Zentrum für Technomathematik
Fachbereich 3 – Mathematik und Informatik

Vorstudie für einen Bauteilversuch zur Umwandlungsplastizität bei der perlitischen Umwandlung des Stahls 100Cr6

Michael Wolff, Friedhelm Frerichs,
Bettina Suhr

Report 03–10

Berichte aus der Technomathematik

Report 03–10 August 2003

Vorstudie für einen Bauteilversuch zur Umwandlungsplastizität bei der perlitischen Umwandlung des Stahls 100Cr6

M. Wolff, F. Frerichs, B. Suhr

Zusammenfassung

Zur Vorbereitung eines Bauteilversuches, bei dem unter kontrollierten Randbedingungen die Umwandlungsplastizität bei Abwesenheit der klassischen Plastizität untersucht werden soll, werden Vergleichsrechnungen mit dem kommerziellen Programm SYSWELD™ durchgeführt. Um ein Auftreten der normalen, "klassischen" Plastizität auszuschließen, ist es erforderlich, die Versuchsbedingungen so einzustellen, daß die Vergleichsspannung nach von Mises im Bauteil unter der Fließgrenze bleibt. Die Rechnungen werden für den Wälzlagerstahl 100Cr6 durchgeführt.
Der geplante Versuch soll unter kontrollierten Randbedingungen durchgeführt werden, damit zum Vergeich mit den experimentellen Daten eine Simulation der ablaufenden Prozesse mit SYSWELD™ und vergleichend mit dem universitären Programm ALBERT [Sch00, 01] möglich wird.
Diese Arbeit entstand mit teilweiser Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 570 "Distortion Engineering" an der Universität Bremen.

Abstract

Comparison calculations are performed by the commercial program SYSWELD™ in preparation of a workpiece experiment. In this experiment the transformation induced plasticity (TRIP) is to be investigated under controlled boundary conditions. In order to avoid the normal "classical" plasticity it is necessary to set up the experiment conditions in such a way that the von Mises stress in the workpiece will be lower than the yield stress. The calculations are carried out for the bearing steel 100Cr6 (SAE52100).
The experiment planned is to be performed under controlled boundary conditions for giving a good possibilty to compare the measured data with the simulation by SYSWELD™ and by the universitary package ALBERT [Sch00, 01], too. This work was partially supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft via the Collaborative Research Centre (SFB) 570 "Distortion Engineering" at the university of Bremen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **2**

2 Versuchsbeschreibung **3**

3 Rechnungen **3**
3.1 Umlagerung der Zylinder von 850° C auf 700° C 4
3.2 Wiederholung des Versuchs 3.1 unter Berücksichtigung der Phasenumwandlung von Austenit zu Perlit 5
3.3 Wiederholung des Versuchs 3.1 mit doppelter Anzahl der Gitterlinien 5
3.4 Wiederholung des Versuchs 3.1 mit vierfacher Anzahl der Gitterlinien 6
3.5 Umlagerung der Zylinder von 850° C auf 750° C und danach auf 700° C 6
3.6 Langsame Abkühlung im Salzbad von 850° C auf 750° C mit unterschiedlichen Versuchsfortsetzungen 7
3.6.1 Anschließende Umlagerung in ein Salzbad mit 700° C 7
3.6.2 Berücksichtigung der Phasenumwandlung in Versuch 3.6.1 7
3.6.3 Anschließende Umlagerung in ein Salzbad mit 650° C 8
3.6.4 Umlagerung der Zylinder von 750° C auf 700° C unter Berücksichtigung des Transportes in Umgebungsluft von 30° C für die Dauer von 5 Sekunden 8
3.6.5 Umlagerung der Zylinder von 750° C auf 700° C unter Berücksichtigung des Transportes in Umgebungsluft von 700° C für die Dauer von 5 Sekunden 9
3.7 Exponentielle Abkühlung des Salzbades von 850° C auf 750° C 9

4 Schlussfolgerungen **11**

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, Versuchsbedingungen aufzuzeigen, unter denen die Umwandlungsplastizität bei Abwesenheit der klassischen Plastizität im Experiment untersucht werden kann. Hierzu werden Rechnungen für die Umwandlung des Austenits zum Perlit beim Stahl 100Cr6 durchgeführt.

Bekanntlich ist Stahl ein komplexer Werkstoff, bei dem thermische, mechanische und metallurgische (mikrostrukturelle) Effekte in Wechselwirkung stehen (vgl. z.B. [Mac92], [Dah93], [Den97, 02]). Bei der industriellen Fertigung von Stahlbauteilen können als Ergebnis dieser Wechselwirkungen unerwünschte Maß- und Formänderungen auftreten, die als Verzug bezeichnet werden (vgl. [Hof02]). Den weiteren Untersuchungen des Materialverhaltens von Stahl kommt daher eine große Bedeutung zu. Neben Versuchen mit kleinen Stahlproben in Dilatometern und komplexeren Maschinen unter der Annahme, daß die Temperatur- und Phasenverteilungen homogen sind (vgl. z.B. [Ahr02], [Wol03c]), werden auch Versuche an größeren Bauteilen ohne Homogenitätsannahmen zum Studium des Materialverhaltens durchgeführt (vgl. z.B. [Gra87]).
Ein wesentliches Phänomen im Materialverhalten von Stahl ist neben den Phasenumwandlungen die Umwandlungsplastizität. Darunter werden bleibende plastische Verformungen des Werkstücks verstanden, die weder mit der normalen, im Folgenden als klassisch bezeichneten Plastizität, noch mit den Dichteänderungen der Phasen erklärbar sind (vgl. z.B. [Fis96],[Mit87], [Leb89a,b] [Den97, 02], [Ron00]). Die Umwandlungsplastizität tritt bei nichtverschwindendem Spannungsdeviator während der Phasenumwandlung auf und besitzt keine Fließgrenze wie die klassische Plastizität. Besondere Effekte der Umwandlungsplastizität können auch bei Abwesenheit von deviatorischen Spannungen während der martensitischen Umwandlung auftreten (vgl. [Fis00]).

Beiträge zur Modellierung der Umwandlungsplastizität im Rahmen der Kontinuumsmechanik endlicher Deformationen finden sich in [Böc02], [Dac03], [Wol03a, 03b]. In [Böc02] und [Wol03b] sind auch Ansätze zur numerischen Simulation der Umwandlungsplastizität enthalten.

2 Versuchsbeschreibung

In dem Versuch, der mit dieser Vorstudie vorbereitet wird, soll der Effekt der Umwandlungsplastizität bei Abwesenheit von klassischer Plastizität während der Umwandlung des Austenits zu Perlit beim Stahl 100Cr6 untersucht werden. Nach vollständigem Austenitisieren werden Zylinder aus 100Cr6 mit einer bekannten Temperatur oberhalb der Perlit-Starttemperatur in ein Salzbad einer bekannten Temperatur zwischen Bainit- und Perlit-Starttemperatur gebracht. Als Perlit-Starttemperatur sei die Temperatur bezeichnet, unterhalb derer sich Austenit in Perlit umwandeln kann. Anschließend wird die volle Umwandlung des Austenits zu Perlit abgewartet. Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur werden die Bauteile vermessen, um Abweichungen von der Zylinderform festzustellen.
Soll keine störende klassische Plastizität auftreten, müssen die Vergleichsspannungen in allen Punkten des Bauteiles und zu allen Zeiten deutlich unter der (temperaturabhängigen) Fließgrenze liegen. In dieser Arbeit sollen für verschiedene Abmessungen der Zylinder und unterschiedliche Start- und Endtemperaturen die von-Mises-Spannungen berechnet und mit der Fließgrenze verglichen werden.
Das Umwandlungsverhalten des 100Cr6 bei der Umwandlung von Austenit zu Perlit (oberhalb von 500° C) wurde am Institut für Werkstofftechnik (IWT) Bremen und im SFB 570 "Distortion Engineering" an der Universität Bremen intensiv untersucht und kann daher bei zukünftigen vergleichenden Simulationen zum Versuch als bekannt angesehen werden (vgl. [Hun99],[Böh02, 03]).
Die benötigten Materialparameter des Stahls 100Cr6 sowie weitere für die Rechnungen benötigte Größen wurden vom IWT Bremen zur Verfügung gestellt. Gerechnet wurde mit dem kommerziellen Paket SYSWELD™.

3 Rechnungen

Wir betrachten einen Satz aus 10 Zylindern mit den in den Tabellen gegebenen Abmessungen aus dem Stahl 100Cr6, für den in der jeweilige Situation die Rechnungen durchgeführt werden. Bis auf die Versuche 3.2 und 3.6.2 rechnen wir ohne Berücksichtigung der Umwandlung des Austenits zum Perlit, d.h., ohne Berücksichtigung der latenten Wärme der Umwandlung (vergl. 4).
Für die Rechnungen wurden folgende Wärmeübergangskoeffizienten verwendet:
bei Abkühlung in Luft: $100\frac{W}{m^2K}$, bei Abkühlung im Salzbad: $2000\frac{W}{m^2K}$.

Bezeichnungen

Die Bezeichnungen sind wie folgt gewählt:

D [mm]	Durchmesser des Zylinders
L [mm]	Länge des Zylinders
σ_m [MPa]	maximale Vergleichsspannung nach von-Mises
t_1 [s]	Zeitpunkt des Erreichen des Wertes von σ_m
Q	max. Quotient zwischen von-Mises-Spannung und zugehöriger Fließgrenze
t_2 [s]	Zeitpunkt des Erreichen des Wertes von Q

$\sigma_{m_2}, Q_2, t_3, t_4$ ggf. analog für den zweiten Schritt des Versuchs.

3.1 Umlagerung der Zylinder von 850° C auf 700° C

Nach der Austenitisierung werden die Zylinder aus einem Salzbad mit 850° C in ein anderes Salzbad mit 700° C umgelagert. Die Zeitspanne des Umlagerns, d.h., des Kontaktes mit der umgebenden Luft wird in diesem Punkt ignoriert.

D [mm]	L [mm]	σ_m [MPa]	t_1 [s]	Q	t_2 [s]
4	10	21,60	0,35	1,56	0,3
10	50	29,30	1	2,04	0,9
10	100	29,29	1	2,04	0,9
10	200	29,23	1	2,04	0,9
20	50	33,78	3	2,25	2,5
20	100	33,84	3	2,25	2,5
20	200	33,80	3	2,25	2,5
30	50	36,11	4,5	2,34	4
30	100	35,87	4,5	2,34	4
30	200	35,85	4,5	2,34	4

Bei diesem Versuch wird bei allen Zylindern die Fließgrenze (zumindest zeitweilig) deutlich überschritten, wie der Quotient Q zeigt. Da die Fließgrenze im betreffenden Temperaturbereich temperaturabhängig ist, werden die Maxima der von-Mises-Spannung und des Quotienten aus von-Mises-Spannung und Fließgrenze zu verschiedenen Zeiten erreicht. Dieser Effekt ist auch bei den folgenden Versuchen zu beobachten.

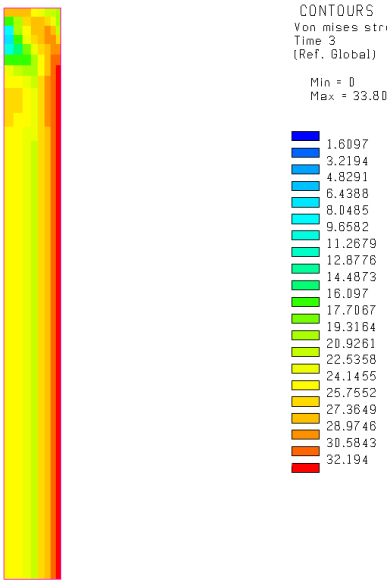

Abbildung 1: Verteilung der von-Mises-Spannung im Zylinder mit Durchmesser 20 mm und Länge 200 mm. Diese Abbildung und auch alle folgenden zeigt ein Viertel des Zylinders.

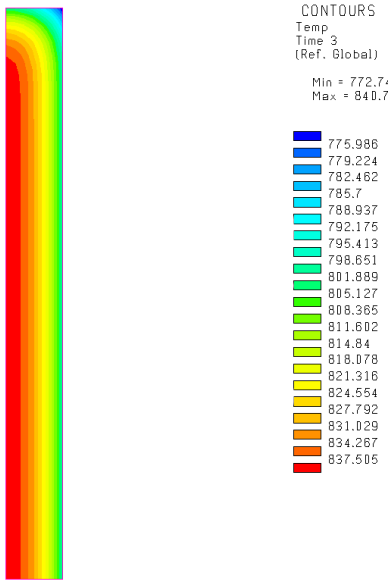

Abbildung 2: Die zugehörige Temperaturverteilung

Wie man Abb. 1 entnehmen kann, treten die größten von-Mises-Spannungen auf der Mantelfläche des Zylinders auf.

3.2 Wiederholung des Versuchs 3.1 unter Berücksichtigung der Phasenumwandlung von Austenit zu Perlit

D [mm]	L [mm]	σ_m [MPa]	t_1 [s]	Q	t_2 [s]
4	10	21,58	0,35	1,56	0,3
10	50	29,30	1	2,05	0,9
10	100	29,30	1	2,05	0,9
10	200	29,22	1	2,04	0,85
20	50	33,78	3	2,25	2,5
20	100	33,78	3	2,25	2,5
20	200	33,74	3	2,25	2,5
30	50	35,70	4	2,35	4,5
30	100	35,82	4,5	2,34	4
30	200	35,80	4,5	2,34	4

Die Abweichungen zu Versuch 3.1 sind minimal, der Einfluss der latenten Wärme ist gering.

3.3 Wiederholung des Versuchs 3.1 mit doppelter Anzahl der Gitterlinien

Die Auswahl des Gitters für die Diskretisierung (FEM) durch SYSWELD™ erfolgte manuell unter Beachtung der Erfahrung, dass die Randzonen kritischer als das Innere sind.
Im folgenden Versuch wurden die Anzahlen der vertikalen und horizontalen Gitterlinien verdoppelt.

D [mm]	L [mm]	σ_m [MPa]	t_1 [s]	Q	t_2 [s]
4	10	22,79	0,35	1,64	0,25
10	50	29,80	1	2,05	0,85
10	100	29,90	1	2,05	0,85
10	200	29,80	1	2,05	0,85
20	50	34,08	2,5	2,27	2,5
20	100	34,29	3	2,26	2,5
20	200	34,23	3	2,26	2,5
30	50	36,54	4	2,38	3,5
30	100	36,41	4	2,37	3,5
30	200	36,41	4	2,36	3,5

Die Abweichungen zu Versuch 3.1 sind minimal.

3.4 Wiederholung des Versuchs 3.1 mit vierfacher Anzahl der Gitterlinien

Im folgenden Versuch wurden die Anzahlen der vertikalen und horizontalen Gitterlinien nochmals verdoppelt.

D [mm]	L [mm]	σ_m [MPa]	t_1 [s]	Q	t_2 [s]
4	10	23,23	0,35	1,62	0,35
10	50	29,95	1	2,06	0,85
10	100	29,95	1	2,06	0,85
10	200	29,95	1	2,06	0,85
20	50	33,78	3	2,25	2,5
20	100	33,78	3	2,25	2,5
20	200	33,80	3	2,25	2,5
30	50	36,11	4,5	2,35	4,5
30	100	35,88	4,5	2,34	4
30	200	35,85	4,5	2,34	4

Die Abweichungen zu den Versuchen 3.1 und 3.3 sind ebenfalls minimal.

3.5 Umlagerung der Zylinder von 850° C auf 750° C und danach auf 700° C

Um die thermischen Spannungen zu reduzieren, wird jetzt in zwei Stufen abgekühlt. Zuerst erfolgt eine Umlagerung vom ersten Salzbad mit 850° C in ein zweites mit 750° C, wobei keine Phasenumwandlung auftritt, danach vom zweiten in ein drittes Salzbad mit 700° C.

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]	σ_{m_2} [MPa]	t_3 [s]	Q_2	t_4 [s]
4	10	16,94	0,35	1,25	0,3	5,97	0	0,29	0
10	50	26,06	1	1,88	0,95	11,09	4	0,60	0,5
10	100	26,04	1	1,88	0,85	11,07	4	0,60	0,5
10	200	26,02	1	1,88	0,9	11,07	4	0,60	0,5
20	50	29,96	3	2,09	2,5	31,86	5	1,40	1
20	100	29,94	3	2,09	2,5	30,94	6	1,40	1
20	200	29,92	3	2,09	2,5	31,72	5	1,40	1
30	50	32,21	6	2,20	5	41,35	7	1,81	1
30	100	31,92	5	2,19	4,5	41,25	7	1,80	2
30	200	31,91	5	2,19	4,5	41,24	7	1,80	2

Die linke Hälfte der Tabelle kennzeichnet die Abschreckung von 850° C auf 750° C (bis zur Spalte t_2), die rechte Hälfte die Abschreckung von 750° C auf 700° C. Da die Werte für Q_1 deutlich größer als eins sind, tritt auch bei dieser Versuchsdurchführung klassische Plastizität auf.

3.6 Langsame Abkühlung im Salzbad von 850° C auf 750° C mit unterschiedlichen Versuchsfortsetzungen

Im Gegensatz zur vorigen Situation erfolgt jetzt der Übergang von 850° C auf 750° C durch langsames Abkühlen, indem das Salzbad insgesamt auf 750° C abkühlt. Wir nehmen an, dass die Abkühlung von 850° C auf 750° C so langsam erfolgt, dass keine kritischen thermischen Spannungen auftreten (vergl. Versuch 3.7).

3.6.1 Anschließende Umlagerung in ein Salzbad mit 700° C

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]
4	10	10,34	0,25	0,48	0,25
10	50	22,17	1	1,00	0,95
10	100	22,17	1	1,00	0,95
10	200	22,12	1	1,00	0,9
20	50	29,49	3	1,31	2,5
20	100	29,45	3	1,30	2,5
20	200	29,42	3	1,30	2,5
30	50	35,13	5	1,54	3,5
30	100	34,89	5	1,52	4,5
30	200	34,90	5	1,52	4,5

3.6.2 Berücksichtigung der Phasenumwandlung in Versuch 3.6.1

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]
4	10	10,36	0,25	0,48	0,25
10	50	22,17	1	1,00	0,95
10	100	22,16	1	1,00	0,95
10	200	22,12	1	1,00	0,90
20	50	29,49	3	1,31	2,5
20	100	29,49	3	1,31	2,5
20	200	29,49	2,5	1,31	2,5
30	50	35,13	5	1,54	3,5
30	100	34,98	5	1,52	4,5
30	200	35,00	5	1,52	4,5

Ein Vergleich mit Versuch 3.6.1 zeigt, dass der Einfluss der latenten Wärme gering ist.

3.6.3 Anschließende Umlagerung in ein Salzbad mit 650° C

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]
4	10	20,57	0,35	0,94	0,25
10	50	33,28	1	1,43	0,9
10	100	33,20	1	1,43	0,85
10	200	33,20	1	1,43	0,85
20	50	42,57	3	1,75	2
20	100	42,58	3	1,75	2
20	200	42,54	3	1,75	2
30	50	46,29	6	1,85	4
30	100	45,98	5	1,84	4
30	200	45,98	5	1,84	4

Wie zu erwarten war, treten in diesem Versuch größere thermische Spannungen auf als in den Versuchen 3.6.1 und 3.6.2. Auch in den Versuchen 3.6.1, 3.6.2 und 3.6.3 ist nur beim kleinsten Zylinder klassische Plastizität auszuschließen. Die Situation für die Zylinder mit Durchmesser 10 mm ist in 3.6.1 und 3.6.2 zumindest kritisch.

3.6.4 Umlagerung der Zylinder von 750° C auf 700° C unter Berücksichtigung des Transportes in Umgebungsluft von 30° C für die Dauer von 5 Sekunden

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]	σ_{m_2} [MPa]	t_3 [s]	Q_2	t_4 [s]
4	10	14,20	0,5	0,64	0,5	33,67	0,5	1,06	0,5
10	50	22,68	0,5	1,02	0,5	44,03	0,5	1,67	0,5
10	100	21,56	0,5	1,00	0,5	44,01	0,5	1,67	0,5
10	200	21,60	0,5	1,00	0,5	44,07	0,5	1,67	0,5
20	50	43,52	1	1,43	4	48,26	0,5	1,82	0,5
20	100	30,96	4	1,34	4	46,31	0,5	1,82	0,5
20	200	30,97	4	1,34	4	44,86	0,5	1,82	0,5
30	50	36,10	4	1,54	4	48,39	0,5	1,90	0,5
30	100	35,47	4	1,54	4	47,51	0,5	1,87	1
30	200	35,00	4	1,54	4	46,55	1	1,87	1

Auch bei dieser Versuchsdurchführung wird die Fließgrenze deutlich (bis auf den Zylinder mit Durchmesser 4 mm) überschritten.
Die kleinste Temperatur, die wähend des Umlagerns an der Oberfläche auftritt ist 638° C. Unter den gtroffenen Annahmen werden also weder Bainit noch Martensit gebildet.
Zu diesem Versuch sind in den Abbildungen 3 bis 6 Temperatur- und Spannungsverteilung dargestellt.

3.6.5 Umlagerung der Zylinder von 750° C auf 700° C unter Berücksichtigung des Transportes in Umgebungsluft von 700° C für die Dauer von 5 Sekunden

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]	σ_{m_2} [MPa]	t_3 [s]	Q_2	t_4 [s]
4	10	0,90	0,5	0,05	0,5	8,10	1	0,35	1
10	50	1,63	0,5	0,08	0,5	21,55	1,5	0,96	1,5
10	100	1,50	0,5	0,07	0,5	21,56	1,5	0,96	1,5
10	200	1,50	0,5	0,07	0,5	21,55	1,5	0,96	1,5
20	50	2,82	3,5	0,13	4	29,24	3	1,29	3
20	100	2,76	3,5	0,13	4	29,26	3	1,29	3
20	200	2,72	4	0,13	4	29,28	3	1,29	3
30	50	3,80	4	0,18	4	35,01	6	1,52	4
30	100	3,69	4	0,17	4	34,73	6	1,52	5
30	200	3,47	4	0,16	4	34,72	6	1,52	5

Hier lässt sich bei den ersten vier Zylindern klassische Plastizität vermeiden.

3.7 Exponentielle Abkühlung des Salzbades von 850° C auf 750° C

D [mm]	L [mm]	σ_{m_1} [MPa]	t_1 [s]	Q_1	t_2 [s]
4	10	0,10	20,2	0,008	10,24
10	50	0,63	30,2	0,04	30,2
10	100	0,63	30,2	0,05	30,2
10	200	0,63	30,2	0,05	30,2
20	50	2,44	50,2	0,18	50,24
20	100	2,42	50,2	0,18	50,2
20	200	2,43	50,2	0,18	50,2
30	50	5,24	70,2	0,39	60,24
30	100	5,23	80,2	0,39	70
30	200	5,23	80,2	0,39	70,2

Bei dieser Versuchsdurchführung wird die Fließgrenze bei allen Zylindern deutlich unterschritten. Damit ist die Annahme (kein Auftreten kritischer Spannungen) im ersten Teil des Versuchs 3.6.1 über die “langsame Abkühlung” gerechtfertigt (siehe Punkt 4 “Schlußfolgerungen”).
Die folgenden vier Abb. beziehen sich auf Versuch 3.6.4.

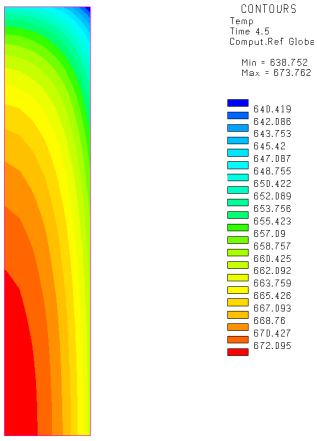

Abbildung 3: Temperaturverteilung des Zylinders (D=4 mm, L=10 mm) kurz bevor er in das Salzbad mit 700° C getaucht wird.

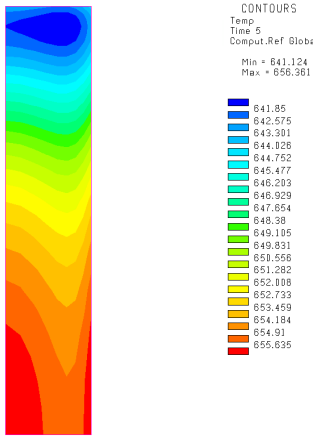

Abbildung 4: Temperaturverteilung des Zylinders kurz nachdem er in das Salzbad mit 700° C getaucht wurde.
Man sieht, wie das Salzbad den Zylinder erwärmt.

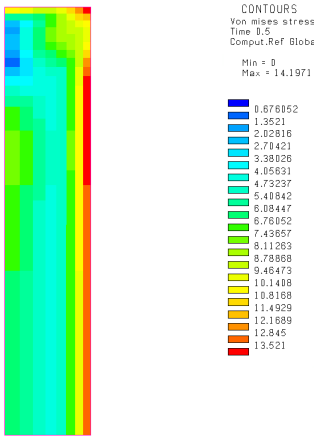

Abbildung 5: Verteilung der von-Mises-Spannungen kurz nachdem der Zylinder aus dem Salzbad mit 750° C gehoben wurde.

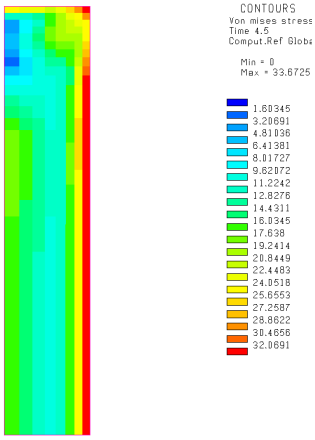

Abbildung 6: Verteilung der von-Mises-Spannung kurz nachdem er in das Salzbad mit 700° C getaucht wurde.

4 Schlussfolgerungen

Wie allgemein bekannt, führen Abschreckprozesse zu großen thermischen Spannungen und somit oft zu klassischer Plastizität, da die Fließgrenze des Stahls bei höheren Temperaturen nicht groß ist. Entscheidend für die Bewertung, ob klassische Plastizität auftreten kann, ist das Maximum des Quotienten aus der Vergleichsspannung nach von Mises und der Fließgrenze. Wie zu erwarten, ist dieser Quotient umso größer, je größer die Temperaturdifferenz beim Abschrecken und je größer die Abmessungen des Bauteils sind. Für die kleinen Zylinder sind Abkühlszenarien ohne Auftreten von klassischer Plastizität möglich.
Während des Transportes an der Luft von 30° C treten große thermische Spannungen auf, obwohl bei der angenommenen Verweildauer von 5 Sekunden die Oberflächentemperatur der Zylinder nicht unter 500° C fällt, so dass die Bildung von Bainit und Martensit ausgeschlossen werden kann. Eine wesentlich heißere Umgebungsluft wirkt sich mindernd auf die auftretenden thermischen Spannungen während des Umlagerns aus.
Die von uns betrachteten Zylinder haben alle ein Längen-Durchmesser-Verhältnis größer als 5:3. In [Gra87] wurde ein Verhältnis von etwa 3:2 ermittelt, ab dem Stirnseiteneffekte keine Rolle mehr spielen.
Die Rechnungen zeigen, dass für die angesprochenen Größen die kleinere Zahl aus den beiden für Durchmesser und Länge, also der Durchmesser, des Zylinders maßgeblich ist.
Der kleinste Zylinder mit den Abmessungen 4 und 10 mm ist eine Dilatometerprobe. Auch hier können die thermischen Spannungen groß sein. Allerdings tritt ein wesentlich schnellerer Temperaturausgleich ein, so dass infolge der langsam anlaufenden Umwandlungen (Inkubation) die Umwandlungsplastizität vernachlässigbar scheint, solange keine äußeren Kräfte aufgetragen werden.
Die Berücksichtigung der latenten Wärme bei der Umwandlung des Austenits zu Perlit beeinflusst die Ergebnisse nur unwesentlich (vgl. Versuche 3.1 und 3.2, sowie 3.6.1 und 3.6.2), so dass ihre Nichtberücksichtigung in den anderen Versuchen gerechtfertigt erscheint, zumal die Umwandlung in allen Versuchen während des Abschreckens stattfindet.
Im Versuch 3.7 wurde das Salzbad mit den enthaltenen Zylindern exponentiell abgekühlt (im Verlauf von 50 min). Dabei wird in keinem Fall die Fließgrenze erreicht, obwohl bei den mittleren und größeren Zylindern nicht zu vernachlässigende thermische Spannungen auftreten. Hieraus ergeben sich gute Möglichkeiten, die Umwandlungsplastizität bei Abwesenheit von klassischer Plastizität zu untersuchen, indem das Salzbad langsam in Bereiche abgekühlt wird, in denen die Umwandlung zu Perlit möglich wird (also unterhalb von 734° C).
Eine Verdoppelung oder Vervierfachung der Gitterlinien bewirkt keine wesentliche Änderung, was zeigt, dass die ursprüngliche Wahl des Netzes der Realität gut angepasst ist.

Literatur

[Ahr00]	Ahrens, U., Besserdich, G., Maier, H. J.: Spannungsabhängiges bainitisches und martensitisches Umwandlungsverhalten eines niedrig legierten Stahl, HTM 55, 329-338, (2000).
[Ahr02]	Ahrens, U., Besserdich, G., Maier, H. J.: Sind aufwändige Experimente zur Beschreibung der Phasenumwandlungen von Stählen noch zeitgemäß? HTM, 57, 99-105, (2002).
[Böc02]	Böck, N., Holzapfel, G. A.: A large strain continuum and numerical method for transformation induced plasticity (TRIP), in WCCM V 5. World Congress on Computorial Mechanics, 2002, Wien, (Hrg. Mang, H. A., Rammerstorfer, F. G., Eberhardsteiner, J.), (2002).
[Böh02]	Böhm, M., Hunkel, M., Schmidt, A., Wolff, M.: Evaluation of various phase-transition models for 100Cr6 for application in commercial FEM-programmes, Berichte aus der Technomathematik, FB 3, Universität Bremen, Report 02-14, (2002).
[Böh03]	Böhm, M., Hunkel, M., Schmidt, A., Wolff, M.: Evaluation of various phase-transition models for 100Cr6 for application in commercial FEM programs, Berichte aus der Technomathematik 02-14, Universität Bremen, Proceedings of the 2nd Intern. Conf. on Thermal Process Modelling and Computer Simulation, Nancy, France, (2003), eingereicht zu J. de Physique IV.
[Dac03]	Dachkovski, S. Böhm, M.: Finite thermoplasicity with phase changes based on isomorphisms, erscheint in International Journal of Plasticity, (2003).
[Dah93]	Dahl, W. (Herausgeber): Eigenschaften und Anwendungen von Stählen, Bd 1: Grundlagen, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, (1993).
[Den97]	Denis, S.: Considering stress-phase transformation interactions in the calculation of heat treatment residual stresses, in: CISM courses and lectures - No 368, Mechanics of solids with phase changes, ed. Bergveiller, M., Fischer, F. D., Springer-Verlag, (1997).
[Den02]	Denis, S., Archambault, P., Gautier, E., Simon, A., Beck, G.: Precdiction of residual stress and distortion of ferrous and non-ferrous metals: current status and future developments, J. of Materials Eng. and Performance, 11, (1), pp. 92-102, (2002).
[Fis96]	Fischer, F. D., Sun, Q. P., Tanaka, K.: Transformation-induced plasticity, (TRIP) Appl. Mech. Rev. 49, pp. 317 - 364, (1996).
[Fis00]	Fischer, F. D., Reisner, G., Werner, E., Tanaka, K., Cailletaud, G., Antretter, T.: A new view on transformation induced plasticity (TRIP), Int. J. of Plasticity, 16, pp. 723-748, (2000).
[Gra87]	Graja, P.: Rechnerische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss kontinuierlicher und diskontinuierlicher Wärmebehandlungsverfahren auf die Wärme- und Umwandlungseigenspannungen und Verzüge von un- und niedriglegierten Stählen, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), (1987).
[Hof02]	Hoffmann, F., Keßler, O., Lübben, T., Mayr, P.: Distortion Engineering - Verzugsbeherrschung in der Fertigung, HTM 57, 3, 213-217, (2002).
[Hun99]	Hunkel, M., Lübben, T., Hoffmann, F., Mayr, P.: Modellierung der bainitischen und perlitischen Umwandlung bei Stählen, HTM 6, pp. 365-372, (1999).
[Leb89a]	Leblond, J. B., Devaux, J., Devaux, J. C.: Mathematical modelling of transformation plasticity in steels. I: Case of ideal-plastic Phases. Int. J. Plasticity, 5, 551-572, (1989).

[Leb89b]	Leblond, J. B.: Mathematical modelling of transformation plasticity in steels. II: Coupling with strain hardening phenomena. Int. J. Plasticity, 5, 573-591 , (1989).
[Mac92]	Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde, 10. Auflage, Vieweg & Sohn, Braunschweig, (1992).
[Mit87]	Mitter, W.: Umwandlungsplastizität und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung von Eigenspannungen, Materialkundlich-technische Reihe 7, Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, (1987).
[Ron00]	Ronda, J., Oliver, G. J.: Consistent thermo-mechano-metallurgical model of welded steel with unified approach to derivation of phase evolution laws and transformation-induced plasticity, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 189, 361-417, (2000).
[Sch00]	Schmidt, A., Siebert, K.G.: ALBERT: An adaptive hierarchical finite element toolbox. Manual, 244 p., Preprint Freiburg 06/2000.
[Sch01]	Schmidt, A., Siebert, K.G.: ALBERT: Software for scientific computations and applications, Acta Math. Univ. Comenianae 70, pp. 105-122 (2001).
[Wol03a]	Wolff, M., Böhm, M.: Umwandlungsplastizität bei Stählen im Konzept der Thermoelasto-Plastizität - modelliert mit dem Ansatz einer Zwischenkonfiguration, Technische Mechanik, Bd 23 (1), pp. 29-48, (2003)
[Wol03b]	Wolff, M., Böhm, M., Schmidt, A.: Phase transitions and transformation-induced plasticity of steel in the framework of continuum mechanics, Proceedings zur Konferenz Thermal Process Modelling and Computer Simulation (ICTPMCS), Nancy, Frankreich, 2003, eingereicht zu J. de Physique IV.
[Wol03c]	Wolff, M., Böhm, M., Dachkovski, S., Löwisch, G.: Zur makroskopischen Modellierung von spannungsabhängigem Umwandlungsverhalten und Umwandlungsplastizität bei Stählen und ihrer experimentellen Untersuchung in einfachen Versuchen, Berichte aus der Technomathematik, FB 3, Universität Bremen, Report 03-06, 2003.

Adressen der Autoren

Dr. Michael Wolff, Zentrum für Technomathematik, FB3, Universität Bremen,
Postfach 330440, D-28334 Bremen, mwolff@math.uni-bremen.de,

Dipl.-Phys. Friedhelm Frerichs, Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT),
Badgasteiner Str. 3, D-28359 Bremen, frerichs@iwt.uni-bremen.de

Bettina Suhr, cand. math, Zentrum für Technomathematik, FB3, Universität Bremen, Postfach 330440, D-28334 Bremen, bsuhr@tzi.de

Berichte aus der Technomathematik ISSN 1435-7968

http://www.math.uni-bremen.de/zetem/berichte.html

— Vertrieb durch den Autor —

Reports **Stand: 1. September 2003**

98–01. Peter Benner, Heike Faßbender:
An Implicitly Restarted Symplectic Lanczos Method for the Symplectic Eigenvalue Problem, Juli 1998.

98–02. Heike Faßbender:
Sliding Window Schemes for Discrete Least-Squares Approximation by Trigonometric Polynomials, Juli 1998.

98–03. Peter Benner, Maribel Castillo, Enrique S. Quintana-Ortí:
Parallel Partial Stabilizing Algorithms for Large Linear Control Systems, Juli 1998.

98–04. Peter Benner:
Computational Methods for Linear–Quadratic Optimization, August 1998.

98–05. Peter Benner, Ralph Byers, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Solving Algebraic Riccati Equations on Parallel Computers Using Newton's Method with Exact Line Search, August 1998.

98–06. Lars Grüne, Fabian Wirth:
On the rate of convergence of infinite horizon discounted optimal value functions, November 1998.

98–07. Peter Benner, Volker Mehrmann, Hongguo Xu:
A Note on the Numerical Solution of Complex Hamiltonian and Skew-Hamiltonian Eigenvalue Problems, November 1998.

98–08. Eberhard Bänsch, Burkhard Höhn:
Numerical simulation of a silicon floating zone with a free capillary surface, Dezember 1998.

99–01. Heike Faßbender:
The Parameterized SR Algorithm for Symplectic (Butterfly) Matrices, Februar 1999.

99–02. Heike Faßbender:
Error Analysis of the symplectic Lanczos Method for the symplectic Eigenvalue Problem, März 1999.

99–03. Eberhard Bänsch, Alfred Schmidt:
Simulation of dendritic crystal growth with thermal convection, März 1999.

99–04. Eberhard Bänsch:
Finite element discretization of the Navier-Stokes equations with a free capillary surface, März 1999.

99–05. Peter Benner:
Mathematik in der Berufspraxis, Juli 1999.

99–06. Andrew D.B. Paice, Fabian R. Wirth:
Robustness of nonlinear systems and their domains of attraction, August 1999.

99–07. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Balanced Truncation Model Reduction of Large-Scale Dense Systems on Parallel Computers, September 1999.

99–08. Ronald Stöver:
Collocation methods for solving linear differential-algebraic boundary value problems, September 1999.

99–09. Huseyin Akcay:
Modelling with Orthonormal Basis Functions, September 1999.

99–10. Heike Faßbender, D. Steven Mackey, Niloufer Mackey:
Hamilton and Jacobi come full circle: Jacobi algorithms for structured Hamiltonian eigenproblems, Oktober 1999.

99–11. Peter Benner, Vincente Hernández, Antonio Pastor:
On the Kleinman Iteration for Nonstabilizable System, Oktober 1999.

99–12. Peter Benner, Heike Faßbender:
A Hybrid Method for the Numerical Solution of Discrete-Time Algebraic Riccati Equations, November 1999.

99–13. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Numerical Solution of Schur Stable Linear Matrix Equations on Multicomputers, November 1999.

99–14. Eberhard Bänsch, Karol Mikula:
Adaptivity in 3D Image Processing, Dezember 1999.

00–01. Peter Benner, Volker Mehrmann, Hongguo Xu:
Perturbation Analysis for the Eigenvalue Problem of a Formal Product of Matrices, Januar 2000.

00–02. Ziping Huang:
Finite Element Method for Mixed Problems with Penalty, Januar 2000.

00–03. Gianfrancesco Martinico:
Recursive mesh refinement in 3D, Februar 2000.

00–04. Eberhard Bänsch, Christoph Egbers, Oliver Meincke, Nicoleta Scurtu:
Taylor-Couette System with Asymmetric Boundary Conditions, Februar 2000.

00–05. Peter Benner:
Symplectic Balancing of Hamiltonian Matrices, Februar 2000.

00–06. Fabio Camilli, Lars Grüne, Fabian Wirth:
A regularization of Zubov's equation for robust domains of attraction, März 2000.

00–07. Michael Wolff, Eberhard Bänsch, Michael Böhm, Dominic Davis:
Modellierung der Abkühlung von Stahlbrammen, März 2000.

00–08. Stephan Dahlke, Peter Maaß, Gerd Teschke:
Interpolating Scaling Functions with Duals, April 2000.

00–09. Jochen Behrens, Fabian Wirth:
A globalization procedure for locally stabilizing controllers, Mai 2000.

00–10. Peter Maaß, Gerd Teschke, Werner Willmann, Günter Wollmann:
Detection and Classification of Material Attributes – A Practical Application of Wavelet Analysis, Mai 2000.

00–11. Stefan Boschert, Alfred Schmidt, Kunibert G. Siebert, Eberhard Bänsch, Klaus-Werner Benz, Gerhard Dziuk, Thomas Kaiser:
Simulation of Industrial Crystal Growth by the Vertical Bridgman Method, Mai 2000.

00–12. Volker Lehmann, Gerd Teschke:
Wavelet Based Methods for Improved Wind Profiler Signal Processing, Mai 2000.

00–13. Stephan Dahlke, Peter Maass:
A Note on Interpolating Scaling Functions, August 2000.

00–14. Ronny Ramlau, Rolf Clackdoyle, Frédéric Noo, Girish Bal:
Accurate Attenuation Correction in SPECT Imaging using Optimization of Bilinear Functions and Assuming an Unknown Spatially-Varying Attenuation Distribution, September 2000.

00–15. Peter Kunkel, Ronald Stöver:
Symmetric collocation methods for linear differential-algebraic boundary value problems, September 2000.

00–16. Fabian Wirth:
The generalized spectral radius and extremal norms, Oktober 2000.

00–17. Frank Stenger, Ahmad Reza Naghsh-Nilchi, Jenny Niebsch, Ronny Ramlau:
A unified approach to the approximate solution of PDE, November 2000.

00–18. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Parallel algorithms for model reduction of discrete–time systems, Dezember 2000.

00–19. Ronny Ramlau:
A steepest descent algorithm for the global minimization of Tikhonov–Phillips functional, Dezember 2000.

01–01. Efficient methods in hyperthermia treatment planning:
Torsten Köhler, Peter Maass, Peter Wust, Martin Seebass, Januar 2001.

01–02. Parallel Algorithms for LQ Optimal Control of Discrete-Time Periodic Linear Systems:
Peter Benner, Ralph Byers, Rafael Mayo, Enrique S. Quintana-Ortí, Vicente Hernández, Februar 2001.

01–03. Peter Benner, Enrique S. Quintana-Ortí, Gregorio Quintana-Ortí:
Efficient Numerical Algorithms for Balanced Stochastic Truncation, März 2001.

01–04. Peter Benner, Maribel Castillo, Enrique S. Quintana-Ortí:
Partial Stabilization of Large-Scale Discrete-Time Linear Control Systems, März 2001.

01–05. Stephan Dahlke:
Besov Regularity for Edge Singularities in Polyhedral Domains, Mai 2001.

01–06. Fabian Wirth:
A linearization principle for robustness with respect to time-varying perturbations, Mai 2001.

01–07. Stephan Dahlke, Wolfgang Dahmen, Karsten Urban:
Adaptive Wavelet Methods for Saddle Point Problems - Optimal Convergence Rates, Juli 2001.

01–08. Ronny Ramlau:
Morozov's Discrepancy Principle for Tikhonov regularization of nonlinear operators, Juli 2001.

01–09. Michael Wolff:
Einführung des Drucks für die instationären Stokes–Gleichungen mittels der Methode von Kaplan, Juli 2001.

01–10. Stephan Dahlke, Peter Maaß, Gerd Teschke:
Reconstruction of Reflectivity Desities by Wavelet Transforms, August 2001.

01–11. Stephan Dahlke:
Besov Regularity for the Neumann Problem, August 2001.

01–12. Bernard Haasdonk, Mario Ohlberger, Martin Rumpf, Alfred Schmidt, Kunibert G. Siebert:
h–p–Multiresolution Visualization of Adaptive Finite Element Simulations, Oktober 2001.

01–13. Stephan Dahlke, Gabriele Steidl, Gerd Teschke:
Coorbit Spaces and Banach Frames on Homogeneous Spaces with Applications to Analyzing Functions on Spheres, August 2001.

02–01. Michael Wolff, Michael Böhm:
Zur Modellierung der Thermoelasto-Plastizität mit Phasenumwandlungen bei Stählen sowie der Umwandlungsplastizität, Februar 2002.

02–02. Stephan Dahlke, Peter Maaß:
An Outline of Adaptive Wavelet Galerkin Methods for Tikhonov Regularization of Inverse Parabolic Problems, April 2002.

02–03. Alfred Schmidt:
A Multi-Mesh Finite Element Method for Phase Field Simulations, April 2002.

02–04. Sergey N. Dachkovski, Michael Böhm:
A Note on Finite Thermoplasticity with Phase Changes, Juli 2002.

02–05. Michael Wolff, Michael Böhm:
Phasenumwandlungen und Umwandlungsplastizität bei Stählen im Konzept der Thermoelasto-Plastizität, Juli 2002.

02–06. Gerd Teschke:
Construction of Generalized Uncertainty Principles and Wavelets in Anisotropic Sobolev Spaces, August 2002.

02–07. Ronny Ramlau:
TIGRA – an iterative algorithm for regularizing nonlinear ill–posed problems, August 2002.

02–08. Michael Lukaschewitsch, Peter Maaß, Michael Pidcock:
Tikhonov regularization for Electrical Impedance Tomography on unbounded domains, Oktober 2002.

02–09. Volker Dicken, Peter Maaß, Ingo Menz, Jenny Niebsch, Ronny Ramlau:
Inverse Unwuchtidentifikation an Flugtriebwerken mit Quetschöldämpfern, Oktober 2002.

02–10. Torsten Köhler, Peter Maaß, Jan Kalden:
Time-series forecasting for total volume data and charge back data, November 2002.

02–11. Angelika Bunse-Gerstner:
A Short Introduction to Iterative Methods for Large Linear Systems, November 2002.

02–12. Peter Kunkel, Volker Mehrmann, Ronald Stöver:
Symmetric Collocation for Unstructured Nonlinear Differential-Algebraic Equations of Arbitrary Index, November 2002.

02–13. Michael Wolff:
Ringvorlesung: Distortion Engineering 2
Kontinuumsmechanische Modellierung des Materialverhaltens von Stahl unter Berücksichtigung von Phasenumwandlungen, Dezember 2002.

02–14. Michael Böhm, Martin Hunkel, Alfred Schmidt, Michael Wolff:
Evaluation of various phase-transition models for 100Cr6 for application in commercial FEM programs, Dezember 2002.

03–01. Michael Wolff, Michael Böhm, Serguei Dachkovski:
Volumenanteile versus Massenanteile - der Dilatometerversuch aus der Sicht der Kontinuumsmechanik, Januar 2003.

03–02. Daniel Kessler, Ricardo H. Nochetto, Alfred Schmidt:
A posteriori error control for the Allen-Cahn Problem: circumventing Gronwall's inequality, März 2003.

03–03. Michael Böhm, Jörg Kropp, Adrian Muntean:
On a Prediction Model for Concrete Carbonation based on Moving Interfaces - Interface concentrated Reactions, April 2003.

03–04. Michael Böhm, Jörg Kropp, Adrian Muntean:
A Two-Reaction-Zones Moving-Interface Model for Predicting $Ca(OH)_2$ Carbonation in Concrete, April 2003.

03–05. Vladimir L. Kharitonov, Diederich Hinrichsen:
Exponential estimates for time delay systems, May 2003.

03–06. Michael Wolff, Michael Böhm, Serguei Dachkovski, Günther Löwisch:
Zur makroskopischen Modellierung von spannungsabhängigem Umwandlungsverhalten und Umwandlungsplastizität bei Stählen und ihrer experimentellen Untersuchung in einfachen Versuchen, Juli 2003.

03–07. Serguei Dachkovski, Michael Böhm, Alfred Schmidt, Michael Wolff:
Comparison of several kinetic equations for pearlite transformation in 100Cr6 steel,
Juli 2003.

03–08. Volker Dicken, Peter Maass, Ingo Menz, Jenny Niebsch, Ronny Ramlau:
Nonlinear Inverse Unbalance Reconstruction in Rotor dynamics,
Juli 2003.

03–09. Michael Böhm, Serguei Dachkovski, Martin Hunkel, Thomas Lübben, Michael Wolff:
Übersicht über einige makroskopische Modelle für Phasenumwandlungen im Stahl,
Juli 2003.

03–10. Michael Wolff, Friedhelm Frerichs, Bettina Suhr:
Vorstudie für einen Bauteilversuch zur Umwandlungsplastizität bei der perlitischen Umwandlung des Stahls 100 Cr6,
August 2003.