

# Statischer Festigkeitsnachweis von Schweissnähten mit örtlichen Spannungen

Beat Schmied, Schmied Engineering GmbH  
Sebastian Kurmann, Schmied Engineering GmbH

Manuskript zum Vortrag am Schweizer Maschinenelemente Kolloquium (SMK2010)  
9. / 10. Nov. 2010 an der Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz

## Zusammenfassung

Im Gegensatz zum Ermüdungsnachweis wird der statische Nachweis von Schweissnähten in der Fachliteratur bisher eher stiefmütterlich behandelt. Die bekannten Regelwerke basieren allesamt auf dem Nennspannungskonzept. Die Schwierigkeit stellt sich im Zusammenhang mit FE-Berechnungen, sobald die örtlichen Spannungen zu beurteilen sind.

Die FKM-Richtlinie hat sich diesem Thema angenommen und beschreibt einen ersten Lösungsansatz. Dieser ist jedoch nur bedingt praxistauglich. Ein Projektbericht der FKM lässt hoffen, dass die nächste Ausgabe der Richtlinie besser an die Bedürfnisse der FE-Simulation angepasst ist. Bis dahin muss sich jeder Berechner selber behelfen. Als Hilfestellung ist der hier beschriebene Ansatz zu verstehen.

## Einleitung

Im Maschinenbau stehen für die Beurteilung von Schweissnähten die Spannungskonzepte im Vordergrund. Aus der Lehre und den klassischen Regelwerken ist das Nennspannungskonzept bestens bekannt. Das Strukturspannungskonzept wurde bereits vor Jahrzehnten entwickelt, um grosse Strukturen wie Ölplattformen mit Finite-Elemente-Programmen beurteilen zu können. Für die praktische Anwendung des Kerbspannungskonzepts waren zuerst leistungsfähige Rechner erforderlich. Dehnungsbasierte und bruchmechanische Konzepte kommen in dieser Branche eher selten zur Anwendung, weshalb sie an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

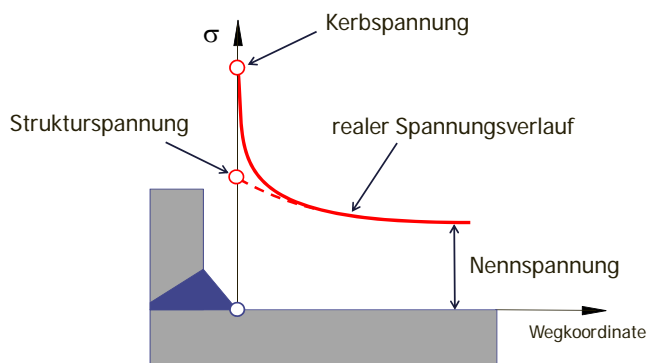


Bild 1 Spannungsbegriffe

Die Nennspannung beinhaltet alle Beanspruchungen in der Tragstruktur. Die lokalen Einflüsse wie Steifigkeitsänderungen oder Kerbwirkungen der Schweissnaht bleiben bei der Spannungsberechnung jedoch unberücksichtigt. Dieses Nachweiskonzept ist in der Praxis bestens bekannt und wird deshalb im Folgenden nicht weiter vertieft.

In der Strukturspannung sind die lokalen geometrischen Effekte, mit Ausnahme der Kerbwirkung der Schweissnaht selber, enthalten. Diese fiktive Spannung spielt insbesondere im Zusammenhang mit der Anwendung von Dehnmessstreifen (DMS) eine wichtige Rolle, da die DMS bei nicht nachbearbeiteten Nähten selten direkt auf den Nahtübergang geklebt werden können.

Die Kerbspannung ist deshalb an realen Nähten nur in Ausnahmefällen messbar. Sie folgt jedoch bei entsprechender Modellierung aus der FE-Simulation. Dabei stellt sich jedoch sofort die Frage, wie dieser meist lokal eng begrenzte Maximalwert zu beurteilen ist. Die FKM-Richtlinie [1] hat sich dieser Problematik vorerst entzogen, indem sie für den Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen explizit die Strukturspannung vorschreibt. Für den Praktiker ergeben sich dadurch bei der Umsetzung aber teilweise erhebliche Schwierigkeiten, auf die noch eingegangen wird.

## Strukturspannungsmethoden

Die klassische Strukturspannungsmethode ist die Hot-Spot- oder auch Extrapolationsmethode, wie sie von IIW [3] beschrieben wird oder auch in Regelwerken, wie zum Beispiel in der Druckbehälternorm DIN EN 13445-3 integriert ist. Die Spannung wird an der Bauteiloberfläche in 2 oder 3 Messpunkten ermittelt und auf den Nahtübergang extrapoliert (Bild 2-a). Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die letztlich massgebende Spannung in der FE-Simulation nicht direkt sichtbar ist.

Der Ansatz von Haibach (Bild 2-b) aus den 60er-Jahren beruht explizit auf der Anwendung von DMS. Der Abstand von 2.5 mm vom Nahtübergang, ergab sich durch die Abmessungen der Messstreifen. An Hand umfangreicher Messreihen zeigte Haibach, dass die lokale Kerbwirkung der Schweißnaht bei diesem Abstand weitgehend abgeklungen ist. Obschon die Methode sehr einfach anzuwenden ist, fand sie keinen Eingang in die Regelwerke.

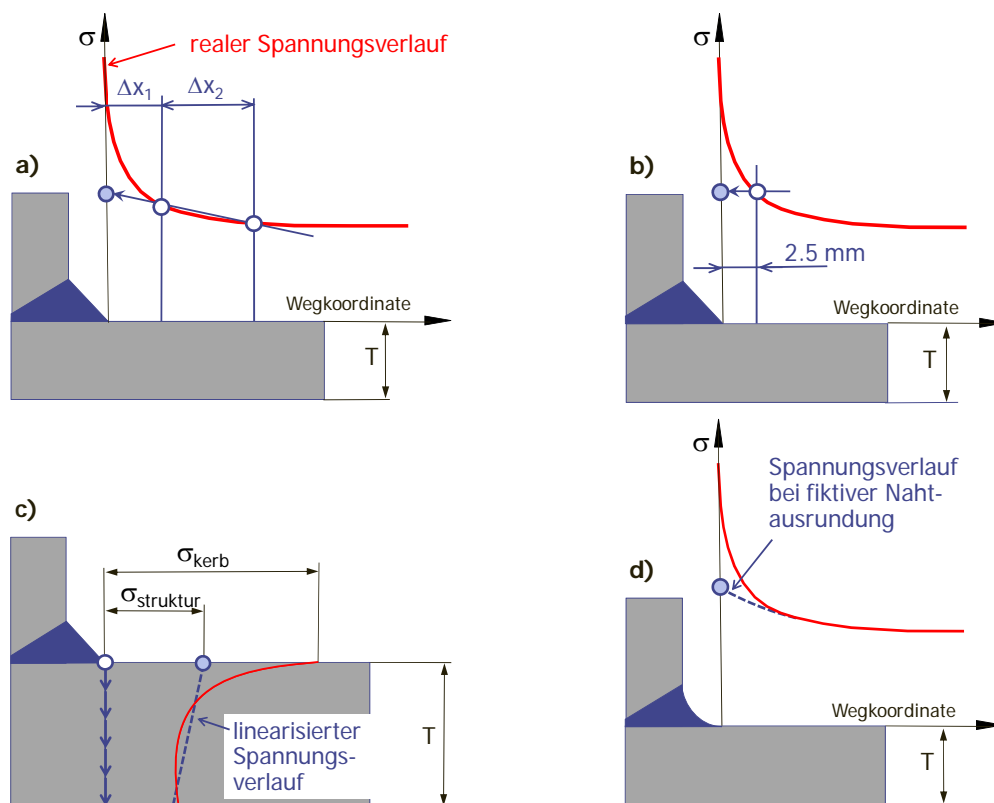


Bild 2 Strukturspannungskonzepte  
a) Hot-Spot-Extrapolation, b) Haibach, c) Innenlinearisierung, d) CAB

Einen grundsätzlich anderen Ansatz verfolgt die Methode der Innenlinearisierung (Bild 2-c). Statt an der Oberfläche wird der Spannungsverlauf über die Wanddicke ermittelt und in die konstante Membranspannung, die lineare Biegespannung und die überlagerte Kerbspannung zerlegt (Bild 3). Indem die dritte Komponente ausgefiltert wird, ergibt sich die gewünschte Strukturspannung. Wie bei der Hot-Spot-Methode ist die massgebende Spannung somit nicht direkt aus der FE-Simulation

ersichtlich. In der Literatur werden verschiedene Abwandlungen beschrieben, so zum Beispiel eine, bei der die Linearisierung in einem gewissen Abstand vom Nahtübergang durchgeführt wird.

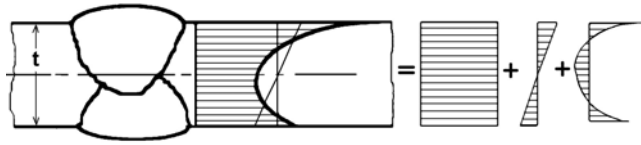


Bild 3 Innenlinearisierung zur Bildung der Spannungsanteile

Die CAB-Methode (Bild 2-d) wurde an der Universität Dortmund von der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau für die Anwendung in FE-Simulationen entwickelt. Sie basiert auf einer fiktiven, nahezu kerbfreien Nahtmodellierung. Dadurch kann die am abgerundeten Nahtübergang ermittelte Spannung direkt als Strukturspannung interpretiert werden [5].

Am Beispiel einer Schweissnaht zwischen Klöpperboden und Rohrstützen wird in Bild 4 die fiktive Verrundung und das Ergebnis der Innenlinearisierung für den Nahtübergang am Stutzen gezeigt. Das Diagramm zeigt die bloss noch geringe verbleibende Kerbwirkung im Nachweispunkt.

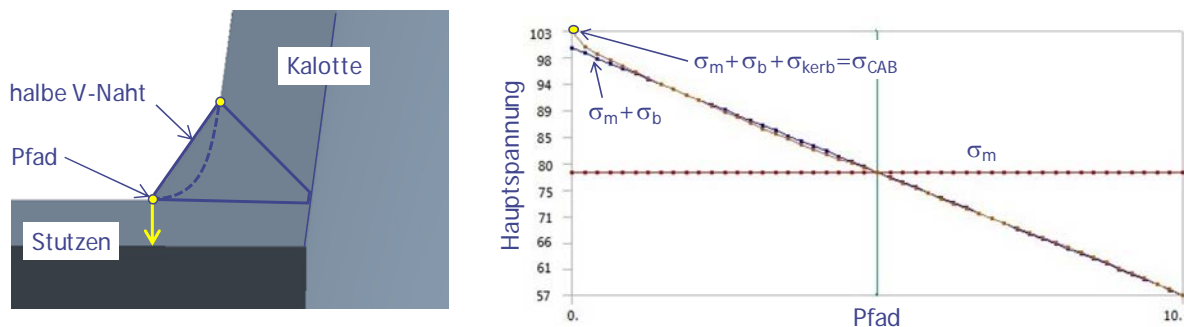


Bild 4 Innenlinearisierung CAB-Konzept

## Hinweise zum Nachweis mit Strukturspannungen

Wie schon erwähnt, schreibt die FKM beim Nachweis mit örtlichen Spannungen die Verwendung der Strukturspannung vor, ohne die anzuwendende Methode oder die Modellierung näher zu definieren. Dies bietet dem Anwender die Möglichkeit, die Methode situativ zu wählen. Bei der Modellierung und Vernetzung sind jedoch einige Punkte zu beachten. Die dazu folgenden Ausführungen beschränken sich auf Volumenmodelle.

### Umsetzung im FE-Modell

Es hat sich erwiesen, dass die Schweissnaht mindestens als simple Fase oder als Verrundung (CAB), zu modellieren ist. Ansonsten werden die lokalen Steifigkeitsverhältnisse ungenügend abgebildet und die ermittelten Spannungswerte fallen meist zu tief aus.

Mit Ausnahme bei der CAB-Methode ist ferner zu beachten, dass die vereinfachte Nahtmodellierung eine Singularität verursachen und dadurch den Spannungswert verfälschen kann. Bei der Hot-Spot-Methode und bei Haibach ist deshalb bei der Vernetzung darauf zu achten, dass zwischen der Ecke des Nahtübergangs (Singularität) und dem Auswertepunkt immer mindestens eine Elementreihe vorhanden ist. Bei der Innenlinearisierung ist zu klären, wie das verwendete FE-Programm die Spannungserlegung durchführt.

### Umsetzungsprobleme

Die Vorgabe, den Nachweis mit der Strukturspannung durchführen zu müssen, stellt den Anwender vor eine grosse Schwierigkeit, sobald eine Nahtwurzel beurteilt werden soll. Es gibt zurzeit nämlich keine anerkannte Methode dafür! Die IIW [3] sagt ausdrücklich, dass die Extrapolationsmethode nur

auf den Nahtübergang anwendbar ist. Genauso scheitern die Methoden Haibach und CAB. Einzig die Innenlinearisierung hat, wie noch gezeigt wird, das Potential, die benötigten Informationen zu liefern. Die Nahtwurzel begründet auch gleich noch ein zweites Problem. Kann deren Ermüdungsfestigkeit nämlich nicht mit Nennspannungen nachgewiesen werden, bedingt dies ein Kerbspannungsmodell. Bezüglich Effizienz und Wirtschaftlichkeit ist es für den praktischen Einsatz kaum vertretbar, für den statischen Nachweis und den Ermüdungsnachweis zwei verschiedene FE-Modelle zu erstellen.

## Kerbspannungskonzept

Dass die vorgenannte Problematik von der FKM erkannt wurde, zeigen die Ausführungen in [2]. Die nächste Ausgabe der Richtlinie dürfte deshalb einen Ansatz mit dem Kerbspannungskonzept beinhalten. Da das von Schmied Engineering angewendete Vorgehen bereits auf diesem Konzept aufbaut, werden auch hierzu die wichtigsten Grundlagen festgehalten.

Das Kerbspannungskonzept ist auf Volumenmodelle beschränkt und bedingt infolge der erforderlichen Vernetzungsqualität durchwegs den Einsatz der Submodelltechnik. Die Nähte werden zwar idealisiert aber geometrisch korrekt modelliert. Sämtliche Kanten an den Nahtübergängen und der Wurzel werden mit dem Referenzradius ausgerundet.

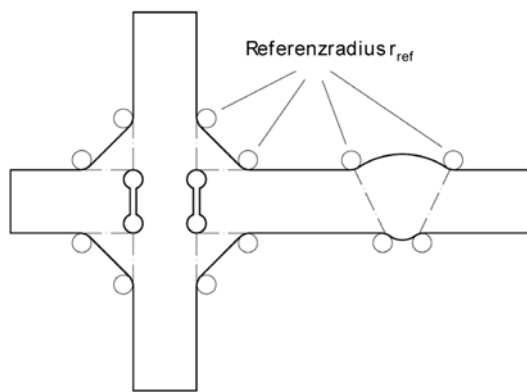


Bild 5 Modellierung für Kerbspannungsmodell

Die FKM [2] und die IIW [3] definieren ausschliesslich den Referenzradius  $R1$ , der durch Versuche und Tests sehr gut abgesichert ist. Bei Feinblechen werden jedoch damit die lokalen geometrischen Verhältnisse stark beeinflusst. Insbesondere wird bei der Wurzelfreistellung von Kehlnähten (Bild 5) zu viel Material weggeschnitten. In einem breit abgestützten Verbundprojekt [4] wurden die kleineren Referenzradien  $R0.3$  und  $R0.05$  untersucht und erprobt. Die daraus folgenden Empfehlungen sind in Bild 6 dargestellt. Für den Ermüdungsnachweis werden im gleichen Bericht die entsprechenden FAT-Klassen genannt.

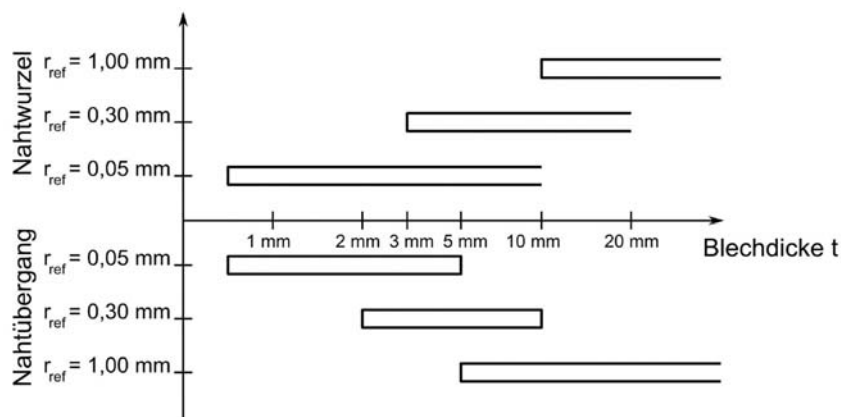


Bild 6 Empfehlungen zur Wahl des Referenzradius [4]

# Statischer Nachweis nach FKM

## Ablauf für flächenförmige, geschweisste Bauteile

Die FKM empfiehlt für geschweisste Bauteile generell den Nachweis wie für flächenförmige Bauteile zu führen. Wie Bild 7 zeigt, sind somit immer drei Spannungskomponenten sowie die entsprechenden Bauteilfestigkeiten zu ermitteln. Neben den Festigkeitswerten des Grundwerkstoffs (Zugfestigkeit und Streckgrenze) wird für den statischen Nachweis einzig noch der Konstruktionsfaktor  $K_{SK}$  benötigt.

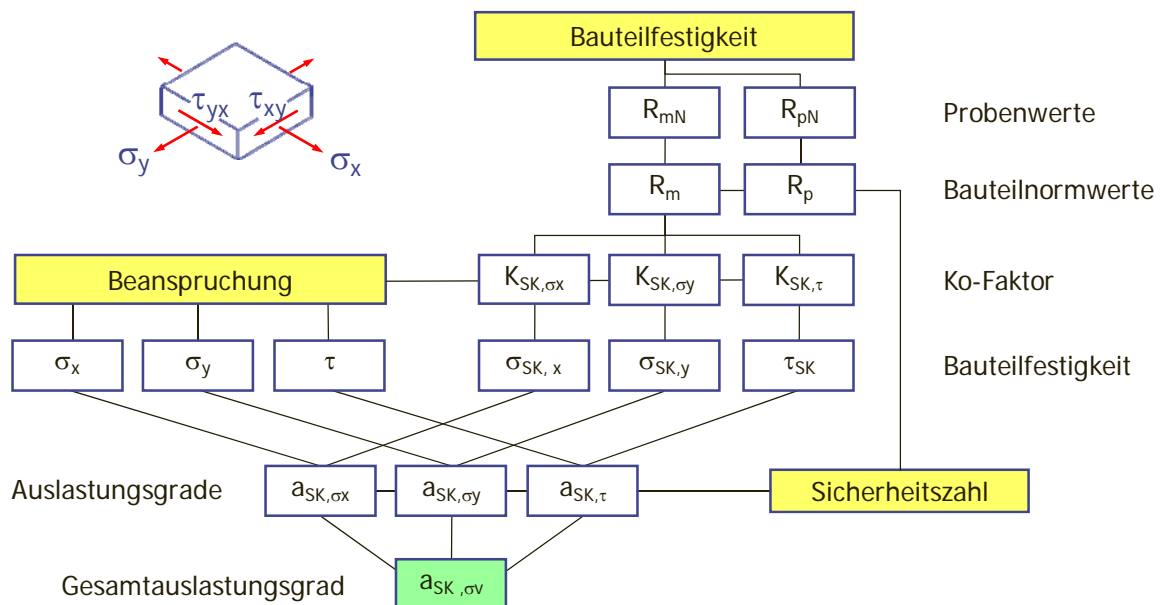


Bild 7 FKM-Nachweis für flächenförmige Bauteile

## Volumenförmige, geschweisste Bauteile

Bei der Ermüdung lässt die FKM eine Hintertür offen, den Nachweis doch für volumenförmige Bauteile führen zu können. Bei der Bildung des Gesamtauslastungsgrads werden nämlich die geschweissten Bauteile ausdrücklich erwähnt und für diese die Normalspannungshypothese vorgeschrieben. Dadurch ist einzig die grösste Hauptspannung für den Nachweis relevant.

$$a_{SK,\sigma} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \leq 1$$

Formel 1

Dieses Vorgehen bietet dem Anwender zwei wesentliche Vereinfachungen. Erstens steht die für den Auslastungsgrad relevante Spannung bei einigen Methoden (Haibach, CAB) in der FE-Auswertung direkt zur Verfügung und zweitens muss der Konstruktionsfaktor nur für diese eine Spannung ermittelt werden. Renormierte Regelwerke wie die IIW [3] basieren beim Ermüdungsnachweis weitgehend auf den Hauptspannungen (Bild 11). Auf diesen Punkt wird später noch einmal eingegangen.

## Plastische Stützzahl

Die Belastungsgrenze hängt einerseits von den plastischen Reserven des ganzen Bauteils (globales Versagen) und andererseits von der Duktilität des Werkstoffs (lokales Versagen im Kerbgrund) ab.

$$n_{pl} = \min(K_p; K_w)$$

Formel 2

Das globale Versagen tritt ein, sobald in einem Querschnitt der vollplastische Zustand erreicht wird. Das Verhältnis aus vollplastischer zu elastischer Grenzlast wird als plastische Formzahl  $K_p$  bezeichnet. Für einfache Nennquerschnitte liefert die Fachliteratur entsprechende Werte.

$$K_p = \frac{\text{vollplastische Grenzlast}}{\text{elastische Grenzlast}}$$

Formel 3

Bei komplizierteren Strukturen ist eine FE-Analyse mit ideal-elastisch-plastischem Werkstoffverhalten durchzuführen. Um den Konvergenzschwierigkeiten mindestens teilweise aus dem Weg zu gehen, wird der Tangentenmodul für den plastischen Bereich meist nicht mit null, sondern mit 1000-2000 MPa eingesetzt. Beim Nachweis für Schweißnähte ist dabei zu beachten, dass für die elastische Traglast die Strukturspannung verwendet wird. Da die nicht-lineare Bestimmung von  $K_p$  aufwändig ist, beinhaltet der Lösungsansatz Schmied einen einfacheren Ansatz (Formel 7).

Das lokale Versagen ist vom Plastifiziervermögen des Werkstoffs abhängig. Dieses ist nebst vom E-Modul und der Streckgrenze auch von der ertragbaren örtlichen Grenzdehnung  $\varepsilon_{err}$  abhängig. Die FKM definiert in [1] für Stahl den Wert mit 5%, bezeichnet ihn in [2] jedoch selber als sehr konservativ. Bisher werden beim statischen Nachweis die Eigenspannungen zwar vernachlässigt, sie erschweren aber das Abschätzen der örtlichen Versagensvorgänge. Dies dürfte den auch der Hauptgrund sein, das der Nachweis zurzeit mit Struktur- und nicht mit Kerbspannungen zu führen ist.

$$K_w = \sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon_{err}}{R_e}}$$

Formel 4

## Unterschiede im FKM-Nachweis von Nahtübergang und Wurzel

Die FKM unterscheidet beim statischen Nachweis an drei Stellen zwischen dem Nahtübergang und der Wurzel. Der gravierendste Unterschied besteht bereits bei der Spannungsberechnung, werden doch für die Wurzel sogenannte Lastarten definiert. Für die Normallast in X-Richtung im lokalen Naht-Koordinatensystem sind die verursachten Strukturspannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  zu ermitteln und daraus die Vergleichsstrukturspannung zu bilden. Für die Normallast in Y-Richtung und die Schublast ist genauso zu verfahren. Mit den so erhaltenen drei Vergleichsstrukturspannungen wird der Nachweis analog dem Nahtübergang geführt, wobei am Schluss für den Gesamtauslastungsgrad erneut eine Vergleichsspannungshypothese (Formel 6) zum Zug kommt.

Während diese Lastarten bei einer einfach verlaufenden Naht noch definierbar sind, wird es bei anspruchsvolleren Strukturen schwierig, wenn nicht sogar unmöglich. Der Ansatz ist schon in sich selber nicht wirklich konsistent und für FE-Simulationen kaum praktikabel. Den Autoren dieses Vortrags ist es bisher nicht gelungen, ein anderes Regelwerk oder eine namhafte Literatur zur Bestätigung dieses Ansatzes zu finden.

Der zweite Unterschied zwischen Nahtübergang und Wurzel liegt im Schweißnahtfaktor, der in den Konstruktionsfaktor eingerechnet wird. Beim Übergang ist keine Abminderung vorgesehen, bei der Wurzel hängt sie von der Schweißnahtform, der Spannungsart und der Zugfestigkeit ab.

Als letztes unterscheiden sich die beiden Nachweise bei der Bildung des Gesamtauslastungsgrads. Formel 5 gilt für den Nahtübergang und Formel 6 für die Nahtwurzel. Der Grund dass zwei verschiedene Hypothesen verwendet werden, dürfte bei den oben erklärten Lastarten zu suchen sein.

$$a_{SK,\sigma} = \sqrt{a_{SK,\sigma_x}^2 + a_{SK,\sigma_y}^2 - a_{SK,\sigma_x} \cdot a_{SK,\sigma_y} + a_{SK,\tau}^2} \leq I$$

Formel 5

$$a_{SK,\sigma} = \sqrt{a_{SK,\sigma_x}^2 + a_{SK,\sigma_y}^2 + a_{SK,\tau}^2} \leq I$$

Formel 6

## Lösungsansatz Schmied

Bei Schweißkonstruktionen im Maschinenbau steht fast immer der Nachweis der Betriebsfestigkeit im Vordergrund. Sofern alle Nähte durchgeschweisst sind oder angenommen werden darf, dass keine der Nahtwurzeln kritisch ist, setzt Schmied Engineering mit Vorliebe das Strukturspannungskonzept CAB ein. Stellt sich dann heraus, dass ein Nahtübergang einen hohen Auslastungsgrad aufweist, erfolgt der Wechsel zum Kerbspannungskonzept. Letzteres kommt von vorneherein zur Anwendung, falls eine Wurzel als kritisch eingestuft wird.

Solange 100'000 oder mehr Lastzyklen gefordert sind und die Ausnahmelasten nur unwesentlich über der höchsten Ermüdungslast liegen, darf angenommen werden, dass der statische Nachweis durch den Ermüdungsnachweis abgedeckt ist. Dies bedingt jedoch, dass jene ausserordentlichen Lastfälle, die über den Lebenszyklus betrachtet des öfters auftreten (z. B. Notaus) im Lastkollektiv für den Betriebsfestigkeitsnachweis mitberücksichtigt werden. Falls jedoch auch sehr seltene Situationen wie hohe Prüflasten, Crashes usw. zuverlässig ertragen werden müssen, ist der statische Nachweis als eigenständiger Nachweis zwingend erforderlich.

Das Bestreben für den nachfolgend beschriebenen Ansatz war, alle benötigten Informationen aus dem für den Ermüdungsnachweis vorhandenen Kerbspannungsmodell zu gewinnen. Es ist ein pragmatischer, praxisorientierter Ansatz der an Hand von Nahtdetails mit FE-Simulationen überprüft wurde und von Schmied Engineering bei Nachweisen im ungeregelten Bereich angewendet wird. Für komplizierte, dreidimensional verlaufende Nähte stösst auch dieses Vorgehen an Grenzen. Letztlich wird künftig in solchen Fällen nur ein auf der Kerbspannung basierender Ansatz eine befriedigende Lösung bieten können. Man darf diesbezüglich gespannt sein, was die nächste Ausgabe der FKM-Richtlinie bringen wird.

### Lastarten

Das von der FKM angewendete Verfahren für Nahtwurzeln mit den Lastarten ist für FE-Simulationen wenig geeignet. In dem für den Nachweispunkt die ungünstigste Kombination aller möglichen Lasten und Zustände ermittelt und damit die Spannungskomponenten ausgewertet werden, ist der Rechengang wesentlich transparenter und entspricht dem vertrauten Vorgehen.

Für Nahtwurzeln wird das gleiche Vorgehen wie bei den Nahtübergängen gewählt.

Regel 1

### Strukturspannung mittels Innenlinearisierung

Ist einzig ein Nahtübergang nachzuweisen, stehen, wie vorgängig gezeigt, mehrere Konzepte zur Auswahl, um die relevante Strukturspannung zu ermitteln. Sobald aber eine Nahtwurzel zu überprüfen ist, scheiden ausser der Innenlinearisierung alle Konzepte aus. Mit Ausnahme der Frage nach der Pfadwahl gibt es keinen plausiblen Grund, wieso die Innenlinearisierung nicht auch auf Nahtwurzeln angewendet werden könnte. In der Fachliteratur sind dazu bisher jedoch keine Angaben zu finden.

Für Nahtübergänge stehen alle Strukturspannungskonzepte zur Auswahl, für Nahtwurzeln ist die Innenlinearisierung anzuwenden.

Regel 2

Der Nachweis hat an der Stelle mit der höchsten Schädigungswirkung zu erfolgen. Diese eigentlich selbstverständliche Forderung ist in der Praxis nicht ganz einfach zu erfüllen, da der Nachweis für flächenförmige Bauteile mit den Spannungskomponenten zu führen ist. Deren Extremwerte liegen kaum je an der punktgleichen Stelle. Gestützt auf die späteren Ausführungen zur Regel 6 bietet sich zur Lokalisierung der höchsten Beanspruchung die grösste Hauptspannung an. Deren FE-Spannungsbild gibt aber auch nicht unbedingt die ganze Wahrheit wider, da auch die plastische Stützwirkung ortsabhängig ist. Nachfolgende Regel ist somit situativ immer kritisch zu hinterfragen.

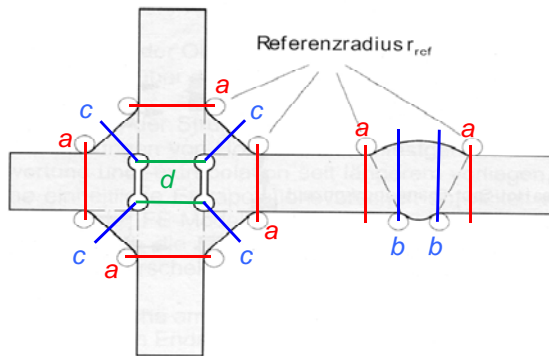
Der Pfad wird an der Stelle mit der grössten Hauptspannung positioniert.

Regel 3

### Pfadwahl zur Innenlinearisierung

Die Pfaddefinition für die Wurzel einer Stumpfnah b) leitet sich von jener des Nahtübergangs a) ab. Bei der Nahtwurzel einer Kehlnah bietet sich der Pfad c) an. Einerseits lehnt er sich damit an den

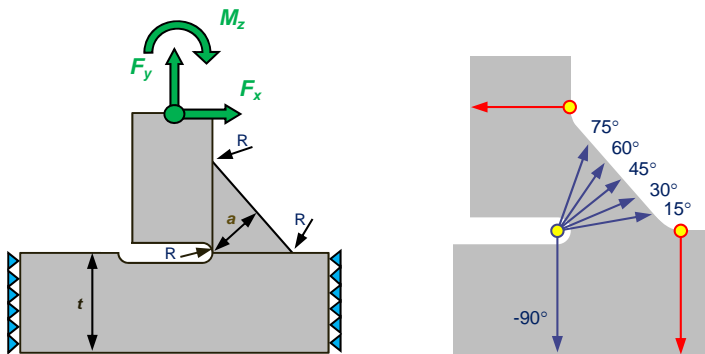
Nachweis des Nahtquerschnitts mit Nennspannungen an und zweitens lässt sich eine einfache Regel festlegen. Nicht zu vergessen ist der Pfad d), falls ein untergeordnetes Bauteil angeschweisst wird und die Naht selber keine relevante Belastung zu übertragen hat.



- a) Nahtübergang
- b) Wurzel von Stumpfnähten
- c) Wurzel von Kehlnähten
- d) Wurzel von Kehlnähten  
(unbelastetes Anschweissteil)

Bild 8 Pfadwahl für Innenlinearisierung

An einem nur einseitig geschweissten T-Stoß wurde die Pfaddefinition c) bei unterschiedlichen Belastungen und geometrischen Verhältnissen mit ANSYS Workbench 12.0 überprüft. Der Referenzradius wurde entsprechend der jeweiligen Blechdicke nach den Empfehlungen in Bild 6 gewählt. Die Neigung des Pfades wurde in 15°-Schritten von 15° bis 75° variiert.



Auslastungsgrade	Kraft $F_x$	Kraft $F_y$	Moment $M_z$
Wurzel -90°	36 - 49%	53 - 62%	25 - 40%
Wurzel +15°	90 - 94%	90 - 92%	91 - 97%
Wurzel +30°	97 - 98%	96 - 98%	98 - 108%
Wurzel +45°	100%	100%	100%
Wurzel +60°	99 - 101%	98 - 100%	98 - 101%
Wurzel +75°	93 - 97%	86 - 92%	96 - 99%

Bild 9 Pfadwahl für die Innenlinearisierung mit ausgewerteten Auslastungsgraden

Einzig beim Winkel 30° gab es bei der reinen Biegemomentbelastung einige Geometrieverhältnisse, bei denen der rechnerische Auslastungsgrad über dem des empfohlenen 45°-Pfades lag. Gestützt auf diese Erkenntnisse wurde die nachfolgende, allgemein formulierte Regel aufgestellt.

Der Pfad hat seinen Ursprung im Zentrum des Referenzradius und steht normal zur Nahtoberfläche.

Regel 4



## Plastische Formzahl für die Strukturspannung

Für flächenförmige Bauteile lässt sich die plastische Formzahl für die Strukturspannung aus der Nennspannung ableiten, in dem nämlich der betrachtete Querschnitt als Rechteck betrachtet wird. Aus der Fachliteratur sind dessen plastische Formzahlen  $K_{p,zd}=1.0$  für die Membran- und  $K_{p,b}=1.5$  für die Biegespannung bekannt. Für die Schubspannung darf nach FKM keine Stützwirkung eingerechnet werden. Für die Kombination aus Membran- und Biegespannung lässt sich damit die plastische Formzahl ermitteln.

$$K_{p,\sigma} = \frac{\sigma_m \cdot K_{p,zd} + \sigma_b \cdot K_{p,b}}{\sigma_m + \sigma_b} = \frac{\sigma_m + 1.5 \cdot \sigma_b}{\sigma_m + \sigma_b} \leq 1.5$$

Formel 7 plastische Formzahlen für die Strukturspannungen

$$K_{p,\tau} = 1$$

Die Formel wurde in ANSYS 12.0 an vier 2D-Nahtdetails im ebenen Dehnungszustand überprüft. Die dazugehörigen Tabellen zeigen die für die Strukturspannung ermittelten plastischen Formzahlen im Verhältnis zu den mit ideal-elastisch-plastischen Materialverhalten ermittelten vollplastischen Grenzlasten. Die  $K_p$ -Werte nach Formel 7 wurden für die jeweils grösste Hauptspannung ermittelt. Die Auswertung zeigt, dass die so errechneten Werte durchwegs unter der elastisch-plastischen Simulation liegen und somit zur sicheren Seite tendieren.

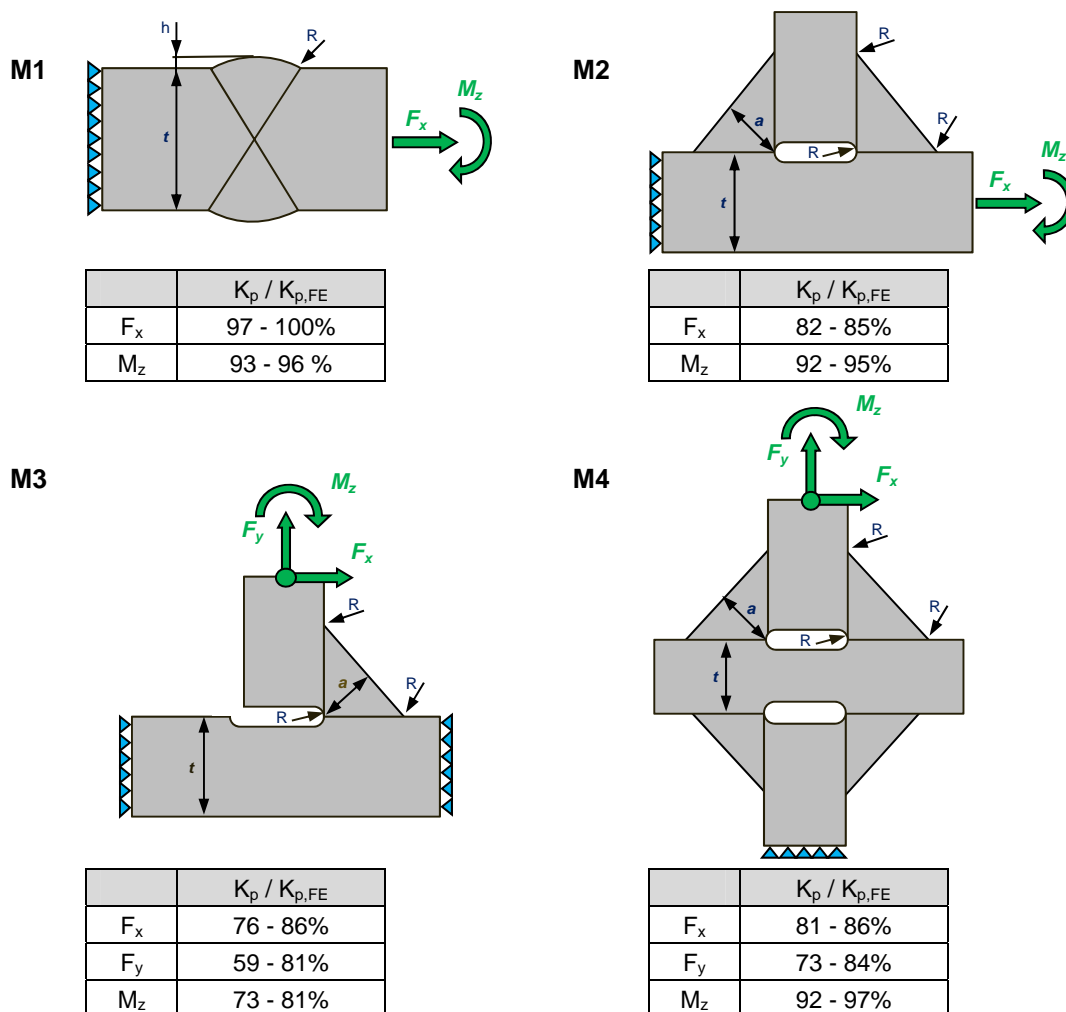


Bild 10 ANSYS-2D-Testmodelle mit Vergleich der plastischen Formzahlen

## Weiterführende Untersuchungen

An den vier untersuchten Nahtdetails wurden zusätzliche Auswertungen vorgenommen.

### Hauptspannung versus Spannungskomponenten

Wie schon erwähnt, wäre der Nachweis als volumenförmige Bauteile mit der grössten Hauptspannung weniger aufwändig, da nur eine Spannung statt drei auszuwerten sind. Die IIW [3] verwendet für die Hot-Spot-Auswertung des Nahtübergangs gemäss nachstehendem Bild stets nur eine Spannungskomponente  $\sigma_{hs}$  und zwar in einem weiten Winkelbereich die grösste Hauptspannung.

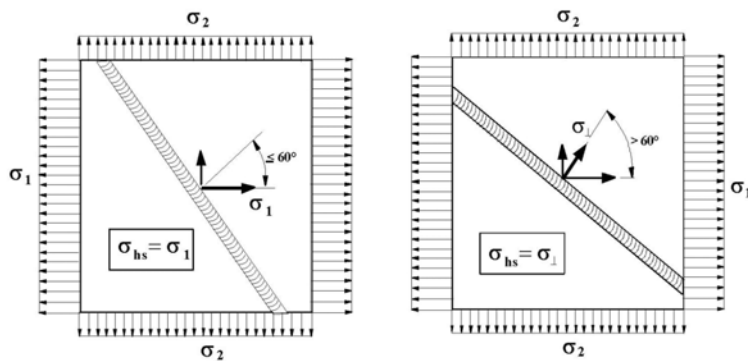


Bild 11 Auszuwertende Spannungskomponente nach IIW [3]

Für die vier Nahtdetails (Bild 10) wurden die Auslastungsgrade der Nachweise mit der grössten Hauptspannung ins Verhältnis gesetzt zu den FKM konformen Nachweisen mit den Komponenten. Die Nahtübergänge ergeben eine recht gute Übereinstimmung. Mehrheitlich tendieren die Ergebnisse zur konservativen Seite. Bei den Nahtwurzeln liegen die Auslastungsgrade für die Hauptspannungen jedoch durchwegs deutlich tiefer. Verantwortlich dafür sind die teilweise hohen Schubspannungen in der Kehlnaht.

Modell & Belastung		Übergang	Wurzel
		$a_{SK, \sigma_1} / a_{SK, FKM}$	$a_{SK, \sigma_1} / a_{SK, FKM}$
M1	$F_x$	98 - 100%	-
	$M_z$	105 - 108%	-
M2	$F_x$	104 - 107%	72 - 74%
	$M_z$	108 - 111%	61 - 67%
M3	$F_x$	94 - 96%	79 - 91%
	$F_y$	122 - 125%	84 - 92%
	$M_z$	105 - 109%	80 - 92%
M4	$F_x$	109 - 113%	65 - 74%
	$F_y$	92 - 94%	81 - 83%
	$M_z$	109 - 112%	42 - 55%

Tabelle 1 Auslastungsgrade für Hauptspannungen im Vergleich zum FKM-konformen Nachweis

Bei Nahtübergängen lassen sich erste Abschätzungen oder sogar Nachweise sehr gut mit der grössten Hauptspannung durchführen. Für Wurzeln ist jedoch davon abzuraten.

Regel 5

## Kerbspannungsmodelle für Dünobleche

Die FKM [1] und IIW [3] definieren bisher für das Kerbspannungsmodell einzig den gut abgesicherten Referenzradius R1. Die Vorarbeiten [2] für die nächste Ausgabe der FKM-Richtlinie beschränken sich weiterhin auf diesen Wert. Nach IIW darf R1 für Blechdicken über 5mm verwendet werden. Ist aber bei einem so dünnen Blech die Wurzel einer Kehlnaht nachzuweisen, werden die Flächenverhältnisse durch die Wurzelmodellierung bereits unverhältnismässig verfälscht.

Gemäss Bild 6 empfiehlt die DVS [4] denn auch, für Bleche unter 10mm die Wurzel mit einem kleineren Referenzradius zu modellieren. Selbstverständlich verursachen die reduzierten Radien von R0.3 oder sogar nur R0.05 im FE-Modell wesentlich höhere Kerbspannungen. Die DVS berücksichtigt dies beim Ermüdungsnachweis mit entsprechend höheren FAT-Klassen.

Die Annahme liegt auf der Hand, dass mit der Innenlinearisierung die unterschiedlichen Kerbwirkungen herausgefiltert werden können und somit immer dieselbe Strukturspannung resultieren sollte. Dies wurde an den vier Nahtdetails bei jenen Blechdicken untersucht, bei denen sich die Empfehlungen für die Referenzradien nach Bild 6 überschneiden. Mittels der elastisch-plastischen Simulation wurden jene Querschnitte bestimmt, die zuerst durchgehend plastifizierten. Bei den Modellen M1 bis M3 war dies unabhängig von der Belastungsart immer der gleiche Querschnitt. Beim Modell M4 war es für  $F_x$  und  $M_z$  der Nahtübergangsquerschnitt und für  $F_y$  der Nahtquerschnitt. Für die so ermittelten Querschnitte wurden die FKM-konformen Nachweise geführt und verglichen. In Tabelle 2 sind die Gesamtauslastungsgrade des jeweils kleineren Radius ins Verhältnis gesetzt zum grösseren. Bei den Nahtübergängen liefern die Radien R0.3 und R1 absolut gleichwertige Ergebnisse. Bei den Radien R0.05 und R0.3 ergibt ersterer immer einen leicht pessimistischeren Wert. Da der kleinere Radius immer ein wesentlich feineres FE-Netz bedingt, ist die Verwendung des jeweils grösseren Radius effizienter. Bei den Nahtwurzeln sind die Abweichungen hingegen deutlich grösser. Die höhere Kerbwirkung wirkt sich trotz der Linearisierung auf die Strukturspannung aus.

	R 0.05 / R 0.3		R 0.3 / R 1.0	
	Übergang	Wurzel	Übergang	Wurzel
M1	101 - 102%	-	100-101%	-
M2	102 - 103%	-	100-101%	-
M3	-	111 - 117%	-	104 - 113%
M4	104 - 106%	109%	101 - 102%	109%

Tabelle 2 Abweichungen der Auslastungsgrade verschiedener Referenzradien

Stehen nach Bild 6 für eine Wanddicke zwei Radien zur Auswahl, darf für den Nahtübergang der grössere verwendet werden. Für die Wurzel wird jedoch der kleinere empfohlen.

Regel 6

## Literatur

- [1] FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 5. Ausgabe 2003
- [2] Verbessertes Berechnungskonzept FKM-Richtlinie, FKM, Heft 306, 2010
- [3] Recommendations for Fatigue Design of welded Joints and Components, International Institute of Welding, 2008
- [4] Festigkeit geschweisster Bauteile, DVS Berichte Band 256, 2009
- [5] Rechnerische Festigkeitsnachweise von Schweissverbindungen, Seminarunterlagen 2010 der CADFEM AG, Autoren Dr. Jürgen Rudolph, Beat Schmied