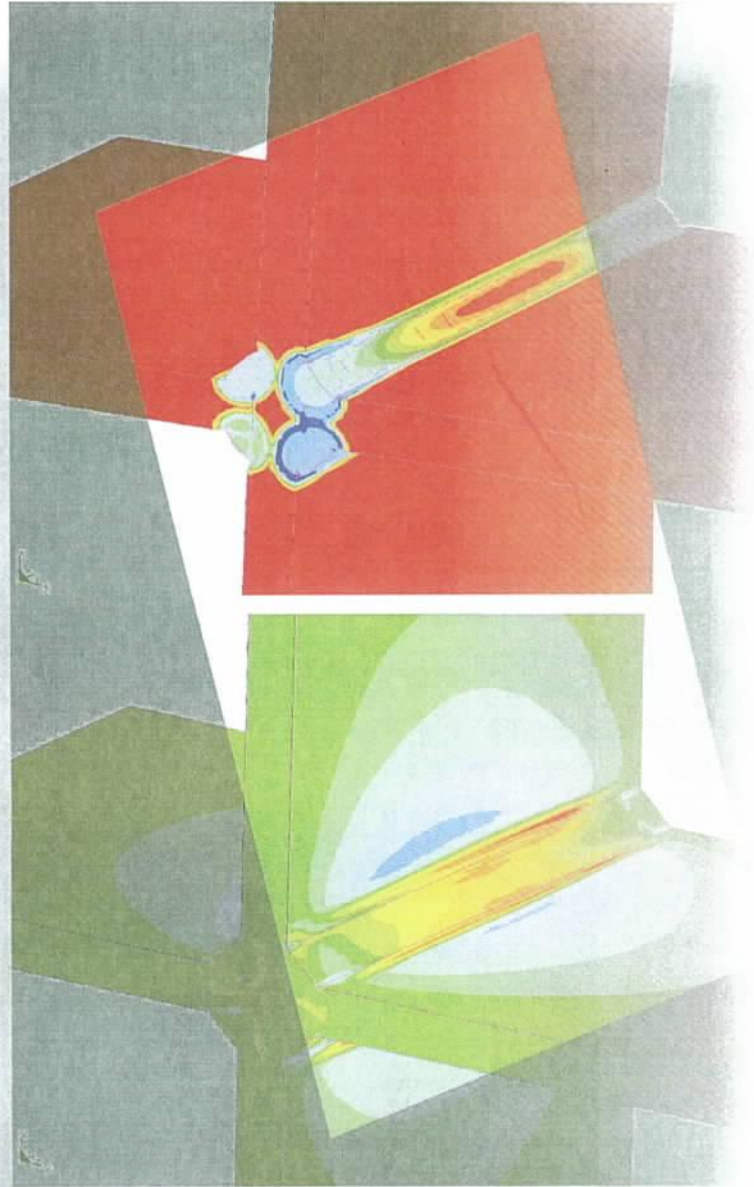


SYSTEMFELD FORUM 2007

Tagungsband



 **ESI GROUP**
THE VIRTUAL TRY-OUT SPACE® COMPANY

**Bauhaus-Universität
Weimar**

Professur Stahlbau
Institut für Konstruktiven
Ingenieurbau

15. November 2007
Weimar

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Simulation der Wärmewirkung des Schweißens basierend auf Microsoft Excel ® H. Porzner, ESI GmbH	7
Fertigungstechnische Herausforderungen bei der Herstellung gekrümmter Fahrwegträger für den Sky Train - Düsseldorf J. Neudel, Plauen Stahl Technologie GmbH	15
Multiphysikalische Prozesskopplung am Beispiel einer stumpf geschweißten und nachbehandelten Stahlplatte Th. Kirsch, P. Schaumann, Ch. Keindorf, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover	25
Schweißsimulationsberechnung mit Schalenelementmodellen T. Loose, R. Ilieva, Ingenieurbüro Tobias Loose GbR	36
Integration des Simulationspaketes SimWeld in FEM-Analyse Programme zur Modellierung von Schweißprozessen E. Alfredo Sambrano Rossiter, O. Mokrov, U. Reisingen, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen	47
Strukturmechanische Berechnung nach einer Schweißsimulationsberechnung T. Loose, R. Ilieva, Ingenieurbüro Tobias Loose GbR	55
Rechnergestützte Optimierung des Betriebsverhaltens und der Schweißbarkeit von T- Stoßverbindungen im Flugzeugbau H. Gruss*, A. Pshennikov**, H. Herold**, * MBDA / LFK, ** Institut für Werkstoff- und Fügetechnik Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg	64
Bestimmung von Eigenspannungen in Aluminiumschweißverbindungen A. Lechner, H. Cramer, SLV München	77
Möglichkeiten und Grenzen bei der numerischen Simulation einer Stumpfnah an Duplex-Stahl J. Hildebrand*, F. Werner*, H. Heinemann**, G. Köhler**, *Bauhaus-Universität Weimar, **Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH Jena	86
Anwendungsmöglichkeiten der Schweißsimulation zur Analyse und Verbesserung der Sicherheit gefügter Bauteile Ch. Schwenk, M. Rethmeier, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	98

Schweißsimulationsberechnung mit Schalenelementmodellen

Tobias Loose¹ und Radostinka Ilieva²

Ingenieurbüro Tobias Loose GbR, Herdweg 13, 75045 Wössingen, Deutschland

¹ E-Mail: loose@tl-ing.de

² E-Mail: ilieva@tl-ing.de

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Schweißsimulationsberechnung werden üblicherweise Volumenelementmodelle und nur selten Schalenelementmodelle verwendet. In der FEM werden Schalenelemente verwendet, um dünne Bauteile abzubilden. Die Verwendung von Schalenelementen hat gegenüber der Verwendung von Volumenelementen den Vorteil, daß eine geringere Elementanzahl hinreichend ist und sich damit die Berechnungszeit verringert.

In dieser Veröffentlichung wird gezeigt, wann ein Schalenelementmodell eingesetzt werden kann, wie ein Schalenelementmodell zur Schweißsimulationsberechnung aufgebaut wird, welcher Elementtyp verwendet wird und wie die Randbedingungen definiert werden und welche numerische Formulierung verwendet wird.

Im weiteren wird gezeigt, wie eine Volumenwärmequelle auf eine Oberflächenwärmequelle für Schalen abgewandelt wird und welche Besonderheiten beim Wärmeeintrag zu beachten sind.

Besonders bei der Verwendung von Schalenelementen hängt die numerische Stabilität der thermischen Berechnung von Elementgröße und Zeitschritt ab. Die Zusammenhänge werden an einem Beispiel erläutert und die bei Mißachtung von Grenzen auftretenden nichterwünschten Effekte gezeigt.

1 Einleitung

Bei der Finite-Element-Methode gibt es drei Hauptgruppen von Elementtypen: eindimensionale Stabelemente, zweidimensionale Schalen oder Scheibenelemente und dreidimensionale Volumenelemente. Mit dreidimensionalen Volumenelementen ist allgemein eine Beschreibung für jede beliebige Geometrie möglich. Hinsichtlich der Netzdiskretisierung führen Volumenelementmodelle schnell zu sehr großen Modellen mit langen Berechnungszeiten. Wenn abhängig eine Modellierung mit ein- oder zweidimensionalen Elementen möglich ist, haben diese Modelle eine geringere Größe als Volumenelementmodelle für das gleiche Problem. Stabelemente werden für Rahmentragwerke verwendet, Scheibenelemente für ebene Probleme und Schalenelemente für dünnwandige biege- und membranbeanspruchte Bauteile. Die Abmessungen in Längs- und Querrichtung sind bei dünnwandigen Bauteilen größer als die Abmessung in Dickenrichtung.

Üblicherweise werden in der Schweißsimulationsberechnung Volumenelementmodelle verwendet. Bei dünnwandigen Bauteilen ist die Diskretisierung mit Schalenelementen vorteilhafter als eine Diskretisierung mit Volumenelementen. Die Elementgröße hängt von der kleinsten Bauteilabmessung ab. Bei dünnwandigen Bauteilen ist dies die Blechdicke, die beim Volumenelement die Kantenlänge begrenzt. Die Kantenlänge des Schalenelementes ist üblicherweise deutlich größer als die Blechdicke. Daher kann ein Schalenelement mehrere Volumenelemente ersetzen. Dadurch reduziert sich die Berechnungszeit. In Sysweld sind Schalenelemente implementiert, mit denen eine Schweißsimulationsberechnung mit gekoppelter Temperaturfeldberechnung, Gefügeumwandlungsberechnung und struktrurmechanischer Berechnung möglich ist.

2 Sysweld Schalenelement

TYP 4 ist in Sysweld der Schalenelementtyp für die Schweißsimulationsberechnung und als isoparametrisches Dreieck- oder Viereckelement verfügbar. Der Elementtyp mit quadratischen Ansätzen (2406, 2408) ist bei einer Schweißsimulation dem Elementtyp mit linearen Ansätzen (2403, 2404) vorzuziehen. Die hohen Spannungsgradienten aus den thermometallurgischen Dehnungen insbesondere im Bereich der WEZ führen bei den Elementen mit linearen Ansätzen zu mangelhafter Spannungsberechnung. Das Schalenelement 2408 ist mit Koordinaten und den Schnittgrößen aus der strukturmechanischen Berechnung in Abbildung 1 dargestellt.

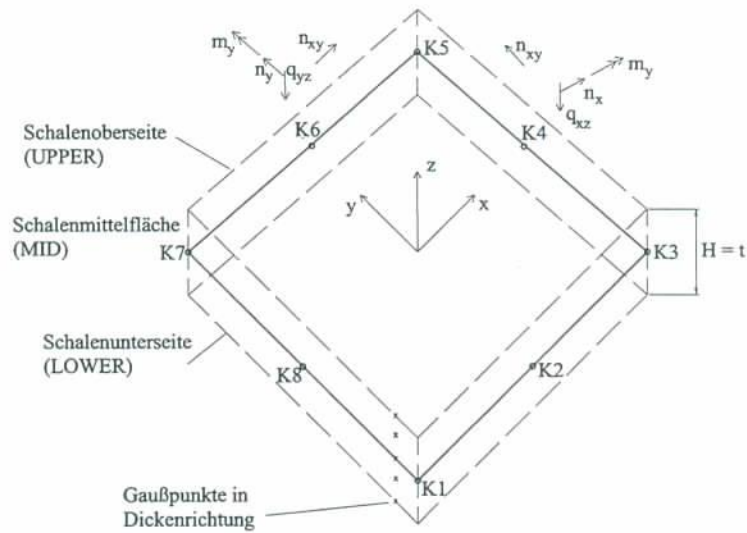


Abbildung 1: Sysweld Schalenelement TYP 2408

Schalen haben an den Knoten mehrere Integrationspunkte (Gaußpunkte) rechtwinklig zur Schalenebene. In Sysweld können 3 bis 9 Gaußpunkte in Dickenrichtung gewählt werden. Dadurch können Gradienten in Dickenrichtung abgebildet werden. Bei den Schalenelementen gibt es drei Ebenen, die bei der Definition von Lasten und Randbedingungen angesprochen werden können:

Schalenunterseite, lower surface, in Richtung negativer Z-Achse, Schlüsselwort: LOWER

Schalenmittelfläche, mid surface, Schlüsselwort: < >

Schalenoberseite, upper surface, in Richtung positiver Z-Achse, Schlüsselwort: UPPER

Die Temperaturfeldberechnung muß mit topologisch gleichen Schalenelementen wie die strukturmechanische Berechnung durchgeführt werden. Die Berechnungsergebnisse aus der Temperaturfeldberechnung werden an Gaußpunkten gespeichert und müssen bei der strukturmechanischen Berechnung an den identischen Gaußpunkten abgerufen werden können. Folglich muß auch die Anzahl der Gaußpunkte bei beiden Berechnungen identisch sein.

Bei der Temperaturfeldberechnung wird in Schalendickenrichtung kein Wärmestrom aus Wärmeleitung berechnet. Ein Temperaturgradient in Dickenrichtung ergibt sich nur aus den Randbedingungen. Dies kann eine Wärmequelle auf der Schalenoberseite sein oder unterschiedlicher Wärmeübergang an den Schalenaußenseiten. In Schalenlängsrichtung werden Ansatzfunktionen aus Lagrange-Polynomen verwendet.

Für die strukturmechanische Berechnung enthält das Schalenelement Typ 4 Ansätze nach der Scheibentheorie für die Lastabtragung in Schalenebene (Membranverschiebung) und Ansätze nach der Plattentheorie für die Lastabtragung rechtwinklig zur Schalenebene (Biegeverformung). Für die Membranverschiebung werden Ansatzfunktionen aus Lagrange-Polynomen und für die Biegeverformung Ansatzfunktionen aus

Hermite-Polynomen verwendet. Die Schubverformung rechtwinklig zur Schalenebene wird berücksichtigt. Das Schalenelement hat drei Verschiebungs- und zwei Rotationsfreiheitsgrade. Die Rotation um die Oberflächennormale (z-Richtung) ist ohne Wirkung.

Die Schalenelemente sind ausgelegt für Berechnungen von Systemen mit großen Verformungen, großen Rotationen und kleinen Verzerrungen.

3 Abgrenzung zwischen zwei- und dreidimensionaler Wärmeleitung

Ein Schalenelementmodell ist geeignet zweidimensionale Wärmeleitung abzubilden. Bei zweidimensionaler Wärmeleitung existiert kein signifikanter Wärmestrom in Dickenrichtung. Der Temperaturgradient in dieser Richtung ist vernachlässigbar klein. Für den Anwendungsfall ist zu beurteilen, ob zweidimensionale Wärmeleitung vorliegt oder ob es sich um dreidimensionale Wärmeleitung mit einem signifikanten Temperaturgradient in Dickenrichtung handelt. Der Temperaturgradient in Dickenrichtung kann durch den Wärmeeintrag oder durch die Wärmeabgabe entstehen.

Im DVS-Merkblatt 1703 [DVS, 1984] wird zwischen zweidimensionaler und dreidimensionaler Wärmeleitung unterschieden. Die Grenzblechdicke liegt nach [DVS, 1984] zwischen 11 mm und 14 mm.

Beim Schweißverfahren MIG/MAG einlagiger Nähte ist die Schweißwärmequelle nicht zentrisch in Blechmitte. Der Temperaturgradient in Blechdickenrichtung unmittelbar an der Schweißwärmequelle ist hoch. Aus der dreidimensionalen Temperaturfeldberechnung für ein 6 mm dickes Blech mit Blindnaht ergibt sich, daß zwar die 1500 °C Isotherme geneigt ist, jedoch bereits die 800 °C Isotherme hinter der Schweißwärmequelle einen zur Blechoberfläche rechtwinkligen Verlauf aufweist. Die Isothermen dieses Modells sind in Abbildung 2 dargestellt. Da für die Eigenspannungsberechnung und die Berechnung des Verzuges der Temperaturbereich oberhalb 800 °C eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Annahme einer zweidimensionalen Wärmeableitung ohne Temperaturgradient in Dickenrichtung gerechtfertigt. Eine für einlagige Stumpfnähte und Blechdicken bis 6,0 mm gewählte Abbildung als Scheibenelementmodell mit zentrisch eingetragener Wärmequelle wird daher als hinreichend zutreffend angesehen.

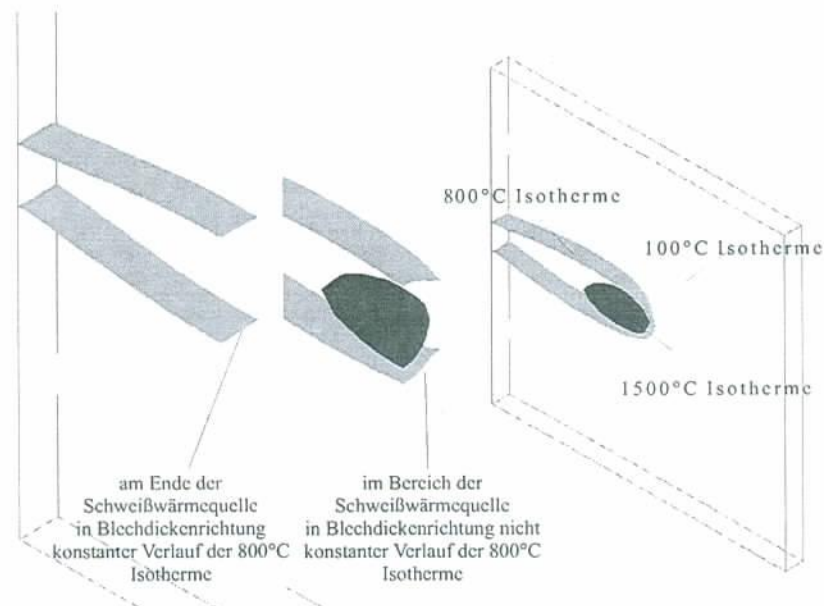


Abbildung 2: Isothermen der Blindnaht eines 6 mm dicken Bleches

Beim Laserschweißen ist der Wärmeeintrag über die Blechdicke annähernd konstant, so daß dadurch zunächst zweidimensionale Wärmeleitung vorliegt. Aufgrund der Wärmeabgabe an der Oberfläche kann sich ab einer gewissen Blechdicke dennoch ein dreidimensionaler Wärmestrom einstellen.

Für ein gleichmäßig erwärmtes Blech, dessen Oberfläche gekühlt wird, kann mit der Biot-Zahl Bi abgeschätzt werden, ob sich ein signifikanter Temperaturgradient in Dickenrichtung ausbildet [Incropera & Dewitt, 2002]. Die Biot-Zahl wird für ein Blech der Dicke t , der Wärmeleitfähigkeit λ und dem Wärmeübergangskoeffizienten α wie folgt definiert:

$$Bi = \frac{2 \cdot \alpha \cdot t}{\lambda} \quad (1)$$

Für ein 6 mm dickes Blech aus unlegiertem Stahl beträgt die Biot-Zahl bei Raumtemperatur $Bi = 0,0055$ und bei 1000 °C $Bi = 0,065$. Die Biot-Zahl ist sehr viel kleiner als Eins. Dies sagt aus, daß sich aufgrund der Abkühlung an der Blechoberfläche kein signifikanter Temperaturgradient in Dickenrichtung ausbildet.

Bei mehrlagigen Nähten ist der Wärmeeintrag nicht zentrisch. Durch die lagenweise Spaltfüllung ändert sich die Steifigkeit im Nahtbereich während des Schweißvorganges. Bei einer mehrlagig geschweißten Naht wird vorzugsweise ein Volumenelementmodell oder ein Schalen-Volumenelementmodell mit Volumenelementen im Nahtbereich verwendet.

4 Wärmequelle

Für Schalenelemente ist die doppeltellipsoide Volumenwärmequelle nach Goldak [Goldak & Mehdi, 2005] nicht geeignet. Die geometrisch veränderliche Ausbreitung in Richtung der Blechdicke, die bei einem Volumenelementmodell möglich ist, läßt sich nicht auf die verwendeten Schalen übertragen.

Bei Schalen kann die Wärmequelle nur auf die Oberseite, Mittelebene und Unterfläche aufgebracht werden. Hierzu wird eine Wärmequelle benötigt, bei der in Dickenrichtung keine veränderliche Größe existiert. Dazu kann für die Abbildung einer MIG/MAG-Schweißwärmequelle die in Abbildung 3 dargestellte doppelt-halbelliptische Oberflächenwärmequelle verwendet werden, die analog zur Volumenwärmequelle ebenfalls eine Gauß normalverteilte Wärmequellendichte besitzt und sich aus der Volumenwärmequelle ableitet, indem die z -Koordinate entfällt. Für das Laserstrahlschweißen muß die Wärmequelle von der Ellipsenform zur Kreisform geändert werden.

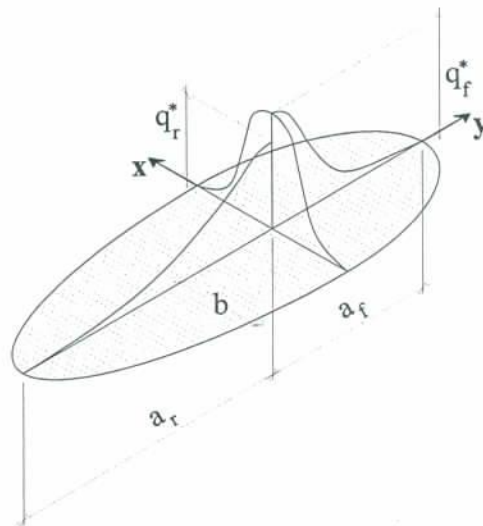


Abbildung 3: Doppelt-halbelliptische Oberflächenwärmequelle

Die Funktion der flächenspezifischen Wärmequellendichte q^* lautet für die frontseitige Ellipse:

$$q^*(x, y) = q_f^* \cdot e^{-\frac{mx^2}{a_f^2}} \cdot e^{-\frac{my^2}{b_f^2}} \quad (2)$$

und für die rückwärtige Ellipse:

$$q^*(x, y) = q_r^* \cdot e^{-\frac{mx^2}{a_r^2}} \cdot e^{-\frac{my^2}{b_r^2}} \quad (3)$$

mit dem Maximalwert q_{lr}^* der flächenspezifischen Wärmequellendichte.

Mit dem Exponenten m wird die Wärmequellendichte am Ellipsenrand eingestellt. Für $m = 3$ beträgt die Wärmequellendichte am Rand 5% des Maximalwertes q^* und für $m = 1$ beträgt sie 37%.

Bei Sysweld wird diese Wärmequelle, wenn sie an Schalenober- oder Schalenunterseite aufgebracht wird, als Oberflächenwärmequelle interpretiert. Die Eingabezeilen lauten beispielsweise:

LOAD

1 Oberflächenwärmequelle

```
ELEMENTS GROUPS $SCHALE$ / QR 10.6 VARIABLE -10000 TRAJECTORY 1 UPPER
ELEMENTS GROUPS $SCHALE$ / QR 10.6 VARIABLE -10000 TRAJECTORY 1 LOWER
```

Für die Schweißsimulationsberechnung ist es sowohl beim MIG/MAG als auch beim Laserstrahlschweißen angebracht, die Wärmequelle nicht als Oberflächenwärmequelle zu definieren, sondern die Wärme zentrisch auf das Schalenelement aufzubringen. Die Definition in der Eingabedatei lautet dann:

LOAD

1 zentrische Wärmequelle

```
ELEMENTS GROUPS $SCHALE$ / QR 10.6 VARIABLE -10000 TRAJECTORY 1
```

Die Definition dieser Wärmequelle ist mit der Definition der Oberflächenwärmequelle identisch. Sysweld interpretiert die Wärmequelle als prismatische Volumenwärmequelle. Die flächenspezifische Wärmequellendichte q^* in den Gleichungen 2 und 3 wird zur volumenspezifischen Wärmequellendichte q^{**} und über die Blechdicke t aufintegriert. Die eingebrachte Gesamtwärme ergibt sich zu:

$$Q = t \cdot \int q^{**}(x, y) dA \quad (4)$$

Liegen im Modell zwei Bleche hintereinander, die von dem Prisma geschnitten werden, dann muß bei der Definition der Wärmequellenfunktion die Wirksamkeit in Abhängigkeit von der lokalen z -Koordinate der Trajektorie begrenzt werden. Dies kann durch eine if-Bedingung erfolgen, wie sie am Ende vom Beispiel in Tabelle 1, der Definition einer Schalenwärmequelle für MIG/MAG in der Eingabedatei, angegeben ist.

5 Stabilitätskriterium für die Temperaturfeldberechnung

Bei der numerischen Temperaturfeldberechnung mit der Finite-Element-Methode kommt es zu Instabilitäten in der Berechnung, wenn der Zeitschritt zu klein gewählt wird. Diese Instabilitäten äußern sich durch sogenannte Oszillationen: Schwingungen im Zeit-Temperaturverlauf oder negative Temperaturen. Der kleinste zulässige Zeitschritt, der Mindestzeitschritt Δt_{min} , ist abhängig von der Dichte ρ , der spezifischen Wärmekapazität c , der Schalendicke oder Elementgröße l und der Wärmeleitfähigkeit λ . Bergheau [Bergheau & Fortunier, 2004] gibt für den Mindestzeitschritt folgenden Grenzwert für das zur Temperaturfeldberechnung beim Schweißen verwendete Backward-Differenz-Verfahren an:

$$\Delta t_{min} = \frac{\rho \cdot c \cdot l^2}{3\lambda} \quad (5)$$

Tabelle 1: Beispiel einer Wärmequellendefinition für Schalenelemente in der Eingabedatei

<pre> 10000 / FORTRAN FUNCTION F(X) DIMENSION X(4) XX = X(1) ; X Coordinate YY = X(2) ; Y Coordinate ZZ = X(3) ; Z Coordinate TT = X(4) ; Time QF = 1.2 QR = 1.0 AF = 1.875 AR = 3.125 B = 1.25 X0 = 0.0 Y0 = 0.0 VY = 0.0 AY = 0.0 M1 = -1 XD = XX - X0 YD = VY * TT YD = YD + Y0 ZD = ZZ SA = SIN(AY) SA = - SA CA = COS(AY) A1 = XD * CA A2 = ZD * SA XL = A1 + A2 </pre>	<pre> YL = YY - YD COND = VY * YL IF (VY .EQ. 0.) COND = YL QC = QR AC = AR IF(COND .GT. 0.) QC = QF IF(COND .GT. 0.) AC = AF A1 = YL * YL A2 = AC * AC A2 = A1 / A2 A2 = M1 * A2 V1 = EXP(A2) A1 = XL * XL A2 = B * B A2 = A1 / A2 A2 = M1 * A2 V2 = EXP(A2) <Begrenzung z-Richtung auf 30 mm> V3 = 0 IF (ZD .LT. 30.) V3 = 1 F = QC * V1 F = F * V2 F = F * V3 RETURN END </pre>
--	--

Werden die thermodynamischen Werkstoffkennwerte mit

$$\rho = 7,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

$$c = 500 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda = 0,046 \frac{\text{W}}{\text{mm} \cdot \text{K}} \text{ bei } 20^\circ\text{C} \text{ und}$$

$$\lambda = 0,024 \frac{\text{W}}{\text{mm} \cdot \text{K}} \text{ bei } 800^\circ\text{C}$$

angenommen, so ergeben sich für Elementgrößen von 1 mm bis 10 mm folgende Mindestzeitschritte:

Tabelle 2: Mindestzeitschritte für die Temperaturfeldberechnung

Elementgröße	$\Delta t_{\min}(20^\circ\text{C})$	$\Delta t_{\min}(800^\circ\text{C})$
1mm	0,0283s	0,0542s
2mm	0,113s	0,217s
4mm	0,452s	0,867s
6mm	1,02s	1,95s
10mm	2,83s	5,42s

Bei den verwendeten Schalenelementen richtet sich der Mindestzeitschritt nach der Kantenlänge der Schalenelemente. Wird bei diesen Schalenelementen die Wärme nicht zentrisch, sondern auf die Schalenober- oder Schalenunterseite aufgebracht, dann muß für die Bestimmung des Mindestzeitschrittes auch die Schalendicke berücksichtigt werden.

Am Beispiel eines 4 mm dicken Bleches, bei dem die Wärme auf die Schalenoberfläche eingetragen wird, soll der Effekt der numerischen Oszillation dargestellt werden. Der Mindestzeitschritt beträgt nach Tabelle 2

im unteren Temperaturbereich 0,452s. In Abbildung 4 ist der Zeit-Temperaturverlauf für die Schalenober-, Schalenunterseite und Schalenmittelfläche für eine Berechnung mit zwei Zeitschritten, 0,2 s und 0,5 s, dargestellt. Die Oszillation im Anfangsbereich beim Zeitschritt 0,2 s ist deutlich erkennbar. Es wird für die Schalenunterseite eine negative Temperatur berechnet, obwohl Wärme in das Bauteil eingetragen wird.

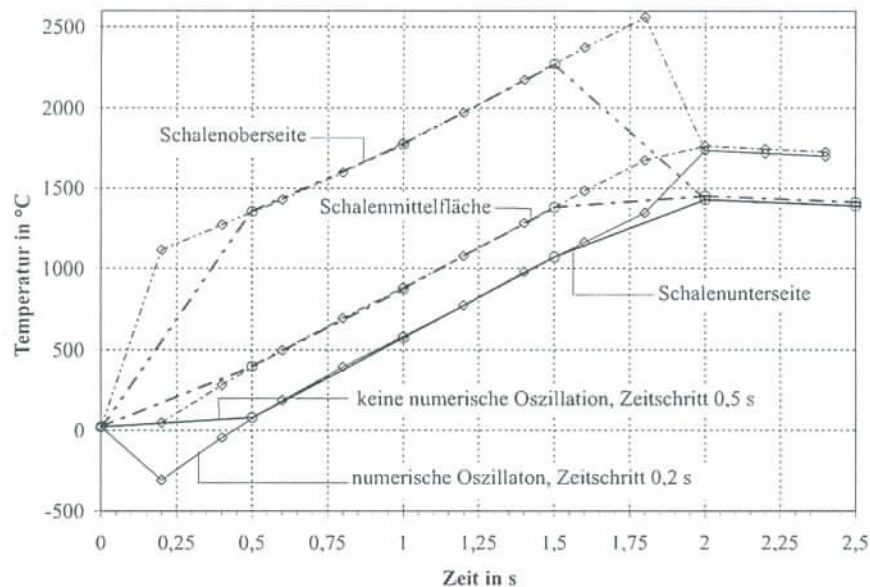


Abbildung 4: Zeit-Temperaturverlauf im Schalenelement, Berechnungszeitschritt von 0,2s und 0,5s

6 Randbedingungen

Bei der Temperaturfeldberechnung wird die elastische Randbedingung des Wärmeübergangs direkt über das Schalenelement definiert. Die Wärmeübergangsfunktion und die Umgebungstemperatur werden der Schalenoberseite und der Schalenunterseite zugewiesen.

CONSTRAINTS

ELEMENTS GROUPS \$SCHALE\$ / KT 1 VARIABLE 1 UPPER

ELEMENTS GROUPS \$SCHALE\$ / KT 1 VARIABLE 1 LOWER

LOAD

1

ELEMENTS GROUPS \$SCHALE\$ / TT 20. UPPER

ELEMENTS GROUPS \$SCHALE\$ / TT 20. LOWER

Bei der strukturemechanischen Berechnung können im Schalenelementmodell außer den Verschiebungen UX, UY, UZ die Rotationen RX, RY, RZ als Randbedingung gesetzt werden. Eine Rotation um die Normale zur Schalenebene ist als Randbedingung wirkungslos.

7 Berechnungsparameter

Für die Temperaturfeldberechnung wird bei Schalenelementmodellen die Option THERMAL METALLURGY SPATIAL gewählt, mit der für Schalen auch die Gefügeumwandlungsberechnung durchgeführt wird. Mit der Definition des Materials (MATERIAL PROPERTIES) erfolgt die Festlegung der Schalendicke über den Parameter H. Die Angabe der Gaußpunkte wird über den Parameter INTE gesetzt. Die erste Zahl vor der Null gibt dabei die Anzahl der Gaußpunkte in Dickenrichtung an, die Zahl hinter der Null die

Integrations-tiefe. Bei Schalenelementen mit quadratischen Ansätzen steht 2 für reduzierte und 3 für volle Integration, wobei reduzierte Integration bevorzugt verwendet wird. Mit TYPE 4 wird dem Element der Typ 4 zugewiesen. Diese Angabe ist notwendig, wenn das Netz nicht mit Typ 4, sondern mit Typ 0 Schalen generiert wurde.

DEFINITION

```
Schalenelementmodell
OPTION THERMAL METALLURGY SPATIAL
MATERIAL PROPERTIES
ELEMENTS GROUPS $SCHALE$ / MATE 1 TYPE 4 H 4.0 INTE 502
```

Für die strukturmechanische Berechnung wird die Option SHELL SPATIAL THERMOELASTICITY gewählt. In der Materialdefinition muß zwingend der Parameter INTE genauso wie für die Temperaturfeldberechnung gewählt werden. Für die Berechnung mit linearem Werkstoffverhalten sind 3 Gaußpunkte in Dickenrichtung hinreichend. Für die Berechnung mit elastisch-plastischem Werkstoffverhalten sind mindestens 5 Gaußpunkte erforderlich. Die Anzahl der Gaußpunkte wird so gering gewählt wie notwendig, da mit größerer Anzahl auch die Berechnungszeit steigt.

DEFINITION

```
Schalenelementmodell
OPTION SHELL SPATIAL THERMOELASTICITY
MATERIAL PROPERTIES
ELEMENTS GROUPS $SCHALE$ /<...> TYPE 4 H 4.0 INTE 502
```

Beim Befehl für das Einlesen des Temperaturfeldes ist die Option SHEM für Schalenelemente anzugeben:

```
TEMPERATURE METALLURGY TRANSIENT SHEM CARD
```

Bei der Wahl der numerischen Formulierung für die strukturmechanische Berechnung ist auf die relevanten Nichtlinearitäten, nichtlineares Werkstoffverhalten, nichtlineare Strukturantwort zu achten.

Für die Berechnung von Schweißbeigenspannungen und Schweißverzug an dickwandigen Bauteilen ist es ausreichend, bei der numerischen Formulierung nur nichtlineares Werkstoffverhalten zu berücksichtigen.

Bei dünnwandigen Bauteilen kommt es beim Schweißen zu lokalen Instabilitäten. Um diese in der Berechnung zu erfassen ist es notwendig, in der numerischen Formulierung große Verformungen und große Rotationen zu berücksichtigen. Bei Schalenmodellen wird daher die Updated Lagrangesche Formulierung gewählt. Dies erfolgt mit:

```
TRANSIENT NON-LINEAR STATIC
BEHAVIOUR PLASTIC METALLURGY 6 UPDLAGR
```

Als Lösungsalgorithmus wird das Verfahren nach Broyden Fletcher Goldfarb Shano (BFGS-Verfahren) verwendet. Es können bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen Zwischenzustände auftreten, bei denen mit dem reinen BFGS Verfahren Konvergenz nur bei sehr kleinen Zeitschritten erreicht wird. In dem Fall ist es hilfreich vor der BFGS-Iteration zunächst ein paar Iterationen mit dem Standard Newton-Raphson-Verfahren durchzuführen. Die Eingabezeile mit vier Newton-Raphson-Iterationen lautet:

```
ALGORITHM IMPLICIT 1 OPTI 1 1 4 BFGS ITER 19
```

Bei Kreiszylinderschalen hat sich herausgestellt, daß der Zeitschritt in s, bei dem die Berechnung der Strukturmechanik kontinuierlich konvergiert, in etwa ein Zehntel der Blechdicke in mm beträgt.

8 Berechnungsbeispiel

Ein klassisches Anwendungsgebiet für Schalelementmodelle in der FEM sind Berechnungen von Schalentragwerken. Abbildung 5 zeigt links das Netz und die Randbedingungen des Modells von einem Segment von 90° einer Kreiszylinderschale mit $R = 400$ mm, $t = 4$ mm, $L = 800$ mm. Es wurden zwei Schweißnähte gleichzeitig geschweißt (Abbildung 5 rechts). Die sukzessive Füllung der Schweißfuge wurde mit abgebildet.

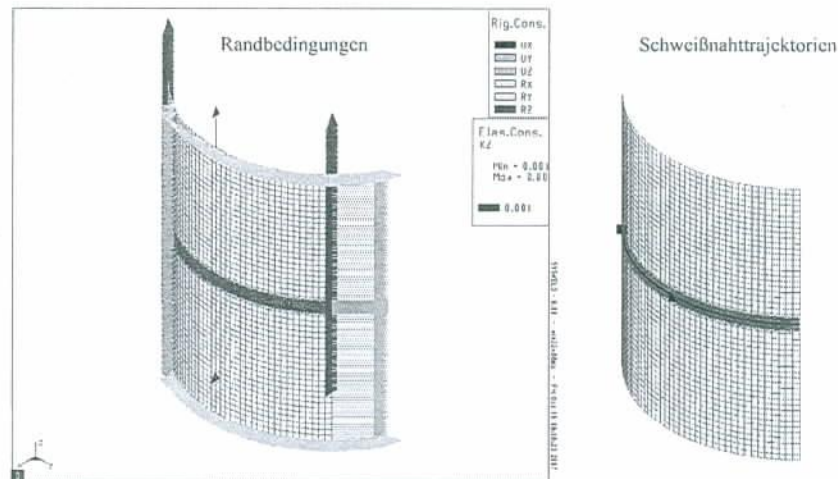


Abbildung 5: Randbedingung und Schweißnahttrajektorien vom Schalelementmodell des Segmentes einer Kreiszylinderschale

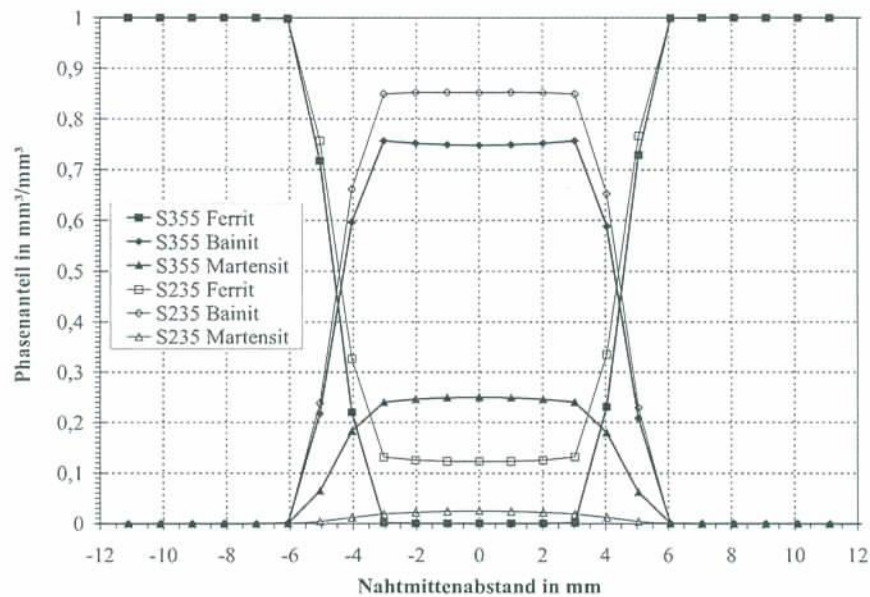


Abbildung 6: Gefügeanteile im Meridianschnitt einer Kreiszylinderschale aus S235 und S355 mit einer Wanddicke von 4 mm

Abbildung 6 zeigt am Meridian $-22,5^\circ$ die Gefügeverteilung nach dem Schweißen. Beim Zylinder aus S355 bildet sich ein größerer Martensitanteil als beim Zylinder aus S235. Die $\gamma \rightarrow \alpha$ findet beim S355 bei tieferen Temperaturen statt als beim S235. Die Umwandlungsdehnungen beeinflussen den Schweißverzug. In Abbildung 7 ist die Radialverformung nach dem Schweißen links für das Modell aus dem Stahl S235, rechts für das Modell aus dem Stahl S355. Trotz gleichen Temperaturfeldverlaufes unterscheiden sich die Verfor-

mungen zwischen beiden Werkstoffen deutlich. Dies ist auf das unterschiedliche Umwandlungsverhalten während des Schweißens zurückzuführen.

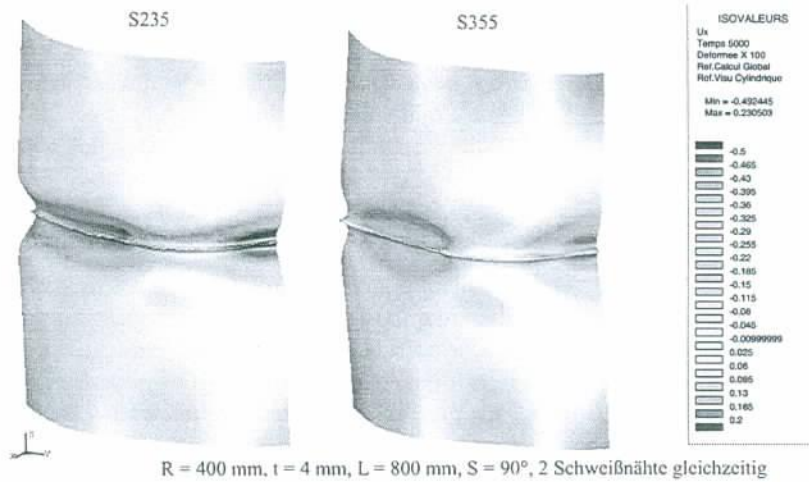


Abbildung 7: Radialverformung einer Kreiszyinderschale aus S235 und S355

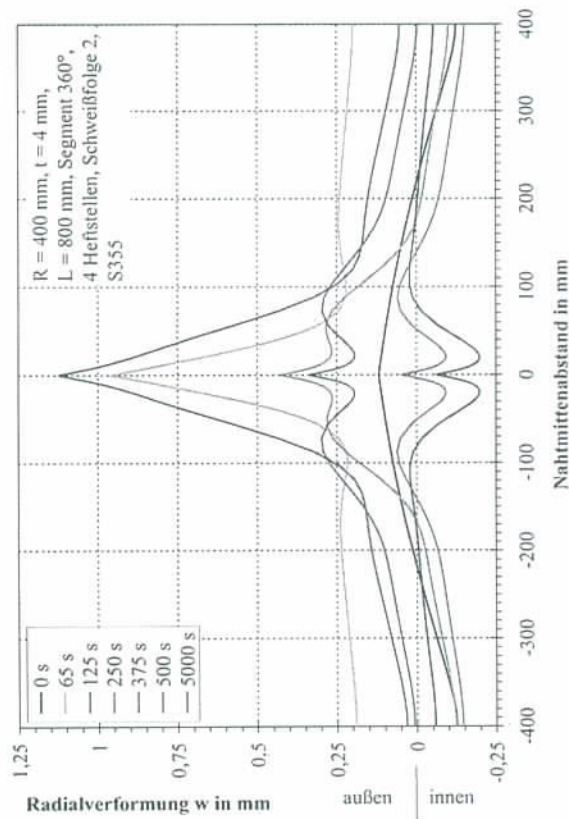


Abbildung 8: Radialverformung am Meridianschnitt während des Schweißens und Abkühlens

Abbildung 8 zeigt den Radialverzug zu verschiedenen Zeitpunkten am Meridian +45 der gleichen Kreiszyinderschale aus S355, die als ganzer Zylinder (Segment = 360°) abgebildet und mit einer umlaufenden Schweißnaht geschweißt wurde. Nach 65 s hat die Schweißwärmequelle den betrachteten Meridian erreicht. Die maximale Verformung stellt sich erst hinter der Schweißwärmequelle ein. Anschließend folgt die Abkühlphase.

Das Schmelzbad ist die heißeste Zone und damit auch der Bereich mit der geringsten Steifigkeit. Bei der Erwärmung dehnt sich der Nahtbereich radial nach außen aus. An der Grenzlinie zwischen oberer und unterer Zylinderhälfte ist im Schmelzbad und im unverschweißten Bereich keine tangentielle Biegesteifigkeit vorhanden. In Nahtmitte entsteht beim Ausdehnen ein Knick.

Der weitere Verlauf des Schweißverzuges wird durch Ausdehnung und Zusammenziehen der Nahtnebenbereiche wesentlich mitbestimmt und von der sich während des Schweißprozesses verändernden Systemsteifigkeit beeinflusst. Nach Erstarren und Abkühlen der Naht wird der Knick zwischen oberer und unterer Zylinderhälfte „eingefroren“.

Der Nahteinzug ist beim Abkühlen neben der Naht größer als in der Nahtmitte, so daß der in Bild 8 mit der Kurve für 5000 s dargestellte typische Verlauf der Radialverformung entsteht, der in qualitativ gleicher Form von Banke et al. [Banke et al., 2003] gemessen wurde.

Literaturverzeichnis

- [Banke et al., 2003] Banke, F., Schmied, J., & U., S. (2003). "Der Einfluß von Schweißzugspannung und Schweißverformungen auf das Beulverhalten von axialgedrückten Zylinderschalen". *Stahlbau*, 72(2), 91–101.
- [Bergheau & Fortunier, 2004] Bergheau, J.-M. & Fortunier, R. (2004). "Simulation numérique des transferts thermiques par éléments finis". Lavoisier.
- [DVS, 1984] DVS (1984). "-Merkblatt 1703: Empfehlungen zur Wahl der Werkstücktemperatur beim Lichtbogenschweißen von Stahlbauten aus St 52". Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V.
- [Goldak & Mehdi, 2005] Goldak, J. A. & Mehdi, A. (2005). "Computational welding mechanics". Springer.
- [Incropera & Dewitt, 2002] Incropera, F. P. & Dewitt, D. P. (2002). "Introduction to heat transfer". John Wiley + Sons.