

Rechnerischer Nachweis von Schweissnähten Konzepte & Methoden an konkreten Beispielen

25. VPE Swiss Workshop 23. Januar 2020, Rapperswil

Beat Schmied
Schmied Engineering GmbH, CH-4563 Gerlafingen

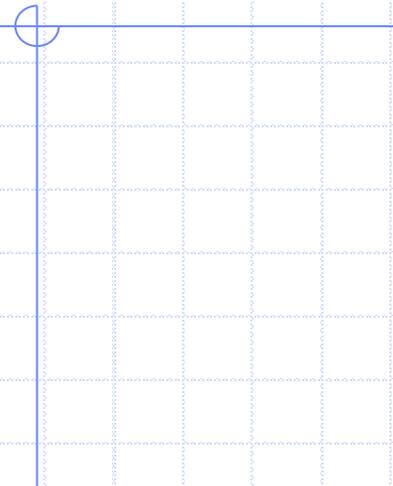
Einleitung und Inhalt

Inhalt

1. Begriffe & Grundlagen
2. Nennspannungskonzept
3. Strukturspannungskonzept
4. Kerbspannungskonzept
5. Nachweisführung

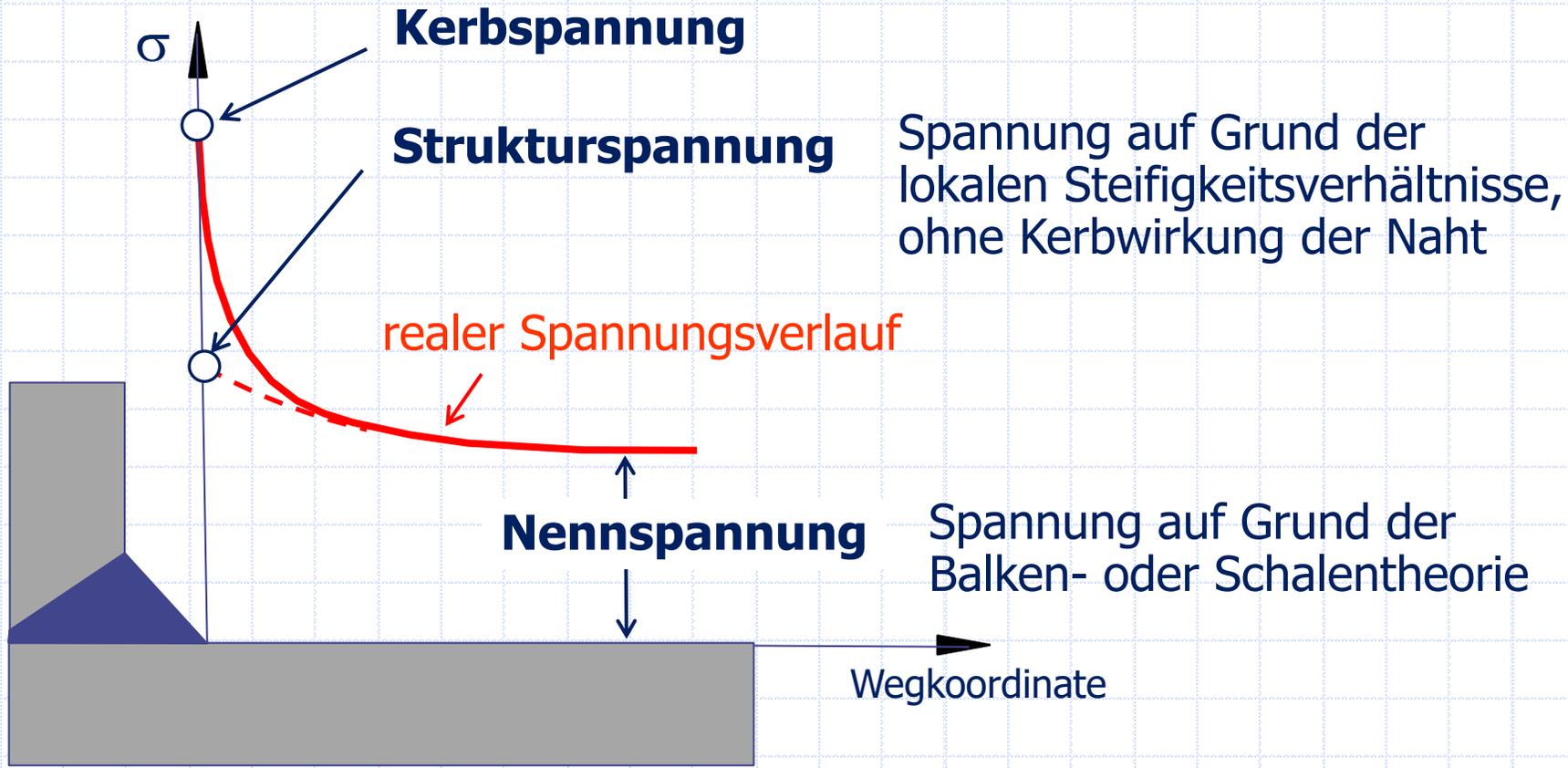
Beschränkung

- ... auf den Ermüdungsnachweis. Nicht behandelt wird der statische Nachweis.
- ... auf die Spannungskonzepte. Nicht eingegangen wird somit auf die Kurzzeitfestigkeit (örtliches Dehnungskonzept) und auf den bruchmechanischen Nachweis.
- ... auf die Dauerfestigkeit (1-Stufenkollektiv).

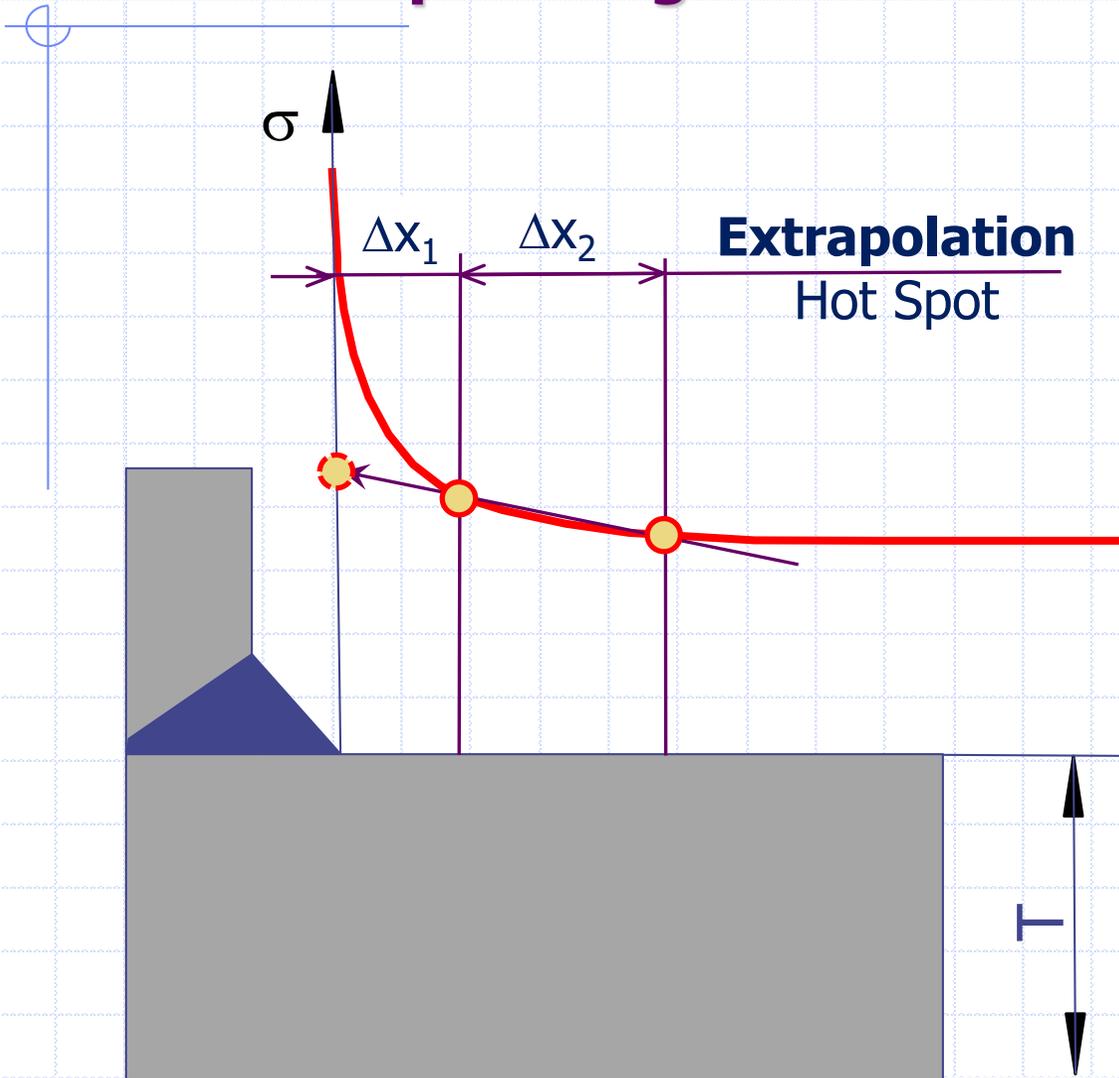


Begriffe & Grundlagen

Spannungsdefinitionen



Strukturspannungsmethode: Extrapolieren (Hot-Spot)

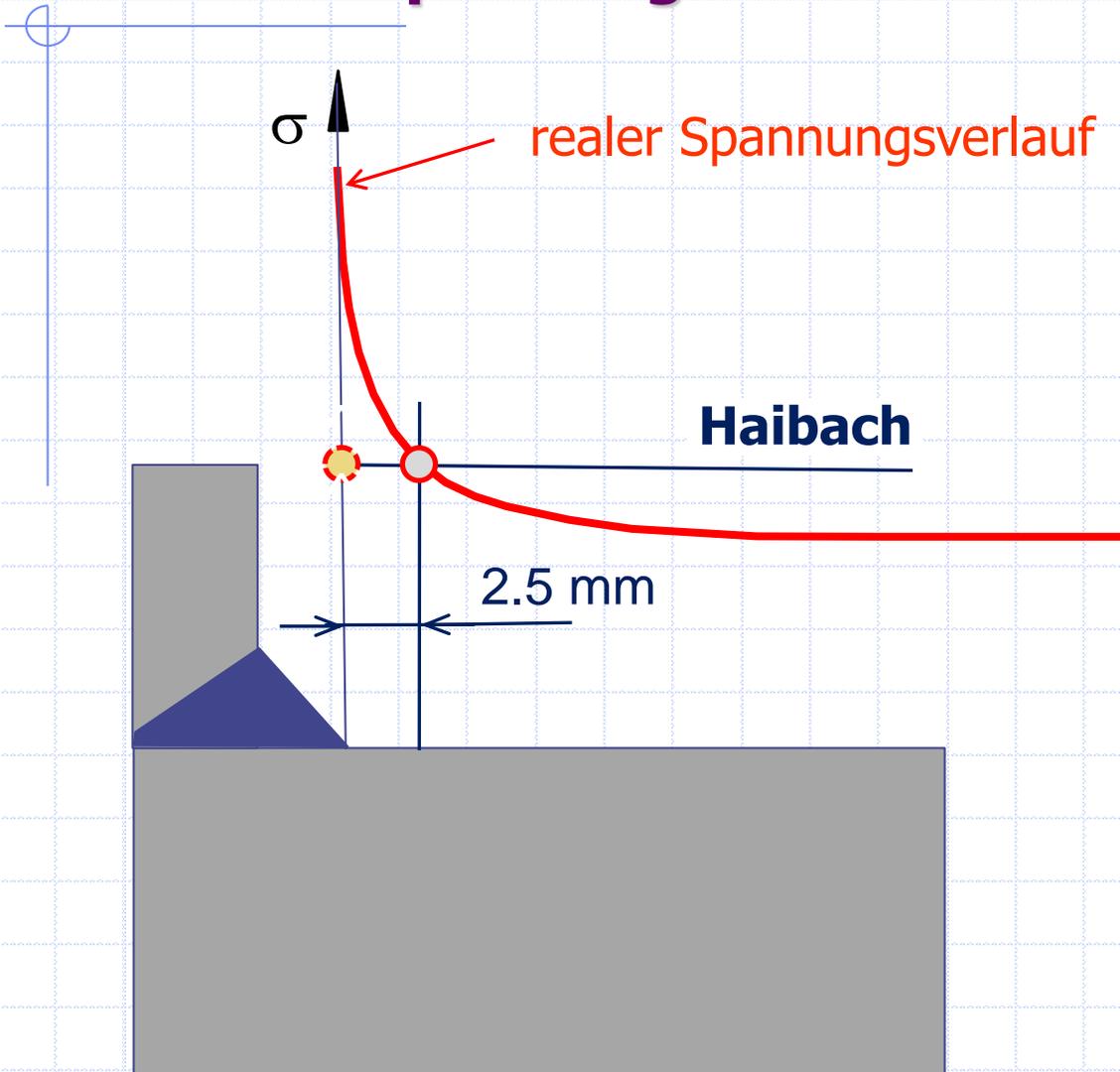


Lineare oder quadratische Extrapolation $\Delta x_i = f(T)$

Standardmethode z. B. in Eurocode und Druckbehälternorm EN 13445

verschiedene Extrapolationen mit zugehörigen Netzvorgaben

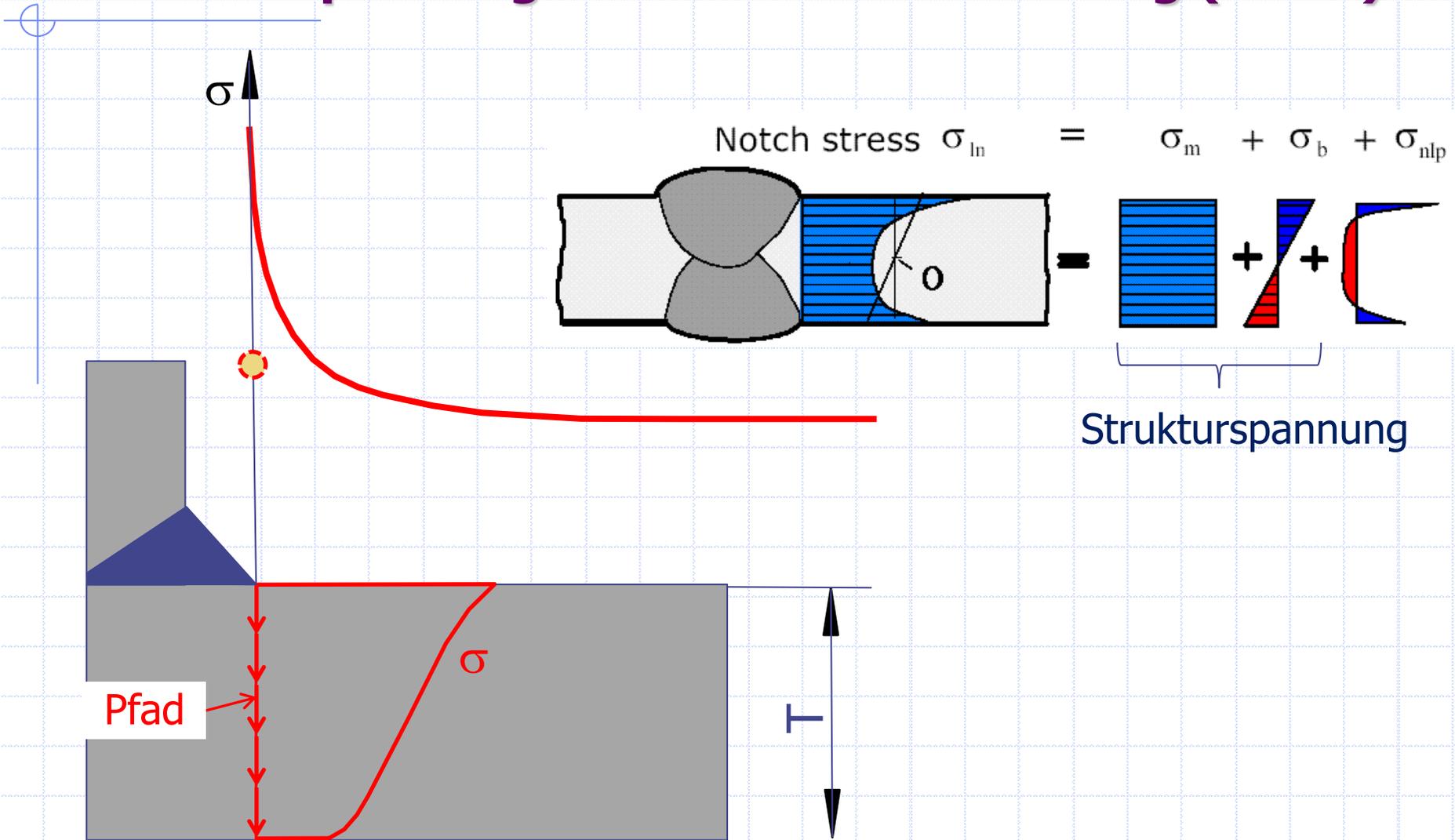
Strukturspannungsmethode: Haibach



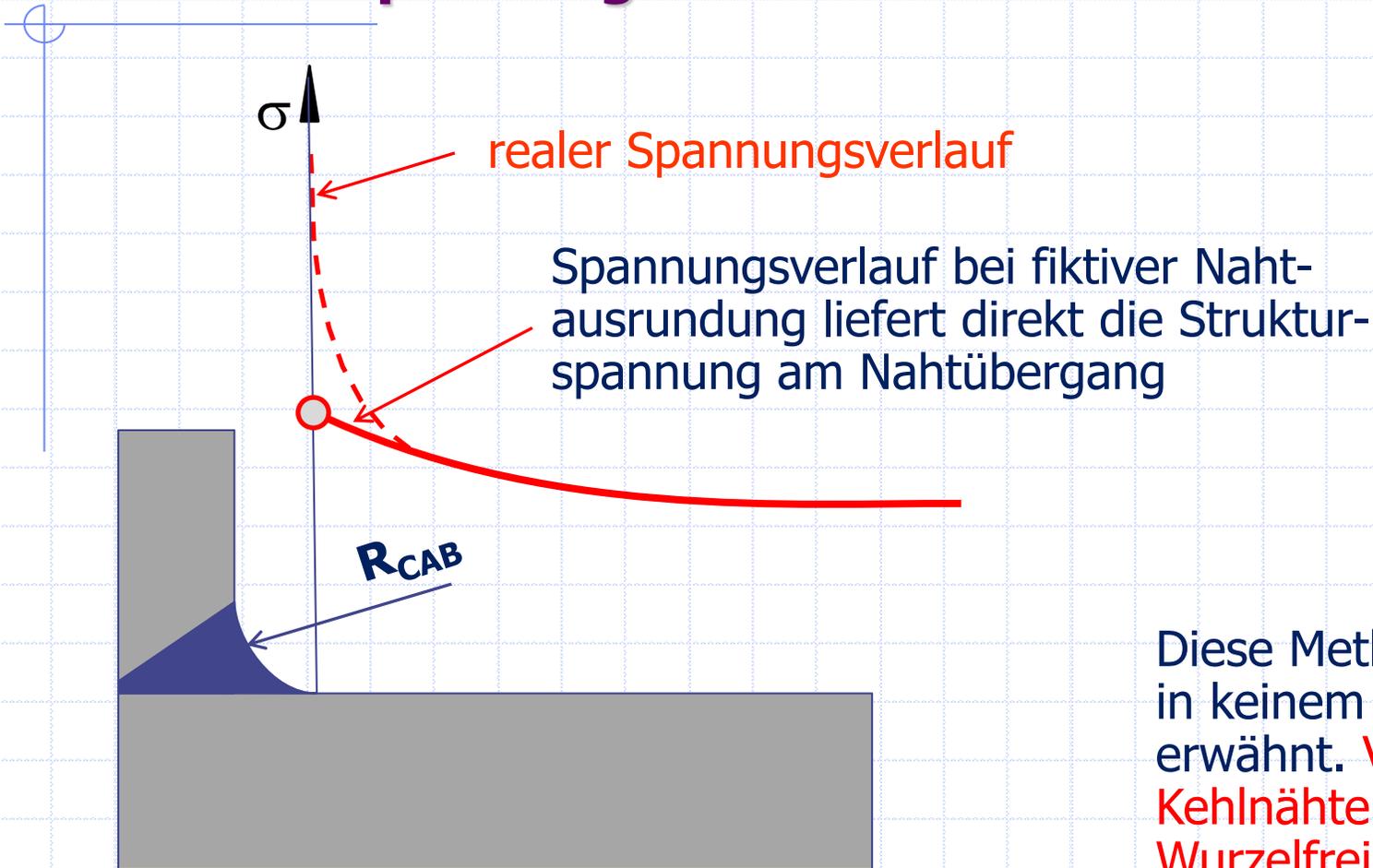
In keiner Norm und keiner Regelwerk definiert. In [IIW1] jedoch erwähnt mit dem Hinweis, dass kein Dickenfaktor berücksichtigt werden muss.

Vorsicht: Bei Blechstärken unter 6 mm ist der Abstand von 2.5 mm u. U. zu gross.

Strukturspannungsmethode: Linearisierung (ASME)



Strukturspannungsmethode: CAB



Diese Methode ist bisher in keinem Regelwerk erwähnt. **Vorsicht bei Kehlnähten wegen der Wurzelfreistellung.**

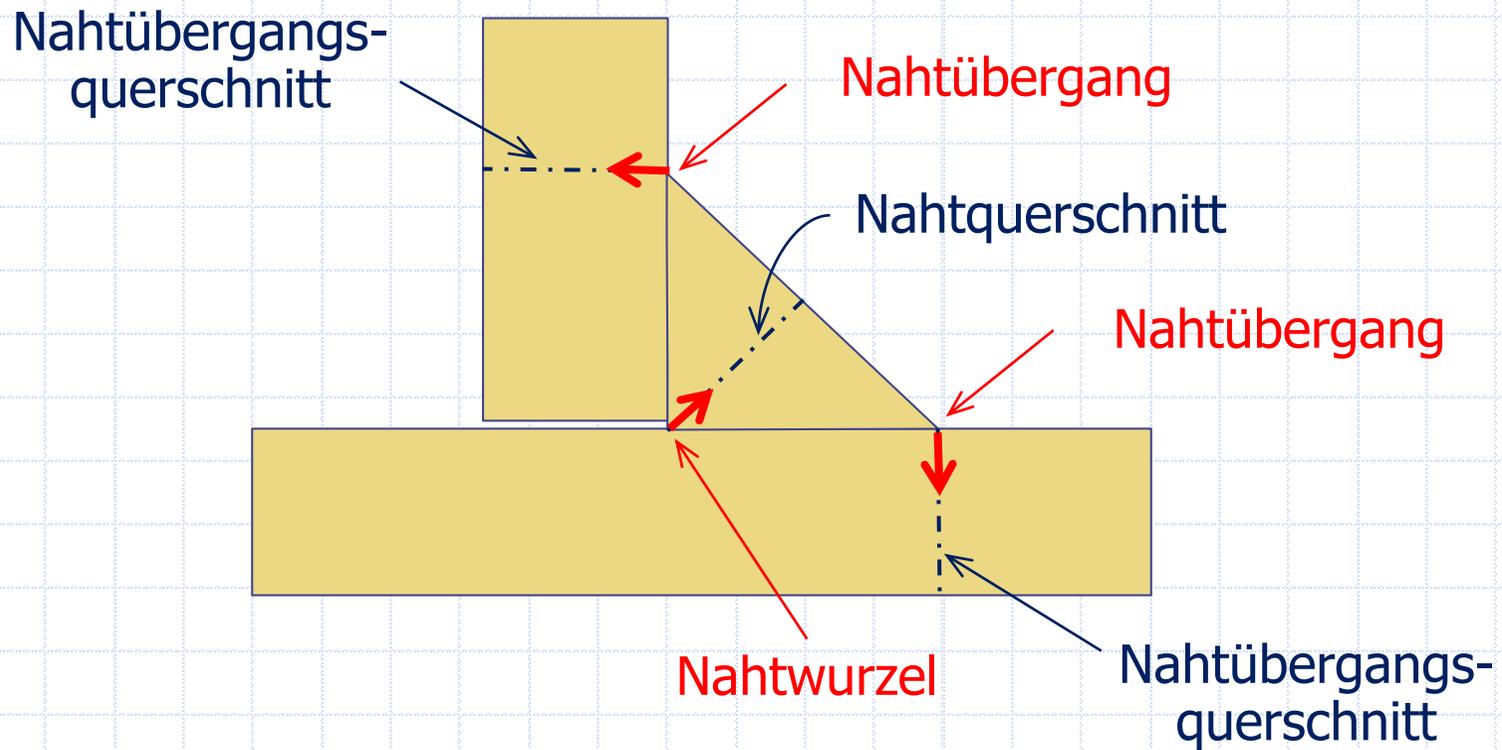
Anwendung der Nachweiskonzepte auf FE-Modelle

Nachweiskonzept		Balken	Schalen	Volumen
Nennspannung		✓	✓	✓
Strukturspannung	Hot-Spot	-	✓	✓
	Haibach	-	✓	✓
	ASME	-	-	✓
	CAB	-	-	✓
Kerbspannung		-	-	✓

Nachweisstellen & Nachweisquerschnitte

Nennspannungsnachweis

Örtlicher Nachweis



Schwingfestigkeitsklasse FAT

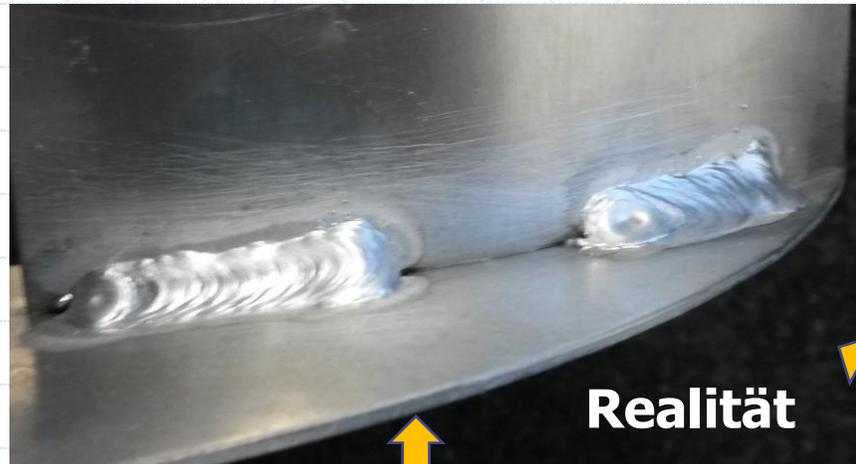
Definition aus DVS1

Die **Schwingfestigkeitsklasse FAT** ist der charakteristische Wert der Spannungsschwingbreite, der bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspiele und bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ festgelegt ist. Sie kann durch Versuche an realen Bauteilen oder an Kleinproben bestimmt werden.

Die Schwingfestigkeitsklasse FAT bezieht sich auf eine statistische Überlebenswahrscheinlichkeit von $P = 95 \%$ sowie auf einen zweiseitigen Vertrauensbereich des Mittels von 75% .

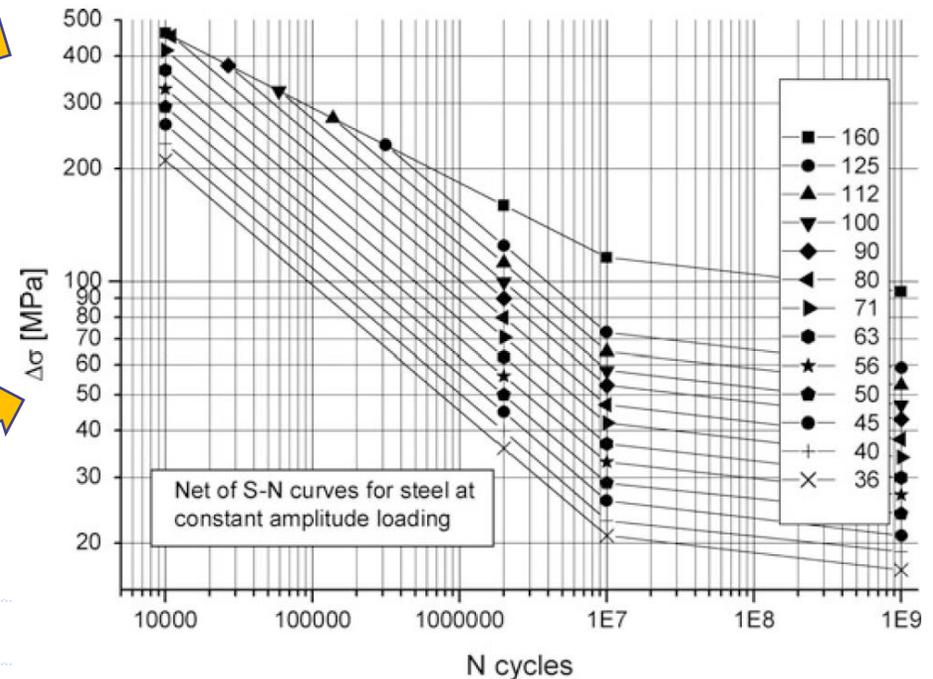
In verschiedenen Regelwerken und üblichen Versuchsauswertungen wird der charakteristische Wert der Ermüdungsfestigkeit auf den Mittelwert minus zwei Standardabweichungen bezogen, was einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $97,7 \%$ entspricht. Diese Definition des charakteristischen Wertes der Ermüdungsfestigkeit ist gleichwertig, wenn dieser auf der Prüfung von ca. 20 Versuchsproben basiert. Mögliche Unterschiede sind nur von theoretischem Interesse und können in der ingenieurmäßigen Anwendung vernachlässigt werden.

Reale Naht und ihr rechnerischer Nachweis

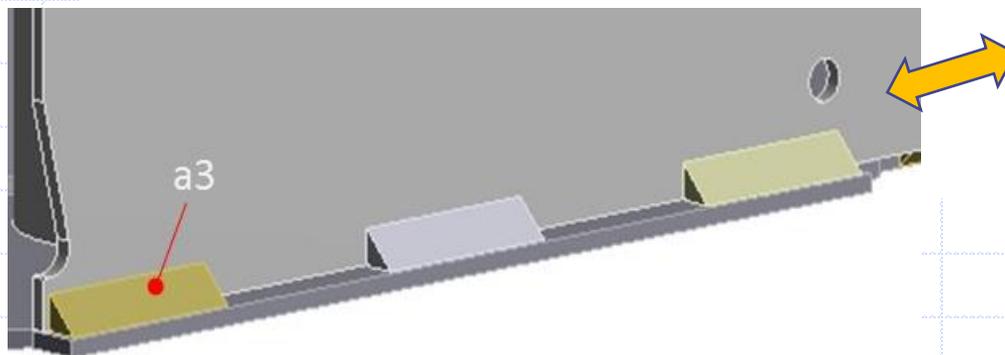


Testmodell

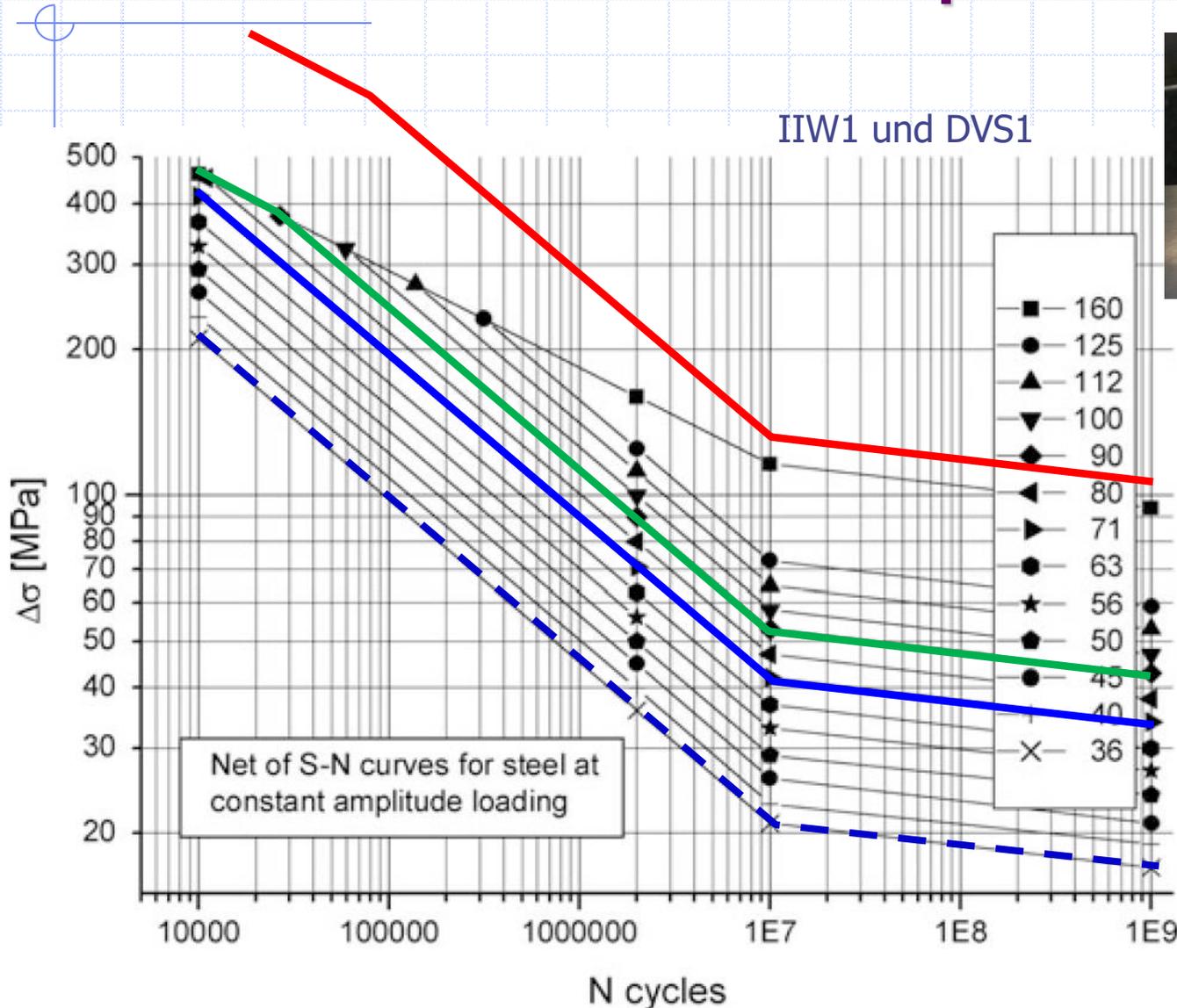
Wöhlerdiagramm für kleine Proben und meist vereinfachter Beanspruchung unter Berücksichtigung der Streuung.



Simulations- / Nachweismodell
Konzeptgebundene Modellierungsvorgabe



Verschiedene Nachweiskonzepte für 1 Naht



Kerbspannung R1 FAT 225
(Nahtübergang und Wurzel)

Strukturspannung
Kehlnaht FAT 90
(Nahtübergang)

Nahtübergangs-
querschnitt FAT 71

Kehlnahtquer-
schnitt FAT 36

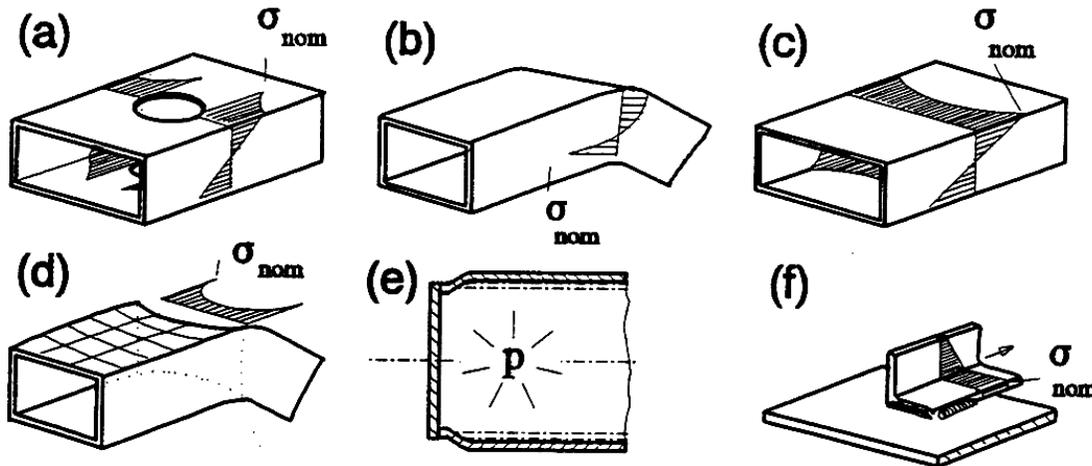
Nennspannung

Nennspannungskonzept

Besonderheiten

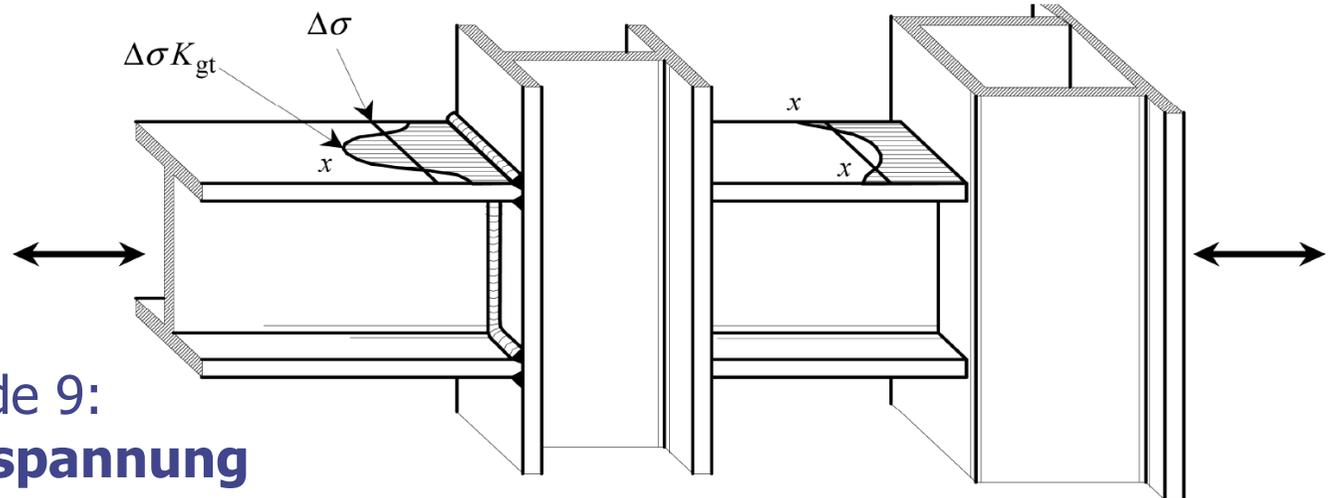
- Langjährige Erfahrungen in verschiedensten Anwendungsgebieten.
- Meist einfache FE-Modellierung, da Schweißnähte oft nicht modelliert werden. (Vorsicht bei Klaffungen \Rightarrow MPC-Kontakte)
- Makro-geometrische Effekte sind zu berücksichtigen.
- Bedingung für die Anwendbarkeit des Konzepts:
Es muss ein Nennquerschnitt vorliegen, für den die analytischen Formeln der Nennspannungsberechnung anwendbar sind.
- Die Anforderungen an das FE-Modell sind moderat, da die FE-Spannungen nicht zum Nachweis dienen:
 - Die globalen Steifigkeitsverhältnisse müssen korrekt abgebildet sein.
 - Die auszuwertenden Kontakte müssen sauber abgetrennt sein.
- Schwierigkeit beim Nachweis:
Es ist oft nicht einfach, die zutreffende FAT-Klasse zu finden.

Makrogeometrische Effekte



Empfehlung:

Falls derartige Effekte zu erwarten sind, ist es sicherer den Strukturspannungsnachweis anzuwenden.



Bezeichnung in
EN 1999-1-3 Eurocode 9:
modifizierte Nennspannung

Beispiel makro-geometrischer Effekt

F: Statisch-mechanische Analyse

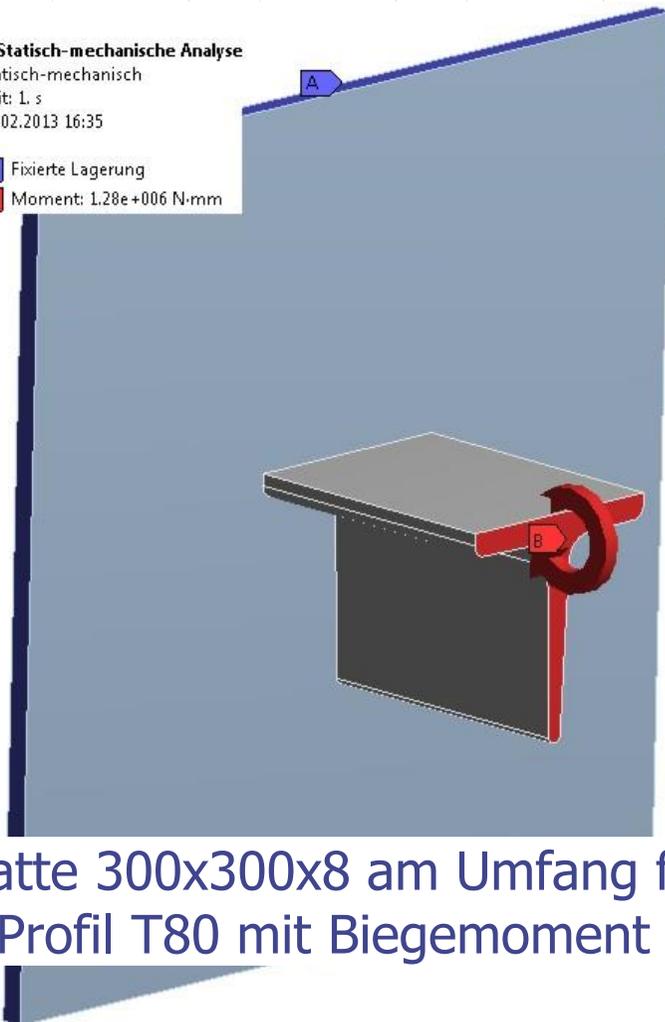
Statisch-mechanisch

Zeit: 1. s

04.02.2013 16:35

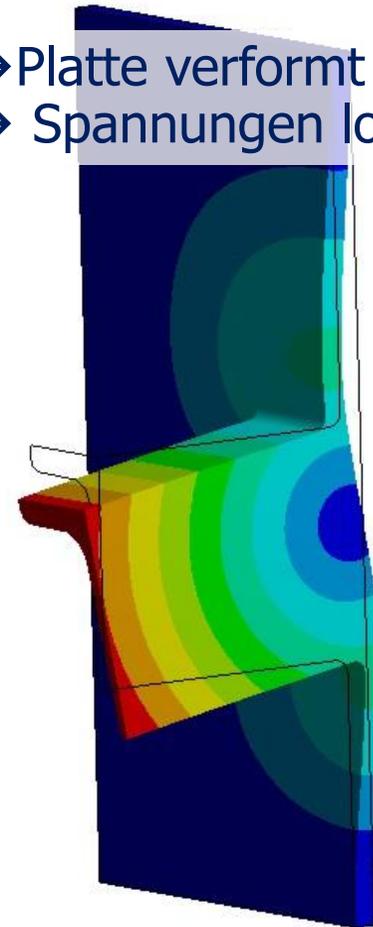
A Fixierte Lagerung

B Moment: 1.28e+006 N·mm



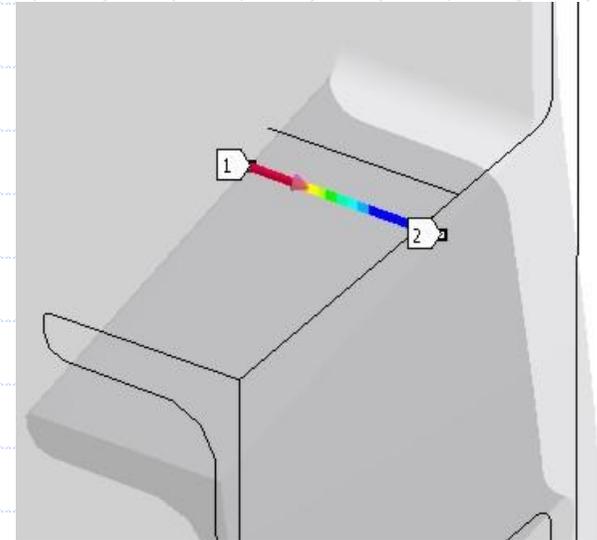
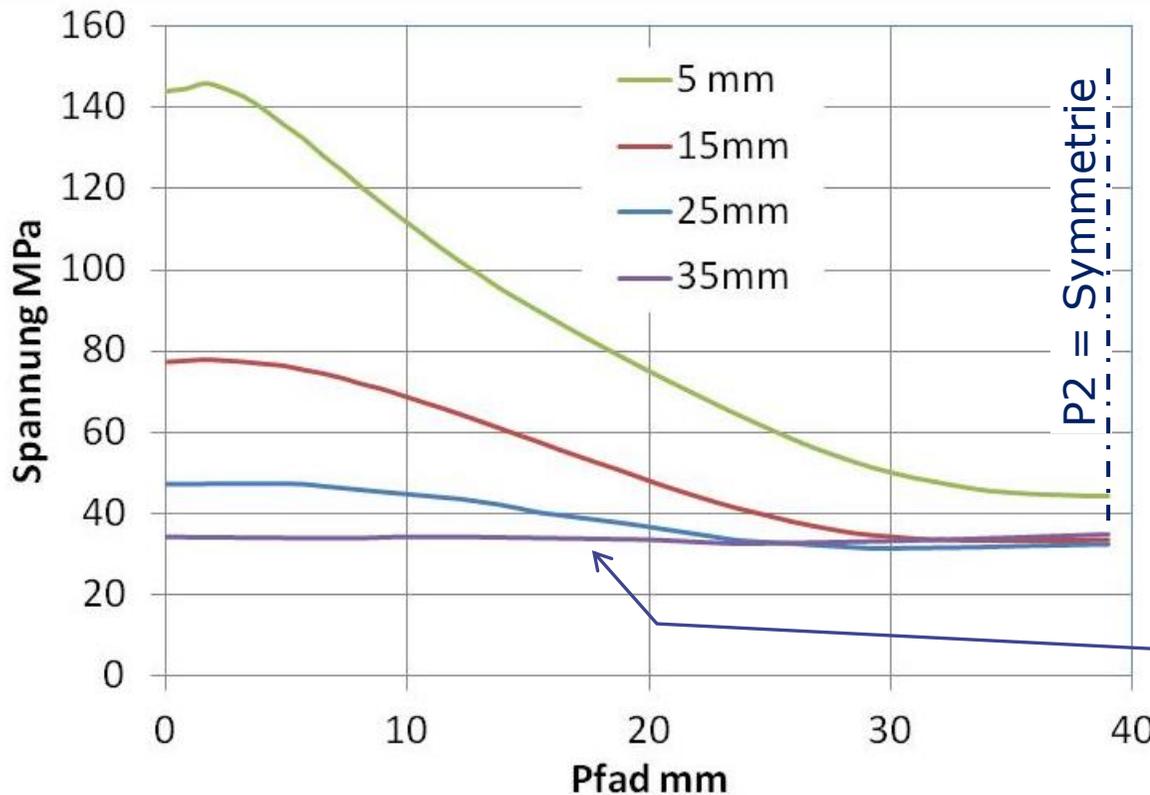
Platte 300x300x8 am Umfang fixiert
T-Profil T80 mit Biegemoment beansprucht

→ Platte verformt sich stark
→ Spannungen lokal erhöht



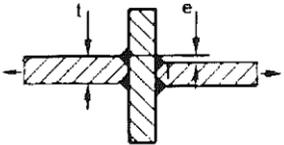
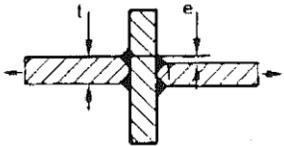
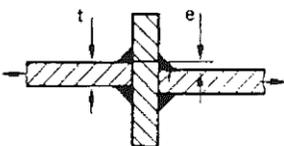
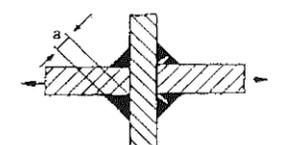
Beispiel makro-geometrischer Effekt (2)

Größte Hauptspannung entlang Pfad quer über Gurtoberfläche in verschiedenen Abständen vom Nahtübergang.



≙ Nennspannung

FAT-Klassen am Beispiel Kreuzstoß

			Stahl
411		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißt, Nahtübergang beschliffen, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$ kein Kantenversatz	80 90
412		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißt, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$ kein Kantenversatz	71 80
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantenversatz	63 71
414		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder unvollständig durchgeschweißte K-Naht, auch beschliffene Nähte, Wurzelriss, Spannung in der Schweißnaht: $\sigma = F / \Sigma (a \cdot l)$ $l \dots$ Länge der Schweißnaht für $a/t \leq 1/3$ $t \dots$ Blechdicke	36 40

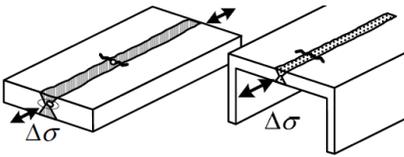
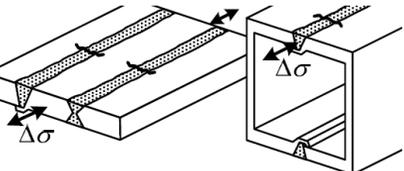
Bonus für Nachbearbeitung

Nachweis Nahtübergangsquerschnitt

Nachweis Nahtquerschnitt

FKM1 Anhang 5.4

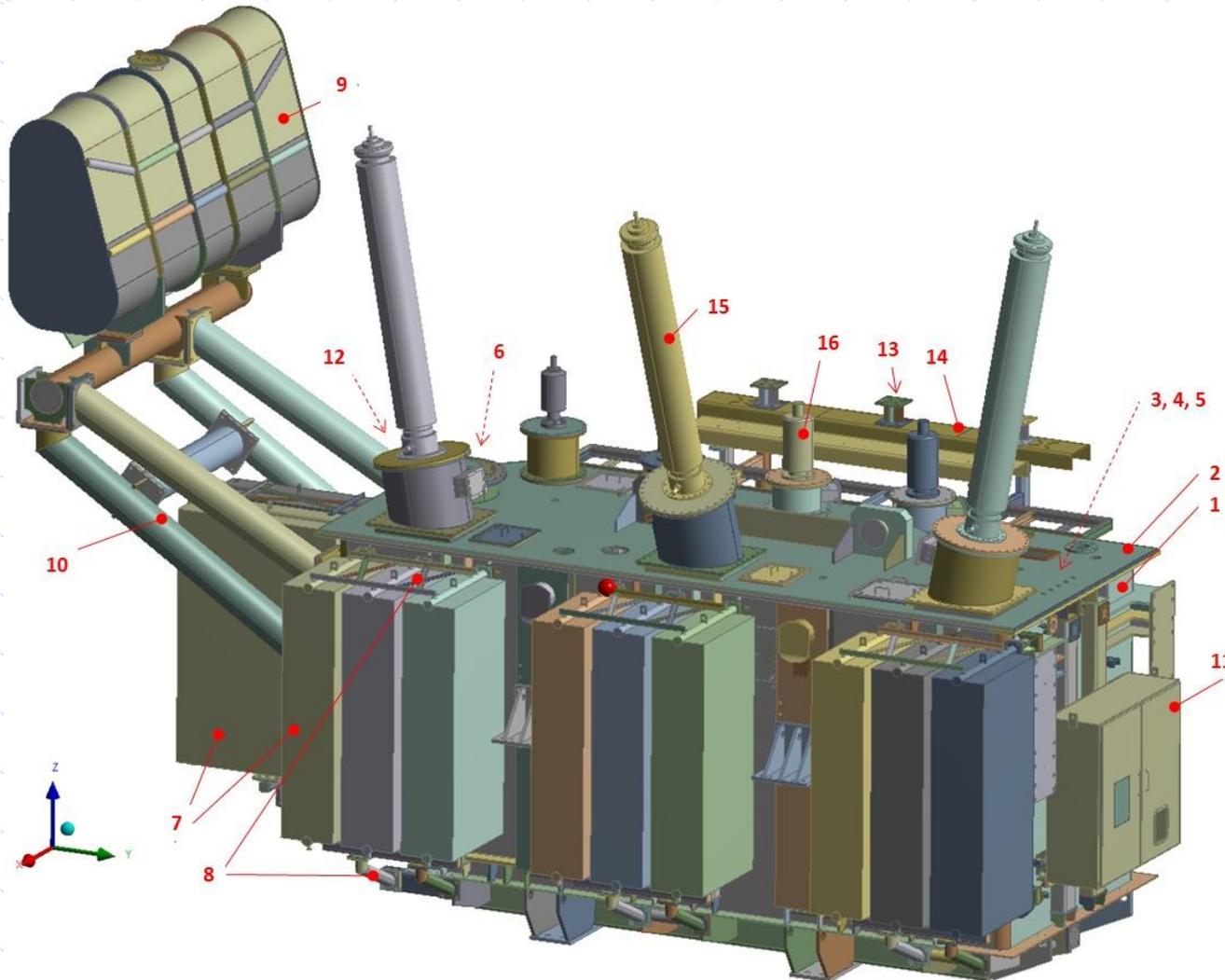
FAT-Klassen in Funktion der Nahtqualität

Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta \sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp	Spannungsanalyse		Ausführungsanforderungen			
				Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Schweißtechnische Anforderungen	Qualitätsstufe ^c		Zusätzlich
							Intern	Oberfläche u. geometrisch	
5.1	63-4,3		Voll durchgeschweißte Stumpfnahht; Nahtüberhöhung blecheben abgearbeitet	Nennspannung an der Rissentstehungsstelle		Kontinuierliches automatisches Schweißen	B	C	
5.2	56-4,3						Bei Nahtdiskontinuität	C	
5.3	45-4,3		Voll durchgeschweißte Stumpfnahht			Wurzelunterlagen müssen durchgehend sein	C	D	

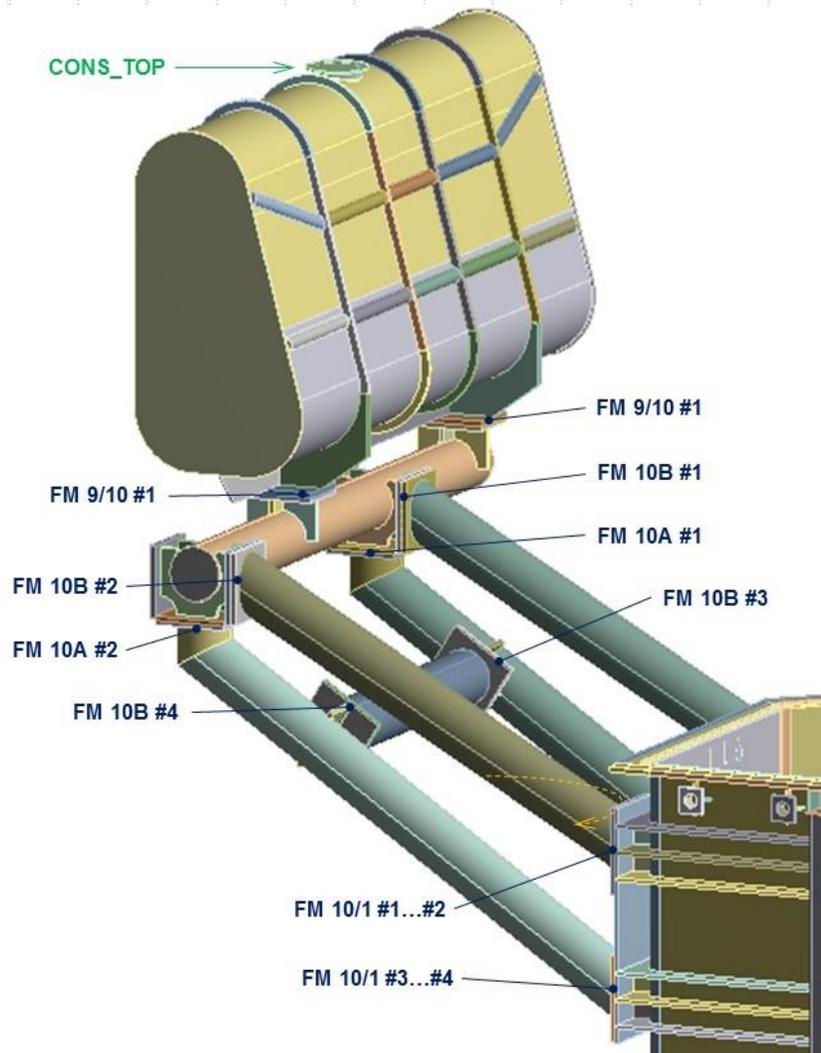
Auszug aus Eurocode 9 EN 1999-1-3: 2007

ISO 5817 ist in Überarbeitung und wird neu ebenfalls die Nahtqualität mit der FAT-Klasse verknüpfen.

Anwendung 1: Erdbebennachweis Transformator



Schnittlasten durch Kontakt- oder Gelenkauswertung



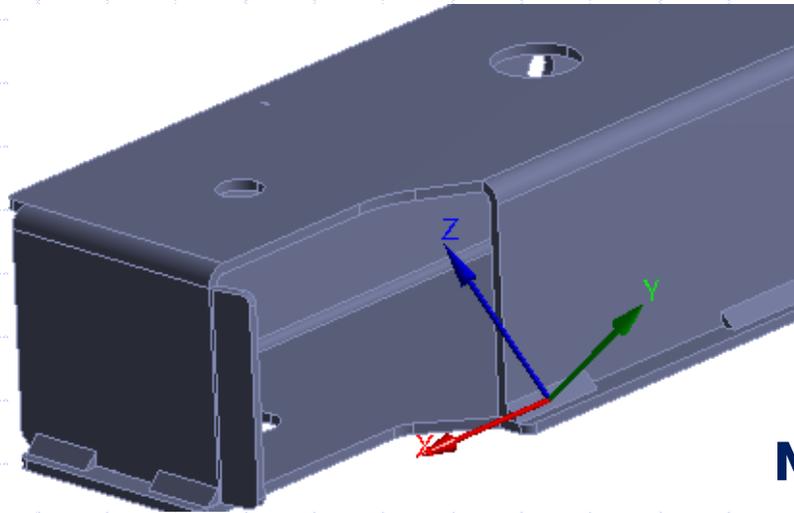
In ANSYS WB werden für die Einzellastfälle (statische Lasten, Erdbeben in 3 Richtungen) an den nachzuweisenden Flanschen die Schnittlasten ausgewertet und exportiert.

In Mathcad werden die Schnittlasten überlagert und die Nachweise für Profile, Schweißnähte und Schraubenverbindungen entsprechend der vorgegebenen Norm geführt.

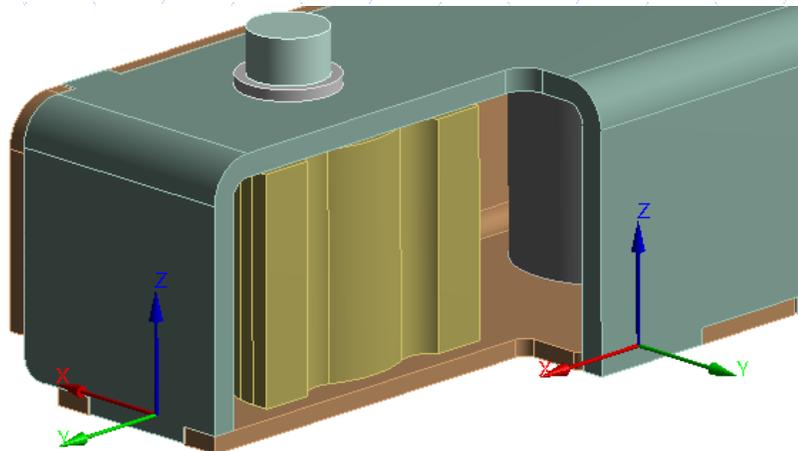
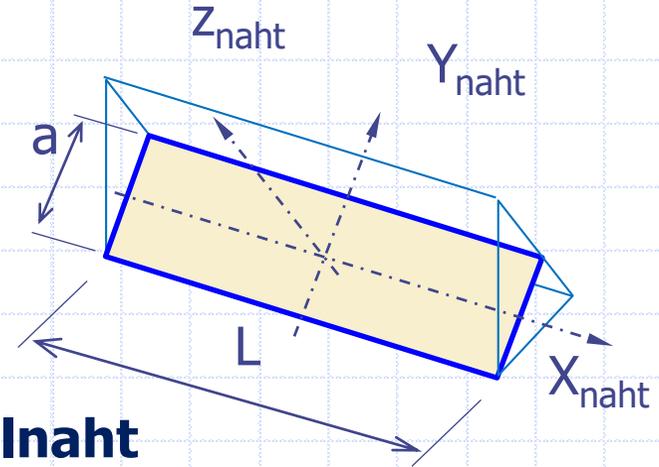
Anwendung 2: Fahrwerk Gepäcksortieranlage



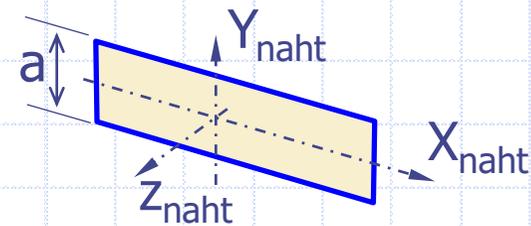
Kontaktauswertungen im lokalen Koordinatensystem



MAG-Kehlnaht

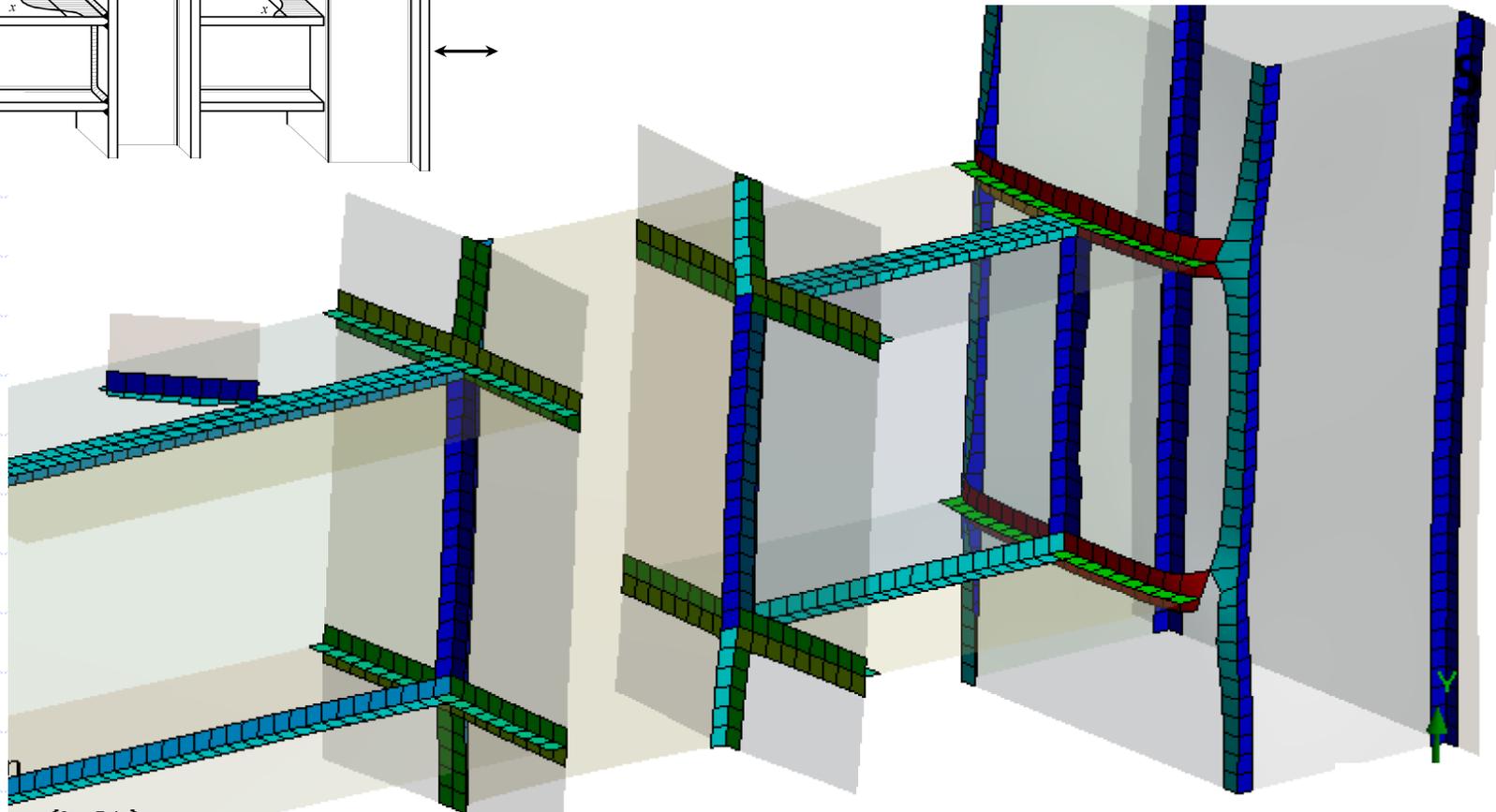
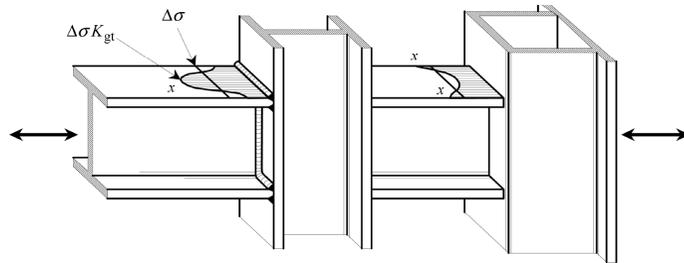


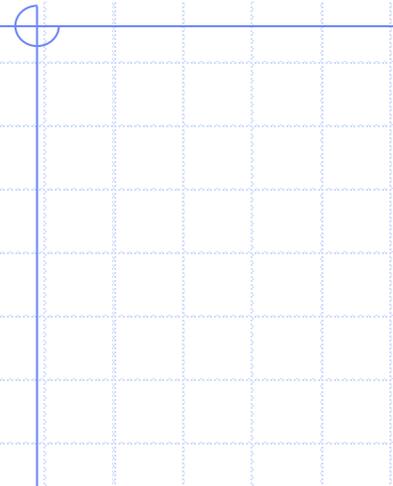
I-Lasernaht



Anwendung 3: Demo-Beispiel FKM inside ANSYS

Schalenmodell mit Auswertung der Knotenlasten





Strukturspannungskonzept

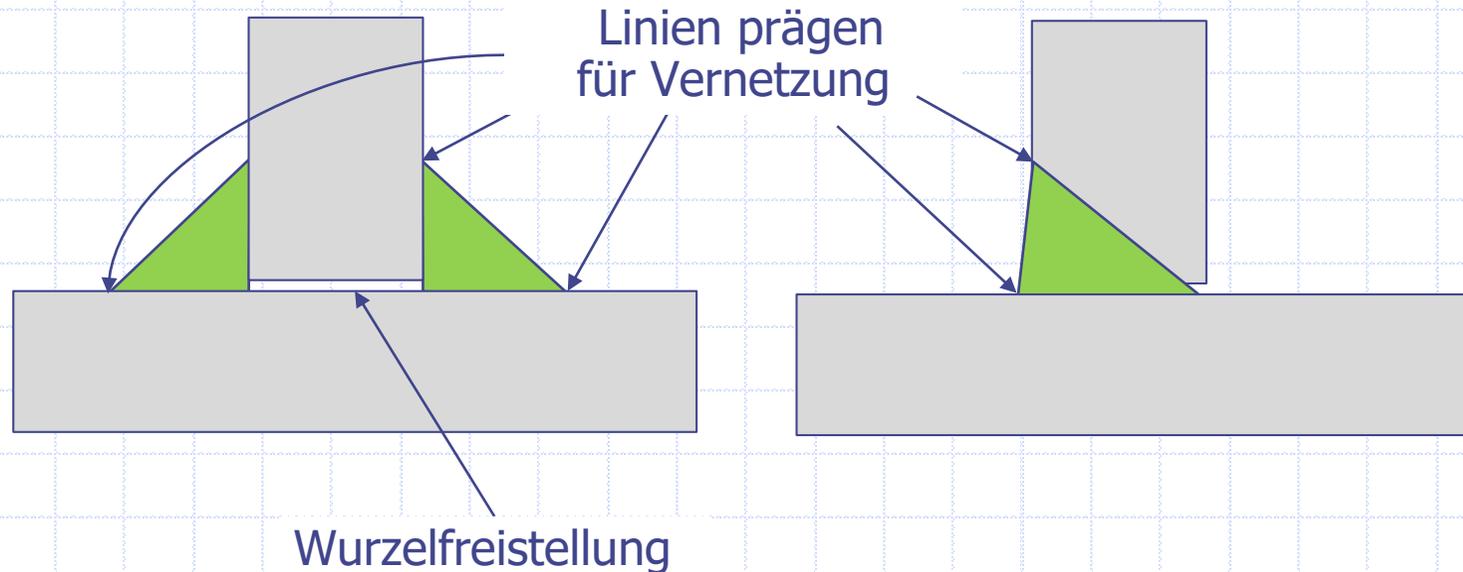
Besonderheiten

- Da die Spannung direkt bei der Schweißnaht ausgewertet wird, sind im FE-Modell nun auch die lokalen Steifigkeitsverhältnisse abzubilden. In der Regel ist deshalb die Schweißnaht zu modellieren.
- Die Netzqualität muss verlässliche Spannungswerte gewährleisten und allfällige Vorgaben der angewendeten Methode erfüllen.
- Schwierigkeit bei der Nachweisführung: Die Strukturspannungsmethoden respektive FAT-Klassen gelten allesamt für den Nahtübergang. Für den Nachweis der Nahtwurzel gibt es bloss vereinfachte Ansätze.
- Die meisten Normen definieren die anzuwendende Strukturspannungsmethode. Die FKM überlässt hingegen die Wahl dem Anwender.
- Die FAT-Klassen für Strukturspannungen enthalten keine Reduktionen für Kantenversatz, Winkelfehler und andere fertigungsbedingten Abweichungen. Da das FE-Modell meist die ideale Geometrie abbildet, sind gegebenenfalls entsprechende Korrekturfaktoren zu berücksichtigen (DVS1).

Nahtmodellierung bei Volumenmodellen

Empfehlungen:

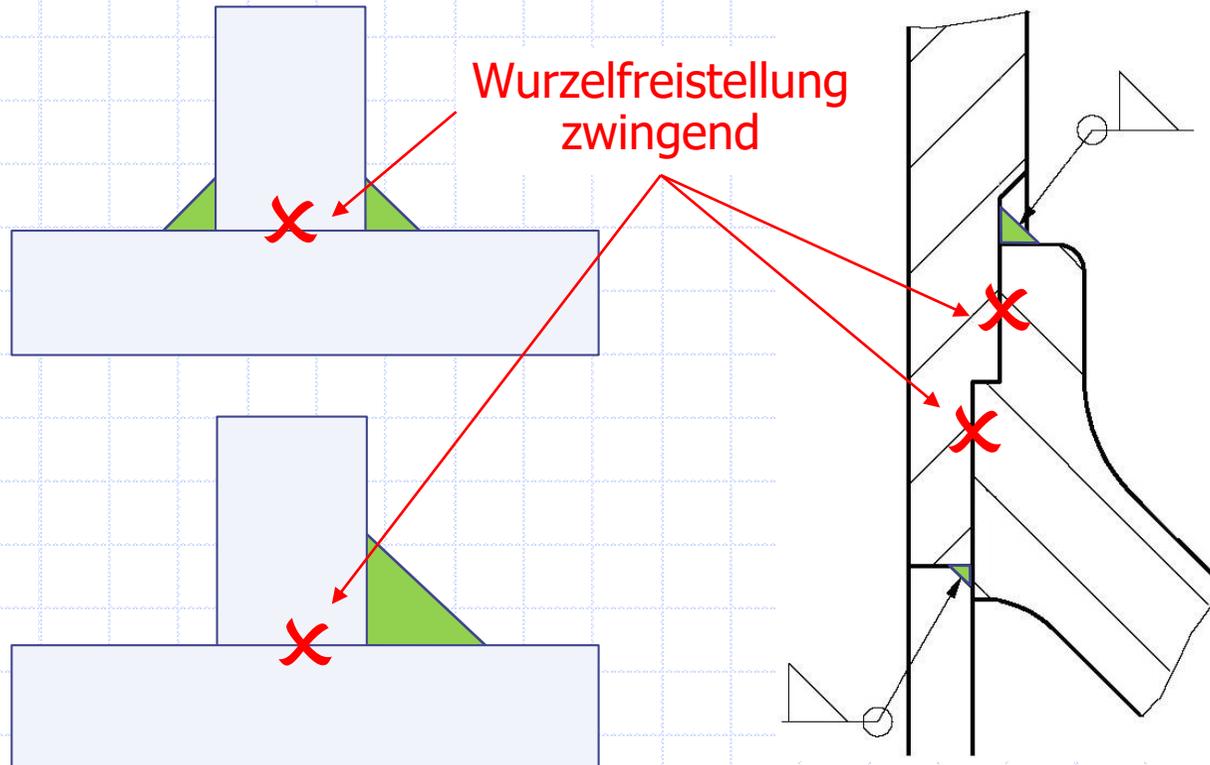
- Schweissnähte als eigenständige Körper definieren
- Nähte auf die Oberflächen der anschliessenden Bauteile prägen



Wichtig: Wegen den Fertigungstoleranzen und dem Wärmeverzug müssen auch Druckbelastungen von den Nähten übertragen werden. Deshalb sind die Bauteile nur über die Nähte zu verbinden.

Wurzelfreistellung ja/nein

Bei Doppelkehlnähten ist das Vernachlässigen der Wurzelfreistellung im verantwortbar, wenn die Summe der Nahtquerschnitte in etwa der 1.5-fachen Blechdicke entspricht. In den untenstehenden Beispielen ist diese Bedingung nicht erfüllt.



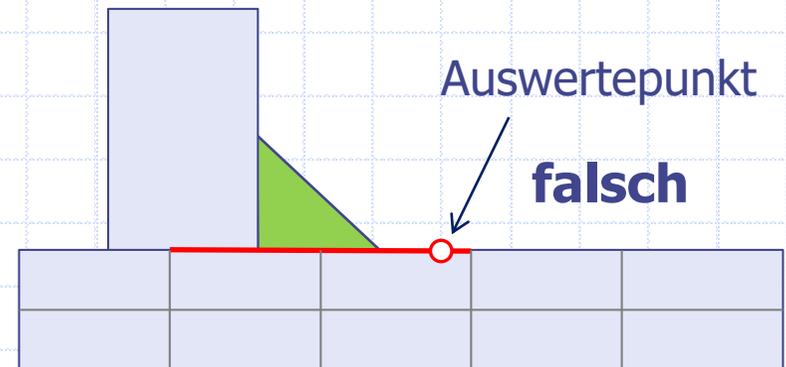
Wichtig:

Ist die Naht resp. die Wurzel der Schwachpunkt, ist das Kerbspannungskonzept anzuwenden!

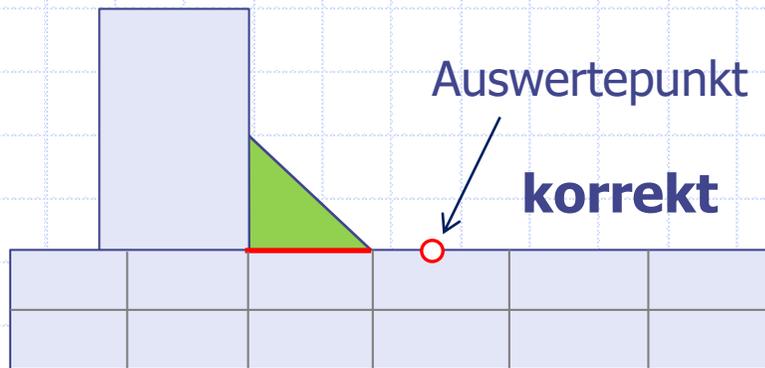
Kontakte und Prägungen

Liegt der Auswertepunkt innerhalb eines Kontakts ist das Spannungsergebnis unbrauchbar. Die Kontaktflächen sind mittels Prägungen von den freien Oberflächen abzutrennen. Idealerweise werden bei der Methode Haibach, die Auswertepfade ebenfalls geprägt.

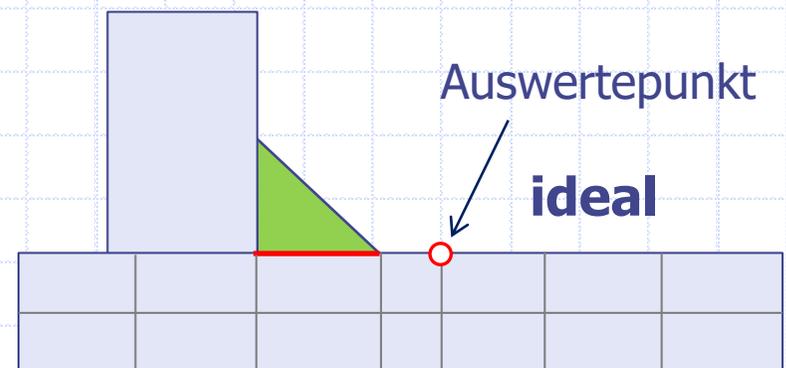
Oberfläche mit Kontakt belegt



Kontakt mit Prägung abgetrennt

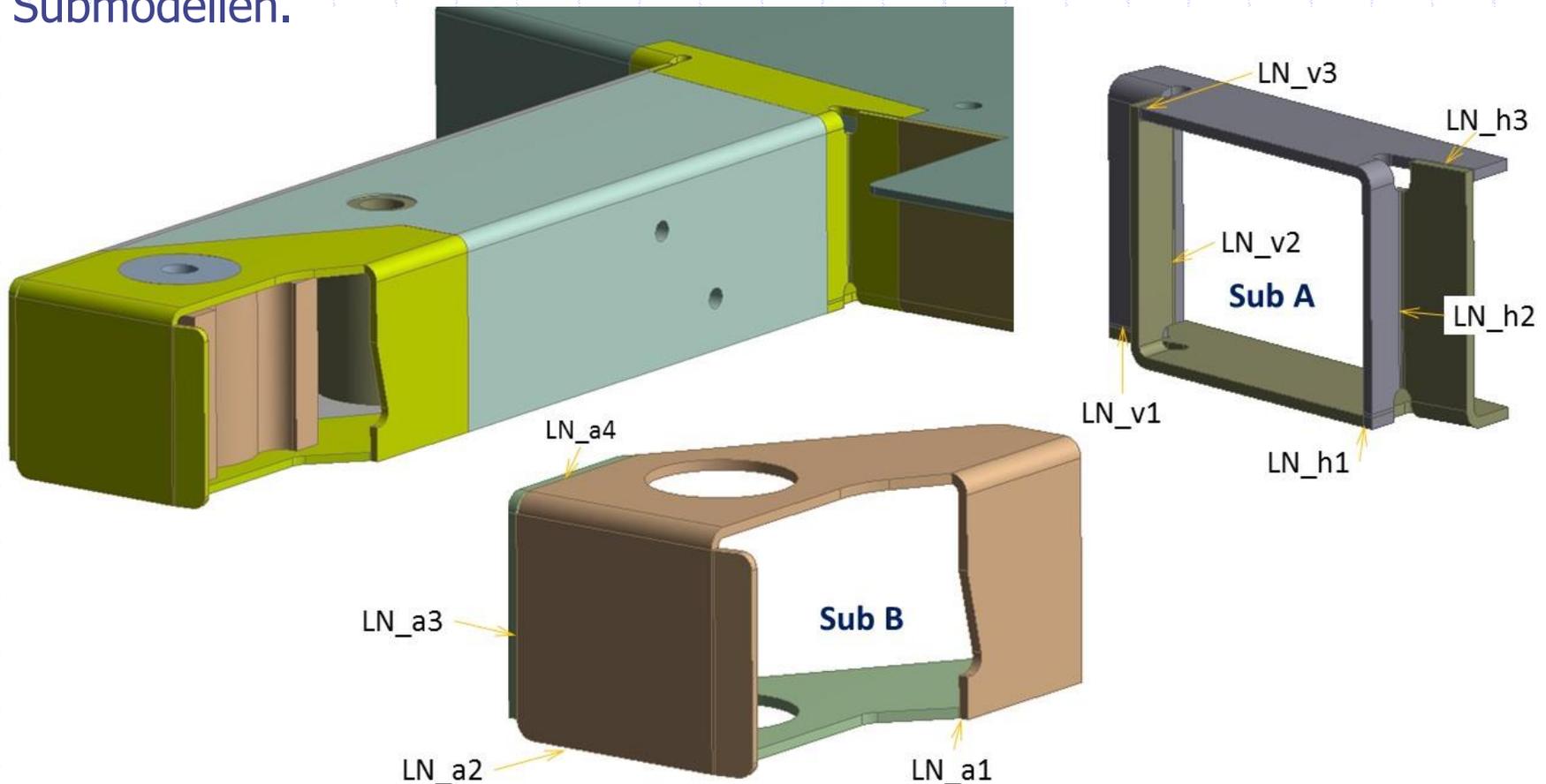


Kontakt und Pfad geprägt



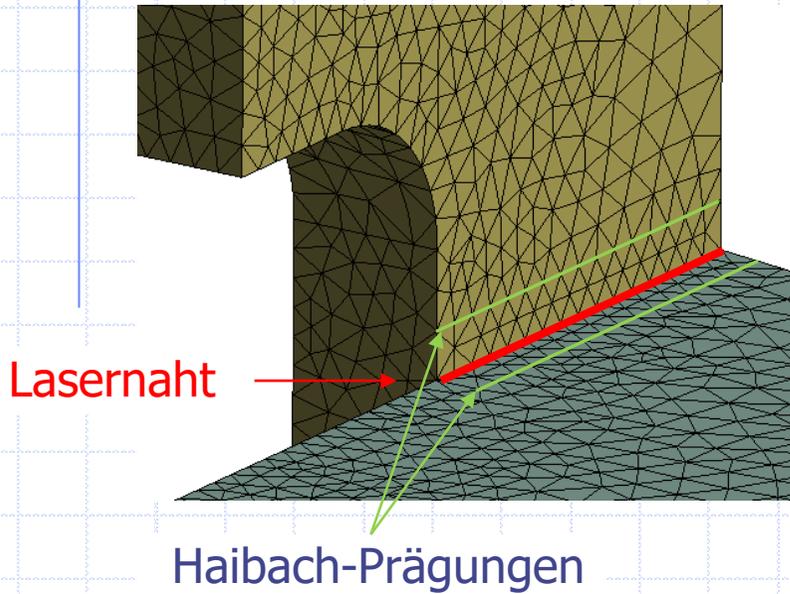
Anwendung 2: Fahrwerk

Nachweis der Laser-Schweissnähte mit der Strukturspannungsmethode Haibach unter Verwendung von Submodellen.



Anwendung 2: Fahrwerk – Vorgehen

1. Modellvorbereitung



2. Suche der Nachweisstelle

Vergleichsspannung FAT_Amplitude U Wurzeln

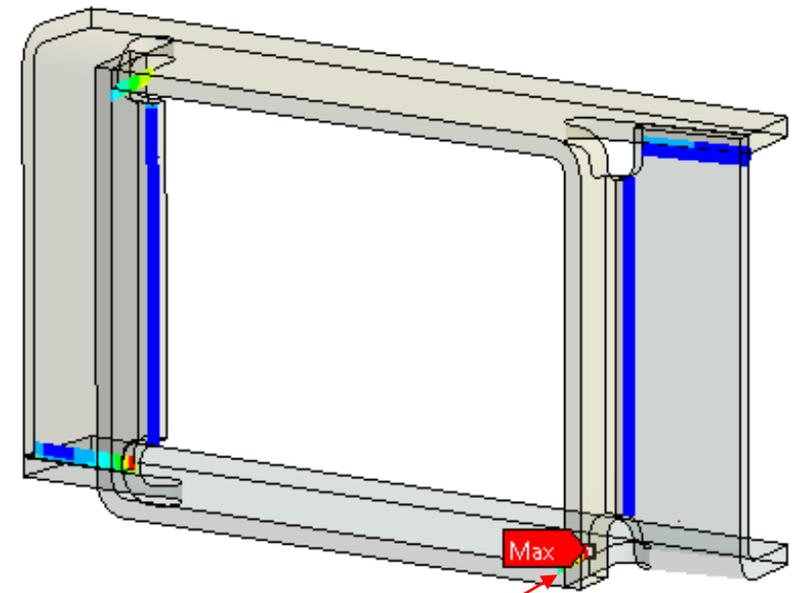
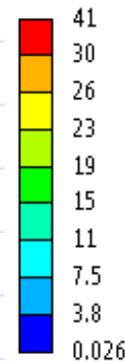
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)

Einheit: MPa

Max: 41

Min: 0.026

01.11.2019 17:45



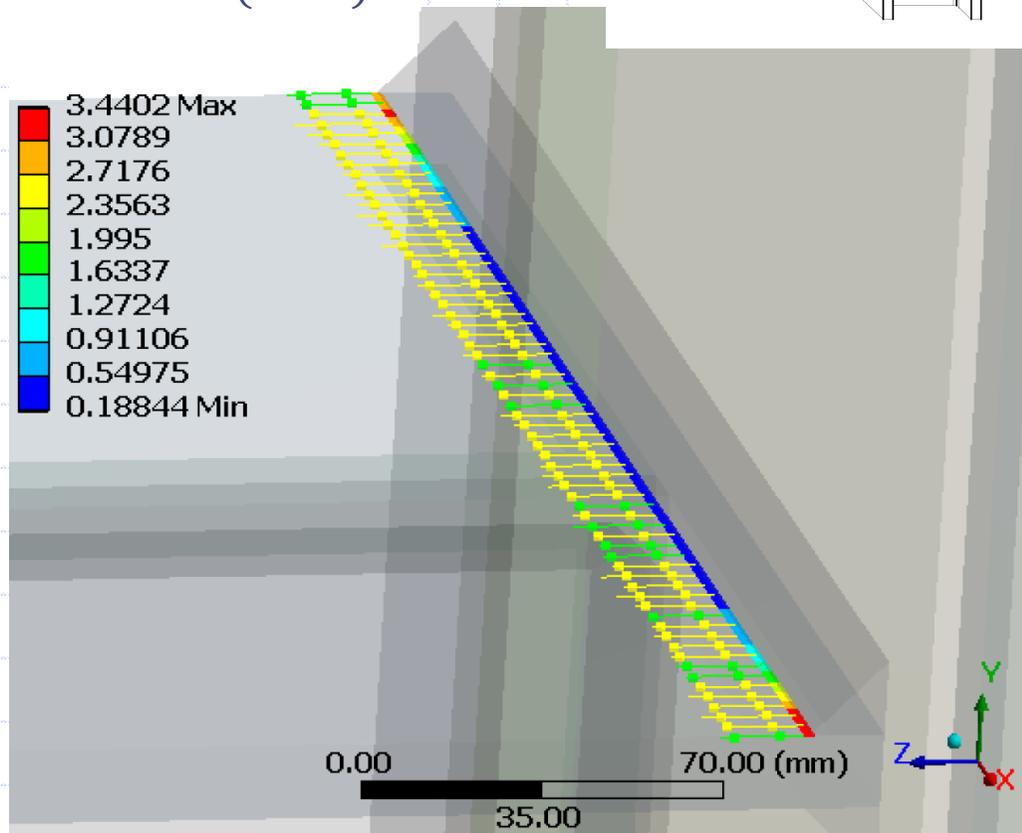
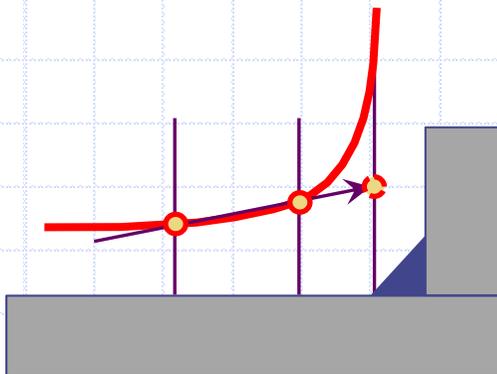
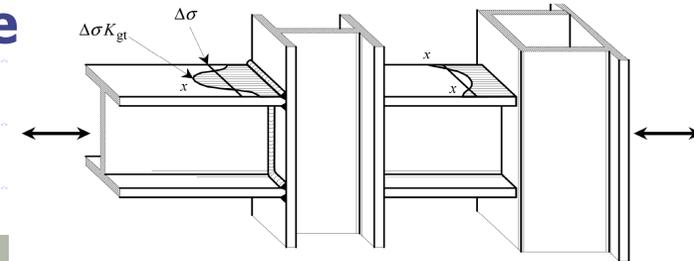
3. Spannungsstichprobe Spannungskomponenten für Nachweis nach Regelwerk

Anwendung 3: Demo-Beispiel FKM inside ANSYS

Volumenmodell und Extrapolationsmethode

Lineare Extrapolation nach IIW

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{(0.4 \cdot t)} - 0.67 \cdot \sigma_{(1.0 \cdot t)}$$

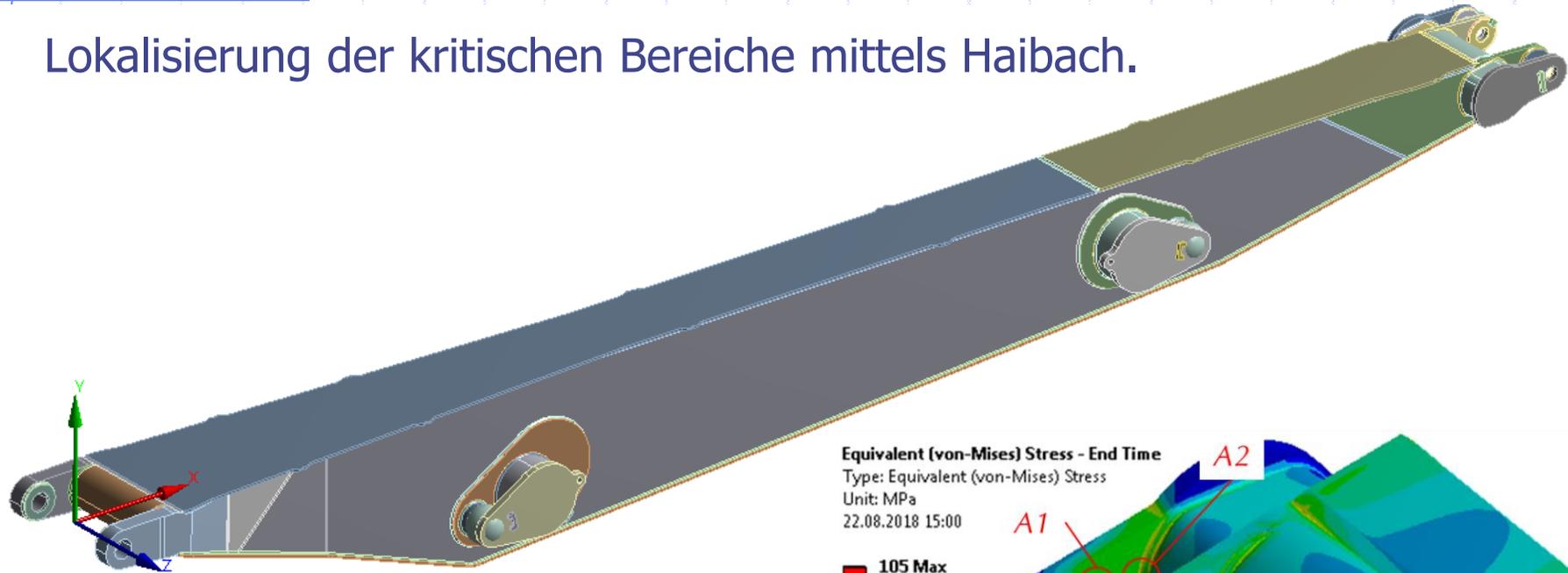


Anwendung 4: Lademaschine Terex Fuchs



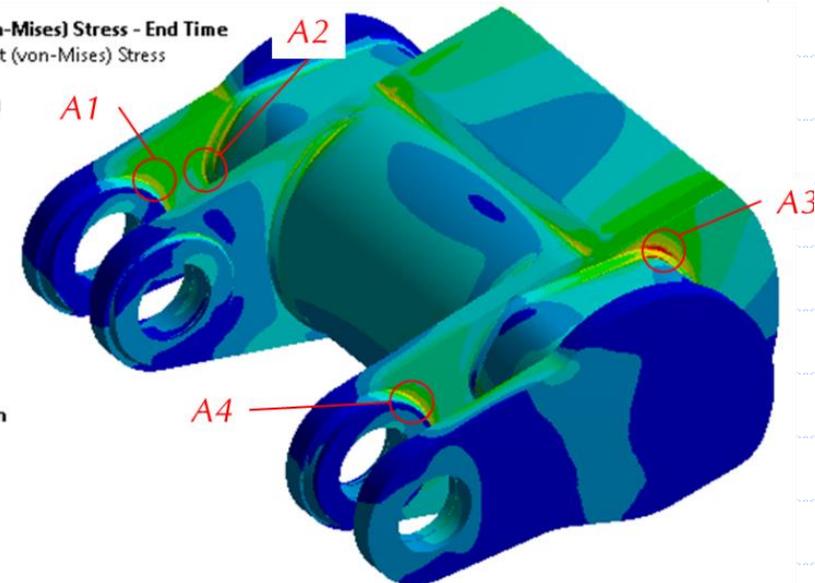
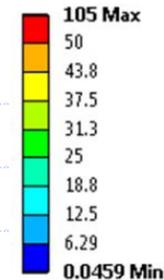
Überprüfung Ausleger

Lokalisierung der kritischen Bereiche mittels Haibach.



Überprüfung der kritischen Bereiche mittels Submodellen.

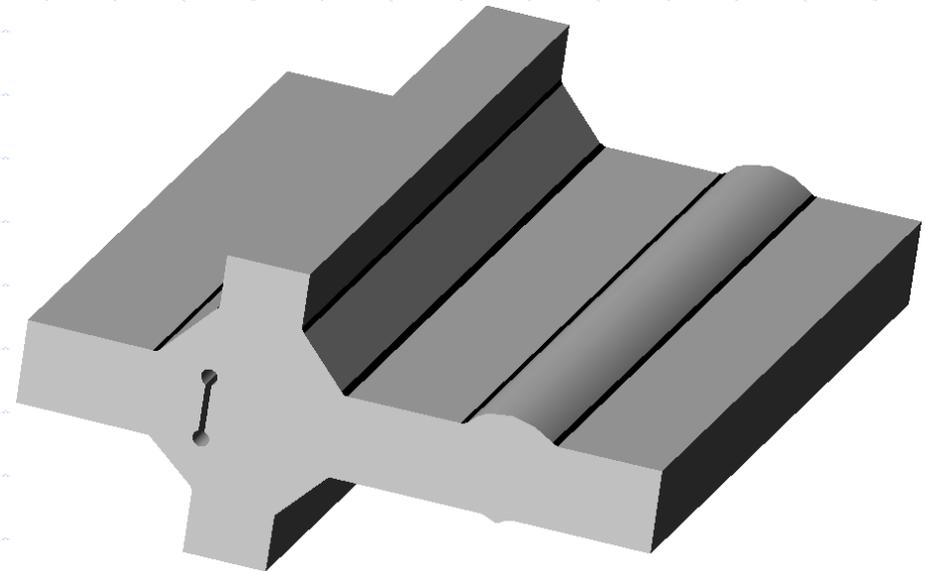
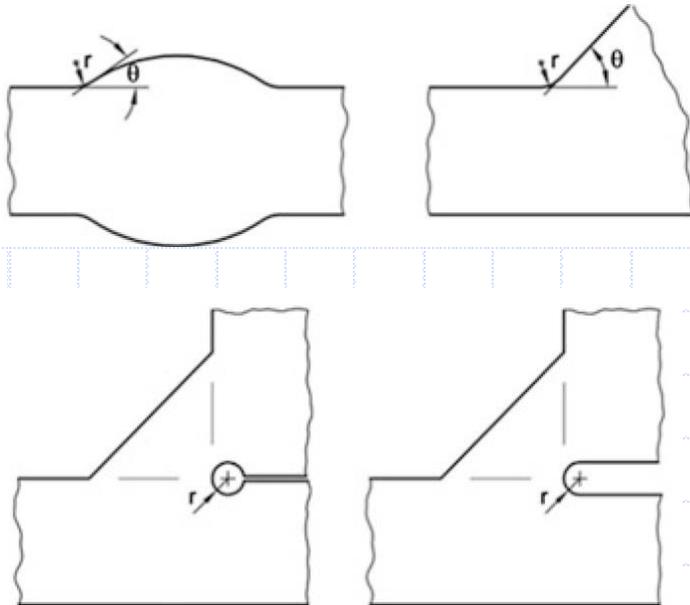
Equivalent (von-Mises) Stress - End Time
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
22.08.2018 15:00



Kerbspannungskonzept

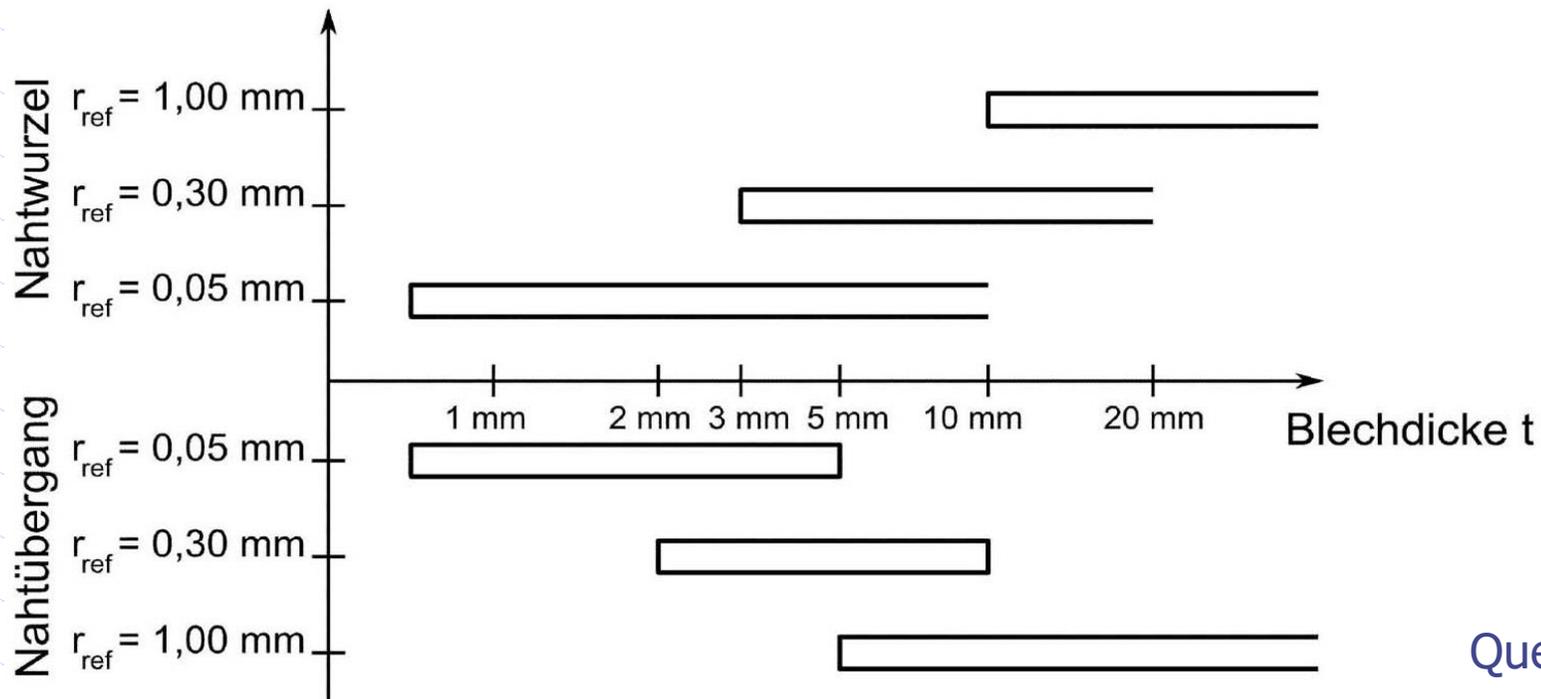
Besonderheiten

- Methode auf Volumenmodelle beschränkt, dafür universell anwendbar auf Stumpf- und Kehlnähte, auf Nahtübergänge und Nahtwurzeln.
- Erfordert zwangsläufig die Verwendung von Submodellen.
- Alle Kanten werden mit einem Referenzradius verrundet.
- Die Nähte werden idealisiert modelliert. Die FAT-Klasse berücksichtigt u.a. auch die Streuung der Nahtgeometrie.



Referenzradien

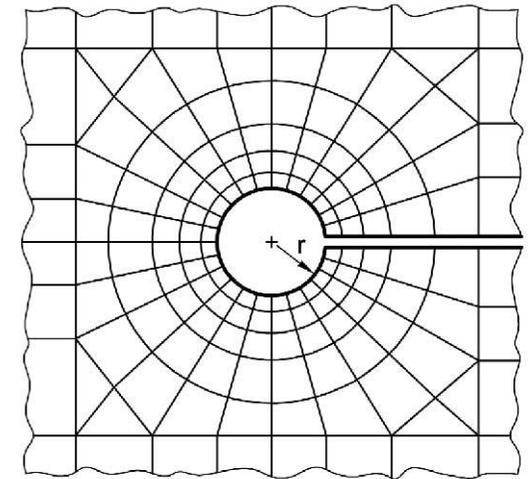
Die FKM definiert die Radien R1 und R0.05. Leider ist der für Blechdicken von etwa 3 mm bis 8 mm ideale R0.3 nicht aufgeführt. In [DVS1] ist dieser hingegen definiert.



Quelle DVS1

Empfehlungen zu FE-Netz

Empfehlungen nach [DVS1] für die Vernetzung der Referenzradien. Bedingung für die gezeigte Minimalteilung von 6 Elementen auf 90° ist die möglichst unverzerrte, quadratische Elementform. Lässt sich die Geometrie nur mit Tetraedern vernetzen, ist ein entsprechend feineres Netz erforderlich.



FAT-Klassen und Wöhlerlinien nach FKM

- Für Nahtübergang und Nahtwurzel gelten identische Werte.
- Die Neigungsexponenten der Wöhlerlinie sind innerhalb einer Werkstoffgruppe konstant z.B. 3.0 für Normalspannungen bei Stahl.
- Knickpunkt-Zyklenzahl der Wöhlerlinie $5 \cdot 10^6$ (bei nächster Ausgabe ist Erhöhung auf 10^7 zu erwarten (IIW, Eurocode usw.)).

FAT	Normalspannung		Schubspannung	
	Stahl	Aluminium	Stahl	Aluminium
R1	225	71	160	63
R0.05	630	180	250	90

FAT-Klassen und Wöhlerlinien nach DVS 0905

- Markante Unterscheidungen zwischen Nahtübergang und Nahtwurzel sowie bei der Blechdicke (größer oder kleiner 5 mm).
- Knickpunkt-Zyklenzahl der Wöhlerlinie $1 \cdot 10^7$

Tabelle 6.1. Charakteristische Schwingfestigkeitswerte für den Kerbspannungsnachweis mit Normal- oder Schubspannungen von Schweißverbindungen aus Stahl.

Referenzradius r_{ref} [mm]	Ort maximaler Beanspruchung	Normalspannung			Schubspannung		
		$\Delta\sigma_{e,C}$ [MPa] bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen FAT	$\Delta\sigma_{e,R}$ [MPa] bei $N_k=10^7$ Schwingspielen		$\Delta\tau_{e,C}$ [MPa] bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen FAT	$\Delta\tau_{e,R}$ [MPa] bei $N_k=10^8$ Schwingspielen	
			k = 3 t ≥ 5 mm	k = 5 t < 5 mm		k = 5 t ≥ 5 mm	k = 7 t < 5 mm
1,00	NÜ und NW	225	131,6	163,1	160	73,2	91,5
0,30	NÜ	300	175,4	217,4	180	82,3	102,9
	NW	340	198,8	246,4	210	96,0	120,1
0,05	NÜ	500	292,4	362,4	240	109,8	137,2
	NW	630	368,4	456,6	320	146,3	183,0

Neigungsexponent k der Wöhlerlinie für
 - Normalspannungen: k = 3 bei Wanddicken t ≥ 5 mm und k = 5 bei t < 5 mm
 - Schubspannungen: k = 5 bei Wanddicken t ≥ 5 mm und k = 7 bei t < 5 mm

NÜ: Nahtübergang; NW: Nahtwurzel

Besonderheiten beim Nachweis

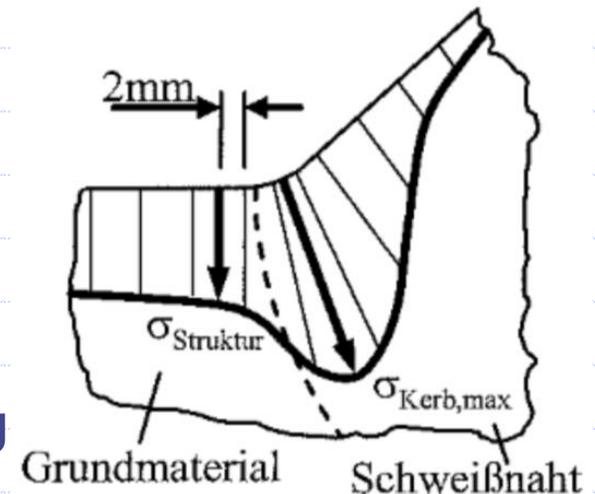
- Im Gegensatz zum Ermüdungsnachweis mit Nenn- oder Strukturspannungen ist der Größeneinfluss im Geometriemodell schon enthalten. Für den Größenfaktor gilt deshalb: $f_t = 1$.
- Das Kerbspannungskonzept bedingt eine minimale Kerbwirkung. Damit die FAT-Klasse für den Referenzradius R1 angewendet werden darf, muss die Kerbformzahl nach FKM folgende Minimalwerte aufweisen:

$$r_{\text{ref}}=1\text{mm} \quad K_{t, \text{fiktiv}}=1.6$$

$$r_{\text{ref}}=0.05\text{mm} \quad K_{t, \text{fiktiv}}=4.5$$

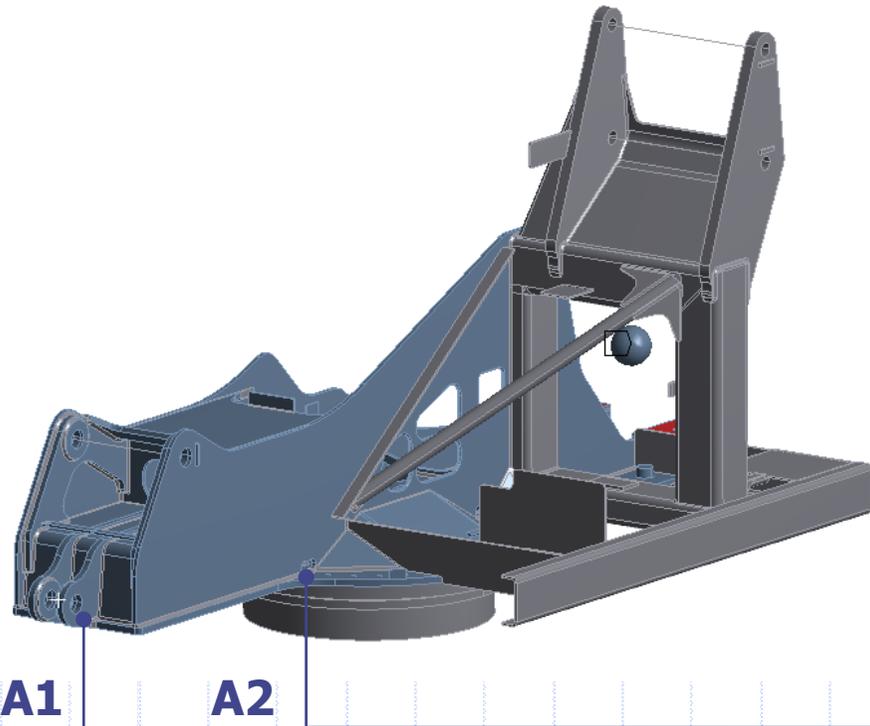
$$K_{t, \text{fiktiv}} = \frac{\sigma_{\text{kerb}}}{\sigma_{\text{struktur}}}$$

- Oft ist das Spannungsgefälle längs der Naht nur gering und erfüllt damit vorgenanntes Minimalkriterium nicht. In dem Fall ist diese Spannungskomponente als **Strukturspannung** nachzuweisen.
- Für Kantenversatz und Winkelfehler sind wie beim Strukturspannungsnachweis gegebenenfalls Korrekturfaktoren zu berücksichtigen.

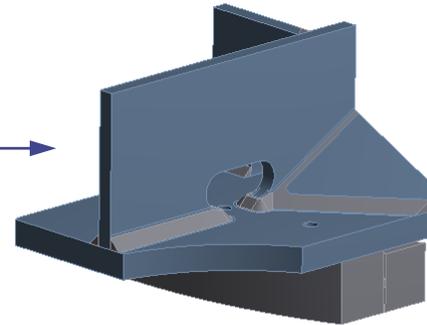


Anwendung 4: Nachweis Unterwagen

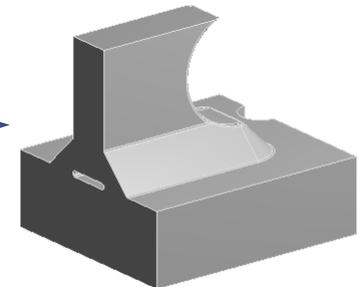
Kaskade von Submodellen



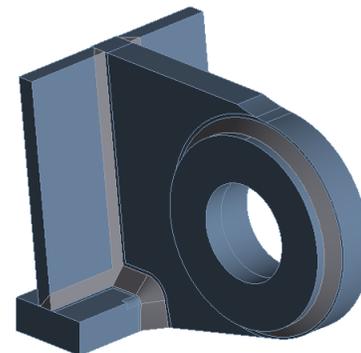
A2 Haibach



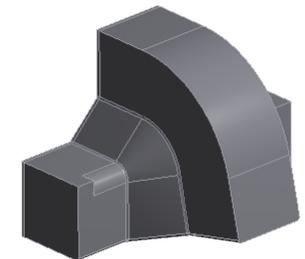
A2 Kerbspannung



A1 Haibach



A1 Kerbspannung



Anwendung 4: Nachweis Unterwagen

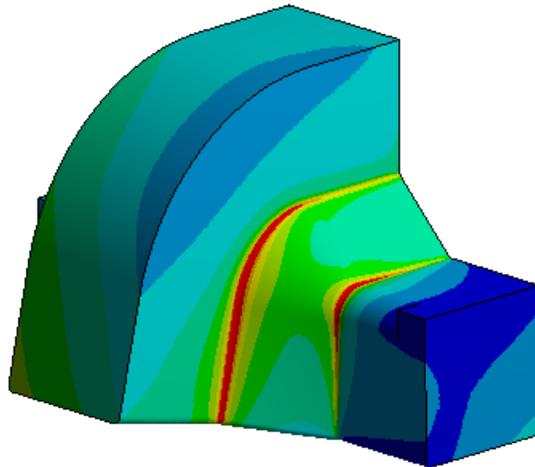
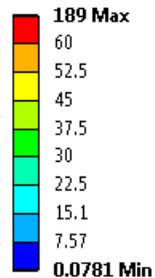
A1 Kerbspannung

Vergleichsspannung (von Mises) - 1. s

Typ: Vergleichsspannung (von Mises)

Einheit: MPa

23.07.2018 12:01



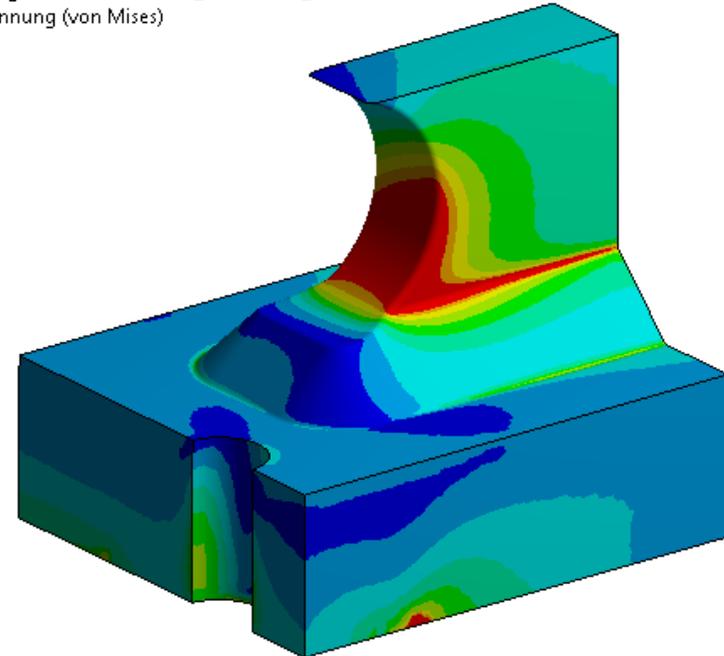
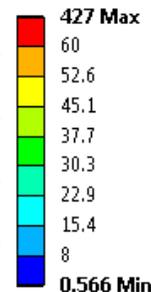
A2 Kerbspannung

Vergleichsspannung (von Mises) - Kerb_Submodell_B - 1. s

Typ: Vergleichsspannung (von Mises)

Einheit: MPa

23.07.2018 12:09



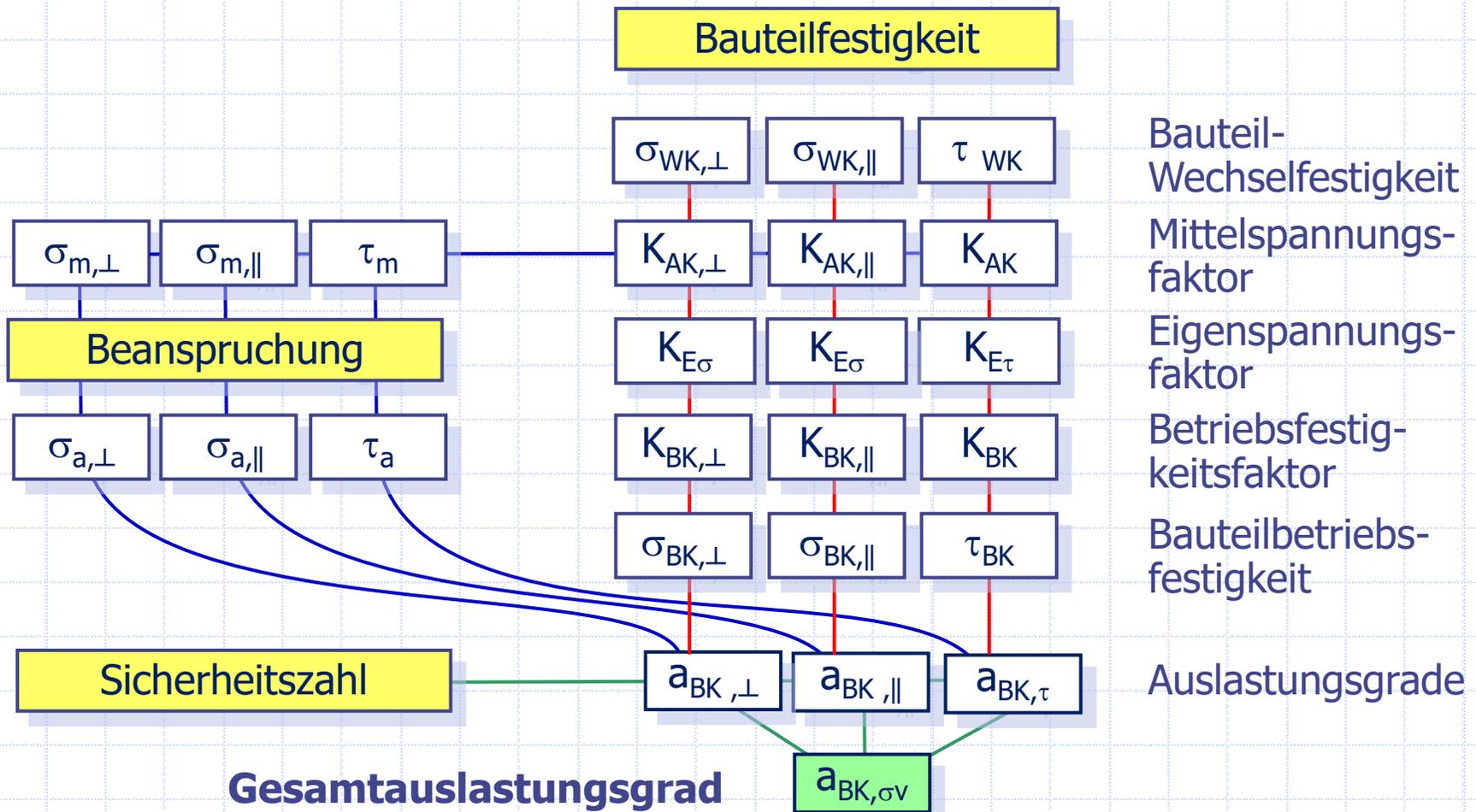
Verwendete Spannungsarten:

- Vergleichsspannung von Mises für statischen Nachweis und generell für Übersichtsbilder im Nachweisbericht.
- Hauptspannungen zur Lokalisierung der höchsten Ermüdungsbelastung.
- An Naht ausgerichtete Spannungskomponenten für Ermüdungsnachweis.

Ermüdungsnachweis im Überblick

FKM - Ermüdungsnachweis mit örtlichen Spannungen

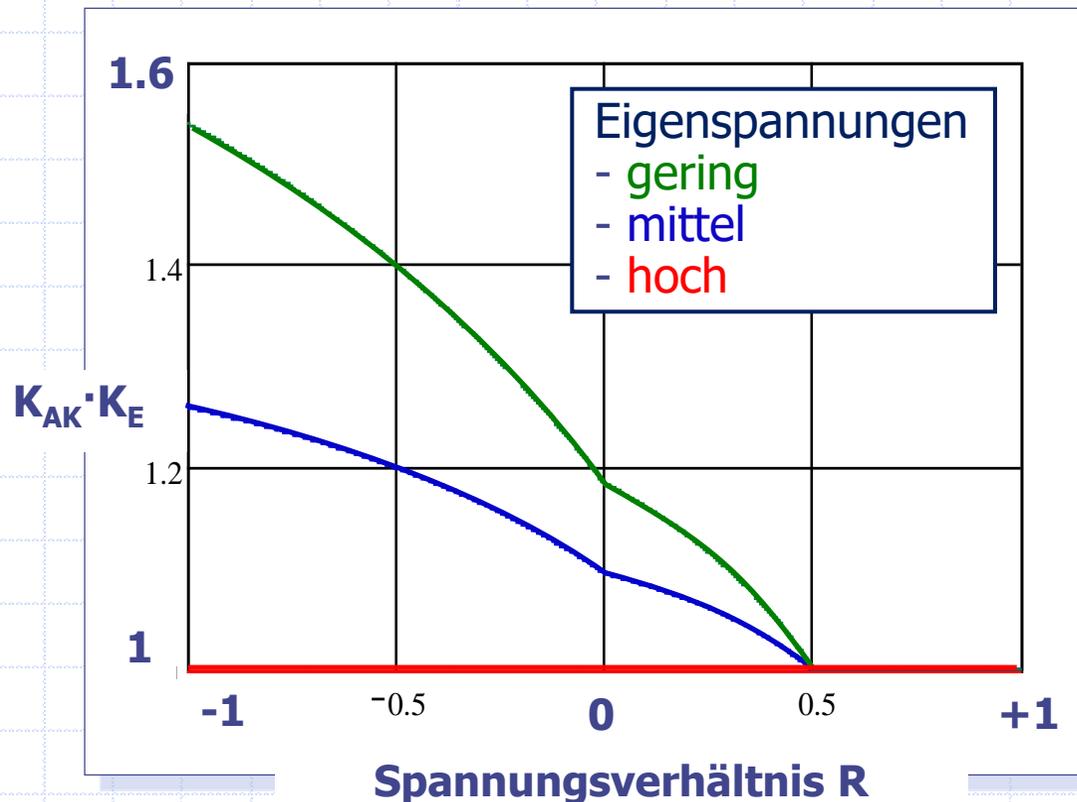
Der Nachweis erfolgt mit den ausgerichteten Spannungskomponenten.



Eigenspannungen und Mittelspannungen

Der Eigenspannungszustand wird beim Ermüdungsnachweis eher rudimentär berücksichtigt. Die Mittelspannungsempfindlichkeit hängt mit dem Eigenspannungszustand zusammen. Somit ist der Mittelspannungsfaktor K_A mit dem Eigenspannungsfaktor K_E gekoppelt.

Hohe Eigenspannungen ohne Mittelspannungsempfindlichkeit stellen den Ausgangszustand dar.



Nachweis nach IIW – konstante Amplitude

Die IIW erlaubt bei proportionalen Spannungen den Nachweis mit der grössten Hauptspannung. Dies vereinfacht die direkte Auswertung des Auslastungsgrads in der Simulation und das Auffinden der kritischen Stellen.

Tab. {4-1}: Verification procedures for combined normal and shear stress using S-N curves

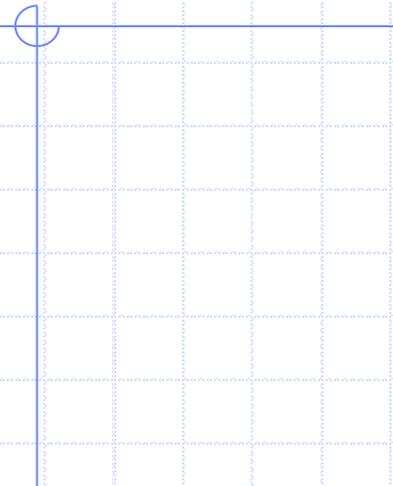
Type of load	Phase of stresses	Verification procedure	Miner-sum D or comparison value CV	
Constant amplitude	proportional	verification of maximum principal stress or $\left(\frac{\Delta \sigma_{S,d}}{\Delta \sigma_{R,d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_{S,d}}{\Delta \tau_{R,d}}\right)^2 \leq CV$	CV=1.0	
	non-proportional	$\left(\frac{\Delta \sigma_{S,d}}{\Delta \sigma_{R,d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_{S,d}}{\Delta \tau_{R,d}}\right)^2 \leq CV$	steel	CV=0.5
			aluminium	CV=1.0

Nachweis nach IIW – variable Amplitude

Beim Mehrstufen-Kollektiv werden die variablen Schwingbreiten in schädigungs-äquivalente Schwingbreiten umgerechnet. Bei variabler Mittelspannung wird die Schädigungssumme zusätzlich reduziert ($D_m=0.2$).

Type of load	Phase of stresses	Verification procedure	Miner-sum D or comparison value CV	
Variable amplitude	proportional	Verification of maximum principal stress and Miner sum D, or $\left(\frac{\Delta\sigma_{eq,S,d}}{\Delta\sigma_{R,d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_{eq,S,d}}{\Delta\tau_{R,d}}\right)^2 \leq CV$	D=0.5 CV = 1.0	
	non-proportional	$\left(\frac{\Delta\sigma_{eq,S,d}}{\Delta\sigma_{R,d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_{eq,S,d}}{\Delta\tau_{R,d}}\right)^2 \leq CV$	steel	D=0.5 CV=0.5
			aluminium	D=0.5 CV=1.0

Note: For fluctuating mean stress, a Palmgren-Miner sum of D=0.2 is recommended.



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Literaturverzeichnis

FKM1 Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile

FKM-Richtlinie, 6. Auflage 2012, VDMA Verlag

DVS1 Merkblatt DVS 0905 Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweissverbindungen

DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe „Konstruktion und Berechnung“, Feb. 2017

IIW1 Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW Document IIW-2259-15, 2016