safety and engineering consulting

Vergleich verschiedener Methoden zur Auswertung von Schweissnähten im Schienenfahrzeugbereich

MSc. Mech. Eng. Philippe Senn

CADFEM ANSYS SIMULATION CONFERENCE RAPPERSWIL 2023, 15.06.2023

INHALT

1. Normen im Schienenfahrzeugbau

2. Einleitung und Kontext

3. Vergleich verschiedener Methoden zur Auswertung von Schweissnähten

4. Schlussfolgerungen

5. Ausblick

SAECON SAGL
Seit 2015 in Montagnola - TI

Engineering
Produktentwicklung

R&D, FEM & CFD Analysen

Technische Dok.
CE Zertifizierung

Messungen & Tests Prototypen

Automatisierung
Softwareentwicklung

Kompetenz und Leidenschaft
2023: 12 Ingenieure und Techniker

NORMEN IM SCHIENENFAHRZEUGBAU

- Der Eisenbahnbereich untersteht eindeutigen Normen und Richtlinien sowohl was die Auslegung als auch was die Konstruktion von Schienenfahrzeugen betrifft; diese unterscheiden sich häufig von Land zu Land.

- Die **Europäische Norm DIN EN 12663** legt Mindestanforderungen an die Festigkeit von Wagen und zugehörigen besonderen Ausrüstungsgegenstände fest und soll eine einheitliche Grundlage für die Konstruktion von Wagenkästen schaffen:
  - **Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge;**
  - **Teil 2: Güterwagen;**

- Im Schienenfahrzeugbau findet man **Schweisskonstruktionen** praktisch in allen Bereichen; Für deren Auslegung sind verschiedene Normen mit unterschiedlichen Anforderungen im Schienenfahrzeugbau zu beachten. **Die Basis bildet die EN 12663**, allerdings enthält diese keine konkrete Festigkeitswerte von Schweissverbindungen.

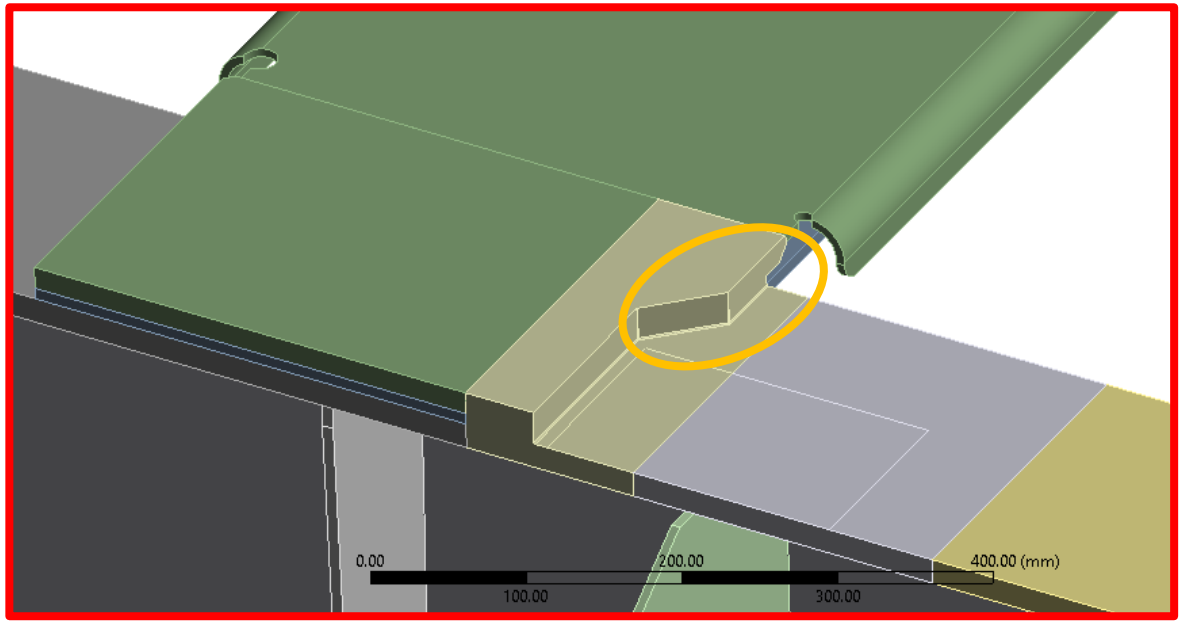
NORMEN IM SCHIENENFAHRZEUGBAU

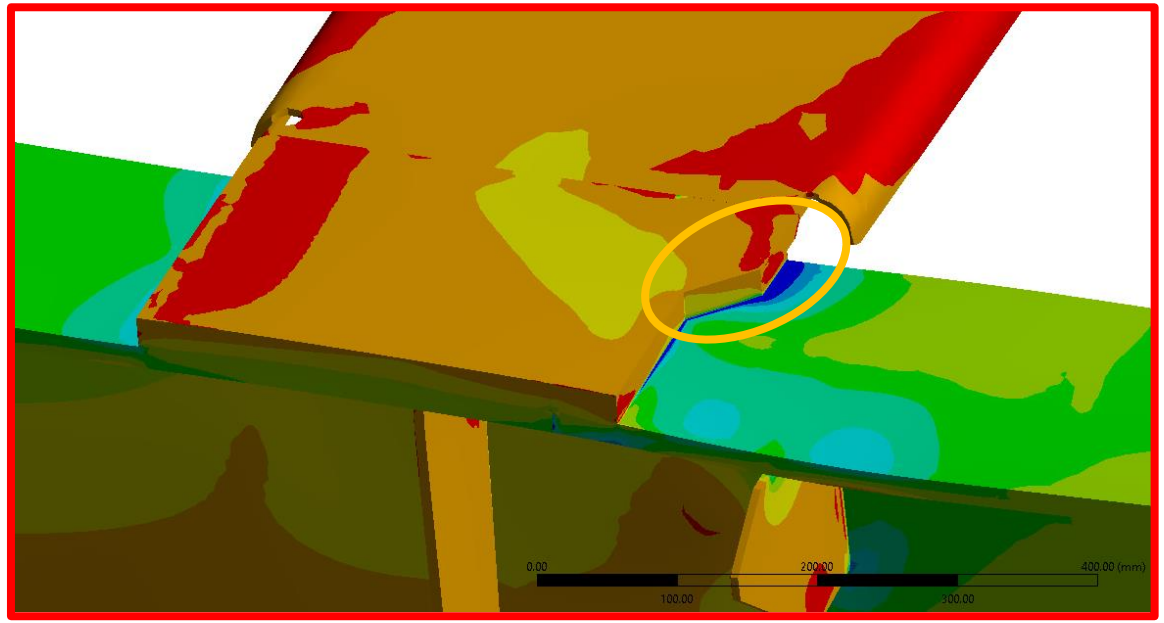
- Aus diesem Grund werden für die Auslegung von Schweissnähten häufig **zusätzliche Richtlinien** beigezogen, **welche** nicht selten **vom Bestimmungsland des Schienenfahrzeugs abhängen**. Hier einige Beispiele:
  - **IIW** (International Institute of Welding): internationaler technisch-wissenschaftlicher Verband für Schweissen (FAT Klassen), Löten und verwandte Technologien;
  - **EUROCODE 3:** Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit, die Tragfähigkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Stahl;
  - **ERRI** (European Rail Research Institute bis 2004): Festigkeitswerte für Schweissnähte (ERRI B 12/RP 17 und in ERRI B 12/RP 60)
  - **DVS** (Deutscher Verband für Schweissen): Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweissverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau (DVS 1612);
  - **FKM** (Forschungskuratorium Maschinenbau): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen;

EINLEITUNG UND KONTEXT

- **Ziel dieses Projekts** war die Evaluierung verschiedener Methoden zur Auswertung von Schweissnähten am Beispiel eines **Güterwagens, bei welchem Punkt und Streckenlasten neu ermittelt werden sollten**, aufgrund einer neuen Beladungskonfiguration.

- Folgende Auswertungsmethoden für Schweissnähte wurden untersucht und verglichen **(Ziel: Dauerfestigkeit in der Ermüdungsauswertung):**
  - **DVS 1612 (Nennspannungskonzept)**
  - **FKM (Strukturspannungskonzept, «Hot-Spot» Methode) => auch FKM inside ANSYS**
  - **FKM (Kerbspannungskonzept)**
  - **FKM (Effektivspannungskonzept)**



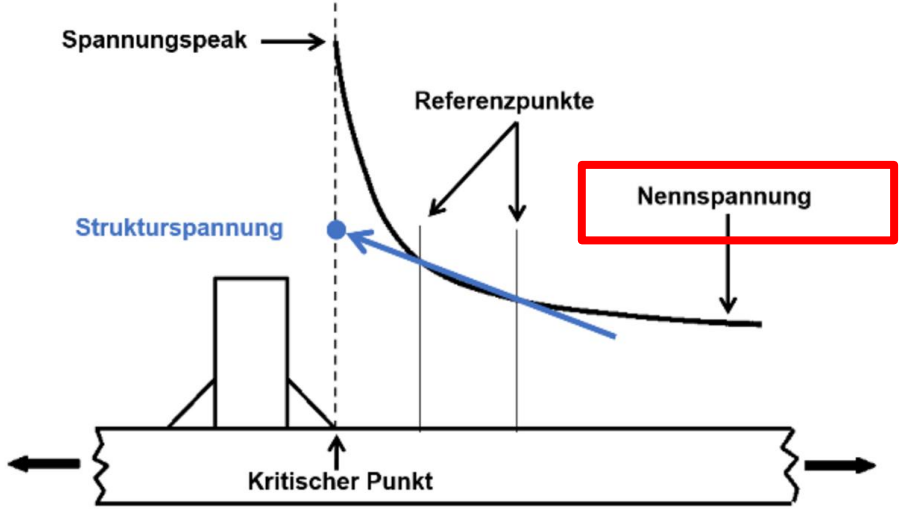


Güterwagen mit Zapfen und Anschlagplatten zur Sicherung der Container und Plattformen (Lasteinführung nach EN 12663-2)

DVS 1612 (Nennspannungskonzept)

- Die Spannungsauswertung nach DVS erfolgt über Nennspannungen die im Abstand **1t** zur Schweissnaht abgegriffen werden;
- Gut geeignet für die Auswertung von Schweissnähten im Grundträger des Wagens;
- Im Fall eines Steifigkeitssprungs, ist diese Methode **mit Vorsicht anzuwenden**, da eigentlich Strukturspannungen ausgewertet werden müssen.

DVS 1612, Nennspannungen

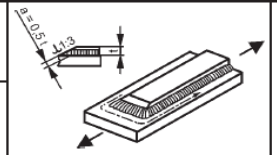
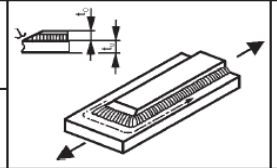
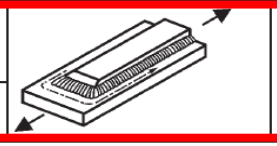


Quelle: https://www.cee.ed.tum.de/metallbau/forschung/stahlbau/

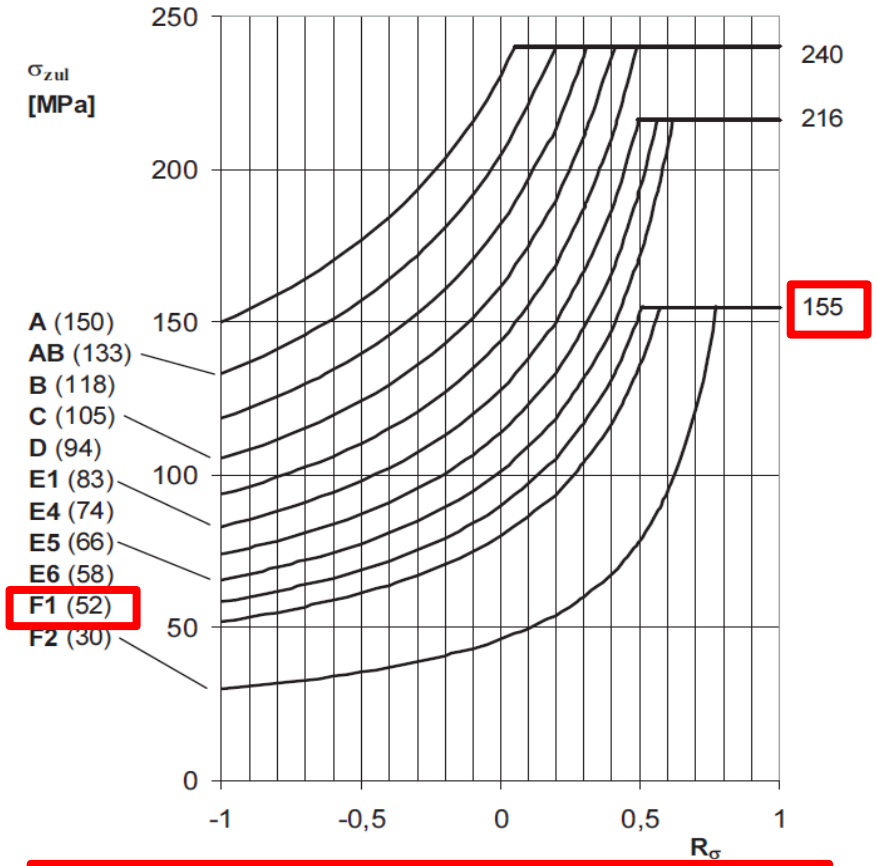
DVS 1612 (Nennspannungskonzept)

- Auswertung basierend auf bestimmten FAT-Klassen und Materialgrenzwerte (S355) welche direkt in der **DVS 1612** angegeben werden;
- **In gewissen Fällen Auswahl der FAT-Klasse nicht eindeutig!**

Tabelle B-4.1. Längsbeanspruchte durchlaufende Bauteile mit aufgeschweißter Gurtplatte.

Nr.	Stoß- und Nahtausbildung					Prüfart und -umfang	Schweißnaht-güteklasse nach DIN EN 15085-3	Kerb-falllinie	Bemerkungen
	Darstellung	Beschreibung	Nahtart	Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3	Nahtober-fläche bearbeitet				
4.1.1		Bauteil mit aufge-schweißter Gurtplatte, Kehlnähte und Gurt-platte an den Stirn-flächen bearbeitet	Kehlnaht bzw. Überlapp-naht	13e	ja	10% ZfP-O	CP B CP C1	E1+	höchstbeanspruch-te Stelle (Anrissort) im Nahtübergang
4.1.2						Sichtprüfung	CP C2	E1	
4.1.3		aufgeschweißte Gurt-platte und Kehlnähten an den Stirnflächen bearbeitet	Kehlnaht bzw. Überlapp-naht	13e	ja	10% ZfP-O	CP B CP C1	E5+	
4.1.4						Sichtprüfung	CP C2	E5	
4.1.5		aufgeschweißte Gurt-platte und unbearbeite-ten Kehlnähten	Kehlnaht bzw. Überlapp-naht	13e	nein	10% ZfP-O	CP B CP C1	F1+	
4.1.6						Sichtprüfung	CP C2	F1	

MKJ-Diagramm S355 Normalspannung



$$\sigma_{o,\,zul}(\kappa) = 150\ \text{MPa} \cdot 1{,}04^{-x} \cdot \frac{2}{1-\kappa} \qquad (5)$$

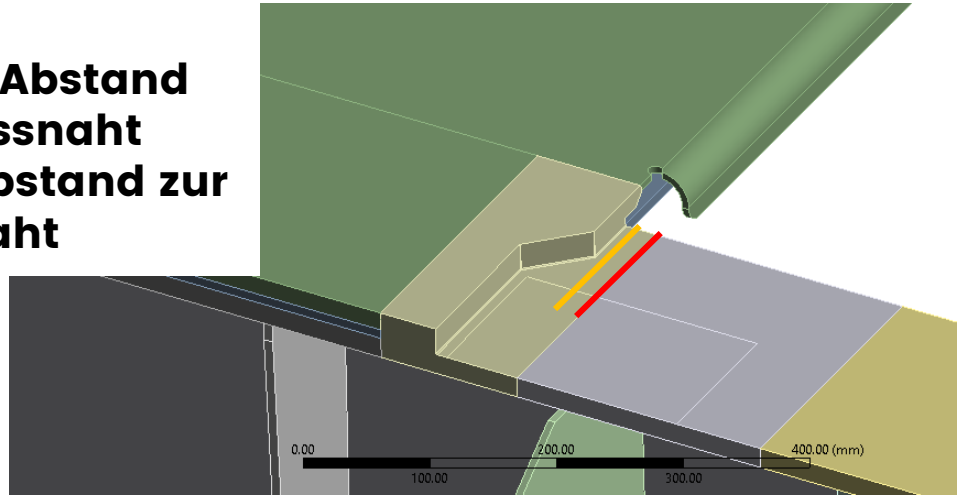
Im Druckbereich wird die zulässige Oberspannung (betragshöhere Spannung) durch die gleichen Werte wie im Zugbereich begrenzt.

FKM (Strukturspannungskonzept, «Hot-Spot» Methode)

- Auswertung der Spannungen in Abstand **0.4t** und **1t** zur Schweissnaht und dann Extrapolation der Spannungen mittels Hot Spot Methode (IIW);
- Gut geeignet an stellen wo Nennspannungskonzepte an ihre Grenzen stossen;
- **Hot Spot Methode ist nicht immer anwendbar (Nahtwurzel)**, da Pfade in bestimmten Abstand zur Schweissnaht benötigt werden!

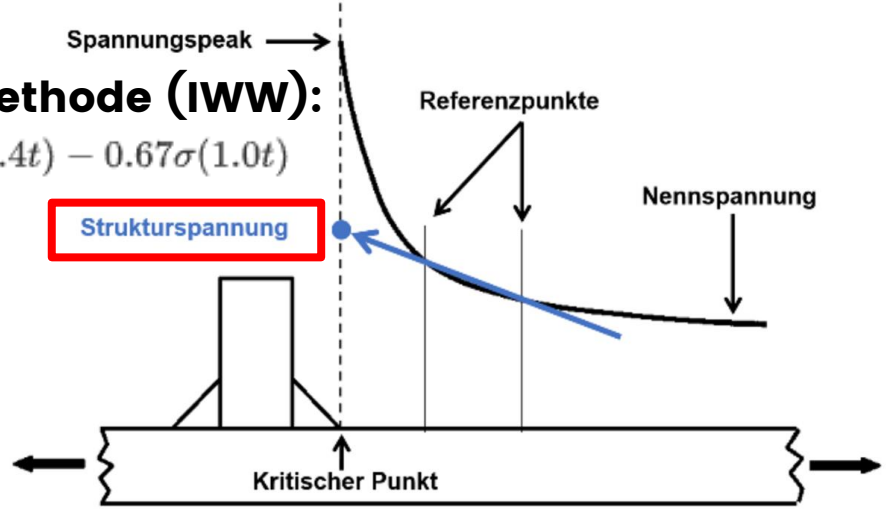
FKM, Strukturspannungen, Hot Spot Methode

Zwei Pfade:
1. Pfad 0.4t Abstand zur Schweissnaht
2. Pfad 1t Abstand zur Schweissnaht



Hot Spot Methode (IWW):

$$\sigma_{HS} = 1.67\sigma(0.4t) - 0.67\sigma(1.0t)$$



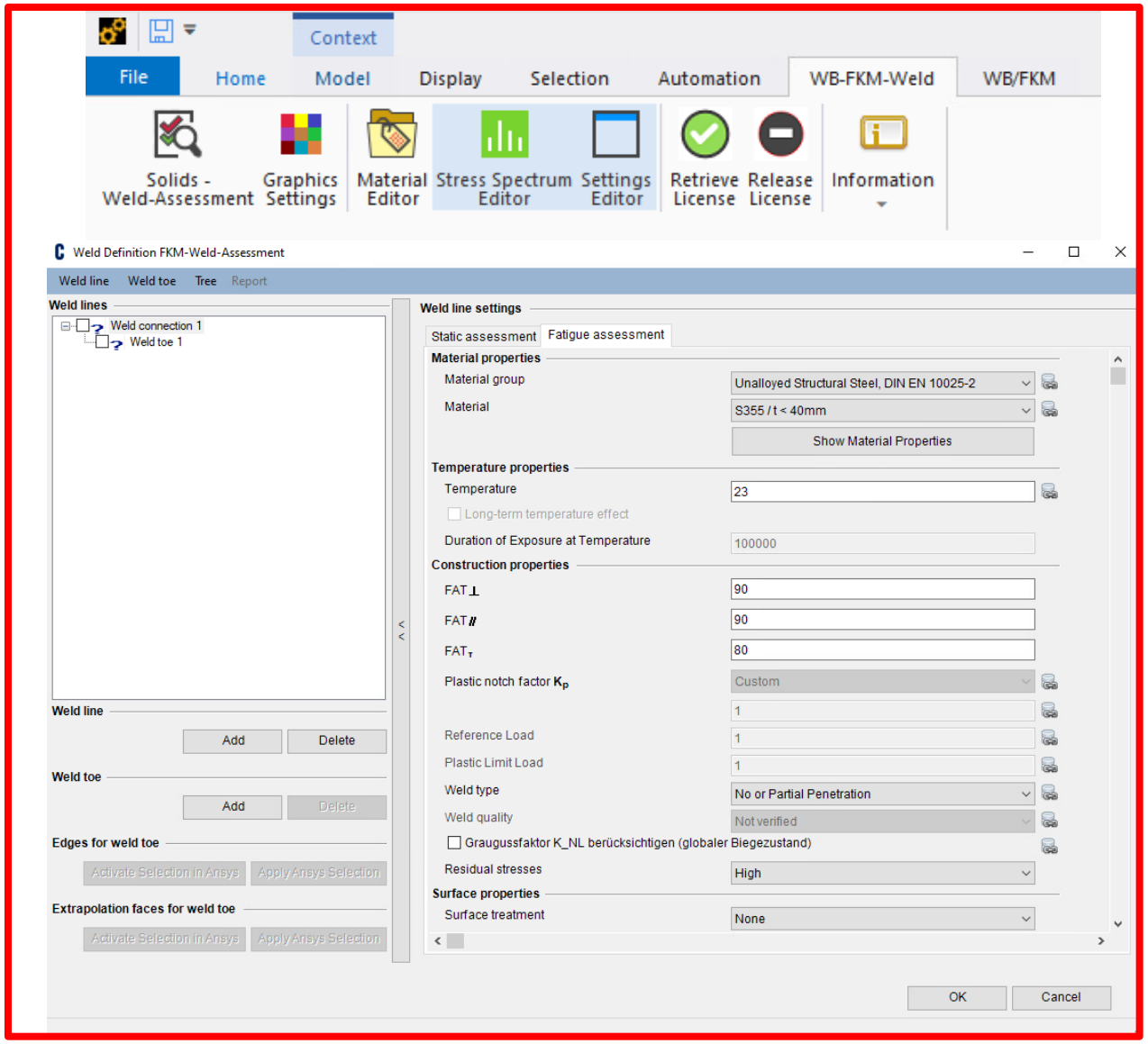
Quelle: https://www.cee.ed.tum.de/metallbau/forschung/stahlbau/

FKM (Strukturspannungskonzept, «Hot-Spot» Methode)

- **FKM INSIDE ANSYS von CADFEM**

- Möglichkeit zur vereinfachten automatischen Auswertung der Schweissnähte nach FKM mit Strukturspannungskonzept (Hot Spot);

- Erweiterbare FKM Materialdatenbank und Möglichkeit zur Auswertung von Schweissnähten und Basismaterial, sowohl statisch als auch Ermüdung direkt in ANSYS Mechanical.

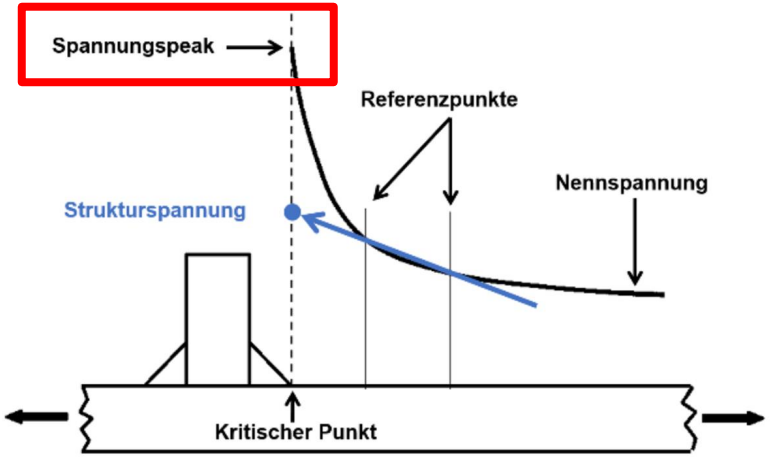


FKM (Kerbspannungskonzept)

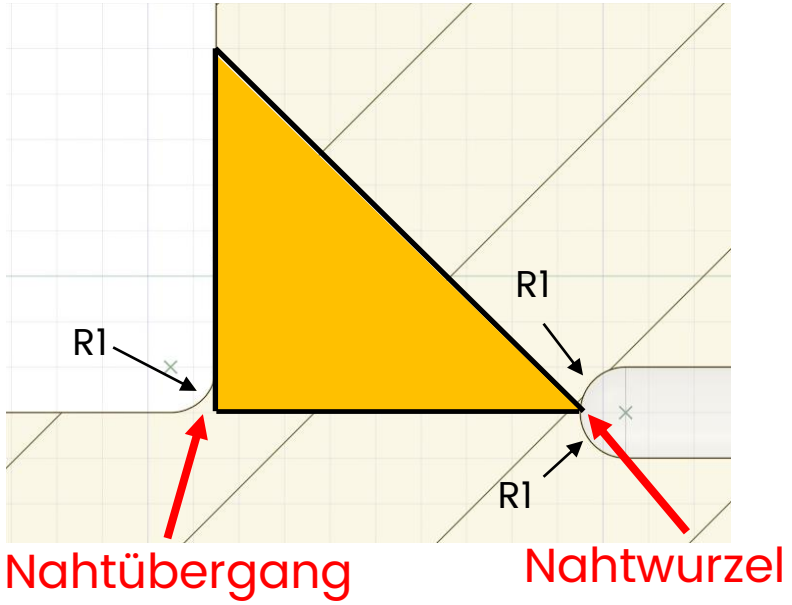
- Spannungsauswertung erfolgt direkt auf der Oberfläche am Nahtübergang und auch an der Nahtwurzel im Kritischsten Knoten der Vernetzung;

- **In Fällen, wo unbedingt eine Auswertung der Schweissnaht an der Nahtwurzel benötigt wird, kann nur das Kerbspannungskonzept angewendet werden, da es als einzige Methode dies ermöglicht;**

- Um Spannungssingularitäten auszuschliessen, sollte nach FKM, einen fiktiven **Radius von 1 [mm]**, sowohl an der Nahtwurzel als auch am Nahtübergang, im FE-Modell eingeführt werden.



Quelle: https://www.cee.ed.tum.de/metallbau/forschung/stahlbau/

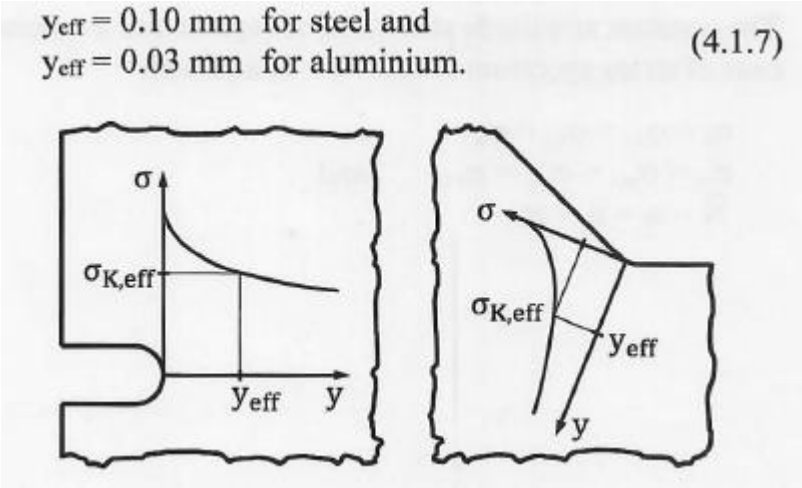


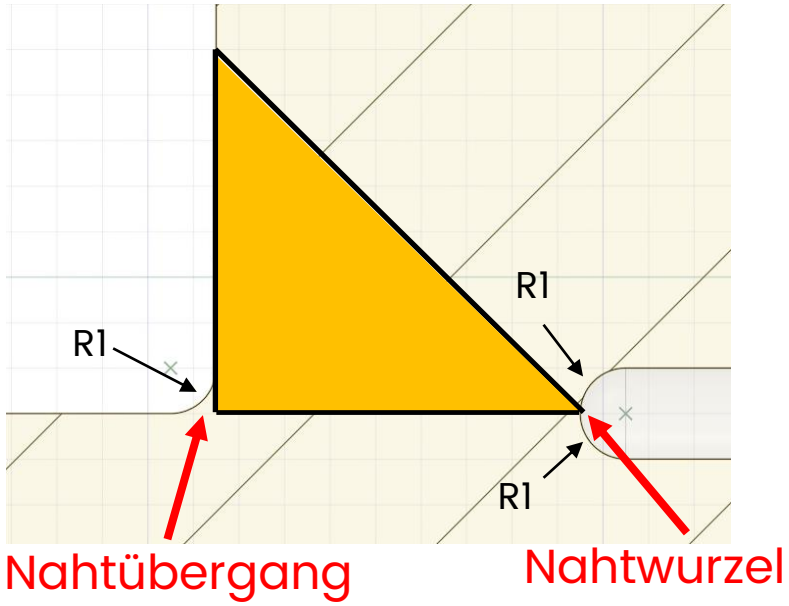
FKM (Effektivspannungskonzept)

- **Die Modellierung und Auswertung von Effektivspannungen wurde in der 7. Auflage der FKM (2020) hinzugefügt;**

- Diese erlaubt die Spannungsauswertung 0.1 [mm] unterhalb der Oberfläche, dabei wird aber eine sehr feine Vernetzung dieser Stelle benötigt;

- Die Modellierung und die Spannungsauswertung ist gleich wie bei dem Kerbspannungskonzept, allerdings wird ein **Kerbradius von 0.05 [mm]** empfohlen, falls keine abgesicherte Informationen über den realen Radius vorliegen.





Kerbspannungskonzept

- Auswertung der Kerbspannungen;
- Fiktiver Radius an Nahtübergang und Nahtwurzel;
- Definierte FAT Klasse für Kerbspannungsauswertungen mit Referenzradius.

Table 5.4.4 Fatigue classes for notch stresses in MPa acc. to DVS-Merkblatt 0905 /46/

r_{ref} [mm]	Position	FAT for steel	FAT for aluminium
Normal stress $\sigma_\perp$			
1	weld toe	225	71
	weld root	225	71
0.3	weld toe	300	95
	weld root	340	110
0.05	weld toe	500	160
	weld root	630	200

Effektivspannungskonzept

- Auswertung der Effektivspannungen 0.1 [mm] unter der Oberfläche;
- Für Blechdicken **über 10mm** ist diese Auswertung mit Vorsicht zu behandeln;
- **Möglichkeit mit dem Effektivradius an Nahtübergang oder Nahtwurzel zu arbeiten (sonst 0.05 [mm]);**
- Definierte FAT Klasse für Effektivspannungen.

Table 5.4.5 Fatigue classes for effective stresses in MPa acc. to *Baumgartner et al.* /44/, /45/

Material group	Stress component	FAT
Steel	Normal stress $\sigma_\perp$	160
	Shear stress τ	160
Aluminium [1]	Normal stress $\sigma_\perp$	50
	Shear stress τ	50

[1] For plate thicknesses above t > 10 mm and generally for welded components made of aluminium, the calculation with effective stresses shall be applied with caution!

ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH

VARIABLE	DVS 1692	FKM STRUKTUR	FKM KERB	FKM EFFEKTIV
Zyklenzahl (Dauerfestigkeit)*	2e6	2e6	2e6	2e6
FAT Klasse	155 MPa	90 MPa	225 MPa	160 MPa
Eigenspannungen	-	Mässig	Mässig	Mässig
Sicherheitsfaktor*	1.5	1.5	1.5	1.5
Kerbradius	-	-	1 mm	1 mm
Maximale Punktlast bei Auslastungsgrad 100%	**100%**	**98%**	**87%**	**78%**

***Angepasst an DVS 1612 damit Resultate vergleichbar sind.**
(FKM wäre 5e6 Zyklen und Sicherheitsfaktor 1.25)

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bei angeglichener Sicherheitsfaktoren und Referenz Zyklenzahlen zur Ermüdungsauswertung (Dauerfestigkeit) können folgende Bemerkungen gemacht werden:

- **DVS 1612 und FKM mit Strukturspannungen**, führen in diesem Fall zu ähnlichen Ergebnissen;
- **FKM mit Kerbspannungen oder Effektivspannungen** führen zu einer tieferen Punktlast a-a;
- Die Auswertung nach **FKM mit Kerbspannungen** muss eingesetzt werden falls die Nahtwurzel untersucht werden will;
- Das volle Potential der **FKM Auswertung nach Effektivspannungen** kann nur ausgenutzt werden wenn der genaue Radius am Nahtübergang oder an der Nahtwurzelbekannt ist.

Der Vergleich verschiedenen Methoden zur Auswertung von Schweissnähten im Schienenfahrzeugbau hat gezeigt dass:

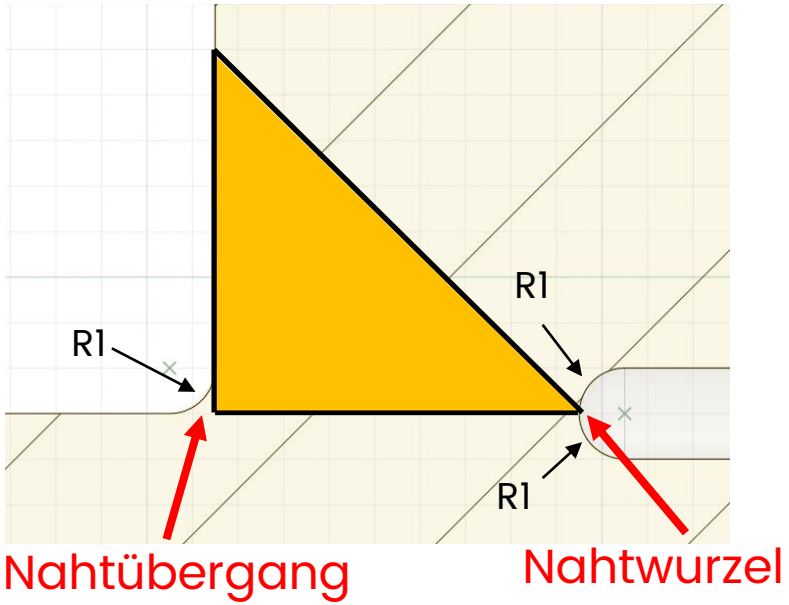
- Es gibt nicht unbedingt ein richtiger oder ein falscher Ansatz;
- Je nach Anforderungen (Kundenwunsch oder Stand der Technik in diesem Sektor) gibt es verschiedene Ansätze;
- **Je vertiefter die Methodik, desto genauere FE-Modelle und demnach detailliertere Angaben zur realen Beschaffenheit der Konstruktion werden benötigt**, um das volle Potenzial dieser Auswertungsmethoden auszunutzen;
- In gewissen Fällen, wie zum Beispiel bei der Auswertung von Nahtwurzeln, ist es **nicht möglich, einfache Auswertungsmethoden nach Nennspannungen (DVS 1612) oder Strukturspannungen (FKM Hot Spot) anzuwenden.**

Potential von Effektivspannungsauswertung:

- Sind Informationen zum Effektivradius (R1) am Nahtübergang vorhanden, können Effektive Radien im FE-Modell eigeführt werden:
  - **R1 => Punktlast -20% gegenüber FKM Struktur**
  - **R3 => Punktlast +15% gegenüber FKM Struktur**
  - **R5 => Punktlast +30% gegenüber FKM Struktur**

- Je nach eingeführtem Radius kann das Resultat der Auswertung deutlich unterschiedlich ausfallen;

- Um das Potential dieser Auswertungsmethode auszunutzen müssen tatsächliche Radien bekannt sein => **NICHT IMMER MÖGLICH**



NORMEN UND REFEREZEN

Ref.	Titel	Datum
[1]	Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 2: Güterwagen; **EN 12663-2 Norm**	2010
[2]	Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweissverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau; **DVS 1612 Richtlinie**	2009
[3]	Forschungskuratorium Maschinenbau; **FKM Richtlinie**, 6 und 7 Auflage, 2012 und 2020	2012 / 2020

Besonderen Dank an Beat Schmied, Schmied Engineering GmbH!

safety and engineering consulting

Via Grancia 1
6926 – Montagnola
Svizzera

Tel. +41 091 608 30 00
Fax +41 860 91 608 30 00

info@saeconsagl.ch

www.saecon.net