

Schweisnahtberechnung und Nachweis

>> Aus der Fachliteratur und den traditionellen Regelwerken ist das Nennspannungskonzept für die Schweisnahtberechnung und die Festigkeitsbeurteilung bestens bekannt. Bei Berechnungen mit der Finite Element Methode (FEM) lässt sich dieses Konzept allerdings nur noch beschränkt anwenden. Die FKM-Richtlinie [1] bietet hierzu zwei Alternativen.

Im Folgenden werden die oben erwähnten Konzepte und ihr Zusammenspiel mit der FE (Finite Element)-Berechnung anhand einer konkreten Anwendung beschrieben. Bild 1 zeigt den Laufwagen einer einachsigen Handlinganlage mit Linearmotorantrieb der Firma Güdel AG in Langenthal. Die FE-Berechnungen erfolgen mit ANSYS Workbench mit linear-elastischem Materialverhalten. Beim Festigkeitsnachweis beschränken sich die Ausführungen auf die Ermüdungsproblematik.

Da die Nutzlast der Linearachse, die Zykluszeiten und die Beschleunigungen variieren, entspricht die zeitliche Belastung nicht der für die Dauerfestigkeit sonst üblichen konstanten Sinusschwin-

gung. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem mehrere Lastfälle berechnet werden. An den interessierenden Nahtstellen werden danach die beiden Lastfälle ermittelt, welche die grösste Spannungsdifferenz erzeugen.

Gesamtmodell mit Nennspannungsnachweis

Im 3D-CAD sind die Nähte selten bis nie enthalten. Besteht eine Schweißkonstruktion aus mehreren Bauteilen, würde eine komplette Naht-Modellierung rasch sehr aufwändig. Dazu kommt, dass die Nähte für eine korrekte Spannungsermittlung fein zu vernetzen sind und damit die Re-

chenzeit exponentiell ansteigt. Deshalb wird hier eine Vorgehensmethode beschrieben, mit der sich der Aufwand optimieren lässt.

Im FE-Modell der kompletten Schweißkonstruktion wird auf die Modellierung der Nähte verzichtet. Die Einzelteile des Laufwagens werden in der Simulation mittels Kontakten verbunden. Dabei ist darauf zu achten, dass bei Spaltabständen lokal keine unrealistischen Versteifungen eingebaut werden. In ANSYS Workbench steht hierzu die MPC-Methode zur Verfügung. Sie gewährleistet die korrekte kinematische Kopplung der Bauteile (Bild 2).

Mit diesem Gesamtmodell werden die Verformungen der Struktur berechnet und heikle Stellen lokalisiert (Bild 3). Eine direkte Beurteilung der vom Programm ausgewiesenen Spannungen im Bereich der Kontaktverbindungen ist jedoch nicht zulässig.

Bei geometrisch relativ einfachen Kontaktflächen kann der Festigkeitsnachweis weiterhin mittels des Nennspannungskonzepts durchgeführt werden. Die im jeweiligen Kontakt übertragenen Kräfte und Momente liefert das FE-Programm. Zusammen mit den Flächenkennwerten lassen sich die Nennspannungen ermitteln. Deren Beurteilung kann mit der FKM-Richtlinie oder einem anderen anerkannten Regelwerk erfolgen.

Submodelltechnik

Die im Gesamtmodell als möglicherweise kritisch erkannten Bereiche werden im zweiten Schritt mit der Submodelltechnik näher untersucht. Jeder dieser Bereiche wird aus dem Gesamtmodell herausgeschnitten und in ein eigenständiges Modell abgespeichert. Je nach angewandeter Methode wird nun die Schweißnaht vereinfacht (Strukturspannungskonzept) oder geometrisch korrekt (Kerbspannungskonzept) hinzumodelliert. In der anschließenden Simulation werden vom Programm, die aus dem Gesamtmodell erhaltenen Verformungen an den Schnittflächen des Submodells interpoliert und dem neuen Rechenmodell als Randbedingungen aufgezogen.

Um den Modellierungsaufwand und die Rechenzeit möglichst gering zu halten, ist man bestrebt, das Submodell in den Abmessungen möglichst klein zu halten. Andererseits müssen jedoch die Schnittflächen genügend weit von der auszuwertenden Stelle sein, damit Interpolationsungenauigkeiten und geometrische Unstetigkeiten keine Resultatverfälschung erzeugen (Bild 4). Die Unstetigkeiten ergeben sich insbesondere dort, wo die nachträglich hinzugefügten Schweißnähte bis

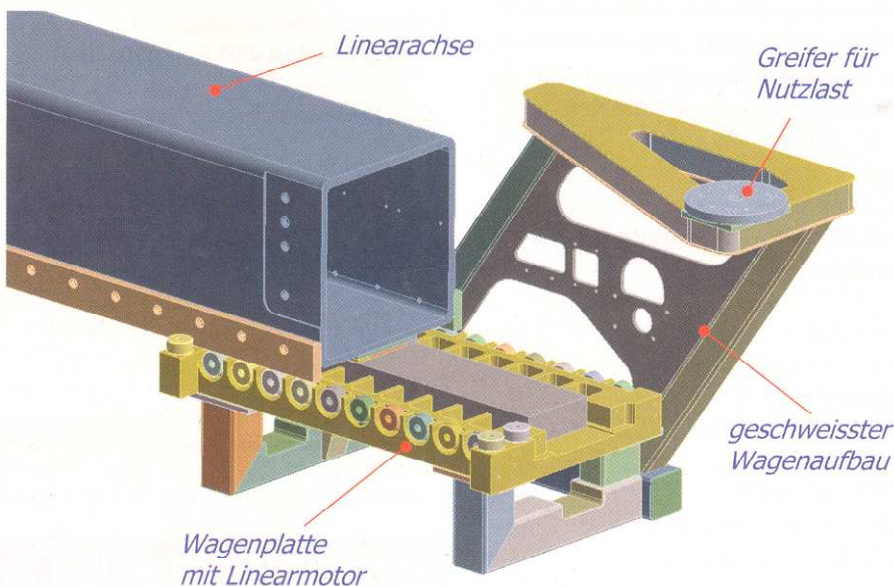


Bild 1: Geschweisster Laufwagen einer Linearachse mit Linearmotor der Firma Güdel AG.

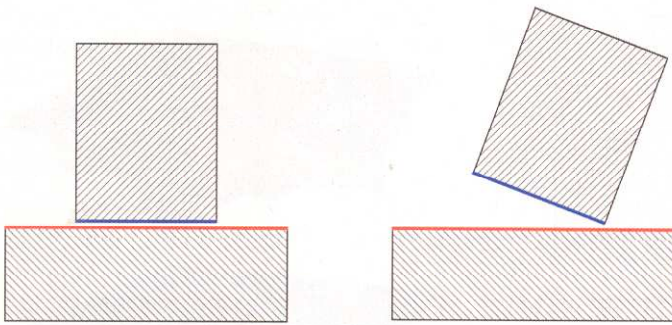


Bild 2: Normaler Verbundkontakt bei geschlossenem Spalt (links), MPC-Kontakt bei offenem Spalt (rechts).

ANSYS

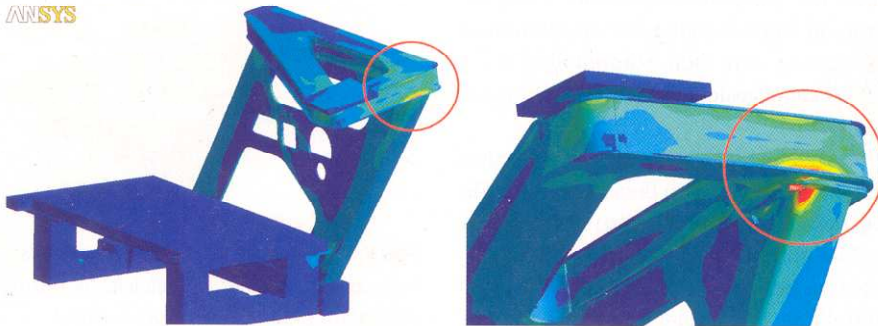


Bild 3: Berechnung des gesamten Laufwagens. Die Ergebnisse werden für die nachfolgende Submodellberechnung gespeichert. Rechts die Schweißverbindung, für welche der Festigkeitsnachweis geführt wird.

an die Schnittflächen des Submodells gezogen werden.

Strukturspannungskonzept

Bei Messungen an realen Schweißkonstruktionen können die Dehnmessstreifen meist nur neben den Nähten angebracht werden. Mit dem Ansatz der Strukturspannungen wird mit diesen ausserhalb liegenden Messwerten eine Aussage über das relevante Spannungsniveau in der Naht gewonnen. Übertragen auf die FE-Berechnung bedeutet dies, dass die Schweißnaht im Gegensatz zum Kerbspannungskonzept nicht detailgetreu zu modellieren ist, sondern vereinfacht werden darf. In der Fachliteratur werden dazu verschiedene Methoden beschrieben.

Die FKM-Richtlinie macht dazu keinerlei Angaben. Für Kehlnähte wurde an der Universität Dortmund von der Arbeitsgruppe Chemieapparatebau die CAB-Methode entwickelt. Sie ist modelltechnisch einfach anzuwenden, da die Naht durch einen simplen, fiktiven Verrundungsradius ersetzt wird (Bild 5). Die Nahtwurzeln lassen sich damit allerdings nicht beurteilen. Mit Messungen wurde die Methode für den Wanddickenbereich von 8 bis 80 mm verifiziert.

Beim Festigkeitsnachweis werden die beiden Nahtübergänge ausgewertet. In die-

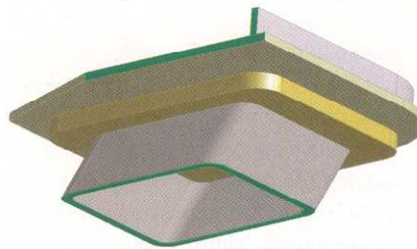


Bild 4: Zugeschnittenes Submodell mit den grün markierten Schnittflächen.

sen Zonen ist deshalb auf eine genügend feine Vernetzung zu achten. Mittels der Vergleichsspannung nach von Mises lassen sich die Stellen mit den höchsten Beanspruchungen lokalisieren. Für den Festigkeitsnachweis werden jedoch die Hauptspannungen benötigt (Bild 6). Für Strukturspannungen definiert die FKM, analog den Nennspannungen, sogenannte Bauteilklassen mit entsprechenden Grenzwerten. So gilt für unbearbeitete Kehlnahtübergänge die Wechselfestigkeit $FAT=100$ MPa (vgl. [1] Tab. 5.4.3 Nr. 400). Gemäss dem Autorenteam der CAB-Methode [2 und 3] würde der Wert 103 MPa betragen.

Kerbspannungskonzept

Bei diesem Konzept wird die Schweißnaht inklusive der Wurzel geometrisch korrekt modelliert. Theoretisch scharfe Übergänge werden mit dem Radius 1 mm verrundet

parts
2clean

Industrielle Teilereinigung

Lösungen für den gesamten Reinigungsprozess. Branchenübergreifend.



Info

Messe Stuttgart, Germany
09. – 11.10. 2007

Hier finden Sie die besten Antworten:

- Für sämtliche Reinigungsaufgaben entlang der Prozesskette
- Durch praxisorientierte Fachvorträge in einem hochkarätigen Anwenderforum
- In der Sonderschau „BASIS-WISSEN Teilereinigung“

www.parts2clean.com



Die FachmesseXperten:

fairxperts GmbH

Hauptstrasse 7 • D-72639 Neuffen

T +49 (0) 7025-8434-0 • F - 8434-20

www.fairxperts.de

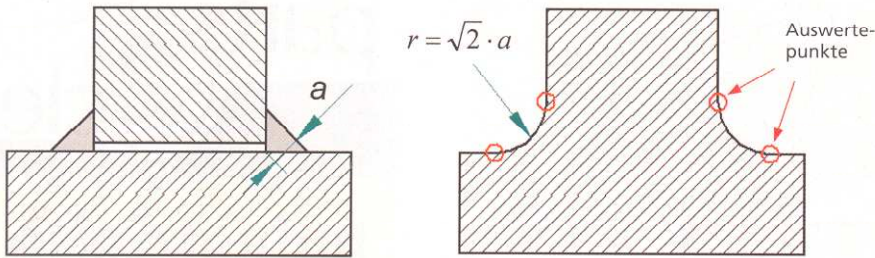


Bild 5: CAB-Methode für Kehlnähte.

(Bild 7). Dieser Ersatzradius stützt sich auf die bekannte Kerbtheorie von Neuber. Der Modellieraufwand ist in der Regel um einiges grösser als bei der CAB-Methode. Es ist nämlich sicherzustellen, dass der Kraftfluss ausschliesslich über die Nähte erfolgt. Dies bedingt bei Kehlnähten entsprechende Freistellungen und sorgfältige Verrundung der Nahtwurzeln. In räumlichen Ecken kann die Modellierung ganz schön knifflig werden.

Diese Methode eignet sich für die Berechnung beliebiger Nahtformen. Bei Blechstärken unter 5 bis 6 mm ist jedoch

Vorsicht geboten, da der 1 mm grosse Radius die Flächenverhältnisse beeinflussen kann. Ein entsprechend kleinerer Radius dürfte in solchen Fällen für den Praktiker die Lösung sein. Den Autoren sind dazu jedoch keine gesicherten Untersuchungen bekannt.

Die höchstbelasteten Stellen befinden sich in der Regel in den Ersatzradien R1. Sie sind deshalb genügend fein zu vernetzen. In der Literatur sind dazu unterschiedliche Angaben zu finden. Die FKM nimmt dazu keine Stellung. Wie immer ist letztlich der Berechnungsingenieur für die Qualität seiner

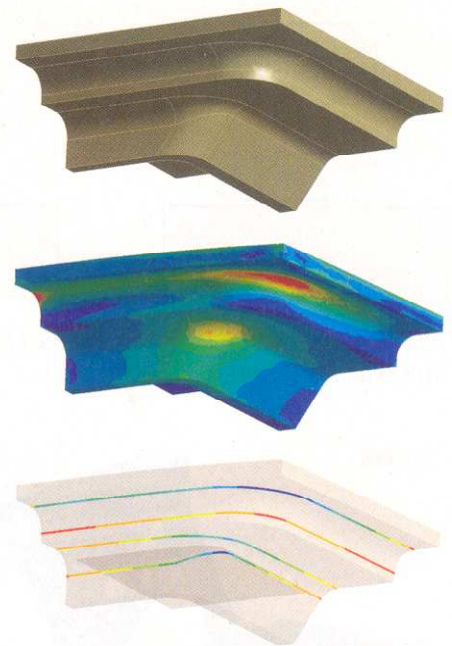


Bild 6: Berechnung des CAB-Submodells; Geometrie (oben) mit Vergleichsspannung (Mitte) und Hauptspannung (unten) entlang den Nahtübergängen.

KURZINTERVIEW ZUM THEMA

Fragen an Beat Schmied:

SMM: So wie Sie das Vorgehen für die Berechnung einer Schweisskonstruktion beschreiben, erscheint der Aufwand beträchtlich. Überprüfen Sie sämtliche Schweissnähte auf diese Weise?

Beat Schmied: In der Regel sind die Nahtüberprüfungen ein Bestandteil der sowieso durchzuführenden FE-Analyse der Gesamtstruktur. Dabei können die paar Stellen mit den höchsten Nahtbeanspruchungen rasch lokalisiert werden. Mit etwas Routine und den geeigneten Hilfsmitteln ist der Nachweis für die Nähte dann keine Hexerei mehr.

Welche Hilfsmittel meinen Sie?

Schmied: In unserem Fall ist es das FE-Programm ANSYS Workbench, in welchem die Submodelltechnik mit einigen wenigen Makrobefehlen sehr einfach und zuverlässig funktioniert. Für den eigentlichen Festigkeitsnachweis haben wir uns in Mathcad die Vorlagen für die verschiedenen Konzepte selber erarbeitet.

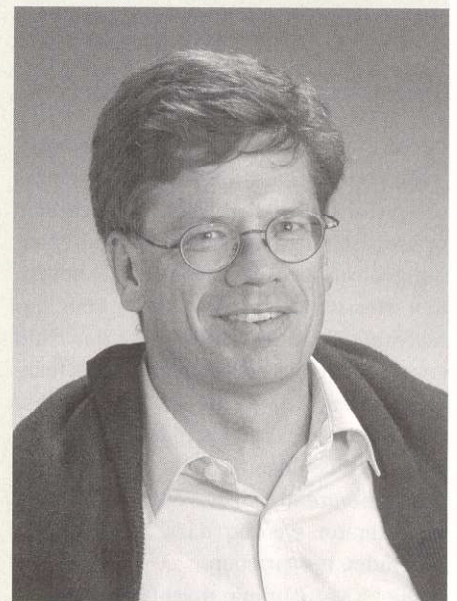
Welches sind die häufigsten Ursachen bei Schweissnahtversagen?

Schmied: Ein einziges Mal war eine zu hohe Belastung in Kombination mit

mangelhaft ausgeführten Schweissnähten die Ursache. Alle anderen von uns untersuchten Schweissnaht-Schadensfälle waren auf ungenaue Angaben auf den Zeichnungen oder auf fehlendes Verständnis für schweissgerechte Gestaltung zurückzuführen. Zu einem grossen Teil liegt die Ursache darin, dass im CAD die Schweissnähte nicht eingezeichnet bzw. modelliert werden. Mit der Floskel «Alle Schweissnähte ...» ist für viele Konstrukteure das Thema erledigt, und die schweisstechnischen Aspekte werden deshalb oft gänzlich vernachlässigt.

Von Ihnen stammt die Aussage: Eine Schweissnaht, die beim Modellieren Mühe bereitet, ist auch beim Bauteil ein «Murks»!

Schmied: Werden beispielsweise einer Kehlnaht in einem Punkt – räumlich gesehen – gleich zwei Richtungsänderungen zugemutet, führt dies häufig schon beim Modellieren zu Problemen. Es ergeben sich Übergänge und Kanten, die nicht regelkonform verrundet werden können. Wenn ich mir dann in der Praxis die Nähte in solchen Ecken anschau, sind sie oft weit von der Idealform entfernt. Liegen sie in einer hoch-



Beat Schmied ist Geschäftsinhaber der Schmied Engineering GmbH.

beanspruchten Zone, beinhalten sie ein erhöhtes Versagensrisiko. Dabei würde in 90 % der Fälle eine kleine Konstruktionsänderung die Situation massgebend verbessern. Mit meiner etwas flapsigen Aussage will ich sagen: Die Sicherheit von Schweissnähten muss in erster Linie konstruiert werden!

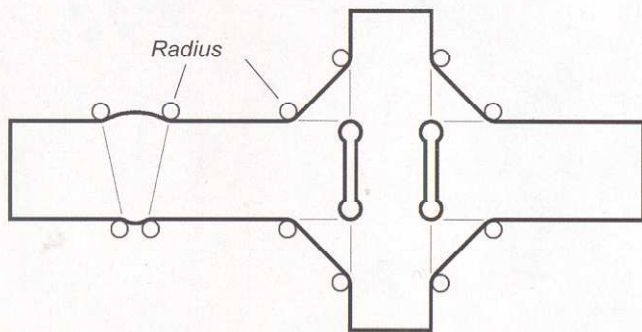


Bild 7: Idealisierung der Nahtgeometrie für das Kerbspannungskonzept.

Analyse verantwortlich. Für die so berechneten örtlichen Spitzenspannungen gilt für den Festigkeitsnachweis nach FKM die Wechselfestigkeit $FAT = 225 \text{ MPa}$ (Bild 8).

Festigkeitsnachweis nach FKM

Unabhängig davon, welches der beiden vorgängig beschriebenen Konzepte angewendet wird, sind für jeden Nachweispunkt und jeden Lastfall die drei Hauptspannungen auszuwerten. Durch Vergleich der verschiedenen Lastfallergebnisse wird vereinfachend die Paarung mit der grössten Spannungsdifferenz ermittelt. Daraus er-

geben sich die Spannungsamplitude und die Mittelspannung. Als Erstes werden diese beiden Werte konstant angenommen, obschon die anderen Lastfallkombinationen tiefere Werte ergeben.

Für fachgerecht geschweisste Bauteile aus schweisbarem Baustahl gilt sowohl für den Nahtübergang wie auch für die Wurzel die Wechselfestigkeit $\sigma_w = 92 \text{ MPa}$. Zu beachten ist, dass dieser Wert unabhängig von der Art des Werkstoffs ist. Eine zu hohe Auslastung einer Schweissnaht kann somit nicht mit einem besseren Material reduziert werden.

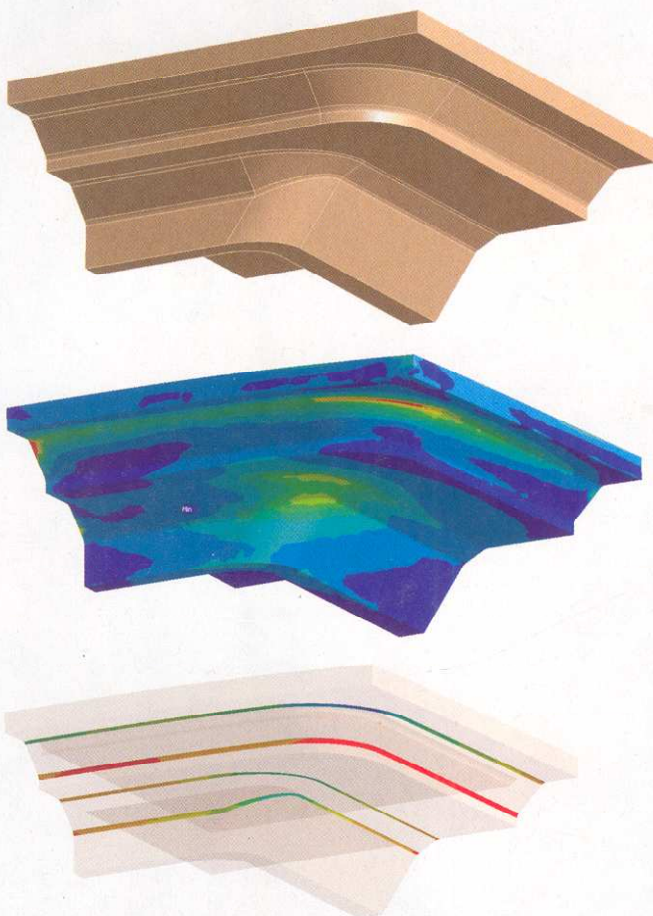
Die Wechselfestigkeit (Amplitude) von 92 MPa bleibt beim Kerbspannungskon-

zept erhalten. Für die CAB-Methode reduziert sie sich jedoch dem FAT-Verhältnis (100/225) entsprechend auf 41 MPa . Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die von der Schweissnaht erzeugte Kerbwirkung bei dieser Modellierungsmethode nicht in Erscheinung tritt.

Erzeugt die Belastung in der Naht keine reine Wechselbeanspruchung, ist dies mit dem sogenannten Mittelspannungsfaktor zu berücksichtigen. Die Besonderheit liegt hier darin, dass die durch den Schweissvorgang erzeugten Eigenspannungen mitberücksichtigt werden. Obige Wechselfestigkeitswerte gelten für hohe Eigenspannungen.

Wird durch geschickte Konstruktion und Schweissfolgeplanung sichergestellt, dass die Eigenspannungen nur mässig oder durch Spannungsarmglühen sogar gering sind, können die Grenzwerte erhöht werden. Bei rein wechselnder Beanspruchung kann diese Verbesserung 50% ausmachen. Je höher die Mittelspannung aber wird, umso kleiner wird dieser Gewinn. Bei hohen Mittelspannungen lässt sich, mindestens aus diesem Standpunkt betrachtet, ein Spannungsarmglühen nicht mehr rechtfertigen.

Als Letztes kann nun noch positiv gewertet werden, dass die Beanspruchung nicht permanent dem eingesetzten Höchstwert entspricht. Für den Fall, dass der zeitliche Verlauf nicht bekannt ist, definiert die FKM sogenannte Normkollektive. In Ver-



$$\text{Auslastungsgrad}_{1,2,3} = \frac{\text{rechnerische Spannungsamplitude}_{1,2,3}}{\text{ertragbare Betriebsfestigkeitsamplitude}} \cdot \text{Sicherheitsfaktor}$$

bindung mit der Lastwechselzahl über die gesamte Lebensdauer des Bauteils ergibt sich die Beanspruchungsgruppe. Für die vorliegende Konstruktion wurde die zweithöchste Gruppe B6 angenommen. Die Grenzamplitude für die sogenannte Bauteil-Betriebsfestigkeit darf dadurch um 36% erhöht werden ([1] Tab. 5.7.1).

Bezüglich Ermüdungsfestigkeit definiert die FKM einen Grundsicherheitsfaktor von $1,5$. Damit können für die drei Hauptspannungsamplituden die Auslastungsgrade ermittelt werden. Ein Auslastungsgrad unter 100% bedeutet, dass zum vorgegebenen Sicherheitsfaktor noch zusätzliche Reserven existieren.

Da die FKM bei Schweissnähten die Normalspannungshypothese vorschreibt, entspricht der höchste Auslastungsgrad der drei Hauptspannungen auch gleichzeitig dem Auslastungsgrad für den räumlichen Spannungszustand.

Bild 8: Berechnung des Kerbspannungs-Submodells; Geometrie (oben), Vergleichsspannung (Mitte) und Hauptspannung (unten) in den Verrundungsradien $R1$.

Konzept	Strukturspannung	Kerbspannung
Berechnete Spannungsvariation	-65 +/- 35 MPa	-110 +/- 75 MPa
Nachweis FKM		
Zulässige Grundamplitude FAT 225	92 MPa	92 MPa
Wechselfestigkeitsamplitude (Reduktion mit Bauteilklasse FAT)	41 MPa	92 MPa
Dauerfestigkeitsamplitude (Einfluss der Mittelspannung)	48 MPa	108 MPa
Betriebsfestigkeitsamplitude (Berücksichtigung Lastkollektiv)	65 MPa	145 MPa
Sicherheitsfaktor	1,5	1,5
Auslastung	80 %	76 %

Bild 9: Vergleich der beiden Nachweiskonzepte.

$$\sigma_v = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

Vergleich der Konzepte

Der Vergleich der beiden Konzepte (Bild 9) zeigt für die beschriebene Anwendung eine sehr gute Übereinstimmung. Dies, obschon die Wandstärke der Vierkantrohre für beide Konzepte unterhalb des jeweils offiziellen Geltungsbereichs liegen. Dass

die CAB-Methode gegenüber dem Kerbspannungskonzept eine leicht höhere Auslastung aufweist, bestätigt mindestens tendenzmässig die Aussage in [2], wonach sie eher konservative Werte liefert. <<

Literatur

- [1] Forschungskuratorium Maschinenbau FKM; Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 2003

- [2] Cadfem AG, Aadorf; Kursunterlagen «Schweissnahtberechnung»
- [3] J. Rudolph, M. Rauth, E. Weiss; Modellgebundener Strukturspannungsnachweis für zyklisch beanspruchte Zylinder-Stützenverbindungen ohne Schweissnahtnachbearbeitung, TÜ-Zeitschrift 43 (2002), Nr. 6, S. 19/26
- [4] J. Rudolph; Zur rechnerischen Bauteil-Ermüdungsfestigkeit unter dem besonderen Aspekt der Schweissnahtnachbearbeitung, Habilitationsschrift Universität Dortmund, 2003

Autoren

Beat Schmied, Masch. Ing. FH
Geschäftsinhaber Schmied Engineering

Lukas Steiner, Masch. Ing. FH
Berechnungsingenieur Schmied Engineering

Information

Schmied Engineering GmbH
Poststrasse 16
4564 Obergerlafingen
Tel. 032 675 12 07
www.schmied-engineering.ch

Güdel AG
4900 Langenthal
Tel. 062 916 91 91
Fax 062 916 91 50
info@ch.gudel.com
www.gudel.com

Bilder: Schmied Engineering

SPRINGMANN

Werkzeugmaschinen / Machines-outils

www.springmann.com



greminger ag
Gewerbstrasse 4
CH-9562 Märwil
Tel. +41 71 655 16 56
Fax +41 71 655 11 71
www.gremingerag.ch

Werkzeugbau
Präzisionsmechanik
Draht-, Senkerosion

