

Nutzen numerischer Simulationen für das Einrichten realer Schweißprozesse

I. Decker, O. Voß, J. Wendelstorf und H. Wohlfahrt, Braunschweig

Zusammenfassung

Zunehmend höhere Anforderungen an die Eigenschaften von Schweißverbindungen und an die Stabilität von Schweißprozessen im Hinblick auf die Gewährleistung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität erfordern ein stetig wachsendes Verständnis der beim Schweißen zusammenwirkenden Teilprozesse. Für den WIG-Lichtbogen einerseits und für die im Werkstück ablaufenden Wärmetransport-, Ausdehnungs- und Schrumpfungsvorgänge einschließlich der Gefügeveränderungen andererseits werden exemplarisch Ergebnisse dargestellt, die durch Berechnungen nach den Verfahren der Finiten Differenzen bzw. der Finiten Elemente gewonnen wurden: Temperaturverteilung im Lichtbogen je nach Strom, Lichtbogenlänge und Schutzgaszufuhr, Verzug von strahlgeschweißten Bauteilen, entstehendes Gefüge und Eigenspannungen, optimierte Wärmeleitung im Hinblick auf eine erhöhte Betriebsfestigkeit.

1. Einleitung

Die durch die fortschreitende Entwicklung der Mikroelektronik stetig wachsende Rechenleistung ermöglicht eine zunehmend detailliertere Simulation von Schweißvorgängen. Hierdurch kann der nötige Aufwand bei der Applikationsentwicklung stark reduziert werden. So sind die Nahtausbildung, die entstehende Gefügeverteilung, die Schweißeingenspannungen und der Verzug numerisch berechenbar. Gleichzeitig erlaubt die Simulation eine Abschätzung von Prozeßerscheinungen, die ihrerseits während des Schweißens für eine prozeßintegrierte Qualitätsprüfung herangezogen werden können, in dem eine Interpretation der Signale in Bezug auf die erzielte Qualität des Fügevorgangs ermöglicht wird [1-3].

Grundsätzlich ist die Simulation eines Schweißprozesses ein gekoppeltes thermomechanisches Problem, für dessen Lösung eine große Anzahl von Werkstoffeigenschaften über einen großen Temperaturbereich hinweg bekannt sein muß. Diese Werkstoffkennwerte sind bisher jedoch nur für eine kleine Gruppe von Werkstoffen als vollständiger Kennwertesatz verfügbar, was häufig ihre Festlegung durch einen Vergleich zwischen Simulation und Experiment nötig macht. Aufgrund der Komplexität des Schweißvorgangs ist es andererseits erforderlich eine Aufteilung in Teilmodelle vorzunehmen. Das langfristige Ziel muß es sein, mit solchen Teilmodellen *ab initio*-Rechnungen

durchzuführen, bei denen eine Prozeßsimulation keine Anpassungen an experimentelle Ergebnisse mehr benötigt. Derartige Teilmodelle werden am Institut für Schweißtechnik der TU Braunschweig für den WIG-Lichtbogen und das Laserstrahlschweißen entwickelt und lassen sich bereits für eine gezielte Auswahl der Schweißparameter einsetzen.

2. Phänomenologische Verfahrensmodellierung am Beispiel des Laserstrahlschweißens

Das Laserstrahlschweißen als in der Industrie bereits etabliertes modernes Schweißverfahren zeichnet sich wie das Elektronenstrahlschweißen durch einen ausgeprägten Tiefschweißeffekt aus: Es entsteht eine schmale Naht, deren Tiefe wesentlich größer ist als die Nahtbreite. Dementsprechend sind die beiden Nahtflanken weitgehend parallel zueinander, und es lag zunächst nahe, das geschweißte Blech unter Vernachlässigung aller Veränderungen in Richtung der Blechdicke als eine Ebene mit zwei Ortskoordinaten zu beschreiben [2].

Die Einkopplung der Laserstrahlenergie in das Werkstück ist ein komplexer Wechselwirkungsmechanismus (siehe z. B. [4], [5]). In einer ersten Näherung kann jedoch die Dampfkapillare entweder als einfache Kombination einer sich über die Blechdicke erstreckenden Linienquelle und einer an der Oberfläche wirkenden Punktquelle oder aber als Zylinder, auf dessen Mantel die Verdampfungstemperatur des Materials herrscht, modelliert werden. Somit entsteht ein phänomenologisches Verfahrensmodell, bei welchem entweder der Energieeintrag oder ein bestimmter Dampfkapillarendurchmesser als Ausgangspunkt für die Werkstoffwärmerung festgelegt ist. Damit sind zusammen mit den Einspannbedingungen des Bauteils sowohl hinsichtlich der mechanischen Fixierung als auch des Abköhlverhaltens die Randbedingungen für die Ausbildung von Temperatur-, thermischen Verschiebungs- und Spannungsfeldern festgelegt. Die Methode der Finiten Elemente ist hierbei für die Berechnung der entstehenden zeitabhängigen Feldprofile in besonderer Weise geeignet, wobei mit Rücksicht auf die Rechenzei-

ten eine entkoppelte thermische und mechanische Formulierung nötig ist.

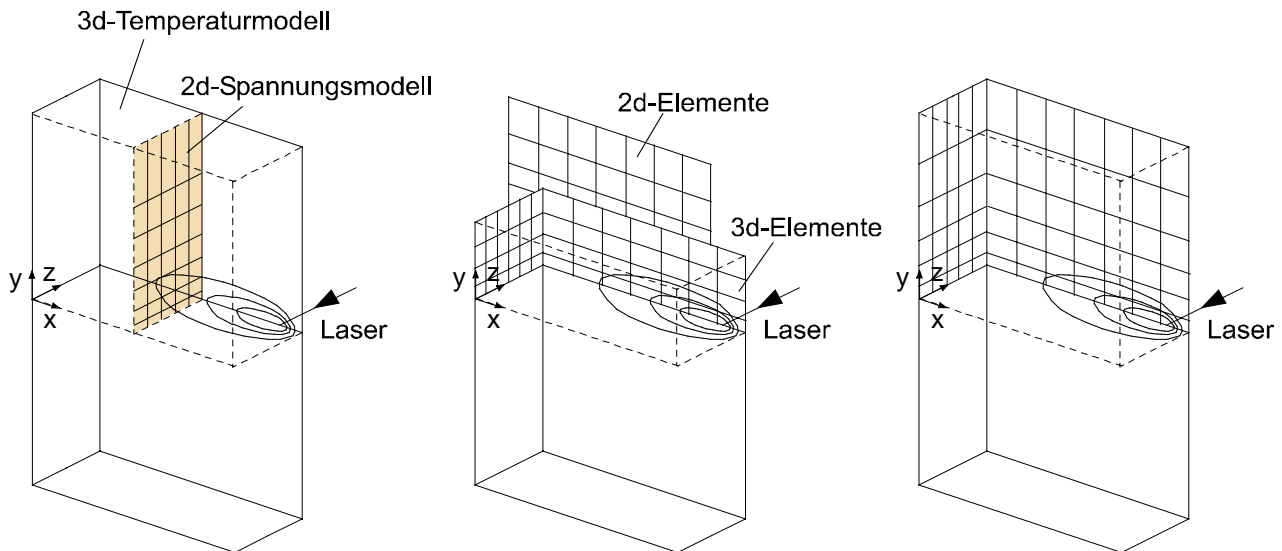


Abbildung 1: Modelle zur Beschreibung des dreidimensionalen Spannungszustandes nahe der Naht: ebener Dehnungszustand (links), Kombination aus Schalen- und Volumenelementen (mitte), vollständiges 3D-Modell.

Eine dreidimensionale Beschreibung von Laserstrahlnähten an größeren Strukturen ist nur möglich, wenn bei der Modellierung besondere Vereinfachungen vorgenommen werden (siehe Abbildung 1): In erster Näherung lassen sich lange Nähte durch einen ebenen Dehnungszustand approximieren. Eine Berücksichtigung der Einspannungswirkung durch die um das Schmelzbad herum liegenden kalten Bereiche läßt sich hingegen nur durch eine Kombination aus Schalen- und Volumenelementen bzw. durch ein vollständiges dreidimensionales Modell erreichen.

Die Bestimmung des infolge eines Schweißtemperaturzyklus in der Wärmeeinflußzone (WEZ) entstehenden Gefüges muß unter Beachtung der örtlichen Austenitisierungstemperatur erfolgen, da bei Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt unter 0.8% (Beispiel St52-3: 0.2% C) eine Erhöhung der Austenitisierungstemperatur zu einer Verschiebung der Ferrit und Bainit Regionen im Schweiß-ZTU-Schaubild hin zu längeren Abkühlzeiten erfolgt (siehe Abbildung 2, oben). Eine Kombination von Schweiß-ZTU-Schaubildern für unterschiedliche Austenitisierungstemperaturen liefert ein Spitzentemperatur-Abkühlzeit-Schaubild (STAZ) [6], mit dem das entstehende Gefüge als Funktion der erreichten maximalen Temperatur und der $t_{8/5}$ -Zeit ermittelt werden kann [7].

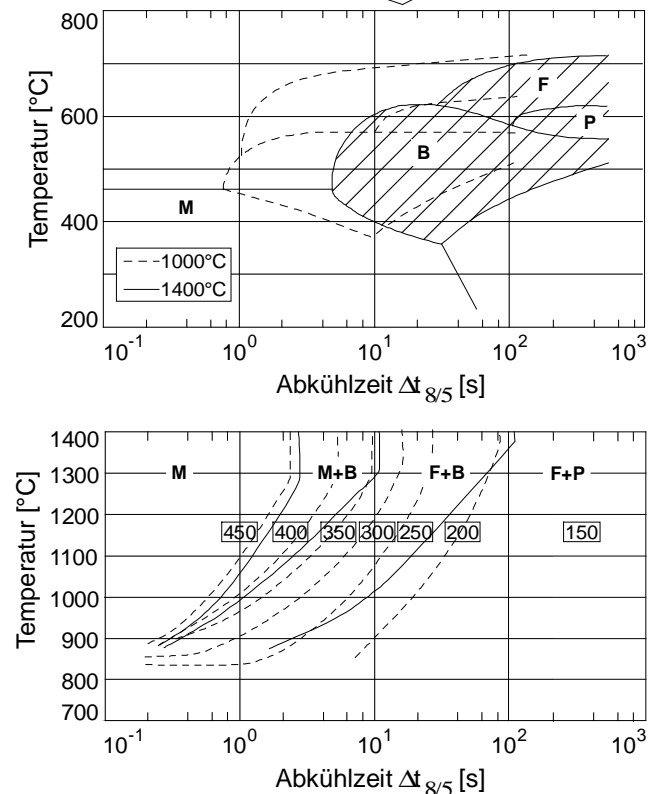


Abbildung 2: ZTU-Schaubild (oben) und STAZ-Schaubild (unten) für einen St52-3.

3. Ergebnisse

Die mit Hilfe dieser phänomenologischen Formulierung erzielbaren Ergebnisse werden im folgenden dargestellt. Aufgrund des gewählten Ansatzes erfolgt zuerst eine von den auftretenden Gefügewandlungen und dem entstehenden Spannungsfeld unabhängige Temperaturfeldberechnung, die durch eine Variation des Wirkungsgrades sowie der Anteile von Punkt- und Linienquelle zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem experimentell

ermittelten Temperaturzyklus führt (siehe Abbildung 3).

Mit Hilfe des STAZ-Schaubildes werden anschließend das entstehende Gefüge und die resultierende Aufhärtung bestimmt. Wegen der zuvor erfolgten Anpassung des Temperaturfeldes an den realen

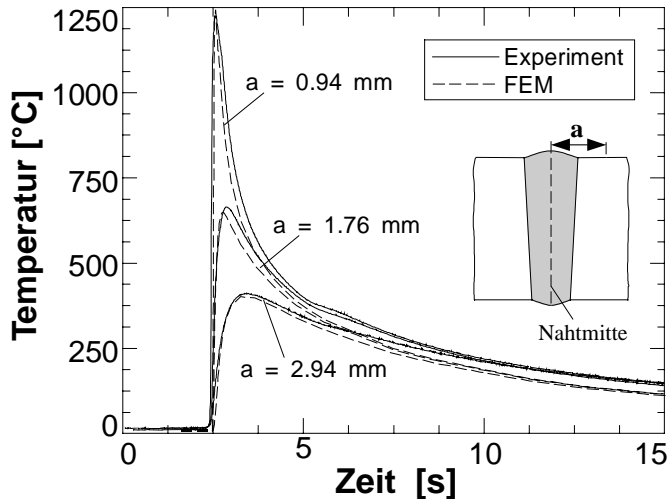


Abbildung 3: Vergleich zwischen experimentell und rechnerisch ermitteltem Temperaturzyklus (St52-3, $d = 3$ mm, $P = 5$ kW, $v = 2.1$ m/min).

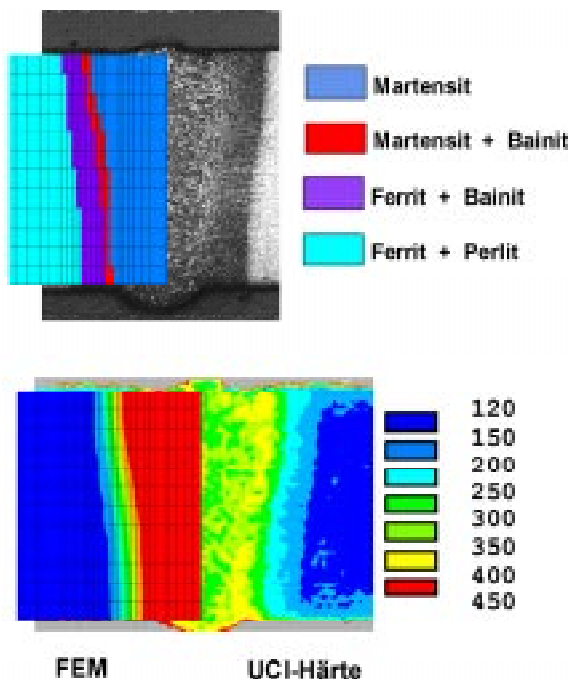


Abbildung 4: Berechnete und experimentell bestimmte Gefüge- und Härteverteilung im Vergleich (St52-3, $d = 5$ mm, $P = 5$ kW, $v = 0.8$ m/min).

Temperaturzyklus des Laserstrahlschweißprozesses werden bei durch äußere Kräfte nicht belasteten Proben die unterschiedlichen Bereiche des

Gefüges korrekt wiedergegeben (siehe Abbildung 4, oben). Neben den Bereichen verschiedener Gefügezusammensetzungen finden sich im STAZ-Schaubild ebenfalls Linien gleicher Härte (siehe Abbildung 2), mit deren Hilfe die Härtewerte in der Naht und der WEZ ermittelt werden können. Der Vergleich zwischen der Berechnung und einer UCI-Messung zeigt noch eine bis zu 10 % Abweichung, was auf die unterschiedlichen Meßverfahren (Experiment HV 0,5 und STAZ-Schaubild HV 30) und die geringe Auflösung im Diagramm zurückzuführen ist (siehe Abbildung 4, unten).

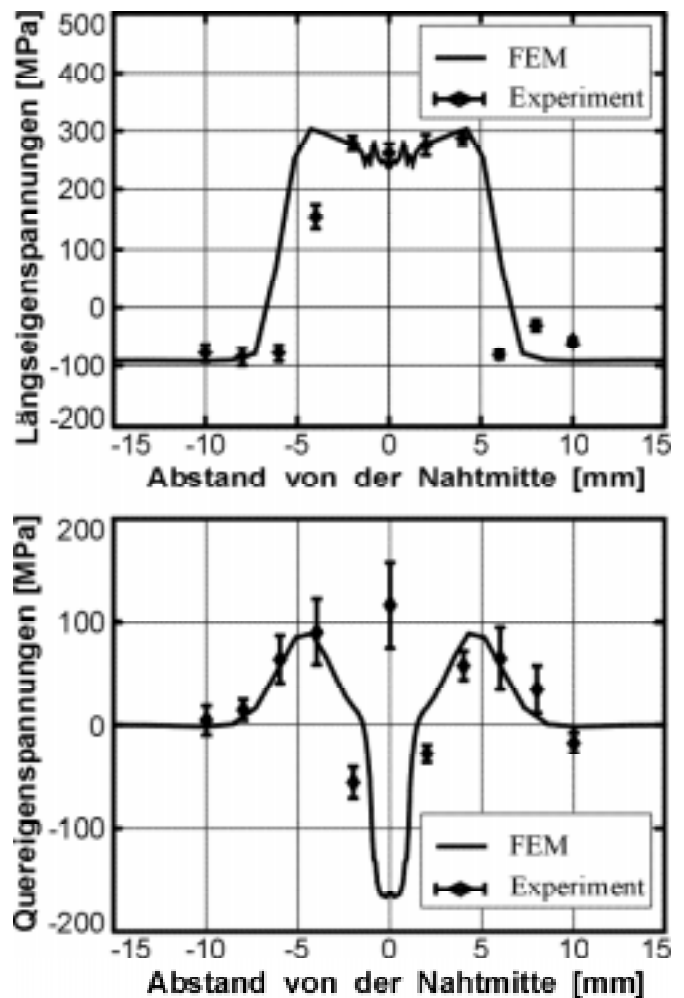


Abbildung 5: Rechnerisch bestimmte Eigenspannungen an der Blechoberseite im Vergleich zu röntgenografischen Messungen (St52-3, $d = 5$ mm, $P = 5$ kW, $v = 1.2$ m/min).

In einem dritten Schritt wird unter Verwendung der bereits ermittelten Ergebnisse (zeitabhängiges Temperaturfeld und entstehende Gefügeverteilung) die mechanische Analyse durchgeführt, wobei aufgrund der fehlenden Werkstoffdaten eine Anpassung der Fließgrenze (als Funktion der Temperatur) und der Umwandlungstemperaturen erfolgen muß. Als Ergebnis ergibt sich das transiente Span-

nungs- und Verschiebungsfeld für das gesamte Modell, welches ebenfalls mit den durch Röntgenbeugung gemessenen Werten gut übereinstimmt. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der gemessenen und rechnerisch bestimmten Eigenspannungen an einer Laserstrahlschweißnaht.

Mit Hilfe dieser Beschreibung des Schweißvorgangs läßt sich bereits heute der Einfluß von Verfahrensparametern auf das Schweißergebnis vorhersagen. Als Beispiel wird hier der Einfluß unterschiedlicher Abkühlbedingungen auf die Eigenspannungsverteilung an einem vollaustenitischen Chrom-Nickel-Stahl aufgezeigt. Abbildung 6 zeigt wie die sich ausbildenden Quereigenspannungen auf der Plattenoberseite bei zunehmender Kühlung der Plattenoberfläche 5 mm hinter dem Laserstrahl von Zug- in Druckspannungen verschoben werden, wobei gleichzeitig in der Plattenmitte eine Erhöhung der Zugeigenspannungen stattfindet. Die so entstehenden Druckeigenspannungen an der Oberfläche erhöhen die Dauerschwingfestigkeit der Laserstrahlnähte.

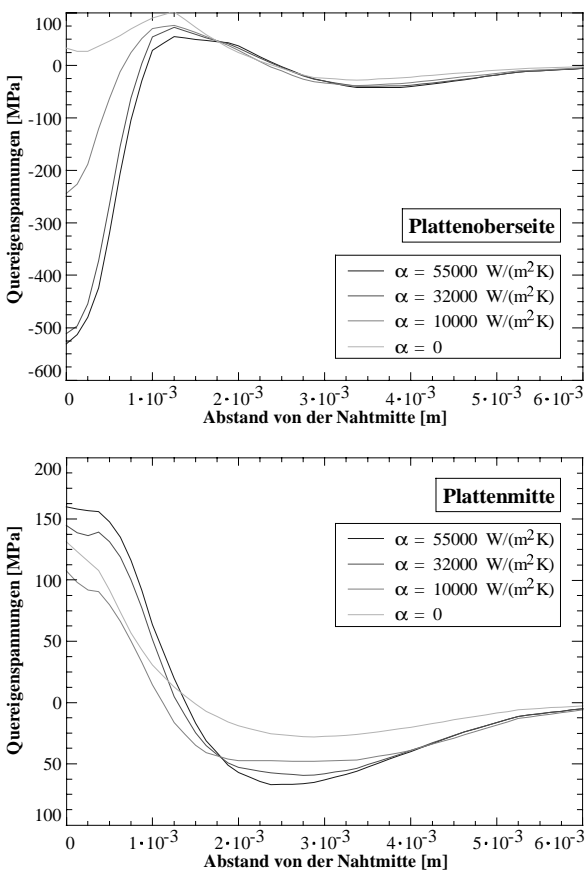


Abbildung 6: Berechnete Quereigenspannungen in Abhängigkeit einer Oberflächenkühlung 5 mm hinter der Wärmequelle (X5CrNi 18 10, $d = 5$ mm, $P = 5$ kW, $v = 1.5$ m/min).

4. Prozeßmodellierung am Beispiel des WIG-Lichtbogens

Wie im vorangehenden Abschnitt gezeigt wurde, sind phenomenologische Verfahrensmodelle durchaus in der Lage, anwendungsrelevante Erkenntnisse zu liefern. Im Zusammenhang mit dem zunehmenden Einsatz von Informationstechnologie innerhalb von Industrieunternehmen wird es somit möglich werden, eine Schweißaufgabe bereits in der Konstruktionsphase zu optimieren.

Ein Problem stellt allerdings die enge Verzahnung zwischen experimentellen Untersuchungen und der Modellierung dar, die eine praktische Anwendung der Modelle nur innerhalb der experimentell bereits untersuchten Parameterbereiche gestattet. Phenomenologische Modelle besitzen naturgemäß immer interne Anpassungsparameter, die aus dem Experiment gewonnen werden müssen. Diese sind zudem von den Einstellgrößen des Schweißverfahrens abhängig. Einen Ausweg aus diesem Dilemma und eine Entwicklung hin zu einer extrapolationsfähigen und prediktiven Berechnung bietet die sogenannte *ab initio* Modellierung. Hierbei werden nur Materialkenngrößen sowie Geometrie- und Verfahrensparameter als Eingabedaten verwendet. Die Ergebnisse der Simulation werden nicht an das Experiment angepaßt. Um die Extrapolationsfähigkeit sicherzustellen, ist allerdings ein Vergleich mit Messungen (Evaluierung) notwendig.

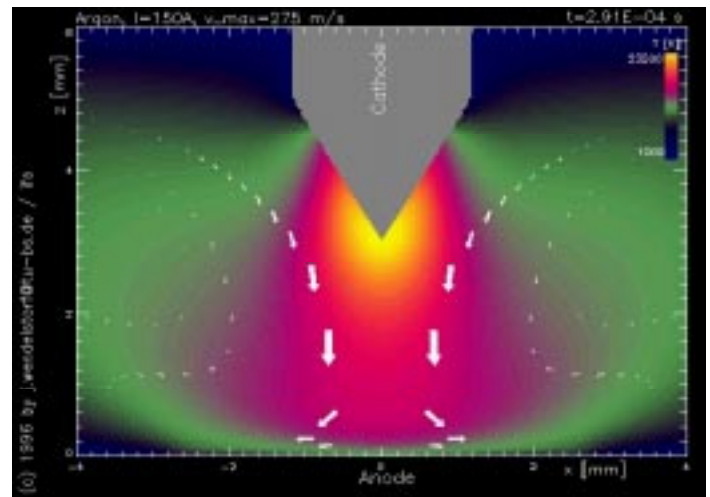


Abbildung 7: Temperatur- und Strömungsfeld eines WIG-Schweißlichtbogens.

Als Beispiel sei hier der WIG-Lichtbogen (Bild 7) betrachtet. Messungen in einem derart dichten und heißen Plasma sind äußerst schwierig, wurden aber in großem Umfang unternommen, da der DCEN-WIG-Argon-Lichtbogen ein relativ einfach zu handhabendes Beispiel für eine ganze Klasse von Bogenentladungen darstellt (eine Übersicht findet sich z.B. in [8]). Die Modellierung des sichtbaren

Lichtbogenbereiches (der sog. Säule) ist Stand der Technik und liefert z.B. eine Temperaturverteilung, die im Rahmen der Meßgenauigkeit von nur 5% mit den spektroskopisch gewonnenen Daten übereinstimmt [8,9]. Die für die Berechnung notwendigen Plasmatransportkoeffizienten (Leitfähigkeit, Viskosität, etc.) wurden dabei nicht experimentell bestimmt, sondern auf der Basis von atomaren Eigenschaften berechnet.

Die dazu verwendeten Simulationen benötigen allerdings noch interne Randbedingungen an der Katodenoberfläche. Momentan laufende Projekte [12] werden dieses Problem beseitigen und einen „Lichtbogen im Rechner“ komplett entstehen lassen. Für die Schweißtechnik können so alle für die Anwendung wichtigen Parameter von Lichtbogenschweißprozessen mit nichtabschmelzender Elektrode (WIG, Plasma) unabhängig von einer experimentellen Anpassung und in beliebigen Parameterbereichen berechnet und rechnerisch optimiert werden:

- Die Verteilung der Energiestromdichte und des Lichtbogendruckes auf der Werkstück- bzw. Schmelzbadoberfläche liefert die für weitergehende *ab initio* Modelle des gesamten Schweißverfahrens (s. Abschnitt 5) notwendigen internen Randbedingungen.
- Die Berechenbarkeit des gesamten WIG-Lichtbogens einschließlich der Elektroden ermöglicht es, daß für die Automatisierung wichtige Problem des ständig notwendigen Neuanschleifens der Wolframelektrode zu lösen, in dem die Elektrodenwerkstoffe und Brenneranordnungen optimiert werden.
- Eine Anpassung von Prozeßparametern (Gas, Elektrodenform, Bogenlänge, Brenner) kann auch unabhängig von der konkreten Anwendung geschehen, da Energiedichte und Druck auf das Schmelzbad aus physikalischen Gründen weitgehend unabhängig vom Grundwerkstoff sind.

Die zuletzt genannte schwache Kopplung zwischen den Vorgängen im Werkstoff (Schmelzbad) und dem Lichtbogen beim WIG-Schweißen liefert die Begründung für die gute Eignung des Verfahrens für neue Werkstoffe, da oft mit bereits erprobten Parametern schon gute Ergebnisse erzielt werden können.

Ist man bereit, eine höhere Komplexität in den Parameterabhängigkeiten zuzulassen, so ist es mit einem grundlegenden Verständnis der Mechanismen im Lichtbogen auch möglich, mit dem WIG-

Verfahren Qualitäten und Schweißgeschwindigkeiten zu erzielen, die an die Möglichkeiten der Strahlverfahren heranreichen. Als Beispiel sei das WIG-Gleichstrom-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen (Blechdicke 2 mm) mit sehr kurzer Lichtbogenlänge (0.5 mm) unter Helium genannt, womit sich Schweißgeschwindigkeiten von 3 m/min erzielen lassen (Die mit einer weiteren Zunahme der einzustellenden Parameter verbundene Kombination mit einem Laser erlaubt dann noch einmal eine Steigerung auf 6 m/min beim Hybridverfahren des LASER-WIG-Schweißens.).

5. Vorausberechnung des gesamten Schweißprozesses

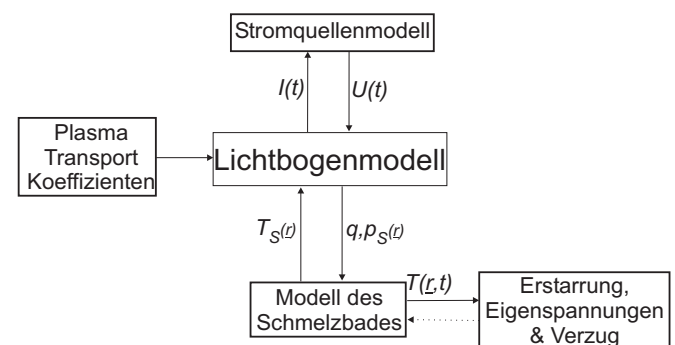


Abbildung 8: Teilmodelle zur *ab-initio* Simulation des WIG-Schweißverfahrens.

In Abbildung 8 sind die für eine *ab initio* Simulation einer WIG-Schweißung notwendigen Teilmodelle skizziert [8]. Das Modell der Stromquelle entspricht weitgehend deren Software, die Lichtbogenmodellierung wurde in Abschnitt 4 diskutiert. Modelle des Schmelzbades müssen je nach Anwendungsfall eine Berechnung der freien Oberfläche (Oberflächenspannungseffekte) und der Schmelzbadströmung umfassen. Erste Ergebnisse zu derartigen Berechnungen liegen bereits zum WIG-Punktschweißen [10] und WIG-Bahnschweißen [11] vor. Die zur Berechnung der Schmelzbadströmung notwendige Software ließe sich allerdings auch aus dem Lichtbogenberechnungscode ableiten, indem dieser entsprechend vereinfacht und um die Modellierung der freien Oberfläche ergänzt würde. Zur Modellierung des Wärmetransportes und der Spannungsverteilung im Werkstück kann der in Abschnitt 2 beschriebene Ansatz verwendet werden.

Das zentrale Problem einer derartigen Komplettmodellierung liegt also nicht in dem mangelnden Wissen über die zugrundeliegenden physikalischen Effekte. Es liegt eher in der Verbindung der Teilmodelle, die oft in Form von Software vorliegen,

die eine Integration nicht zuläßt. Die Modellintegration führt ferner zu riesigen Rechnerprogrammen, bei deren Entwicklung von vornherein die Prinzipien modernen Software Engineerings in den Vordergrund gestellt werden müssen. Eine Nutzung von aktueller (d.h. maximal 2 Jahre alter Rechentechnik) ist unabdingbar notwendig, da die Produktivität der Entwicklungsarbeit direkt von der Rechenleistung abhängt und letztere sich alle 18 Monate bei gleichen Investitionskosten verdoppelt. Hinzu kommt die, wie schon erwähnt, noch mangelnde Kenntnis aller für die Simulation relevanten Materialeigenschaften konkreter Anwendungswerkstoffe, so daß in dieser Hinsicht noch ausreichend Forschungsbedarf besteht.

6. Zusammenfassung

Der Nutzen numerischer Simulationen von Schweißvorgängen bestand bisher überwiegend in dem Erwerb eines Verständnisses des Prozeßgeschehens. Es wurde gezeigt, daß dabei mit heutiger Rechentechnik ein hohes Maß an Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erzielt werden kann.

Gelingt es jedoch, die Simulation von einer Parameteranpassung vollkommen frei zu machen, so liegen die Chancen einer über die Erklärung eines konkreten Experiments hinausgehenden Simulation, in der signifikanten Steigerung der Implementierungsproduktivität bei der Auswahl und dem Einrichten der Schweißverfahren und in der effizienten Entwicklung neuer Schweißverfahren. Ferner kann die naturgemäß steigende Komplexität der Verfahren vom Anwender durch geeignete Software abgeschirmt werden, was eine Durchdringung des Marktes mit neuen optimierten Verfahren möglich macht.

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG Wo-344/9) und dem Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft (BMBF 13N7105) gefördert.

Schrifttum

- [1] Hillebrand, A.; Heyn, H.; Decker, I.; Wohlfahrt, H.: Temperature-modelling and in-process quality inspection in laser beam cutting of contour elements. *Proc. of SPIE 2207*, Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronic Applications, 1994, S. 414-425
- [2] Hillebrand, A.: Numerische Simulation des Laserstrahlschneid- und -schweißprozesses durch Finite Elemente Berechnungen. Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1997. Shaker Verlag
- [3] Heyn, H.: Prozeßüberwachung und -diagnose beim Schneiden und Schweißen mit dem CO₂-Hochleistungslaser. Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1995. Shaker Verlag
- [4] Beck, M.: A Survey of Modelling Laser Deep Welding. *Proc. of the ECLAT '96*, Stuttgart, S. 61-70
- [5] Sudnik, W.; Radaj, D.; Erofeew, W.: Computerized simulation of laser beam welding, modelling and verification. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29** (1996) S. 2811-2817
- [6] Berkhout, C.F. und van Lent, P.H.: Anwendung von Spitztemperatur-Abkühlzeit (STAZ)-Schaubildern beim Schweißen hochfester Stähle. *Schweißen und Schneiden* **20**, Nr. 6 (1968), S. 256-260
- [7] Voß, O., Decker, I. und Wohlfahrt, H.: Determination of Residual Welding Stresses under Consideration of Structural Transformations Using a Multi-Purpose Finite Element Program. *Proc. of Thermal Stresses '97*. Rochester, S. 239-242
- [8] Wendelstorf, J., Decker, I., Wohlfahrt, H. und Simon, G.: TIG and plasma arc modelling. In Cerjak, H. (ed.): *Mathematical modelling of Weld Phenomena III*, London, The Institute of Materials, 1997, S. 848-897
- [9] Wendelstorf, J., Decker, I., Wohlfahrt, H. und Simon, G.: Berechnung anwendungsrelevanter Zielgrößen von thermischen Lichtbögen: Katodenfallmodelle und deren Integration in die Lichtbogenmodellierung. 8. *Bundesdeutsche Fachtagung Plasmatechnologie*, Dresden, 14-17.9.1997
- [10] Kim, S. D. und Na, S. J.: Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding. *Welding Journal* **71** (1992), S. 179s-193s
- [11] Zacharia, T. und David, S. A.: Heat and Fluid flow in welding. In Cerjak, H. und Easterling, K. (ed.): *Mathematical modelling of Weld Phenomena*, London, The Institute of Materials, 1993, S. 3-23
- [12] Grundlagenuntersuchungen zum Stromansatz von thermisch emittierenden Plasmalampen, BMBF-Verbundvorhaben 13N7105, 1997-2000