

Veröffentlicht auf der 19. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen 2004, Duisburg,
Tagungsband

Praxisnahe Finite-Elemente(FE)-Simulation für Problemlösungen auf dem Gebiet der Widerstandsschweißtechnik

Dr.-Ing. M. J. Greitmann, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

1. Einleitung

Für die industrielle Fertigung sind die schweißtechnischen Fertigungsverfahren von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung. Dabei bietet die Widerstandsschweißtechnik ein breites Anwendungsspektrum vom Widerstandspunktschweißen in der blechverarbeitenden Industrie bis zum Kleinteilschweißen in der Feinwerktechnik und Elektronik.

Der technische Fortschritt hat auch eine Reihe von schweißtechnischen Softwareprodukten für die Widerstandsschweißtechnik hervorgebracht, die im Rahmen dieser Ausführung mit Sicherheit nicht vollständig erfasst werden können. Dies gilt um so mehr, als gegenwärtig auch international immer stärkere Aktivitäten auf diesem Gebiet zu beobachten sind. Zum Beispiel werden regelmäßig spezielle Tagungen zu Problemen der Softwareentwicklung auf dem Gebiet der Werkstoffforschung und Schweißtechnik durchgeführt (Veranstaltungen des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS), der Technischen Universität Graz und des The Welding Institute (TWI) Cambridge ...) /1/.

Die Methoden der Finite-Elemente(FE)-Berechnung werden bei der konstruktiven Auslegung und Festigkeitsberechnung von Schweißverbindungen bereits vielfältig eingesetzt /2-4/. Darüber möglichst umfassend zu berichten, würde den Rahmen dieses Beitrags bei weitem überschreiten. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich daher auf die FE-Simulation des Widerstandsschweißprozesses und deren Anwendungsmöglichkeiten in der industriellen Praxis.

2. Widerstandspressschweißen – Ausgangssituation

Die werkstoffkundlichen und verfahrenstechnischen Grundlagen des Widerstandspressschweißens sind den Experten weitestgehend bekannt. Dennoch lässt sich dieses komplexe Schweißverfahren nicht ohne Weiteres an unterschiedliche Gegebenheiten (z.B. neue Fügeaufgaben) anpassen. Vielmehr ist eine Vielzahl von Einflussgrößen zu berücksichtigen, die sich bei der Qualitätssicherung des Widerstandspressschweißens in den Bereichen Werkstoff, Konstruktion und Qualifikation des Verfahrens auswirken:

- Kinematik (mechanisch-dynamische Maschineneigenschaften),
- Kontinuumsmechanik (elastisch-plastische Verformungen),
- Fluidynamik (Verflüssigung, Strömungen),
- Thermodynamik (Wärmeleitung, Phasenübergänge),
- Elektrodynamik (Stromverteilung, Joulesche Wärme, Lorenzkraft)
- Thermoelektrik (Peltier-, Seebeck-, Thomson-Effekt).

Die Vorgänge der zeitlichen und räumlichen Ausbildung des Temperaturfeldes beim Schweißen sind in Fertigungseinrichtungen auch mit modernen Methoden der Thermografie infolge eingeschränkter Zugänglichkeit messtechnisch nur schwer erfassbar bzw. beschränken sich auf die Temperaturverteilung im Bereich der sichtbaren Oberflächen von Elektroden und Fügeteilen. Hier können geeignete Simulationsmethoden dazu beitragen, die Prozessabläufe im Einzelnen besser zu verstehen. Durch eine gezielte Parameterstudie im Modell ist nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik eine Hilfestellung bei der Optimierung schweißtechnischer Prozesse durch richtige Einschätzung/Bewertung von einzelnen Einflussgrößen (aus den Bereichen Werkstoff, Konstruktion oder Fertigungsprozess) möglich. Unabhängig davon werden in der industriellen Praxis experimentelle Arbeiten zur Erstellung von „Schweißbereichsdiagrammen“ mit begleitendem Festigkeitsnachweis (statisch-dynamisch) und metallkundlichen Untersuchungen als Grundlage für eine Fertigungsfreigabe durchgeführt werden.

Generell ist aber davon auszugehen, dass insbesondere numerische Simulationsverfahren das Prinzip „trial and error“ in bestimmten Bereichen der Ingenieurarbeit völlig verdrängen werden /5/. Für die Widerstandsschweißtechnik ist dies u. a. bei der Analyse und Optimierung von Fügeaufgaben zu sehen, für die kein entsprechendes Expertenwissen (Richtlinien, Merkblätter oder Einstelldaten) verfügbar ist.

3. Finite-Elemente(FE)-Simulation des Widerstandspressschweißens

Nachfolgend wird das Zusammenspiel von Füge­teil und Maschine am Beispiel eines gekoppelten FE-Modells für die Widerstandsschweiß­technik beschrieben. In einem ersten Programmschritt wird durch eine strukturmechanische Kontaktberechnung (elastisch-plastisches Werkstoffverhalten) die Verformung von Elektroden und Füge­teilen beim Aufsetzen der Elektroden berechnet. Bei der anschließenden gekoppelten Rechnung (elektrisch-thermisch bzw. elektrisch-thermisch-mechanisch) wird in weiteren Programmschritten das instationäre Temperaturfeld und die weitere instationäre Verformung im Bereich von Elektroden und Füge­teilen während des Schweiß- und Abkühlvorgangs berechnet. Berücksichtigt werden hierbei nichtlineare Werkstoffeigenschaften und ein Modellansatz der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart zur Beschreibung des Kontaktwiderstandes.

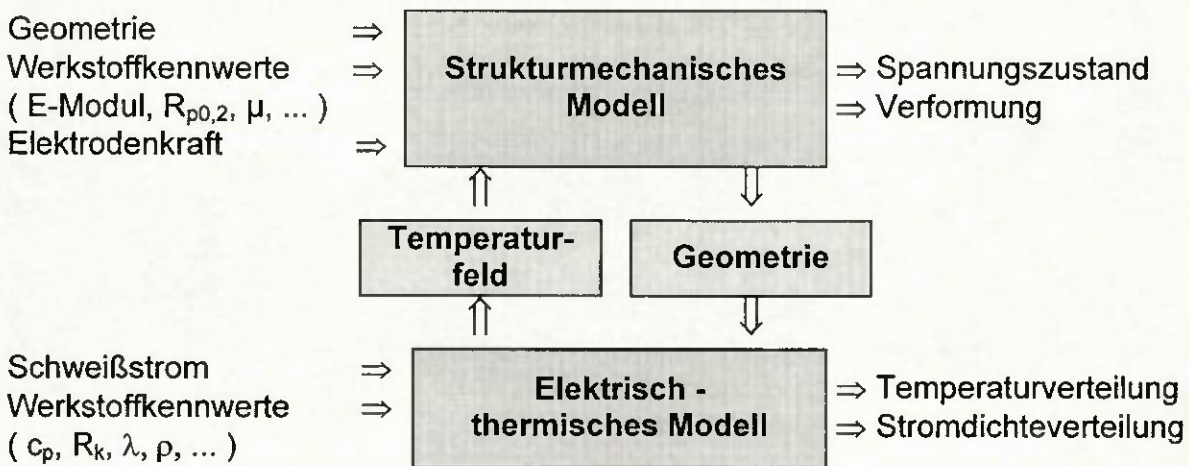


Bild 1: Programmablauf bei direkter elektrisch-thermischer Kopplung und sequentieller Kopplung zwischen elektrisch-thermischer und strukturmechanischer Berechnung /6/

Eine Visualisierung der berechneten Spannungsverteilung und Verformung, der Temperatur-, Stromdichte- oder Potentialfelder kann in Form von räumlichen Schnitten erfolgen. Darüber hinaus können einzelne Prozessgrößen (lokale Temperatur...) als zeitabhängige Ergebniskurven dargestellt werden.

4. Datenbasis

Für eine Finite-Elemente(FE)-Simulation des Widerstandspressschweißens werden Daten zur Beschreibung der Geometrie (Elementstruktur), der Werkstoffe (Stoff- und Oberflächeneigenschaften) und der Schweißeinrichtung (Stromquelle und mechanische Maschineneigenschaften) benötigt.

4.1 Stromquelle

Die Wirkung von Stromquellen lässt sich als zeitlich veränderliche Größe des Schweißstroms, der Sekundärkreis­spannung oder - im Falle einer sequentiellen Verknüpfung mit dem jeweiligen Widerstand der FE-Struktur – der elektrischen Leistung als äußere Last im FE-Modell darstellen. So kann beispielsweise der Schweißstrom als zeitabhängiger Verlauf (Wertepaare an zeitlich aufeinander folgenden (sequentiellen) Stützstellen) dem FE-Programm als zeitlich veränderliche Last vorgegeben werden. Parameterstudien mit unterschiedlichem Stromanstieg oder variabler Stromstärke lassen sich so einfach realisieren.

4.2 Mechanische Maschineneigenschaften

Beim Widerstandspunktschweißen ist das elastische Aufbiegen der Schweißzange und das daraus resultierende Schiebehaviorhalten von Einfluss auf die Kontaktverhältnisse. Bezüglich des Nachsetzens reicht die elastische Vorspannung für eine sichere Kraftaufbringung beim Punktschweißen im allgemeinen aus. Beim Widerstandsbuckelschweißen können sich hingegen abhängig von den mechanischen Maschineneigenschaften Einbrüche in der Elektrodenkraft einstellen, Bild 2.

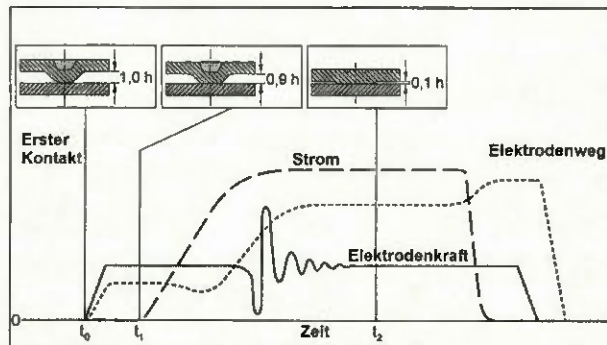


Bild 2: Prozessablauf beim Widerstandsbuckelschweißen

Vor diesem Hintergrund ist auch in FE-Modellen ein Ansatz für die mechanisch-dynamischen Maschineneigenschaften zu berücksichtigen. Dabei können drei unterschiedliche Vorgehensweisen unterschieden werden:

- Starre mechanische Antriebe (z. B. Kuvenscheibe):
Die Aufsetz- und Nachsetzbewegung kann hierbei im Modell als zeitlich veränderliche Verschiebung der Lasteinleitungsknoten der FE-Struktur aufgezwungen werden (weggesteuerter Prozess).
- Gekoppelte Feder-Masse-Dämpfer-Systeme, Bild 3 (links):
Hierbei werden im Maschinenersatzmodell den einzelnen Maschinenkomponenten (beispielsweise: C-Gestell, Nachsetzeinheit) entsprechende Feder-Masse-Dämpfer-Elemente zugeordnet. Die jeweilige Elektrodenkraft kann durch eine entsprechend vorgespannte Feder in diesem System simuliert werden. Die Lasteinleitung (Beaufschlagung mit der jeweiligen Elektrodenkraft) erfolgt über einen Knotenpunkt, in welchem die FE-Struktur mit dem Feder-Masse-Dämpfer-Element der Nachsetzeinheit gekoppelt wird.
Die Federsteifigkeiten c_G oder c_N können beispielsweise aus der Federkennlinie auf einfache Weise bestimmt werden. Die jeweiligen physikalischen Ersatzmassen m_G oder m_N und die Dämpfungskennwerte bedürfen hingegen einer Modalanalyse des jeweiligen Schwingersystems. Aus den jeweiligen Eigenresonanzen und dem logarithmischen Dämpfungsdekrement können die physikalischen Ersatzmassen m_G oder m_N und die Dämpfungskennwerte bestimmt werden. Bei Schweißzylindern an stationären Widerstandsschweißmaschinen lässt sich die Masse m_N durch Wiegen bestimmen (Massen des Kolbens, Elektrodenhalters, Elektrode und Massenanteil der beweglichen Stromzuführung).
- Strukturmechanisches Maschinenmodell (FEM):
Bei diesem mechanische Maschinenersatzmodell, Bild 3 (rechts), werden Komponenten der Widerstandsschweißeinrichtung durch eine Finite-Elemente-Struktur

abgebildet. Abhängig von der äußeren Last (Kraft, Moment oder Verschiebung) können Elektrodenkräfte über die Randbedingungen des Modells aufgebracht werden.

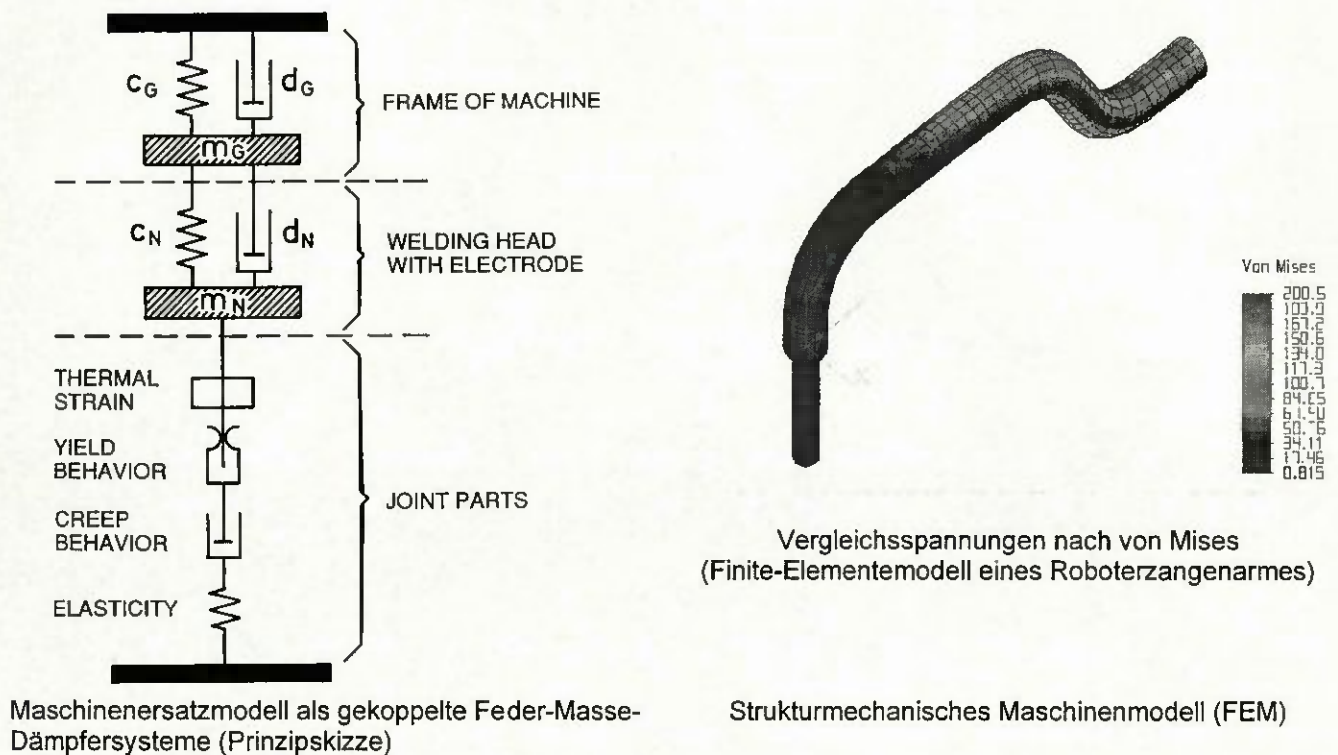


Bild 3: Widerstandsschweißen – mechanische Maschinenersatzmodelle

4.3 Werkstoffmodelle und Werkstoffkennwerte

Die praktische Anwendung schweißtechnischer Software erfordert die Kenntnis entsprechender Werkstoffkennwerte der jeweils eingesetzten Werkstoffe. Dies gilt hinsichtlich der Simulation von Schweißprozessen sowohl für die Zustandsschaubilder und Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder als auch für die thermophysikalischen und thermomechanischen Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit von Werkstoffzustand, Dehngeschwindigkeit und Temperatur. Die Simulation von Widerstandsschweißprozessen erfordert darüber hinaus auch Modelle zur Beschreibung der Kontaktwiderstände.

Bild 4 gibt einen generellen Überblick über die zur Modellierung des Widerstandsschweißens notwendigen temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte.

Die Werkstoffdatenbank FEZEN enthält Kennwerte für metallische Werkstoffe. Es sind etwa 450 Werkstoffblätter nach DIN-Normen und ca. 800 Werkstoffblätter nach EN-Normen gespeichert. Zusätzlich steht eine Gegenüberstellung der neuen europäischen Werkstoffnamen mit den alten Bezeichnungen gemäß DIN zur Verfügung.

Das Programm QD-Stahl ermöglicht die Suche nach Stahlsorten nach bestimmten Auswahlkriterien z. B. dem Verwendungszweck oder der Werkstoffnummer. Die Werkstoffhersteller bieten elektronische Kataloge an zur Auswahl von Grundwerkstoffen und Schweißzusatzwerkstoffen (z. B. WELCOME, Al-Schlüssel, WELDPRODUKT).

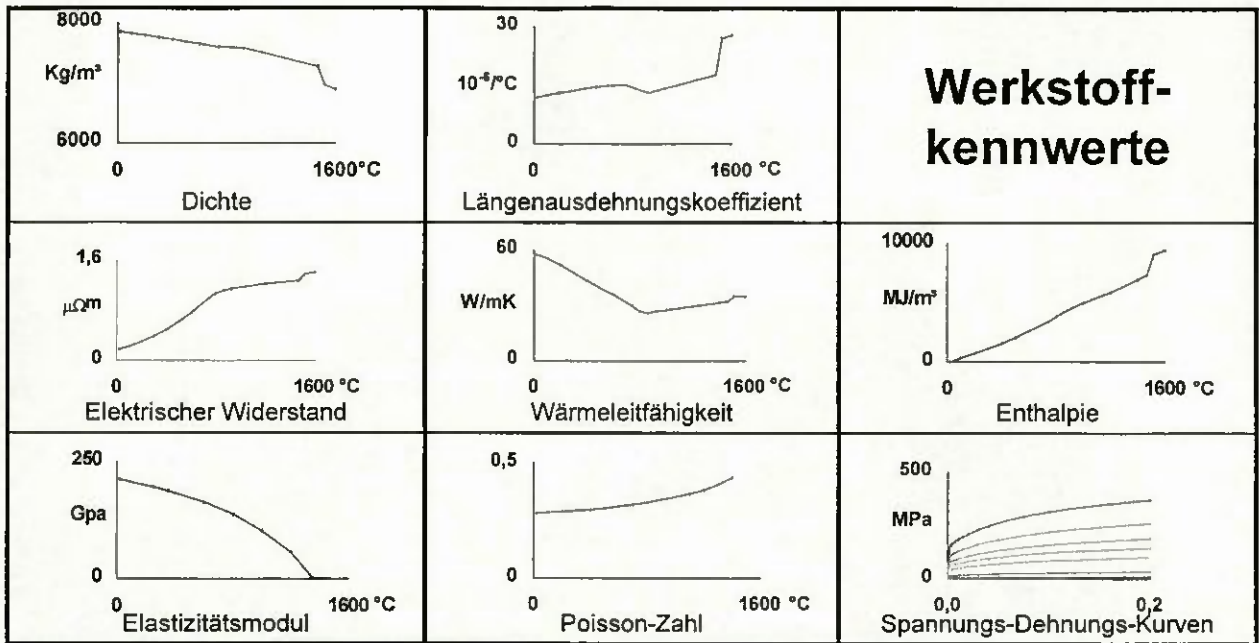


Bild 4: Temperaturabhängige Werkstoffkennwerte für die FE-Simulation des Widerstandsschweißprozesses

E-Modul und Querkontraktionszahl können temperaturabhängig auf vorhandenen Grindosonic-Hochtemperatur-Anlagen, Wärmeausdehnungskoeffizienten, Fließverhalten und Umwandungsverhalten können mit thermo-mechanischen Prüfsystemen ermittelt werden. Für die Ermittlung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, der Wärmekapazität oder der Enthalpie stehen dem Anwender Prüflaboratorien mit entsprechender Gerätetechnik zur Verfügung.

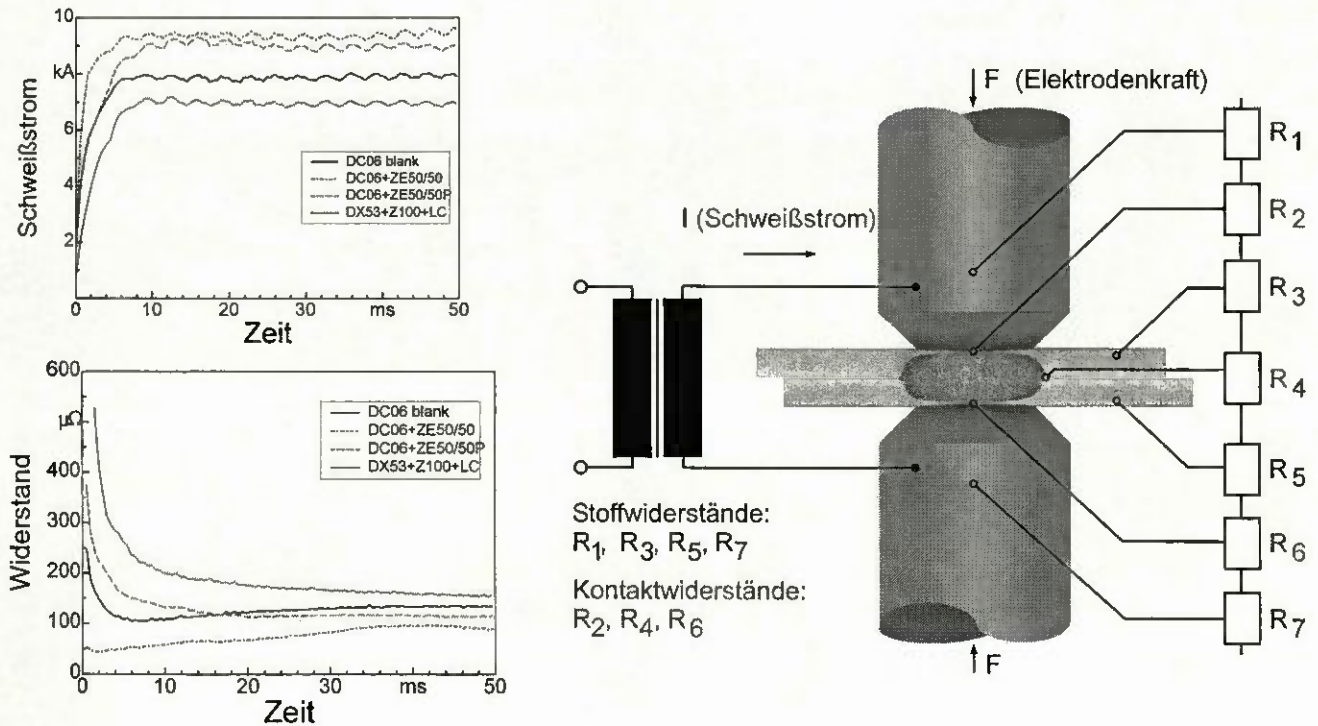


Bild 5: Elektrische Teilwiderstände beim Punktschweißen (rechts) und zeitlicher Verlauf des Übergangswiderstands beim Punktschweißen von Stahlblechen unterschiedlicher Oberflächenmodifikation (links) //

Die Art und Ausführung einer Beschichtung (u.a.: Überzugswerkstoff(e), einseitige oder beidseitige Beschichtung, Texturierung, Reinigungsprozess, Vorbehandlung, Applikation von Schmierstoffen) haben einen signifikanten Einfluss auf den Kontaktwiderstand. Als Beispiel hierfür zeigt Bild 5 den zeitlichen Verlauf des Übergangswiderstandes beim Punktschweißen von Stahlblechen unterschiedlicher Oberflächenmodifikation. Eine der umfassendsten Untersuchungen zum Themenbereich des elektrischen Kontaktes zwischen elektrisch leitfähigen Körpern enthält /8/.

Die wirklichkeitsnahe Modellierung des Kontaktwiderstandes im Rahmen der Prozesssimulation des Widerstandsschweißens ist schwierig, da sich Auf- und Abbau des Kontaktwiderstandes einer vereinheitlichten makroskopischen Beschreibung in vieler Hinsicht entzieht. In /9/ werden hierzu einige Modellansätze verschiedener Autoren näher beschrieben, beispielsweise für das Punktschweißen von Stahlblechen, wobei der Kontaktwiderstand mit steigender Flächenpressung und steigender Temperatur in der Kontaktfläche abfällt.

Die am Markt verfügbaren Finite-Elemente(FE)-Programme enthalten entsprechende Kontaktelemente anhand derer eine Modellierung des mechanischen, elektrischen und thermischen Kontaktes möglich ist. Damit können unterschiedliche Modelle zur Beschreibung des Kontaktwiderstandes in die FE-Struktur implementiert werden.

5. Schweißtechnische Softwareprogramme für das Widerstandspressschweißen

Die numerische Simulation der Widerstandspressschweißverfahren erfordert eine Kopplung elektrischer, thermodynamischer und strukturmechanischer Modelle. Erste Modelle zur Berechnung von Temperaturfeldern beim Widerstandspunktschweißen wurden auf Basis der Methode der Finiten Differenzenverfahren anfang der 80er Jahre entwickelt /10/.

Die Methode der Finiten Differenzen:

Das Programm SPOTSIM basiert auf der Methode der Finiten Differenzen und ermöglicht die Berechnung und Darstellung der Linsenausbildung beim Widerstandspunktschweißen un- und niedriglegierter Stähle. Berücksichtigt werden dabei die Elektrodengeometrie, die elektrischen und mechanischen Parameter der Schweißanlage sowie verschiedene Grundwerkstoffe /9/.

Die Methode der Finiten Elemente (FEM):

Das Programm SYSWELD basiert auf den Routinen des Finite-Elemente(FE)-Programms SYSTUS, einer Entwicklung von Framasoft. Die Ursprünge dieses Programms stammen aus Modellen zur Gefügeumwandlung beim Induktionshärten, welche später auf schweißtechnische Anwendungen (Schmelzschweißen, Widerstandsschweißen) erweitert wurden.

Von Zhang et al. wurde das FE-Programm SORPAS für die Widerstandsschweißtechnik entwickelt /17/. Dieses basiert auf einem eigens hierfür geschaffenen FE-Code für eine gekoppelte elektrisch-thermisch-mechanische Simulation. Das Programm SORPAS bietet dem Benutzer eine funktional und übersichtlich eingerichtete Benutzeroberfläche. Es wurde bereits in einer Reihe industrieller Anwendungen (Punkt- und Buckelschweißungen) erfolgreich eingesetzt.

Ausgehend von den Arbeiten aus /11/ wurde an der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart das numerische Rechenprogramm CARE-Weld (Computer Aided Resistance Welding), welches Methoden der Finiten Differenzen einsetzte, unter Nutzung der FE-Software ANSYS zum Prozessanalyseprogramm SPOTWELDER für die Widerstandsschweißtechnik erweitert.

Der Grund für diesen Schritt waren die Verfügbarkeit entsprechend leistungsfähiger Finite-Elemente-Programme (u.a. ANSYS, ABAQUS, SYSTUS) und die Möglichkeit zu deren Kopplung mit am Markt verfügbaren CAD-Softwaretools. Die Methode der Finiten Elemente bietet auch die Möglichkeit einer über eine Simulation des Schweißprozesses hinausgehenden nachgeschalteten strukturmechanischen Festigkeitsberechnung der Fügeverbindung bzw. von ganzen Bauteilstrukturen. Entsprechend sind zukünftig innovative Lösungen für die CIM-Technologie (Computer Integrated Manufacturing) zu erwarten, in welchen sich beispielsweise verkettete Prozesse in einer ganzheitlichen FEM-Analyse

untersuchen lassen (z.B. Simulation des Umformprozesses + Simulation des Widerstandsschweißprozesses + Festigkeitsberechnung der Bauteilstruktur einschließlich der einzelnen Fügstellen).

Die am Markt verfügbaren FE-Programme sind sehr leistungsfähig und erlauben es dem Anwender eine auf seine Bedürfnisse zugeschnittene Programmlösung zu entwickeln. Hier zeichnet sich ein erweitertes Tätigkeitsfeld für Ingenieurdienstleitungen ab. Auch lassen sich nach unserer bisherigen Erfahrung bei den auf diesem Gebiet tätigen Forschungsstellen und Ingenieurbüros mit finanziell überschaubaren Mitteln bereits für eine Reihe erprobter Anwendungsfälle kundenspezifische FE-Problemlösungen realisieren.

Von Neueinsteigern auf dem Gebiet der Simulation des Widerstandsschweißens werden z. T. der Aufwand für die Modellierung und Verifizierung der Kontaktwiderstände oder von extremer viskoplastischer Umformung unterschätzt. Dies kann zu unbefriedigenden Ergebnissen oder zu erhöhtem Aufwand (entsprechend erhöhten Projektkosten) führen. Andererseits werden entsprechend leistungsfähige numerische Simulationsverfahren das Prinzip „trial and error“ auch in bestimmten Bereichen der Widerstandsschweißtechnik weiter verdrängen.

Voraussetzung für die stetig wachsende Anzahl von schweißtechnischen Softwareprodukten ist die zwischenzeitlich hohe Leistungsfähigkeit der verfügbaren Hard- und Software und ausreichende Mengen an verlässlichen Eingangsdaten für die jeweiligen Programme. So können heute auch komplexe Simulationsaufgaben und enorme Datenmengen für eine Reihe von Aufgaben auf Workstation- oder PC-Plattformen realisiert werden und sind damit auch für kleinere und mittlere Unternehmen interessant.

6. Anwendungsbeispiele

Im nachfolgenden Abschnitt werden praxisnahe Finite-Elemente(FE)-Simulationen für Problemlösungen auf dem Gebiet der Widerstandsschweißtechnik dargestellt und dabei Besonderheiten zu den einzelnen Anwendungen erörtert.

6.1 Widerstandspunktschweißen

Neben den grundlegenden Parametern Schweißstrom und Elektrodenkraft bestimmen im wesentlichen der Blechwerkstoff, die Oberflächenbeschaffenheit der Bleche und die Ausführung der Punktschweißelektrode (Elektrodengeometrie) den Prozessablauf. Deutlich zeigt sich dies für verschiedene Oberflächenqualitäten im zeitlichen Verlauf des Übergangswiderstandes, vgl. Bild 5. Darüber hinaus verändern sich mit fortschreitendem Prozess die Größen der Kontaktflächen, sowohl zwischen den Blechen aber auch zwischen Elektrode und Blech insbesondere beim Einsatz balliger Elektroden.

Neben der Formulierung eines geeigneten Modells für den Kontaktwiderstand, ist eine realitätsnahe strukturmechanische Berechnung zur Beschreibung der sich ändernden Kontaktflächen im FE-Modell umzusetzen. Der Zunahme der Kontaktflächen durch aufschmelzende metallische Überzüge (z. B. verzinnete Teile in der Elektrotechnik, verzinkte Stahlbleche im Karosseriebau) wird in den Modellansätzen der bisher am Markt befindlichen FE-Programme nur mit Einschränkungen Rechnung getragen. Dennoch bietet sich die FE-Simulation für eine Reihe von Aufgaben der Prozessanalyse und -optimierung an. Mit Hilfe von Finite-Elemente(FE)-Simulationen können selektiv eine Reihe von Prozesseinflussgrößen auf die Ausbildung der Schweißlinse betrachtet werden. Hierzu zählen u. a. Variation der Werkstoffauswahl, der Elektrodengeometrie, der Blechdicke, des Kontaktwiderstands und räumliche Problemstellungen wie Fügebauteilstrukturen mit Nebenschluss und Rechnungen mit räumlich versetzten Schweißwerkzeugen zur Simulation des Schiebeverhaltens von Roboterschweißzangen.

Die Berechnungen werden im Allg. mit parametrisierten zwei- und dreidimensionalen Modellen durchgeführt, so dass eine einfache Anpassung der FE-Struktur an andere Aufgabenstellungen möglich ist. Bild 6 zeigt ein Beispiel für eine FE-Simulation des Widerstandspunktschweißens von Stahlblechen gleicher und unterschiedlicher Blechdicken /12,13/.

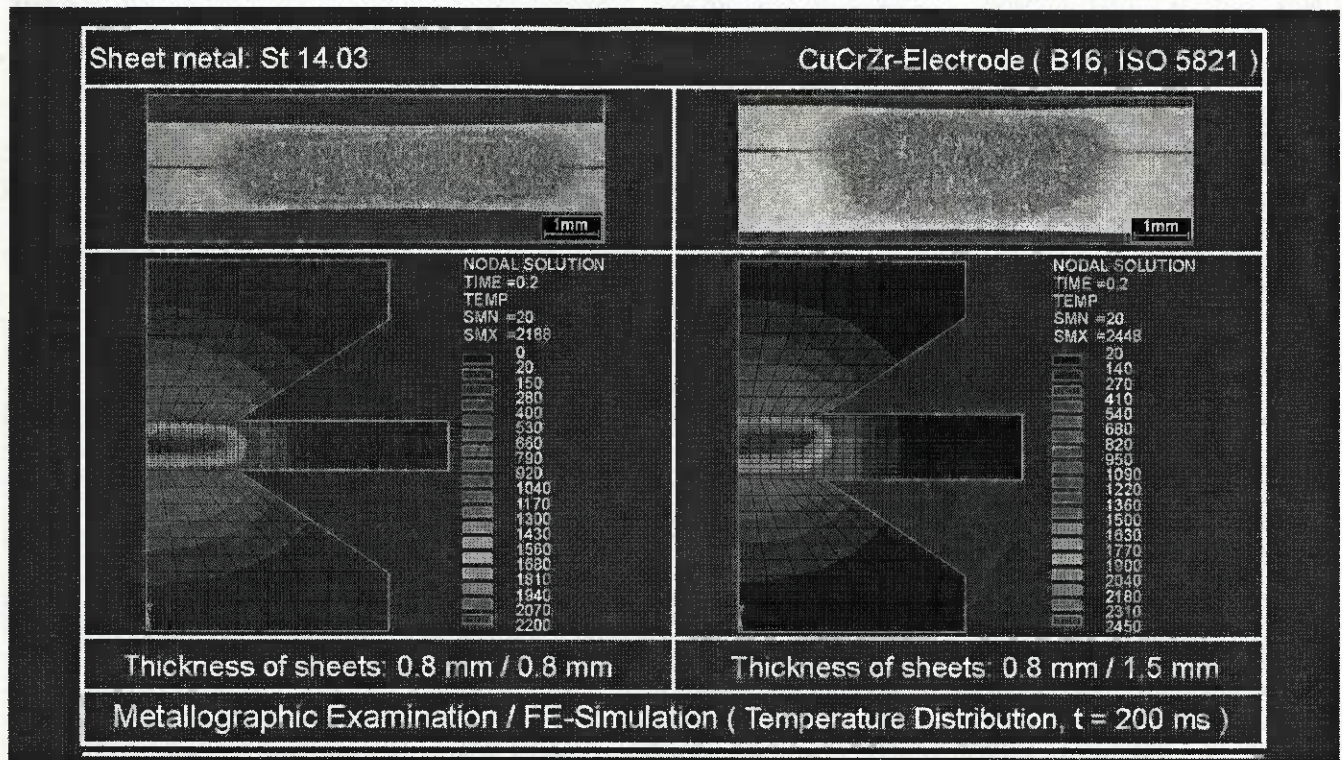


Bild 6: Simulation des Widerstandspunktschweißens von Stahlblechen gleicher und unterschiedlicher Blechdicken (Software: FE-Programm „SPOTWELDER“)

6.2 Widerstandsbuckelschweißen

Anwendungen des Widerstandsbuckelschweißens lassen sich in zwei wesentliche Anwendungsfelder einteilen:

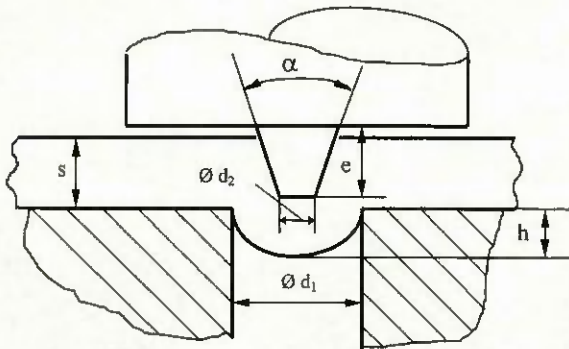
- Fügen von Blechhalbzeugen mit geprägten Schweißbuckeln
- Fügen von Formteilen mit Massivbuckel (spanend oder spanlos geformt)

Die Finite-Elemente(FE)-Simulation ermöglicht dem Anwender die Modellierung der Umformvorgänge bei der Buckelherstellung (im Allg. Kaltumformung), Bild 7 und des Schweißprozesses beim Widerstandsbuckelschweißen, Bild 8.

Für eine wirklichkeitsnahe Beschreibung des Nachsetzverhaltens ist in den FE-Modellen ein Ansatz für die mechanisch-dynamischen Maschineneigenschaften zu berücksichtigen /14/. Aufgrund der örtlich vorliegenden Umformgrade und Umformgeschwindigkeiten (Dehnraten) ist es hierbei notwendig den Einfluss der Erhöhung der Fließspannung in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit im Modell zu berücksichtigen. Beim Rückverformen von Massivbuckeln, Bild 9, ist auf Volumenkonstanz zu achten. Entsprechend muss das FE-Netz in der Lage sein die Bildung des Schweißwulstes richtig abzubilden (zum Teil kontinuumsmechanische Modelle), um die Wärmeaufnahme durch den Wulst realitätsnah zu erfassen. Entsprechende Arbeiten zu den werkstoffkundlichen Grundlagen (Werkstoffmodelle und Werkstoffkennwertermittlung) sind Aufgabe weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Praxisnahe Applikationen finden sich in folgenden Bereichen:

- Buckelprägen - Auslegung von Schweißbuckeln und deren Prägwerkzeuge
- Untersuchungen zum Werkstoffeinfluss
- Untersuchungen zum Blechdickeneinfluss
- Simulation der Buckelrückverformung zur Auslegung von Elektrodenkräften
- Schweißen: Ermittlung von Schweißbereichsdiagrammen

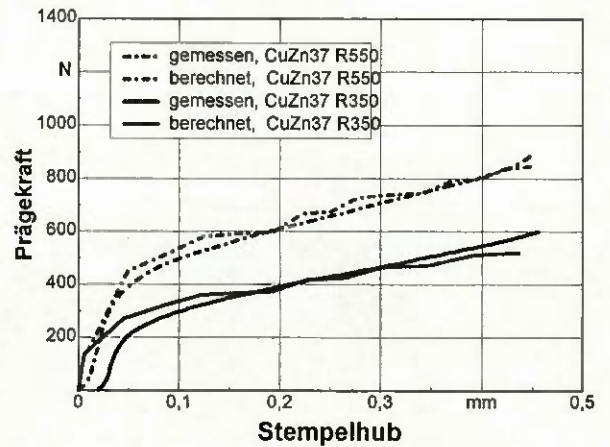


Geometrie A

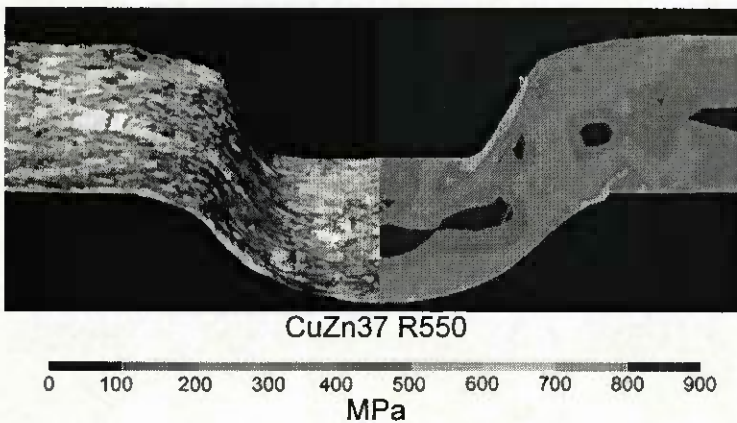
Matrize: $d_1 = 1,6 \text{ mm}$
 Stempel: $d_2 = 0,5 \text{ mm}$

Geometrie B

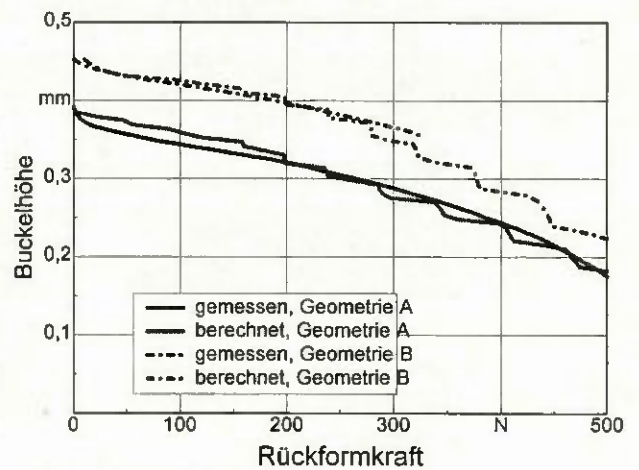
Matrize: $d_1 = 1,8 \text{ mm}$
 Stempel: $d_2 = 0,6 \text{ mm}$



Buckelprägen - Gemessener und berechneter Prägekraftverlauf in Abhängigkeit vom Hub des Prägstempels



Vergleichsspannung von Mises



Buckelhöhe in Abhängigkeit von der Rückformkraft bei Raumtemperatur

Bild 7: Buckelprägen - Auslegung von Schweißbuckeln und deren Prägwerkzeuge /15,16/

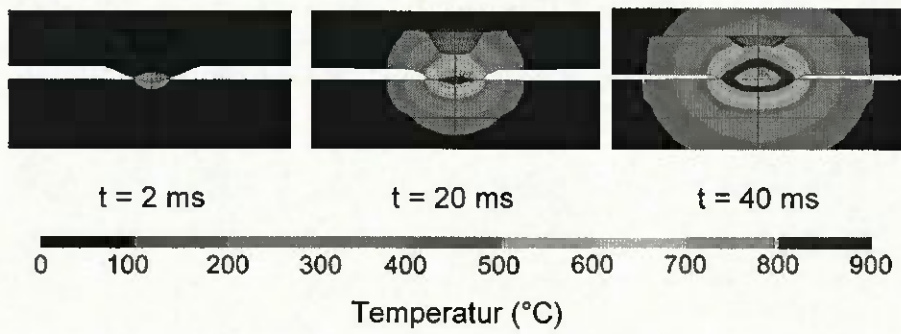
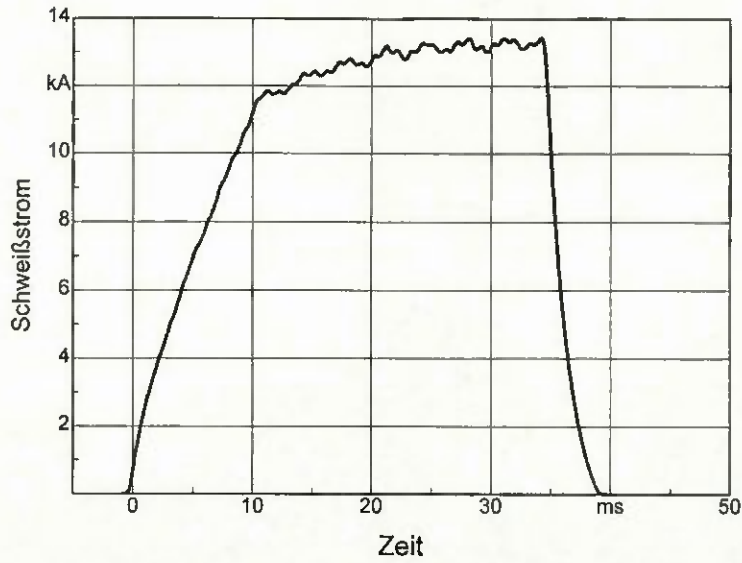
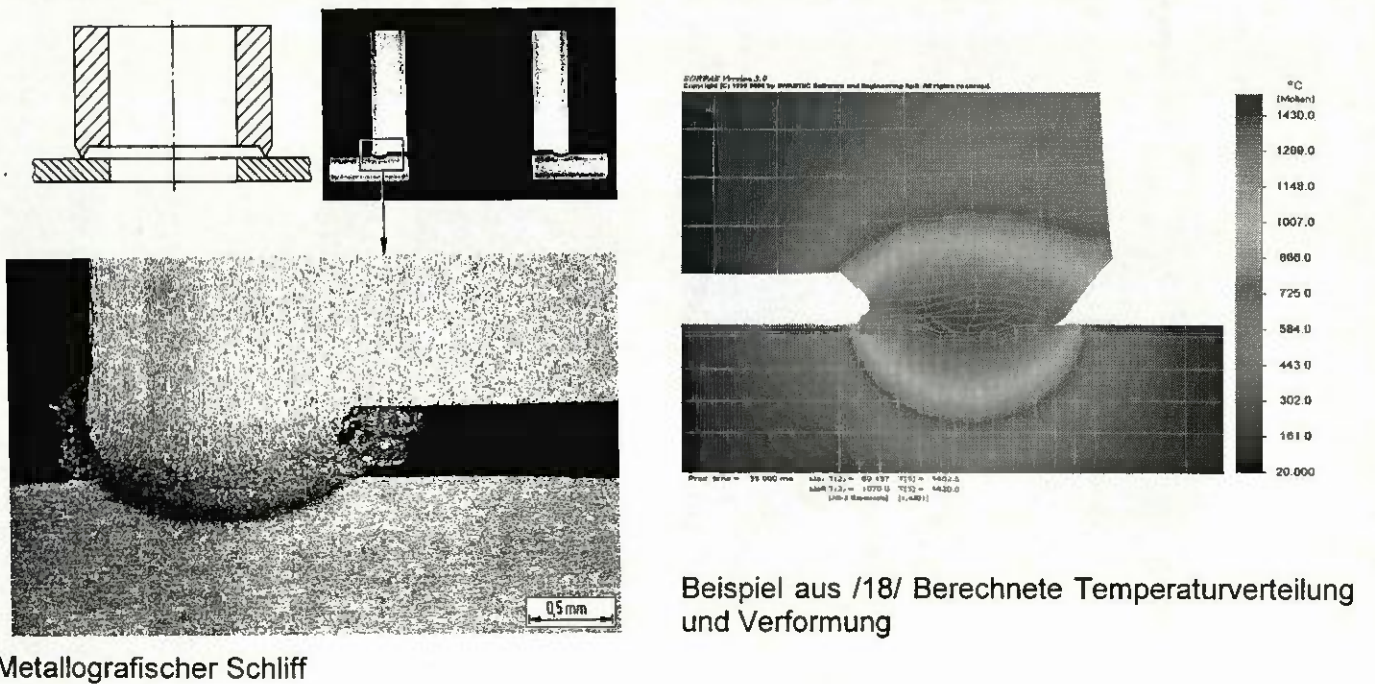


Bild 8: Numerische Simulation einer Widerstandsbuckelschweißung (Temperaturfeld und Verformung) an Proben aus Werkstoff CuZn37 R550 (Blechdicke: $t = 0,6 \text{ mm}$) /15,16/



Metallografischer Schliff

Beispiel aus /18/ Berechnete Temperaturverteilung und Verformung

Bild 9: FE-Simulation von Widerstandsschweißungen mit geschnittenen Buckeln (hier: Ringwarzenschweißung)

6.3 Hartmetallbestückung von Blockbandsägen

Zur Herstellung hartmetallbestückter Werkzeuge werden neben den bekannten Hartlötverfahren mit Silber-Kupfer-Schichtloten auch Widerstandsschweißverfahren zum Fügen von Hartmetallsegmenten auf Trägerstahl eingesetzt (hartmetallbestückte Bohrer, Stich- und Bandsägen für die Metallbearbeitung).

Die Herstellung hartmetallbestückter Blockbandsägebänder für die Holzbearbeitung, Bild 10, stellt eine anspruchsvolle Fügeaufgabe dar. Dies ist insbesondere durch die Empfindlichkeit der Hartmetallsägezähne hinsichtlich einer Gefügeschädigung bei Überhitzung sowie durch den vergleichsweise hohen Kohlenstoffgehalt im Trägerstahl C75 begründet. Weiter sind die hartmetallbestückten Sägezähne im Betrieb beim Sägen von Astholz einer erheblichen mechanischen Beanspruchung unterworfen.

Im Rahmen eines in Zusammenarbeit mit Mitgliedsfirmen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) durchgeführten AiF-Vorhabens /19/ wurde die FE-Simulation gezielt zur Optimierung der Sägezahngeometrie und des Schweißprozesses eingesetzt. Dabei erfolgte die Berechnung des Widerstandsschweißprozesses an einem dreidimensionalen FE-Modell, Bild 10 (rechts). Die am Markt verfügbaren Hartmetallzähne (lötbare Flachzähne) zeigten beim Widerstandsschweißen eine asymmetrische Wärmeverteilung in der Fügezone. Mit Hilfe von FE-Berechnungen konnte die Eignung eines axialsymmetrischen Hartmetallzahnes (Zylindersegment) aufgezeigt werden und in weiteren Optimierungsschritten die Wärme- und Eigenspannungsverteilung im Hartmetallzahn und im Bereich der Schweißstelle durch Optimierung der Elektrodengeometrie und Schweißparameter deutlich verbessert werden.

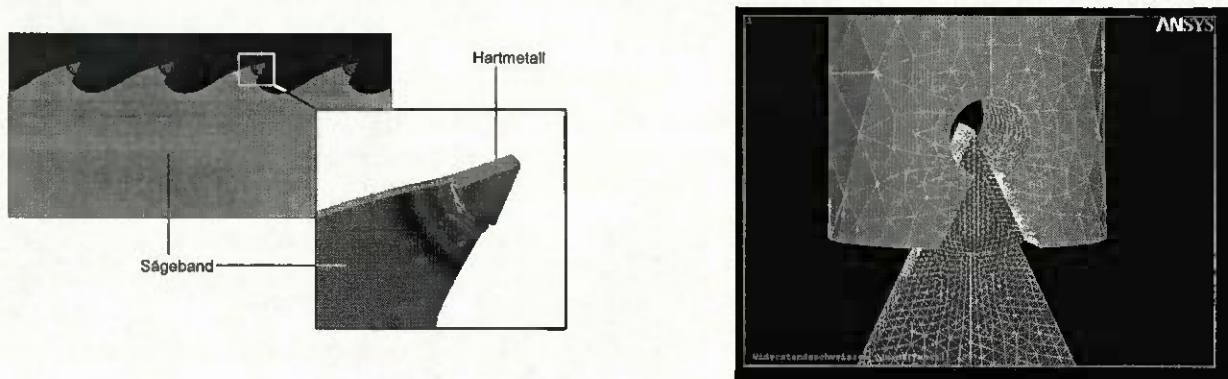


Bild 10: Hartmetallbestückte Sägeband (links), dreidimensionales FE-Modell der Fügeanordnung (rechts)

Temperaturverteilung an der Oberfläche bei Erreichen von etwa 1500 °C im Bereich der Fügestelle

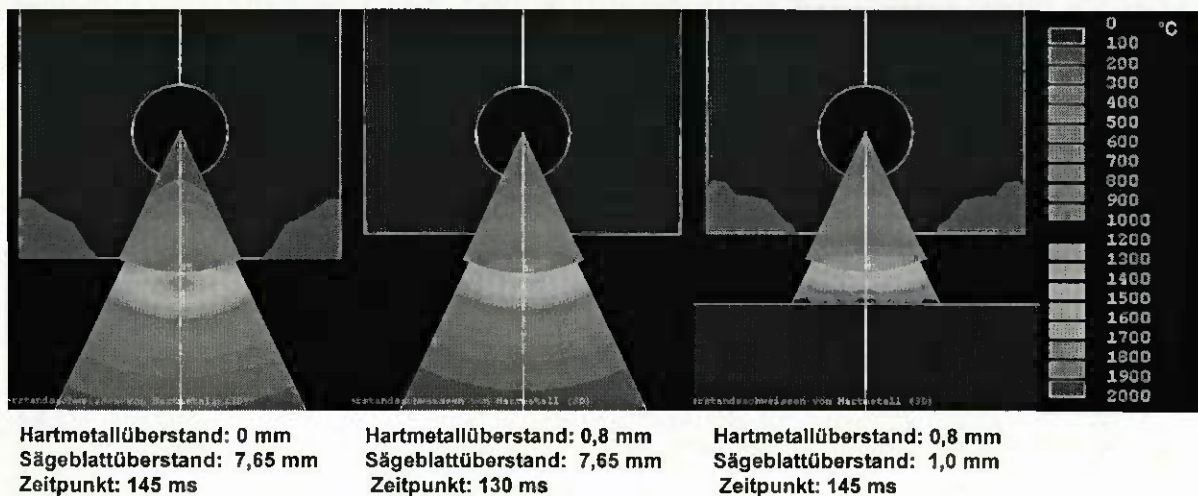


Bild 11: Herstellung hartmetallbestückter Sägebänder – berechnete Temperaturverteilung bei unterschiedlicher Anordnung der Schweißelektroden

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die am Markt verfügbaren FE-Programme sind sehr leistungsfähig und erlauben es dem Anwender eine auf seine Bedürfnisse zugeschnittene Programmlösung zu entwickeln. Hier zeichnet sich ein erweitertes Tätigkeitsfeld für Ingenieurdienstleitungen ab. Auch lassen sich nach unserer bisherigen Erfahrung bei den auf diesem Gebiet tätigen Forschungsstellen und Ingenieurbüros mit finanziell überschaubaren Mitteln bereits für eine Reihe erprobter Anwendungsfälle kundenspezifische FE-Problemlösungen realisieren. Entsprechend leistungsfähige numerische Simulationsverfahren werden daher das Prinzip „trial and error“ in bestimmten Bereichen der Widerstandsschweißtechnik weiter verdrängen.

Voraussetzung für die stetig wachsende Anzahl von schweißtechnischen Softwareprodukten ist die zwischenzeitlich hohe Leistungsfähigkeit der verfügbaren Hard- und Software und ausreichende Mengen an verlässlichen Eingangsdaten für die jeweiligen Programme. So können heute auch komplexe Simulationsaufgaben und enorme Datenmengen für eine Reihe von Aufgaben auf Workstation- oder PC-Plattformen realisiert werden und sind damit auch für kleinere und mittlere Unternehmen interessant.

Ungeachtet der am Markt bereits verfügbaren Möglichkeiten zur praxisnahen Simulation von Problemstellungen auf dem Gebiet der Widerstandsschweißtechnik werden weitere in naher Zukunft entsprechend den industriellen Bedürfnissen entwickelt werden.

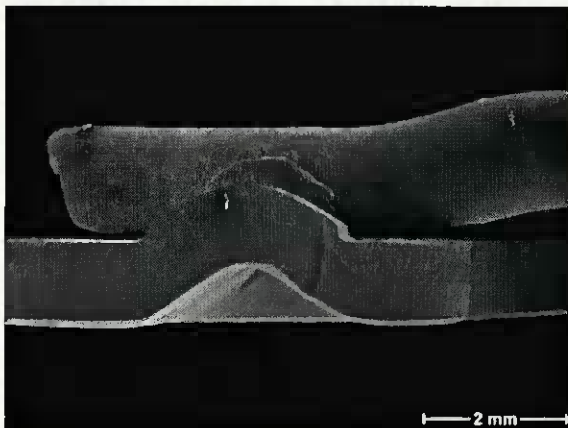


Bild 12: Dreidimensionale Problemstellung (Beispiel: Anschweißen eines Drahtendes an ein Anschlussstück mit geprägtem Längsbuckel)

Im Ausblick auf die Zukunft sind folgende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zu nennen:

- Weiterentwicklung von Werkstoffmodellen und Ermittlung entsprechender Werkstoffkennwerte beispielsweise zur Berücksichtigung der Fließspannungserhöhung in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit und vom Grad der Umformung.
- Entwicklung robuster Methoden zur Erfassung und Beschreibung des Kontaktwiderstandes und Schaffung einer entsprechenden Datenbasis für die numerische Simulation.
- Beherrschung dreidimensionaler Fügeaufgaben bei vereinfachter FE-Netzgenerierung über Schnittstellen zu CAD, [Bild 12](#)
- Durchführung ganzheitlicher FE-Analysen verketteter Prozesse (Simulation von Umformen + Fügen + Festigkeitsberechnung)

8. Literatur

- /01/ Seyffarth P und A. Scharff:
Schweißtechnische Software – Versuch einer Übersicht.
DVS-Berichte Band 198, Schweißtechnische Software – Stand und Entwicklung. S.1-29,
DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (1998)
- /02/ Radaj, D. und C. M. Sonsino:
Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten.
Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 142; DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (2000)
- /03/ Zhang, S.:
Stress intensities derived from stresses around a spot weld.
International Journal of Fracture, 99, S.239-257; Kluwer Academic Publishers, (1999)

- /04/ Pollmann, W. und D. Radaj:
Simulation der Fügetechniken – Potentiale und Grenzen. Beiträge zum DaimlerChrysler-
Technologiekolloquium.
DVS-Berichte, Band 214; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf (2001)
- /05/ N.N.:
Im Gespräch mit Dr.-Ing. Stefan Reul
VTE – Verbindungstechnik in der Elektronik und Feinwerktechnik, Heft 2, S.103-106;
DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (1994)
- /06/ Greitmann, M. J. und R. Rauch:
Rechenprogramm zur numerischen Simulation von Widerstandspressschweißungen.
Der Praktiker, Heft 2, S. 55-56; DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (1997)
- /07/ Greitmann, M. J. , O. Volz und H. -J. Wink:
Untersuchungen zum Übergangswiderstand an blanken und beschichteten Stahlblechen.
Schweißen und Schneiden 56 (2004) Heft 1, S. 16 – 22; DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf
- /08/ Holm, R.:
Electric Contacts, Theory and Application.
4. Edition, Springer-Verlag, Berlin, (1967)
- /09/ Radaj, D.:
Schweißprozesssimulation – Grundlagen und Anwendungen.
Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 141, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (1999)
- /10/ Greitmann, M. J. :
Fügetechnische Softwareanwendungen im Bereich der Schweißtechnik.
Materialprüfung, 43 (2001), H. 4, S. 139-147.
- /11/ Greitmann, M.J. und A. Kessler:
Qualitätssicherung durch Prozessanalyse beim Widerstandspunktschweißen von
Aluminium.
Schweißen und Schneiden, 48 (1996), Heft 1, S. 11-18; DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf
- /12/ Greitmann, M. J. und R. Rauch:
SPOTWELDER - Ein Rechenprogramm zur numerischen Simulation des
Widerstandspunktschweißprozesses.
Sondertagung „Widerstandsschweißen '98“, Deutscher Verband für Schweißtechnik
DVS-Berichte, Band 189. S. 111-115, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (1998)
- /13/ Greitmann, M. J. und K. Rother:
Numerical Simulation of the Spot Welding Process using SPOTWELDER.
4th International Seminar Numerical Analysis of Weldability, 29th September - 1st October
1997, Graz
- /14/ Kußmaul, K. , D. Blind, L. Zeng, M. J. Greitmann, P. M. Schäfer:
Numerische Prozesssimulation von Widerstandsbuckelschweißungen.
DVS-Berichte, Band 142, S. 143-150; DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (1991)

- /15/ Vichniakov, A. , H. Herold, M. J. Greitmann und E. Roos:
FEM tool for the investigation of material properties of the projection during resistance
projection welding.
Tagungsband, 6th international Seminar Numerical Analysis of Weldability, October 1-3,
2001, A-Graz (2001)
- /16/ Vichniakov, A. , H. Herold, H. -J. Wink und M. J. Greitmann:
Numerische Simulation von Widerstandsbuckelschweißungen.
Der Praktiker, Heft 3, S. 92-96; DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (2002)
- /17/ Zhang, W. und Kristensen, L.:
Finite element modelling of resistance spot and projection welding processes, Proc. 9th
Int. Conf. on Computer Technology in Welding, 1999, Detroit
- /18/ Kristensen, L., W. Zhang und N. Bay:
Einfluss der geometrischen Kenngrößen im Widerstandsbuckelschweißen verschiedener
Materialkombinationen.
DVS Berichte, Band 123, S. 76-80, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf (2001)
- /19/ Tröger, J., F. Scholz, M. J. Greitmann, O. Volz und H. -J. Wink:
Verlängerung der Standzeit von Blockbandsägewerkzeugen.
Schlussbericht, AiF-Nr. 13271 N/1, DGfH-Nr. 2002/15, Universität Stuttgart und
Fachhochschule Rosenheim (2004)

Ein Teil der Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS (AiF-Nr.Q10, DVS-Nr. 4.191, AiF-Nr 12.188 B, DVS-Nr. 4.019, AiF-Nr. 12.617 N / DVS-Nr. 4.023) sowie der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH, Vorhaben: Verlängerung der Standzeit von Blockbandsägewerkzeugen AiF-Nr. 13271 N/1, DGfH-Nr. 2002/15) unterstützt.