

Bild 1

Beim Reibrührschweißen wird durch eine auf den Metalloberflächen sitzende Schulter Reibungswärme erzeugt. Durch Rühren des so erwärmten und plastifizierten Werkstoff mit einem Stift wird die Schweißverbindung hergestellt (Foto: TWI, Ltd.)

# Simulation von innovativer Schweißtechnik in der Luftfahrt

*Seit das Reibrührschweißen 1991 patentiert wurde, hat sich dieses Verfahren zur Herstellung widerstandsfähiger Schweißnähte aus Aluminiumlegierungen in vielen Bereichen durchgesetzt. Auch die Flugzeugindustrie interessiert sich mittlerweile für diese Technologie. Bedeutende Hersteller wie Airbus Industries untersuchen derzeit ihr Potential zur Senkung der Fertigungskosten. Da eine Umrüstung der Fertigungsanlagen im Flugzeugbau jedoch mit enormen Investitionen verbunden ist, muss der Prozess zuerst einmal sorgfältig geprüft und erprobt werden. Mathematische Modelle spielen dabei eine zentrale Rolle.*

Als Verfahren zur Herstellung von Aluminiumverbindungen bietet das Reibrührschweißen (Friction Stir Welding, FSW) eine Reihe wesentlicher Vorteile im Vergleich zum Bogenschweißen oder zu Nietverbindungen. Die Schweißnähte zeichnen sich durch eine höhere Festigkeit und ein geringeres

Gewicht aus und können zügiger hergestellt werden. Besonders gut eignet sich das Verfahren zum Schweißen von Aluminiumlegierungen, die sonst nur schwer zu verbinden sind. Der Prozess führt nur zu geringfügigen Verzerrungen, dickwandige Abschnitte können in einem Durchgang geschweißt werden, und das Schweißergebnis weist hervorragende mechanische Eigenschaften auf.

Beim Reibrührschweißen (Bild 1) wird ein zylinderförmiges Werkzeug, das sich aus einer Schulter und einem Gewindestift zusammensetzt, gedreht und in die Naht zwischen zwei Metallstücken eingeführt. Die rotierende Schulter und in geringerem Umfang auch der Stift erzeugen Wärme, wobei jedoch die Schmelztemperatur des Metalls nicht erreicht wird. Vielmehr bildet der erweichte, plastifizierte Werkstoff eine Festphase, die aus einem feinkörnigen Material ohne eingeschlossene Oxide oder

Gasporosität besteht. Die Verbindung, die durch das vom Werkzeug ausgeübte Quetschen, Rühren und Stauchen entsteht, besitzt eine feinere Mikrostruktur als der Ausgangswerkstoff. Auf diese Weise können sogar artfremde Aluminiumlegierungen verbunden werden. Wie Versuche ergeben haben, können FSW-Verbindungen eine doppelt so hohe Festigkeit erreichen wie Nietverbindungen.

## Flugbereit und klar zum Start

Das Reibrührschweißen wird schon heute in den verschiedensten Bereichen erfolgreich eingesetzt, unter anderem auch in der Luftfahrtindustrie. Im kommerziellen Flugzeugbau setzt sich das Verfahren allerdings nur langsam durch. Da die Implementierung eines neuen Prozesses hier mit extrem hohen Investitionen verbunden ist, muss dessen Eignung zuvor

mit absoluter Sicherheit nachgewiesen werden. So setzt Eclipse Aviation mit Sitz in Albuquerque im US-Bundesstaat New Mexico als bislang einziger Flugzeughersteller auf das Reibrührschweißen. Mit der Eclipse 500 stellt das Unternehmen einen Minijet für sechs Passagiere her, der sowohl vom Anschaffungspreis als auch bezüglich der Betriebskosten das wahrscheinlich günstigste Flugzeug ist, das derzeit in der Kategorie Very Light Jet angeboten wird. Diese wirtschaftlichen Vorteile sind zu einem großen Teil dem Reibrührschweißen zu verdanken, das nach den Erfahrungen des Unternehmens besonders energieeffizient ist. Ein Werkzeug kann im Durchschnitt für eine Schweißlänge von 1000 Metern genutzt werden, es wird weder ein Schweißdraht noch ein Schutzgas benötigt, das Verfahren kann auch von Mitarbeitern ohne Schweißer-ausbildung angewendet werden, und für die Massenproduktion ist

### Autor

Dr. Paul Colegrove  
Lehrbeauftragter für  
Schweißtechnik an der  
Cranfield University

Kontakt zu COMSOL:  
FEMLAB GmbH  
Berliner Str. 4  
37073 Göttingen  
Tel.: 05 51/9 97 21-0  
Fax: 05 51/9 97 21-29  
E-Mail: info@femlab.de  
www.femlab.de  
www.comsol.com

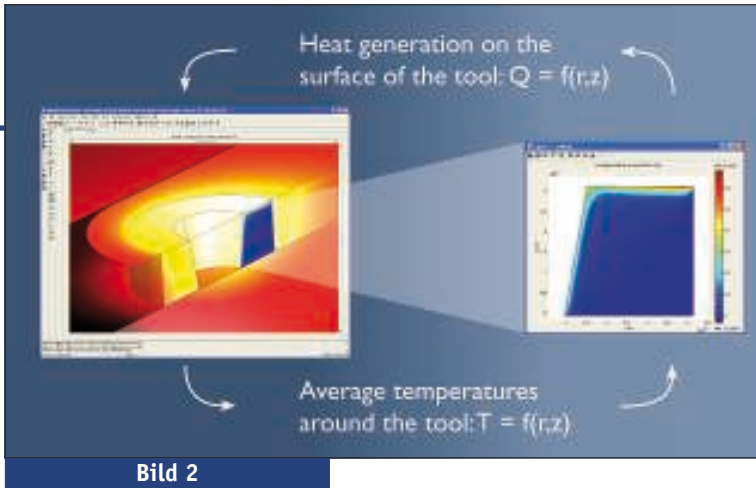


Bild 2

Dieses multiphysikalische Modell des Reibrührschweißens verbindet eine 3D-Wärmefeld- mit einer 2D-achsensymmetrischen Simulation der Drallströmung

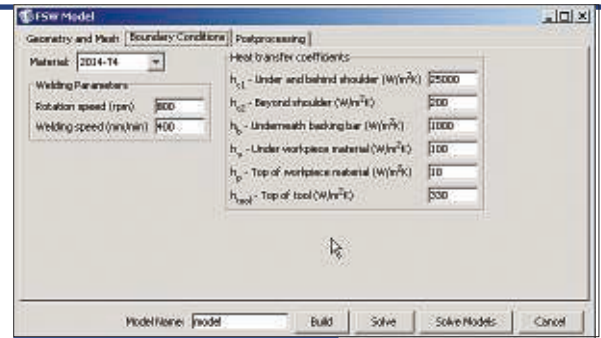


Bild 3

Eine grafische Oberfläche vereinfacht die Analyse verschiedener Werkstoffe und Konfigurationen im mathematischen Modells des Reibrührschweißens

kein Schleifen, Bürsten oder Beizen erforderlich.

Auch der europäische Flugzeugbauer Airbus möchte diese Vorteile nutzen und evaluiert derzeit die Einsatzmöglichkeiten der neuen Technologie in der eigenen Fertigung. Die Nietung ist ein ebenso zeitaufwendiger wie arbeitsintensiver Prozess, sodass eine Umstellung auf fortlaufende Schweißnähte entscheidend zur Beschleunigung der Produktion und zur Kostensenkung beitragen kann. Zudem wird durch die bessere Lastverteilung eine höhere Verbindungsfestigkeit erreicht. Da ein Großflugzeug wesentlich höheren Belastungen ausgesetzt ist als ein Minijet, gelten hier entsprechend strengere Anforderungen an die Dauerfestigkeit. Um jedes Risiko auszuschließen, müssen vor der Einführung eines neuen Verfahrens umfangreiche Tests durchgeführt werden. Die entstehende Wärmemenge und mithin die Qualität der Schweißung hängen von den Eigenschaften des Werkzeugs wie auch von den Betriebsparametern ab. Die verwendeten Rohstoffe, der Durchmesser und die Geometrie des Werkzeugs, die Rotationsgeschwindigkeit, die Laufgeschwindigkeit beim Schweißvorgang oder die Druckkraft sind nur einige der Faktoren, die hier zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus muss der Prozess auf die verwendeten Werkstoffe abgestimmt werden.

Eine von Airbus initiierte Forschungsgemeinschaft hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Entwicklung auf dem Gebiet des Reibrührschweißens voranzutreiben. Das in diesem Artikel vorgestellte Wärmeerzeugungsmodell hat Dr. Paul Colegrove in seiner Zeit an der Uni-

versität von Cambridge entwickelt. Nicholas Kamp, Joseph Robson und Andrew Sullivan von der Universität Manchester haben die Aspekte der Mikrostruktur untersucht.

### Der Blick ins Innere der Schweißnaht

Im Rahmen dieses Projekts wurde zunächst ein mathematisches Modell der Vorgänge beim Reibrührschweißen erstellt. Die Airbus-Ingenieure haben so die Möglichkeit, in die Schweißnaht „hineinzuschauen“ und die Temperaturverteilung sowie die Veränderungen der Mikrostrukturen zu analysieren. Ein von der Arbeitsgruppe entwickeltes Simulationstool stellt eine grafische Oberfläche bereit, mit der die Ingenieure auf einfache Weise die thermischen Eigenschaften und die resultie-

rende Festigkeit der Schweißung untersuchen können.

Das in COMSOL Multiphysics erstellte Modell verbindet eine 3D-Analyse zur Berechnung des Wärmefflusses mit 2D-achsensymmetrischen Simulationen der Drallströmung zur Berechnung der Strömungs- und Wärmeerzeugung (Bild 2). In der Thermoanalyse wird anhand des Wärmestroms an der Werkzeugoberfläche das 3D-Temperaturfeld berechnet. Hierbei werden der Einfluss der Bewegung des Werkzeugs (Translation), die thermischen Grenzbedingungen wie auch die thermischen Eigenschaften des zu schweißenden Werkstoffs erfasst. Anschließend wird im Modell die Temperaturverteilung in der Umgebung der Werkzeugoberfläche aus der dreidimensionalen Begrenzung in die Domäne des zweidimensionalen Teils extrudiert.

Im nächsten Modellteil wird dann die Rotationsströmung des Werkstoffs durch einen zweidimensionalen Querschnitt unterhalb der Schulter ausgewertet. Abschließend wird der Gesamtwärmestrom aus diesem Abschnitt berechnet und wieder an die 3D-Analyse übergeben.

Neben den jeweiligen Modellschnittstellen des „Heat Transfer“-Moduls und des „Chemical Engineering“-Moduls werden in den Analysen spezifische Tools für die Kopplung der Variablen im 2D- und 3D-Modell verwendet. Durch die Nutzung des 2D-Modells konnte der Zeitaufwand für die Berechnungen wie auch der Speicherbedarf verringert werden, wobei die Abweichung gegenüber den 3D-Strömungsmodellen nur ein bis zwei Prozent betrug. Die Analysen werden simultan berechnet, um

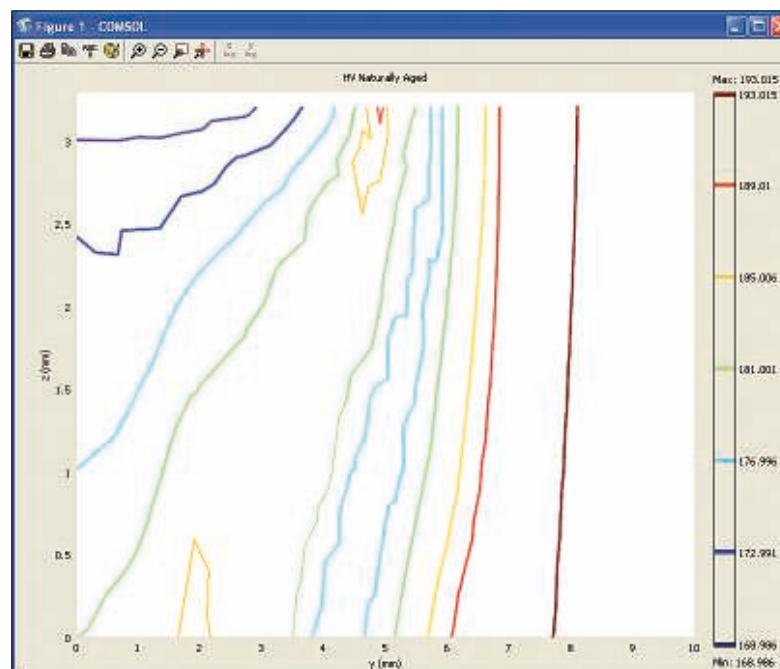


Bild 4

Über die grafische Oberfläche kann beispielsweise dieser 2D-Konturplot ausgegeben werden. Er zeigt die Festigkeit der Schweißung an verschiedenen Stellen. Die blauen Linien in der Mitte kennzeichnen die Bereiche mit der geringsten Härte in der Wärmeeinflusszone

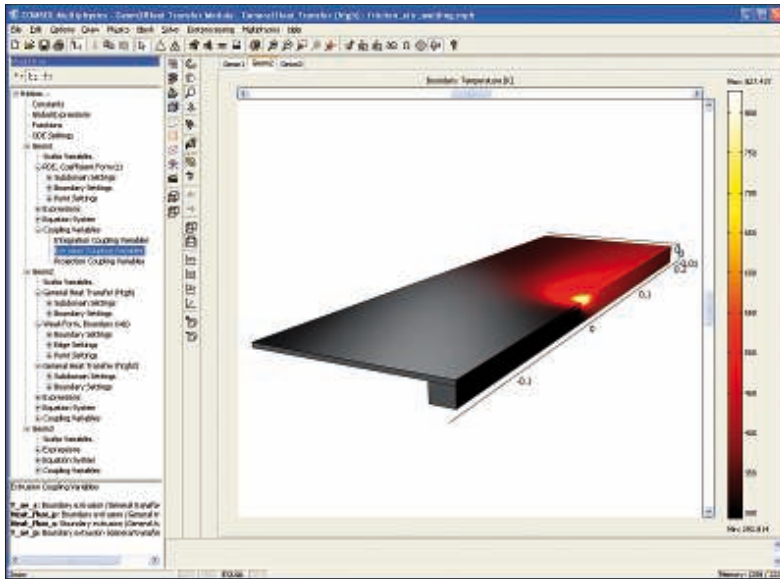


Bild 5

Das 3D-Wärmeprofil  
der Schweißnaht

## Die optimale Modellier- umgebung

Wenn man sich die an das Modell gestellten Anforderungen ansieht, kann man leicht nachvollziehen, warum sich die Arbeitsgruppe für COMSOL Multiphysics als Modellierumgebung entschieden hat. Die Software ist leicht zu bedienen und ermöglicht Verknüpfungen zwischen 2D-achsensymmetrischen Geometrien und 3D-Geometrien, die mit anderen Lösungen nur sehr schwer zu bewerkstelligen wären. Einfach war auch die Einbindung der Mikrostruktur der Werkstoffe, die in MATLAB von MathWorks erstellt wurde. Mit COMSOL Script konnte dann eine grafische Benutzeroberfläche erstellt werden, die den Airbus-Ingenieuren den komfortablen Zugriff auf alle Funktionen des Modells ermöglicht.

Im Rahmen eines von Airbus finanzierten Anschlussprojekts wird das Modell im Hinblick auf die Thermoanalyse und die Untersuchung der Mikrostrukturen weiter verfeinert werden. Mit seinen flexiblen Möglichkeiten zur Simulation komplexer physikalischer Abläufe wird COMSOL Multiphysics weiterhin zum Einsatz kommen. Da das Reib-rührschweißen ein ausgesprochen komplizierter Prozess ist, sind jedoch noch zahlreiche Versuche und umfangreiche Validierungsmaßnahmen erforderlich, um die Genauigkeit des Modells stetig zu verbessern.

ein schnelleres und besseres Konvergieren der Lösung zu gewährleisten.

Wie bereits erwähnt, wurde die Simulation zur Vereinfachung der Handhabung mit einer eigens entwickelten Benutzeroberfläche (Bild 3) versehen, die mit COMSOL Script™ erstellt wurde. Über ein Pull-down-Menü kann der Benutzer einen Werkstoff auswählen; die zugehörigen Mikrostruktureigenschaften werden daraufhin automatisch aus einer Datenbank abgerufen. Werte für die Geometrie des Werkzeugs und die Betriebsparameter können über entsprechende Eingabefelder festgelegt werden. Anhand dieser Angaben wird ein

Konturplot (Bild 4) erstellt, indem der Wärmeverlauf an verschiedenen Punkten des transversalen Querschnitts ermittelt und die resultierende Mikrostruktur des Materials berechnet wird.

Bild 4 zeigt eine typische Ausgabe mit einem 2D-Konturplot der Vickers-Härte des natürlich gealterten Werkstoffs innerhalb eines scheibenförmigen Ausschnitts der Schweißnaht. Die Schweißung erreicht an keiner Stelle die Festigkeit des Ausgangsmaterials (Höchstwert im Farbbalken). Die geringste Härte tritt in der Wärmeeinflusszone durch Auflösung und Überalterung von Härtauscheidungen auf.

Mit dem Simulationstool können auch Wärmeprofile für beliebige Stellen der Schweißung geplottet werden, sodass Ergebnisse aus dem Modell mit Messungen verglichen werden können, die mit einem Thermoelement vorgenommen werden.

Darüber hinaus ermöglicht das Tool die Ausgabe eines 3D-Wärmeprofiles (Bild 5). Hier kann der Ingenieur verschiedene statistische Berechnungen vornehmen und beispielsweise die Schweißtemperatur des Werkstoffs an der Schulter und der Stiftspitze oder die Leistungsaufnahme (bzw. die Wärmeerzeugung) ermitteln.