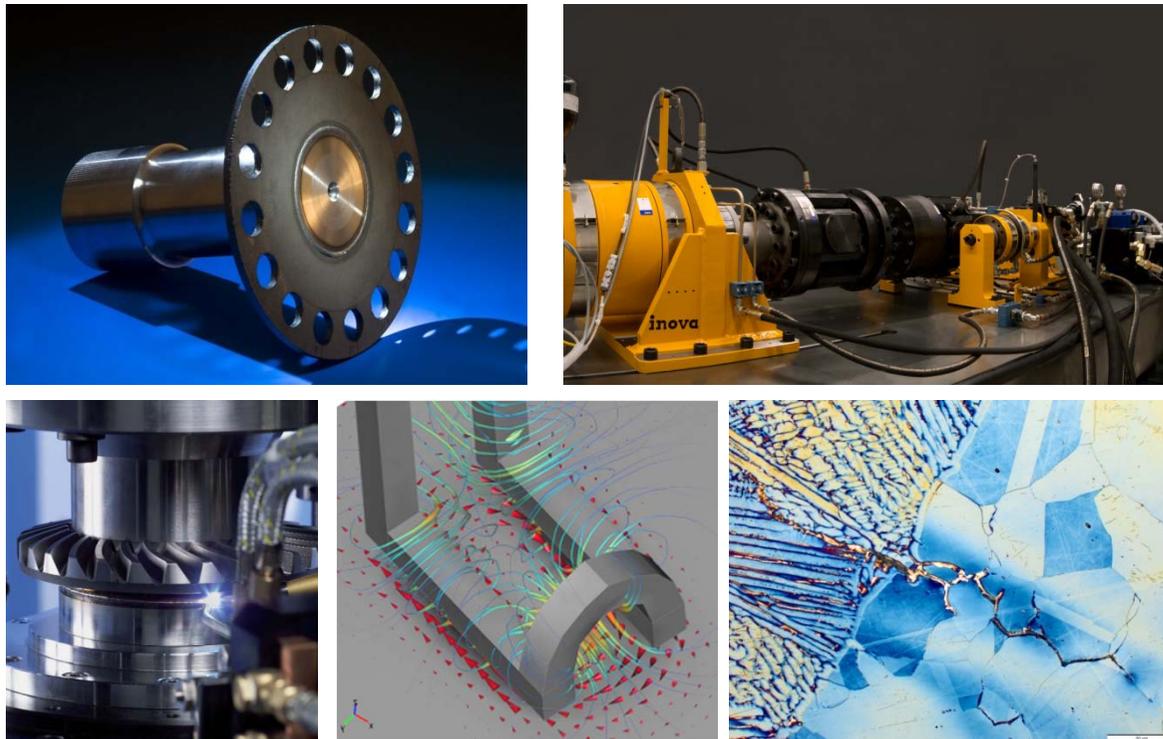


---

# Vorlesung Schadensanalyse Schweißen und Schweißnahtfehler

Dr. Jörg Bretschneider, Fraunhofer IWS Dresden  
TUD 4. Dezember 2013

---



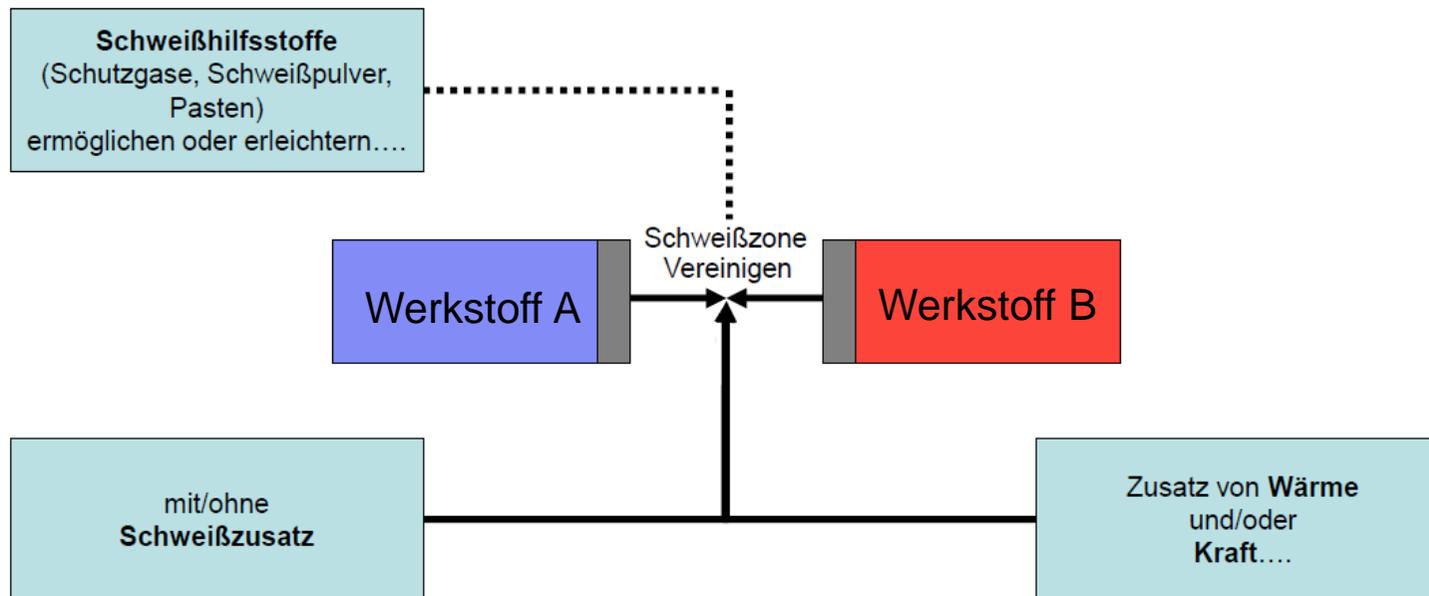
# Schweißen und Schweißnahtfehler

- Überblick:  
Schweißen – Schweißbarkeit - Schweißnahtfehler
- Beispiel 1:  
Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen
- Beispiel 2:  
Prüfung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Welle-  
Nabe- Verbindungen

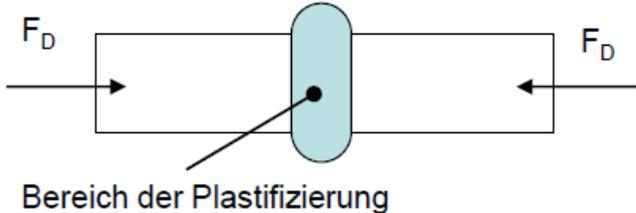
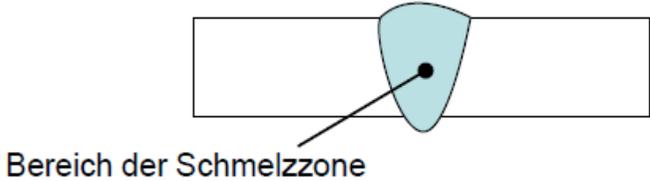
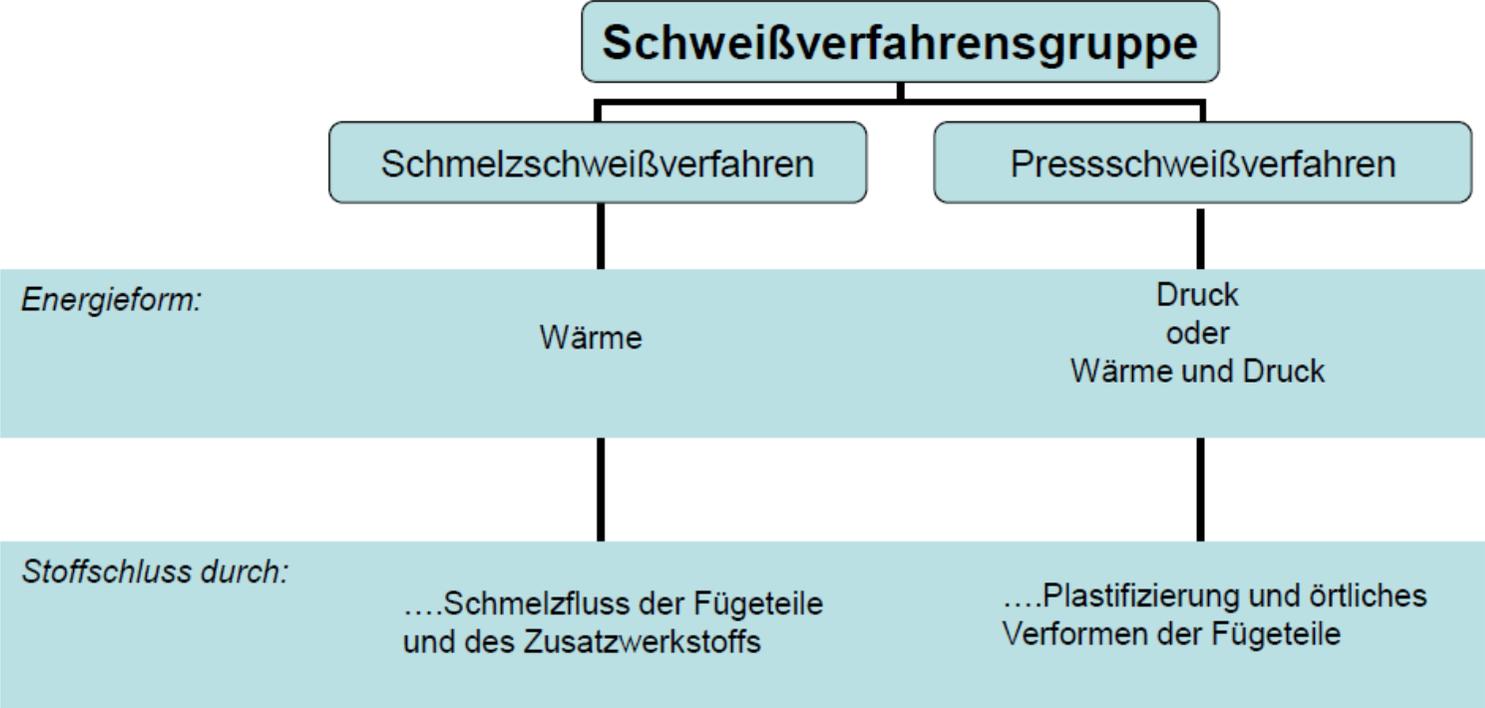
# Definition Schweißen

Definition des Begriffes Schweißen nach DIN 1910

„Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und / oder Kraft ohne oder mit Schweißzusatz.“



# Wirkprinzipien beim Schweißen





- Gasschmelzschweißen
- Lichtbogenschweißen
- Strahlschweißen
  - Laserstrahlschweißen
  - Elektronenstrahlschweißen
  - Ionenstrahlschweißen
  - ....
- weitere Verfahren

- Widerstandsschweißen
- Reibschweißen
- weitere Verfahren

# Laserstrahlschweißen

- hohe Schweißgeschwindigkeit
- Tiefschweißverfahren
- schmale, schlanke Nahtform
- geringer thermischer Verzug

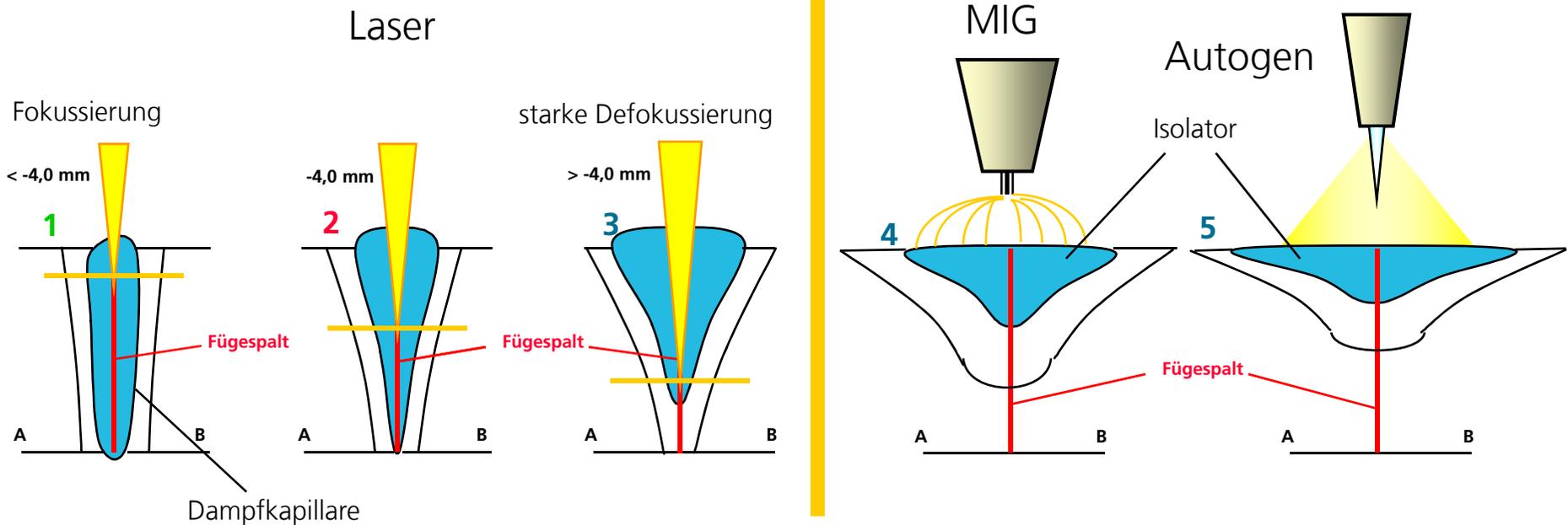
Tiefschweißen

Wärmeleitungsschweißen



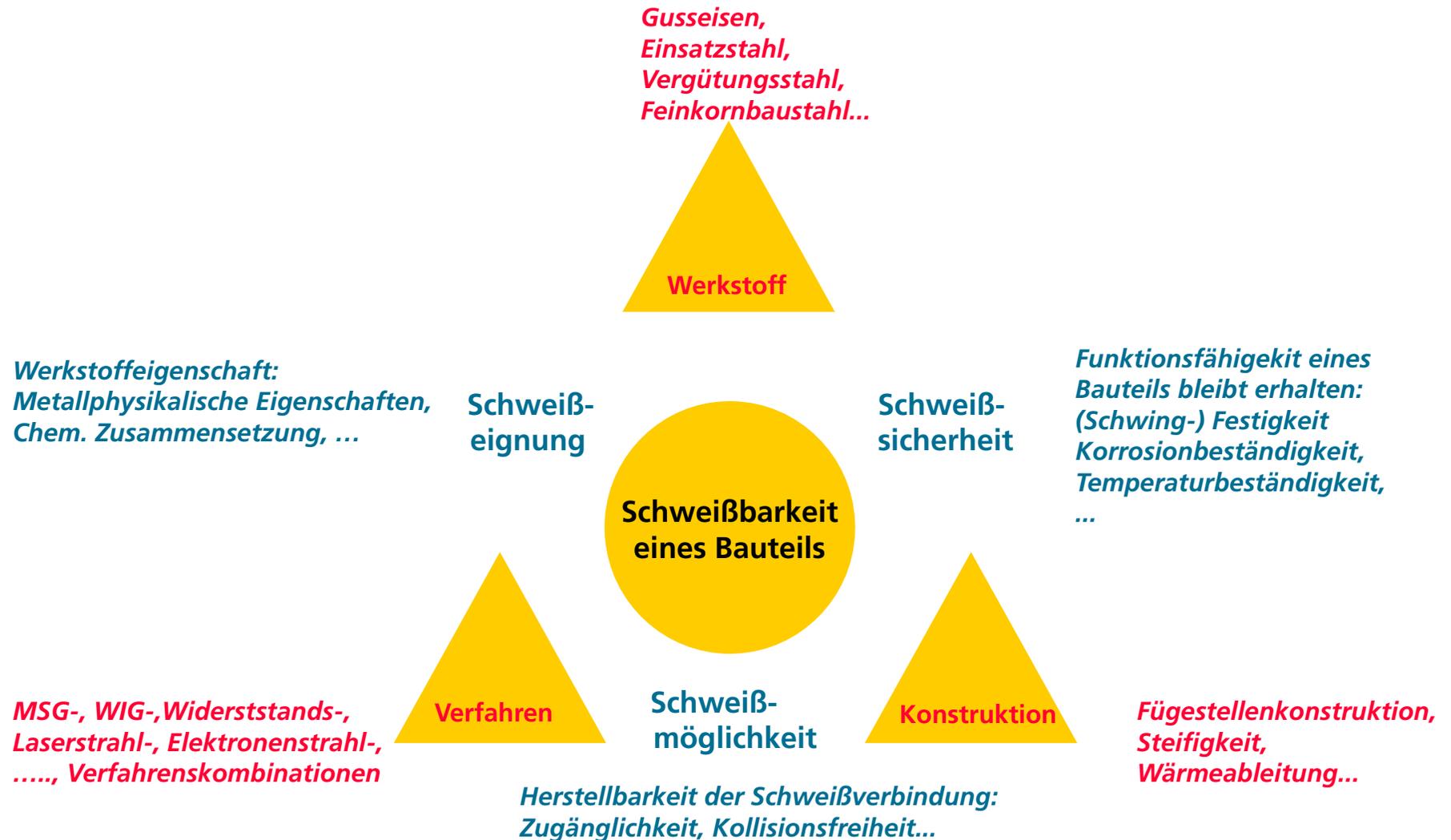
Leistungsdichte nimmt zu

Leistungsdichte nimmt ab



# Schweißbarkeit eines Bauteils

Zusammenhang zwischen den die Schweißbarkeit bestimmenden Einflussgrößen



# Beispiel: Schweißbeignung - Kohlenstoffäquivalent

Empirisch ermittelte Gleichungen zur Bestimmung des Kohlenstoffäquivalents CE:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{Si}{24} \quad \text{in \%}$$

DS 952.01

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad \text{in \%}$$

für niedriglegierte Stähle , IIW

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{15} \quad \text{in \%}$$

für C-Mn-Stähle mit  $t_{8/5} > 10s$

$$CE = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn+Cu}{16} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15} \quad \text{in \%}$$

Mannesmann

$$CE = C + \frac{Si+Mn+Cu+Cr+Ni+Mo+V}{20} \quad \text{in \%}$$

Hoesch

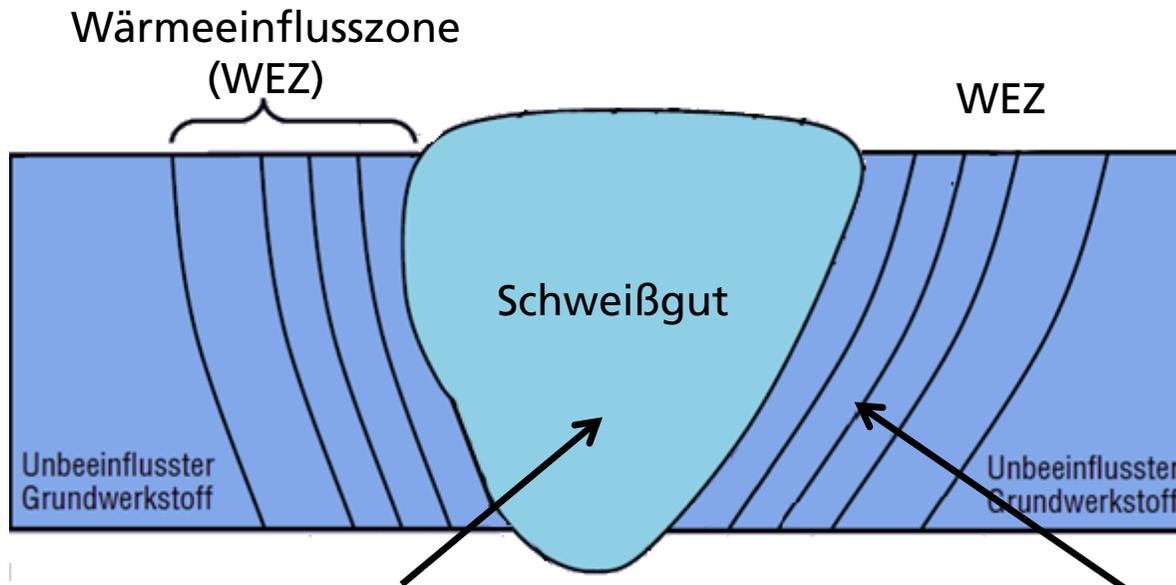
**CE ~ 0,45** gut schweißgeeignet, Schweißen ohne Vorwärmung

**CE bis 0,6** bedingt schweißgeeignet, Schweißen mit Vorwärmung auf 100-200°C

**CE über 0,6** nicht schweißgeeignet (ggf. mit Vorwärmung auf 200-300°C)

# Schweißbeignung

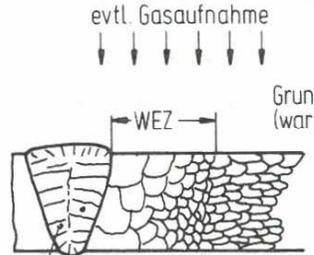
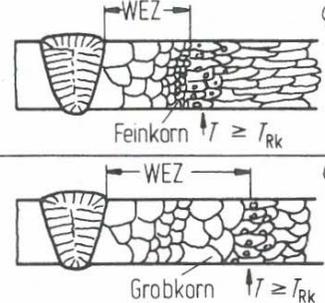
Änderungen im Gefüge durch den Schweißprozess (ohne Schweißnahtfehler!)



- Vermischung
- Bildung eines Gussgefüges
- Zwangslösung von Begleitelementen
- Ausscheidungsvorgänge (Auflösung)
- Seigerungen
- Abdampfung
- Schrumpfung und Eigenspannungen
- Änderung der mechanischen Eigenschaften
- Kornwachstum
- Phasenumwandlungen
- Ausscheidungsvorgänge (Überalterung)
- Seigerungen (Korngrenzen)
- Festigkeitsänderungen
- Stahl: Aufhärtung
- ...

# Schweißbeignung

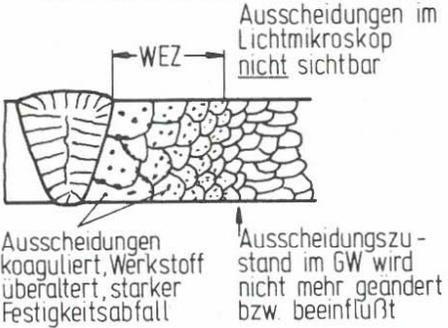
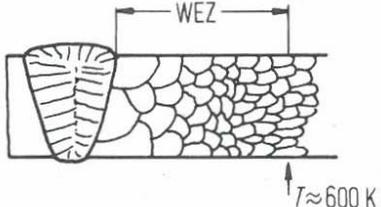
## Vorgänge in der Wärmeeinflusszone

| Werkstoff   | Mikrogefüge der WEZ   | Eigenschaftsänderungen, werkstoffliche Vorgänge   |
|---|---|---|
| Stahl,<br>z. B. S235<br>( $C \approx 0,15\%$ )<br>z. B. C45<br>( $C \approx 0,45\%$ ) |  <p>WEZ</p> <p>evtl. grobkörniger spröder Martensit</p> <p><math>T \approx A_{c1}</math> beginnende Perlitausbildung</p> <p><math>T \approx A_{c3}</math> Feinkornzone</p>                             | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wichtigstes Problem ist das Entstehen von Härtespitzen im Bereich der Schmelzgrenze durch Martensitbildung.</li> <li>2. Daher <math>C \leq 0,2\%</math> in schweißgeeigneten Stählen.</li> <li>3. <math>C &gt; 0,3\%</math>: Vorwärmen und meistens Wärmenachbehandlung erforderlich.</li> </ol>  |
| umwandlungs-<br>freier<br>Werkstoff,<br>z. B.<br>Nickel,<br>Aluminium,<br>Kupfer      |  <p>evtl. Gasaufnahme</p> <p>WEZ</p> <p>Grundwerkstoff (warmgewalzt)</p> <p>Poren</p> <p><math>T_1</math></p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. WEZ mit kontinuierlich abnehmender Korngröße. Breite der WEZ bestimmt durch Schweißdaten, Ein- oder Mehrlagentechnik, Leistungsdichte des Schweißverfahrens.</li> <li>2. Sekundäre Probleme durch starke Neigung zur Gasaufnahme (Verspröden, Poren), große thermische Leitfähigkeit (Verzug), großer Ausdehnungskoeffizient (Verzug, Eigenspannungen).</li> </ol>  |
| kaltverfestigter<br>Werkstoff,<br>z. B.<br>kaltgezogenes<br>Aluminium                 |  <p>WEZ</p> <p><math>\varphi \gg \varphi_{krit.}</math></p> <p>Feinkorn <math>T \geq T_{Rk}</math></p> <p><math>\varphi \approx \varphi_{krit.}</math></p> <p>Grobkorn <math>T \geq T_{Rk}</math></p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bereiche mit <math>T \geq T_{Rk}</math> sind rekristallisiert, d.h. Verfestigung ist aufgehoben, ursprüngliche Festigkeit nur durch erneutes Kaltverformen nach Schweißen erreichbar. Breite der WEZ i.a. deutlich breiter als bei lfd. Nr. 1, da <math>T_{Rk} &lt; T_1</math>. Festigkeitsabfall muß durch Verfahren mit großer Leistungsdichte klein gehalten werden.</li> <li>2. Bei Stahl kann durch künstliche Alterung in Bereichen mit <math>T \approx 500\text{ K}</math> bis <math>600\text{ K}</math> starker Zähigkeitsabfall auftreten.</li> <li>3. Bei kritisch verformten Teilen entsteht auch Grobkorn in Bereichen mit <math>T \geq T_{Rk}</math>.</li> </ol> |

[Bargel, Schulze: Werkstoffkunde 2000; S.80]

# Schweißbeignung

## Vorgänge in der Wärmeeinflusszone

| Werkstoff   | Mikrogefüge der WEZ   | Eigenschaftsänderungen, werkstoffliche Vorgänge   |
|---|---|---|
| <p>ausscheidungsgehärteter Werkstoff, z. B. AlCuMg-Legierungen NiCoMo 18 9 5 PAS-Stähle</p> |  <p>Ausscheidungen im Lichtmikroskop nicht sichtbar</p> <p>WEZ</p> <p>Ausscheidungen koaguliert, Werkstoff überaltert, starker Festigkeitsabfall</p> <p>Ausscheidungszustand im GW wird nicht mehr geändert bzw. beeinflusst</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Auflösung und Wiederausscheiden der Ausscheidungen in nicht optimaler Form und Verteilung, Festigkeits- und Zähigkeitsabfall. Bereich mit Koagulation der Ausscheidungen (Überaltern) durch erneutes Aushärten nach dem Schweißen zu beseitigen.</li> <li>2. Korngrenzenausscheidungen führen häufig zur Rißbildung.</li> <li>3. Besser im lösungsgeglühten Zustand schweißen.</li> <li>4. Durch grobe Ausscheidungen erheblich verringerte Korrosionsbeständigkeit.</li> </ol> |
| <p>Hochreaktive Werkstoffe, z. B. Titan, Tantal, Zirkon, Molybdän</p>                       |  <p>WEZ</p> <p><math>T \approx 600 \text{ K}</math></p>   | <p>Hauptproblem ist die ausgeprägte Versprödung durch Aufnahme atmosphärischer Gase schon bei Temperaturen ab 600 K. Schweißen unter Vakuum, oder Schweißbereich großflächig vor Luftzutritt schützen (Edelgase).</p>   |

[Bargel, Schulze: Werkstoffkunde 2000; S.80]

# Schweißnahtfehler (Übersicht I)

## Fertigungsbedingte Schweißfehler

### Äußere Nahtfehler

- Spritzer und Zündstellen
- Einbrandkerben
- Nahtformfehler

### Innere Nahtfehler

- Bindefehler
- Schlackeeinschlüsse
- Porenbildung

## Werkstoffverursachte Schweißfehler

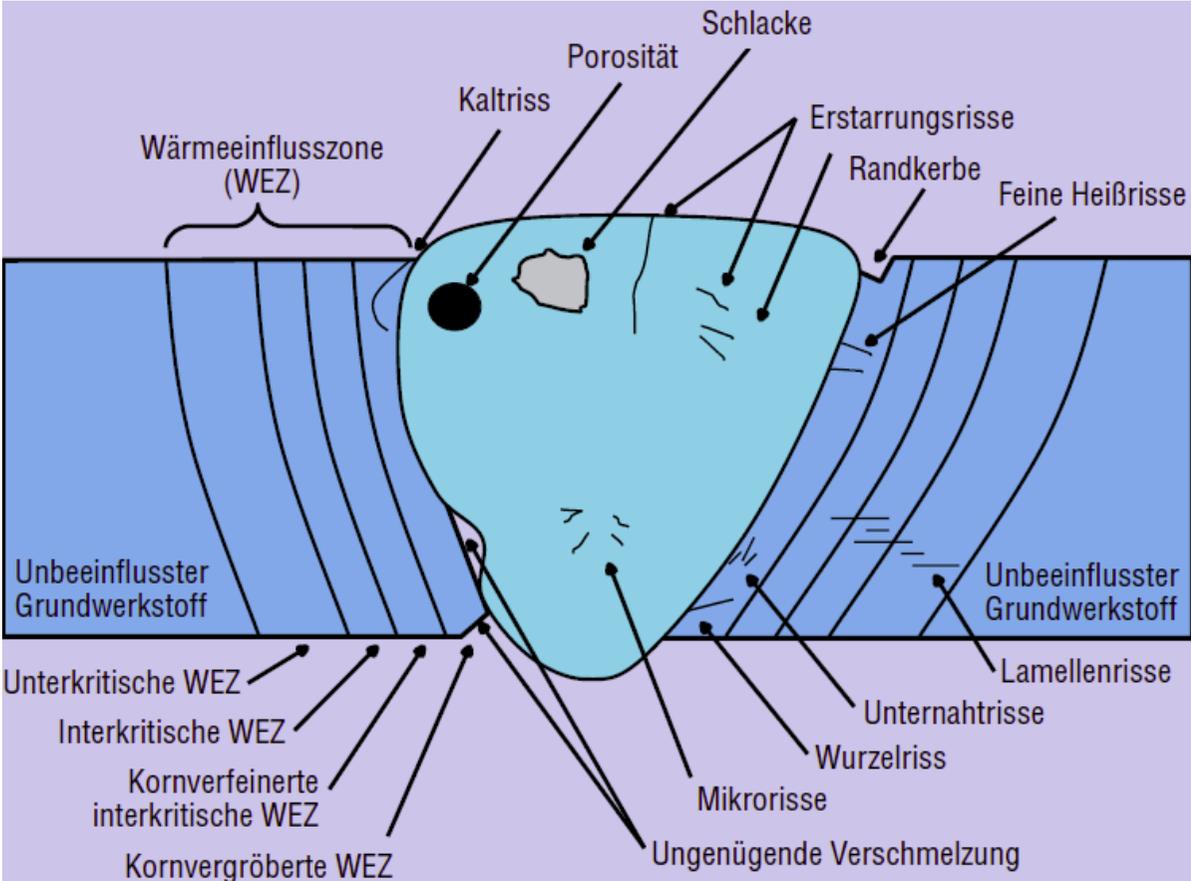
### Heißrisse

- Erstarrungsrisse
- Wiederaufschmelzungsrisse
- Risse durch Zähigkeitsabfall

### Kaltrisse

- Aufhärtungsrisse
- Wasserstoffrisse
- Lamellenrisse
- Ausscheidungsrisse

# Schweißnahtfehler (Übersicht II)



# Fertigungsbedingte Schweißfehler

## Klassifizierung und Bewertung nach EN ISO 5817

Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten

### Beispiele:

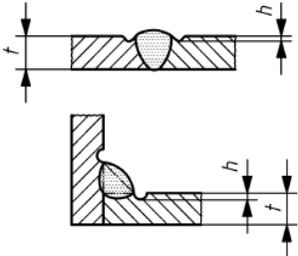
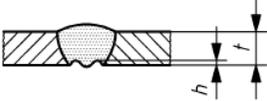
| Nr  | Ordnungs-Nr nach ISO 6520-1:1998 | Unregelmäßigkeit Benennung            | Bemerkungen   | r mm  | Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen            |  |  |
|-----|----------------------------------|---------------------------------------|---|-------|--|--|--|
|     |                                  |                                       |   |       | D  | C  | B  |
| 2.3 | 2011<br>2012                     | Pore Porosität (gleichmäßig verteilt) | <p>Die folgenden Bedingungen und Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten müssen erfüllt werden; siehe auch Anhang A zur Information.</p> <p>a1) Größtmaß der Fläche der Unregelmäßigkeit (einschließlich systematischer Unregelmäßigkeit) bezogen auf die projizierte Fläche.</p> <p>ANMERKUNG Die Porosität in der Abbildungsfläche hängt von der Anzahl der Lagen ab (Volumen der Schweißnaht).</p> <p>a2) Größtmaß der Unregelmäßigkeit in der Querschnittsfläche (einschließlich systematischer Unregelmäßigkeit) bezogen auf die gebrochene Oberfläche (nur in der Produktion, bei Schweißer- oder Verfahrensprüfungen anwendbar).</p> <p>b) Größtmaß einer einzelnen Pore für<br/>— Stumpfnähte<br/>— Kehlnähte</p> | ≥ 0,5 | Einlagig: ≤ 2,5 %<br>Mehrlagig: ≤ 5 %                              | Einlagig: ≤ 1,5 %<br>Mehrlagig: ≤ 3 %                              | Einlagig: ≤ 1 %<br>Mehrlagig: ≤ 2 %                                |
|     |                                  |                                       |   | ≥ 0,5 | ≤ 2,5 %  | ≤ 1,5 %  | ≤ 1 %  |
|     |                                  |                                       |   | ≥ 0,5 | $d \leq 0,4 s$ , aber max. 5 mm<br>$d \leq 0,4 a$ , aber max. 5 mm | $d \leq 0,3 s$ , aber max. 4 mm<br>$d \leq 0,3 a$ , aber max. 4 mm | $d \leq 0,2 s$ , aber max. 3 mm<br>$d \leq 0,2 a$ , aber max. 3 mm |

# Fertigungsbedingte Schweißfehler

## Klassifizierung und Bewertung nach EN ISO 5817

Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten

### Beispiele:

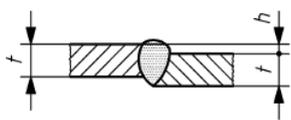
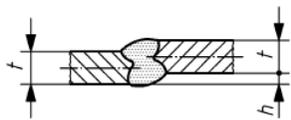
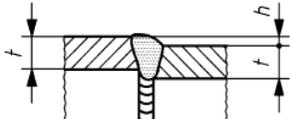
| Nr. | Ordnungs-Nr nach ISO 6520-1:1998 | Unregelmäßigkeit Benennung                                       | Bemerkungen  | t mm      | Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen    |  |  |
|-----|----------------------------------|--|--|-----------|--|--|--|
|     |                                  |  |  |           | D  | C  | B  |
| 1.7 | 5011<br>5012                     | Durchlaufende Einbrandkerbe<br>Nicht durchlaufende Einbrandkerbe | Weicher Übergang wird verlangt.<br>Wird nicht als systematische Unregelmäßigkeit angesehen.<br> | 0,5 bis 3 | Kurze Unregelmäßigkeit:<br>$h \leq 0,2 t$                  | Kurze Unregelmäßigkeit:<br>$h \leq 0,1 t$                  | Nicht zulässig   |
|     |                                  |  |  | > 3       | $h \leq 0,2 t$ , aber max. 1 mm                            | $h \leq 0,1 t$ ,<br>aber max. 0,5 mm                       | $h \leq 0,05 t$ ,<br>aber max. 0,5 mm                            |
| 1.8 | 5013                             | Wurzelkerbe  | Weicher Übergang wird verlangt.<br>  | 0,5 bis 3 | $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 t$                            | Kurze Unregelmäßigkeit:<br>$h \leq 0,1 t$                  | Nicht zulässig   |
|     |                                  |  |  | > 3       | Kurze Unregelmäßigkeit:<br>$h \leq 0,2 t$ , aber max. 2 mm | Kurze Unregelmäßigkeit:<br>$h \leq 0,1 t$ , aber max. 1 mm | Kurze Unregelmäßigkeit:<br>$h \leq 0,05 t$ ,<br>aber max. 0,5 mm |

# Fertigungsbedingte Schweißfehler

## Klassifizierung und Bewertung nach EN ISO 5817

Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten

Beispiele:

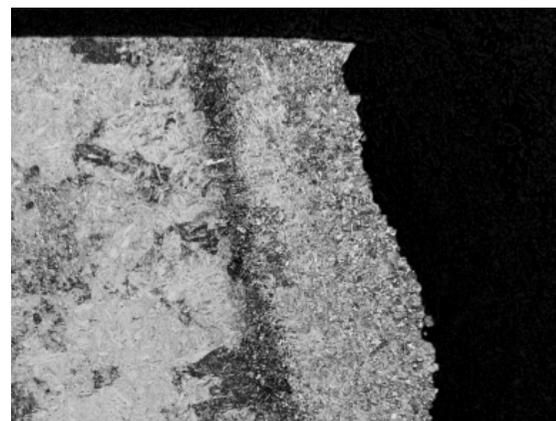
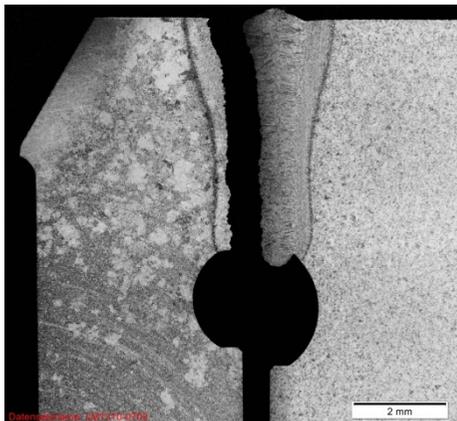
| Nr   | Ordnungs-Nr nach ISO 6520-1:1998 | Unregelmäßigkeit Benennung | Bemerkungen  | t mm       | Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen |                                     |                                    |
|--|----------------------------------|----------------------------|--|------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|
|  |                                  |                            |  |            | D   | C                                   | B                                  |
| <b>3 Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie</b> |                                  |                            |  |            |   |                                     |                                    |
| 3.1  | 507                              | Kantenversatz              | Die Grenzwerte für die Abweichungen beziehen sich auf die einwandfreie Lage. Wenn nicht anderweitig vorgeschrieben, ist die einwandfreie Lage gegeben, wenn die Mittellinien übereinstimmen (siehe auch Abschnitt 1). <i>t</i> bezieht sich auf die geringere Dicke. | 0,5 bis 3  | $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,25 t$                        | $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,15 t$    | $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 t$    |
|  |                                  |                            | <br><br>Bild A: Bleche mit Längsschweißungen  | > 3        | $h \leq 0,25 t$ ,<br>aber max. 5 mm                     | $h \leq 0,15 t$ ,<br>aber max. 4 mm | $h \leq 0,1 t$ ,<br>aber max. 3 mm |
|  |                                  |                            | <br>Bild B: Umfangsschweißungen  | $\geq 0,5$ | $h \leq 0,5 t$ , aber max. 4 mm                         | $h \leq 0,5 t$ , aber max. 3 mm     | $h \leq 0,5 t$ ,<br>aber max. 2 mm |

# Kaltrisse

... entstehen in der letzten Phase der Abkühlung  
(zwischen Umwandlungstemperatur und Raumtemperatur)  
oder zeitverzögert  
(bis zu einigen Tagen/Wochen nach Beendigung des Schweißvorganges).

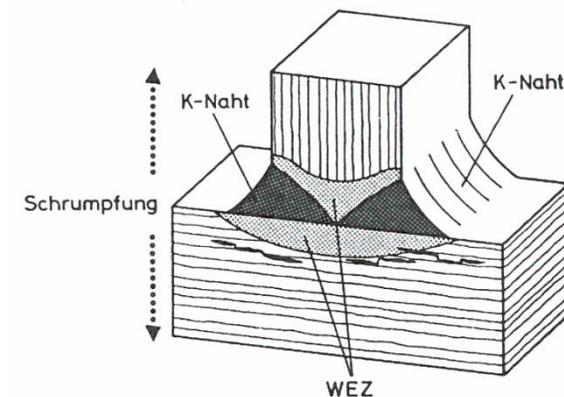
## Aufhärtungsrisse

- entstehen infolge schnellen Abkühlens und damit verbundener Aufhärtung (Martensitbildung) und verminderter Verformbarkeit
- begünstigend: Eigenspannungen, Kerbwirkungen



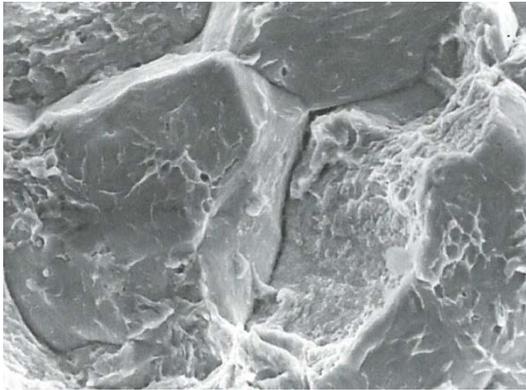
## Lamellenrisse

- parallel zu Blechoberflächen verlaufende Risse im Grundwerkstoff (oder WEZ)
- nur bei Blechen wegen Gefügezeiligkeit nach dem Walzen



# Kaltrisse

... entstehen in der letzten Phase der Abkühlung  
(zwischen Umwandlungstemperatur und Raumtemperatur)  
oder zeitverzögert  
(bis zu einigen Tagen/Wochen nach Beendigung des Schweißvorganges).



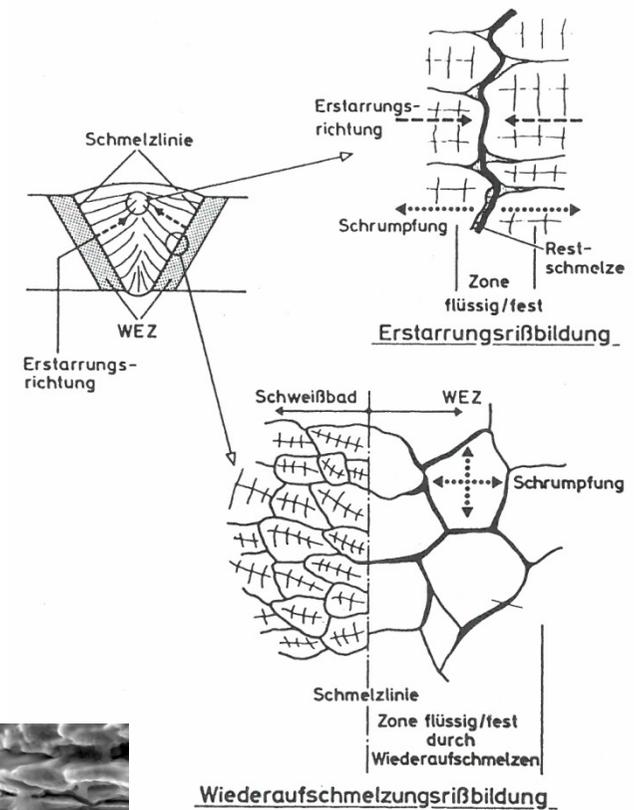
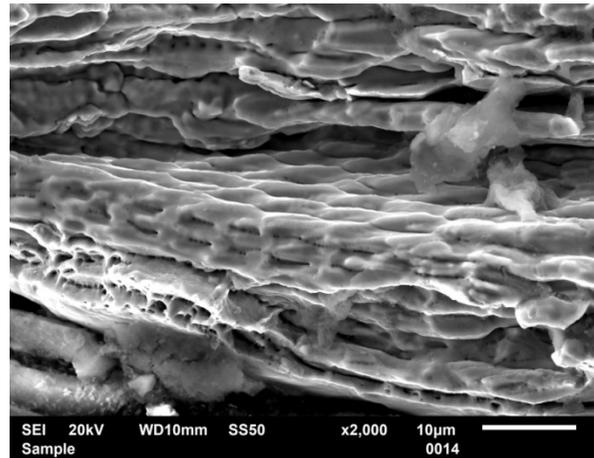
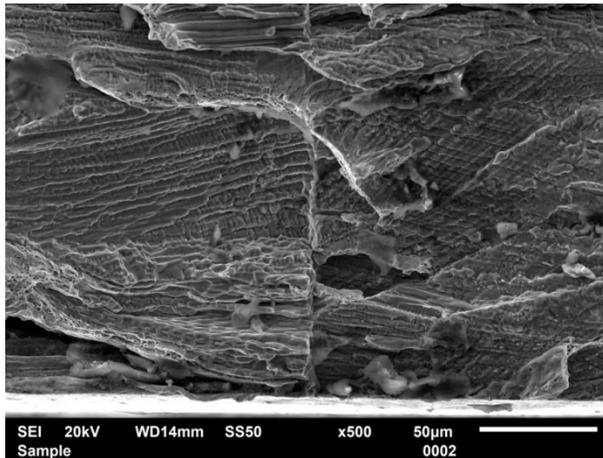
## „Wasserstoffrisse“

genauer: wasserstoffinduzierte Risse

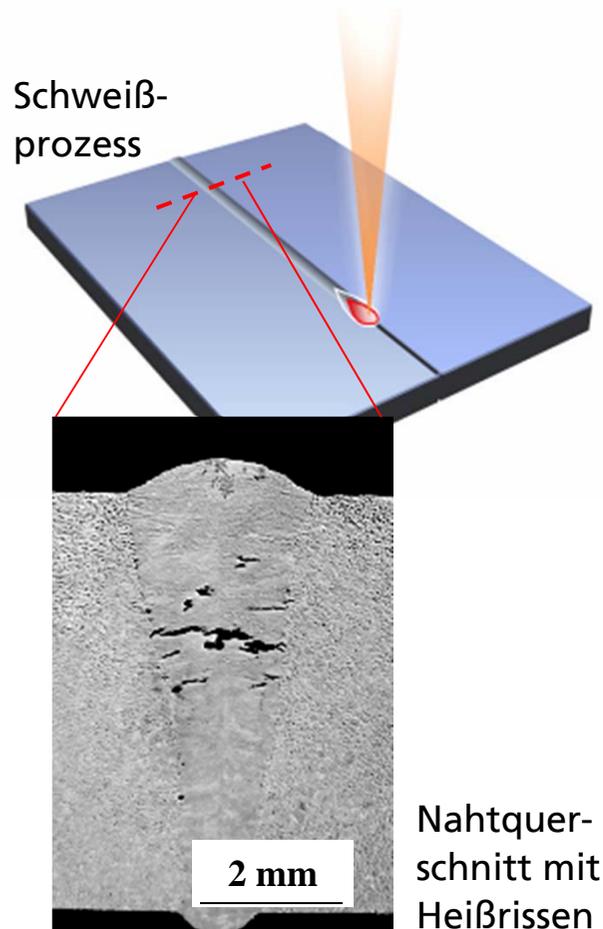
- verzögerter Bruch entsteht durch Diffusionsvorgänge im Werkstoff (Schweißgut und WEZ)
- Bei RT Diffusion von Wasserstoff im krz-Gitter möglich, besonders bei hohen Spannungen (hochfeste Stähle)
- Kennzeichen: Mikroporen, „klaffende“ Korngrenzen, „Krähenfüße“ , „Fischaugen“
- Vorsicht bei der Bewertung !!
  - theoretisch z.T. noch widersprüchlich diskutiert und modelliert
  - zu oft als Ursache benannt, obwohl nicht nachgewiesen

# Heißrisse

- ... entstehen während des Schweißens bei der Abkühlung am Übergang flüssig/fest.
- .... Heißrisse verlaufen interkristallin (interdendritisch)
- ... treten in Verbindung mit niedrigschmelzenden Substanzen auf
- Arten von Heißrissen:
  - Erstarrungsrisse
  - Wiederaufschmelzungsrisse
  - Risse durch Zähigkeitsabfall
- typisches Aussehen der Bruchflächen:



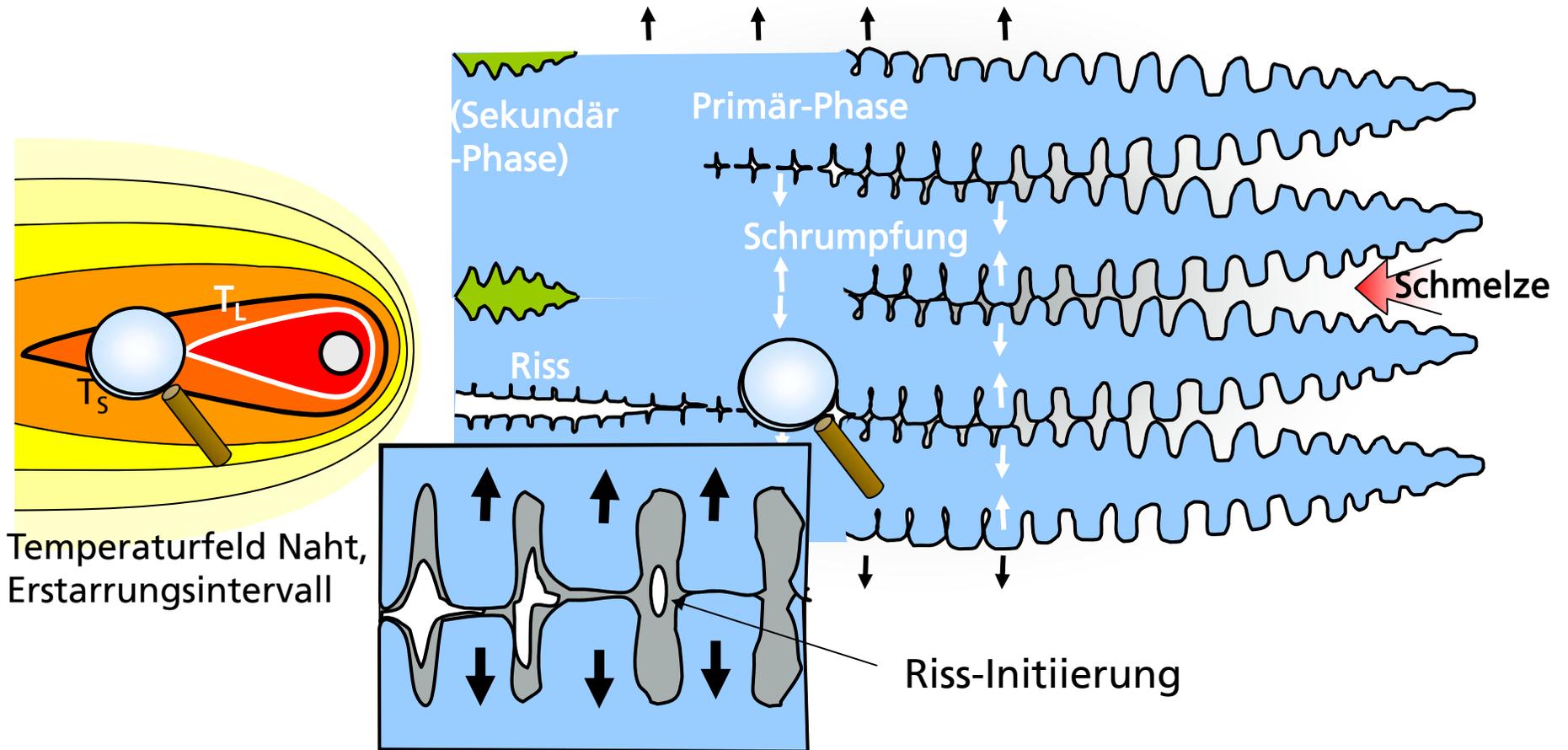
# Beispiel 1: Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen



Definition Heißrisse (HR), DVS Merkblatt 1004-1:  
„Heißrisse entstehen während des Schweißens bei Abkühlung am Übergang flüssig/fest. Heißrisse sind Materialabtrennungen, die entlang der Korngrenzen (Dendritengrenzen), also interkristallin (interdendritisch) verlaufen. Sie treten fast immer in Verbindung mit niedrigschmelzenden Substanzen auf den Korngrenzen auf. [...]“

- HR beim Laserstrahlschweißen ist ein ungelöstes Problem bei einer Vielzahl industriell wichtiger Materialien.
- Es existieren keine allgemein gültigen Ansätze zur HR-Vermeidung
- Eine Vielzahl an Stahlsorten gelten als nicht schweißbar aufgrund ihrer HR-Neigung

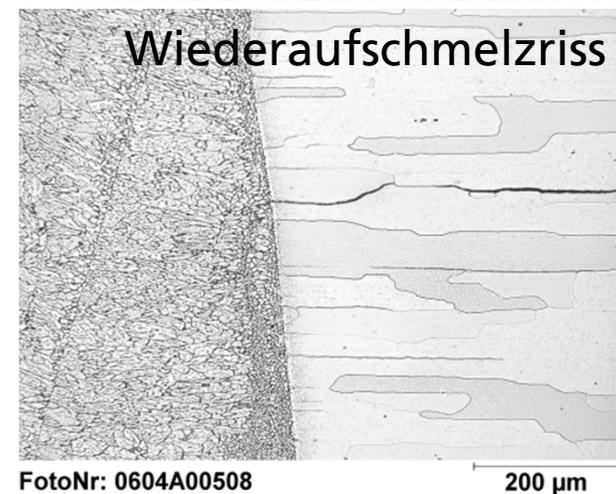
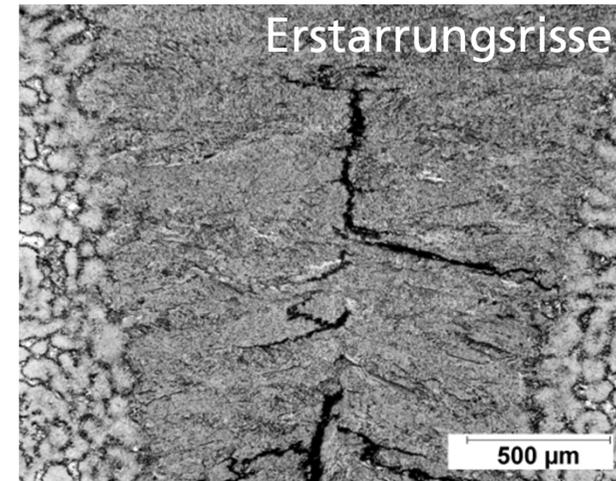
# Modellvorstellungen zur Heißrissbildung, Erstarrungsrisse Zusammenwirken metallurgischer und mechanischer Faktoren



# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

## Heißrisse – Einteilung Unterarten

| Risstyp                      | Entstehung  |
|------------------------------|---|
| Erstarrungsrisse             | Zugbeanspruchung auf Restschmelzen                                  |
| Wiederaufschmelzrisse        | Zugbeanspruchung auf geseigte Zonen mit geringerem Schmelzpunkt     |
| Risse durch Zähigkeitsabfall | Zugbeanspruchung auf kurz unter Solidustemperatur versprödete Zonen |



# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

## Heißrisse – betroffene Werkstoffe

Grundsätzlich bei allen mehrphasig erstarrenden Werkstoffen möglich, typische Vertreter:

- Unlegierte Stähle mit hohem Anteil an Verunreinigungen (primär S und P, siehe Diagramm)
- Al mit Mg  $\approx 1,5\%$  und/oder Si  $\approx 0,7\%$
- Austenitisch erstarrende Cr-Ni Stähle
- Ni-Basis Legierungen
- Ti, Mg...

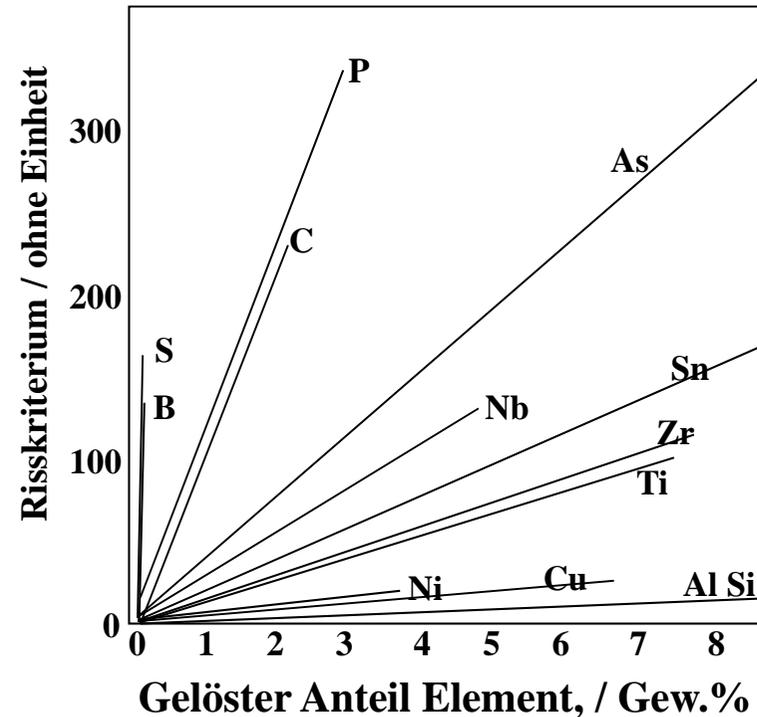


Diagramm aus: Borland, J.C.: "Suggested Explanation of Hot-Cracking in Mild and Low Alloy Steel Welds", Brit. Welding Journal, Vol. 8, H.11, 1961, Seite 526-540

# Bekannte Maßnahmen gegen HR

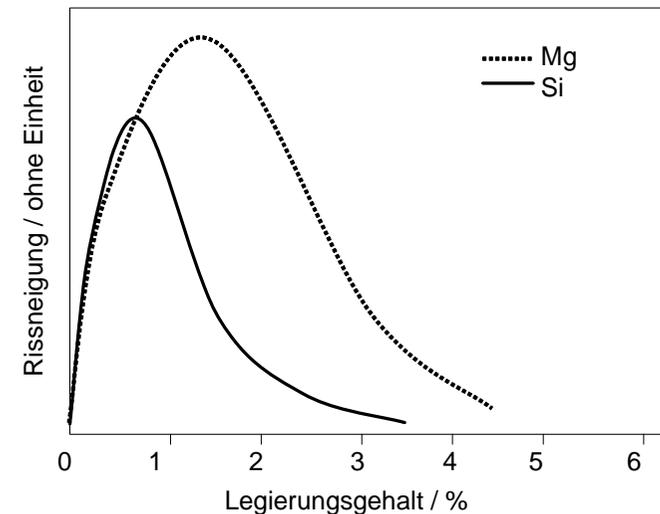
## Metallurgische Maßnahmen

### Stahl:

- Störende Elemente im GW verringern (Beispiel: C45k statt C45)
- Ferritische Primärerstarrung sichern (Zusatzdraht einsetzen: Mn↑, S↓, Ni↓)
- Abbrand nutzen (aber nur 10%)
- N-Gehalt erhöhen (Kornfeinung)
- O<sub>2</sub>-Gehalt erhöhen (senkt Benetzung der Restschmelzen an Umgebung)

### Aluminium:

- GW außerhalb Rissmaxima wählen
- Zusatzdraht einsetzen (Si↑ oder Mg↑)
- Sc oder TiB zugeben (Feinkornbildung)



# Bekannte Maßnahmen gegen HR

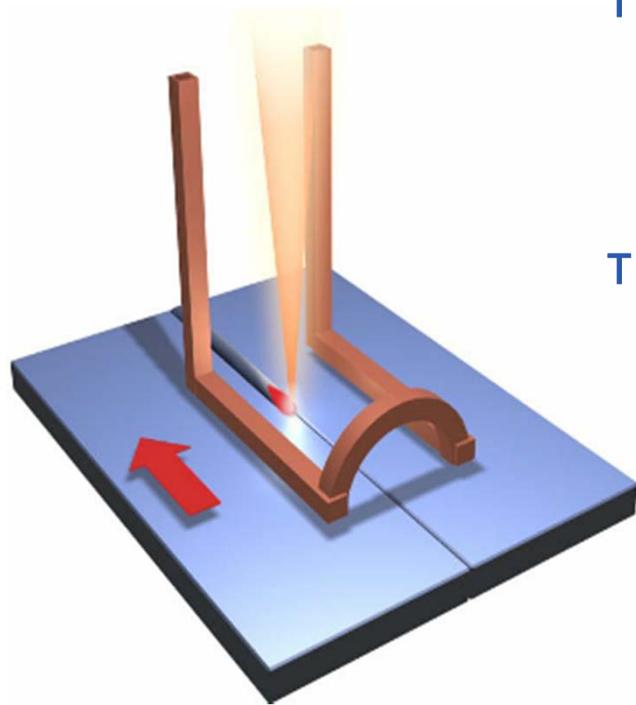
## Maßnahmen ohne metallurgischen Eingriff

- Streckenenergie  $\uparrow$   $\rightarrow$  Dehnungsunterschiede Naht $\leftrightarrow$ Umgebung $\downarrow$
- Streckenenergie  $\downarrow$   $\rightarrow$  Kornfeinung
- Wiederaufschmelzen mit geringerer Streckenenergie
- Steifigkeit Nahtumgebung  $\uparrow$   $\rightarrow$  Geringere Gesamtdehnung
- Steifigkeit Nahtumgebung  $\downarrow$   $\rightarrow$  plastifizierungsbedingte lokale Dehnungen $\downarrow$
- Form Schmelzeberandung gezielt rund einstellen (bei WIG 😊, Laser ☹)
- Aktiver mechanischer Eingriff (Risse „zusammenpressen“)
- **Temperaturfeld-Tailoring: externer Eingriff in Dehnungsunterschieden**
  - Umgebung lokal erwärmen
  - Umgebung lokal abkühlen
  - globale Schrumpfung überlagern (z.B. Ring vorher thermisch aufweiten)

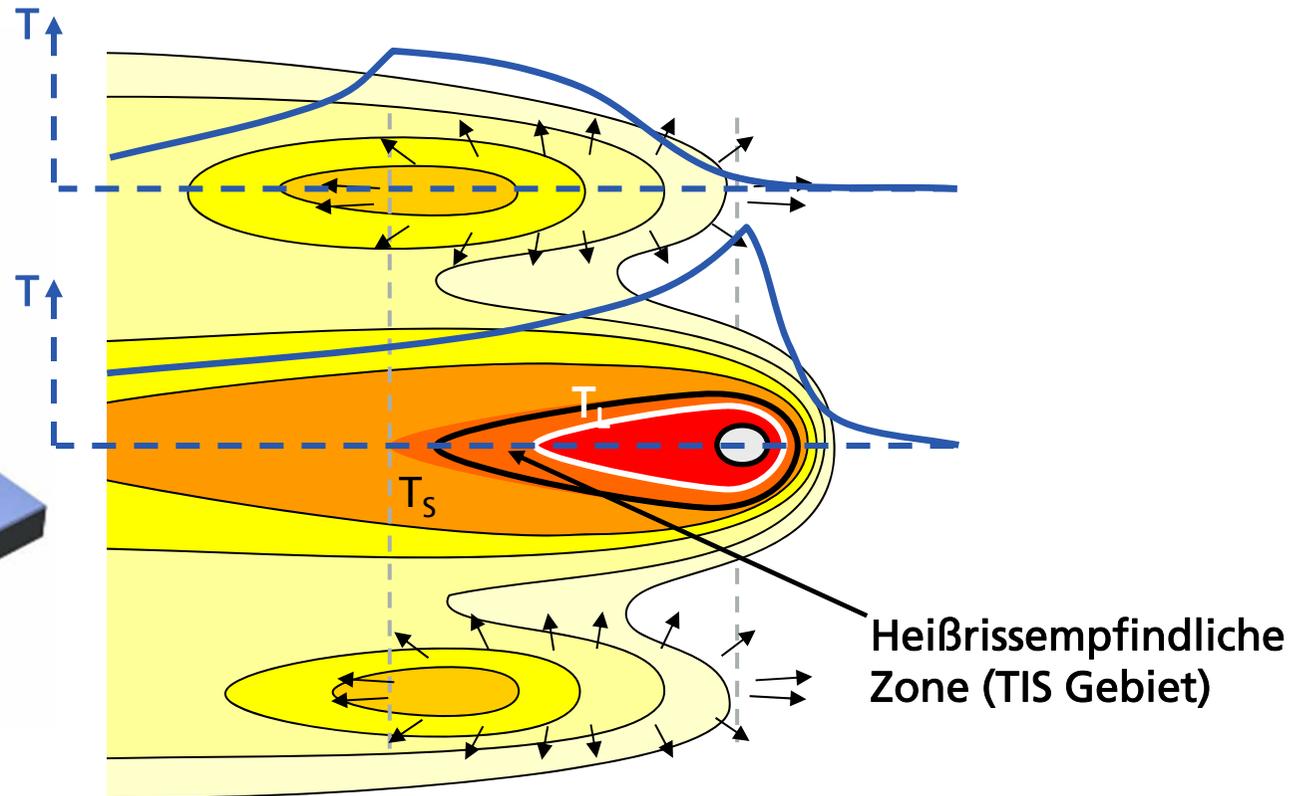
# Heißbrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

## Grundmodell Temperaturfeld-Tailoring (TT)

Direkte Überlagerung der seitlichen Druckspannungen eines Induktors mit HR-Zone



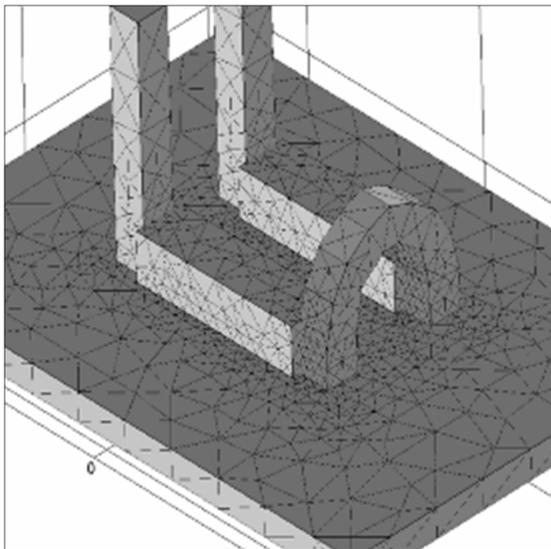
Induktoranordnung,  
schematisch



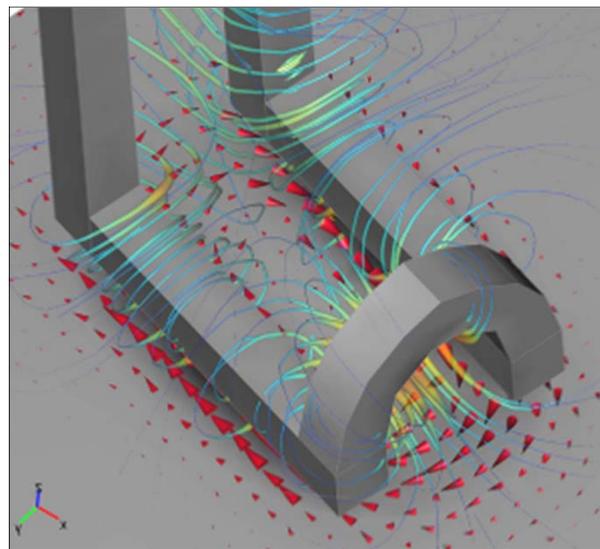
# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen TT-Verfahrensentwicklung

Simulation für Modellbildung und Optimierung

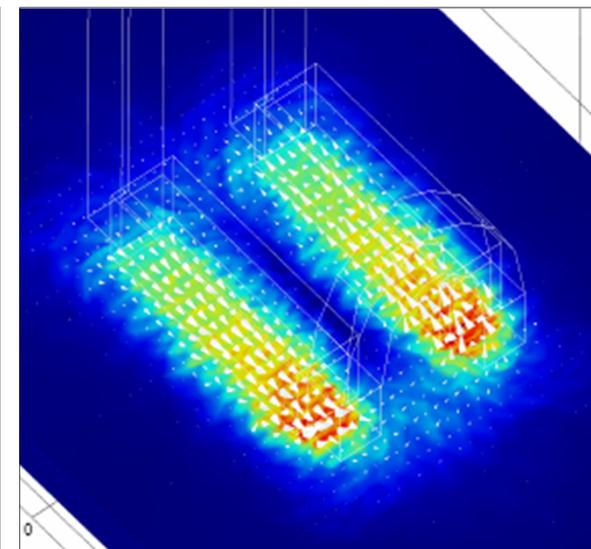
Numerische Nachbildung der EM-Felder bei induktiver Einkopplung



FEM Netz



Berechnetes Magnetfeld

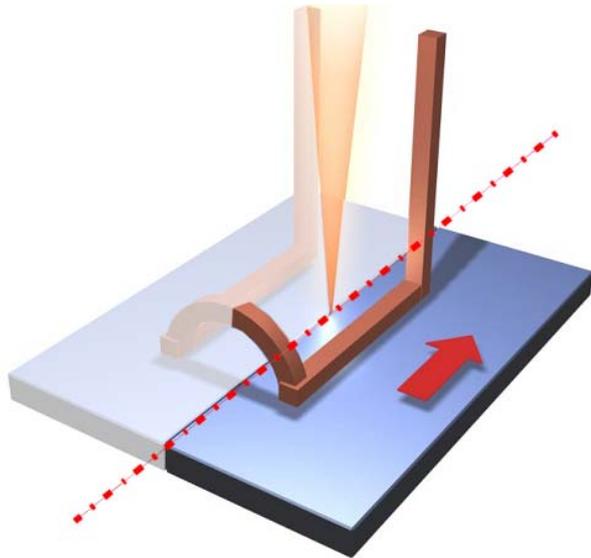


Result. Stromdichte Bauteil

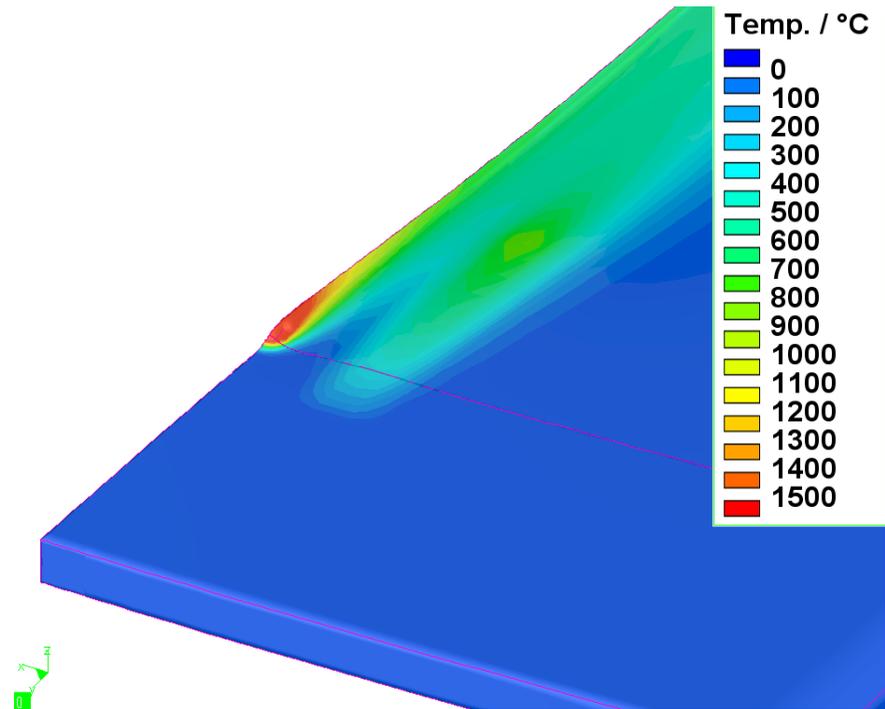
# Heißbrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

## TT-Verfahrensentwicklung

Simulation für Modellbildung und Optimierung  
Berechnung zeitliche und räumliche Temperaturverteilung



Ziel: Ermittlung der transienten Temperaturverteilung als Basis für eine metallurgisch-mechanische Rechnung



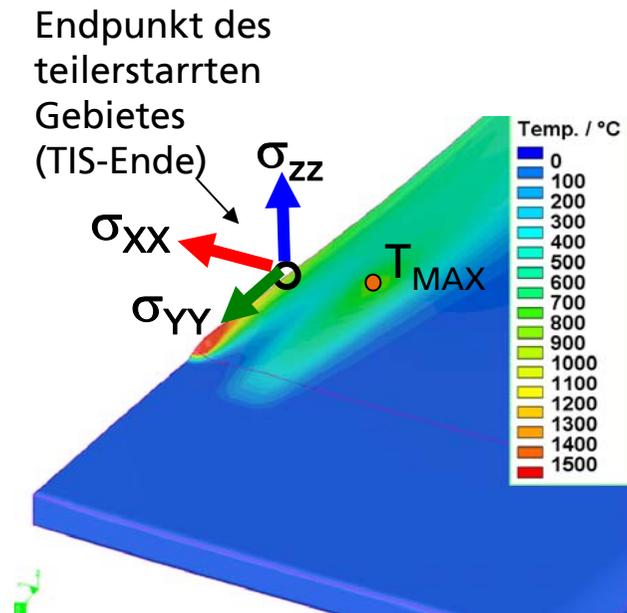
Temperaturfeld, Laser + TT, 6 mm Blech, Material: C45, Schweißgeschw.: 1,5 m/min

# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

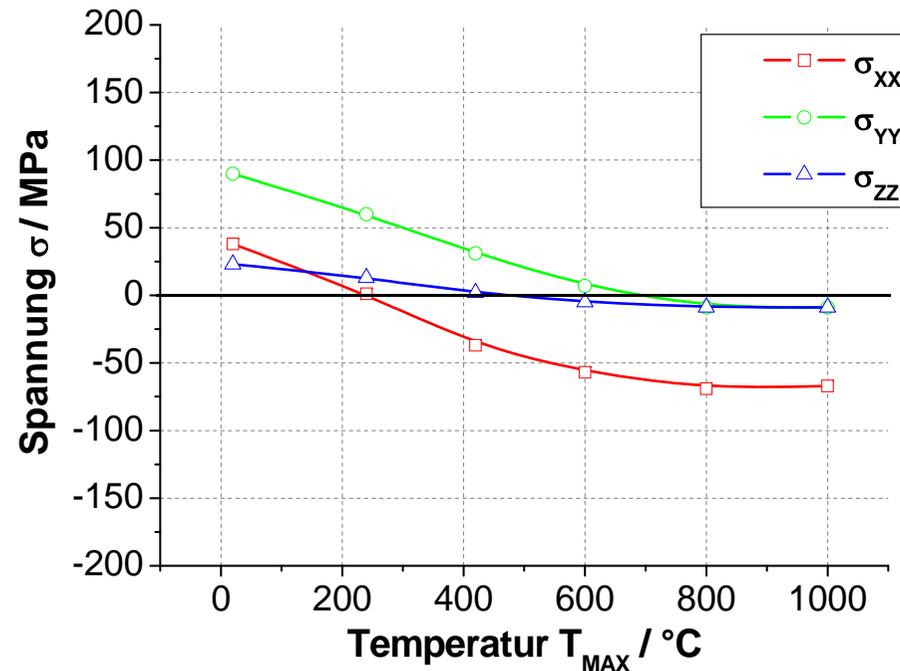
## TT-Verfahrensentwicklung

Simulation für Modellbildung und Optimierung

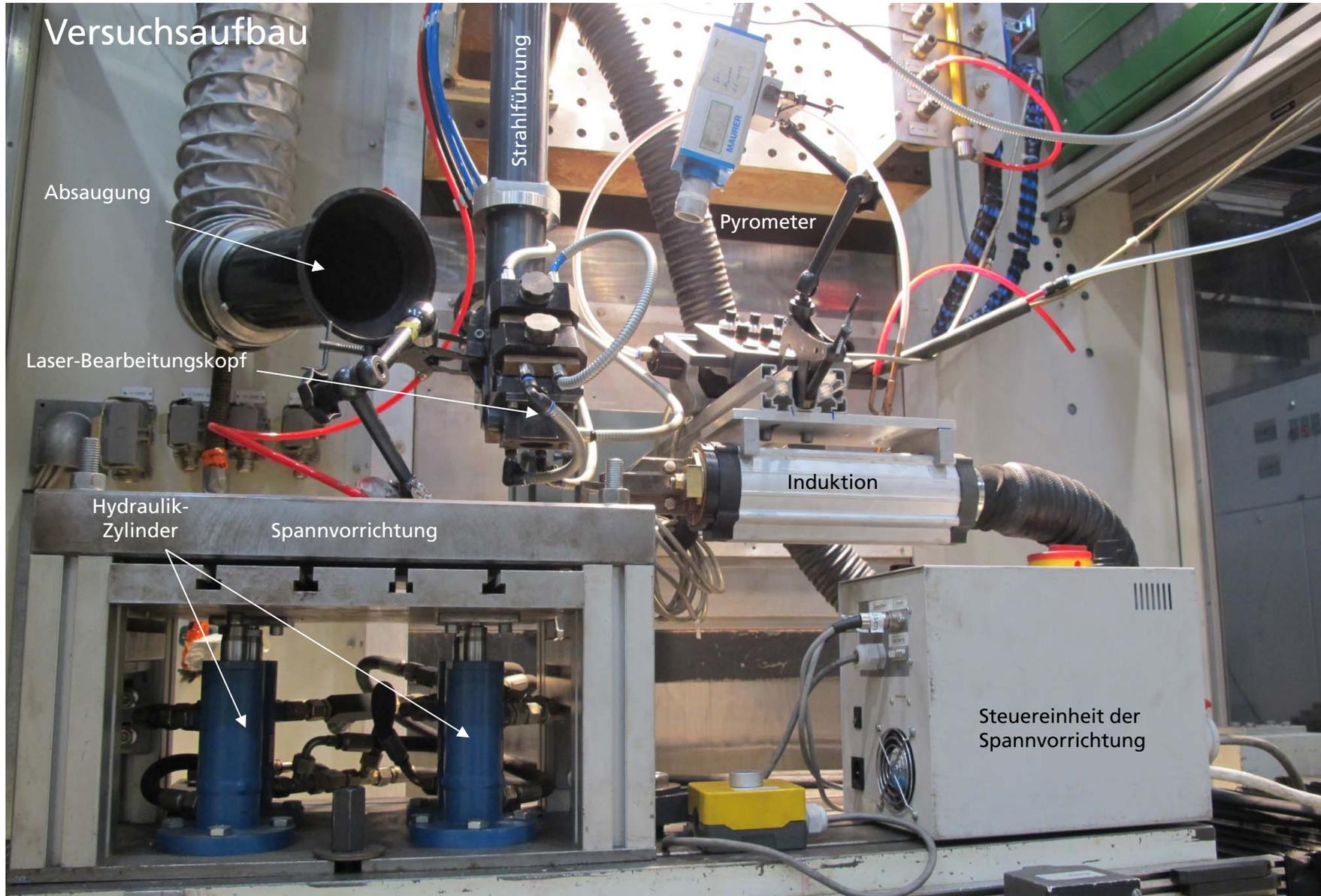
Variation der TT-Parameter, Beispiel: Zusammenhang Intensität <-> Spannungszustand



Lage Messpunkt

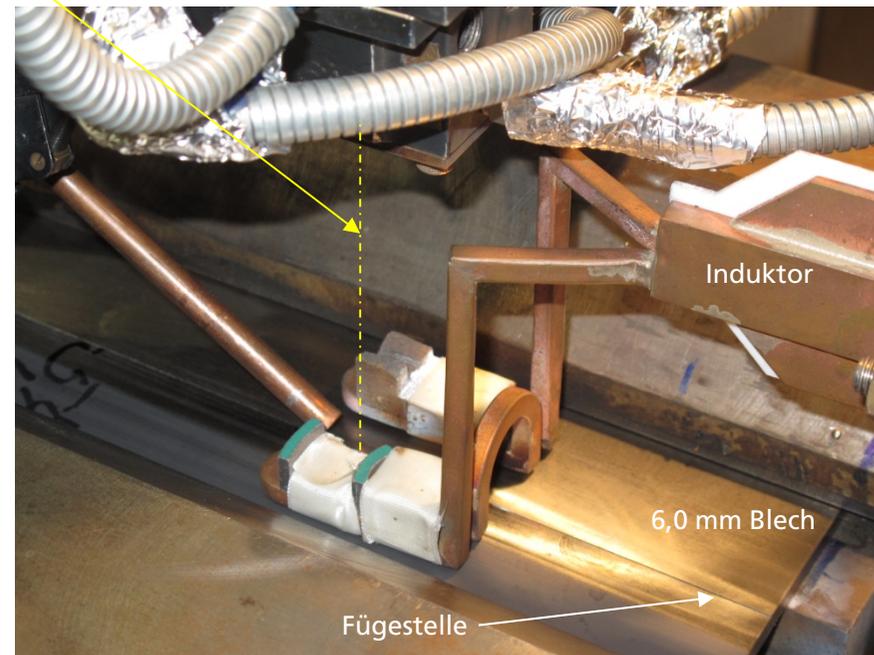
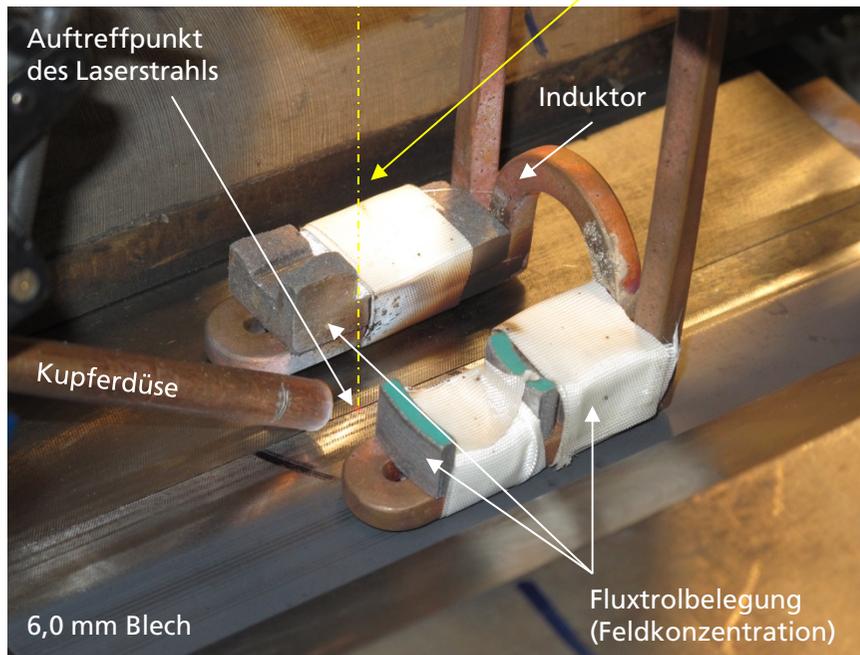


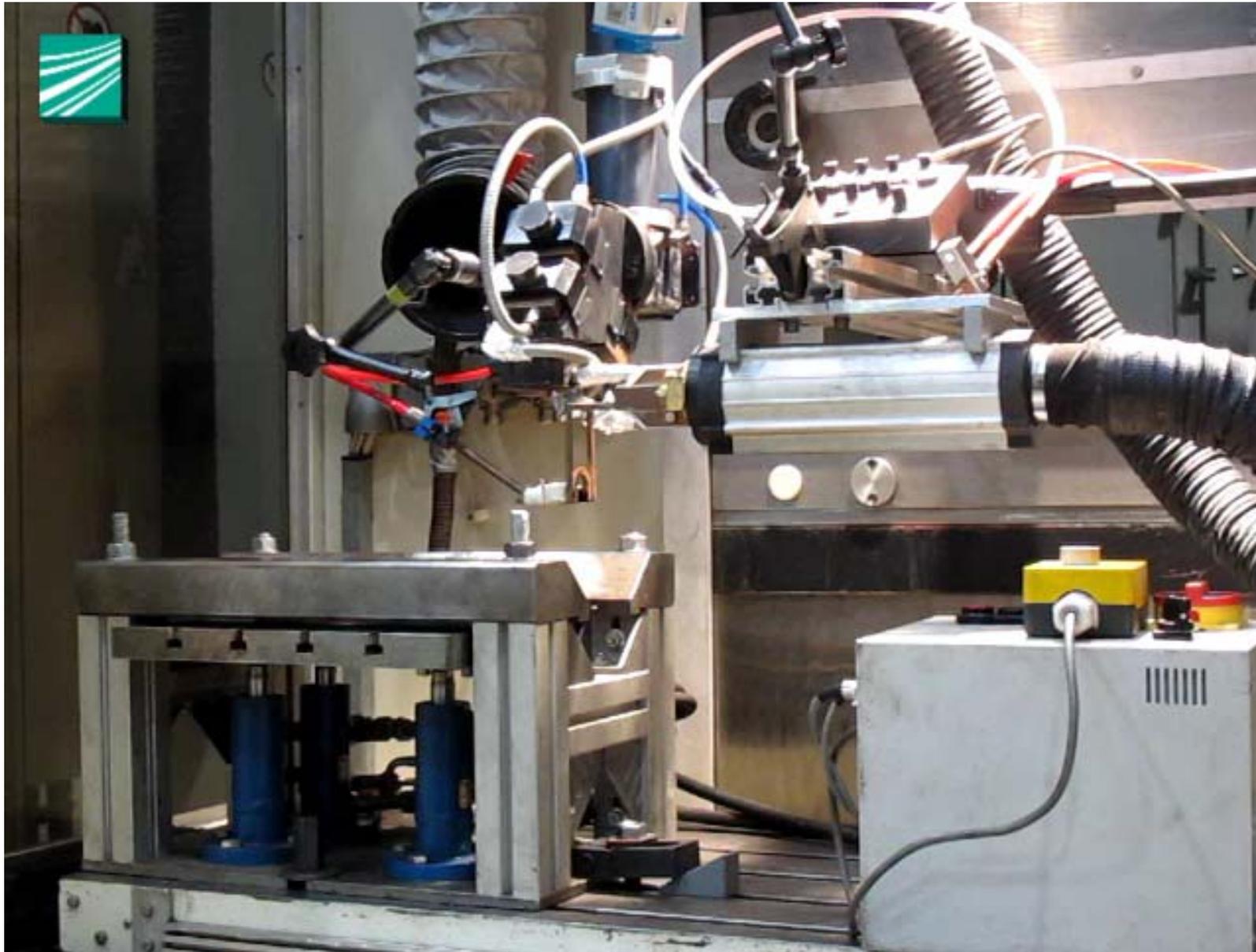
Spannungen am TIS-Ende, TT-Intensität variiert



# Position des Induktors

Mittellinie  
Laserstrahl

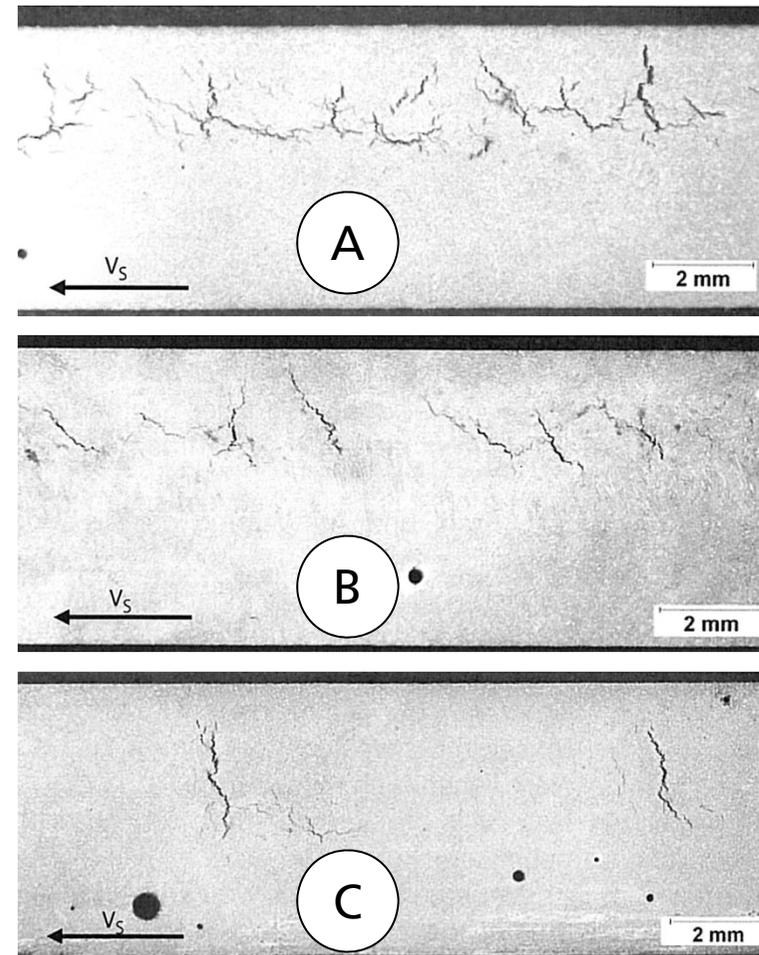
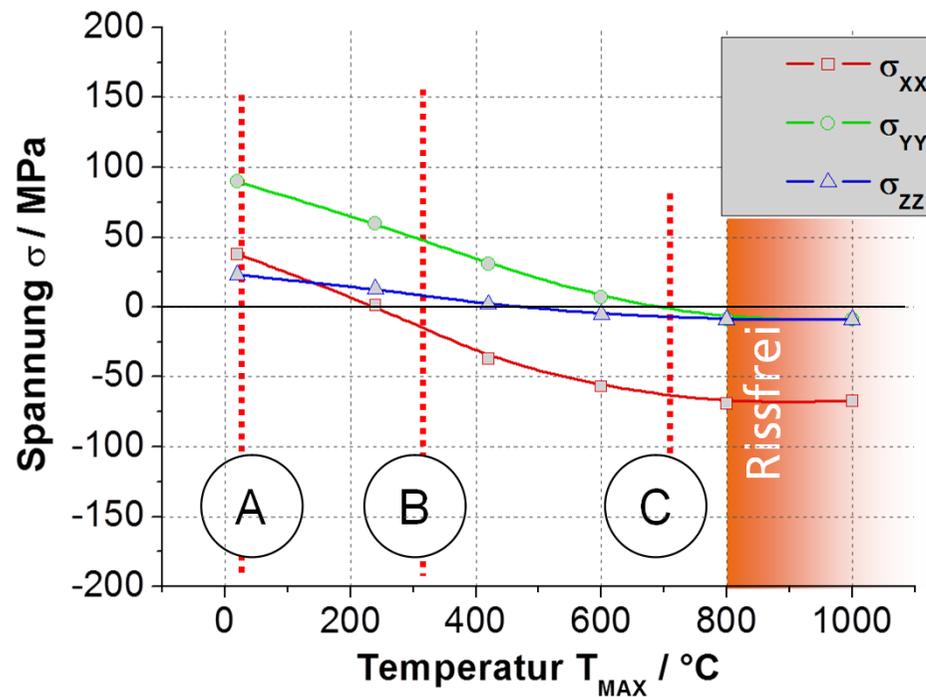




# Heißbrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

## Vergleich Simulation und Experiment

Beispiel: Ergebnisse 45S20



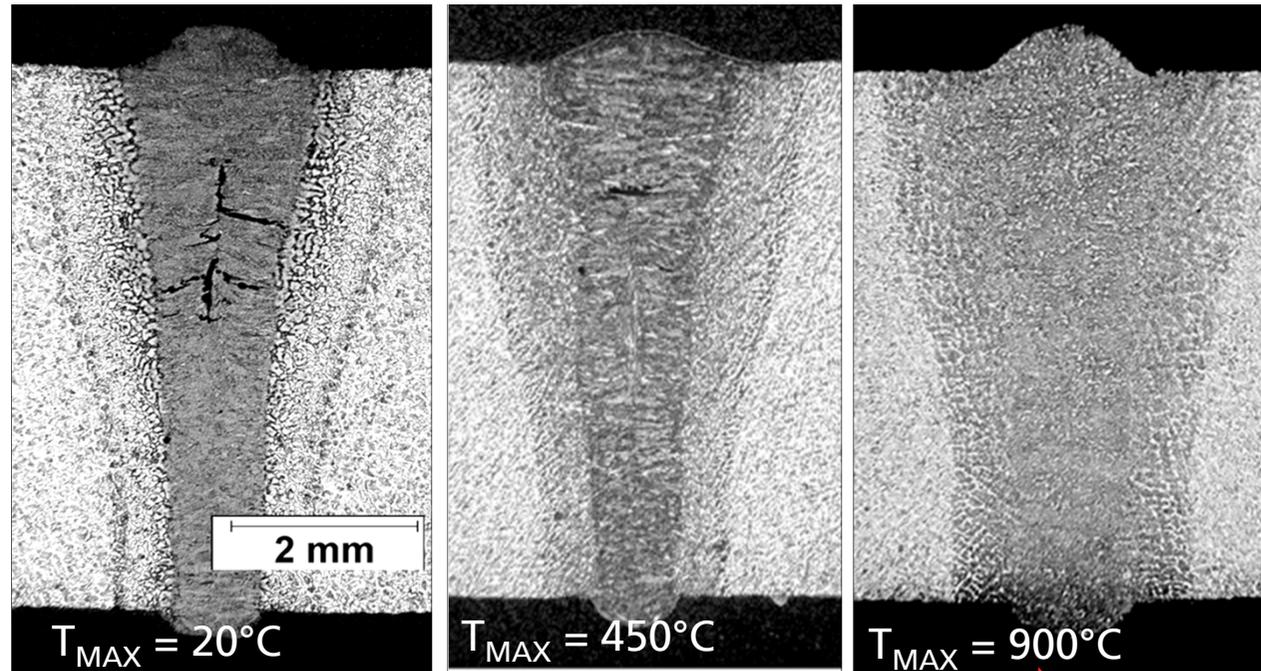
Längsschliffe

# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen TT-Verfahrensentwicklung

Ergebnisse der TT-Anwendung an Stahl mit extremer Heißrissneigung

Material:  
45S20  
(C=0,43%,S=0,2%)  
Dicke: 6 mm

TT-Parameter:  
Spule: Doppelarmig  
Armabstand: 20 mm  
Armlänge: 44 mm



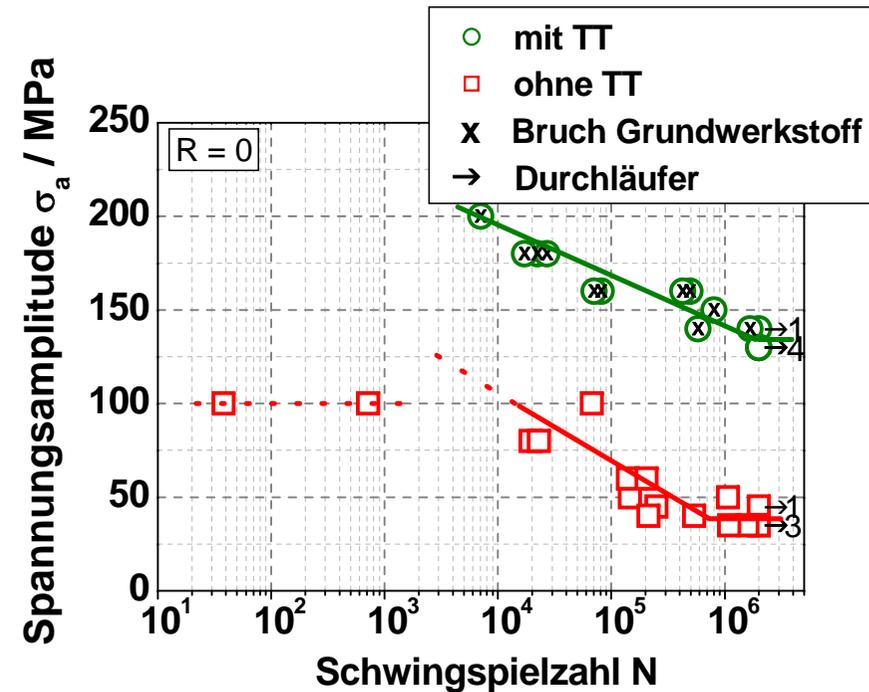
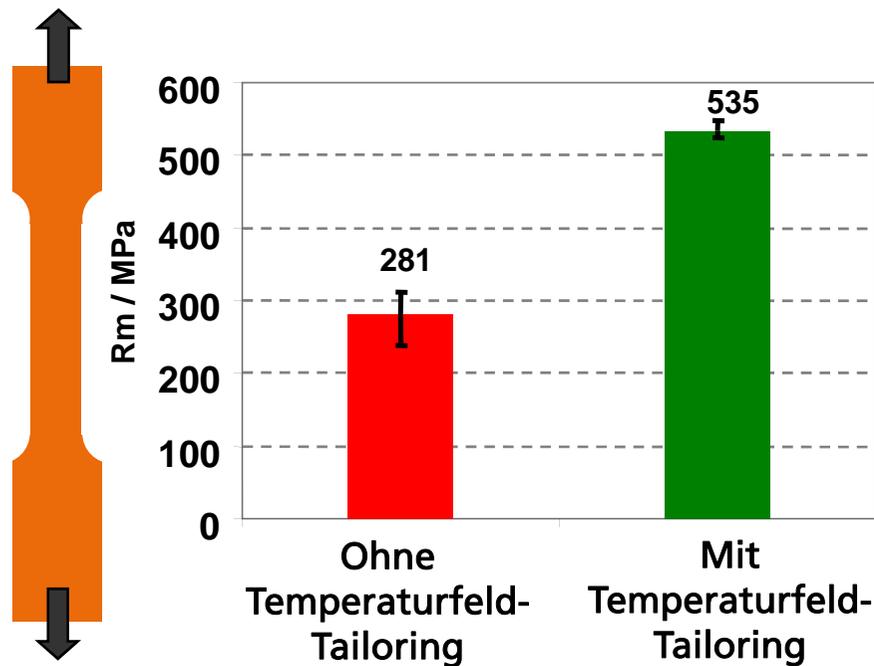
→ Vergütbarer Automatenstahl bis 6 mm Dicke  
durch TT erstmals heiß- und kaltrissfrei schweißbar!

TT-Intensität

# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

## Ergebnisse statische und zyklische Belastungsprüfung

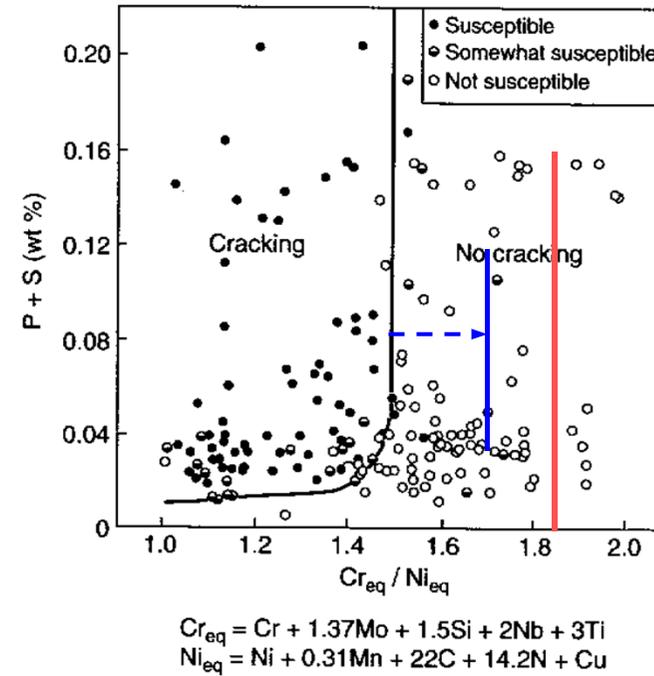
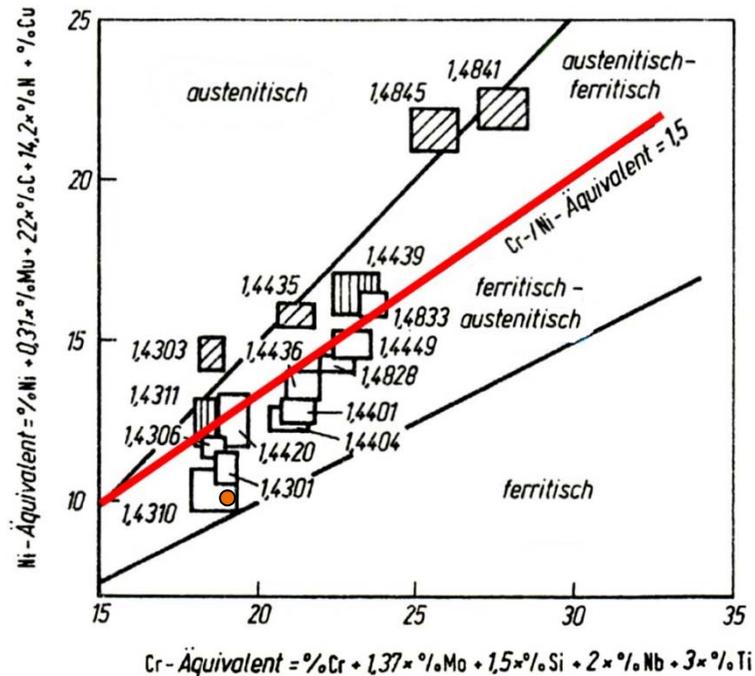
Material: Automatenstahl 45S20



→ Grundwerkstoff-Eigenschaften im Schweißgut erreicht

# Heißrissvermeidung beim Laserstrahlschweißen

Aktuelles Projekt: Erweiterung der Anwendbarkeit der Temperaturfeld-Tailorings auf austenitische Cr- Ni- Stähle



Verschiebung der Grenze für Laserstrahlschweißen  
AISI 304, 316, 321  
[Brooks 2003]

**1.4305- Charge**

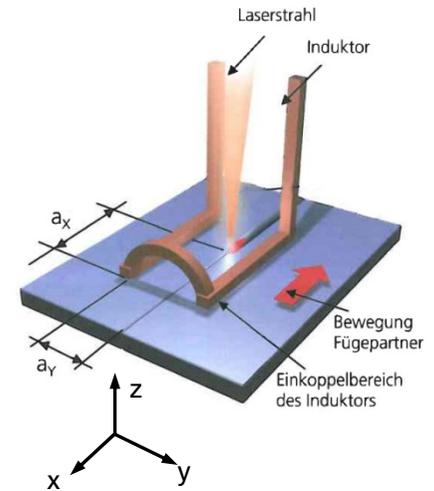
[Suutala-Diagramm 1978]

# 1.4435: Versuche zum Temperaturfeld- Tailoring

Variation: - Temperatur (270° - 450°C)

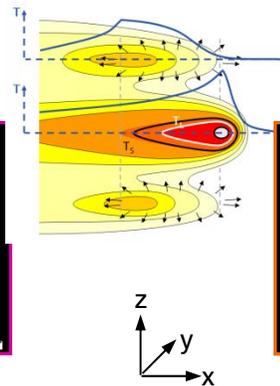
- Lage des Induktors zum Laserstrahl:  $a_x = 12, 55, 78$  mm

- weitere Versuche: Induktor vorlaufend/ nachlaufend

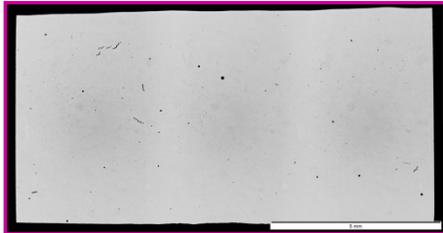


ohne TT

mit TT



Längsschliffe

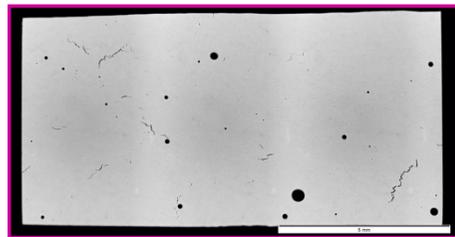


Nahtmitte

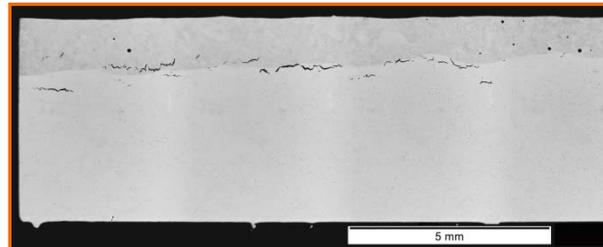


Nahtmitte

geeignetes TT verhindert Rissbildung in der Nahtmitte



Übergang Naht - WEZ



Übergang Naht - WEZ

durch TT werden die Risse auf Grenze Schmelzzone – WEZ gedrängt

Wiederaufschmelzungsrisse bisher nicht verhindert !!

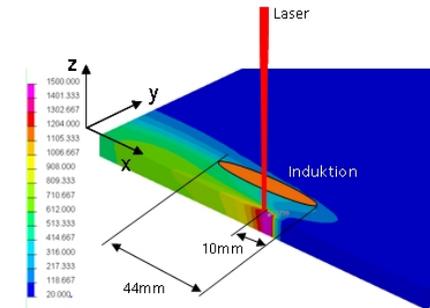
DC060; 5,8 kW; Blech 6,25 mm;  
 $v_s = 1,4$  m/min (V46)

DC060; 5,8 kW; Blech 5 mm;  $v_s = 1,2$  m/min (V52)  
Induktion:  $a_x = 55$  mm; 330°C

# Simulationsrechnungen: Wirkung des TT bei austenitischen Cr- Ni- Stählen

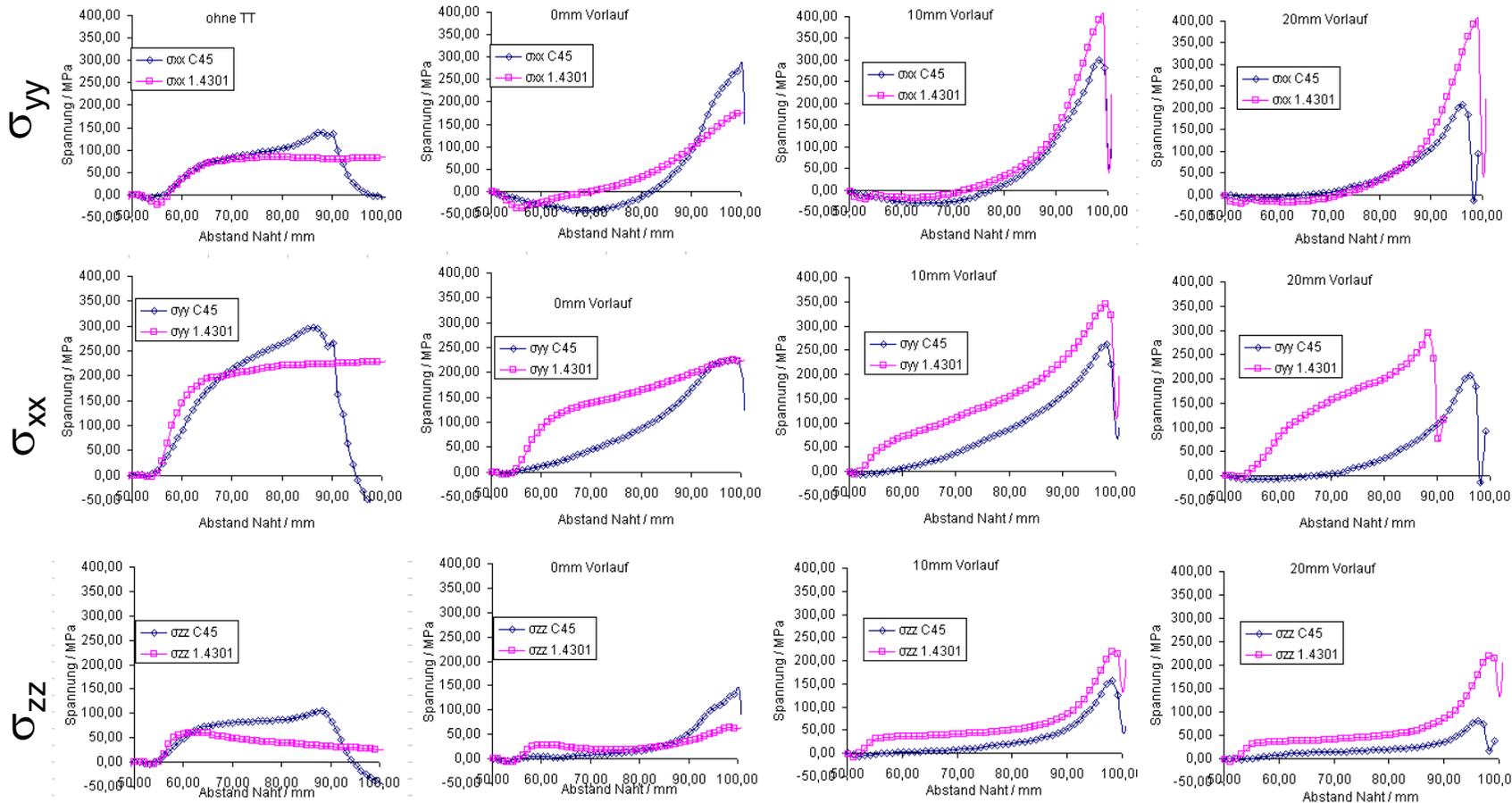
Vergleich: C45/45S20 mit 1.4301/1.4305

( $T_{ind.} = 520 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



ohne TT

mit TT: Variation Vorlauf



# Schweißnahtfehler (Übersicht I)

## Fehler beim (und nach dem) Schweißen

## Betriebsrisse

### Fertigungsbedingte Schweißfehler

#### Äußere Nahtfehler

#### Innere Nahtfehler

### Werkstoffverursachte Schweißfehler

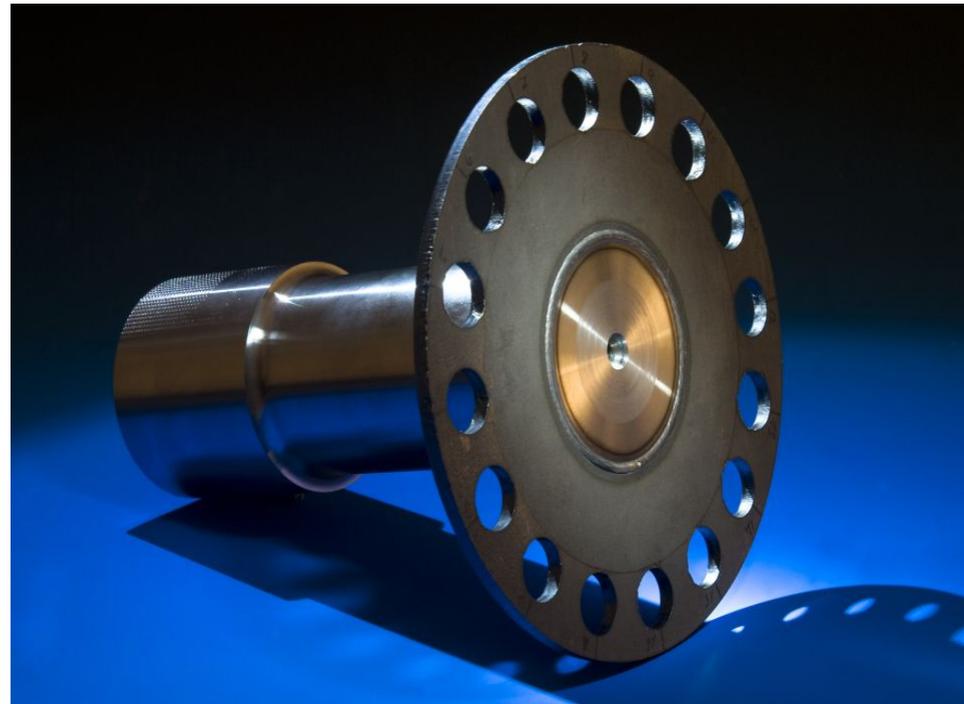
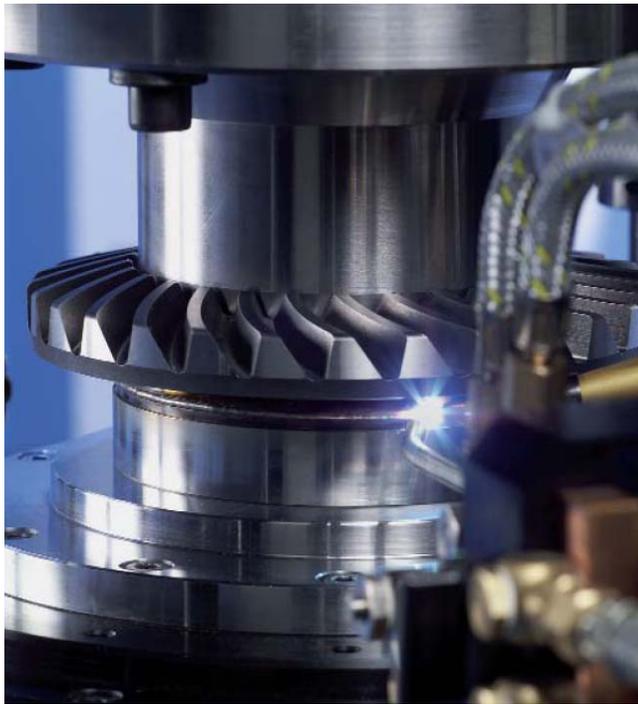
#### Heißrisse

#### Kaltrisse

- Spritzer und Zündstellen
- Einbrandkerben
- Nahtformfehler
- Bindefehler
- Schlackeeinschlüsse
- Porenbildung
- Erstarrungsrisse
- Wiederaufschmelzungsrisse
- Risse durch Zähigkeitsabfall
- Aufhärtungsrisse
- Wasserstoffrisse
- Lamellenrisse
- Ausscheidungsrisse

Rissbildung, die durch die Degradation der Werkstoffeigenschaften in der Schweißverbindung auftritt oder schneller auftritt.

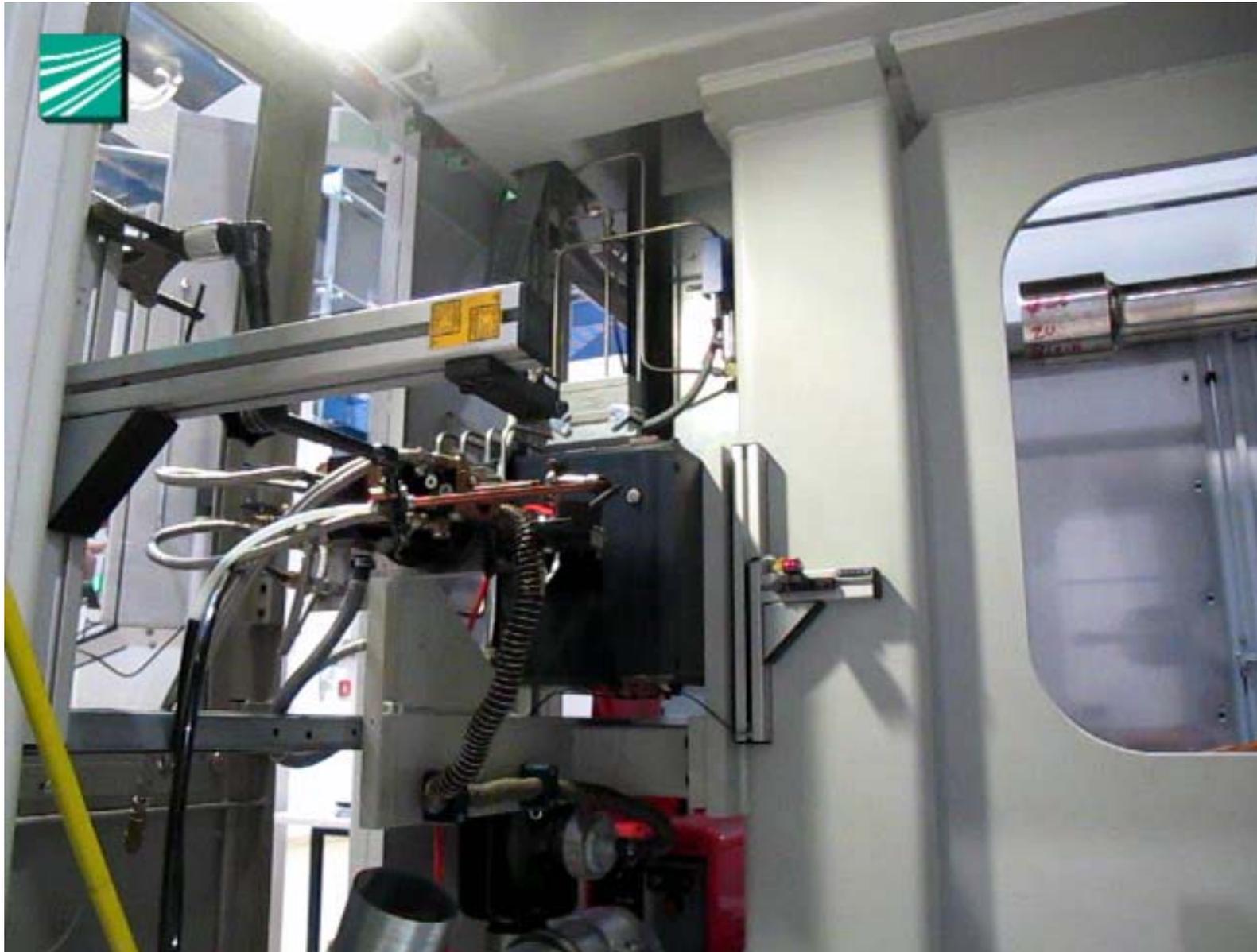
# Beispiel 2: Prüfung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Welle- Nabe- Verbindungen



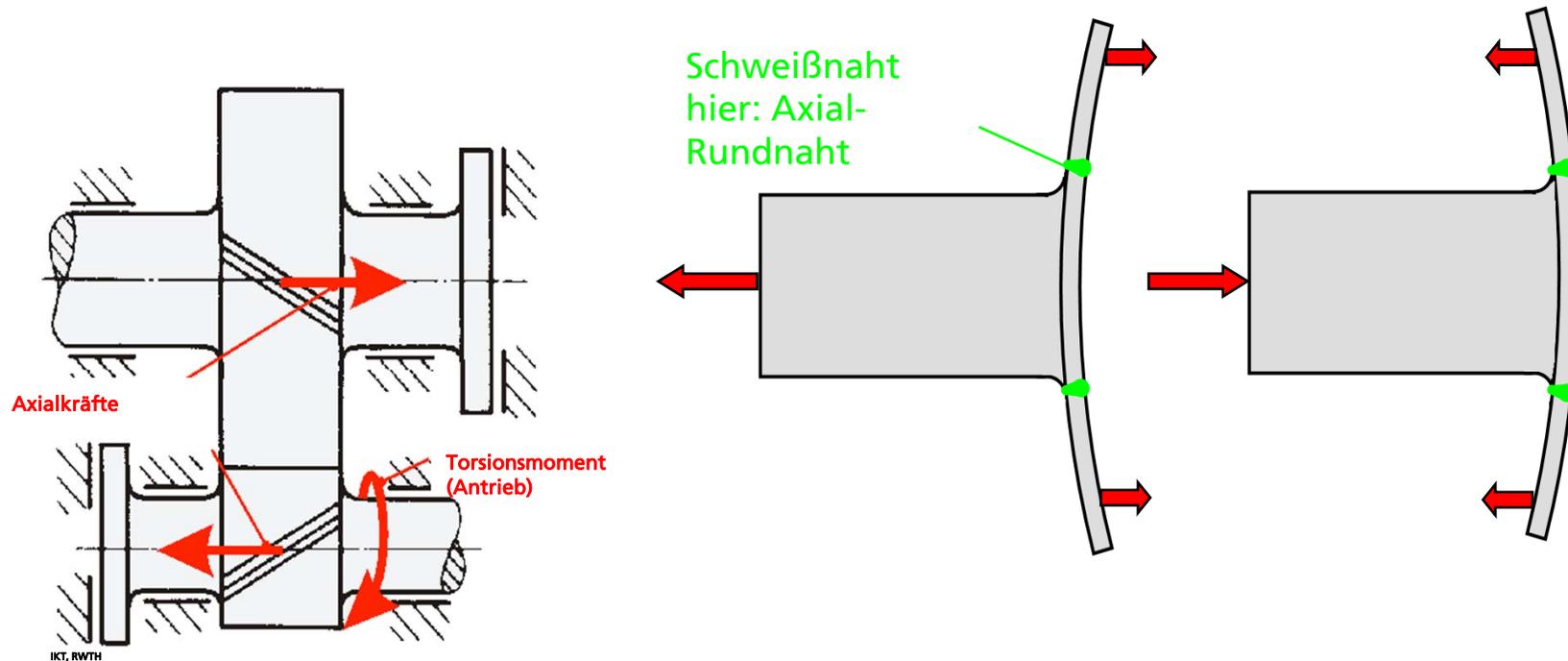
# Probleme für die Prüfung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Welle- Nabe- Verbindungen



- Mehrachsiger Belastungsfall:  
Kombinierte Torsions- und Biegebelastung
- Komplexe Bauteile, die nicht in Standard-Spannzeuge von Prüfmaschinen einspannbar sind
- Fehlendes Bewertungskonzept für das Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Komponenten für den Antriebsstrang (Axial-Rundnähte, Radial-Rundnähte)



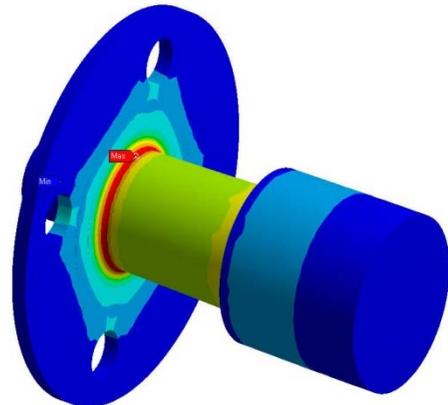
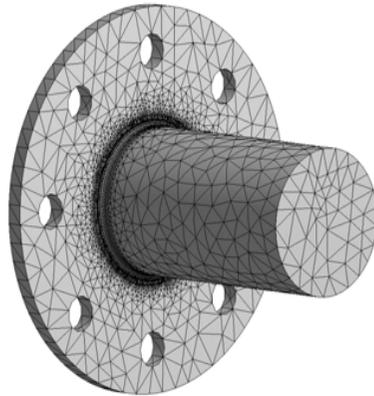
# Kombination von Torsions- und Biegebelastung



Durch die Schrägverzahnung von Zahnrädern entstehen zusätzliche Axialkräfte.

Die Axialkräfte bewirken eine „Aufschirmung“ der Scheibe und eine Biegebelastung der Schweißnaht.

# Prüfkörper- Entwicklung



## Konzept und Anforderungen:

- Beanspruchung der Schweißnaht im Modellprüfkörper möglichst nahe dem realen Bauteil  $\Rightarrow$  Welle- Scheibe- Prüfkörper
- dem realen Bauteil entsprechende Einschweißiefen und Wärmeableitungsbedingungen
- gute Zugänglichkeit beim Schweißen; einfach und kostengünstig herstellbar

## Problem:

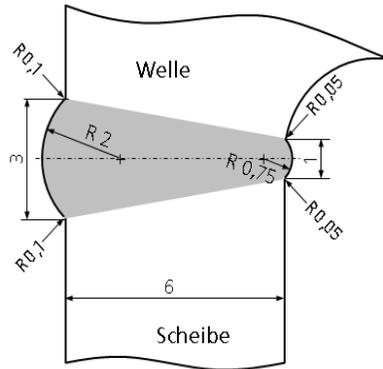
- Für eine idealisierte kerbwirkungsfreie Schweißnaht stellt die Naht nicht die Sollbruchstelle dar.

## Lösung:

- FE-Rechnungen und Variantenvergleich: Berechnung der Spannungsverteilungen für verschiedene Prüfkörper-Geometrien und Schweißnahtlagen
- Auswahl der Variante, für die die Spannung in der Schweißnaht möglichst groß ist im Vergleich zur maximal wirkenden Spannung im Prüfkörper

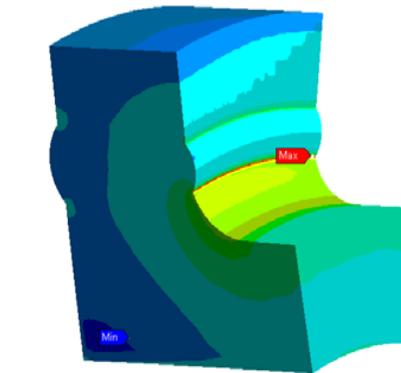
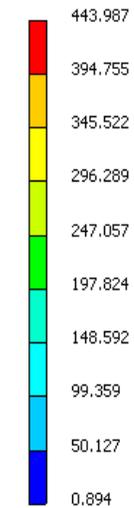
# Prüfkörpervarianten – Beispiele FE- Rechnungen

Variante 1A



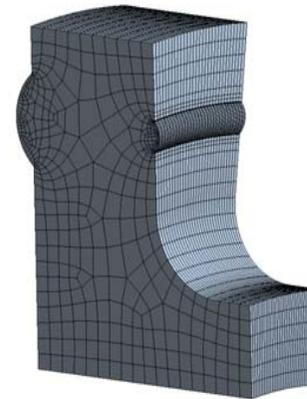
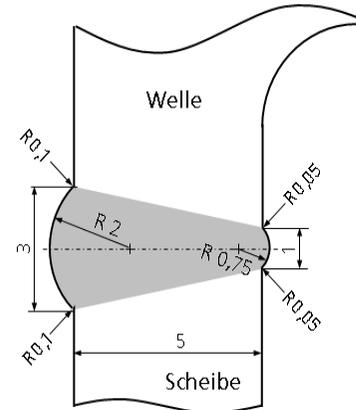
Vergleichsspannung (von Mises)

MPa

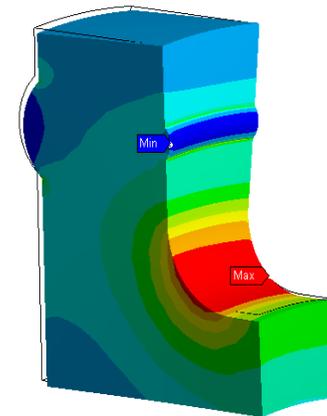
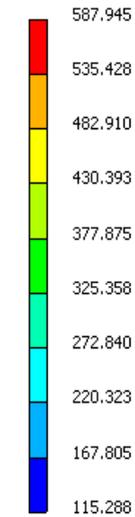


Beispiel:  
Variation von  
Scheibendicke und  
Schweißradius

Variante 2A



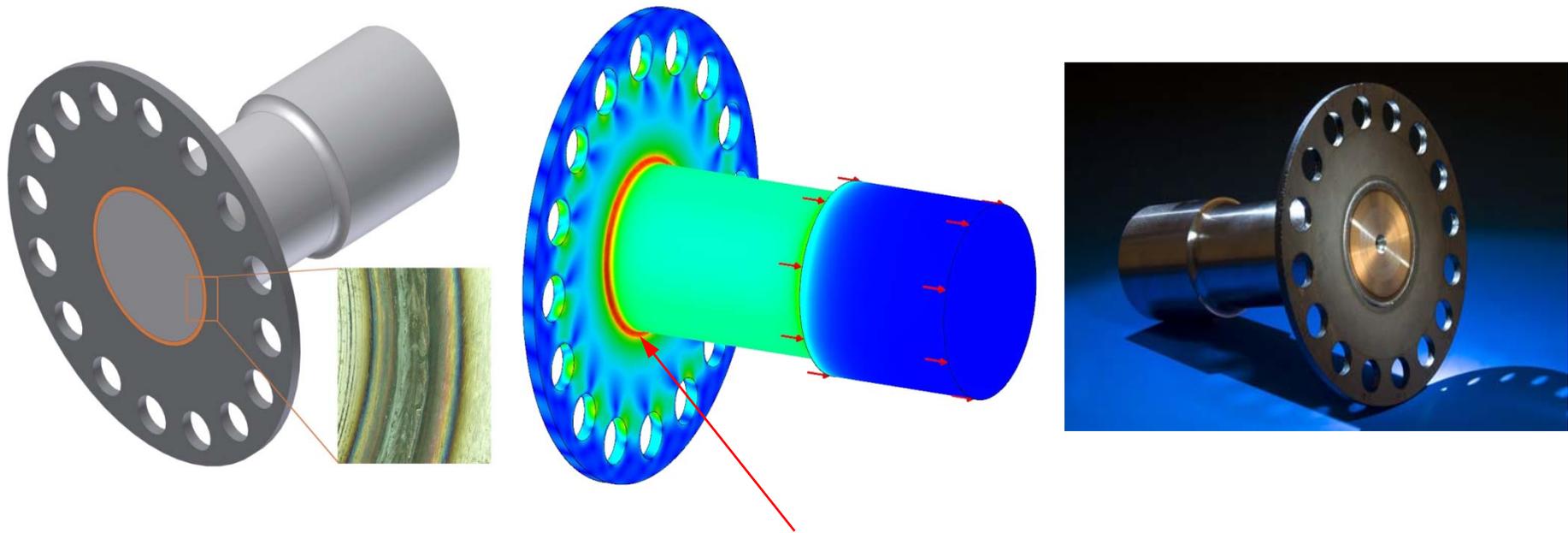
Vergleichsspannung (von Mises)  
MPa



CADFEM

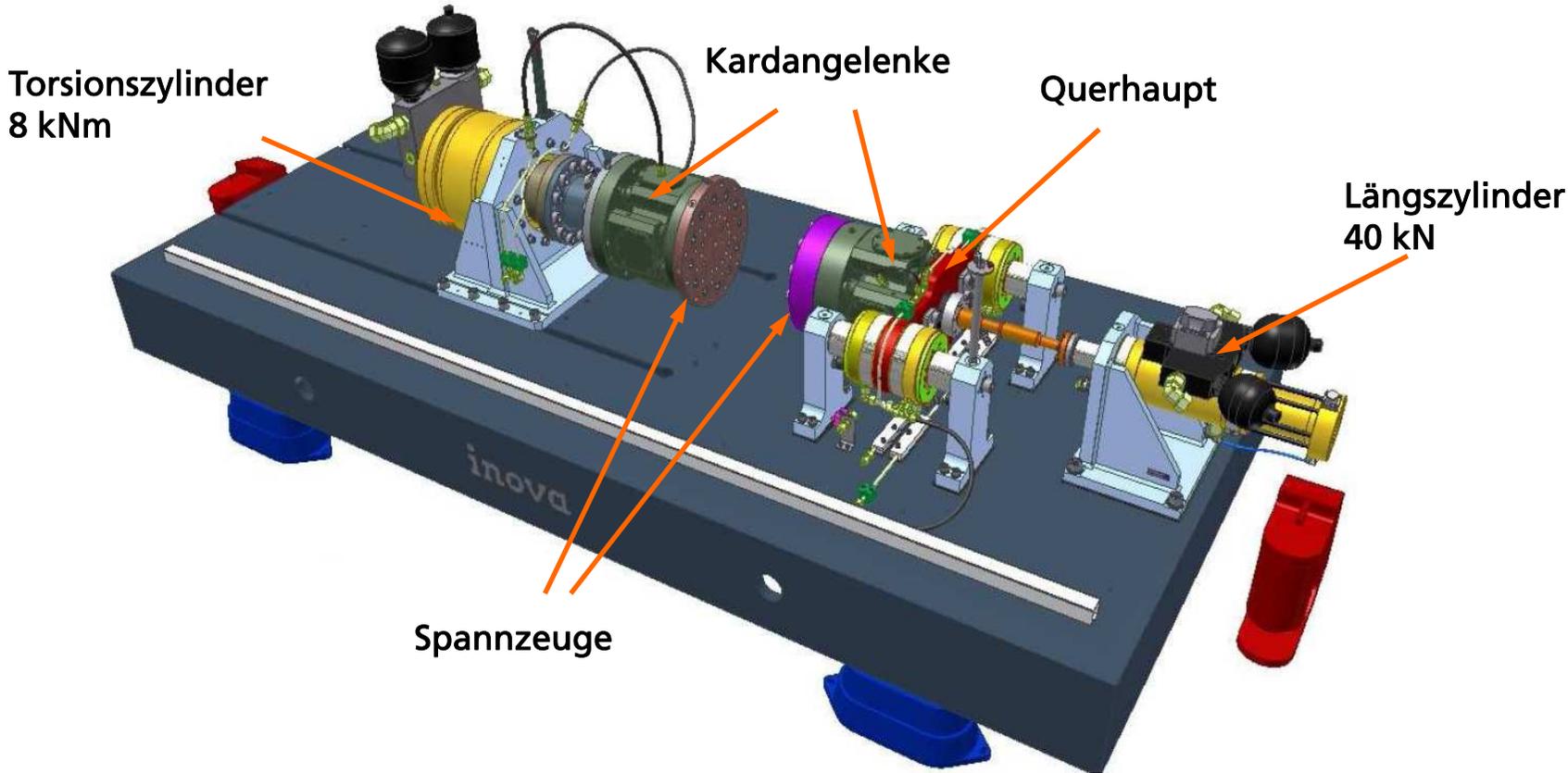


# Prüfkörper 1



Spannungsmaximum liegt in der WEZ der Schweißverbindung, max. Spannung in der Schweißnaht ca. 90% des Gesamt-Spannungsmax.

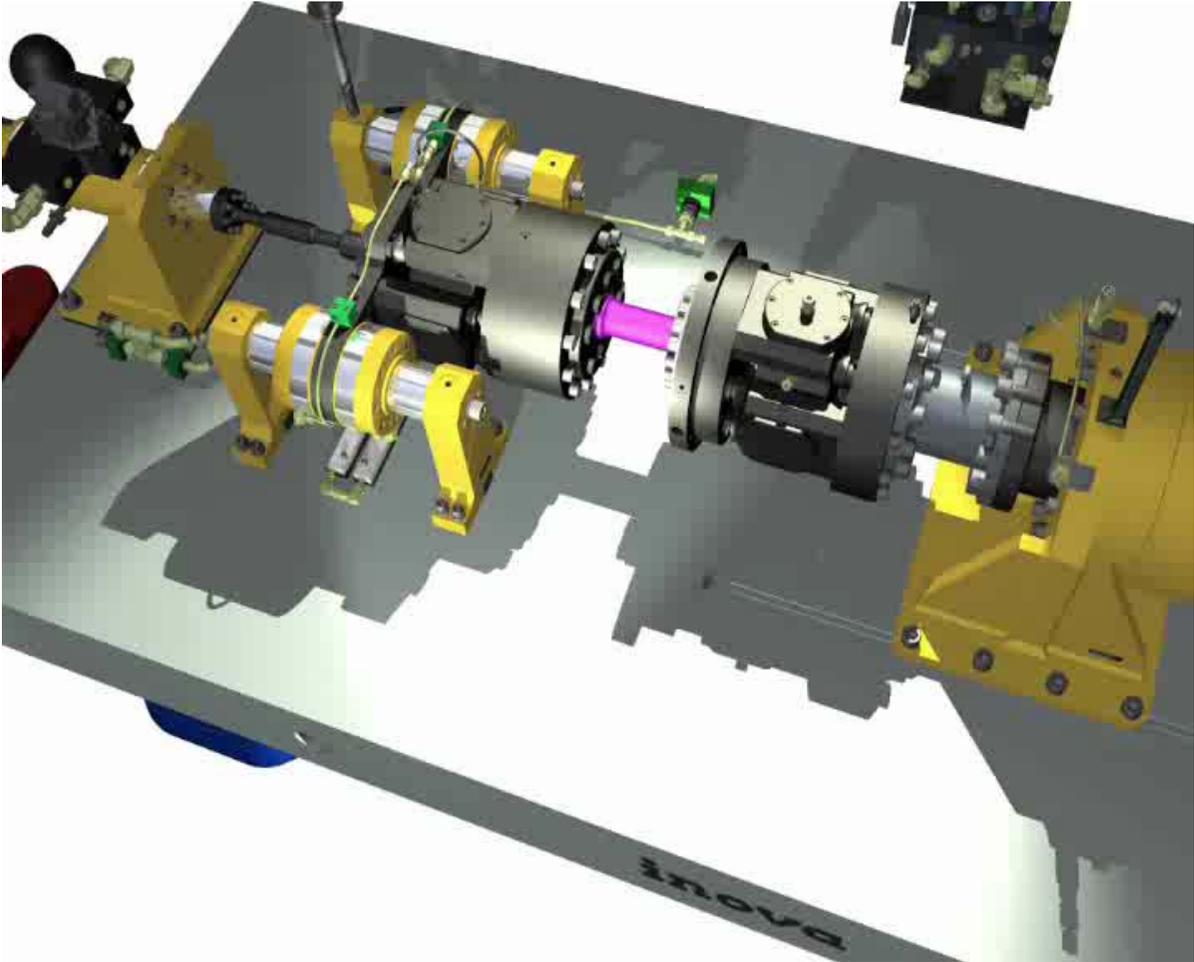
# Prüfmaschine



Fa. Inova GmbH  
Prag/ Rüdeshheim



# Prüfmaschine: Funktionsprinzip



# Prüfmaschine: Parameter

## Probengröße:

Durchmesser bis 300 mm (Lochkreis), Schaftdurchmesser 70 mm

Messlänge bis 1250 mm

## Verformungsparameter:

### Torsion:

Max. Drehmoment  
statisch

$$M_{\max,s} = \pm 8 \text{ kNm}$$

dynamisch

$$M_{\max,d} = \pm 6,4 \text{ kNm}$$

Max. Drehwinkel

$$\alpha = \pm 50^\circ$$

### Zug-Druck:

Max. Kraft

$$F_{\max} = \pm 40 \text{ kN}$$

Max. Kolbenweg

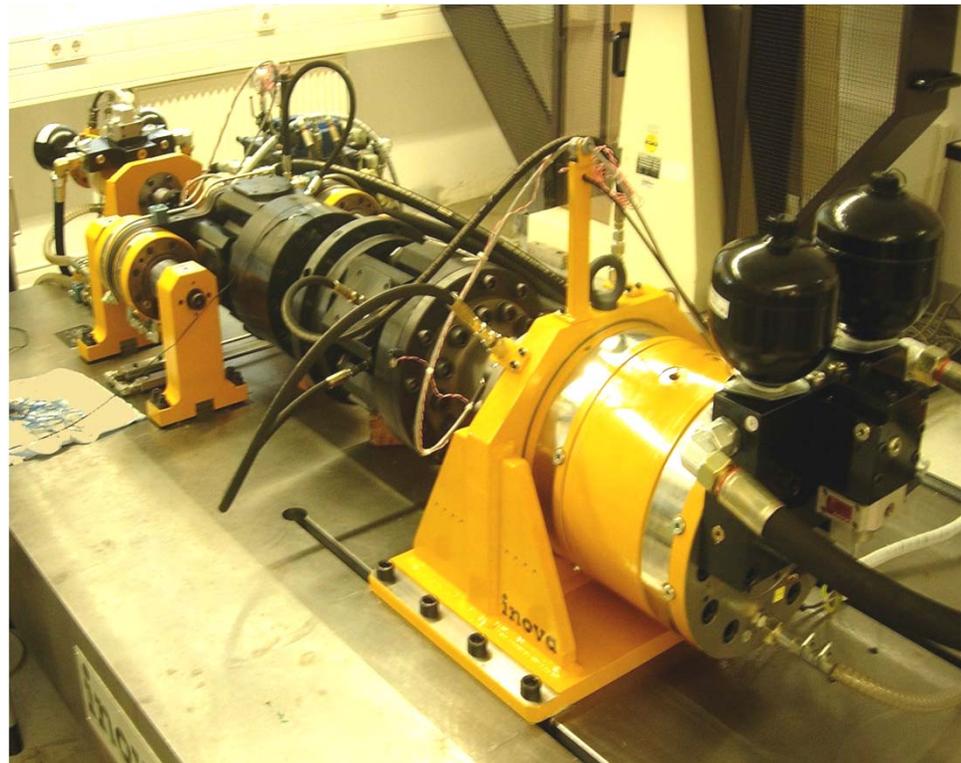
$$s_{\max} = \pm 50 \text{ mm}$$

### Beide Achsen:

Frequenz bis 50 Hz, unabhängig wählbar;

bei gleicher Frequenz beliebige

Phasenlage möglich



# Besonderheiten der Prüfmaschine

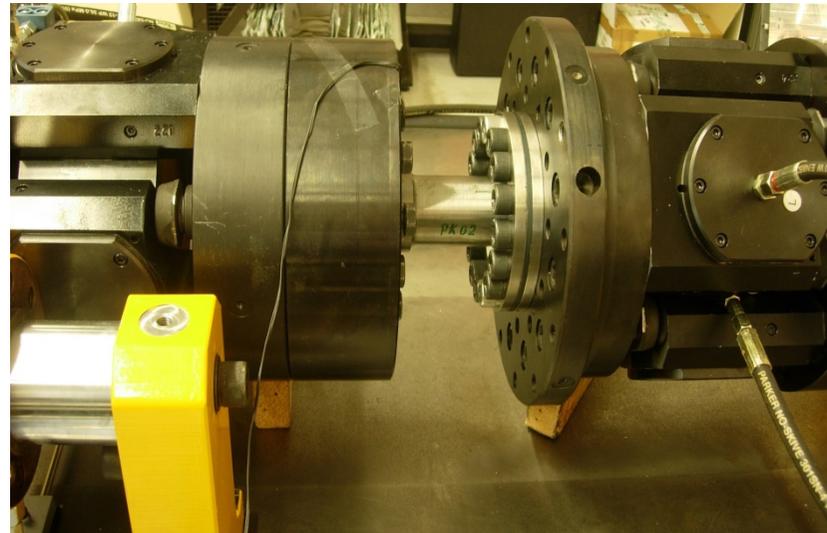
## Querhaupt:

Entkopplung von Torsion und axialer Verformung

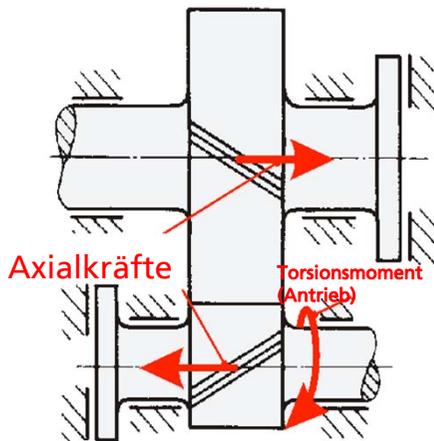


## Kardangelenke:

Möglichkeit der Kompensation des Schweißverzugs, von Versatz und lateraler Verschiebung;

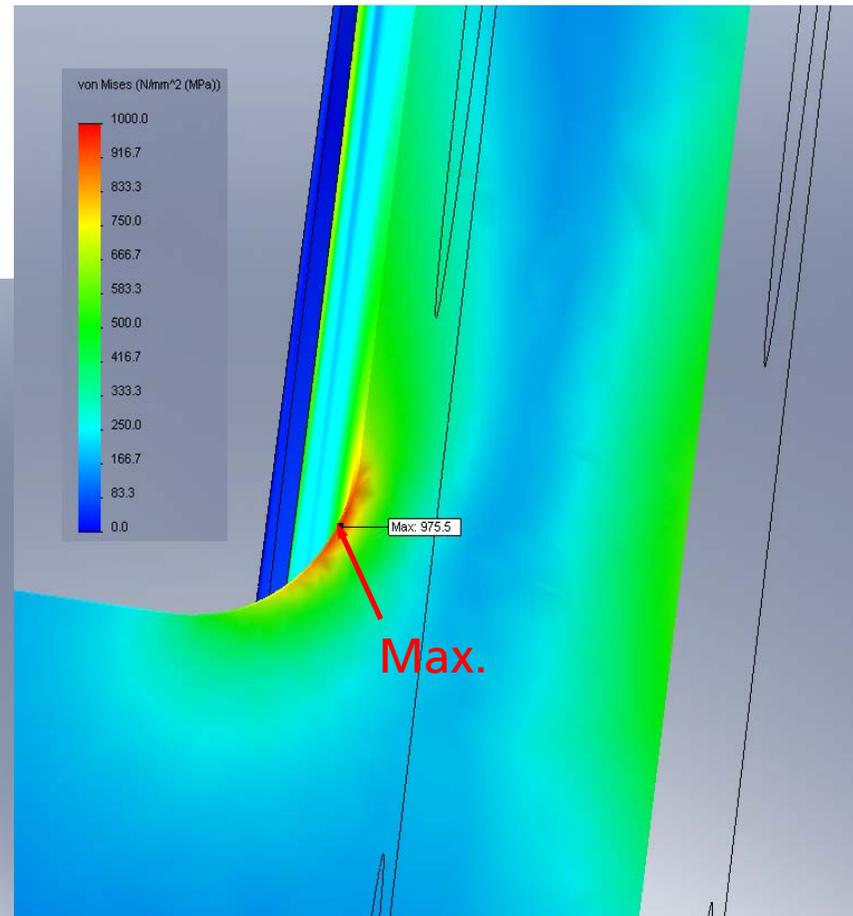
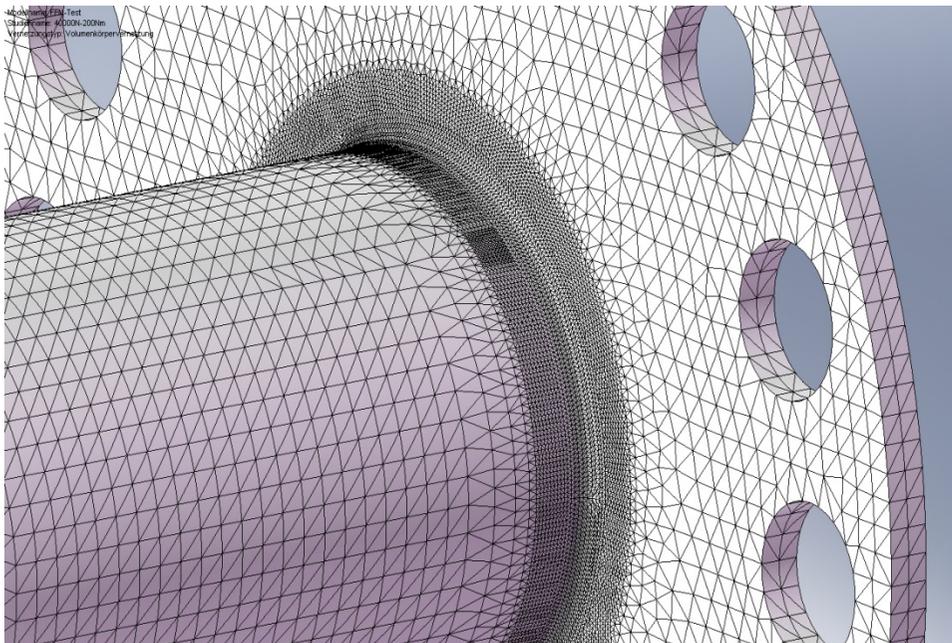


# Spannungsberechnung und Auswahl der Belastungsamplituden

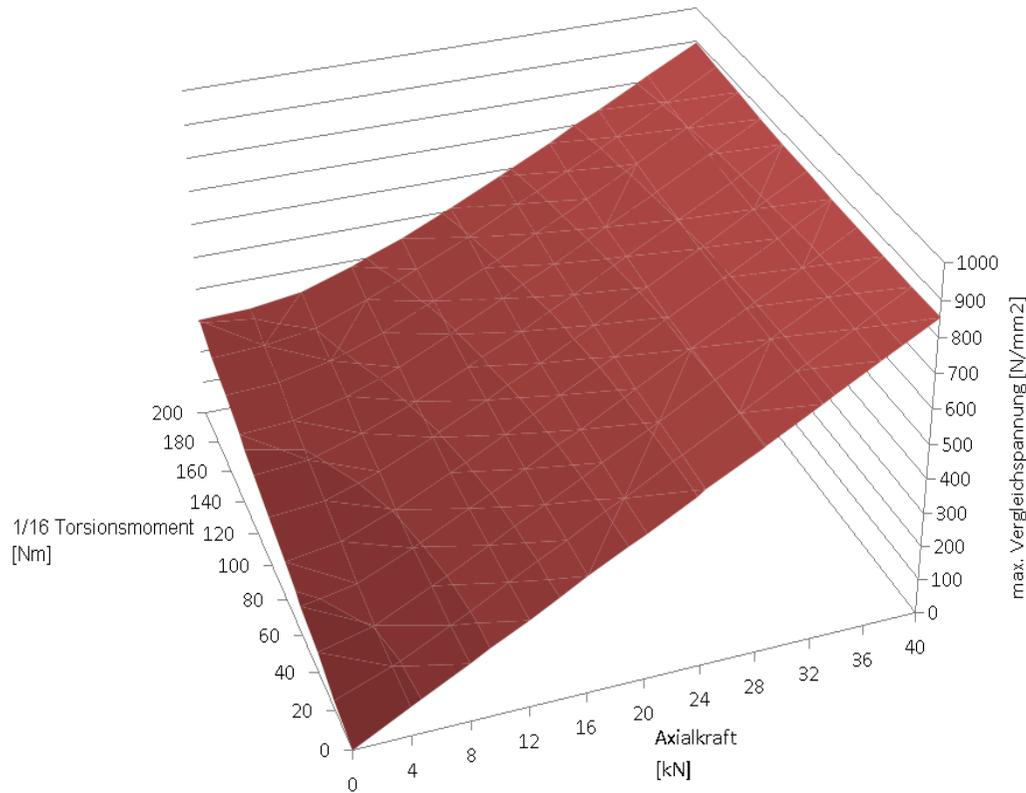


- Mehrachsige Beanspruchung:  
Berechnung einer Vergleichsspannung  
Wahl: Gestaltänderungsenergiehypothese („von Mises“)
- Messungen zur Schwingfestigkeit (Wöhler-Diagramm):  
Wie soll die Parameteränderung vorgenommen werden?  
Torsionsmoment-Amplitude ~ Axialkraft-Amplitude
- „Anteile“ Torsion und Axialkraft/Biegung  
Wahl (Vorversuche):  
Beitrag zur Vergleichsspannung  
90% Torsion - 10% Axialkraft (Biegung der Scheibe)  
in guter Näherung:  $M_a/F_a = 0,42 \text{ m}$
- Wahl der Versuchsbedingungen:  
Spannungsverhältnis  $R = -1$ ,  
Frequenz  $f = 20 \text{ Hz}$ , Grenzyklenzahl  $N_G = 2 \times 10^6$

# FE-Rechnungen am Prüfkörper; u.a.: Ermittlung max. v.-Mises- Spannung



# Abhängigkeit der max. v.-Mises-Spannung von Torsionsmoment und Axialkraft



Beispiel:

reine Torsion

$$M_a = 3 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{V,max.} = 283 \text{ MPa}$$

Torsion+Axial (90/10)-  
Beanspruchung

$$0,9 * \sigma_{V,max.} = 255 \text{ MPa}$$

$$M_a = 2,73 \text{ kNm}$$

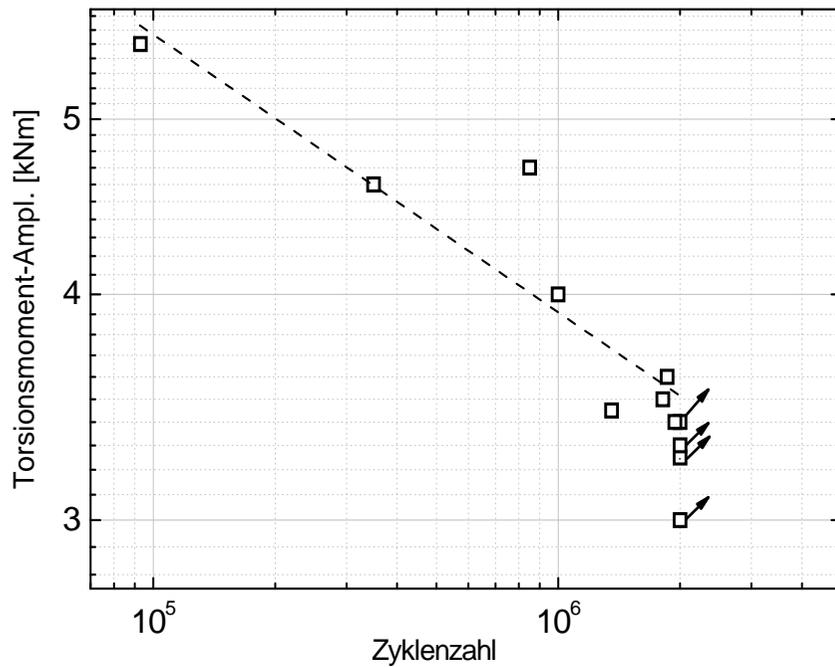
Ermittle  $F_a$  so, dass

$$\sigma_{V,max.} = 283 \text{ MPa:}$$

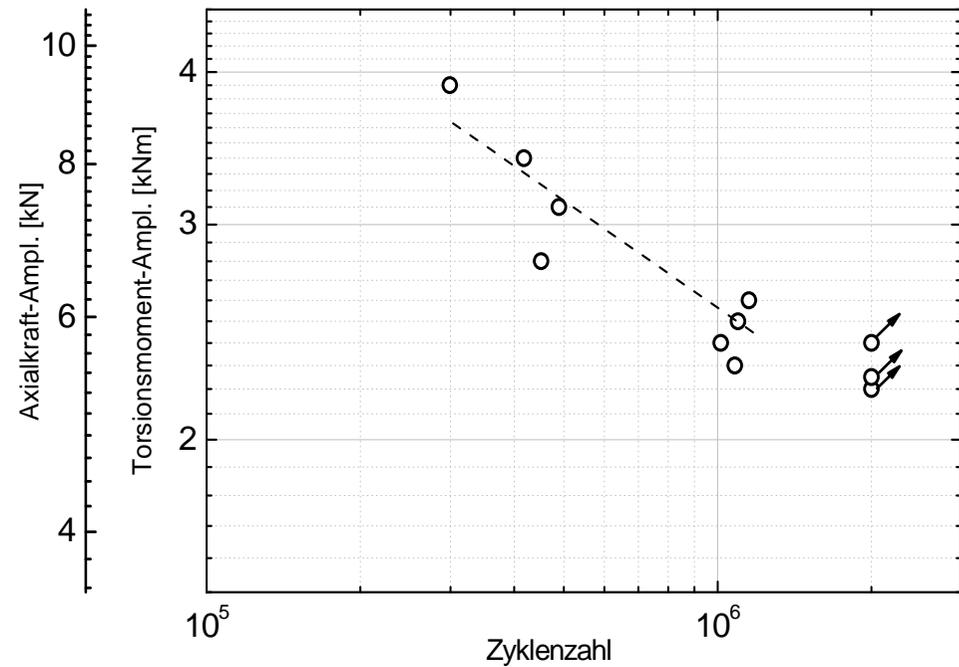
$$F_a = 6,45 \text{ kN}$$

# Torsionsmoment- und Torsionsmoment/Kraft-Wöhlerkurven

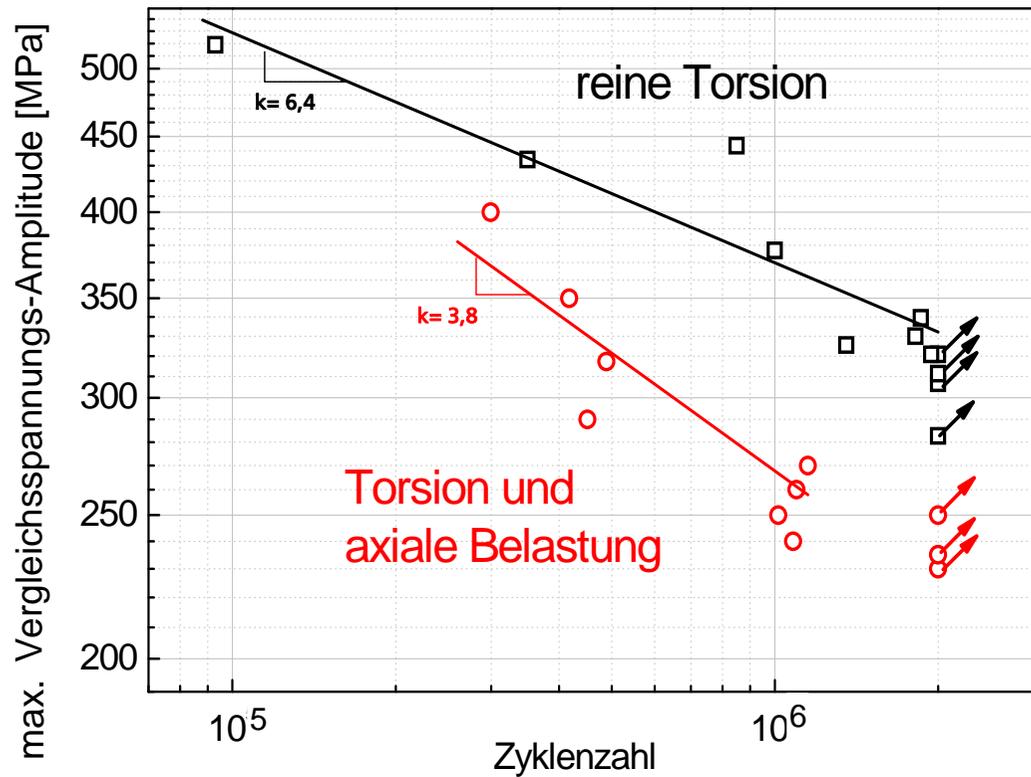
„reine“ Torsion



Torsions-Axial-Beanspruchung



# Vergleich der Wöhlerkurven für Torsions- und kombinierte Torsions-Axial-Beanspruchung



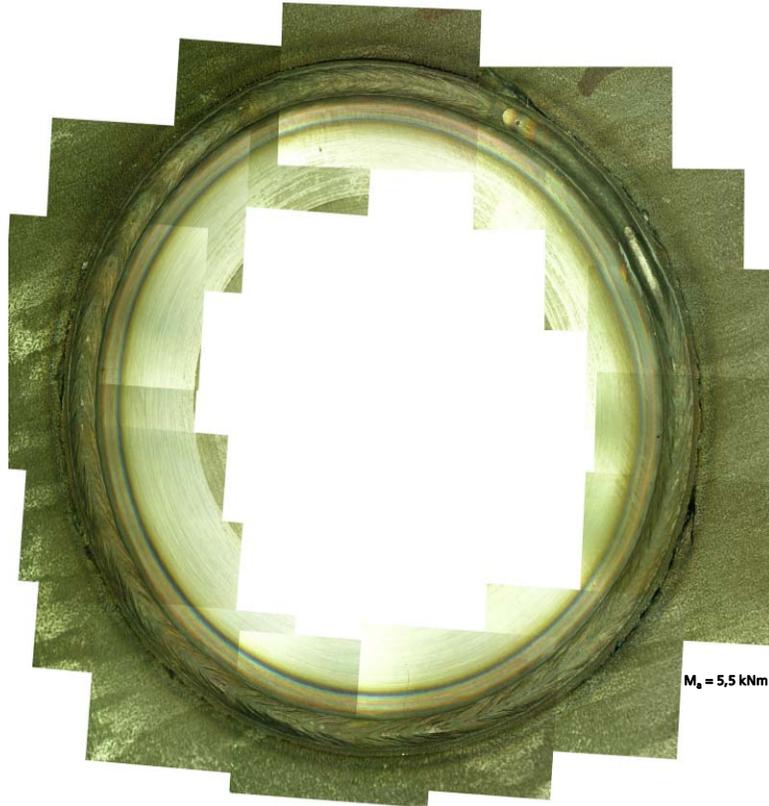
deutlicher Abfall der Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich (und vermutlich auch der Dauerfestigkeit) durch Axialkraft

Änderung des Anstiegs der Wöhlerlinie  
 $k = 6,4$  (Torsion)  
 $k = 3,8$  (Torsion-Axial)

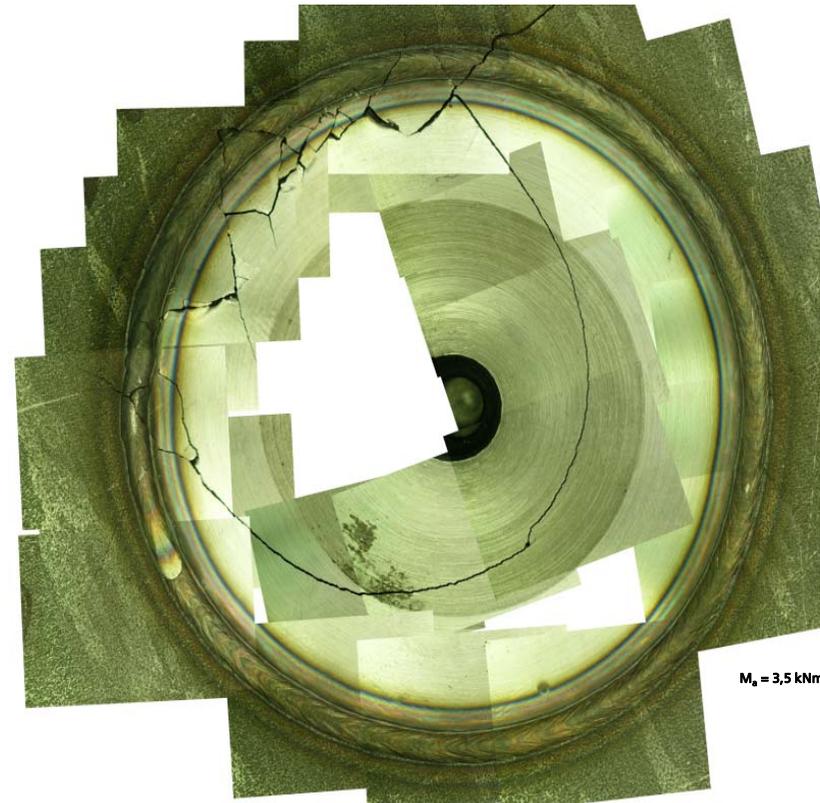
Abnahme  $k$  bei stärker gekerbten Proben [Haibach];  
 Kerbwirkung der Schweißnaht bei Biegung an der Naht

**Erheblicher Einfluss des Axial-bzw. Biegungs- Anteils auf die Schwingfestigkeit der Schweißverbindung**

# Risse: zwei grundsätzlich verschiedene Typen des Rissverlaufs

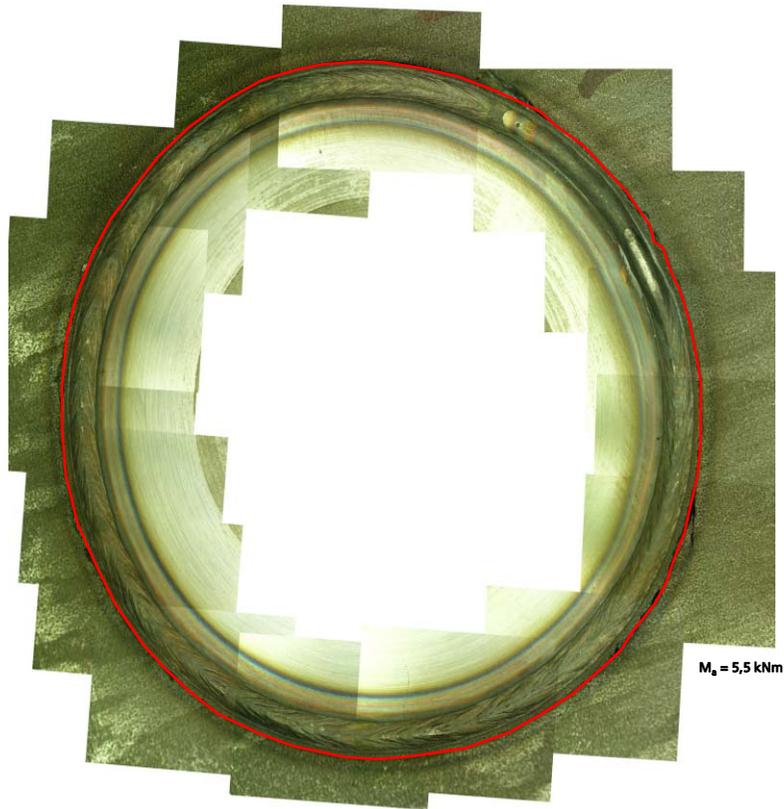


umlaufender Risse an der Außenseite der Schweißnaht bei großen  $M_a > 4,5 \text{ kNm}$

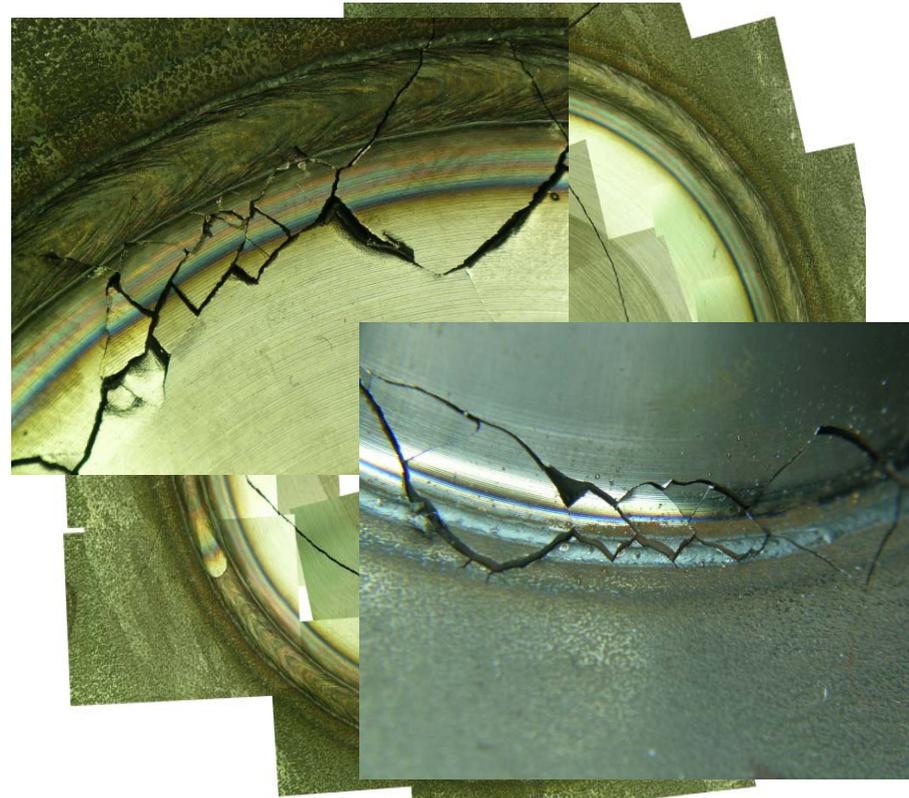


Riss mit stark unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen, hauptsächlich an der Innenseite der Schweißnaht bei mittleren und kleinen  $M_a \leq 4,5 \text{ kNm}$

# Risse: zwei grundsätzlich verschiedene Typen des Rissverlaufs

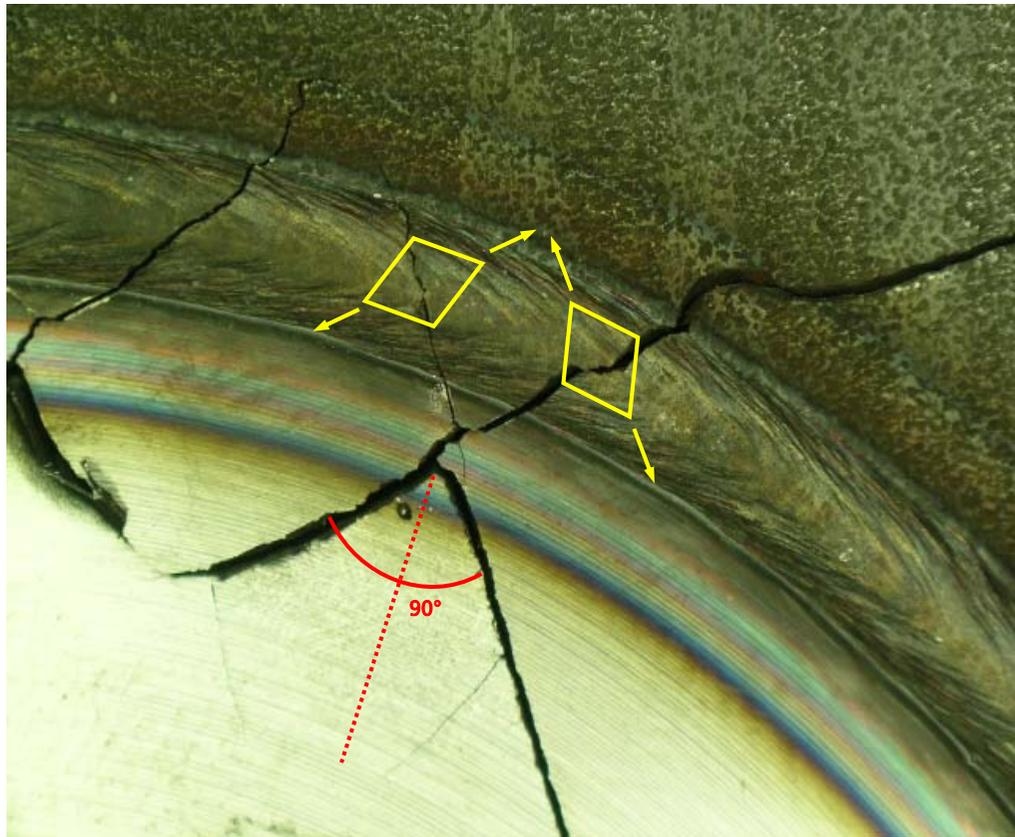


umlaufender Risse an der Außenseite der Schweißnaht bei großen  $M_a > 4,5 \text{ kNm}$



Riss mit stark unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen, hauptsächlich an der Innenseite der Schweißnaht bei mittleren und kleinen  $M_a \leq 4,5 \text{ kNm}$

# Warum entsteht die „X-Form“ der Risse und wo liegt der Ort des Rissursprungs?

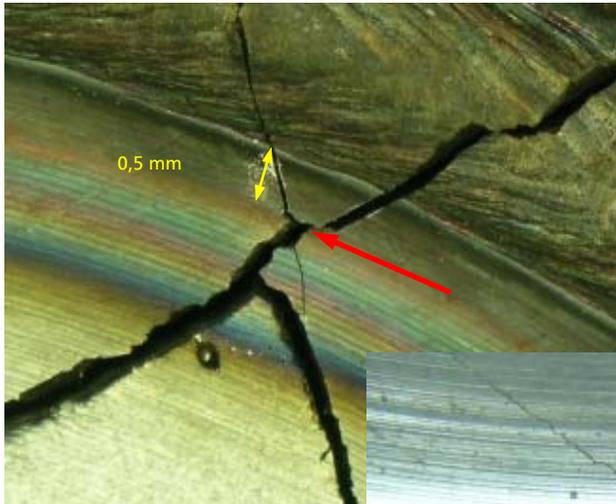


tordierter Prüfkörper besteht aus einzelnen schubverformten Volumenelementen

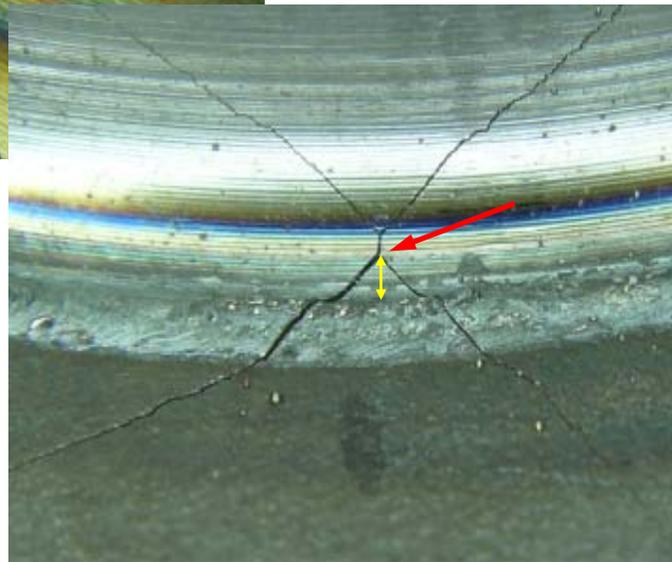
Hauptspannungen liegen unter  $45^\circ$  zur Schubrichtung  
(bei Torsion: zur Tangente)

⇒ Das Risswachstum in „X-Form“ beruht auf der Richtung der Hauptspannungen.

# Warum entsteht die „X-Form“ der Risse und wo liegt der Ort des Rissursprungs?



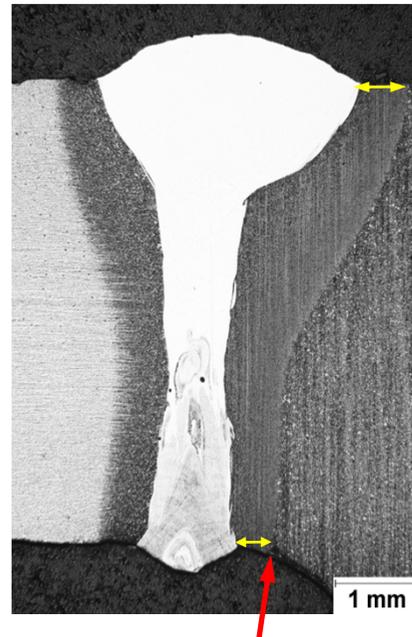
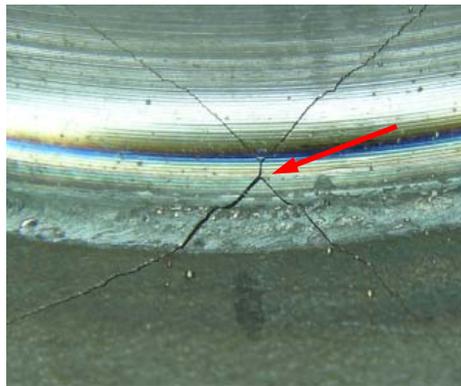
Scheibenseite



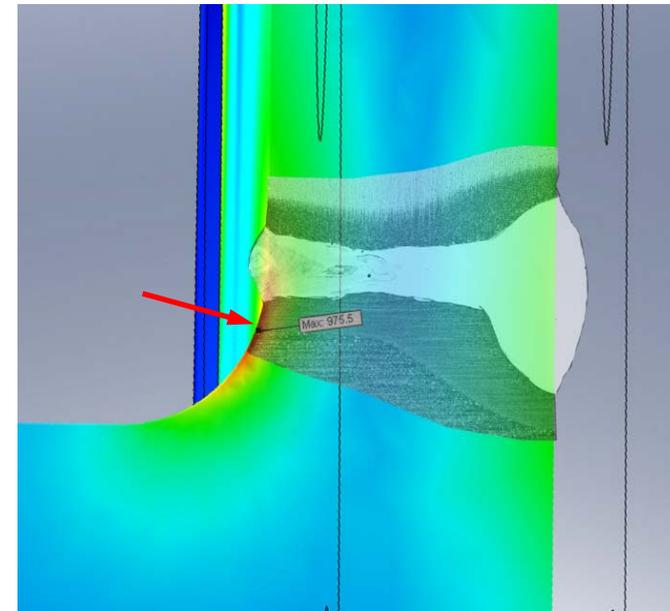
Wellenseite

Rissverlauf legt die Vermutung nahe, dass der Riss am kleinen geraden Teil in der Mitte des „X“ entstanden ist.

# Warum entsteht die „X-Form“ der Risse und wo liegt der Ort des Rissursprungs?



Die „X“-Risse entstehen an der wellenseitigen Grenze der Wärmeeinflusszone (metallurgischer Kerb).



An dieser Stelle wirkt gleichzeitig die höchste (von-Mises-) Spannung.



**Vielen Dank für die  
Aufmerksamkeit !**