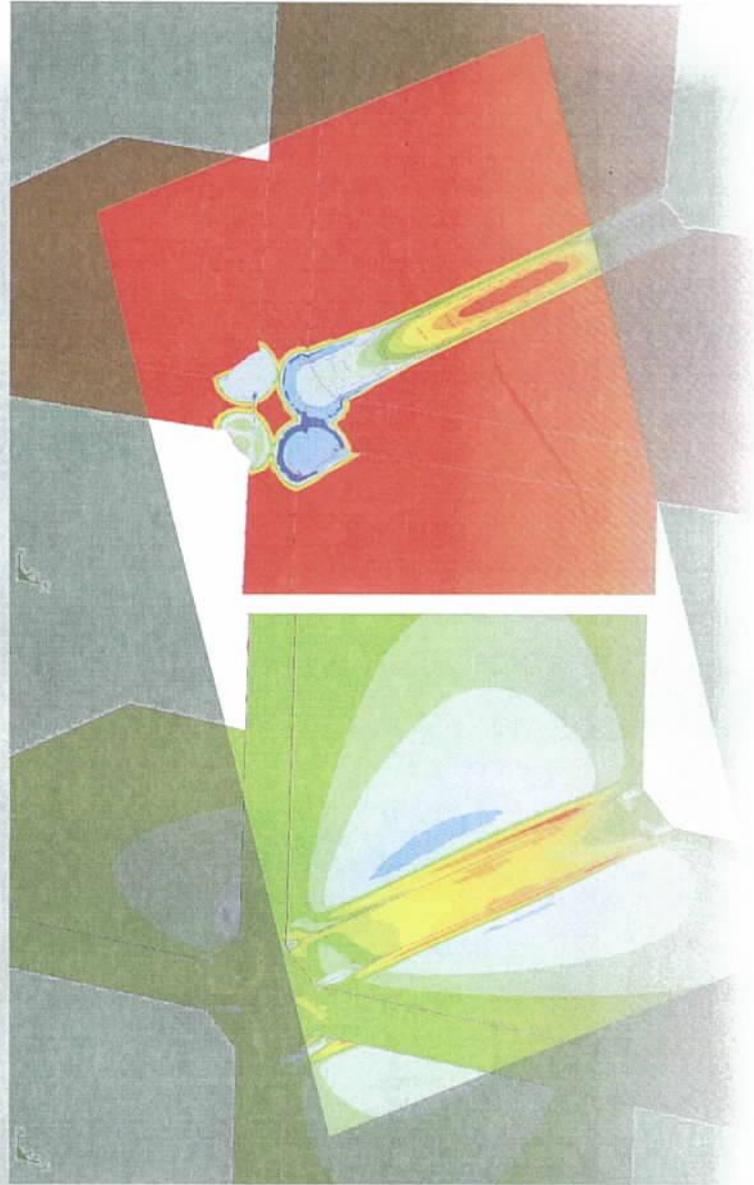


2007

SYSTEMFIELD FORUM

Tagungsband



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

**Bauhaus-Universität  
Weimar**

**Professur Stahlbau**  
Institut für Konstruktiven  
Ingenieurbau

15. November 2007  
Weimar

## Inhaltsverzeichnis

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

# Strukturmechanische Berechnung nach einer Schweißsimulationsberechnung

Tobias Loose und Radostinka Ilieva

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

<sup>1</sup> E-Mail: loose@tl-ing.de

<sup>2</sup> E-Mail: ilieva@tl-ing.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Sysweld ist ein allgemein anerkanntes Programm zur Berechnung von Schweißspannungen und von Schweißverzug. In einigen Anwendungsfällen ist jedoch nicht nur die Ermittlung der Schweißspannungen und des Verzuges von Interesse, sondern auch deren Auswirkungen auf das Trag- oder Stabilitätsverhalten. Diese Veröffentlichung soll zeigen, daß und wie strukturmechanische Berechnungen nach einer Schweißsimulationsberechnung mit Sysweld durchgeführt werden können.

Anhand von Vergleichsberechnungen mit anderen FE-Programmen wird das Verhalten der Sysweld-Schalenelemente bei Stabilitätsproblemen bewertet. Es wird dargestellt, wie Stabilitätsuntersuchungen nach einer Schweißsimulationsberechnung an einer Kreiszyinderschale unter Axiallast durchgeführt werden können.

Für eine Kehlnahtverbindung wird anhand einer Traglastberechnung der Einfluß von Schweißspannungen auf das Tragverhalten verdeutlicht, indem bei einer von zwei Varianten zuvor eine Schweißsimulationsberechnung durchgeführt wird, bei der anderen nicht.

## 1 Einleitung

Aus dem Fügeprozeß Schweißen entstehen im Bauteil Eigenspannungen und Verzug. Für die Fertigung wird jedoch im wesentlichen die Berechnung des Schweißverzuges und die Optimierung des Schweißprozesses auf minimalen Verzug betrachtet, da der Schweißverzug die Maßhaltigkeit des Werkstücks beeinträchtigt.

Schweißspannungen und Schweißverzug können sich auch auf die Tragfähigkeit eines Bauteils auswirken, denn die Stabilität wird durch diese beeinflusst. Eigenspannungen wirken sich auf das Last-Verformungsverhalten aus. Sprödbruchssicherheit und Ermüdungssicherheit werden ebenfalls von Eigenspannungen beeinflusst. Stellt sich die Frage nach der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung des Einflusses aus dem Schweißprozeß, dann wird eine strukturmechanische Berechnung oder bruchmechanische Berechnung unter äußeren, mechanischen Lasten benötigt, die als Ausgangsbedingung die Ergebnisse einer Schweißsimulationsberechnung, das Eigenspannungs- und Verzugsfeld, enthalten. In diesem Aufsatz werden die Punkte Stabilitätsberechnung und Traglastberechnung nach einer Schweißsimulation behandelt.

Die Schweißsimulationsberechnung mit Sysweld liefert gleichzeitig eine Berechnung der Gefügewandlung in der Nähe der Schweißnaht. Mit der Gefügewandlung ändern sich die mechanischen Eigenschaften. Eine an die Schweißsimulation anschließende strukturmechanische Berechnung kann mit dem mehrphasigen Werkstoffgesetz (METALLURGY) durchgeführt werden. Damit bleiben die Informationen über die Gefügewandlung erhalten.

Der Spannungs-Dehnungszustand nach dem Schweißen setzt sich aus einem komplexen, nichtlinearen und nicht rückverfolgbaren Vorgang aus Temperaturzyklus mit thermometallurgischen Dehnungen, umwandlungsplastischen Dehnungen, vor allem bei un- und niedriglegierten Stählen, Löschen der Materialhistorie und der Festigkeitsänderung durch Gefügewandlung zusammen. Es ist allenfalls nur mit großen Vereinfachungen möglich, den Spannungs-Dehnungszustand nach einer Schweißsimulation in ein FE-Modell ohne mehrphasiges Werkstoffgesetz als Anfangsbedingung einzubringen. In Abaqus beispielsweise können

Spannungen als Anfangsbedingung („initial conditions“) eingelesen werden. Unmittelbar nach dem Einlesen dieser Anfangsbedingung wird ein Berechnungsschritt durchgeführt, bei dem das innere Gleichgewicht für den aufgeprägten Zustand gesucht wird. Aus dieser Berechnung ergibt sich ein neuer, vom Dehnungszustand der Schweißsimulationsberechnung gänzlich abweichender Dehnungszustand, bei dem die Eigenspannungen gegenüber den Eingabewerten abnehmen. In Abbildung 1 ist das Beispiel einer Kreiszylinderschale im Bereich eines Nahtanfangs und Nahtendes dargestellt. Links sind die Quereigenspannungen nach der Schweißsimulationsberechnung mit Sysweld zu sehen, rechts die Quereigenspannungen im Element nach Datenübertragung und Gleichgewichtsberechnung in Abaqus. Die Eigenspannungen gehen zurück, es kommt zum Datenverlust. Aus diesem Grund ist eine auf die Schweißsimulation aufgesetzte strukturmechanische Berechnung mit Sysweld vorteilhafter, da keine Informationen verlorengehen.

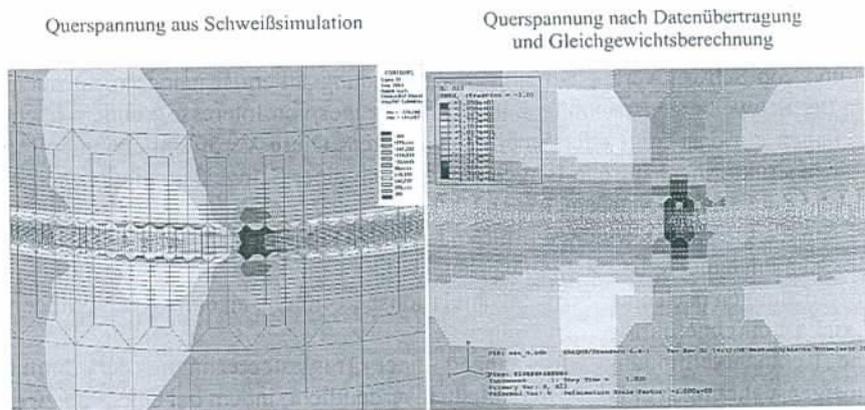


Abbildung 1: Quereigenspannung vor und nach einer Datenübertragung

## 2 Restart für eine strukturmechanische Berechnung mit mechanischen Lasten

Um die Berechnung mit der Gefügezusammensetzung nach der Schweißsimulation fortzuführen, werden für die strukturmechanische Berechnung mit mechanischen Lasten die gleichen Optionen gewählt wie bei der strukturmechanischen Berechnungsschritt der Schweißsimulation. Dies ist notwendig, da die mit dieser Option festgelegte Datenstruktur konsistent bleiben muß. Das heißt, daß auch für diese Berechnung ein Temperaturfeld eingelesen werden muß, auch wenn keine Lasten aus dem Temperaturfeld abgegriffen werden. Als Anfangsbedingung wird jeweils der letzte Berechnungsschritt aus der Temperaturfeldberechnung und strukturmechanischen Berechnung der Schweißsimulation verwendet. Es ist möglich, den letzten Zeitschritt selektiv zu speichern um die Datenmenge auf das Notwendige zu reduzieren:

<pre>&lt;für das Temperaturfeld&gt; NAME SCHW_ SAVE TRAN 1100 ASCII SELECTION CARD LAST RETURN SEAR TRAN 1100 ASCII SAVE DATA TRAN 1100</pre>	<pre>&lt;für die Strukturmechanik&gt; NAME SCHW_ SAVE TRAN 2100 ASCII SELECTION CARD LAST RETURN SEAR TRAN 2100 ASCII SAVE TRAN 2100</pre>
---	--

Das selektive Abspeichern ist derzeit nur im ASCII-Modus möglich. Nach dem Abspeichern im ASCII-Modus erfolgt das Konvertieren in den Binär-Modus, da das Einlesen des Temperaturfeldes nur aus dem Binär-Modus möglich ist.

Für das Preprocessing der Schweißsimulation folgenden Berechnung (\*LAST.DAT) wird mit zwei Modifikationen die gleiche Eingabedatei wie für die strukturmechanische Berechnung der Schweißsimulation verwendet. Der Befehl MEDIUM kann entfallen. Nach dem Befehl LOAD sind die mechanischen Lasten für das Bauteil zu definieren. Es können Knotenlasten als Weg- oder Kraftgröße und Elementlasten ang

geben werden. Das nachfolgende Beispiel zeigt die Eingabe von Knotenlasten, die mit einer Zeitfunktion gekoppelt sind.

```
DEFINITION
  Traglast Berechnen
< ... wie *MECH.DAT der Schweißsimulation, MEDIUM kann entfallen ...>
LOAD
1 Knotenlasten
  NODE GROUPE $LASTKNOTEN$ / FZ=-1.0 FT 1
TABLE
  1 / 1
    0    0
    100 7854
<... TABLE für Werkstoffgesetz wie *MECH.DAT der Schweißsimulation ...>
RETURN
SAVE DATA 2100
```

Die Eingabedatei für die Berechnung (\*LAST\_C.DAT) beginnt mit dem Einlesen des Temperaturfeldes. Wird der Zeitbereich der eingelesenen Karten über- oder unterschritten, dann werden die Daten aus der jeweils letzten Karte verwendet. Bei nur einer eingelesenen Karte gelten die Daten dieser Karte für den gesamten Zeitbereich. Unit 19 wird mit der Transientdatei verbunden (ASSIGN), in der der letzte Zeitschritt der strukturmechanischen Berechnung der Schweißsimulation gespeichert wurde. Mit INITIAL CONDITIONS RESTART CARD LAST wird festgelegt, daß auf diesen Zeitschritt bei der weiteren Berechnung aufgesetzt wird. TIME INITIAL setzt die Anfangszeit für den neuen Berechnungsabschnitt. Dieser kann mit RESTART auf die Zeit der letzten Karte gesetzt werden oder wie im folgenden Beispiel neu gesetzt werden. Die Neudefinition hat den Vorteil, daß die Zeit mit dem Laststeigerungsfaktor gleichgesetzt werden kann.

```
SEARCH DATA 1100
ASSIGN 19 SCHW_TRAN1100.TIT
TEMPERATURE METALLURGY TRANSIENT SHEM CARD LAST
DEASSIGN 19
; ***** Lastberechnung *****
SEARCH DATA 2100
ASSIGN 19 SCHW_TRAN2100.TIT
;
TRANSIENT NONLINEAR STATIC
BEHAVIOUR PLASTIC METALLURGY 6 UPDLAGR
ALGORITHM IMPLICIT 1 BFGS ITER 19
PRECISION ABSOLUTE FORCE 1*-3 DISP 1*-3 ENER 5*-3 UNIT
METHOD SYMMETRICAL TEST 2 OPTIMISE
STEP DTMINI .1 DTMAXI 10 EPSF 20**20 EPSD 5*-2 FACC .5 FACP 1.5 FORCE
DEACT
INITIAL CONDITIONS RESTART CARD LAST
;
TIME INITIAL 0
  100.0 step 0.5 / store 0
RETURN
```

### 3 Stabilitätsberechnung mit Sysweld Schalenelementen

#### 3.1 Schwach gekrümmtes Tonnendach unter Einzellast

Bei einem schwach gekrümmten Tonnendach unter Einzellast im First handelt es sich um ein System mit geometrisch nichtlinearem Systemverhalten, bei dem bei einer bestimmten Last das Dach durchschlägt. Das in Abbildung 2 dargestellte System wird von Entwicklern von Finite-Element-Programmen als Verifikationstest verwendet. Die Schalenelemente von Sysweld sollen anhand dieses Beispiels überprüft werden.

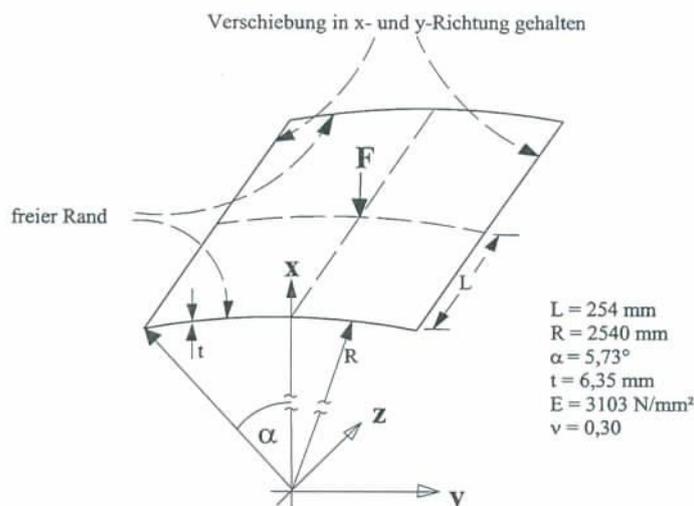


Abbildung 2: Geometrie des Tonnendachs

Bei den im Schrifttum veröffentlichten Berechnungen [Sabir & Lock, 1973, Crisfield, 1980, Ramm, 1980] wird ein ideal-elastisches Werkstoffgesetz zugrunde gelegt. Die Berechnungen werden jeweils für ein Symmetrieviertel durchgeführt. Die unsymmetrischen Lösungen werden durch die Symmetriebedingungen unterdrückt [Hinton, 1992].

Sabir und Lock [Sabir & Lock, 1973] verwenden für ein Symmetrieviertel ein  $4 \times 4$  Netz aus Rechteckschalenelementen, Chrisfield [Crisfield, 1980] ein  $5 \times 5$  Netz aus Rechteckschalenelementen und Ramm [Ramm, 1980] ein  $2 \times 2$  Netz aus bikubischen, degenerierten 16-knotigen Rechteckschalenelementen.

Die eigenen Berechnungen werden für ein Symmetrieviertel mit einem  $6 \times 6$  Netz aus 4-Knoten-Rechteckschalenelementen mit Sysweld und zum Vergleich mit Abaqus durchgeführt. Die Elementansätze sind bei Sysweld und Abaqus gleich.

Für die thermo-mechanische Kopplung gibt es bei Sysweld die Option Thermoelasticity. Da diese Option später verwendet wird, werden mit Sysweld zwei Berechnungen durchgeführt, eine Berechnung ohne thermo-mechanische Kopplung und eine mit thermo-mechanischer Kopplung, bei der ein konstantes Temperaturfeld mit  $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  hinterlegt wird. Aus diesem Temperaturfeld werden keine Wärmedehnungen in das System eingetragen.

Die Last-Verformungspfade werden mit dem Bogenlängenverfahren nach Riks [Riks, 1979] berechnet. Die von Sabir und Lock, Chrisfield und Ramm ermittelten Last-Verformungspfade sind in Abbildung 3 den mit Sysweld und Abaqus berechneten Last-Verformungspfaden gegenübergestellt.

Es ist bei der Berechnung mit Sysweld festzustellen, daß die mit der Option Thermoelasticity durchgeführte

thermo-mechanisch gekoppelte Berechnung den identischen Last-Verformungspfad liefert wie die Berechnung ohne thermo-mechanische Kopplung.

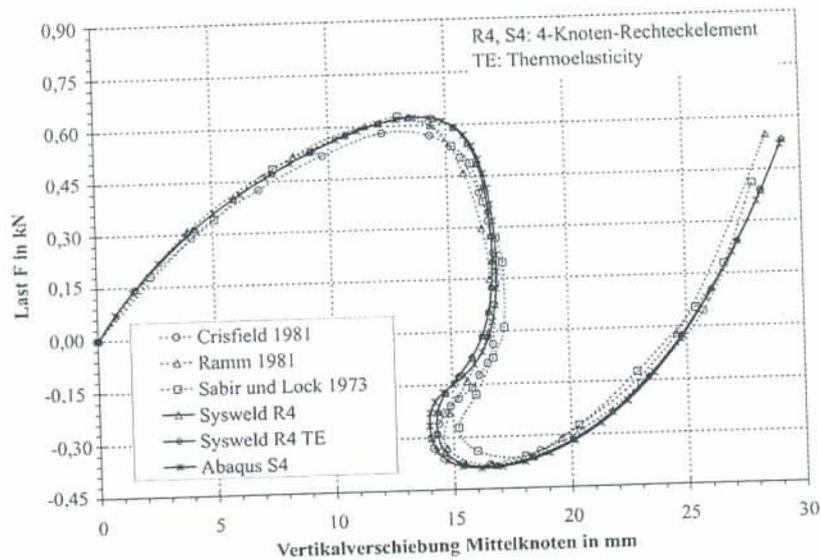


Abbildung 3: Last-Verformungspfade des Tonnendachs mit elastischem Werkstoffgesetz

Der mit Sysweld berechnete Last-Verformungspfad ist in guter Übereinstimmung sowohl mit dem mit Abaqus berechneten Last-Verformungspfad wie auch mit den im Schrifttum angegebenen Last-Verformungspfaden. Das Sysweld 8-Knoten-Schalelement konnte in gleicher Weise verifiziert werden.

### 3.2 Berechnung der Grenztragfähigkeit stabilitätsgefährdeter Bauteile

Zur Bestimmung der Grenzspannung eines durch den Schweißprozeß verzogenen eigenspannungsbehafteten Bauteils wird folgendes Vorgehen gewählt (siehe Abbildung 4):

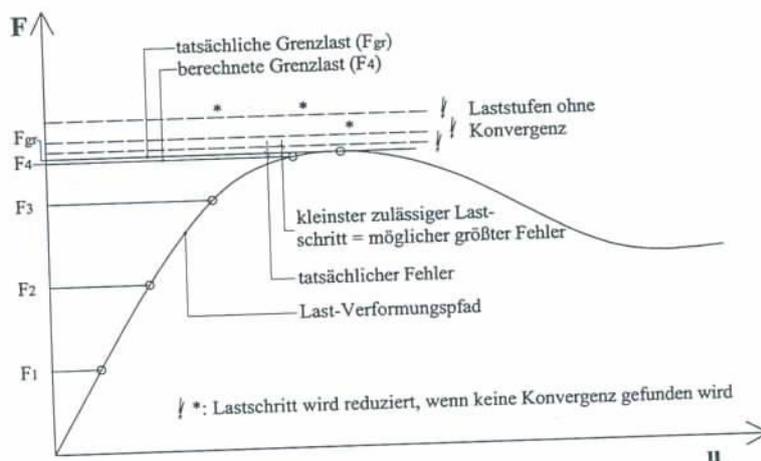


Abbildung 4: Verfahren zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit

Als Anfangsbedingung wird der Zustand des letzten Zeitschrittes aus der Schweißsimulationsberechnung verwendet. Die äußeren Lasten werden als Einheitslast aufgebracht.

Es wird eine transiente Berechnung mit dem automatischen Zeitschrittverfahren durchgeführt. Die Last wird mit jedem Lastschritt gesteigert.

Wird die Grenzlast überschritten, dann wird für den aktuellen Lastschritt keine Konvergenz erreicht. Der Lastschritt wird automatisch reduziert. Anschließend erfolgt eine Iteration gegen die gesuchte Grenzlast des Systems, bei der die Lastschritte kontinuierlich reduziert werden. Die Grenzlast ergibt sich aus dem Produkt aus Einheitslast und Laststeigerungsfaktor.

Das Konvergenzkriterium wird durch den kleinsten zulässigen Lastschritt definiert. Mit dem kleinsten zulässigen Lastschritt ist der größte mögliche Fehler zwischen tatsächlicher Grenzlast und berechneter Grenzlast definiert.

### 3.3 Verifikation des gewählten Berechnungsverfahrens

Die Kreiszylinderschale unter Axiallast ist für die Finite-Element-Berechnung eine der anspruchsvollsten Geometrien. Zur Verifikation des zuvor beschriebenen Verfahrens werden daher Kreiszylinderschalen im elastisch und im plastisch beulenden Schlangheitsbereich gewählt. Bei der Berechnung mit Sysweld wird statt einer Schweißsimulation eine geometrische Vorverformung gewählt. Bei der Verformungsfigur handelt es sich um eine radiale Formabweichung in Gestalt von Kosinuswellen in Längsrichtung und in Umfangsrichtung. Die Vergleichsberechnungen werden mit Abaqus für den elastisch beulenden Zylinder mit der Eigenwertanalyse und für den plastisch beulenden Zylinder mit dem Bogenlängenverfahren nach Riks durchgeführt.

Die Berechnungsergebnisse sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt. Mit der Berechnung mit Sysweld werden die gleichen Grenzlasten ermittelt wie mit der Berechnung mit Abaqus.

**Tabelle 1:** Grenzspannung in  $\frac{N}{mm^2}$  elastisch beulender Zylinder

Abmessung L / R / t in mm	Abaqus	Sysweld	Vorverformung Sysweld $w_0$ in mm
800 / 400 / 1	169,5	168,4	0,0125
1600 / 800 / 1	45,8	45,5	0,025
3200 / 1600 / 1	11,8	11,8	0,04

**Tabelle 2:** Grenzspannung in  $\frac{N}{mm^2}$  plastisch beulender Zylinder

Abmessung L / R / t in mm	Abaqus	Sysweld	Vorverformung $w_0$ in mm
400 / 200 / 4	147,8	148,5	6,0
800 / 400 / 4	191,3	193,8	6,0

Die mit Abaqus berechneten Last-Verformungspfade der plastisch beulenden Zylinder sind in Abbildung 5 den Last-Verformungspfaden der Berechnung mit Sysweld gegenübergestellt. Sowohl die ermittelten Grenztragfähigkeiten als auch die berechneten Last-Verformungspfade sind trotz unterschiedlicher Berechnungsverfahren in guter Übereinstimmung.

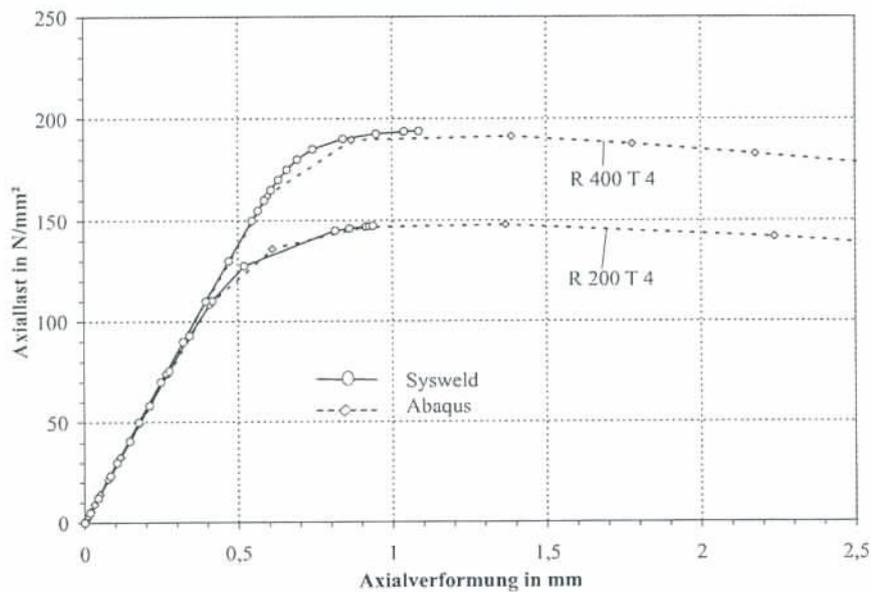


Abbildung 5: Last-Verformungskurven der plastisch beulenden Zylinder

#### 4 Beulberechnung umfangsnahtgeschweißter Kreiszyinderschalen

In [Loose, 2007] wurde der Einfluß des transienten Schweißvorganges auf das Stabilitätsverhalten der axialgedrückten Kreiszyinderschale untersucht. Dabei wurden Stabilitätsuntersuchungen im Anschluß an Schweißsimulationsberechnungen durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen wird das in Abbildung 6 gezeigte Beispiel eines Zylindersegmentes aus S355 mit einem Radius von 400 mm und einer Wanddicke von 2 mm vorgestellt, das mit einer Folge von zwei Umfangsnähten geschweißt wurde. Links sind in Abbildung 6 die Radialverformungen nach dem Schweißen dargestellt und rechts die Radialverformungen unter Axialgrenzlast nach der Beulanalyse.

Zylindersegment  $R = 400$  mm,  $t = 2$  mm,  $L = 800$  mm, Segment =  $90^\circ$ , 2 Schweißnähte

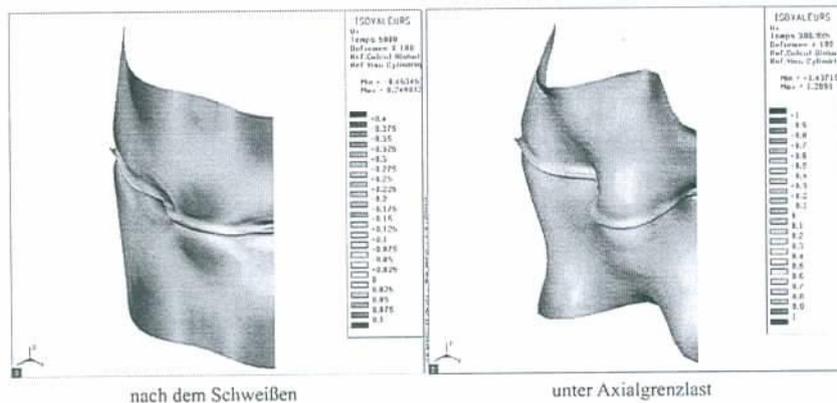


Abbildung 6: Radialverformung  $u_x$  in mm

Aus der in Abbildung 7 dargestellten Last-Verformungskurve für die Radialverformung am Äquatorpunkt des rechten Segmentrandes unter Axialbelastung läßt sich das Erreichen der Grenzlast durch die überproportional zunehmenden Verformungen deutlich erkennen.

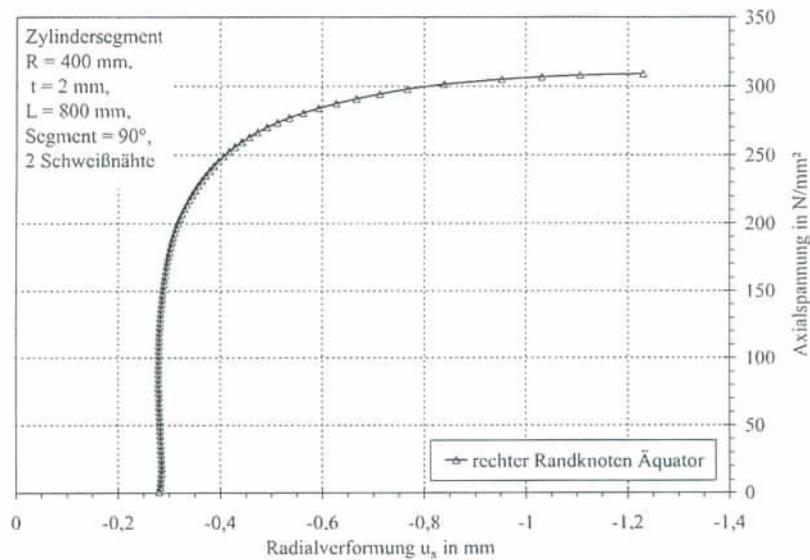


Abbildung 7: Last-Verformungskurve

## 5 Traglastberechnung T-Stoß

Am Beispiel eines mit einer Kehlnaht geschweißten T-Stoßes soll der Einfluß von Schweißeigenspannungen auf das Tragverhalten verdeutlicht werden. Die Blechdicke in diesem Beispiel beträgt 6 mm, die Steghöhe 42 mm und die Flanschbreite 144 mm. Abgebildet wird eine Symmetriehälfte.

Nach der Schweißsimulationsberechnung wird am äußeren Flanschende eine Einheitslast von 1,0 N je Knoten aufgebracht. Der Knotenabstand beträgt 3 mm, daraus ergibt sich eine Einheitsstreckenlast von  $0,333 \frac{N}{mm}$ . Das Modell ist mit Einheitsbelastung und Randbedingungen in Abbildung 8 dargestellt.

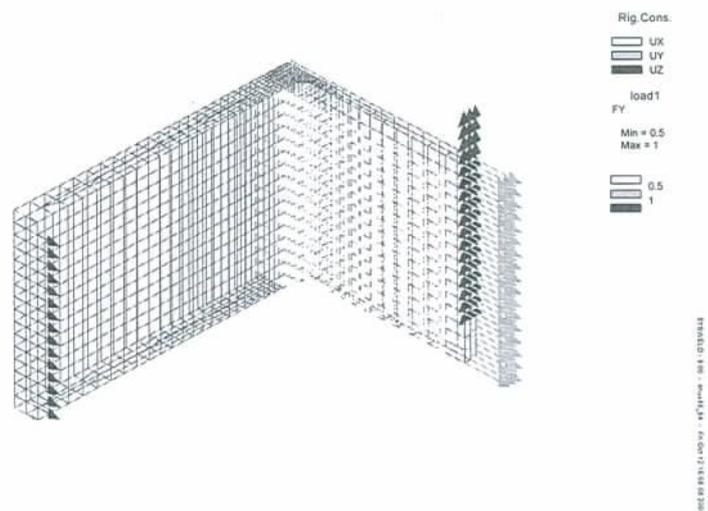


Abbildung 8: FE-Modell T-Stoß, links Einheitslast, rechts Randbedingungen

Die Traglastberechnung wird mit Schweißeigenspannungen als Restart auf den letzten Zeitschritt der Schweißsimulationsberechnung durchgeführt. Zum Vergleich erfolgt eine Berechnung mit Anfangsbedingungen, also ohne Eigenspannungen. Die Last-Verformungskurve für beide Berechnungen ist in Abbil-

Abbildung 9 dargestellt. Sie zeigt den Einfluß, den die Schweißzugspannungen hervorrufen. Im Lastbereich zwischen  $30 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$  und  $60 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$  ist die Verformung beim System mit Schweißzugspannungen größer als beim System ohne Schweißzugspannungen. Dies liegt daran, daß aufgrund der Zugspannungen bereits im ansonsten elastischen Lastbereich lokale Plastizierungen auftreten.

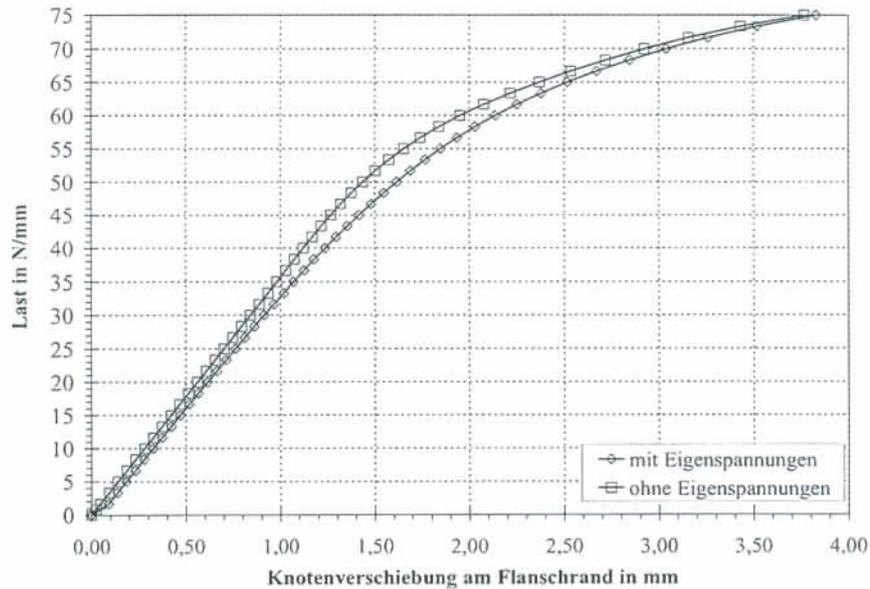


Abbildung 9: Last-Verformungskurven

#### Literaturverzeichnis

- [Crisfield, 1980] Crisfield, M. A. (1980). "A fast incremental/iterative solution procedure that handles snap-through". *Computers & Structures*, 13, 55–62.
- [Hinton, 1992] Hinton, E. (1992). "Introduction to nonlinear finite element analysis". NAFEMS.
- [Loose, 2007] Loose, T. (2007). "Einfluß des transienten Schweißvorganges auf das Stabilitätsverhalten axial gedrückter Kreiszyinderschalen aus Stahl". Diss., Universität Karlsruhe (TH).
- [Ramm, 1980] Ramm, E. (1980). "Strategies for tracing the nonlinear response near limit points". W. Wunderlich, E. Stein, & K.-J. Bathe (Eds.), *Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*: Springer-Verlag.
- [Riks, 1979] Riks, E. (1979). "An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems". *Int. J. Solids*, 15, 529–551.
- [Sabir & Lock, 1973] Sabir, A. B. & Lock, A. C. (1973). "The application of finite elements to the large deflection geometrically non-linear behaviour of cylindrical shells". C. A. Brebbia & H. Tottenham (Eds.), *Variational Methods in Engineering* (pp. 7/66–7/75): Southampton University Press.