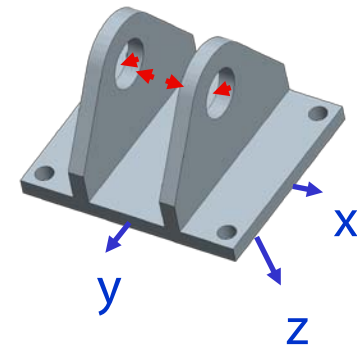
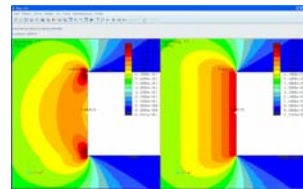
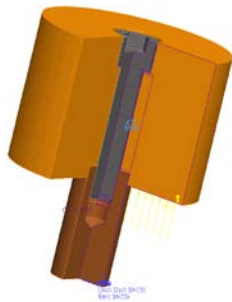


Die Finite Elemente Methode (FEM)
gibt es seit über 50 Jahren

Aber es gibt bis heute kein Regelwerk
oder allgemein gültige Vorschriften/Normen
für die Anwendung von FEM-Analysen!

Es gibt nur sehr vereinzelt Empfehlungen
für FEM-Analysen von Verbindungen –
kaum einer hält sich daran!

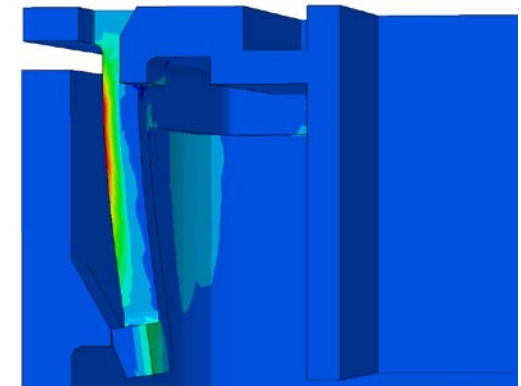
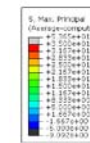
Simulationen in der Verbindungstechnik - ein Überblick



Dr. Stefan Reul, PRETECH GmbH

Diskussionspunkte

- » Anforderungen an Verbindungen
- » Verbindungen
- » Fügevorgang
- » Modellierungspraxis
- » Beispiel Verschraubung
- » Beispiel Klebverbindung
- » Beispiel Schweißung
- » Thesen zu Simulationen in der Verbindungstechnik

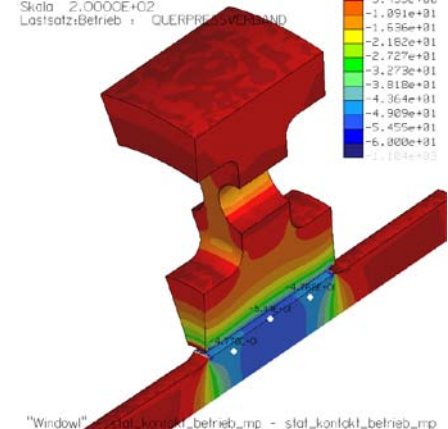
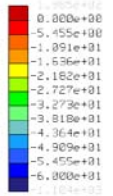


Spannung RR (CSO ; WELLE)
(N / mm²)

Verformt

Skala 2,0000E+02

Lastsatz:Betrieb : QUERPRESSVERBAND

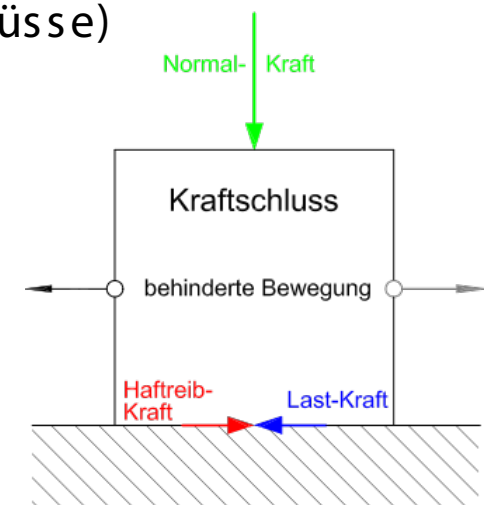
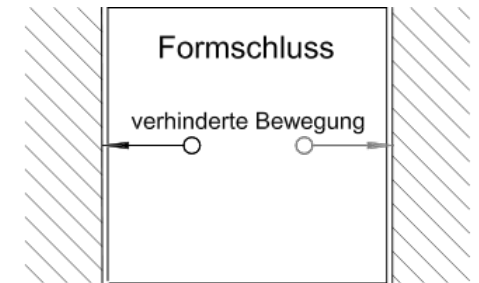


Anforderungen an Verbindungen

- » Mechanisch (sicherheitsrelevant):
 - Statische Festigkeit
 - Betriebsfestigkeit
 - Steifigkeit
 - Duktilität
 - Wärmedehnung
- » Elektrisch:
 - Leitfähigkeit
 - Isolierend
 - Magnetisch
 - Elektrostatisch
 - Thermoelektrisch
- » Thermisch:
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Wärmekapazität
- » Optisch:
 - Wenig Dämpfung
 - Spiegelnd
- » Akustisch:
 - Dämpfend
 - Resonanz
 - Reflektierend
- » Chemisch:
 - Korrosion

Verbindungstechnik I

- » Verbindungstechnik beschreibt die zum Fügen von Einzelteilen angewendeten Methoden
- » In der Regel handelt es sich um feste Verbindungen
- » Verbindungen, die Beweglichkeit zwischen Teilen herstellen, sind Gelenke
- » Verbindungen sind z.B.
 - Lösbar (u.a. Schraubverbindungen, Stecker, Klettverschlüsse)
 - Nicht lösbar (u.a. Schweißungen, Klebungen)
- » Wirkprinzipien:
 - Formschluss
 - Kraftschluss
 - Stoffschluss



Verbindungstechnik II

» Kraftschluss:

- Normalkraft überträgt durch Reibung tangential Last
- Reibung meist zwischen 0,01 (Eis) bis 0,5 (Reifen)



» Stoffschluss (nicht lösbar; lösbar nur durch Zerstörung):

- Schweißung
- Lötung
- Klebung



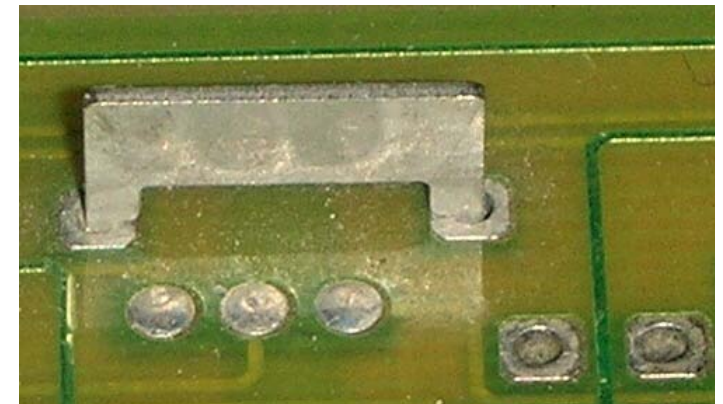
Verbindungstechnik III

- » Beispiel: Verbindung einer Schiene mit einer Schwelle
 - Formschluss quer zur Schiene
 - Kraftschluss in Schienen-Richtung
 - Formschluss in den Schraubverbindungen
 - Kraftschluss zusätzlich durch Vorspannung der Federringe
 - Die vertikale Radlast wird direkt per Druck in die Schwelle übertragen
 - Die Verbindung ist also nur für die Längs- und Querkräfte ausgelegt



Verbindungstechnik IV

- » Elektrische Verbindungen, lösbar:
 - Stecker
 - Lüsterklemme
 - Kabelschuh (verschraubt)
- » Elektrische Verbindungen, bedingt lösbar:
 - Lötung
 - Drahtwickeltechnik
 - Schneidklemmen, Einpresstechnik
- » Elektrische Verbindungen, unlösbar:
 - Schweißung
 - Bonden



Fügen

- » Fügen nach DIN 8593 ist in der Fertigungstechnik der Verbindungsprozess von Bauteilen
- » Fügeprozesse/-vorgänge sind in Analogie zu den Verbindungen:
 - Zusammensetzen / Einschnappen -> u.a. Schnapp-Verbindung
 - Füllen / Beschichten -> u.a. Beschichtung
 - An- und Einpressen -> Pressverband
 - Umformen / Krimpen / Falzen -> u.a. Klemmverbindung
 - Schweißen (u.a. MIG/MAG, Laser) -> Schweißung
 - Löten (u.a. Weich- und Hartlöten) -> Lötung
 - Schrauben -> Verschraubung
 - Kleben /Laminieren -> Klebung / Laminat
 - Nageln / Nieten -> Nietung

Was folgt daraus für die Simulation ?

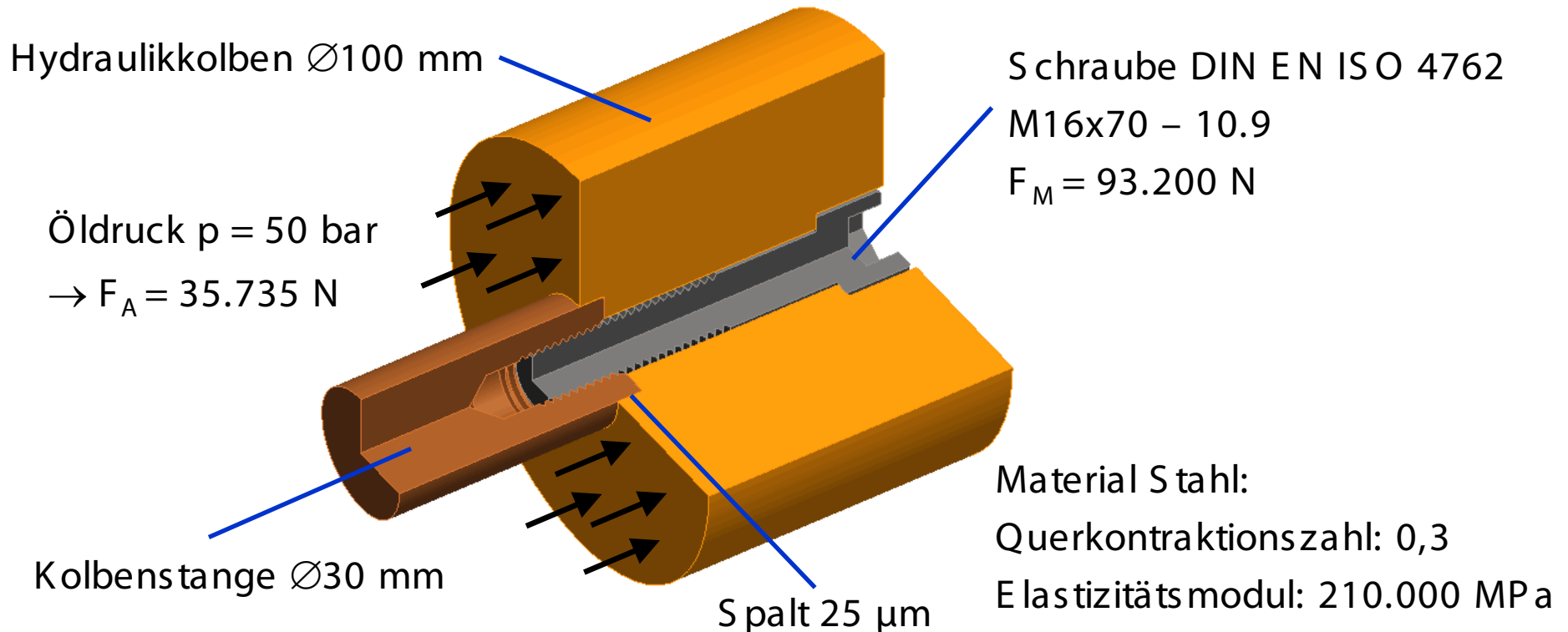
- » Fügeprozesse:
 - Sind immer transient zu simulieren
 - Müssen alle wesentlichen physikalischen Vorgänge berücksichtigen
 - Also z.B. mechanische, thermische, elektrische, chemische Prozesse
 - Führen – mehr oder weniger - zu Eigen- bzw. Vorspannungen und Verzug
- » Verbindungen:
 - Werden im Betrieb statisch und/oder dynamisch belastet
 - Belastungen z.B. Kräfte, Vibrationen, Stöße, Wärmelasten, Korrosion
- » Simulationsmodelle können dadurch u.a.
 - Sehr komplex sein
 - Viele Einflussparameter haben
 - Bewertung der Modelle und Ergebnisse kann sehr schwierig sein

Derzeitige Modellierungspraxis

- » Verbindungen / Fügestellen werden oft „ideal verschweißt“ oder als Kontakt (kraftschlüssig) behandelt
- » Beliebt sind auch idealisierte Verbindungen wie „Balkenspinnen“ und Gelenke
- » D.h. Effekte wie Vorspannungen und Verzug werden selten oder gar falsch berücksichtigt und sind Gegenstand der Forschung
- » Modellierung nach Regelwerken ist selten, da oft nicht vorgeschlagen, zu komplex oder unbekannt
- » Es ist sehr schwer den Fehler durch ungeschickte Verbindungsmodellierung für die jeweils interessierenden Modellbereiche abzuschätzen
- » Z.B. können Verformungen sehr realitätsnah, die Lebensdauerabschätzungen aber um Größenordnungen falsch sein

Vergleichs-Beispiel Verschraubung

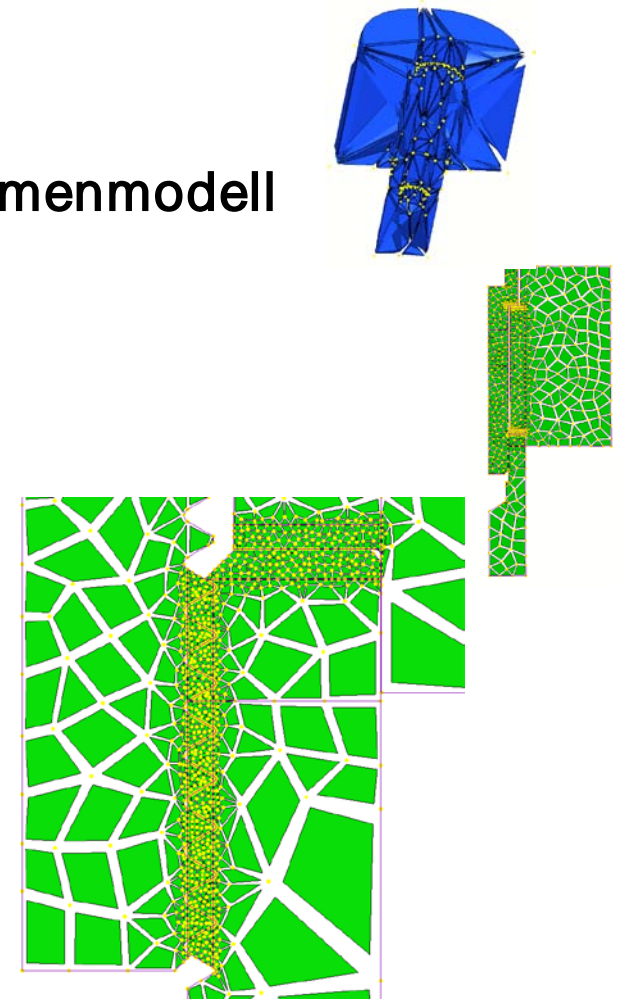
- » Standardverschraubung mit zentrischer Lasteinleitung in den Flansch (Berechnung nach VDI 2230, Beispiel 8.1*)



* H.Wittel, D.Jannasch, J.Voßiek, Roloff/Matek: Maschinenelemente Normung Berechnung Gestaltung, 18. Auflage

Modellierungs-Varianten

- » FE-Systeme: **MECHANICA** und **ABAQUS**
- » Modelltyp: **2D-Achsensymmetrie** und **3D-Volumenmodell**
- » Gewindeflanken: **mit** und **ohne**
- » Kontakt: **mit** und **ohne**
- » Reibung: **ohne**, mit ($\mu = 0,12$)
und **unendliche Reibung**
- » Spezielle Schraubenelemente:
Schraubenfeature in MECHANICA
- » Netz MECHANICA: **Standard-Einstellungen**,
nur in Kontaktbereichen **fein**
- » Netz ABAQUS: **grob** und **fein**



Modell-Vergleiche Verschraubung

	VDI 2230	Modell-Varianten								
		1 MECH	2 MECH	3 MECH	4 MECH	5 MECH	6 ABA	6a ABA	7 ABA	7a ABA
F_M, N	92.300	92.302	92.304	92.298	92.303	92.296	92.300	92.300	92.301	92.301
F_A, N	35.735	35.735	35.735	35.735	35.735	35.735	35.735	35.735	35.735	35.735
F_S, N	93.479	95.232	95.475	95.415	95.239	95.956	95.425	95.416	94.940	94.724
F_{SA}, N	1.179	2.930	3.171	3.117	2.936	3.660	3.125	3.116	2.639	2.423
Φ_n	0,033	0,082	0,089	0,087	0,082	0,102	0,087	0,087	0,074	0,068

$F_{SA} = \Phi_n \cdot F_A$: Schraubenzusatzkraft

Φ_n : Kraftverhältnis Phi

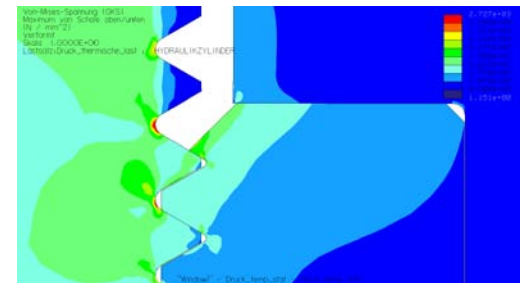
F_S : gesamte zulässige Schraubenkraft

F_M : eingestellte Montagekraft

F_A : gewünschte Betriebslast

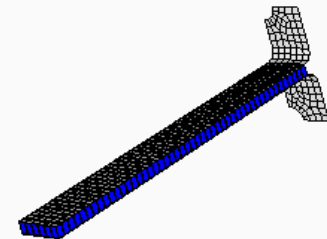
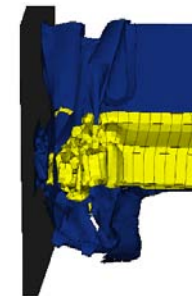
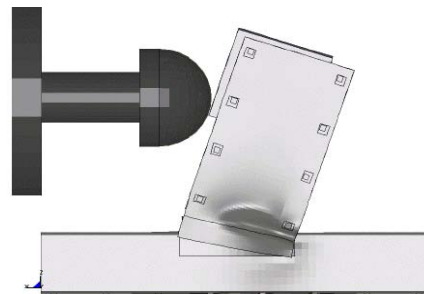
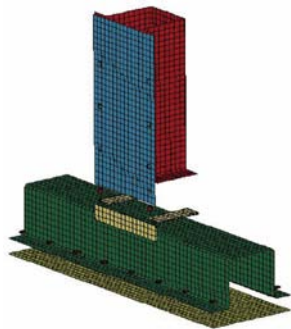
Fazit Verschraubung

- » Wie das Beispiel zeigt, sind die Näherungslösungen aus den Normen und Regelwerken nur brauchbar für dort abgedeckte Standardfälle und können zu Unter-Dimensionierungen führen !
- » Schraubenberechnungen auf der Basis der FE-Methode (FEM) sind im Gegensatz dazu sehr zuverlässig, besonderes wenn keine Messungen oder Erfahrungswerte vorliegen
- » Kenngrößen für die Berechnung einer Schraubenverbindung, die bisher abgeschätzt werden mussten, können mit der FE-Methode wesentlich präziser abgebildet werden
- » Es ist jedoch zu beachten, dass für die Modellierung, Analyse und Bewertung von Schraubenverbindungen auf der Basis der FEM zurzeit keine allgemeingültige - auch experimentell abgesicherte - Vorgehensweise existiert



Stand der Technik Kleerverbindungen

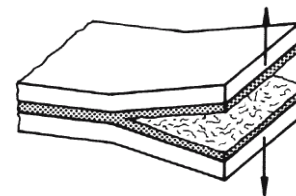
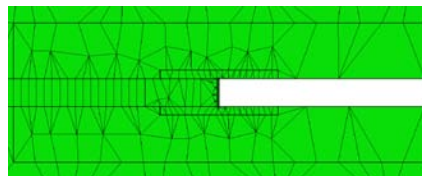
- » Es wurden bereits vielfache Untersuchungen zur Berechnung von Kleerverbindungen durchgeführt
- » Oft werden „Grenzflächenelemente“ eingesetzt (Idealisierung)
- » Meist wird ein tatsächlicher Bruch der Klebung simuliert (Nicht-Linearitäten, teure FEM-Systeme, eher wissenschaftliche Betrachtung)
- » „Einfache“ Lösungen für die Bewertung vor der Rissausbreitung mit der FEM stehen derzeit noch nicht zur Verfügung



Quelle: A. Matzenmiller, F. Burbulla: Kontinuumsmechanische Modellierung von Stahlblechklebverbindungen für die FE-Crashanalyse, LS-Dyna Anwenderforum, Bamberg 2008

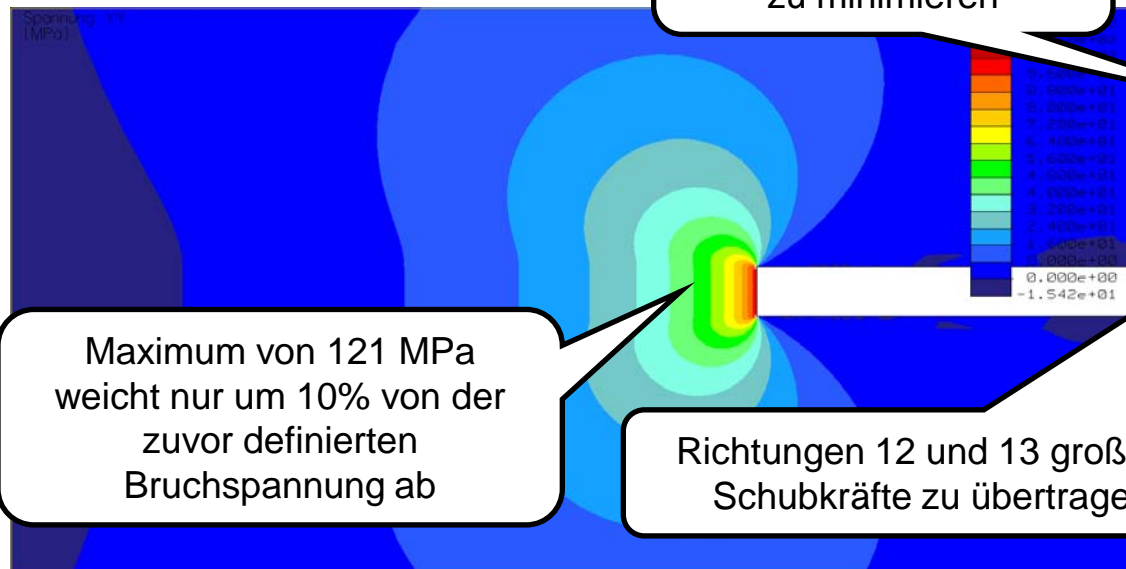
Ergebnisse Kleber-Modell 3

- » Die Kerbspannungen resultieren aus dem dreidimensionalen Spannungszustand in der Klebschicht (Spannungen gibt es sowohl senkrecht, als auch parallel zur Klebschicht)
- » In der Literatur wird oftmals vereinfacht davon ausgegangen, dass die relevanten Kräfte in der Klebschicht über Spannungen senkrecht zur Klebschicht und über Schubspannungen übertragen werden
- » Um dies mit Standard-Finiten Elementen zu erreichen, muss mit orthotropem Material gearbeitet werden



Ergebnisse Kleber-Modell 3

» Unten sind die y-Spannungen dargestellt, die sich mit den rechts dargestellten orthotropen Materialeigenschaften für die Klebschicht ergeben



Richtungen 2 und 3 klein um Singularitäten zu minimieren

Maximum von 121 MPa weicht nur um 10% von der zuvor definierten Bruchspannung ab

Richtungen 12 und 13 groß um Schubkräfte zu übertragen

Elastizitätsmodul		Querkontraktionszahl	
E1	3430 MPa	Nu21	0
E2	0.1 MPa	Nu31	0
E3	0.1 MPa	Nu32	0

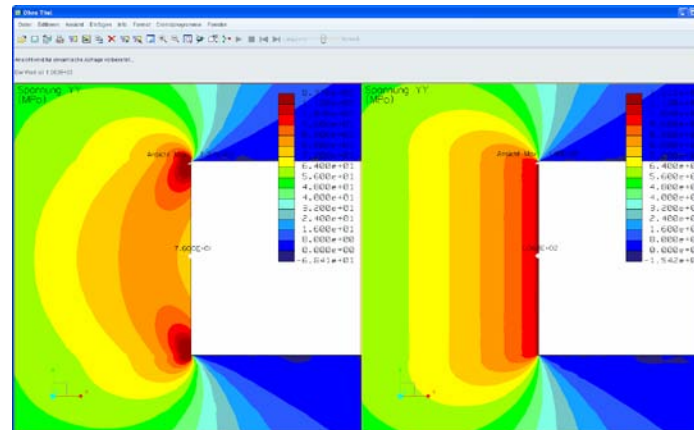
Schubmodul		Thermalausdehnungskoeffizient	
G12	1346 MPa	a1	0 /C
G13	1346 MPa	a2	0 /C
G23	0.1 MPa	a3	0 /C

Richtung 1 senkrecht zur Klebschicht. Hoher Wert um senkrechte Kräfte zu übertragen.

Alle Querkontraktionszahlen klein um Singularitäten zu minimieren

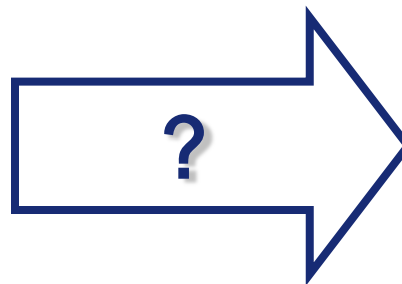
Ergebnisse Kleber-Modell 3

- » Der Vergleich der Ergebnisse mit isotropem / orthotropem Material zeigt, das die Berechnung mit orthotropem Material Vorteile birgt:
 - Sowohl im Mittelpunkt der Klebschicht als auch an der Kerbe sind die Berechnungsergebnisse konvergent
 - Die Ergebnisse von Mitte und Kerbe unterscheiden sich nicht sehr stark (14 %; vergleiche: bei isotropem Material sind es 323 % !)
- » Daraus folgt, das mit orthotropem Material auch bei geringerer Feinheit der Vernetzung gute Ergebnisse ermittelt werden können



Problemstellung Schweißung

- » Schweißnähte müssen gegenüber nicht geschweißten Bereichen gesondert behandelt werden:
 - Veränderungen des Materialgefüges
 - Eigenspannungen
 - Geometrie kann nur vereinfacht berücksichtigt werden

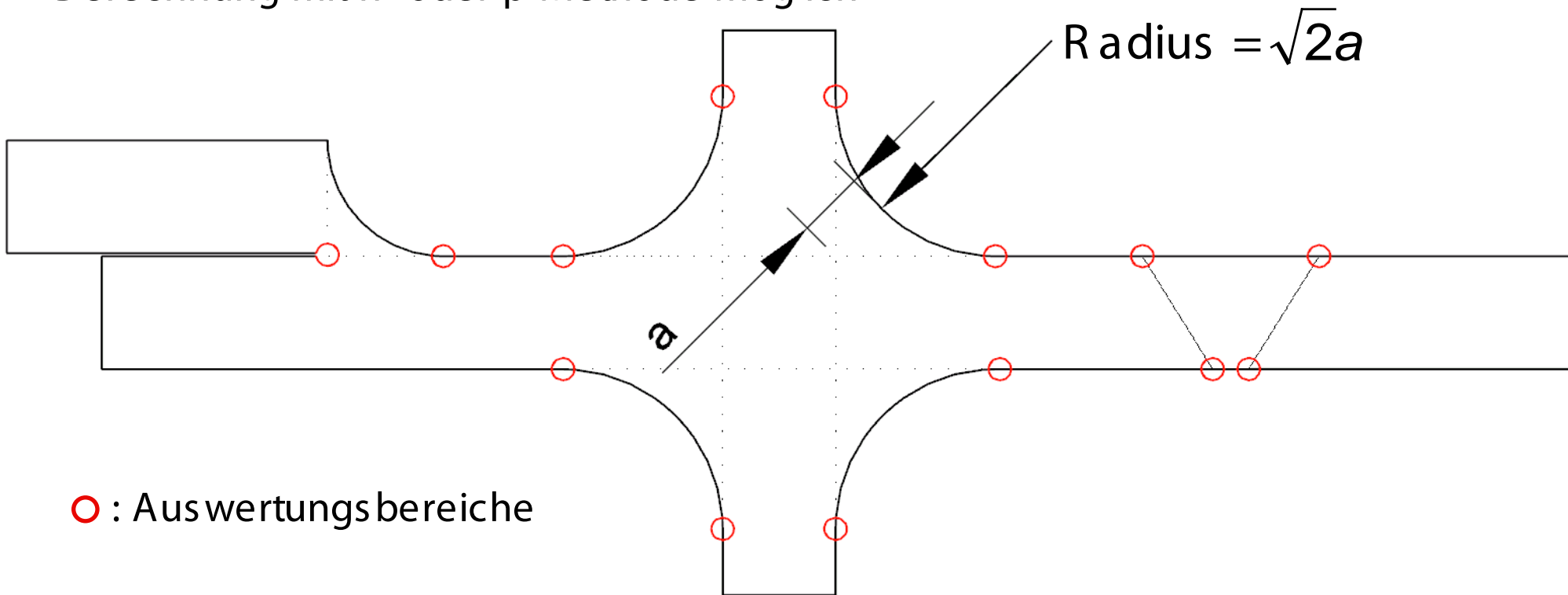


Regelwerke Schweißungen

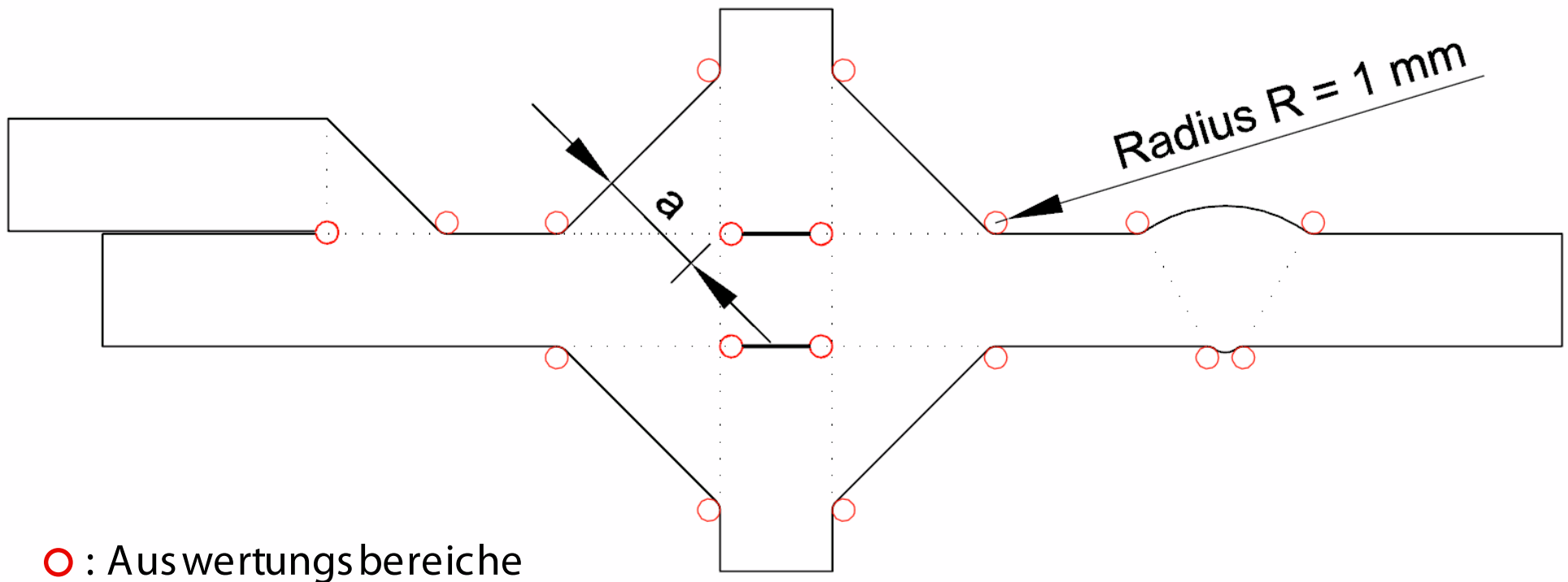
- » U.a. folgende Regelwerke geben Empfehlungen zur Bewertung von Schweißnahtspannungen:
 - FKM-Richtlinie
 - AD-Merkblätter 2002 (Druckbehälter)
 - DIN 18800-1 (Krane, Stahltragwerke)
 - DIN 15018-1 (Stahlbauten)
- » Hier betrachtet: FKM-Richtlinie

Strukturspannungsmethode

Berechnung mit h- oder p-Methode möglich



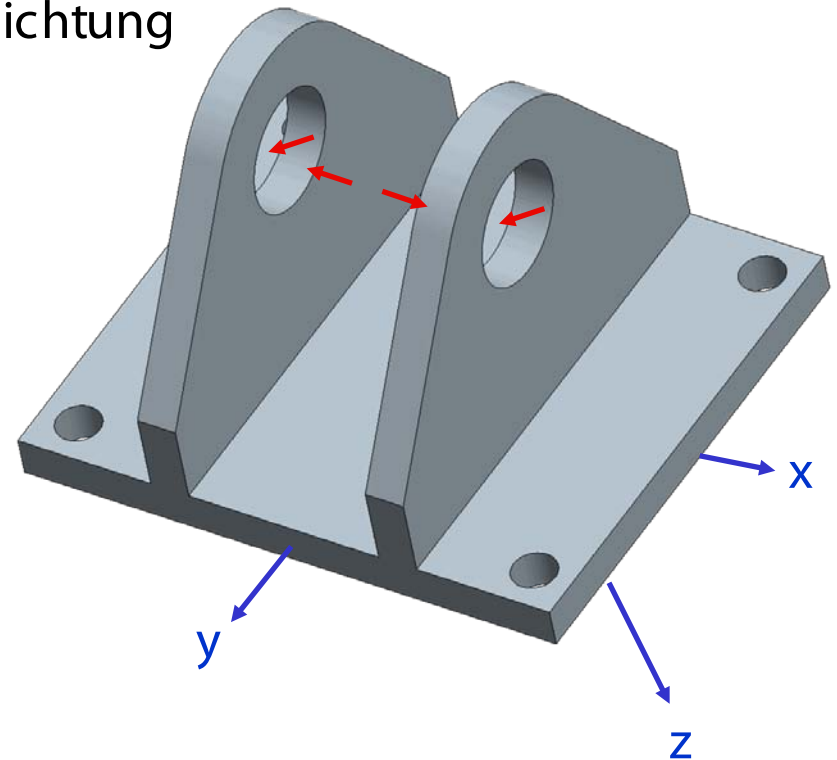
Kerbspannungsmethode



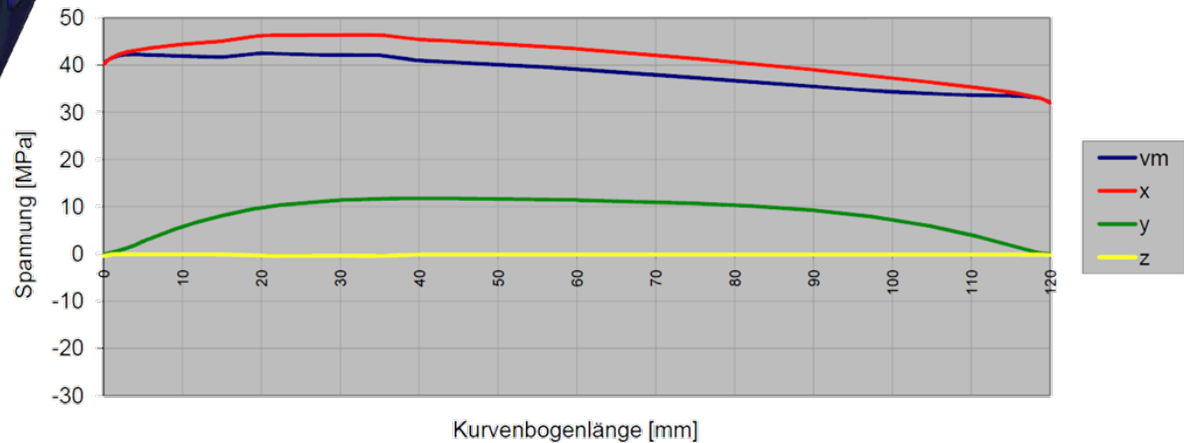
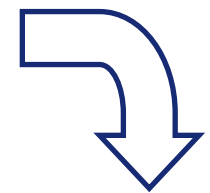
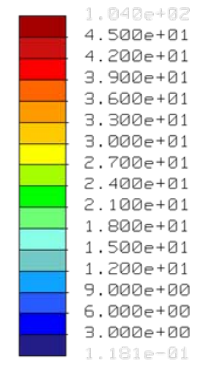
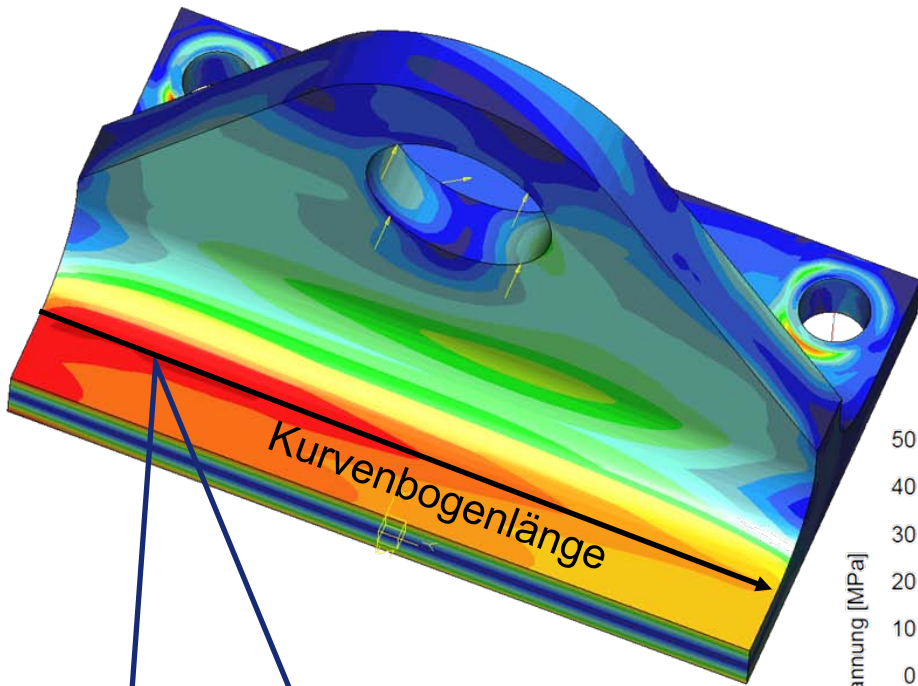
R ist immer 1 mm, wenn der reale Kerbradius $< 1 \text{ mm}$ ist!

Beispiel-Modell mit Kehlnähten

- » Jeweils 1 kN Lagerlast in -z- und +y-Richtung
- » Jeweils 1 kN axial auf Bohrung
- » Blechstärke 10 mm
- » Kehlnahthöhe $a = 10$ mm
- » Material Stahl
- » Halbmodell wird genutzt
- » Soll Zyklenzahl (schwellende Last) von $1e6$ ertragen können



S trukturspannungskonzept

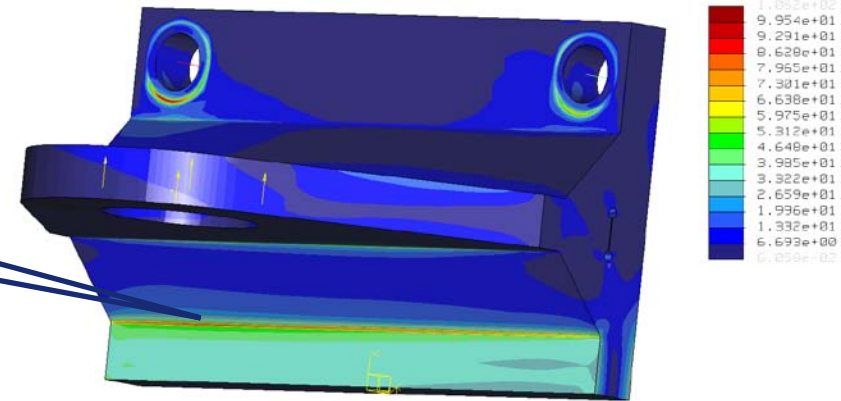


In diesem Übergang wird ausgewertet und treten auch die maximalen Spannungen auf

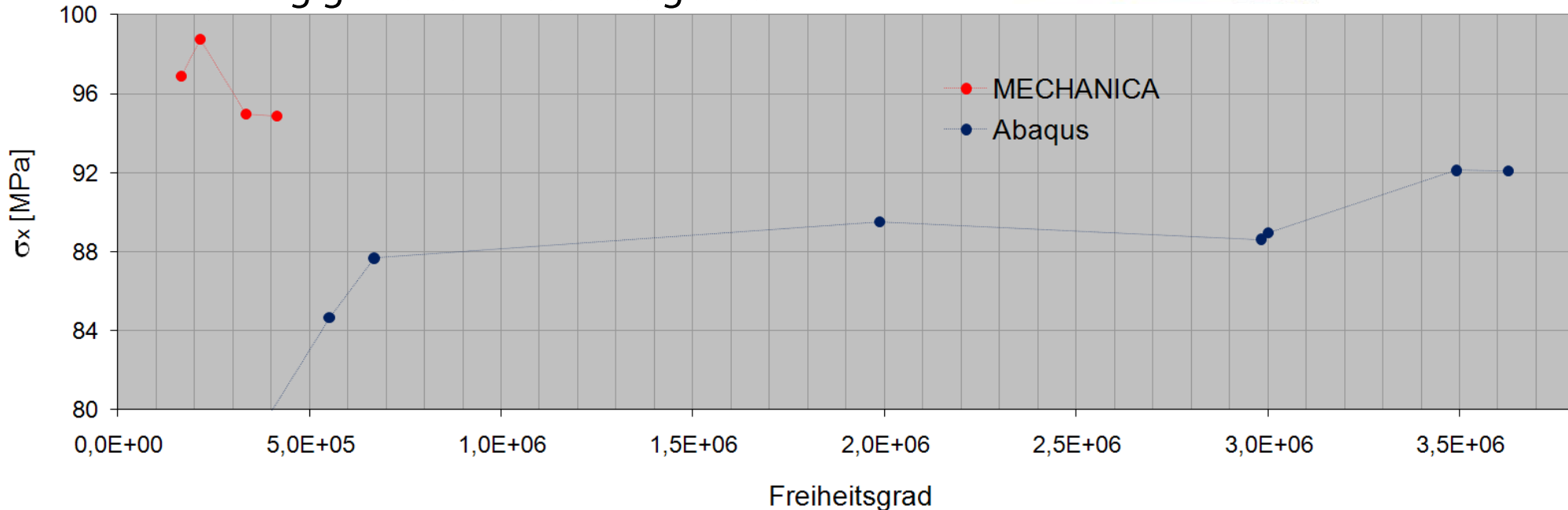
$$\sigma_x = 46,2 \quad \sigma_y = 11,7 \quad \tau = 23,4 \text{ MPa}$$

Kerbspannungskonzept

Hier ebenfalls maximale Spannungen in diesem Übergang



» Vergleich MECHANICA/Abaqus in Abhängigkeit von Freiheitsgraden



Bewertung der Spannungen

- » Bewertung nach Auslastungsgrad a :
 - $a = \frac{\text{Aufretende Spannungsamplitude}}{\text{Zulässige Spannungsamplitude}}$ muss kleiner 1 sein !
- » Strukturspannungskonzept:
 - $a_{GH,SS} = 0,602$ (Gestaltänderungsenergie-Hypothese)
- » Kerbspannungskonzept:
 - $a_{GH,KS,Mech} = 0,724$ (MECHANICA)
 - $a_{GH,KS,Abaq} = 0,693$ (Abaqus)

Damit ist Nachweis mit allen Modellen erbracht !

Fazit Schweißungen

- » Mit der H- und der P-Methode können präzise Aussagen zu den Schweißspannungen gewonnen werden, wenn die Regeln für die Erstellung der Geometrien eingehalten werden
- » Die Nennspannungsmethode ist für Handrechnungen entwickelt worden und ist unsicher
- » Die Kerbspannungsmethode ergibt die konservativsten Ergebnisse, ist aber wesentlich aufwändiger als die Strukturspannungsmethode und ist bei großen Modellen mit der H-Methode praktisch nicht durchführbar
- » Mit Abaqus ist der Zeitaufwand wesentlich höher, um mit MECHANICA vergleichbare Ergebnisse zu erhalten (bei automatischer Vernetzung mit Tetraedern würden noch ungenauere Ergebnisse errechnet werden)
- » Bester Kompromiss ist die Strukturspannungsmethode mit MECHANICA (-> „worst case“)
- » Die Strukturspannungsmethode kann auch für statische Fälle benutzt werden (Kerbspannungsmethode nur für dynamische)

Thesen zu Simulationen in der Verbindungstechnik

- » Es gibt nur sehr eingeschränkt Vorschriften in Regelwerken zur Verbindungs-Modellierung
- » Numerisch korrekt und physikalisch vollständig modellierte Verbindungen ergeben in der FEM sehr präzise Ergebnisse
- » Die Bewertung bezüglich der Tragfähigkeit oder der Betriebsfestigkeit ist nur teilweise möglich oder ist nicht genau genug
- » Es fehlen oft systematische Untersuchungen um zuverlässige Aussagen zu ermöglichen !
- » Einfache Modellierungen bzw. Unterstützungen durch Software-Codes nach Regelwerken für den Konstrukteur existieren nicht !
- » Hier gibt es einen erheblichen Forschungsbedarf im Rahmen der Virtuellen Produktentwicklung !

Fragen ?
Bemerkungen ?
Kritik ?

Danke !