

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

Einleitung

Im deutschen Stahlbau gelten die **statischen Festigkeitsnachweise nach Eurocode 3** als Stand der Technik, z.B. für eine Schweißnaht:

DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.

Ebenfalls als Stand der Technik haben sich die **Spannungsberechnungen mittels FEM** (Finite-Elemente-Methode) etabliert. Mit dieser Methode können örtliche (lokale) Spannungskonzentrationen sehr genau erfasst werden.

Dilemma: Die beiden erwähnten Verfahren stehen aktuell im Konflikt zueinander. Eine statische Bewertung von lokalen FEM-Spannungskonzentrationen ist im Eurocode 3 nicht vorgesehen.

Die folgenden Empfehlungen basieren auf der Interpretation der FKM:

FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile", 6. Auflage, 2012.

Die Anwendung dieser Richtlinie ist im Stahlbau umstritten, einige Sachverständige lehnen die FKM als Nachweis der statischen Tragsicherheit ab.

1. Praktisches Beispiel

Anhand eines einfachen Beispiels aus der Praxis wird der statische Festigkeitsnachweis in Anlehnung an die FKM-Richtlinie durchgeführt.



$t := 8 \text{ mm}$ Dicke der Lasche

$a := 5 \text{ mm}$ a-Maß der Kehlnaht

Die Kehlnaht ist umlaufend, damit ist die Schweißnaht **querschnittsdeckend**:

$2 \cdot a \geq t = 1$ 1="Bedingung erfüllt"

Abbildung 1: Ankerplatte mit angeschweißter Lasche

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

In der Abb. 1 ist eine Ankerplatte mit angeschweißter Lasche dargestellt. Die Lasche wird umlaufend mit einer Kehlnaht a5 angeschlossen, damit ist die Naht querschnittsdeckend. Diese Tatsache ist in der FKM sehr wichtig und erlaubt z.B. das Nutzen von plastischen Reserven (Hinweise auf den Seiten 27 bzw. 77).

2. Statische Lasten

In den Abb. 2 bzw. Abb. 3 sind die auf die Lasche aufgebrachtten **maximalen statischen Lasten** angedeutet.

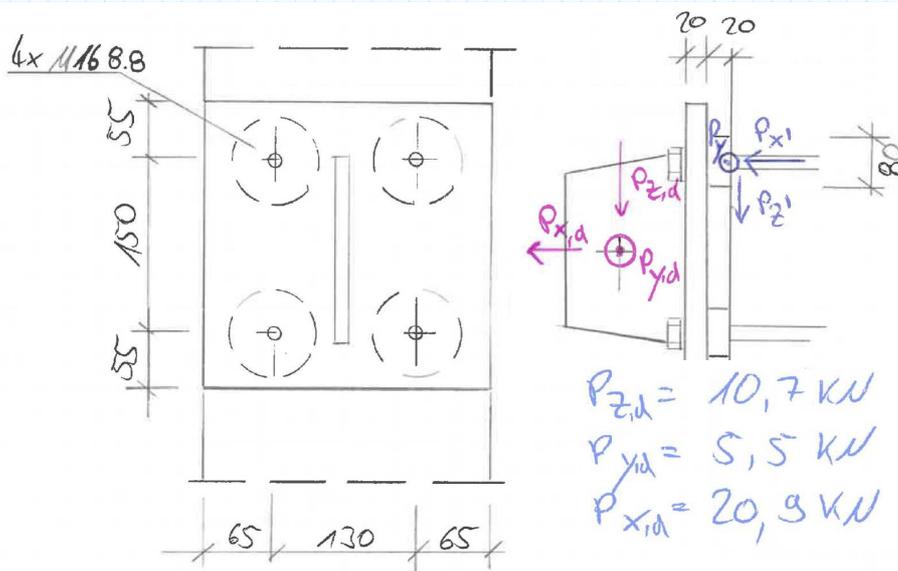
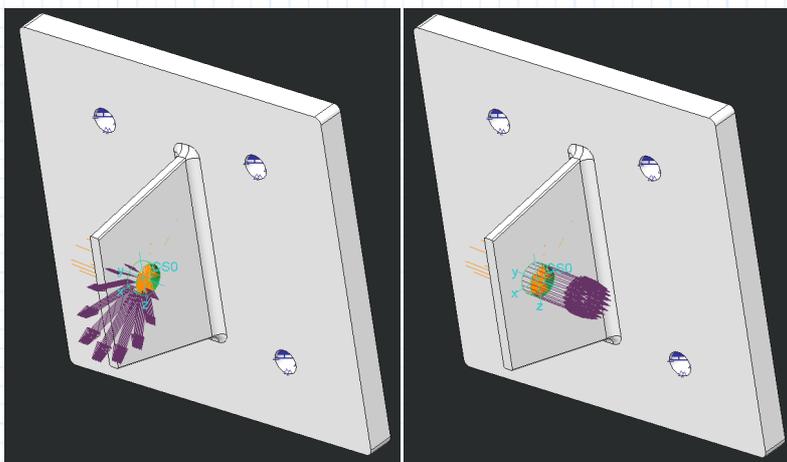


Abbildung 2: Statische Lasten auf die Lasche



Die Höhe der statischen Lasten im FEM-Modell entspricht der Abb. 2

Abbildung 3: Statische Lasten im FEM-Modell

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

3. Nahtgeometrie

Die FKM verwendet den Begriff "**Strukturspannung**", vgl. Hinweis auf der Seite 66:

"... Nachweis mit Strukturspannungen. Bei ... geschweißten räumlichen Strukturen erfolgt die Spannungsermittlung in der Regel durch FEM-Analysen mit ... Volumenelementen ... Die für den Nachweis zu verwendenden örtlichen Spannungen werden als ... Strukturspannungen ermittelt. Singularitäten im Modell sollten nach Möglichkeit vermieden werden ..."

Es findet sich in der FKM jedoch kein Hinweis, wie die **Singularitäten** vermieden werden. Die Abb. 0.3-4 auf der Seite 13 liefert aufgrund der einspringenden Ecken ein grundsätzlich mit Singularitäten behaftetes Modell. Damit ist lediglich eine **näherungsweise Umrechnung** bzw. **Extrapolieren einer Strukturspannung** möglich. Die Genauigkeitsvorteile der FEM werden so aufgehoben.

Die Abb. 0.3-5 auf der Seite 13 liefert zwar ein singularitätsfreies Modell für sogenannte "**effektive Kerbspannungen**", die hier aber nicht weiter betrachtet werden, denn solche derart komplexe Modelle sind allgemein unwirtschaftlich.

Eine konservativ-pragmatische und wirtschaftliche Art der Nahtmodellierung bietet die "**CAB-Methode**" ("CAB" steht für Chemieapparatebau). Das a-Maß der Kehlnaht wird direkt mittels einer Rundung berücksichtigt:

$$a = 5 \text{ mm} \qquad R_{\text{ersatz}} := \sqrt{2} \cdot a = 7 \text{ mm}$$

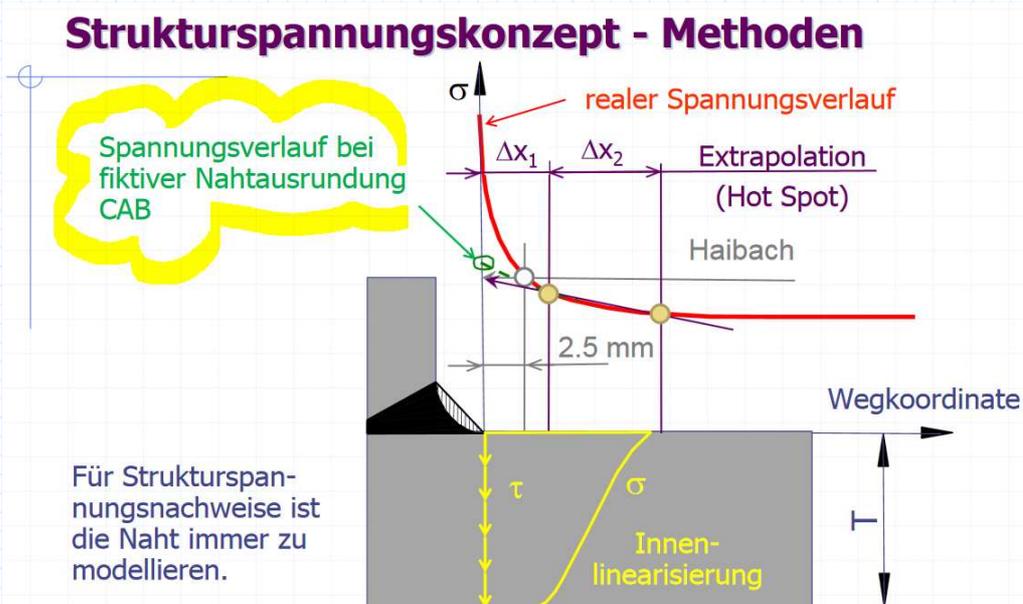


Abbildung 4: Strukturspannungskonzepte, vgl. CADFEM User's Meeting 2010, Schmied Engineering GmbH

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

In der Abb. 4 sind unterschiedliche Konzepte für die Ermittlung einer Strukturspannung dargestellt. Die CAB-Methode hat dabei mehrere Vorteile:

- konservativ, ganz im Sinne von dem Eurocode 3
- FEM-Modelle sind frei von Singularitäten, hohe Prozess-Sicherheit
- Spannungen sind unmittelbar an dem Nahtübergang auswertbar
- Für konkav geschweißte Nähte alternativlos

4. Vernetzung

Die FKM liefert keine Vorgaben für die Vernetzung, jedoch den Hinweis (Seite 66):

"... Der Anwender hat dann sicherzustellen, dass der so berechnete Spannungswert für einen Festigkeitsnachweis geeignet ist ..."

Damit hat der Anwender zunächst einen gewissen Spielraum für die Netzfeinheit, in diesem Aspekt ist jedoch sein Festigkeitsnachweis stets anfechtbar.

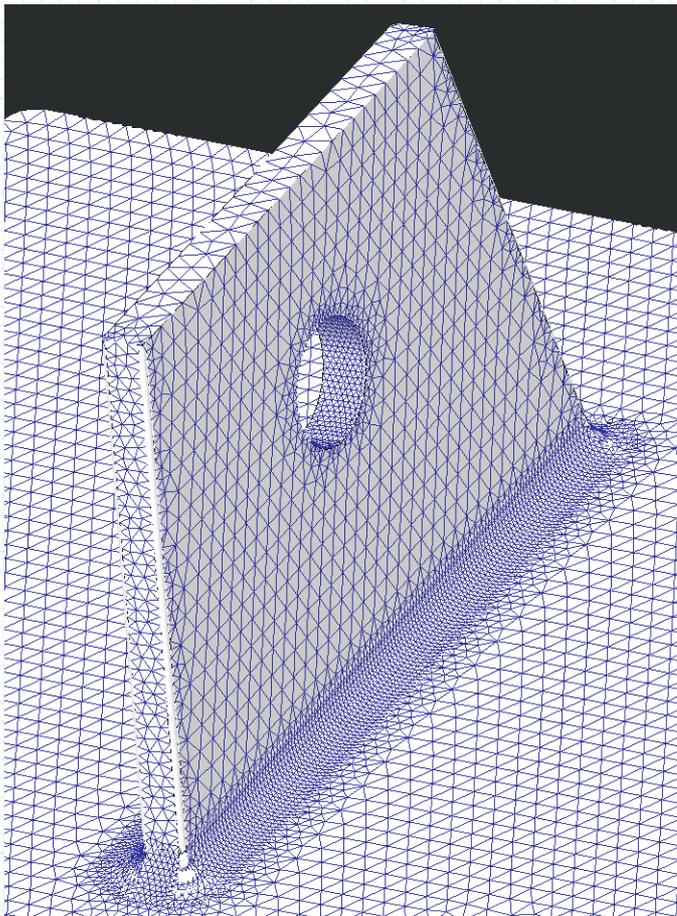


Abbildung 5: Beispiel für eine Vernetzung

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

In der Abb. 5 ist beispielhaft eine Vernetzung mit Tetraedern dargestellt. Grundsätzlich gilt der Vorsatz:

Das Netz sollte an den auszuwertenden Geometrien verdichtet werden.

Vor der FEM-Berechnung sind die kritischen Bereiche nicht immer bekannt. Somit ergeben sich in den meisten Fällen mindestens 2 FEM-Analysen, wobei der 2. Rechenlauf mit einem lokal verfeinerten Netz durchgeführt und auch ausgewertet wird.

5. FEM-Spannungen

Die statische FEM-Analyse liefert folgende Spannungen:

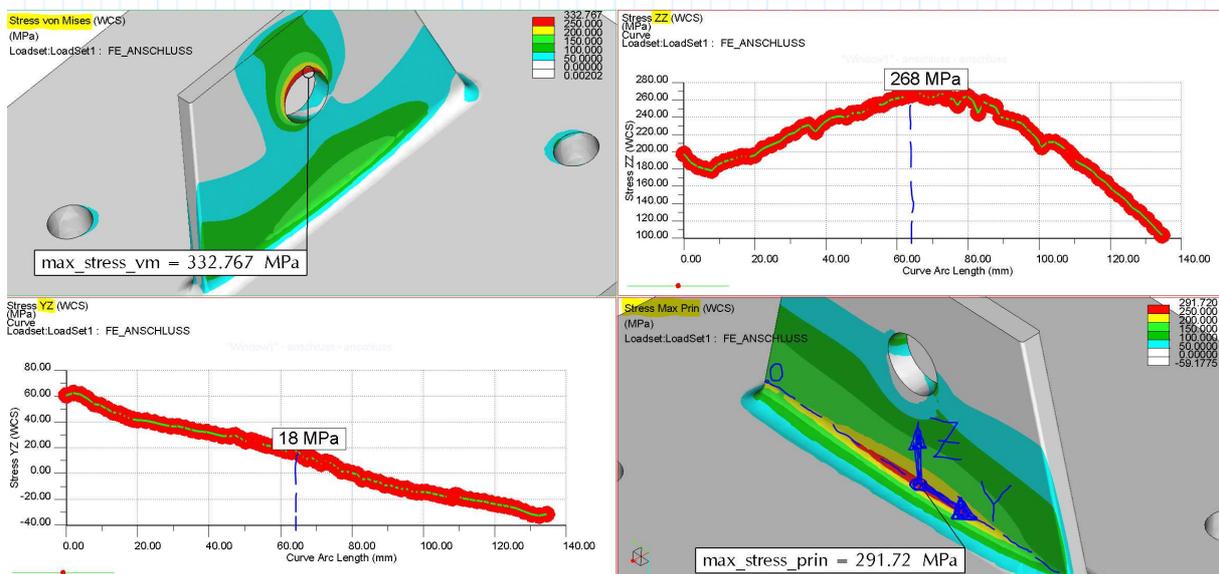


Abbildung 6: FEM-Spannungen

$$\sigma_v := 332.8 \text{ MPa}$$

Vergleichsspannung von-Mises (Abb. 6, oben links), maßgebend für den **nichtgeschweißten Bereich**, vgl. FKM, Seite 65.

$$\sigma_z := 268 \text{ MPa}$$

betragsmäßig max. Hauptspannung quer zur Naht (Abb. 6, oben rechts), maßgebend für den **geschweißten Bereich**, vgl. FKM, Seite 67.

$$\tau_{yz} := 18 \text{ MPa}$$

Schubspannung an der gleichen Stelle, parallel zur Naht (Abb. 6, unten links), maßgebend für den **geschweißten Bereich**, vgl. FKM, Seite 67.

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

6. Vergleichsspannungen nach FKM

Das Beispiel beinhaltet einen duktilen Baustahl S235, den im Stahlbau am meisten verwendeten Werkstoff. Die ermittelte maximale Vergleichsspannung σ_v von-Mises im ungeschweißten Bereich ist hierbei direkt verwertbar.

Die Bewertung der Kehlnaht erfolgt am Nahtübergang mittels 2 Spannungskomponenten: Betragsmäßig maximaler Hauptspannung (Zug bzw. Druck) quer zur Naht und der Schubspannung "parallel zur Naht" an der gleichen Stelle, vgl. Abb. 6. Der Einfluss der Schubspannung ist jedoch meistens gering, mit Ausnahme von Torsionslasten.

$$\sigma_v = 332.8 \text{ MPa} \quad \text{im ungeschweißten Bereich, vgl. Seite 65}$$

$$\sigma_{vw} := \sqrt{\sigma_z^2 + \tau_{yz}^2} = 268.6 \text{ MPa} \quad \text{im geschweißten Bereich, vgl. 3.1.14}$$

7. Statischer FKM-Festigkeitsnachweis

Der statische Festigkeitsnachweis erfolgt in Anlehnung an die FKM-Richtlinie:

$$E := 210000 \text{ MPa} \quad \text{E-Modul, vgl. Tabelle 3.3.3}$$

$$R_p := 240 \text{ MPa} \quad \text{Dehngrenze, vgl. Tabelle 5.1.24}$$

$$R_m := 360 \text{ MPa} \quad \text{Zugfestigkeit, vgl. Tabelle 5.1.24}$$

$$\epsilon_{ertr} := 0.05 = 5\% \quad \text{Ertragbare Gesamtdehnung, vgl. Tabelle 3.3.3}$$

An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass die im Maschinenbau sehr wohl zumutbare (ertragbare) Gesamtdehnung von 5% im Stahlbau kaum zu vermitteln ist. Aufgrund der damit verbundenen nichtlinearen Aspekte, z.B. ignoriert die FKM die Effekte starker Verformungen, wird hier eine Reduktion der ertragbaren Dehnung empfohlen:

$$\epsilon_{ertr} := 0.01 = 1\%$$

Mit diesem Grenzwert sind Fachleute im Stahlbau vertraut, z.B. von den Werkstoff-Kennwerten bei rostfreien Edelstählen, die häufig keine ausgeprägte messbare Streckgrenze aufweisen

8. Plastische Stützzahl in FKM

Für die weitere Vorgehensweise ist es zunächst wichtig, zwischen einem lokalen und einem globalen Versagen zu unterscheiden.

Ein globales Versagen liegt z.B. vor, wenn über einem **gesamten tragenden Querschnitt** die Dehngrenze überschritten wird. Der Querschnitt wird instabil, man spricht von einem "plastischen Kollaps". FKM berücksichtigt die Art des Versagens mittels der **plastischen Formzahl**:

$$K_p = \frac{\text{vollplastische_Traglast}}{\text{elastische_Grenzlast}} \quad \text{vgl. 3.3.8}$$

Die Ermittlung der **elastischen Grenzlast** im gekerbten Querschnitt erfolgt mittels einer linear-elastischen FEM-Analyse bis zum Erreichen der Dehngrenze in der Kerbe.

Für die Bestimmung der **vollplastischen Traglast** wird zum einen die ermittelte elastische Grenzlast um einen bestimmten Faktor gesteigert. Auf der anderen Seite wird das Materialgesetz elastisch-idealplastisch angenommen, vgl. Hinweise auf der Seite 76. Die Laststeigerung erfolgt iterativ, bis die nichtlineare FEM-Analyse nicht mehr konvergiert bzw. kein statisches Gleichgewicht mehr gefunden werden kann. Für den konkreten Fall beträgt dieser Steigerungsfaktor bzw. die minimale plastische Formzahl:

$$K_{p_min} := 3 \quad \text{Nur falls diese Bedingung erreicht wird, ist das Nutzen lokaler plastischen Reserven mittels } n_{pl} \text{ zulässig:}$$

$$n_{pl} := \min \left(\sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon_{ertr}}{R_p}}, K_{p_min} \right) = 2.96 \quad \text{vgl. 3.3.13}$$

Die **plastische Stützzahl** n_{pl} nach FKM ergibt sich aus einer Interpretation der Neuber-Umrechnung für die Kerbspannungen, wobei wiederum das elastisch-idealplastische Materialgesetz zugrunde gelegt wird.

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

9. Statische Festigkeitswerte

Im konkreten Fall werden 2 Werte für die statische Festigkeit gebildet:

$$\sigma_{SK} := n_{pl} \cdot R_p = 709.9 \text{ MPa} \quad \text{im Grundwerkstoff, vgl. 3.4.2}$$

$$\alpha_w := 0.95 \quad \text{Schweißnahtfaktor der Kehlnaht, vgl. Tabelle 3.3.5}$$

$$\sigma_{SK_w} := \alpha_w \cdot n_{pl} \cdot R_p = 674.4 \text{ MPa} \quad \text{am Nahtübergang, vgl. 3.4.4}$$

10. Sicherheitsfaktoren

Der Gesamtsicherheitsfaktor wird aus mehreren Faktoren gebildet:

$$j_s := 1 \quad \text{Lastfaktor, sichere Lastannahme}$$

$$j_p := 1.5 \quad \text{Maximaler Grund-Sicherheitsfaktor gegen Fließen, hohe Schadensfolge, hohe Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Spannung, vgl. Tabelle 3.5.1}$$

$$K_{T-p} := 1 \quad \text{Normaltemperatur, vgl. 3.2.20}$$

$$\frac{R_p}{R_m} = 0.67 \quad \text{Niedriges Streckgrenzenverhältnis (<0,75)}$$

$$j_z := 1 \quad \text{Zusätzlicher Teil-Sicherheitsfaktor, vgl. Tabelle 3.5.2}$$

$$j_{ges} := j_s \cdot j_z \cdot \left(\frac{j_p}{K_{T-p}} \right) = 1.5 \quad \text{Gesamtsicherheitsfaktor, abgeleitet aus 3.5.5}$$

FEM im Stahlbau: Eurocode 3 oder FKM?

Eine Empfehlung für die praktische Anwendung

11. Nachweis

Statischer Festigkeitsnachweis nach FKM liefert:

$$a_{SK} := \frac{\sigma_v}{\frac{\sigma_{SK}}{\dot{j}_{ges}}} = 0.7$$

Der statische Festigkeitsnachweis ist erbracht, vgl. 3.6.14

$$a_{SK_w} := \frac{\sigma_{vw}}{\frac{\sigma_{SK_w}}{\dot{j}_{ges}}} = 0.6$$

Der statische Festigkeitsnachweis ist erbracht, vgl. 3.6.16

$$a_{SK} = 70\%$$

Statische Auslastung im Grundwerkstoff

$$a_{SK_w} = 60\%$$

Statische Auslastung in der Schweißnaht

12. Fazit

Der hier durchgeführte statische FKM-Festigkeitsnachweis anhand der örtlichen (lokalen) FEM-Spannungskonzentrationen ist als konservativ zu betrachten. Alle getroffenen Annahmen, insbesondere die Reduktion der ertragbaren Dehnung, tragen dazu bei.

Jedoch ist die Anwendung dieser Richtlinie im Stahlbau umstritten, einige Sachverständige (Bundesland Bayern) lehnen die FKM als Nachweis der statischen Tragsicherheit ab.

Literatur

- *DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*
- *FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile", 6. Auflage, 2012.*
- *CADFEM User's Meeting 2010, Schmied Engineering GmbH*