

Spannungskonzepte im Vergleich

Sitzung der AG Q 1.1 „Berechnen und Gestalten“ 1.12.2010

Beat Schmied, Schmied Engineering GmbH

Einleitung

Ein Teilnehmer des CADFEM Schweissnahtberechnungsseminars überprüfte an einem von ihm frei gewählten Beispiel die verschiedenen Strukturspannungsmethoden und verglich sie mit der Kerbspannung. Die daraus resultierenden Fragen nahm Schmied Engineering zum Anlass, die im Seminar vorgestellten Methoden an diesem Beispiel vertiefter zu untersuchen (→ Hauptuntersuchung).

Für den statischen Festigkeitsnachweis von Schweissnähten hat Schmied Engineering einen Ansatz entwickelt, wie aus dem Kerbspannungsmodell alle Informationen gewonnen werden können, um den Nachweis, wie von der FKM gefordert, mit den Strukturspannungen führen zu können. An 4 Nahtbeispielen wurde dieses Vorgehen getestet. Diese Modellbeispiele wurden nun ebenfalls verwendet, um die verschiedenen Konzepte miteinander zu vergleichen (→ weitere Überprüfungen).

In eigener Sache

Zur Person

- *Maschineningenieur FH*
- *Dozent an der Berner Fachhochschule für Festigkeitslehre und FEM*
- *Co-Referent bei CADFEM im Seminar „Festigkeitsnachweise von Schweissnähten“ zusammen mit Dr. Jürgen Rudolph.*
- *b.schmied@schmied-engineering.ch*

Zur Firma

- *Fokussiert auf Festigkeitsberechnungen*
- *Bürogemeinschaft mit Büro Mittelland der CADFEM Schweiz*
- *FE-Programm ANSYS Workbench 12.1*
- *www.schmied-engineering.ch*

Inhaltsverzeichnis

1. In eigener Sache

2. Hauptuntersuchung an einem Volumenmodell

- Aufgabenstellung
- Modellbildung und Modellvariationen
- Untersuchte Strukturspannungsvarianten
- Kerbspannungskonzept
- Ergebnisse der einzelnen Konzepte
- Vergleich der Konzepte
- Modell ohne Naht = Nennspannung ?
- Zusammenfassung

3. Weitere Überprüfung an Testmodellen für statischen Nachweis

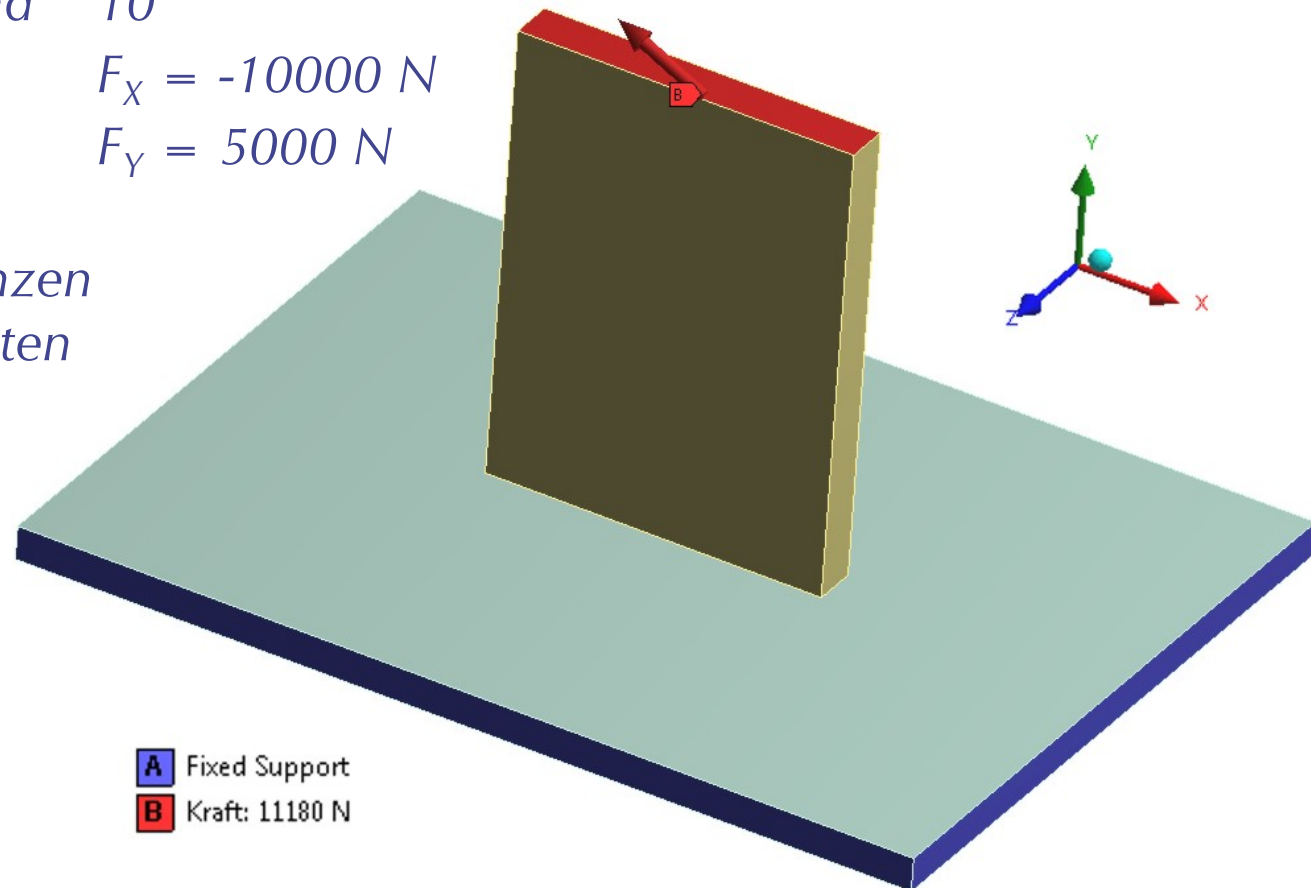
- Modelle und die Ergebnisse
- Erkenntnisse

Hauptuntersuchung am Volumenmodell

Aufgabenstellung

Horizontale Platte	400x300x15
Vertikale Platte	200x150x20
Kehlnaht umlaufend	10
Scherkraft	$F_x = -10000 \text{ N}$
Zugkraft	$F_y = 5000 \text{ N}$

Plattenrand am ganzen
Umfang starr gehalten



Zielsetzungen und Fragestellungen

- *Vergleich der verschiedenen Strukturspannungskonzepte an einem komplexeren Nahtdetail unter kombinierter Belastung.
→ Vorgaben und Einschränkungen bezüglich Modellierung ?*
- *Vergleich der Ergebnisse mit dem Kerbspannungskonzept als Referenz*
- *Können umgekehrt die Strukturspannungen aus dem Kerbspannungsmodell ermittelt werden, um die Kerbspannung zu verifizieren ?*
→ *Einfluss der Wurzelfreistellung auf die Strukturspannung am Nahtübergang ?*
- *Kann aus dem Modell direkt auf die Nennspannung geschlossen werden, wie dies die DVS 1612 als Möglichkeit aufzeigt:
Bei FEM oder DMS haben die maßgebenden Nennspannungen in der Regel einen bestimmten Abstand zur Schweißnaht. Ein Richtwert für den Abstand zum Nahtübergang ist bei querbeanspruchten Schweißnähten 1 bis 1.5 Blechdicke.*

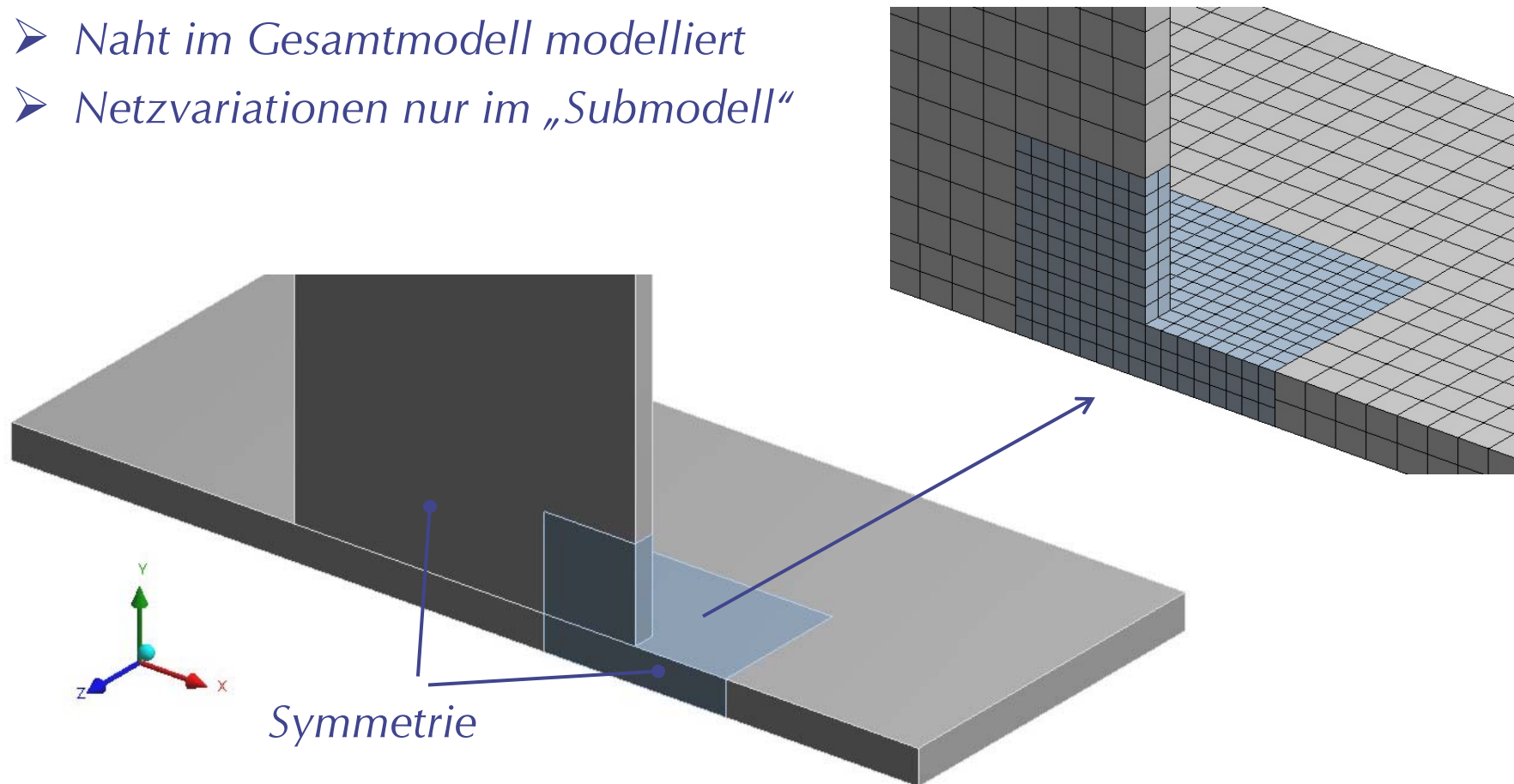
Festlegungen

- *Simulationen in ANSYS Workbench 12.1*
- *Beschränkung auf Volumenmodelle*
- *Nur der Nahtübergang auf der Grundplatte wird untersucht.*
- *Linear-elastisches Materialverhalten*
- *Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz*
- *Bei der Hexaeder-Vernetzung wird die Workbench Option „Hex-dominant“ verwendet → Randschichtelemente: Hexaeder, die inneren Elemente jedoch meist Tetraeder*
- *Verglichen werden die grössten Hauptspannungen. Nach FKM würde dies der Nachweisführung für volumenförmige Bauteile entsprechen.*

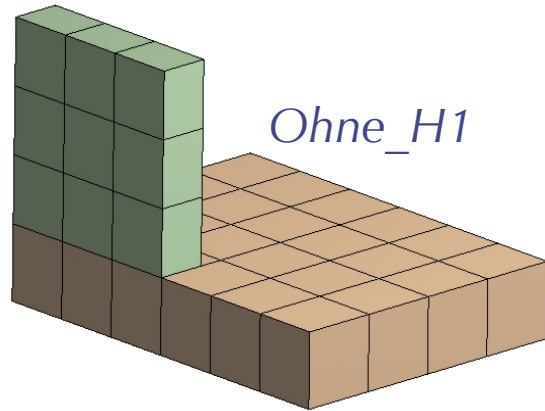
Hauptuntersuchung
Modellbildung
und Modellvariationen

FE-Modell

- Ausnutzen der Symmetrie
- „Submodell“ im Gesamtmodell integriert
- Naht im Gesamtmodell modelliert
- Netzvariationen nur im „Submodell“

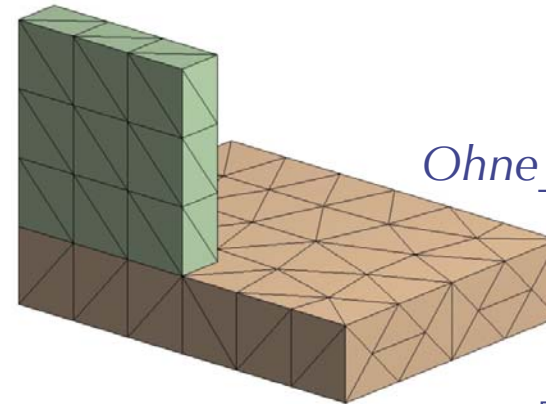


Modell ohne Schweissnaht



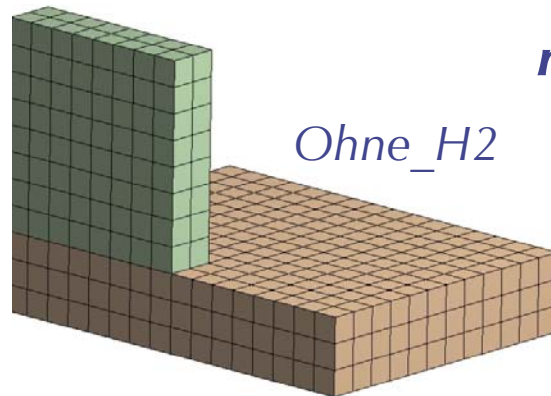
Ohne_H1

grob



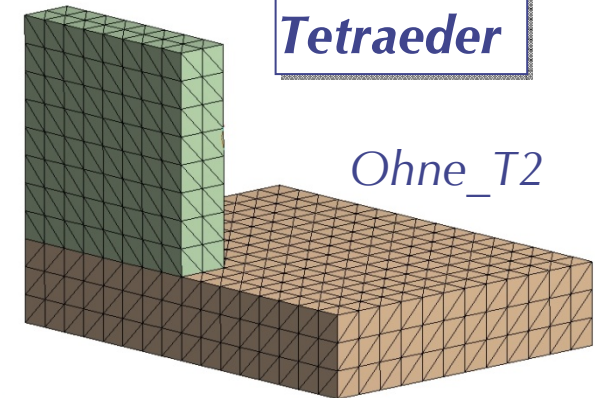
Ohne_T1

Hexaeder



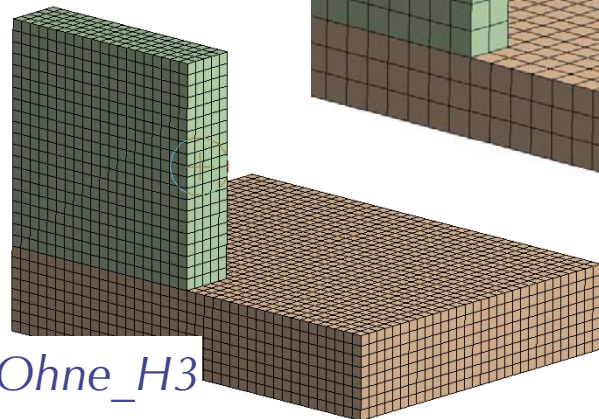
Ohne_H2

mittel



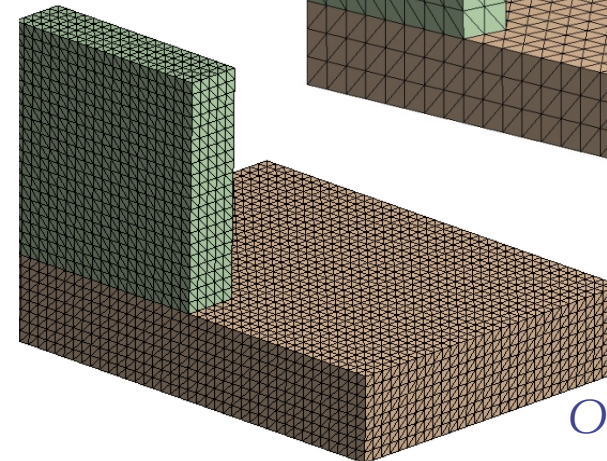
Tetraeder

Ohne_T2



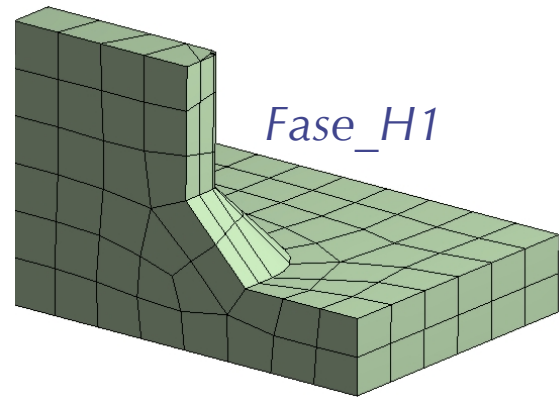
Ohne_H3

fein

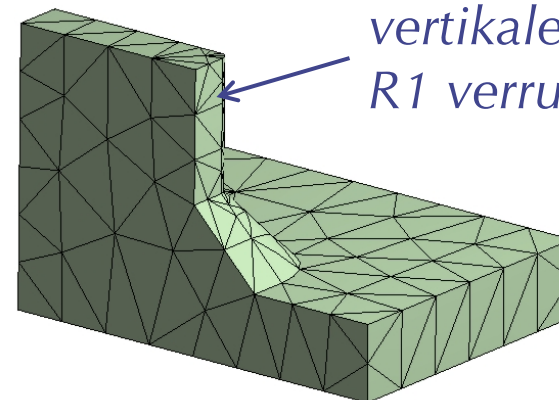


Ohne_T3

Naht als Fase 14x14

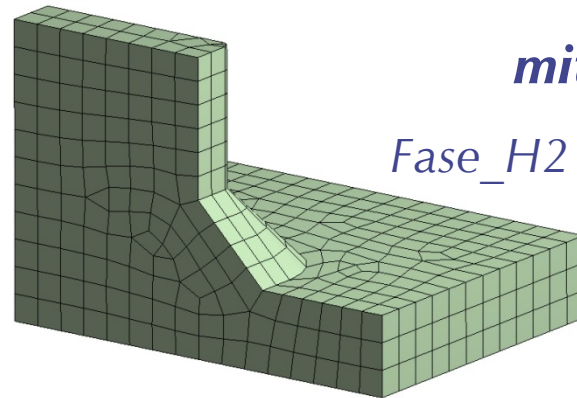


grob

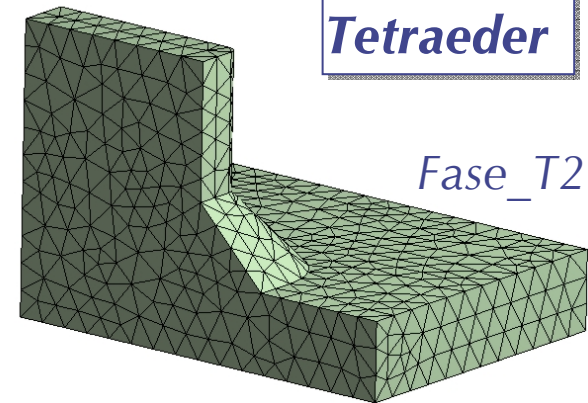


vertikale Kante mit R1 verrundet

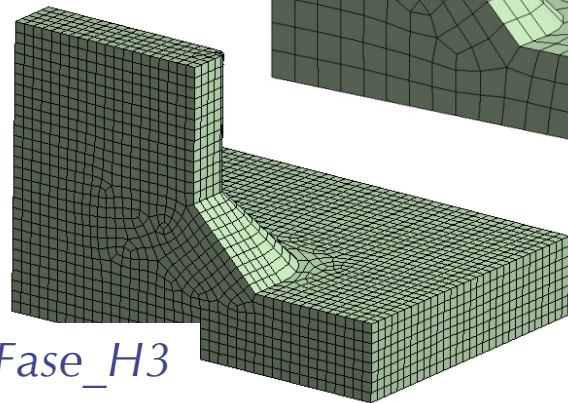
Hexaeder



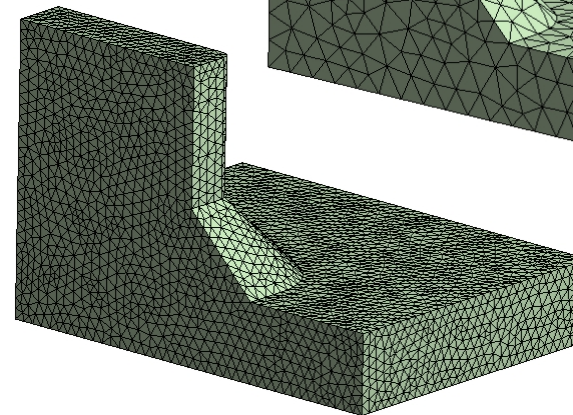
mittel



Tetraeder

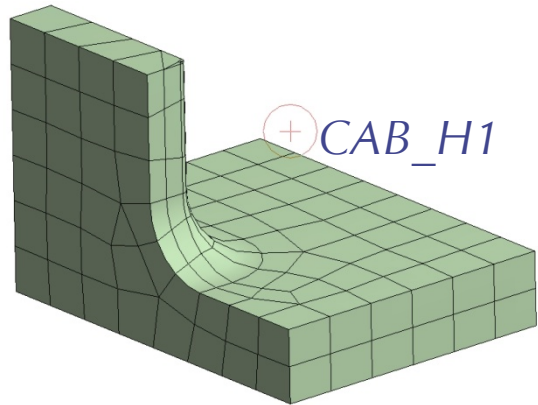


fein

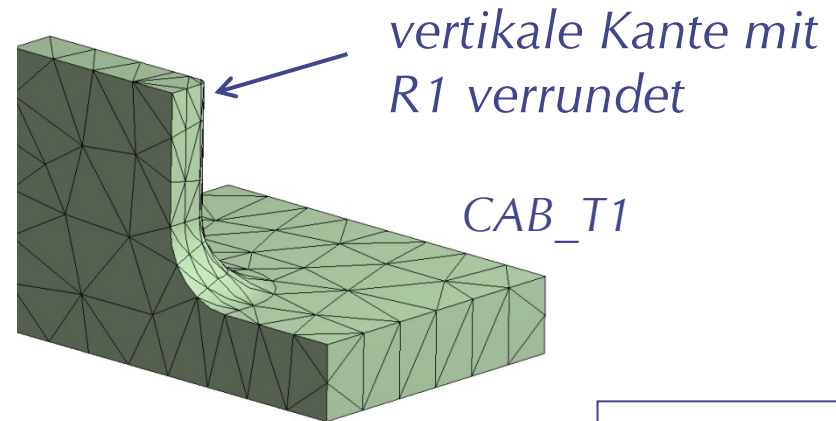


Fase_T3

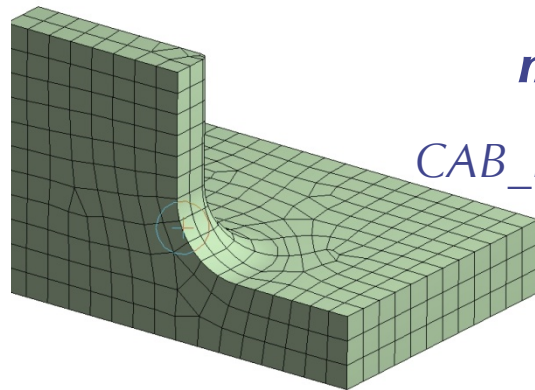
Naht als Viertelkreis R14



grob

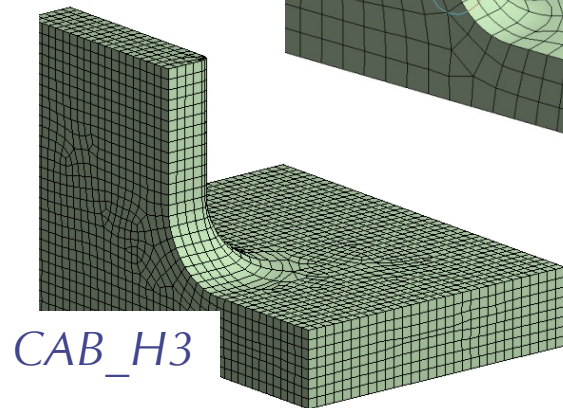
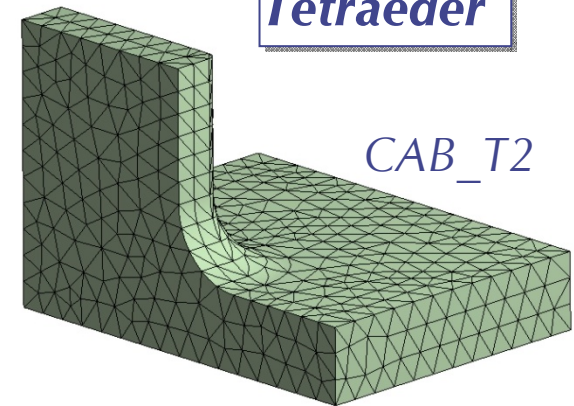


Hexaeder

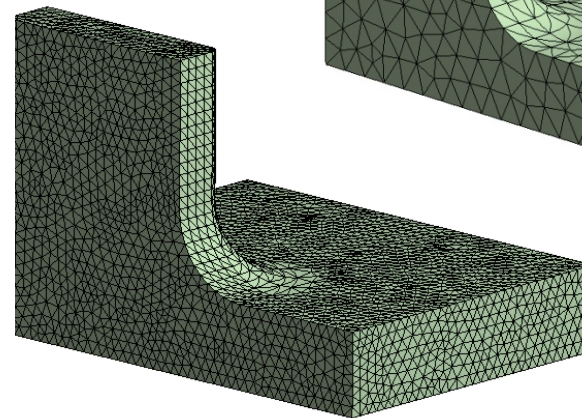


mittel

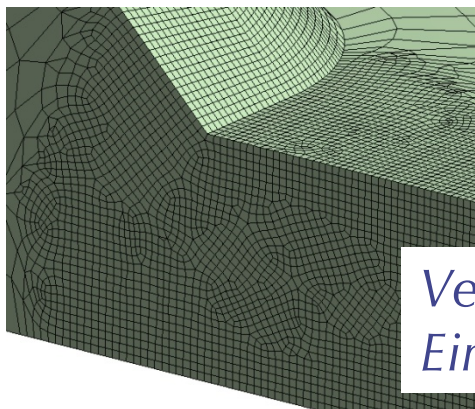
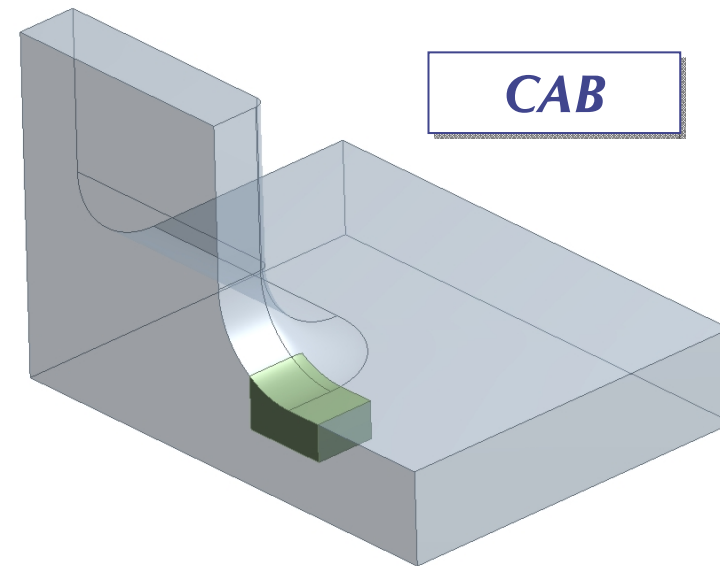
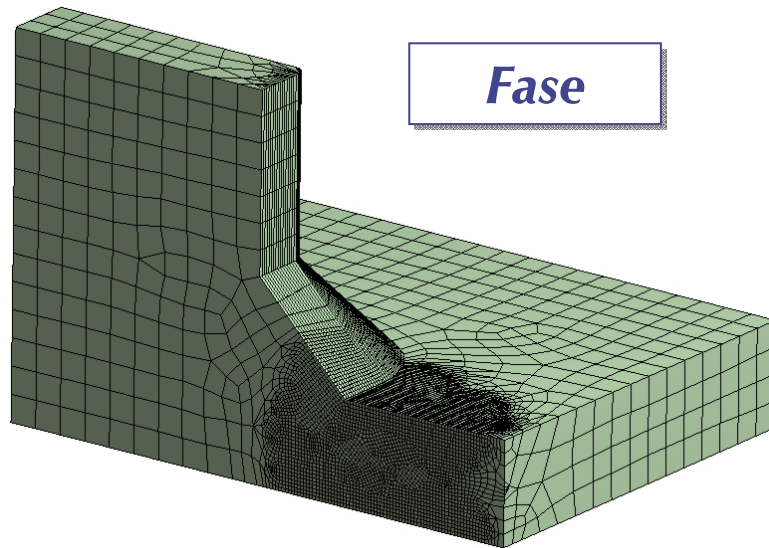
Tetraeder



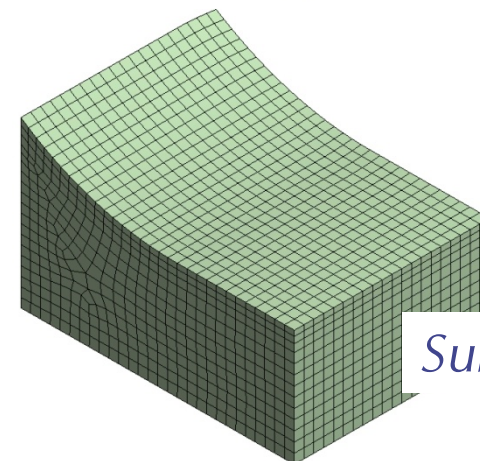
fein



„Ideale“ Netze



Verfeinerung im Einflussbereich

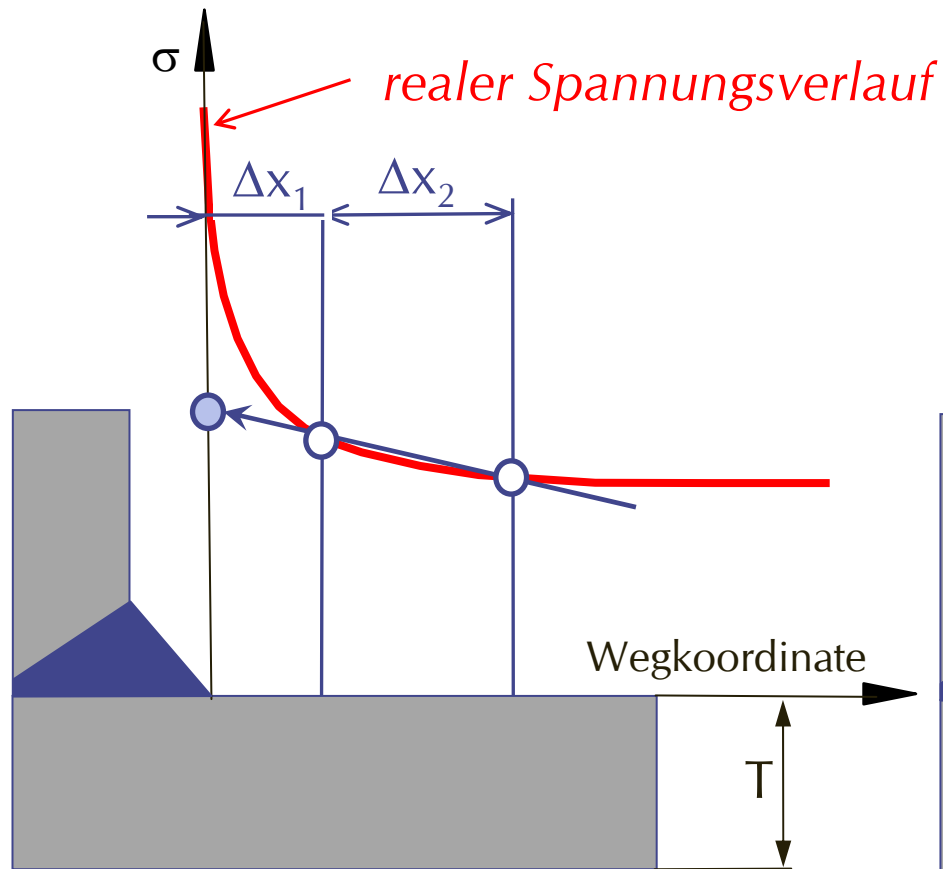


Hauptuntersuchung

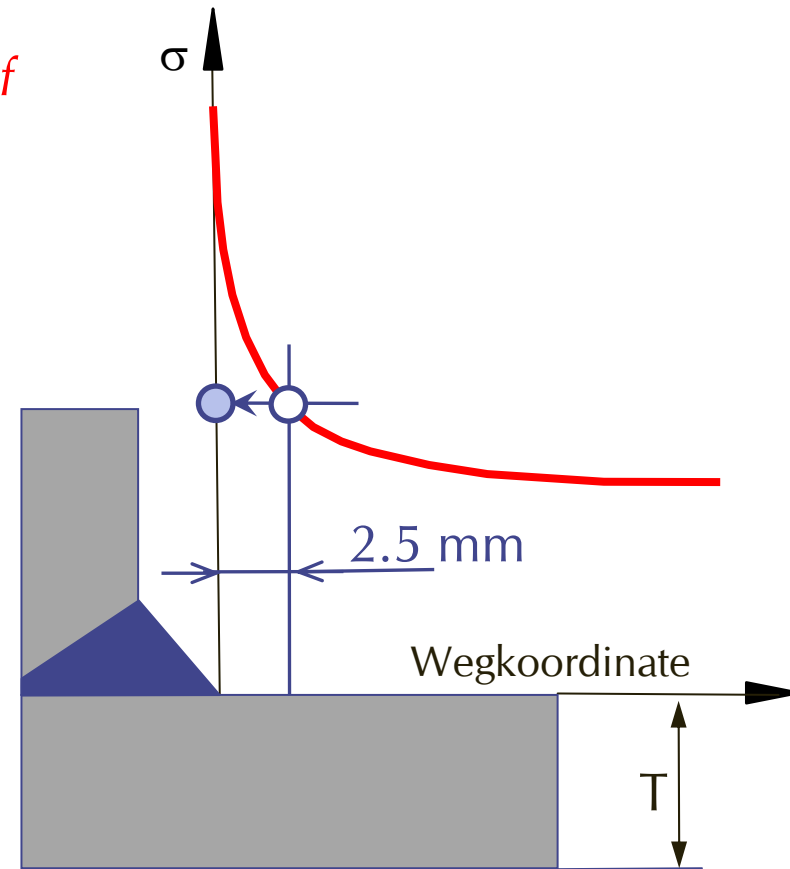
Strukturspannungsmethoden

Hot-Spot und Haibach

Hot-Spot-Extrapolation

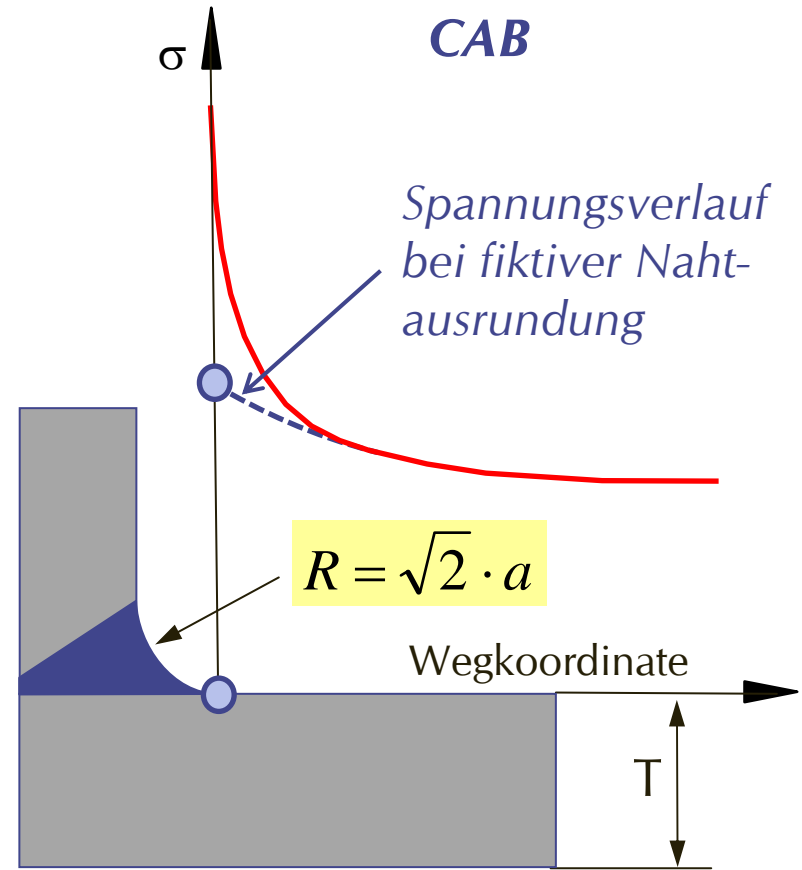
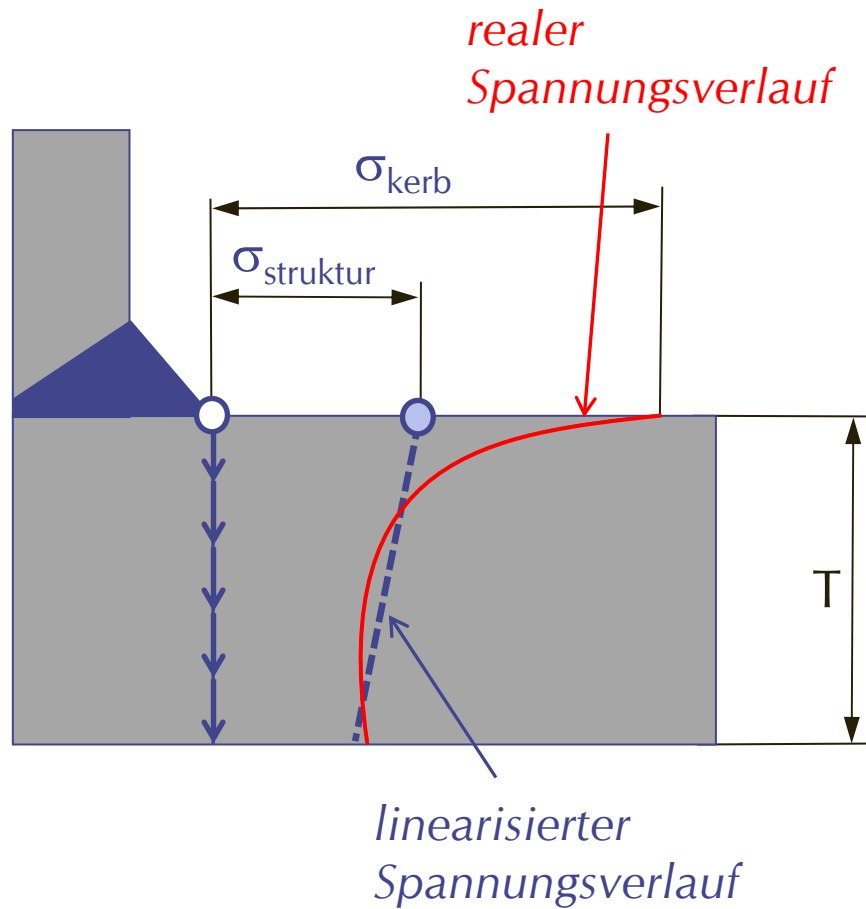


Haibach



ASME und CAB

Innenlinearisierung nach ASME



Varianten der Hot-Spot-Methode

Untersucht werden alle 3 von der IIW definierte Extrapolationen (Typ a).

Die ersten beiden stellen Minimalanforderungen an die Elementgröße. Infolge des großen Steifigkeitssprungs sollte die quadratische Extrapolation die besseren Ergebnisse liefern.

Die dritte Extrapolation wird für grobe Netze empfohlen.

$$1) \quad \sigma_{hs_1} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4 \cdot t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0 \cdot t}$$

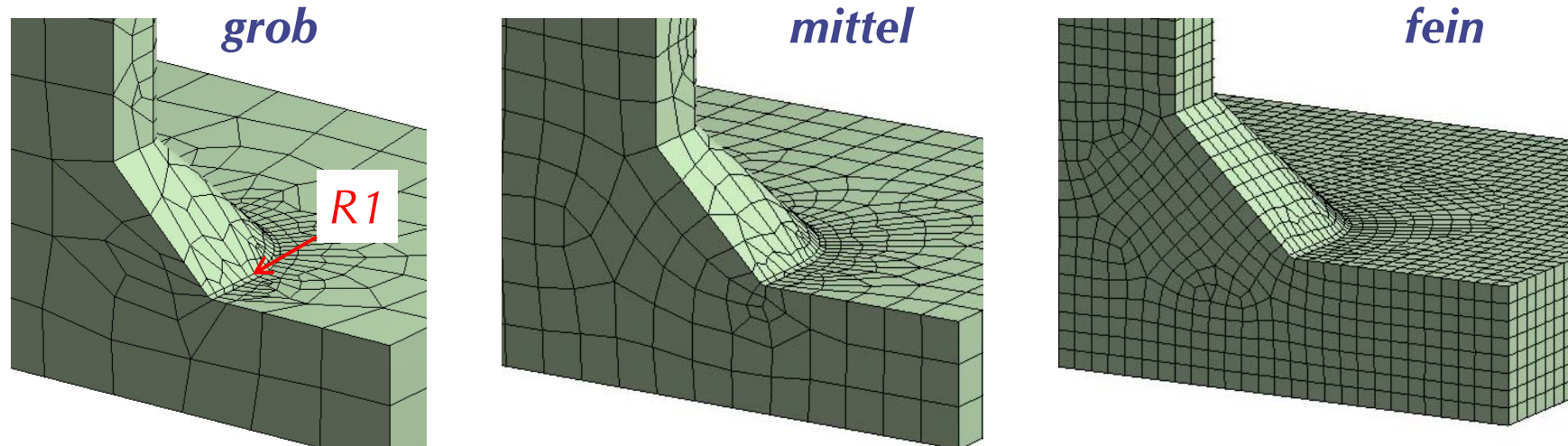
$$2) \quad \sigma_{hs_2} = 2.52 \cdot \sigma_{0.4 \cdot t} - 2.24 \cdot \sigma_{0.9 \cdot t} + 0.72 \cdot \sigma_{1.4 \cdot t}$$

$$3) \quad \sigma_{hs_3} = 1.50 \cdot \sigma_{0.5 \cdot t} - 0.5 \cdot \sigma_{1.5 \cdot t}$$

Variante der ASME-Methode mit R1

Die Singularitäten in den Kanten der Fase verfälschen die Spannungslinearisierung. Je feiner das Netz, umso besser wird die Singularität herausgefiltert. Um die Singularität grundsätzlich zu vermeiden, bietet sich in Analogie zum Kerbspannungskonzept die Kantenverrundung mit R1 an.
→ Anforderungen an die Vernetzung ?

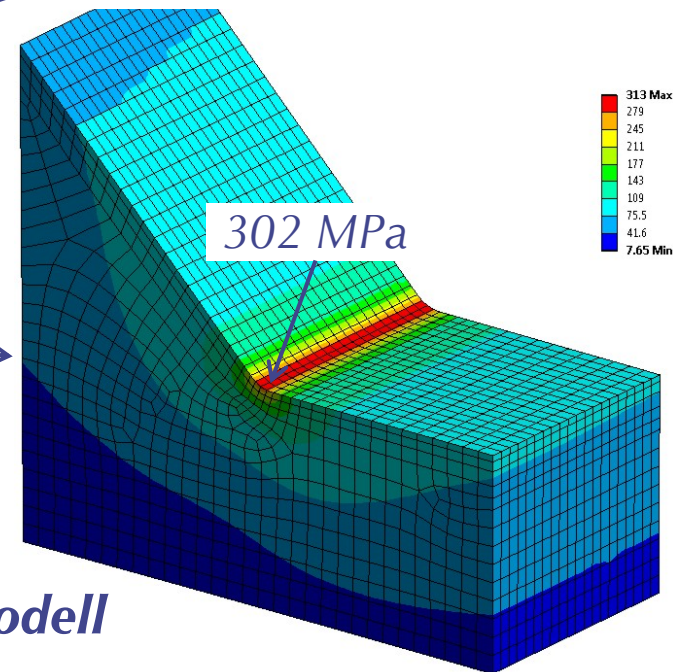
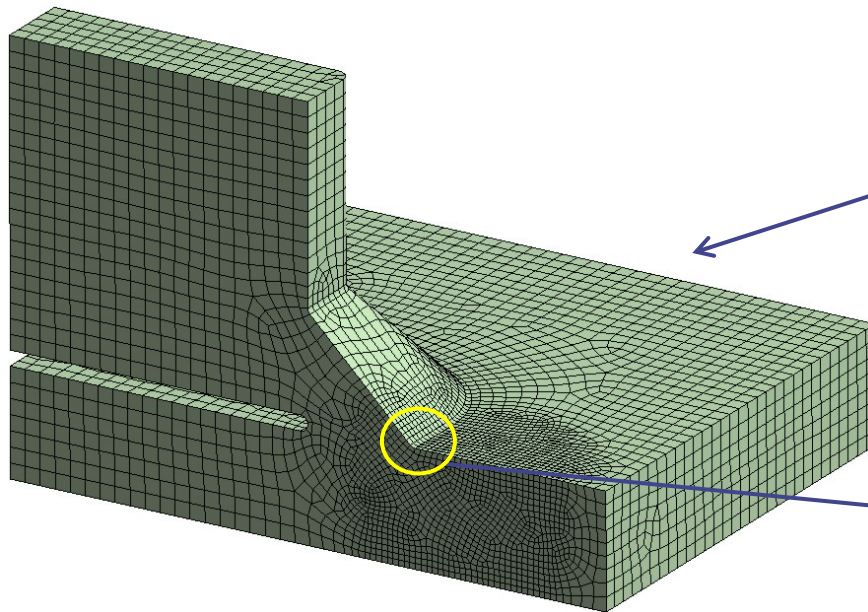
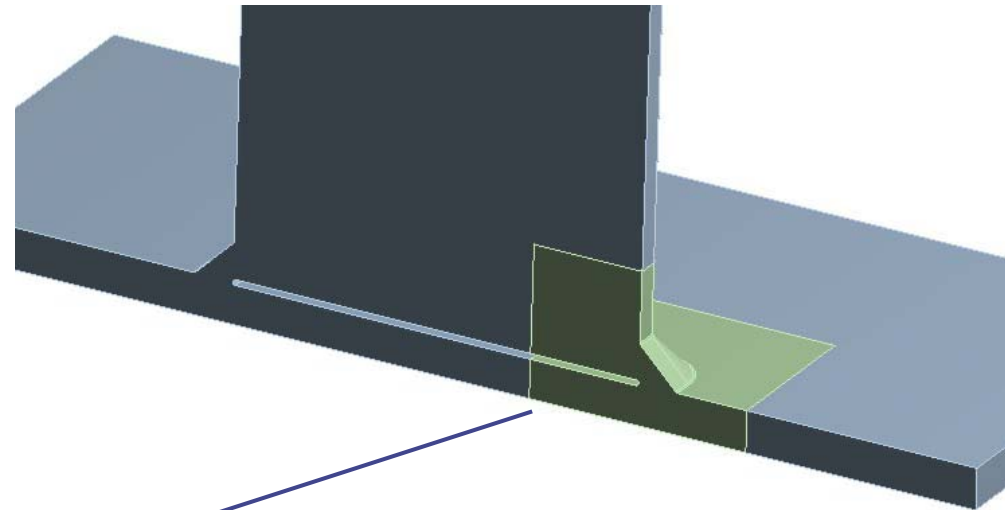
Netzqualitäten (nur Hexaeder gezeigt, Tetraeder ähnlich)



Hauptuntersuchung
Kerbspannungskonzept

Modell

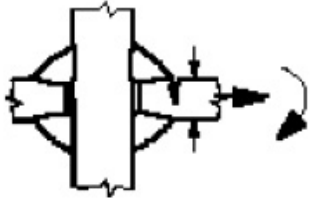
- Wurzel freigestellt
- alle Kanten mit R1 verrundet



Submodell

Umrechnung auf gleichwertige Strukturspannung

Nach FKM gilt für unbearbeitete Kehlnaht die FAT 100. Nach IIW ist jedoch eher FAT 90 zutreffend.

6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36
---	---	--	-------------------------	----	----

FAT-Klasse für Kerbspannung

$$FAT_{\text{kerb}} := 225$$

FAT-Klassen für Strukturspannung

$$FAT_{\text{struktur}} := \begin{pmatrix} 100 \\ 90 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \text{FKM} \\ \text{IIW} \end{pmatrix}$$

max. Hauptspannung nach
Kerbspannungsmethode

$$\sigma_{1_kerb} := 302 \text{ MPa}$$

gleichwertige Strukturspannung

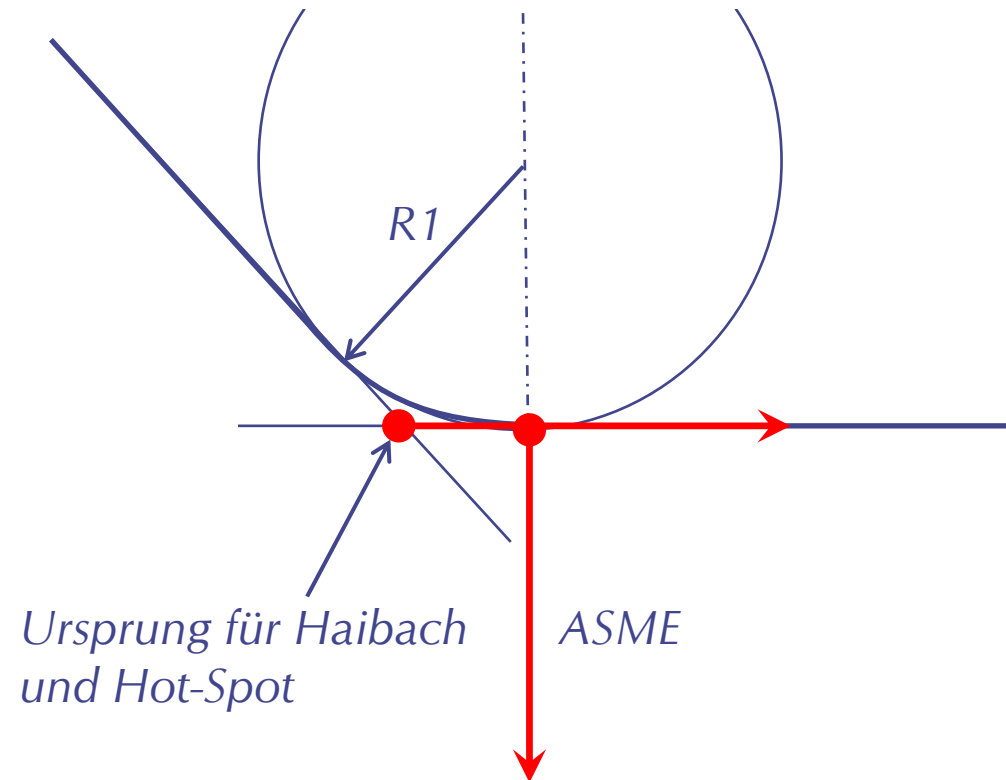
$$\sigma_{1_struktur} := \frac{FAT_{\text{struktur}}}{FAT_{\text{kerb}}} \cdot \sigma_{1_kerb} = \begin{pmatrix} 134 \\ 121 \end{pmatrix} \text{ MPa} \quad \begin{pmatrix} \text{FKM} \\ \text{IIW} \end{pmatrix}$$

Strukturspannungen aus Kerbspannungsmodell

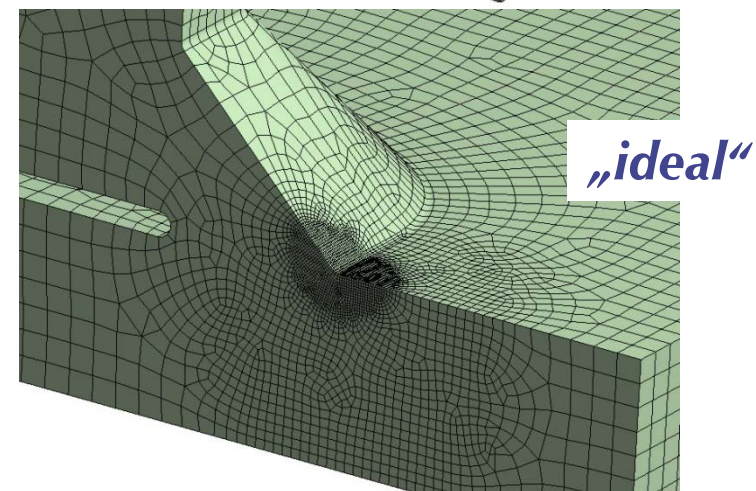
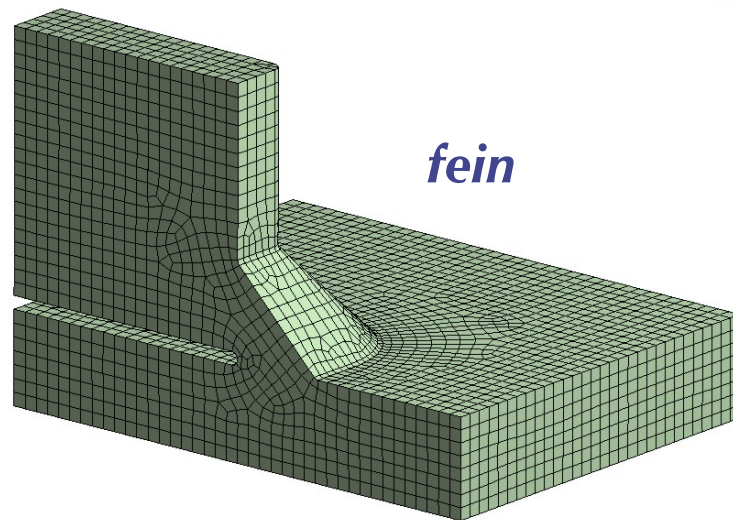
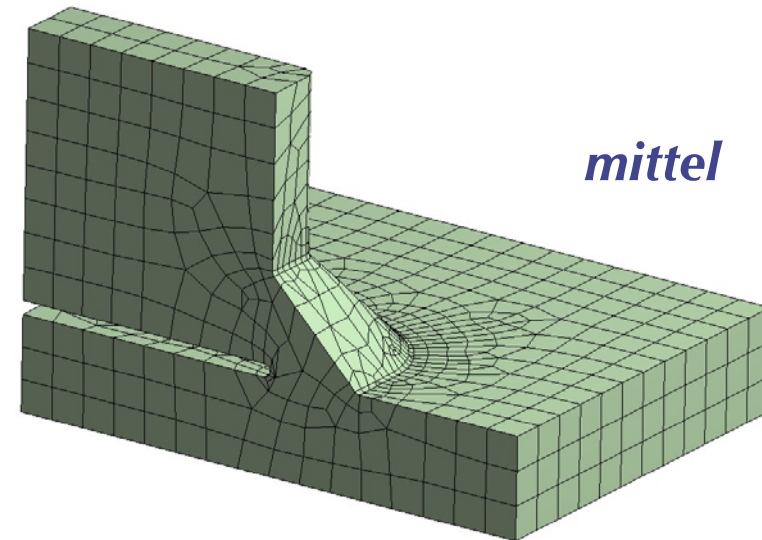
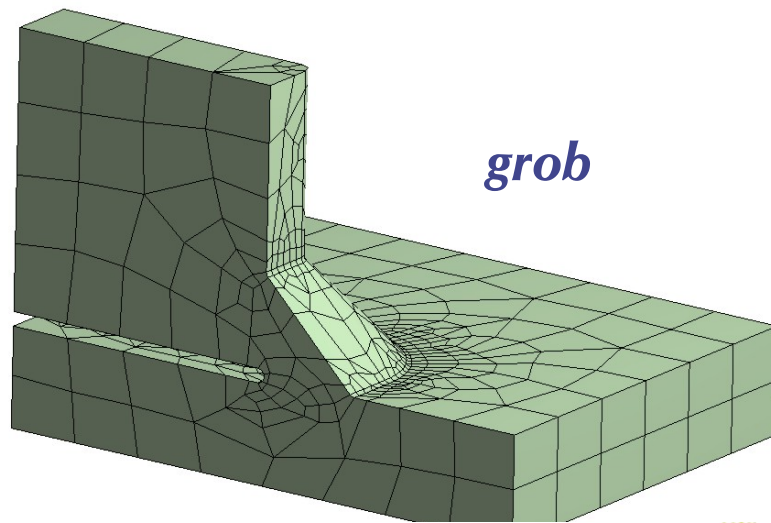
Der statische Nachweis von Schweißnähten hat nach FKM mit Strukturspannungen zu erfolgen. Erfolgt der Ermüdungsnachweis mit Kerbspannungen, verwendet Schmied Engineering die ASME-Linearisierung zum Ermitteln der Strukturspannung.

Der Pfadbeginn wird aus Gründen der Einfachheit (Pfaddefinition in ANSYS) an den Radiusübergang verlegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Wurzelfreistellung auch für die anderen Methoden untersucht.



Strukturspannungen aus Kerbspannungsmodell



Hauptuntersuchung

Ergebnisse der Methoden für verschiedene Nahtmodellierungen

Hot-Spot

Werte in MPa		Ohne Naht	Fase	¼ Kreis
Hexaeder	H1	79	126	109
	H2	76	118	100
	H3	75	108	98
Tetraeder	T1	83	105	106
	T2	77	111	99
	T3	75	107	98
„ideales“ Netz		-	107	-
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)		

Vergleich mit
Extrapolation Nr. 1

$$\sigma_{hs_1} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4-t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0-t}$$

- Ohne Naht eindeutig zu tiefe Werte.
- Auch CAB-Verrundung ergibt zu tiefe Werte
- Bei Hexaeder-Vernetzung konvergiert Spannung zu einem zu tiefen Wert. Bei Tetraeder-Vernetzung ist kein Zusammenhang mit der Netzfeinheit erkennbar.

Hot-Spot - Extrapolationsvarianten für Fase

Werte in MPa		<i>linear - fein (1)</i>	<i>quadratisch (2)</i>	<i>linear-grob (3)</i>
Hexaeder	H1	126	133	117
	H2	118	127	108
	H3	108	113	103
Tetraeder	T1	105	109	101
	T2	111	118	104
	T3	107	112	103
„ideales“ Netz		107	112	-
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)		

Anwendungsbereich
bezüglich
Netzqualität

- Hexaeder-Vernetzung konvergiert - Tetraeder kein Zusammenhang
- Hexaeder durchwegs besser als Tetraeder.
- Linear-grob → H1 gutes Ergebnis; T1 sehr tiefer Wert
- Quadratische Extrapolation 2) ergibt tatsächlich bessere Werte als 1).
- H2 & T2 bessere Ergebnisse als H3 & T3. **Kann das Netz zu fein sein?**

Hot-Spot - Modellierungsvarianten für Fase

Werte in MPa		Method	Nur Fase	R1MS
Hexaeder	H1	linear - grob	117	101
	H2	quadratisch	127	112
	H3	quadratisch	113	108
Tetraeder	T1	linear - grob	101	98
	T2	quadratisch	118	111
	T3	quadratisch	112	108
„richtiger Wert“			121 (IIW) - 134 (FKM)	

- Das Kerbspannungsmodell R1MS mit der Wurzelfreistellung ergibt 5 bis 15% tiefere Spannungen.

Haibach

Werte in MPa		Ohne Naht	Fase	¼ Kreis	R1MS
Hexaeder	H1	78	124	109	113
	H2	77	128	103	110
	H3	76	117	97	110
Tetraeder	T1	80	104	104	107
	T2	77	118	101	111
	T3	76	119	97	112
„ideales“ Netz		-	113	-	
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)			

- Ohne Naht eindeutig zu tiefe Werte
- Auch CAB-Verrundung ergibt zu tiefe Werte
- Keine eindeutige Netzabhängigkeit → kann das Netz zu fein sein?
- Das Kerbspannungsmodell R1MS ergibt 5 bis 15% tiefere Spannungen.

ASME

Werte in MPa		Ohne Naht	Fase	Fase + R1	R1MS	¼ Kreis
Hexaeder	H1	85	112	119	123	113
	H2	88	119	123	119	110
	H3	87	123	122	117	110
Tetraeder	T1	85	116	121	114	116
	T2	88	119	120	115	110
	T3	87	123	121	118	110
„ideales“ Netz		-	122	122		-
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)				

- ohne Naht eindeutig zu tiefe Werte, genauso CAB-Verrundung
- bei der einfachen Fase konvergieren beide Elementtypen
- ohne R1 ergibt das grobe Netz zu tiefe Werte (Singularität)
- sehr gute Übereinstimmung mit IIW
- das Kerbspannungsmodell R1MS ergibt nur leicht geringere Werte

CAB

Werte in MPa		¼ Kreis
Hexaeder	H1	123
	H2	123
	H3	122
Tetraeder	T1	127
	T2	120
	T3	123
„ideales“ Netz		122
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)

- Hexaeder-Vernetzung ergibt bereits beim groben Netz den idealen Wert. Die Tetraeder-Vernetzung stellt leicht höhere Ansprüche.
- Sehr gute Übereinstimmung mit IIW.

Hauptuntersuchung

Vergleich der Nahtmodellierungen

Ohne Nahtmodellierung

Werte in MPa		Hot-Spot ¹⁾	Haibach	ASME	CAB
Hexaeder	H1	79	78	85	-
	H2	76	77	88	-
	H3	75	76	87	-
Tetraeder	T1	83	80	85	-
	T2	77	77	88	-
	T3	75	76	87	-
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)			

¹⁾ Lineare Extrapolation σ_{hs_1}

Die Werte sind deutlich zu tief und dürfen nicht als Strukturspannungen verstanden werden → **die Naht ist zu modellieren.**

Naht als Fase

Werte in MPa		Hot-Spot	Haibach	ASME	ASME R1
Hexaeder	H1	117	124	112	119
	H2	127	128	119	123
	H3	113	117	123	122
Tetraeder	T1	101	104	116	121
	T2	118	118	119	120
	T3	112	119	123	121
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)			

- Hot-Spot ohne klaren Zusammenhang mit Netzqualität.
- Haibach bedingt bei Tetraeder eine minimale Netzqualität.
- ASME bedingt infolge der Singularität eine minimale Netzqualität. Wird die Kante mit R1 verrundet, ergeben schon grobe Netze gute Ergebnisse.

Naht als Eckradius R14

Werte in MPa		<i>Hot-Spot</i>	<i>Haibach</i>	<i>ASME</i>	<i>CAB</i>
Hexaeder	H1	109	109	113	123
	H2	100	103	110	123
	H3	98	97	110	122
Tetraeder	T1	106	104	116	127
	T2	99	101	110	120
	T3	98	97	110	123
„richtiger Wert“		121 (IIW) - 134 (FKM)			

Die Annäherung der Nahtgeometrie durch einen Kreis bleibt der CAB-Methode vorbehalten. Alle anderen Methoden ergeben zu tiefe Werte. CAB zeigt bloß eine geringe Abhängigkeit von der Netzqualität.

Kerbspannungsmodell

Werte in MPa		<i>Hot-Spot 2</i>	<i>Hot-Spot 3</i>	<i>Haibach</i>	<i>ASME</i>
Hexaeder	H1	-	101 (117)	113 (124)	123 (112)
	H2	112 (127)	-	110 (128)	119 (119)
	H3	108 (113)	-	110 (117)	117 (123)
Tetraeder	T1	-	98 (101)	107 (104)	114 (116)
	T2	101 (118)	-	111 (118)	115 (119)
	T3	98 (112)	-	112 (119)	118 (123)
<i>„ideales Netz“</i>		108	-	108	117
<i>„richtiger Wert“</i>		121 (IIW) - 134 (FKM)			

- Werte in Klammern: Modell mit einfacher Fase
- Die Wurzelfreistellung reduziert durchwegs die Spannungen im Nahtübergang.

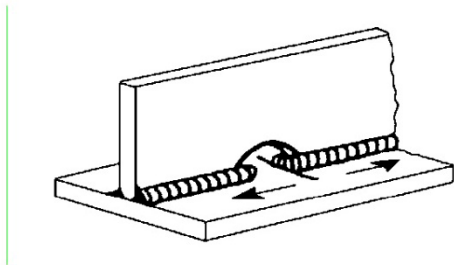
Hauptuntersuchung

***Modell ohne Naht
→ Nennspannungen ?***

FAT-Klassen

In Frage kommende FAT-Klassen:

325

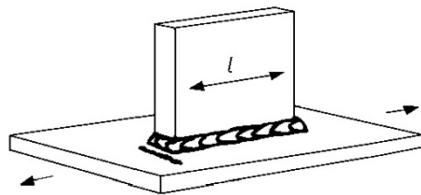


Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with cope holes (based on normal stress in flange σ and shear stress in web τ at weld ends), cope holes not higher than 40% of web.

$\tau/\sigma =$	0	71	28
	0.0 - 0.2	63	25
	0.2 - 0.3	56	22
	0.3 - 0.4	50	20
	0.4 - 0.5	45	18
	0.5 - 0.6	40	16
	> 0.6	36	14

Oberer Grenzwert, da unbelastete Rippe:

521



Longitudinal fillet welded gusset at length l

	$l < 50 \text{ mm}$	80	28
	$l < 150 \text{ mm}$	71	25
	$l < 300 \text{ mm}$	63	20
	$l > 300 \text{ mm}$	50	18

Äquivalente Nennspannung

Die FAT-Klasse des Nahtdetails 325 ist vom τ/σ -Verhältnis abhängig. Die Schubspannung liegt bei ca. 25% der Normalspannung.

FAT-Klasse für Kerbspannung

$$FAT_{\text{kerb}} := 225$$

FAT-Klasse für unterbrochene,
längsbelastete Kehlnaht

$$FAT_{325} := 56$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = 0.2 - 0.3$$

max. Hauptspannung nach
Kerbspannungsmethode

$$\sigma_{1_kerb} := 302 \text{ MPa}$$

gleichwertige Nennspannung

$$\sigma_{1_nenn} := \frac{FAT_{325}}{FAT_{\text{kerb}}} \cdot \sigma_{1_kerb} = 75 \text{ MPa}$$

Ergebnisse aus Modell ohne Naht

Gemäss DVS 1612 kann bei querbeanspruchten Nähten im Abstand 1.0 - 1.5 x Blechdicke vom Nahtübergang die Nennspannung abgegriffen werden. Im vorliegenden Fall wären dies 15 - 22.5 mm.

Werte in MPa	Hot-Spot	Haibach	ASME	DVS 1xt	DVS 1.5xt
Hexaeder	75-79	76-78	85-87	61-62	46
Tetraeder	75-83	76-80	85-88	61-62	46-48
„richtiger Wert“	ca. 75				

- *Hot-Spot und Haibach ergeben eine sehr gute Übereinstimmung*
- *ASME gute, konservative Übereinstimmung*
- *DVS-Richtwert ist im vorliegenden Fall ungeeignet.*

Hauptuntersuchung

Zusammenfassung

Erkenntnisse zur Modellierung

- *Ohne Nahtmodellierung dürfen im vorliegenden Fall die ermittelten Werte als Nennspannung interpretiert werden. Die allgemeine Anwendbarkeit dieses Ansatzes ist jedoch noch vertieft zu prüfen.*
- *Für den Strukturspannungsnachweis ist die Naht unbedingt zu modellieren. Die runde Naht bleibt dabei der CAB-Methode vorbehalten.*
- *Wird für ASME der Nahtübergang mit R1 verrundet, liefert bereits ein grobes Netz sehr gute Werte.*
- *Mit ASME werden aus dem Kerbspannungsmodell adäquate Strukturspannungen ermittelt (statischer Festigkeitsnachweis). Haibach und Hot-Spot liefern jedoch etwas zu tiefe Werte.*
- *Die Hexaeder-Vernetzung ist keine Bedingung. Die Tetraeder erfordern jedoch in der Regel, außer bei CAB, etwas feinere Netze.*

Weitere Überprüfungen

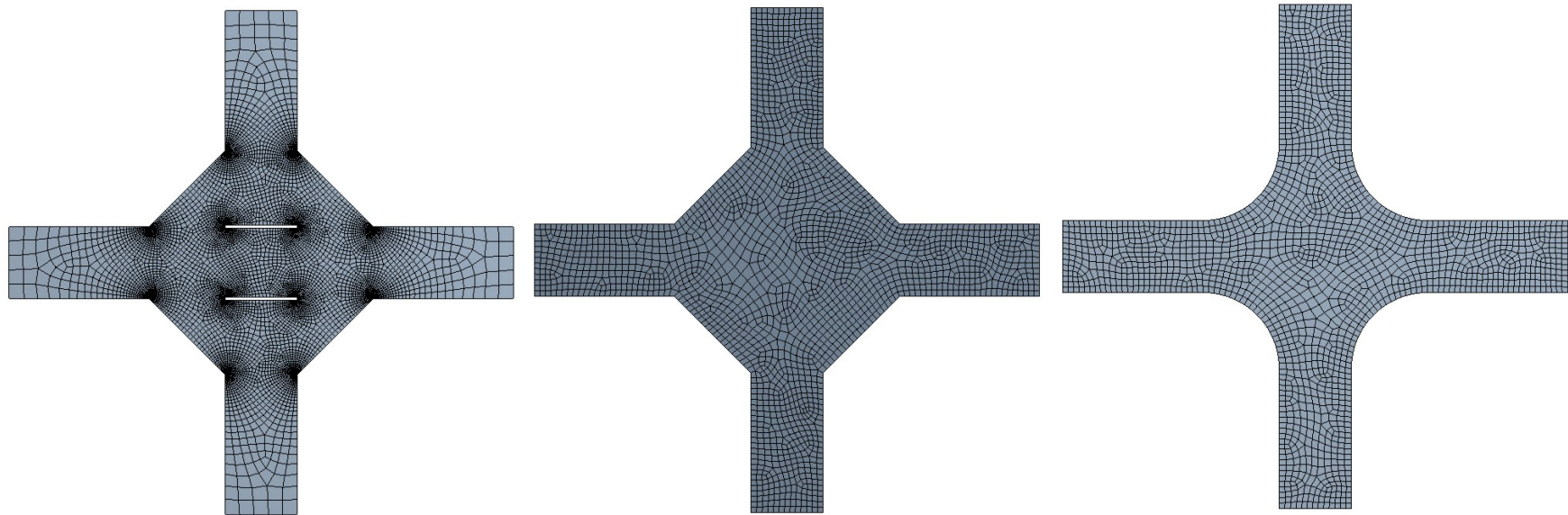


Konzept für statischen Nachweis

- *Gemäss FKM-Richtlinie 2005 ist der statische Nachweis mit der Strukturspannung zu führen.*
- *Für die Nahtwurzel ist bisher jedoch kein Strukturspannungskonzept anerkannt → für Ermüdungsnachweis immer Kerbspannungsmodell erforderlich.*
- *Schmied Engineering suchte ein Vorgehen, um aus dem Kerbspannungsmodell alle Informationen für den FKM konformen, statischen Nachweis zu generieren:*
 - *Ansatz mit Innenlinearisierung nach ASME auch für Nahtwurzel*
 - *plastische Formzahl*
- *Konzeptüberprüfung an 4 Nahtdetails unter verschiedenen Lasten*
 - *2D-Modell, ebener Dehnungszustand*
 - *Variation der Blechdicken von 2 bis 20 mm*
 - *Modellierung entsprechend Kerbspannungskonzept*
 - *Referenzradien 0.05 / 0.3 / 1 mm (DVS-Berichte Band 256)*

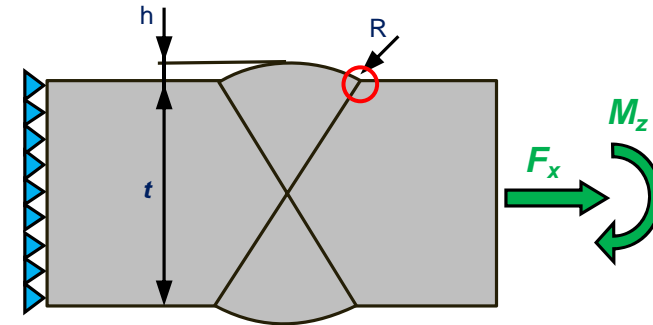
Vergleich der Spannungskonzepte

- Umrechnung der Kerbspannung σ_K entsprechend den FAT-Klassen auf die Strukturspannung σ_S
- Kehlnaht als Fase: Strukturspannung Hot-Spot, Haibach, ASME
- Kehlnaht als Viertelkreis: Strukturspannung CAB
- Ohne Kehlnaht: Nennspannung nach Hot-Spot, Haibach, ASME
- Ausgewertet wird die absolut grösste Hauptspannung



Modell 1: Stumpfnahht - F_x

- Strukturspannungsmodell ohne Radius
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **100**
- $\sigma_z = 100 \text{ MPa}$

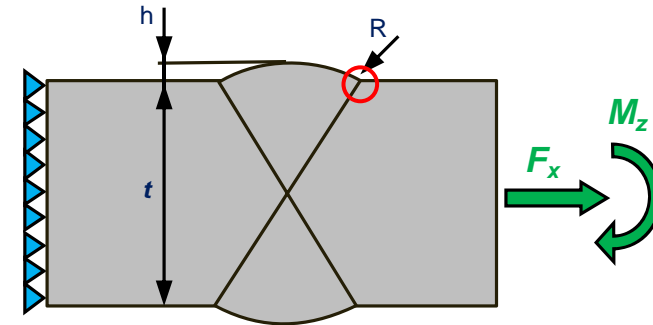


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	F_x	r	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	N	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	200	0.05	630	244	39	101-104		101 100-102 ¹⁾	
5	500			308	49				
10	1000	0.3	320	197	62		104		
				233	73		104		
20	2000	1.0	225	175	78		111		
				206	92				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 1: Stumpfnahat - M_z

- Strukturspannungsmodell ohne Radius
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **100**
- $\sigma_b = 100 \text{ MPa}$

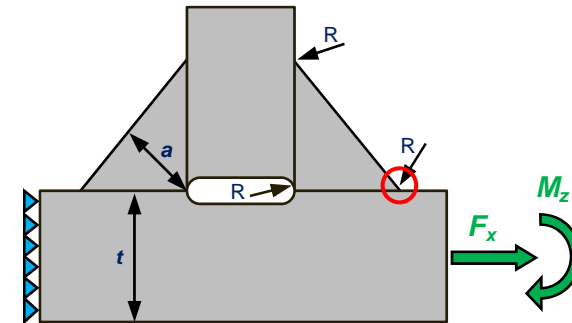


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	M_z	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	Nmm	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	67	0.05	630	232	37	100-101		100-101 100-104 ¹⁾	
5	417			292	47				
10	1667	0.3	320	187	59		101		
				221	69		101		
20	6667	1.0	225	166	74		101		
				195	87		106		

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 2: Stumpfnah - F_x

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **100**
- $\sigma_z = 100 \text{ MPa}$

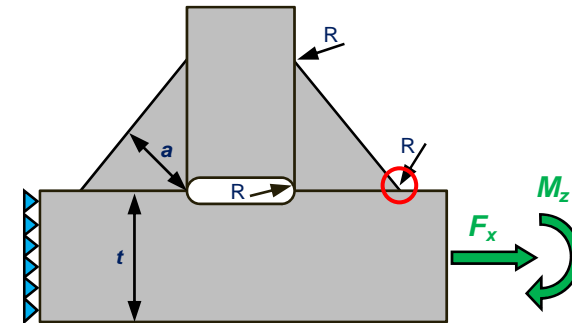


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	F_x	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	N	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	200	0.05	630	297	47	100-102		100-102 101-104 ¹⁾	112-113
5	500			395	63				
10	1000	0.3	320	229	72		103		
				281	88		103		
20	2000	1.0	225	199	88		111		
				242	108				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 2: Stumpfnah - M_z

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **100**
- $\sigma_b = 100 \text{ MPa}$

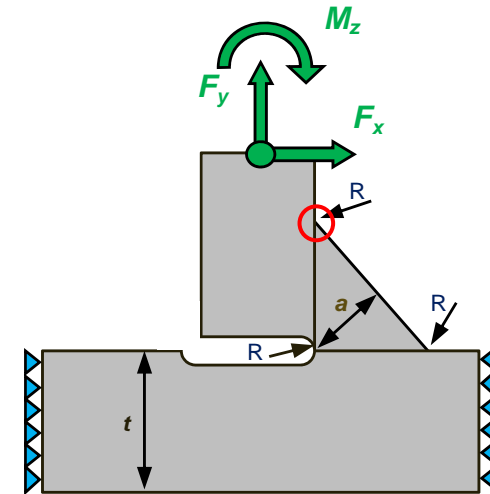


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	M_z	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	Nmm	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	67	0.05	630	340	54	99-100		100-102 102-106 ¹⁾	112-113
5	417			454	72				
10	1667	0.3	320	259	81		103		
				320	100		103		
20	6667	1.0	225	221	99		111		
				273	121				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 3: Einseitige Kehlnaht - F_x

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **90**
- $\sigma_b = 120 \text{ MPa} / \tau_s = 10 \text{ MPa}$

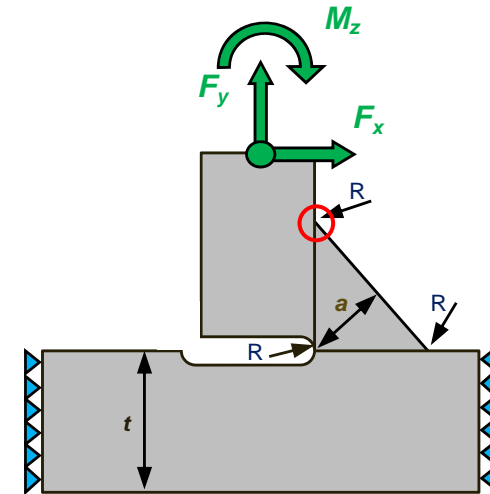


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	F_x	R	FAT	σ_K	σ_s	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	N	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	200	0.05	630	498	71	114-120		124-130 134-145 ¹⁾	131-137
5	500			712	102				
10	1000	0.3	320	417	117		108		
				509	143		108		
20	2000	1.0	225	369	148		129		
				438	175				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 3: Einseitige Kehlnaht - F_y

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **90**
- $\sigma_z = 100 \text{ MPa}$

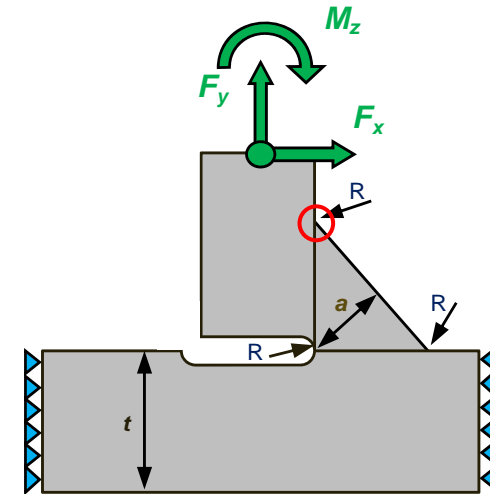


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	F_y	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	N	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	200	0.05	630	167	24	94-98		100-101 102-104 ¹⁾	102-103
5	500			165	24				
10	1000	0.3	320	126	36		98		
				134	38		98		
20	2000	1.0	225	121	49		102		
				128	51				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 3: Einseitige Kehlnaht - M_z

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **90**
- $\sigma_b = 100 \text{ MPa}$

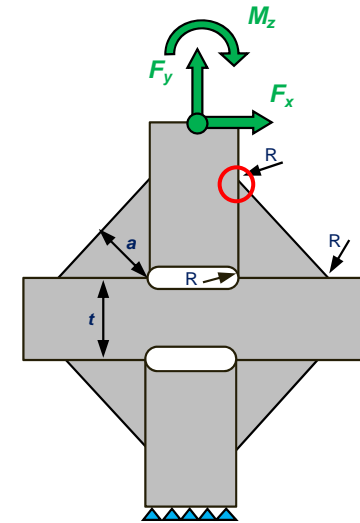


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	M_z	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	Nmm	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	67	0.05	630	377	54	99-101		101-102 105-110 ¹⁾	112-113
5	417			522	75				
10	1667	0.3	320	302	85		103		
				371	104		103		
20	6667	1.0	225	265	106		112		
				318	127				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 4: Kreuzstoss mit Kehlnaht - F_x

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **90**
- $\sigma_b = 120 \text{ MPa} / \tau_s = 10 \text{ MPa}$

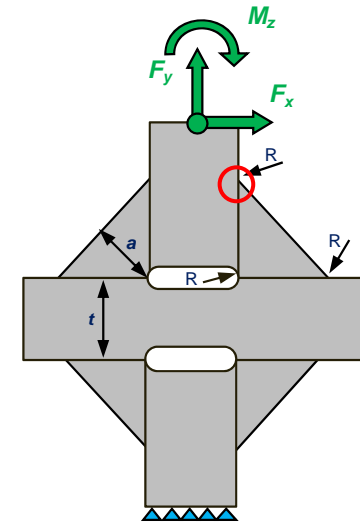


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	F_x	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	N	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	200	0.05	630	364	52	119-120		119-120 120-128 ¹⁾	132-133
5	500			503	72				
10	1000	0.3	320	288	81		107		
				357	101		107		
20	2000	1.0	225	245	98		122		
				304	122				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 4: Kreuzstoss mit Kehlnaht - F_y

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **90**
- $\sigma_z = 100 \text{ MPa}$

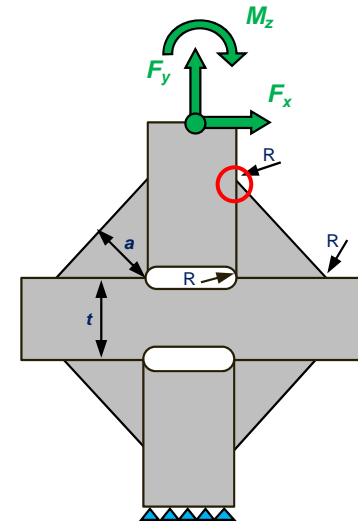


Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	F_y	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	N	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	200	0.05	630	450	65	97-101		111 121-126 ¹⁾	115-117
5	500			616	88				
10	1000	0.3	320	357	101		105		
				439	124		105		
20	2000	1.0	225	311	124		120		
				376	150				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Modell 4: Kreuzstoss mit Kehlnaht - M_z

- Strukturspannungsmodell ohne Wurzelfreistellung und ohne Radien
- FAT-Klasse für Strukturspannung: **90**
- $\sigma_b = 100 \text{ MPa}$



Geometrie			Kerbspannung			Strukturspannung			
t	M_z	R	FAT	σ_K	σ_S	Hot-Spot	Haibach	ASME	CAB
mm	Nmm	mm		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2	67	0.05	630	294	42	99-100		98-99 100-105 ¹⁾	109
5	417			390	56				
10	1667	0.3	320	225	63		101		
				278	78		101		
20	6667	1.0	225	193	77		107		
				238	95				

¹⁾ aus Kerbspannungsmodell

Erkenntnisse

- *Beim Kerbspannungsmodell streuen die Ergebnisse für den Referenzradius $R1$ stark. Die kleineren Radien $R0.3$ und $R0.05$ unterschätzen die Spannungen meist massiv.*
- *Die Strukturspannungskonzepte können die Kerbwirkung der verschiedenen Referenzradien gut „herausfiltern“.*
- *Die Strukturspannungskonzepte bilden die analytischen Werte meist innerhalb $\pm 10\%$ ab. Nur vereinzelt liegt die Streuung bei $\pm 20\%$.*
- *Die CAB-Methode liefert im Vergleich durchwegs konservative Werte.*
- *Erfolgt die Innenlinearisierung im Kerbspannungsmodell ist die Spannung immer konservativer, als jene aus dem Modell mit Fase (Widerspruch zum erst gezeigten Beispiel).*
- *Wird die Schweissnaht NICHT modelliert, liefern sämtliche Strukturspannungskonzepte die Nennspannung auf 1 MPa genau.*