



# maschinenbau



## INDUSTRIEMAGAZIN: ZUM THEMA

Führung 4.0 – So geht  
Zukunft im digitalen Zeitalter

**32**

## DOSSIER: SCHWEISSEN, SCHNEIDEN

Berechnung von  
Schweissverbindungen

**68**

## DOSSIER: ANTREIBEN, BEWEGEN, AUTOMATION

Optoelektronische  
«Universal-Genies»

**84**

**Schwermontagen.**

 **BAUBERGER**  
so reisen Fabriken®

# Berechnung von Schweissverbindungen

Die Praxis zeigt, dass mehr als die Hälfte aller Schadensfälle im Maschinenbau aus Schwingbrüchen entstehen. Gut 50 Prozent davon sind konstruktiven Mängeln zuzuschreiben. Nur ein marginaler Anteil sind, entgegen weit verbreiteter Meinungen, Werkstoff- oder Fertigungsfehler.

Als konstruktive Mängel bei Schweissnähten sind vor allem die Auswahl einer belastungskonformen Schweissnahtform und deren korrekte Dimensionierung zu nennen. In meiner langjährigen praktischen Tätigkeit als Berechnungsingenieur hat sich jedoch ein Aspekt als unumgänglich erwiesen. Die Kenntnis über den Kraftfluss in einer Konstruktion und dessen Visualisierung. Liegt diese Kenntnis vor, so kann gemeinsam mit dem Konstrukteur nach Lösungen für eine ergonomische Gestaltung diskutiert werden. In beinahe aller Fälle tritt bald der sogenannte Aha-Effekt auf. Doch wie kann der Kraftfluss in einer Konstruktion oder gar in einer belasteten Schweissnahtzone sichtbar gemacht werden?

## ZUM AUTOR

Dipl. Wirt. Ing. Martin Weiss  
Geschäftsführer  
WeissQuadrat AG  
Schaanerstrasse 25  
FL-9487 Bendorf

Telefon +43 (0)699 106 044 11  
www.weissquadrat.li  
martin.weiss@weissquadrat.li

Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten Schweissnähte zu berechnen. Zunächst sei die Berechnung von Hand, also mit analytischen Formeln genannt. Eine weitere ist die Anwendung der FEM-Methode (Finite-Elemente-Methode). Sie hat sich bereits derart etabliert, dass viele Behörden auch diese Möglichkeit einer Nachweisführung akzeptieren. Natürlich muss die Berechnungsmethode und die Anwendung von Regelwerken wie zum Beispiel der FKM-Richtlinie (Forschungskuratorium Maschinenbau) oder den Eurocode mit dem Auftraggeber beziehungsweise mit der Behörde vorab geklärt werden.

Besteht die Geometrie aus einfachen Strukturen, oder ist das Nennspannungskonzept aufgrund eines Regelwerks vorgeschrieben, so erfolgt der Nachweis zumeist händisch. Die Berechnung mit Nennspannungen setzt jedoch einen definierten Querschnitt voraus. Dabei bleiben lokale spannungserhöhende Effekte wie Schweissnähte unberücksichtigt. Der Berechnungsablauf richtet sich hierbei nach der technischen Mechanik

und deren Grundbeanspruchungsarten. Probleme kann es mit der Definition des Bezugsquerschnitts bei unterschiedlichen Blechstärken oder mit der Übertragbarkeit von Daten aus Wöhlerversuchen auf das reale Bauteil mit dessen Beanspruchung kommen. Der Fatigue-Katalog (FAT-Klassen) für Nennspannungen stellt sich nämlich recht umfangreich dar.

Bei komplexen Geometrien oder bei Verwendung eines FEM-Programms bietet sich die Berechnung mit Strukturspannungen an. Der Vorteil liegt dabei in der Berücksichtigung von lokalen Effekten und somit von Steifigkeitssprüngen. Geometriedetails wie die Schweissnähte werden hier vereinfacht modelliert und tragen somit zur Bestimmung der Strukturspannung bei, nicht jedoch der Kerbspannung. Kerbdetails wie die Schweissnahtübergänge oder Wurzelfreistellungen bleiben dem Kerbspannungsmodell vorbehalten.

Ob ein Nachweis mit Nenn-, Struktur- oder Kerbspannungen erfolgen muss, ist weitestgehend in den entsprechenden Regelwerken vorgegeben.

## Vorgangsweise

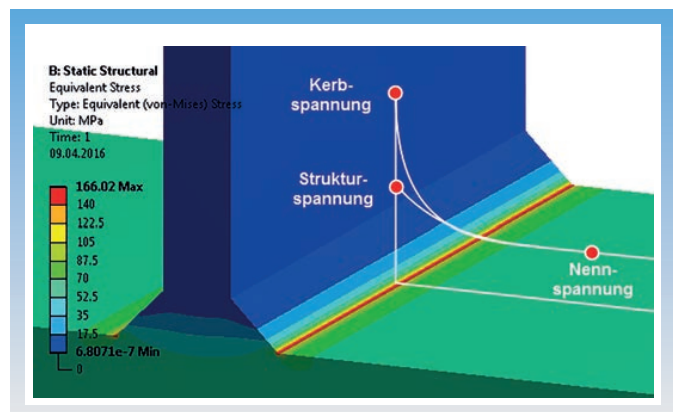
Welche Vorgangsweise hat sich bei der Verwendung eines FEM-

Programms in der Praxis bewährt? Zunächst werden in einem Globalmodell hoch beanspruchte Bereiche, in welchen Schweissnähte vorkommen lokalisiert. Um Rechenzeit und somit Kosten zu sparen, sollten vorhandene Symmetrien genutzt werden. Die Schweissnähte selbst sind dabei geometrisch noch nicht vorhanden. Wie bei einer Baugruppe üblich, sind alle Bauteile mit Kontakte zueinander verbunden. Im Anschluss daran werden diese identifizierten Bereiche mittels der sogenannten Submodelltechnik extrahiert. In diesem Submodell können nun die unterschiedlichen Strukturspannungskonzepte oder auch das Kerbspannungskonzept modelliert, ausgewertet, deren Ergebnisse visualisiert und zueinander verglichen werden.

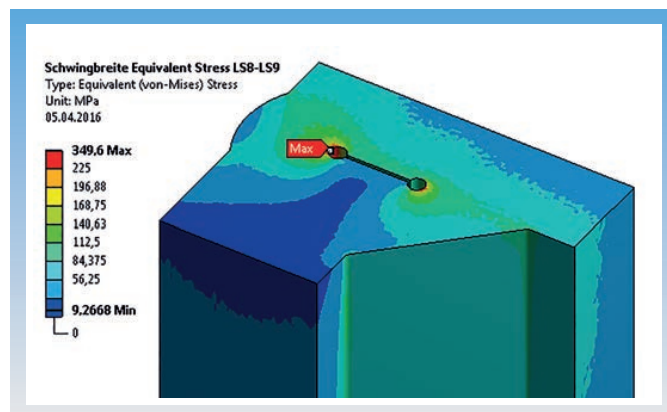
Die FKM-Richtlinie schreibt zwar für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis das Strukturspannungskonzept vor, nicht aber die Methode der Spannungsermittlung. Dies ist eine der wenigen Entscheidungen, welche der Berechnungsingenieur beim Anwenden der FKM-Richtlinie selbst treffen muss. Bei der Verwendung des Kerbspannungsmodells hingegen ist die Modellbildung klar definiert. Im Übrigen setzt die FKM-Richtlinie einen statischen Nachweis dem Ermüdungsfestigkeitsnachweis voraus.

## Strukturspannungskonzepte

Bei der «Hot Spot Extrapolation» werden anhand von Stützstellen im Abstand vom Nahtübergang die Strukturspannung in der Schweissnaht berechnet. Die



Strukturspannung.



Kerbspannung.

IIW (International Welding Association) definiert dabei drei unterschiedliche Extrapolationsmethoden – je nach Anforderungen an den mathematischen Ansatz (linear oder quadratisch) und an die Vernetzung. Der entsprechende FAT-Katalog weist dabei die Ermüdungsfestigkeitswerte bei zwei Millionen Lastwechseln für die entsprechende Schweissnahtform und deren Belastungsrichtung aus. Eine Möglichkeit der praktischen Überprüfung der Berechnungsergebnisse wäre die Anwendung von Dehnmessstreifen. Diese werden an den Stützstellen angebracht und das Abklingverhalten der Strukturspannung gemessen.

Auch Prof. Haibach erkannte schon früh, dass die Kerbspannung am Nahtübergang relativ rasch abklingt und in eine Strukturspannung übergeht. Er brachte deshalb die Dehnmessstreifen in einem diskreten Abstand von 2,5 mm vom Nahtübergang entfernt an. Auch im FEM-Modell wird die Strukturspannung bei dieser Methode an derselben Position entnommen. Am einfachsten ist es, wenn bereits bei der Modellaufbereitung dieser Bereich mittels einer Flächenprägung eingearbeitet wird.

Eine weitere Möglichkeit die Strukturspannungen zu berechnen ist die ASME Innenlinearisierung. Dabei wird ein Pfad direkt durch den Nahtübergang in Richtung Bauteilinnere gelegt. Um eine Singularität am Nahtübergang zu vermeiden, kann bei der erweiterten Methode auch ein Referenzradius zur Entschärfung gelegt werden. Der Spannungsverlauf entlang des Pfades wird in einen Membrananteil einen Biegeanteil und in einer nichtlinearen Spannungsspitze ausgegeben.

Die CAB-Methode mit ihrer fiktiven Nahtausrundung nutzt die im FEM-Modell vorhandenen Volumenelemente um die Steifigkeitsunterschiede und die geometrische Nahtdicke zu berücksichtigen. Zwei Vorteile hat diese Methode. Zum einen werden die Kerbspannungen aufgrund der Nahtausrundung nahezu herausgefiltert, zum anderen kann die Strukturspannung direkt aus dem FEM-Modell entnommen werden.

Ganz gleich, welches Strukturspannungskonzept angewendet wird, die Schweissnaht muss zwingend modelliert werden, da ohne Schweissnaht zu tiefe Spannungswerte ausgegeben werden. Gleichzeitig ist bei allen vorher genannten Möglichkeiten eine Beurteilung der Schweissnahtwurzel nicht möglich. Dies bleibt dem Kerbspannungskonzept vorbehalten.

### **Kerbspannungskonzept**

Das örtliche Konzept der RIMS (Radius 1 mm, Mittelwert, Streuung) Methode beschreibt eine lokale Ersatzgeometrie an der Schweissnaht, da diese einen grossen Einfluss auf die lokalen Spannungen und somit auf die Ermüdungseigenschaften der

Schweissnaht hat. Naturgemäss ist die lokale Geometrie der Schweissnaht in der Praxis von vielen Prozessparametern abhängig und bringt eine gewisse Streuung mit sich. Aufgrund dieser Lokalität hängt die Modellbildung vom jeweiligen Kerbfall ab und repräsentiert eine ideale Schweissnahtgeometrie. Somit ist sie für Stumpf- und Kehlnähte (Nahtübergänge und Wurzel) universell einsetzbar. Versuche haben gezeigt, dass die Ermüdungsfestigkeitswerte innerhalb einer Werkstoffgruppe gleich bleiben, was bedeutet, dass eine Werkstoffkenngrösse pro Gruppe (Stahl oder Aluminium) ausreichend ist. Um keine Querschnittsschwächung bei kleinen Blechdicken hervorzurufen, wird bei Blechdicken von weniger als 8 mm auch ein kleinerer Referenzradius herangezogen. Im Gegenzug dazu gelten dann auch wieder andere FAT-Klassen.

### **Nachweisführung**

Die so ermittelten Spannungskennwerte fliessen anschliessend in die Nachweisführung (zum Beispiel FKM-Richtlinie) ein. Beim statischen Nachweis errechnet sich aus den Werkstoffkennwerten und den Konstruktionskennwerten die Bauteilfestigkeit. Unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren und einer eventuellen plastischen Stützzahl resultiert im Anschluss daran der statische Auslastungsgrad. Beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis sind zunächst ebenfalls die Werkstoffkennwerte und die Konstruktionskennwerte massgebend. Die Bauteilfestigkeit errechnet sich hier jedoch zuerst als Bauteilwechselfestigkeit ohne Berücksichtigung der Mittelspannung. Danach wird die Bauteildauerfestigkeit je nach Mittelspannung ermittelt. Die Bauteilbetriebsfestigkeit richtet sich entweder bei gleichbleibender Amplitude anhand der vorgegebenen Zyklenzahl oder bei veränderlichen Amplituden (Mehrstufenkollektiv) anhand einer Schadensakkumulation. Zusammen mit den Sicherheitsfaktoren ergibt sich dann der zyklische Auslastungsgrad.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass das Nennspannungskonzept bei komplexen Geometrien, für die weder eine Nennbeanspruchung noch eine Schweissnaht-Kerbklasse definiert werden kann, an die Grenzen der Anwendbarkeit stösst. Ein Konzept, welches speziell für Schweissnähte entwickelt wurde ist das Strukturspannungskonzept. Hier wird anhand definierter Kriterien die Spannungsverteilung vor der Schweissnaht bis an den Nahtübergang hin ermittelt. Bereiche wie zum Beispiel die Schweissnahtwurzel, welche nicht zugänglich sind, können ausschliesslich mit einem örtlichen Konzept der Kerbspannungsermittlung untersucht werden. Die Komplexität und somit der Aufwand für eine Beurteilung steigt ebenfalls mit dieser Auflistung rapide an.