

FEMFAT User-Meeting (Mai 2001)

Berechnungsmethoden Punkt-/Laserstrahlschweißen

Dr. Genbao Zhang

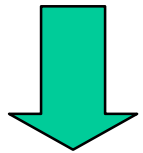
Übersicht

- Problemstellung
- Betriebsfestigkeitstheorien für Schweißpunkte und -nähte:
State-of-the-art
- Motivation zur Entwicklung von neuen Berechnungsmethoden für
Schweißpunkte
- Aspekte der numerischen Berechnung
- Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte
- Vergleich von Schweißpunkten und Lasernähten
- Zusammenfassung und Ausblick

Problemstellung

Zusammenbau eines PKWs

> 400 Einzelbleche



Fügen

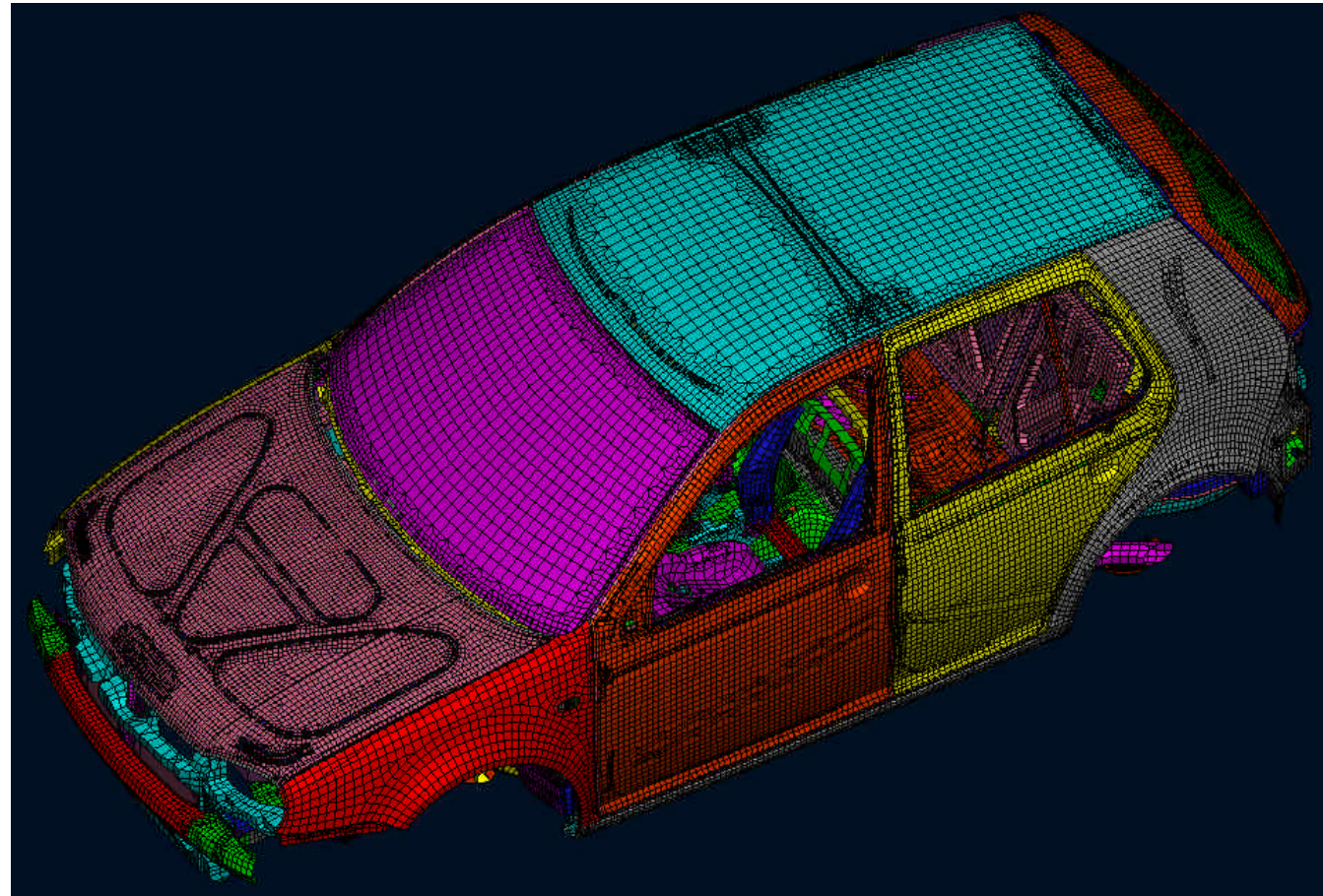
Einzelteile

Tür
Heckklappe
Motorhaube
Windschutzscheibe
...



Fügen

Karosserie (+Anbauteile)



Problemstellung

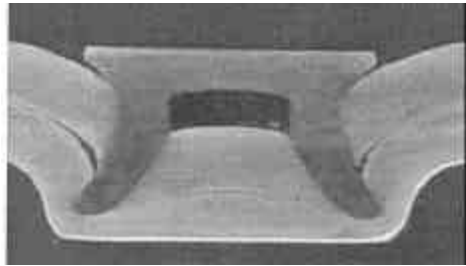
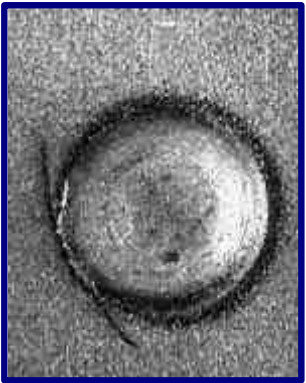
Fügen von Blechen und Teilen

- Fügeverfahren
 - Schweißen
 - Widerstandspunkt-, MIG/MAG-, Laserstrahlschweißen
 - Löten
 - Stanznieten
 - Clinchen
 - Kleben
 - Festigkeits- und Dickschichtklebverbindungen
 - Schrauben
 - Scharnier
 - ...

Problemstellung

Geometrie (Kerbe und Singularität)

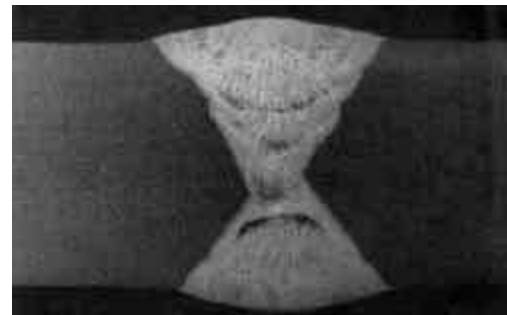
Punktförmig



Linienförmig



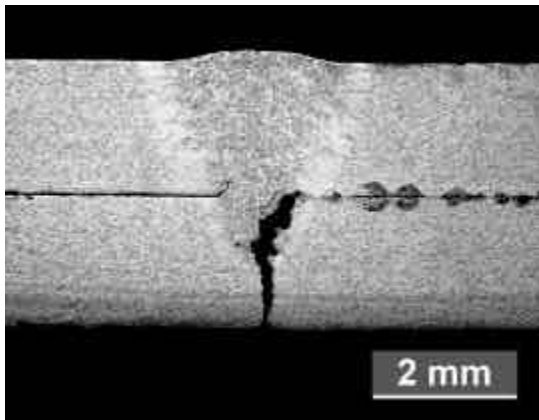
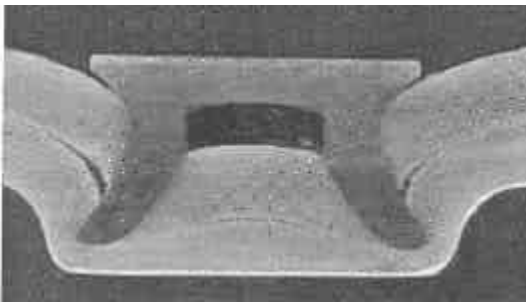
Flächenförmig



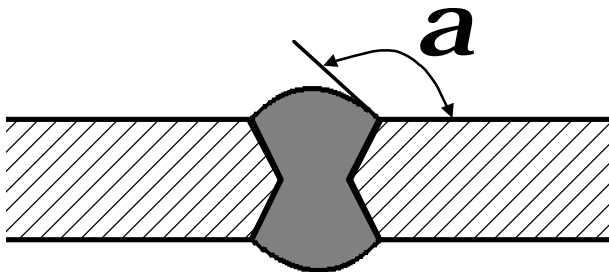
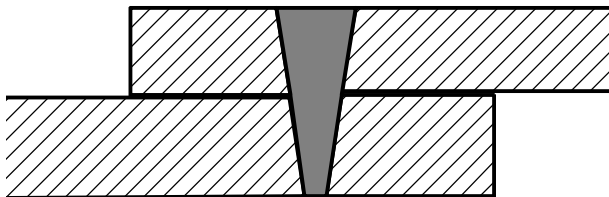
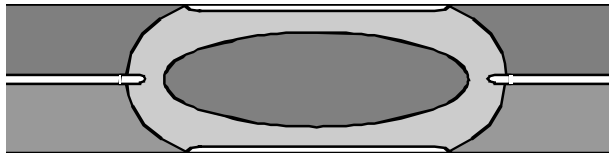
Problemstellung

Betriebsfestigkeitsbestimmende Faktoren

Werkstoffseitig



Beanspruchungsseitig Singularität, Kerbe

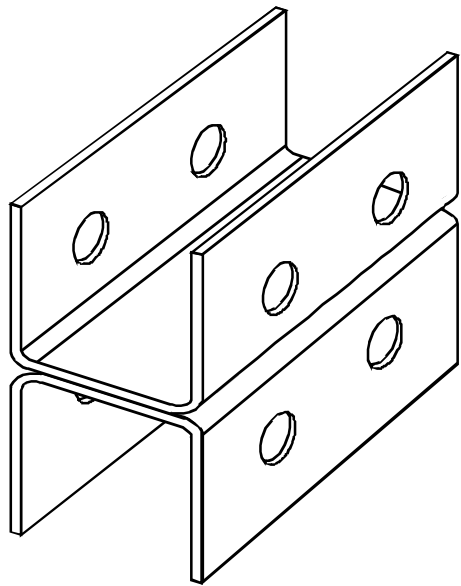


Andere Einflüsse

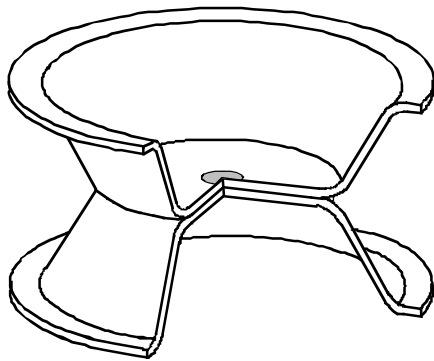
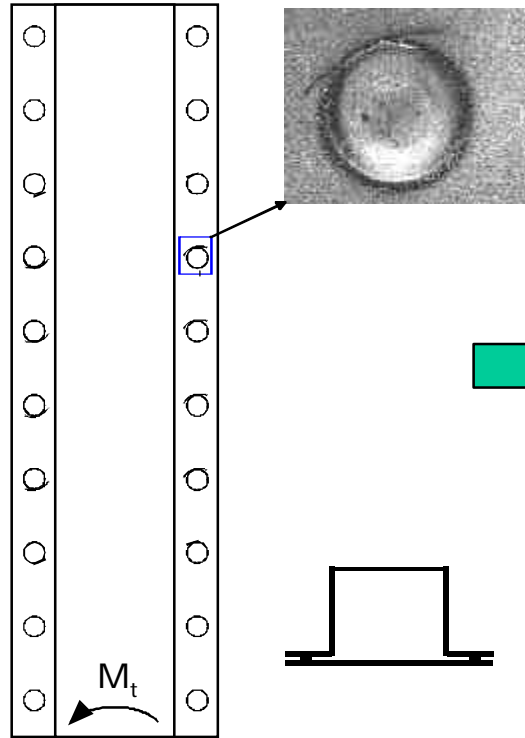
Fertigung
Eigenspannungen
etc.

Problemstellung

Übertragung von Proben zu Bauteilen

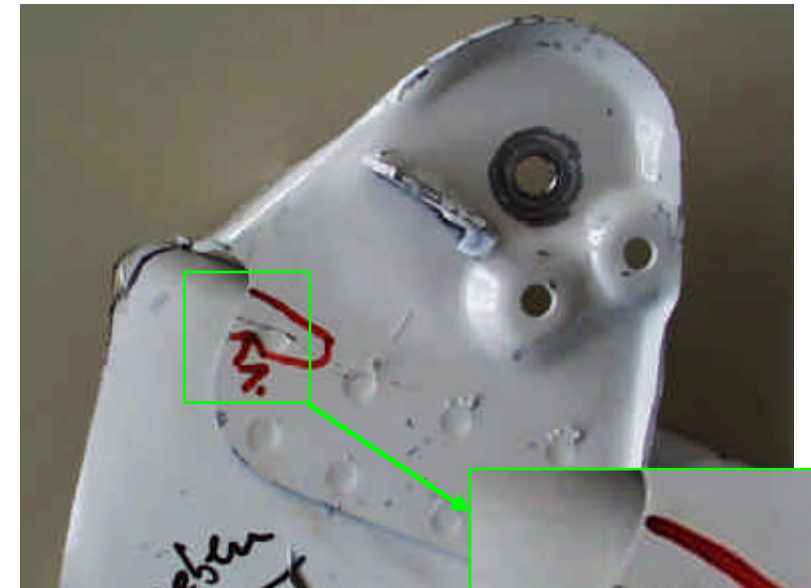
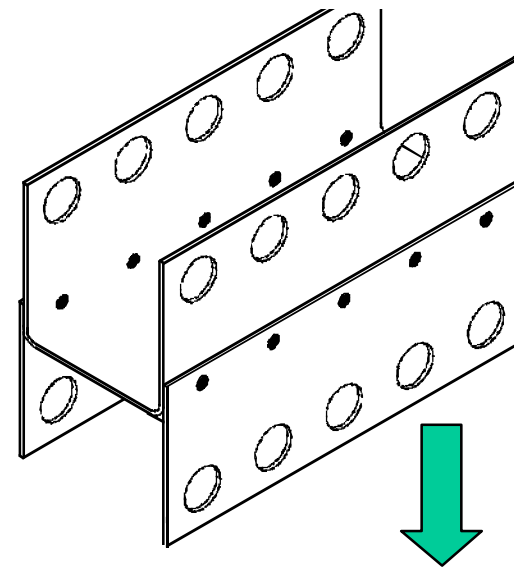


+



+

+



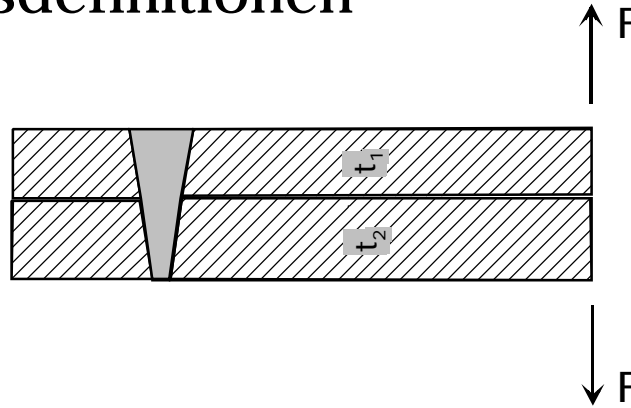
Betriebsfestigkeitstheorien für Schweißpunkte und -nähte

State-of-the-art

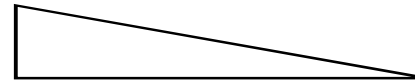
- Bruchmechanische Ansätze
 - Spannungsintensitätsfaktor: Pook, Yuuki, Radaj, Wang ...
 - SIF + Rißfortschritt: Smith & Cooper, Newman & Dowling ...
 - J-Integral: Wang & Ewing
- Spannungsansätze
 - Kerbspannungen: Radaj, Zhang
 - Strukturspannungen: Radaj, Rupp, Sheppard, Zhang ...
- Dehnungsansätze
 - Mizui etc., Rui etc.
- Örtliches Konzept (basierend auf Dehnungen und Dehnungswöhlerlinien)
 - Hsu, Henrysson

Betriebsfestigkeitstheorien für Schweißpunkte und -nähte

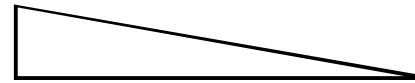
Unterschiedliche Spannungsdefinitionen



Momentverlauf



Verlauf der (Nenn-)
Strukturspannung



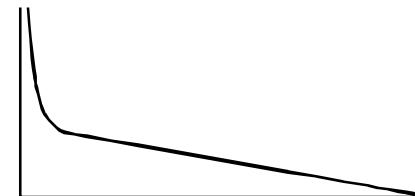
Berechnungsaufwand
gering

Verlauf der (fiktiven)
Kerbspannung
(Strukturspannung)



Berechnungsaufwand
hoch

Spannungsverlauf mit
Singularität



Berechnungsaufwand
sehr hoch

Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Konzept von FESPOW

Radialspannung im Blech

$$s_r(F_{x,i}) = F_{x,i} / (p d t_i)$$

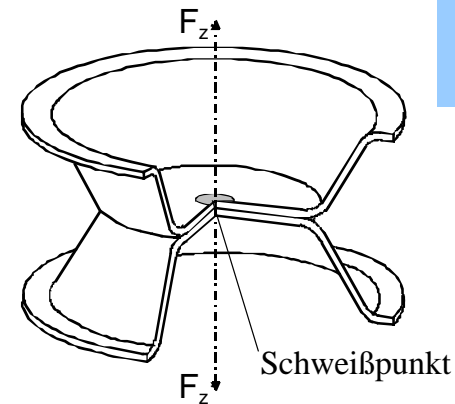
$$s_r(F_{y,i}) = F_{y,i} / (p d t_i)$$

$$s_r(F_{z,i}) = \begin{cases} 1.744 K F_{z,i} / t_i^2 & \text{für } F_{z,i} \geq 0 \\ 0 & \text{für } F_{z,i} < 0 \end{cases}$$

$$s_r(M_{x,i}) = 1.872 K_i M_{x,i} / (d t_i^2)$$

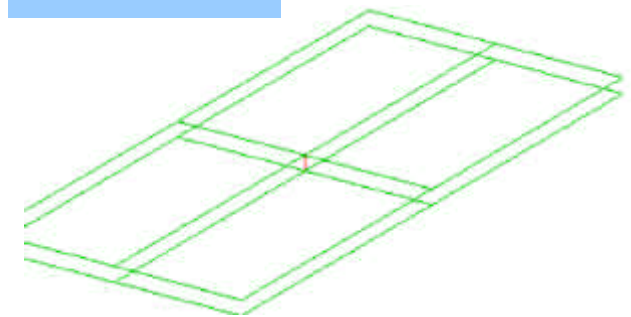
$$s_r(M_{y,i}) = 1.872 K_i M_{y,i} / (d t_i^2)$$

$$K_i = 0.6 \sqrt{t_i}$$



Versagen beim Kopfzug ?

FE-Modell



**MODELL DER BLECHE ALS SCHEIBEN
UND PLATTEN MIT STARREM KERN
RADIALSPANNUNGEN**

$$\sigma_{r,max} = F_{x,y} / \pi d s$$

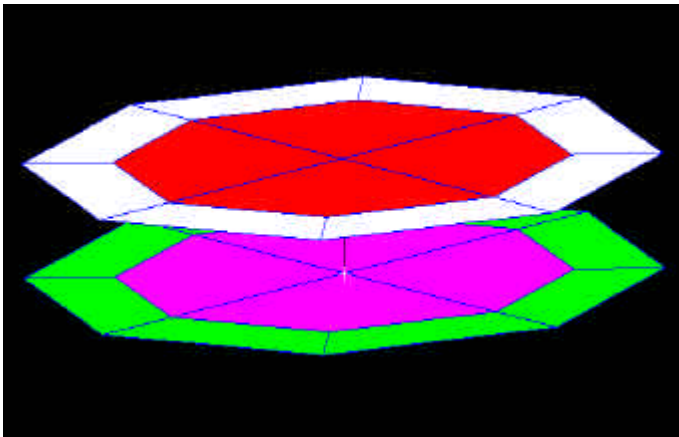
$$\sigma_r = 1,744 F_z / s^2$$

$$\sigma_{r,max} = 1,872 M_{x,y} / d s^2$$

Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Methode in FEMFAT

FE-Modell in FEMFAT

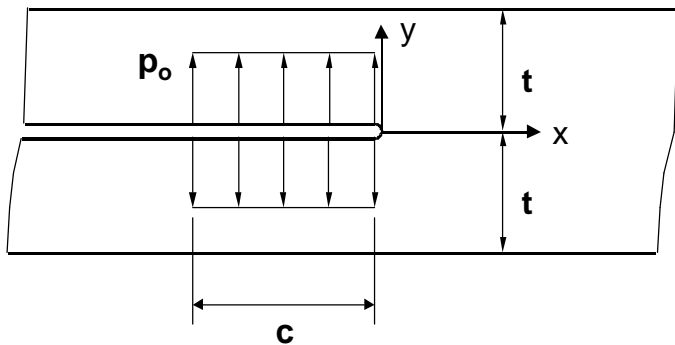


- Modellierung
 - lokal versteift durch Schalenelemente mit hohem E-Modul
 - Schalenelemente mit einem Balkenelement verbunden
- Die Spannungen in den angrenzenden Elementen werden zur Auswertung herangezogen
- Das Konzept ist ein reines Strukturspannungskonzept
- Die Beanspruchbarkeit ist richtungsabhängig

Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Zusammenhang zwischen SIF und Strukturspannung

Riss in einer Schalenstruktur



Ein neuer Parameter

$$p = \mathbf{s}_{a(rn)} \sqrt{t}$$

Spannungsintensitätsfaktor

$$K_I = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{c^2}{t^2} p_o \sqrt{t} \quad \text{für } c \rightarrow \infty$$

Moment

$$m_z = -c^2 p_o / 2$$

Strukturspannung

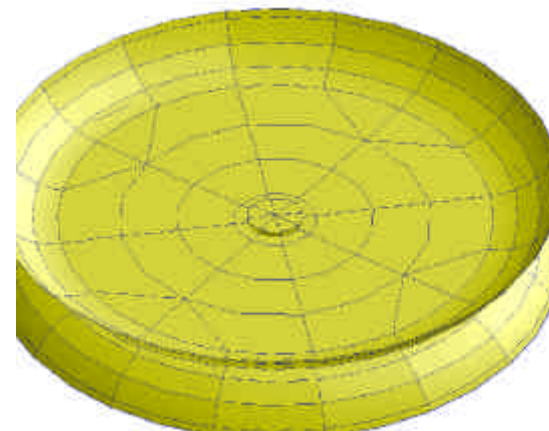
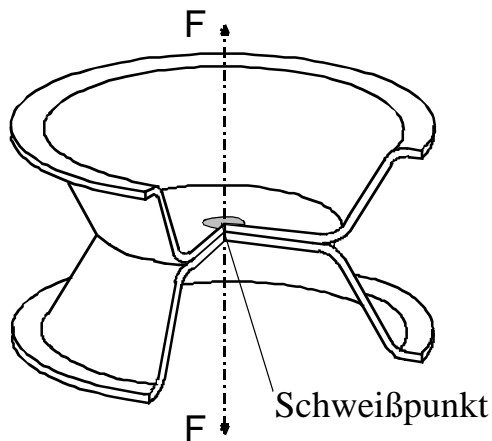
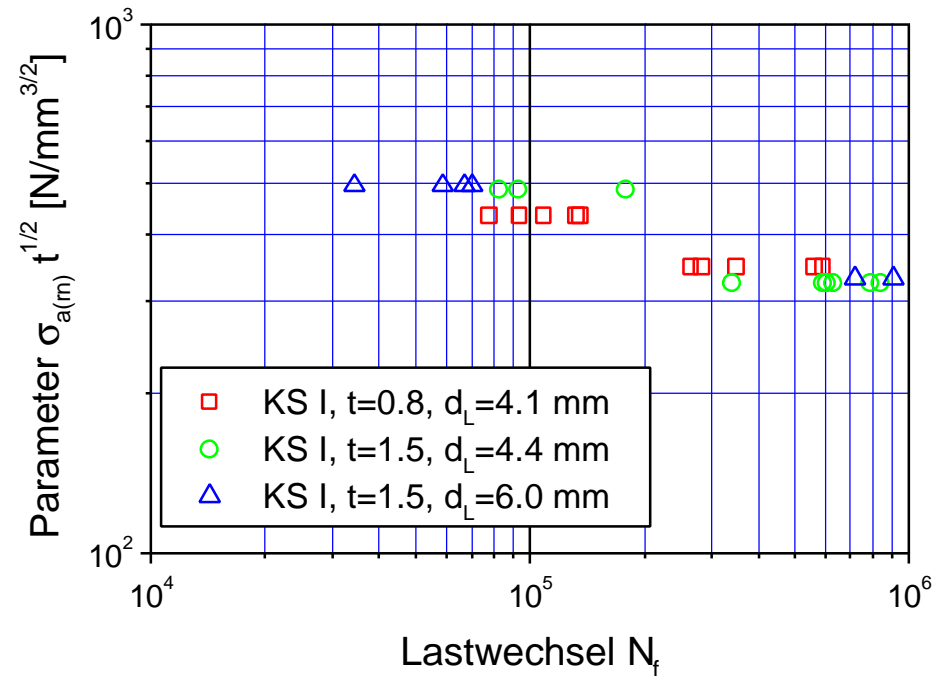
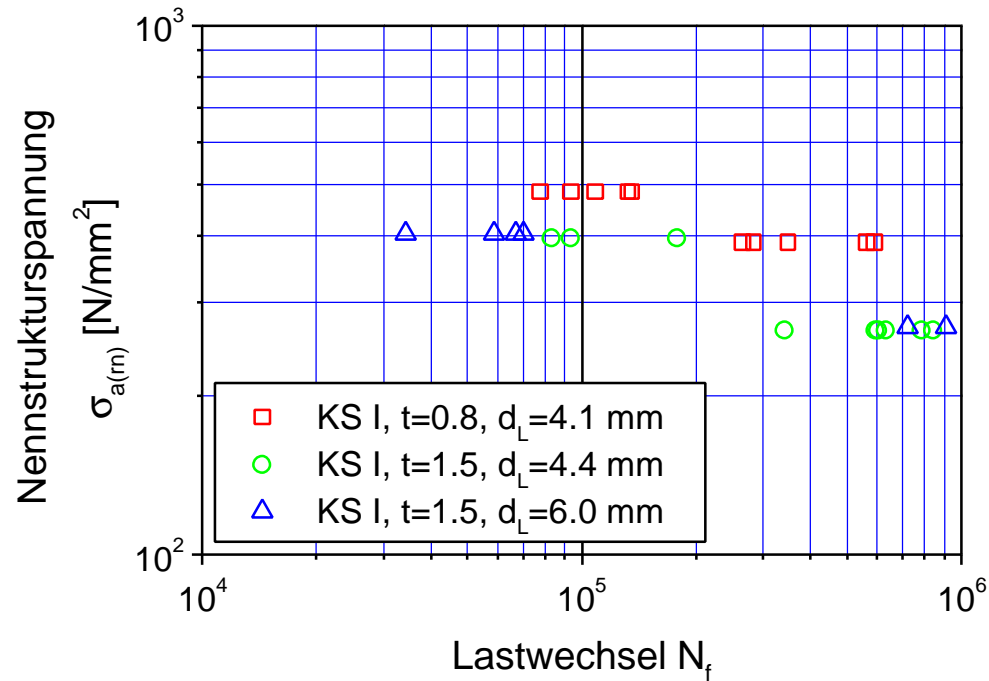
$$\mathbf{s}_{xn} = -6m_z / t^2 = 3c^2 p_o / t^2$$

SIF und Strukturspannung

$$K_I = \sqrt{\frac{1}{6}} \mathbf{s}_{xn} \sqrt{t} \quad \text{für } c \rightarrow \infty$$

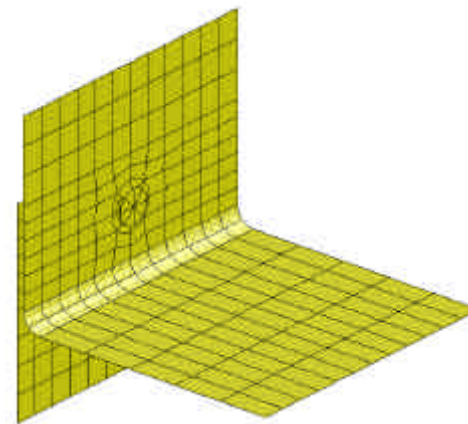
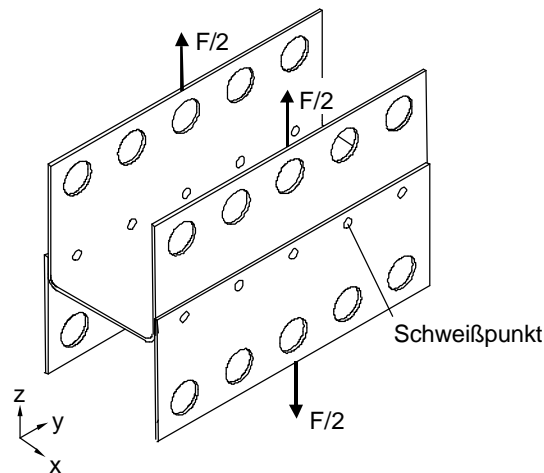
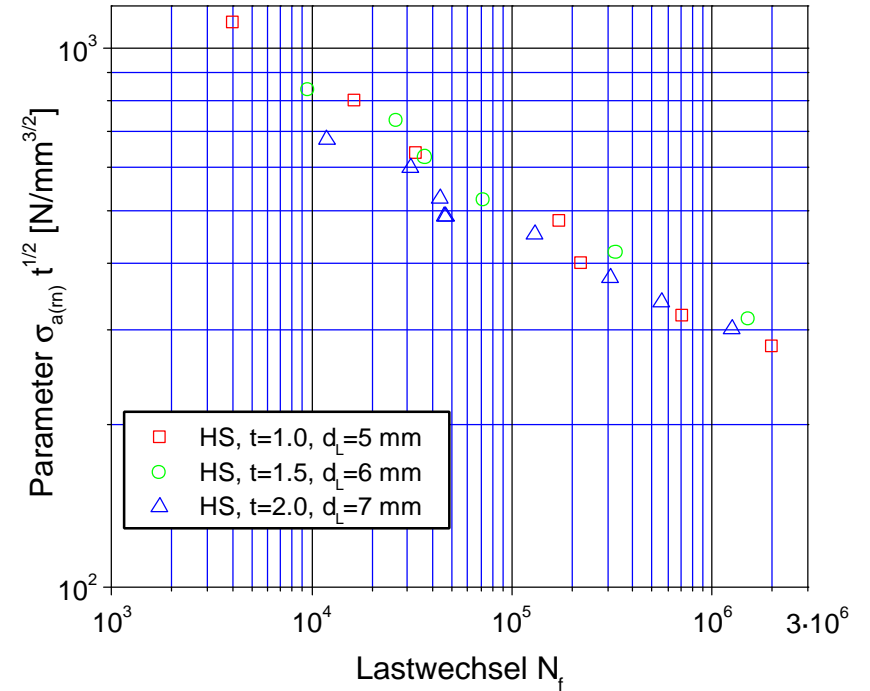
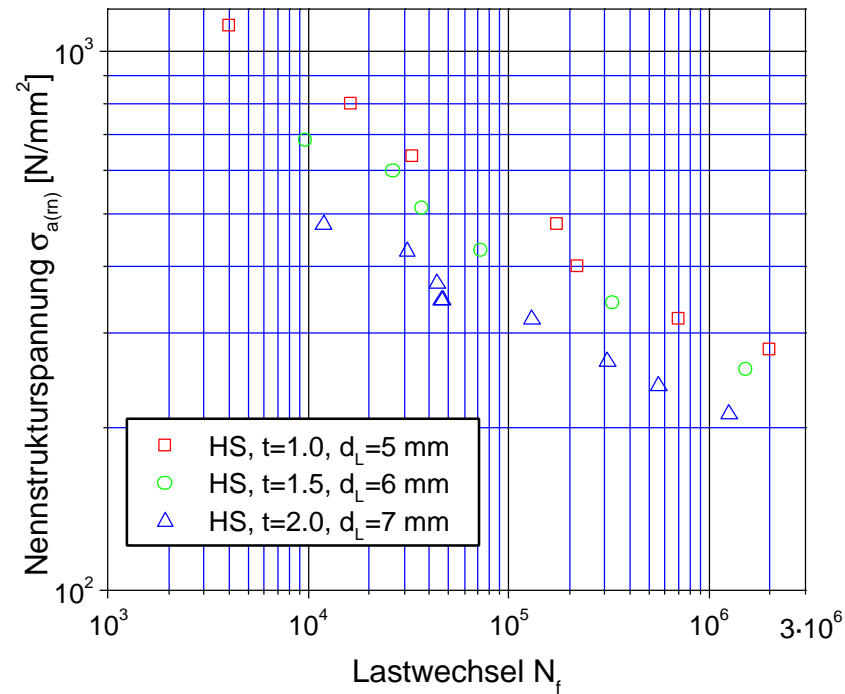
Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Auswertung Versuchsergebnisse mit verschiedenen Methoden



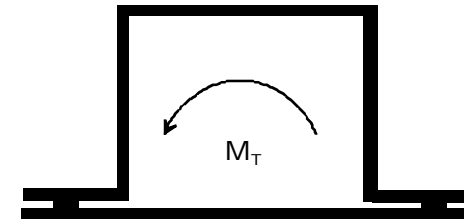
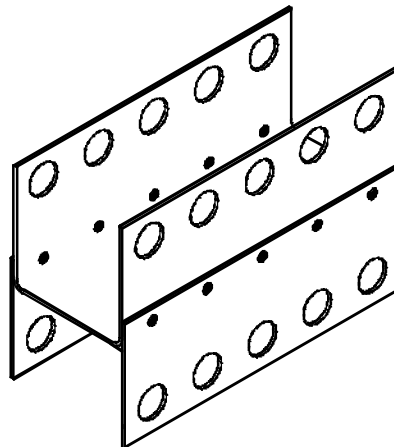
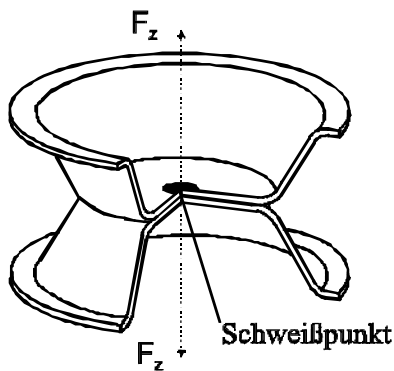
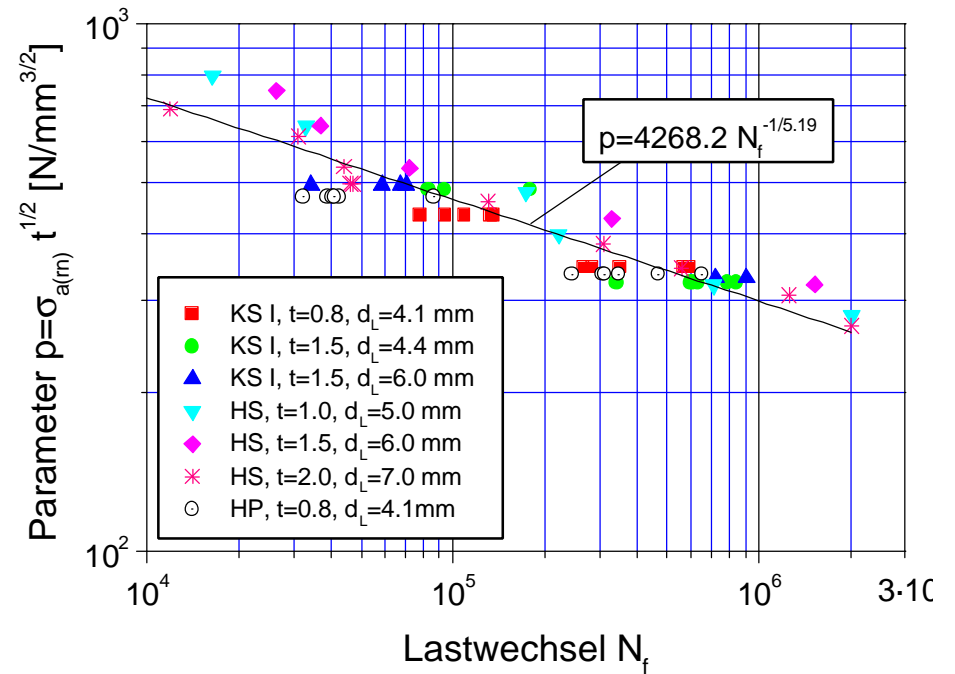
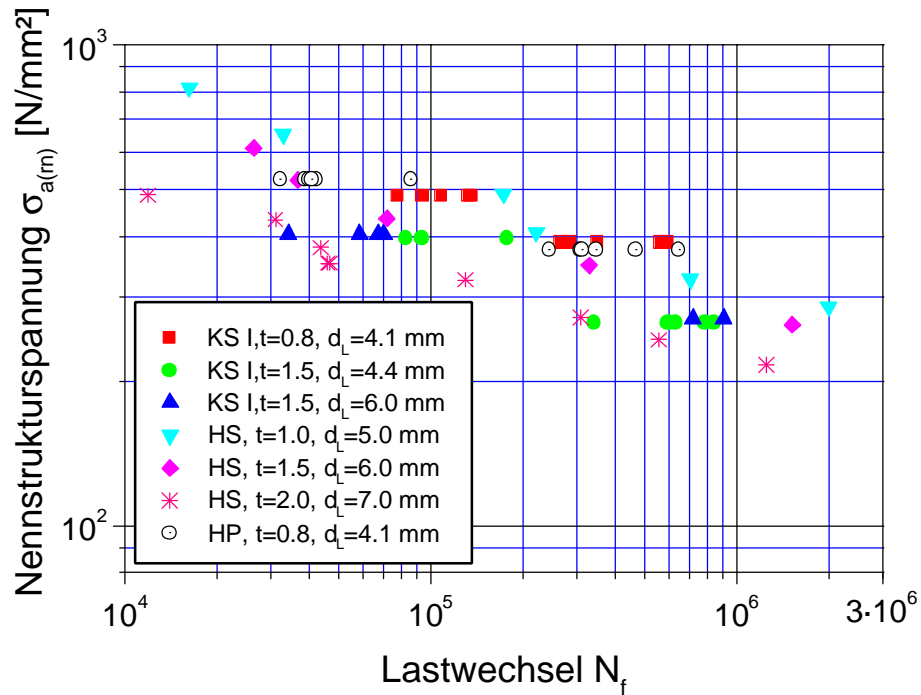
Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Auswertung Versuchsergebnisse mit verschiedenen Methoden



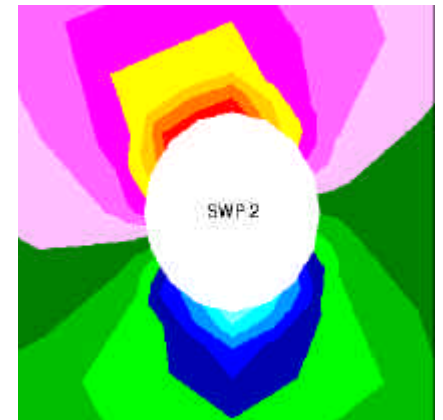
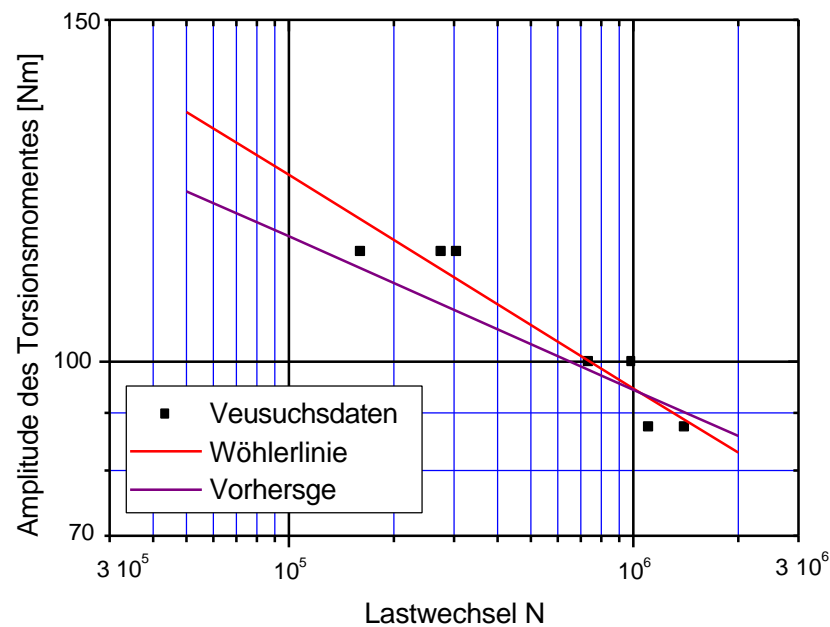
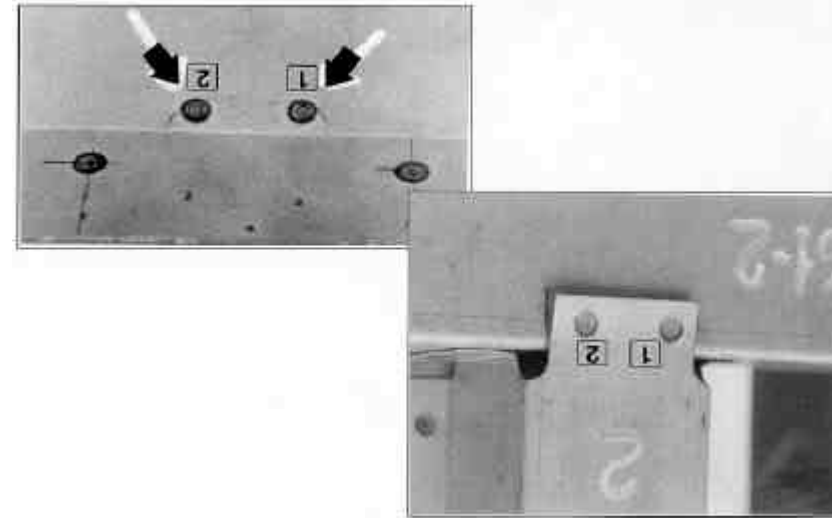
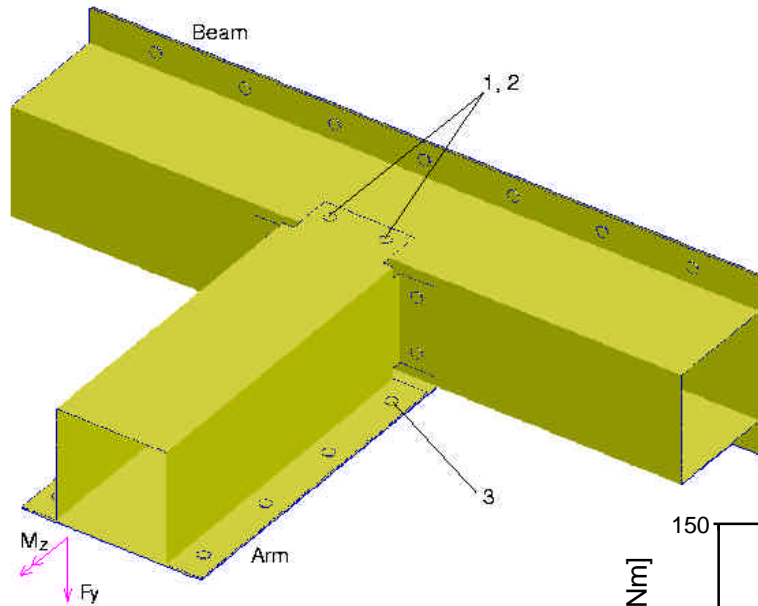
Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Zusammenstellung der Auswertung



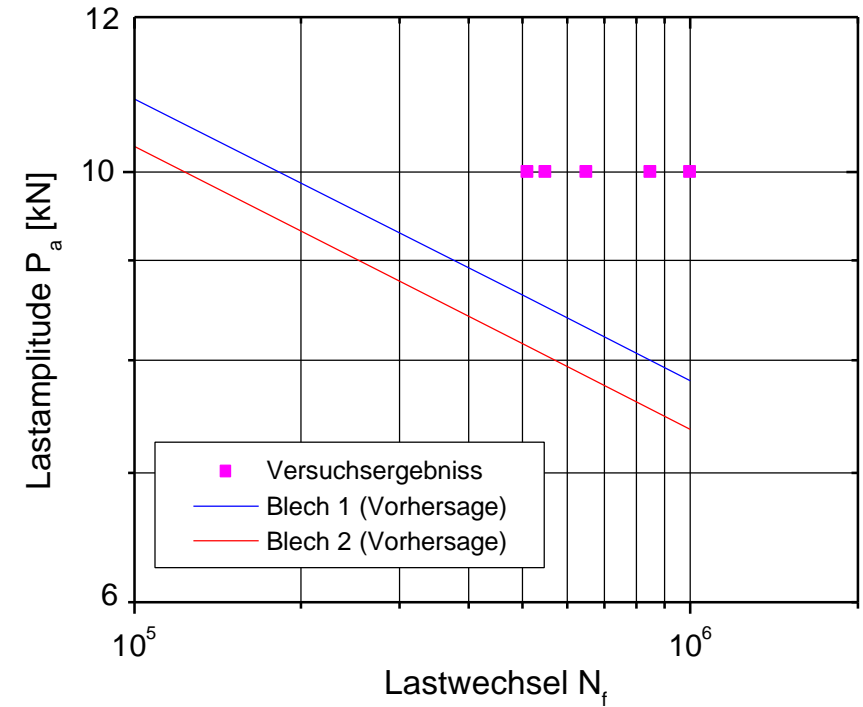
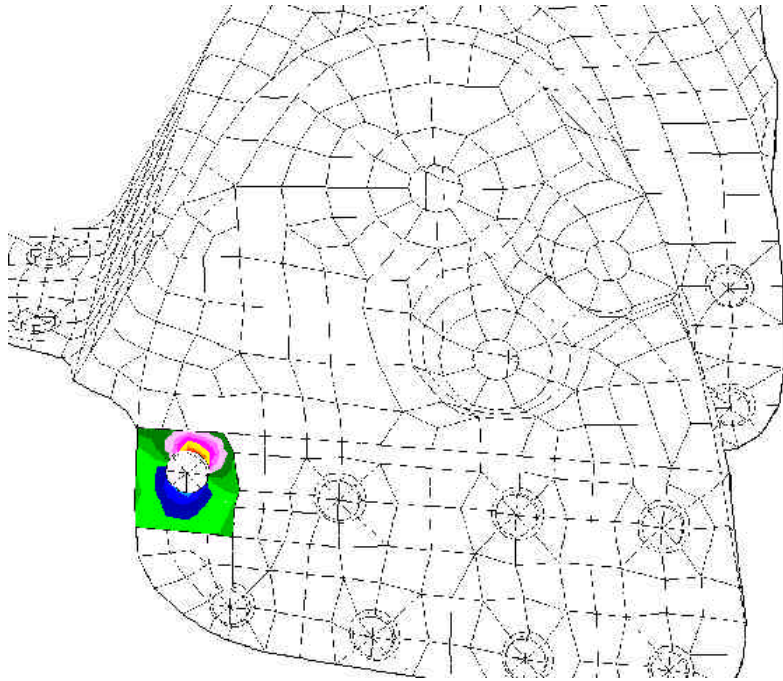
Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Verifikation an bauteilähnlicher Probe



Motivation zur Entwicklung von neuen Methoden

Anwendung an Bauteilen

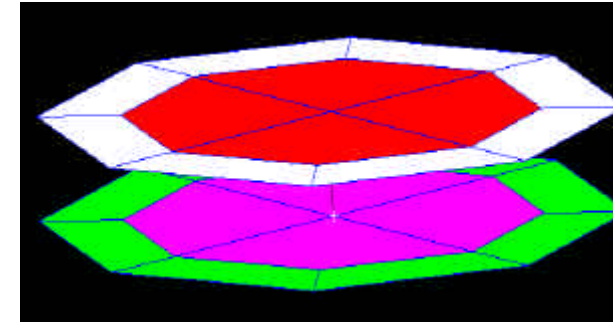
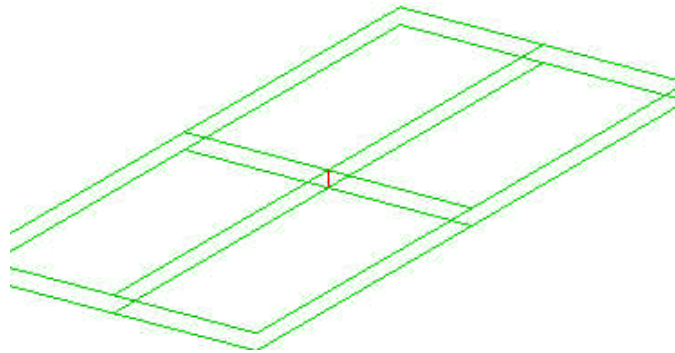


Aspekte der numerischen Berechnung

Kinematische Anforderungen

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(\mathbf{x}_p) &\approx \mathbf{u}(\mathbf{x}_C) + \mathbf{W} \cdot (\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_C) \\ &= \mathbf{u}(\mathbf{x}_C) + ? \times (\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_C)\end{aligned}$$

$$\forall \mathbf{x}_p \in \Omega_S$$

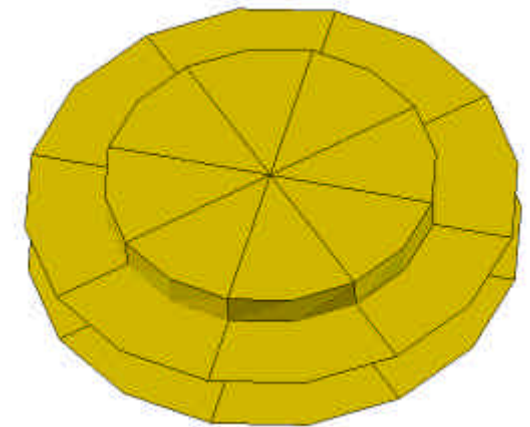
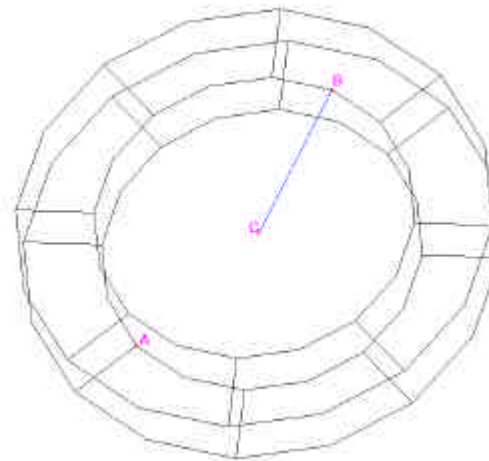


$$\|\mathbf{x}_A + \mathbf{u}(\mathbf{x}_A) - \mathbf{x}_B - \mathbf{u}(\mathbf{x}_B)\| \approx \|\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_B\|$$

$$\forall \mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B \in \Omega_S$$

Statische Anforderungen

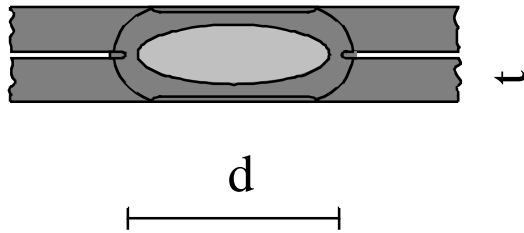
$$F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$$



Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

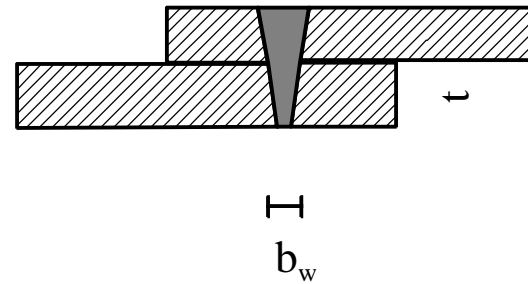
Vergleich Geometrie von SWP und Schweißnaht

Schweißpunkte



$$d = 5\sqrt{t}$$

Lasernaht

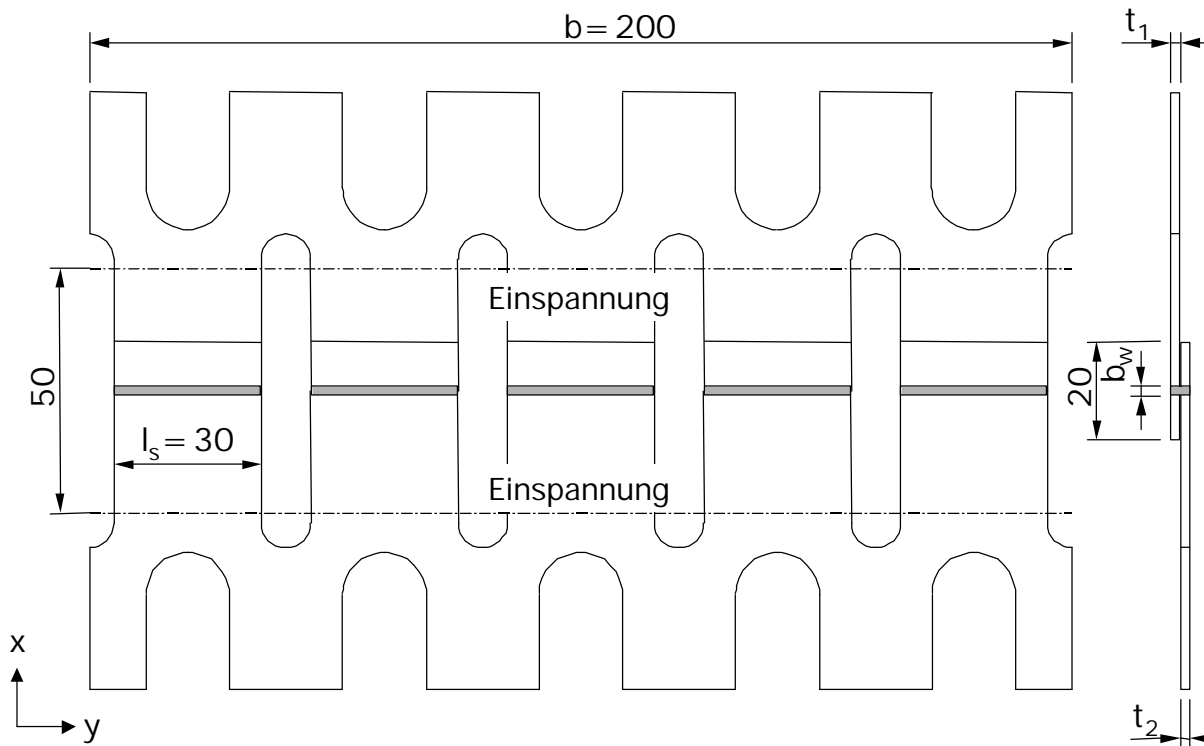


$$b_w \approx 0.5t$$

Lokale Singularität ähnlich

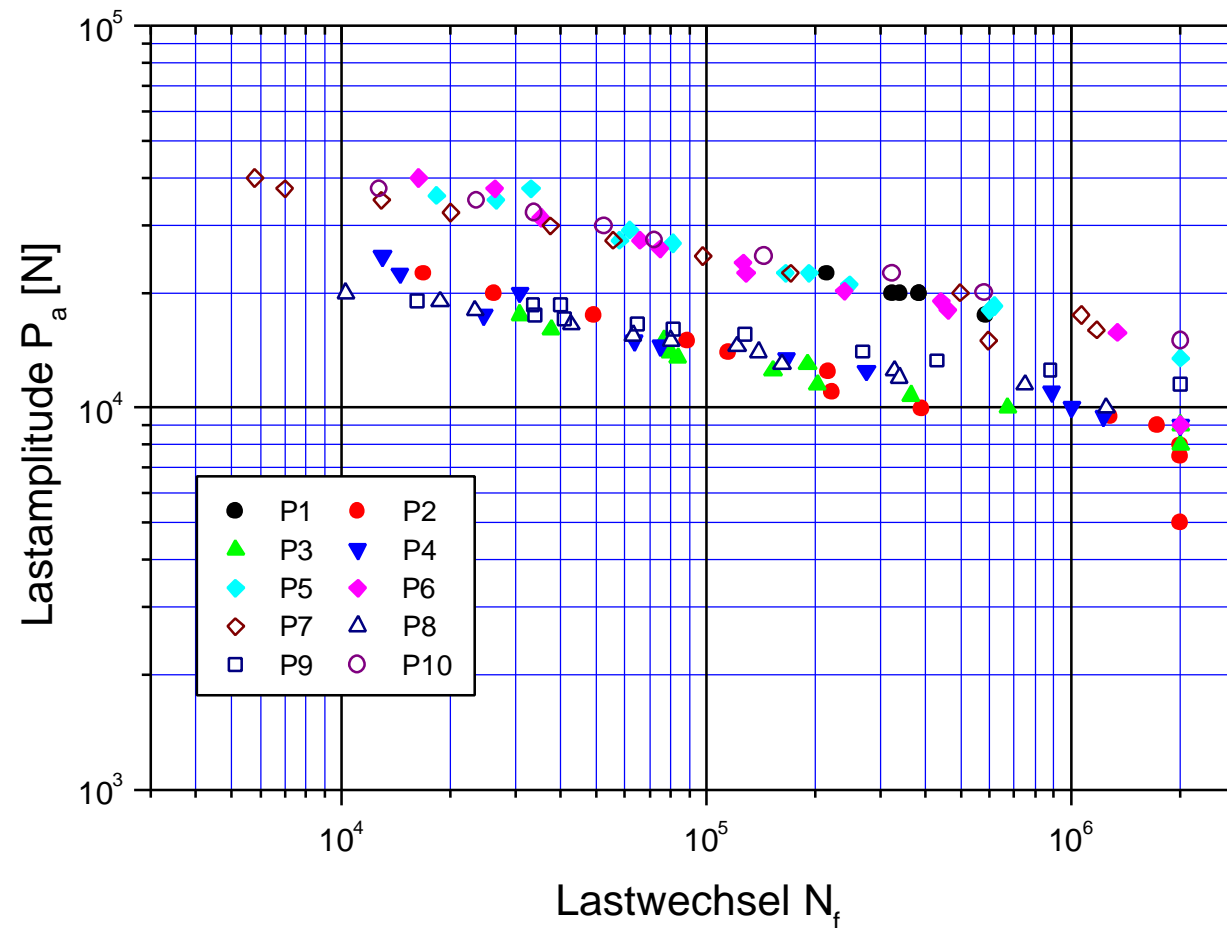
Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Experimentelle Grundlagen



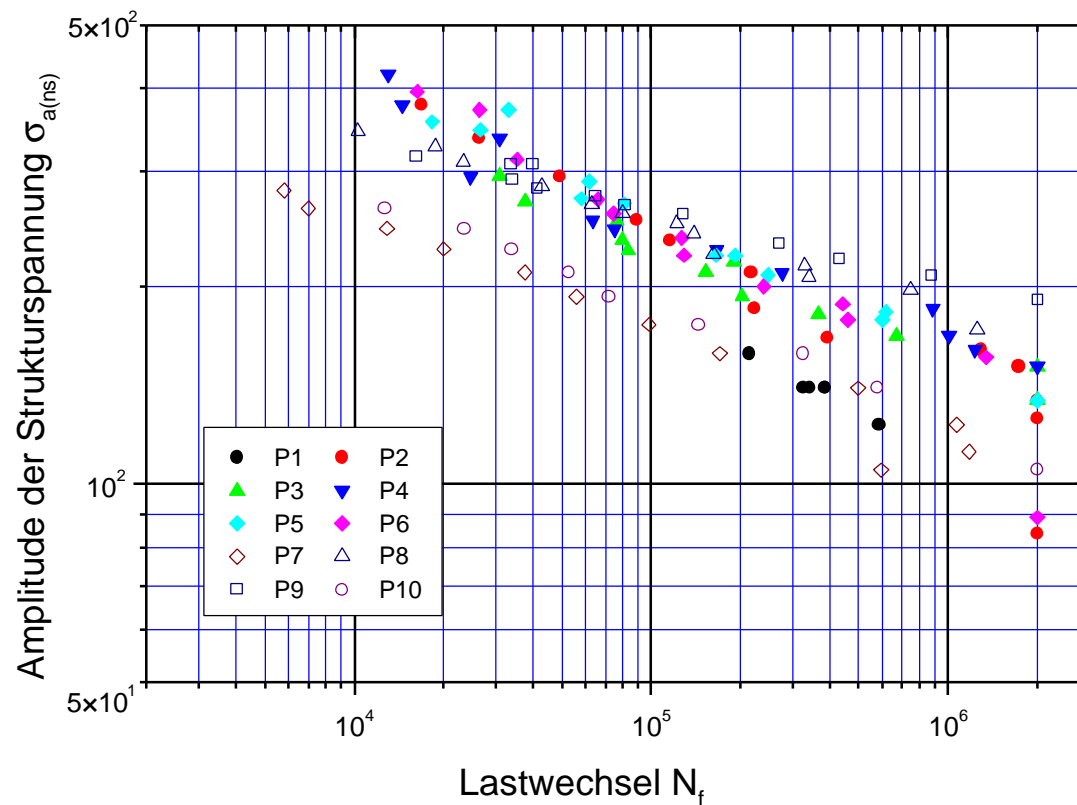
Reihe	Blechdicke t1 [mm]	Blechdicke t2 [mm]	Nahtbreite b [mm]
P1	1,90	1,90	1,0
P2	0,80	0,80	0,6
P3	0,80	0,80	0,6
P4	0,80	0,80	0,6
P5	1,35	1,35	0,8
P6	1,35	1,35	0,8
P7	1,90	1,90	2,0
P8	0,80	1,35	0,6
P9	0,80	1,90	0,6
P10	1,90	1,90	1,0

Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte Wöhlerlinien

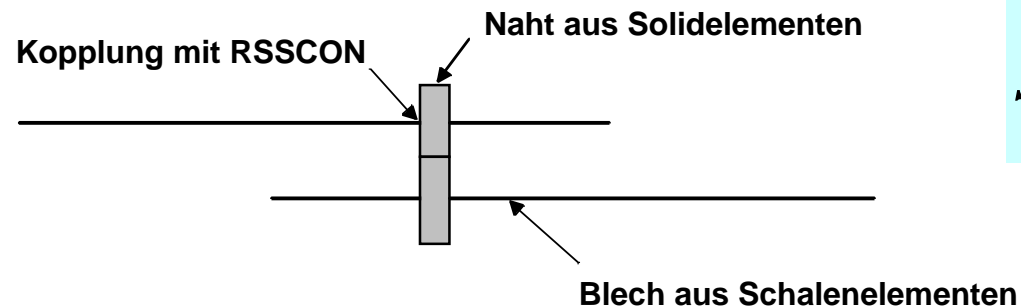


Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Auswertung mit Strukturspannung



FE-Modellierung



$$S_{x,ns} = \frac{n_x}{t} + \frac{6m_y}{t^2}$$

Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Bruchmechanische Ansätze

$$s_x = \frac{K_I}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{j}{2} \left(1 - \sin \frac{j}{2} \sin \frac{3j}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2pr}} \sin \frac{j}{2} \left(2 + \cos \frac{j}{2} \cos \frac{3j}{2} \right)$$

$$s_x = \frac{1}{\sqrt{2pr}} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} K_I - \frac{3}{2\sqrt{2}} K_{II} \right) = \frac{K_{mix}}{\sqrt{2pr}}$$

$$K_{mix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} (K_I - 3K_{II})$$

$$K_{a,mix} = s_{a(ns)} f(b_w/t) b_w^{0,5-p} t^p$$

$$\begin{aligned} K_{a,mix} &= s_{a(ns)} f(b_w/t) (b_w/t)^{0,5-p} \sqrt{t} \\ &= s_{a(ns)} \bar{f}(b_w/t) \sqrt{t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{a,mix} &= s_{a(ns)} f(b_w/t) (b_w/t)^{-p} \sqrt{b_w} \\ &= s_{a(ns)} \bar{\bar{f}}(b_w/t) \sqrt{b_w} \end{aligned}$$

Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Bruchmechanische Ansätze

$$f(b_w/t) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(0.6)}{k!} (b_w/t - 0.6)^k + O((b_w/t - 0.6)^{n+1})$$

$$\begin{aligned} f(b_w/t) &\approx f(0.6) + f^{(1)}(0.6)(b_w/t - 0.6) \\ &= A + B(b_w/t - 0.6) \end{aligned}$$

$$\widehat{K}_a = K_1 N_f^{-1/k}$$

$$\sum_i^N \left(s_{a(ns),i} \sqrt{b_{w,i}} (A + B((b_w/t)_i - 0.6)) - K_1 N_{f,i}^{-1/k} \right)^2 \rightarrow \min$$

Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Bruchmechanische Ansätze

$$\begin{aligned}
 p_a &= K_{a,mix} / A \\
 &\approx \mathbf{s}_{a(ns)} (1 + (B/A)(b_w/t - 0.6)) \sqrt{b_w} \\
 &= \mathbf{s}_{a(ns)} (1 + B_1(b_w/t - 0.6)) \sqrt{b_w}
 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^N \left(\mathbf{s}_{a(ns),i} \sqrt{b_{w,i}} (1 + B_1((b_w/t)_i - 0.6)) - p_1 N_{f,i}^{-1/k} \right)^2 = \sum_{i=1}^N (p_{a,i} - \hat{p}_{a,i})^2 \rightarrow \min$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_i (p_{a,i} - \hat{p}_{a,i})^2}{\sum_i p_{a,i}^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_i p_{a,i} \right)^2} \rightarrow \max$$

Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Bruchmechanische Ansätze/Erweiterung

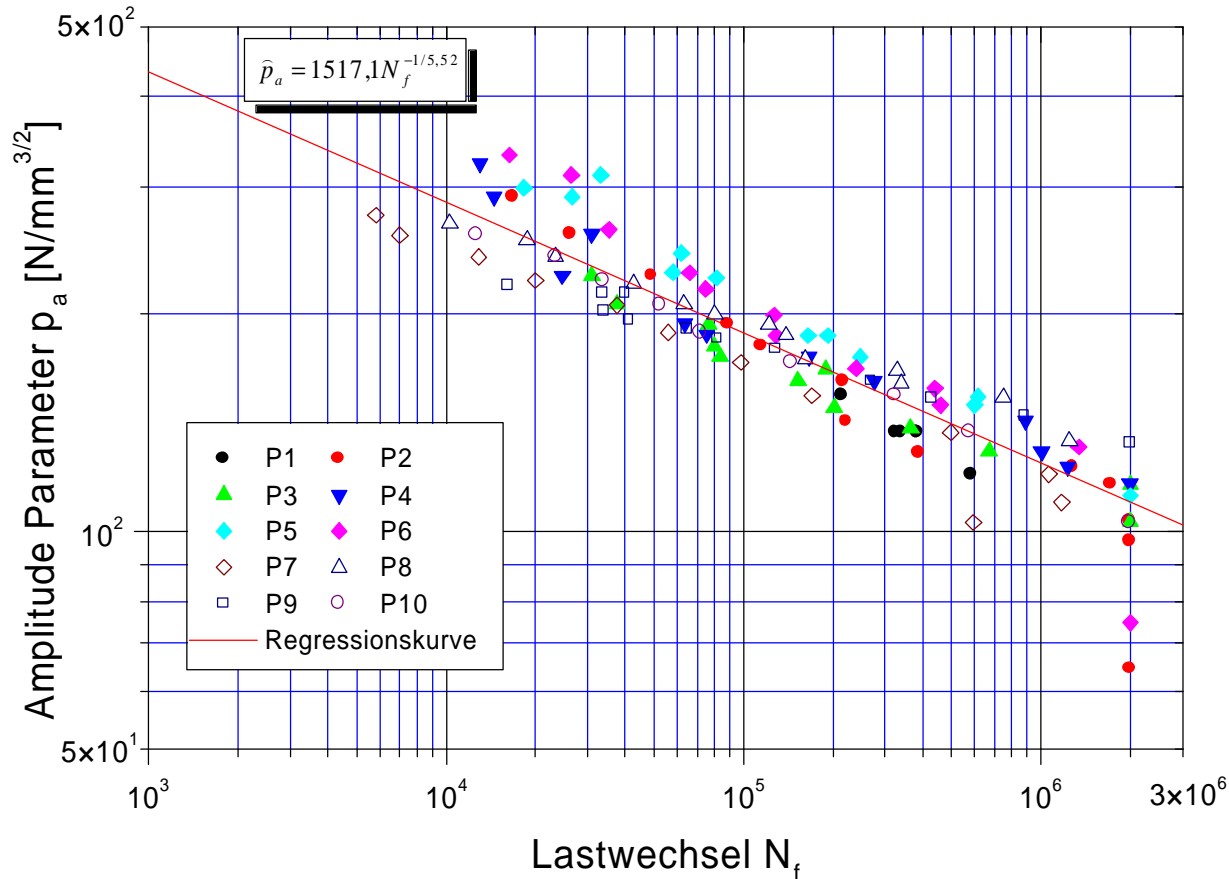
$$K_{a,mix} = \mathbf{s}_{a(ns)} f(b_w/t_1, b_w/t_2, t_1/t_2) \sqrt{b_w}$$

$$\begin{aligned} f(b_w/t_1, b_w/t_2, t_1/t_2) &\approx f(0.6, 0.6, 1.0) + \frac{\partial f}{\partial x_1} (b_w/t_1 - 0.6) + \frac{\partial f}{\partial x_2} (b_w/t_2 - 0.6) \\ &\quad + \frac{\partial f}{\partial x_3} (t_1/t_2 - 1) \\ &= A + 0.5B(b_w/t_1 - 0.6) + 0.5B(b_w/t_2 - 0.6) + C(t_1/t_2 - 1) \\ &= A(1 + 0.5B_1(b_w/t_1 + b_w/t_2 - 1.2)) + C_1(t_1/t_2 - 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_a &= K_{a,mix} / A \\ &\approx \mathbf{s}_{a(ns)} (1 + 0.5B_1(b_w/t_1 + b_w/t_2 - 1.2)) + C_1(t_1/t_2 - 1) \sqrt{b_w} \end{aligned}$$

Übertragung auf die lasergeschweißten Überlappnähte

Auswertung mit dem Parameter P_a



- Mit der zunehmenden Breite nimmt die Beanspruchung der Naht zu und die Tragfähigkeit der Naht ab (Unlogisch?)!!!
- Nahtbreite so schmal wie möglich
- Im Gegensatz zu SWP ist die Breite der Naht bei Schweißnaht die dominante geometrische Größe

$$p_a = (1 + 0.5B(b_w/t_1 + b_w/t_2 - 1.2) + C(t_1/t_2 - 1))s_{a(ns)}\sqrt{b_w}$$

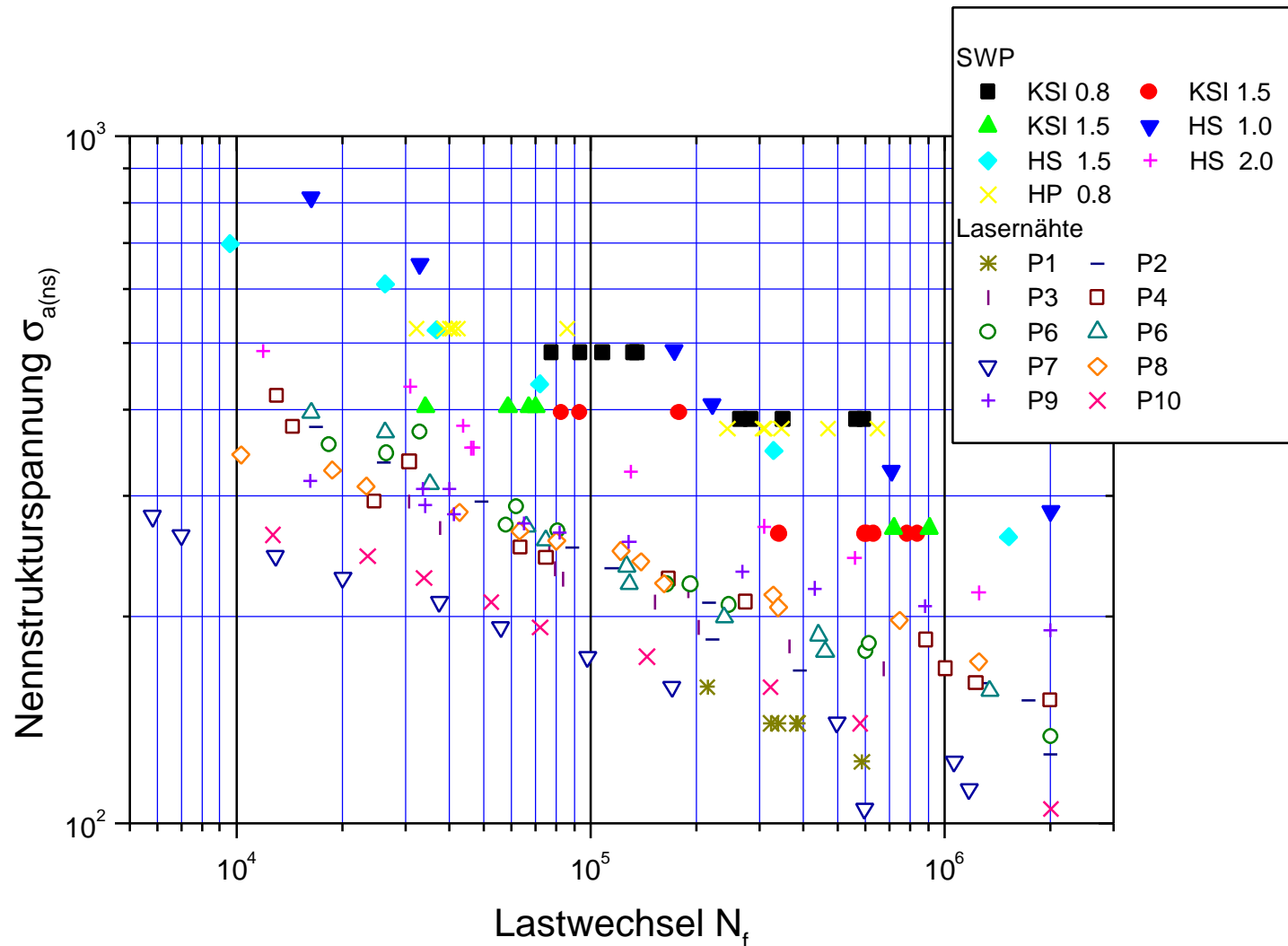
$$p_a = s_{a(ns)}\sqrt{b_w}$$

$$B = -0.05$$

$$C = 0.5$$

Vergleich Schweißpunkte und Lasernähte

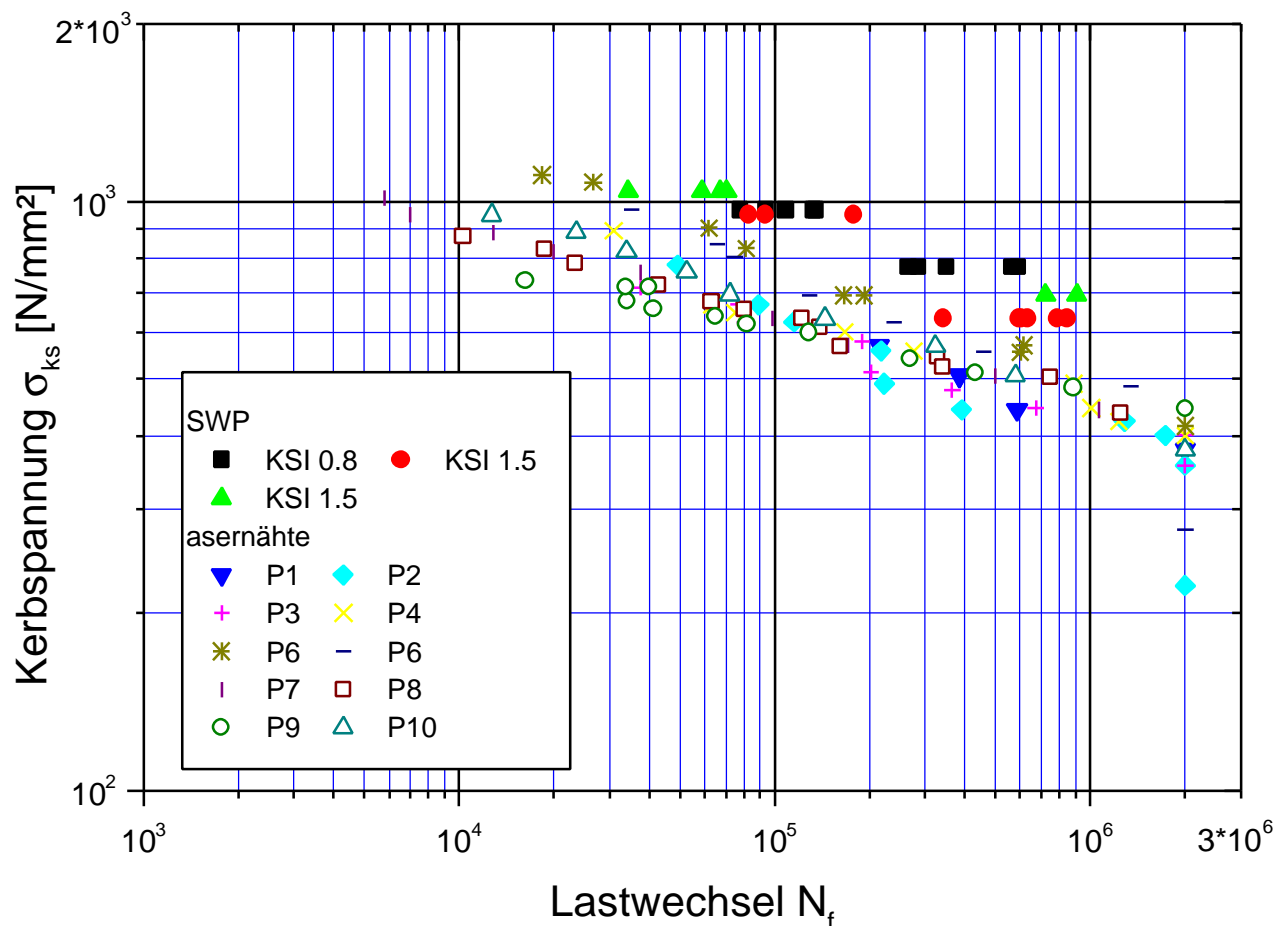
Vergleich basierend auf Strukturspannung



- Die ertragbare Strukturspannung bei SWP ist um ca. 1/3 höher als bei Schweißnähten

Vergleich Schweißpunkte und Lasernähte

Vergleich basierend auf Kerbspannung



- Die ertragbare Kerbspannung bei SWP ist um ca. 1/3 höher als bei Schweißnähten

Vergleich von Schweißpunkten und Lasernähten

Fazit

- Die lokale Schwingfestigkeit eines Schweißpunktes ist um ca. $1/3$ höher als die von einer lasergeschweißten Naht
- Eine Lasernaht besitzt festigkeitsmäßig nur dann Vorteil gegenüber einem Schweißpunkt, wenn sie homogen beansprucht wird
- Homogene Beanspruchung einer Naht liegt in der Regel nur bei einfachen Proben vor. Bei einem realen Bauteil muß mit einer stark inhomogenen Beanspruchung der Nähten gerechnet werden

Zusammenfassung und Ausblick

- Vorgestellte Methoden anwendbar auf reale Strukturen, da nur Strukturspannungen als Grundgrößen verwendet werden
- Singularität bzw. Kerbe werden durch geometrische Größen wie Blechdicke bzw. Nahtbreite berücksichtigt
- Die systematischen Untersuchungen ermöglichen eine Differenzierung der Festigkeitswerte der unterschiedlichen Fügearten
- Übertragung der Methoden auf andere Verbindungsarten erfordern weiteren Forschungsbedarf