UNIVERSITÄT **Zentrum für Technomathematik**

BREMEN Fachbereich 3 – Mathematik und Informatik

Zum Vergleich von Massen- und Volumenanteilen bei der perlitischen Umwandlung der Stähle 100Cr6 und C80

Michael Wolff **Bettina Suhr**

Report 03-11

Berichte aus der Technomathematik

Report 03-11 **September 2003**

Zum Vergleich von Massen- und Volumenanteilen bei der perlitischen Umwandlung der Stähle 100Cr6 und C80

M. Wolff, B. Suhr

Zusammenfassung: Aus den gemessenen Längen der umwandelnden Stahlprobe im Dilatometer wird auf die aktuelle Phasenzusammensetzung geschlossen. In der Arbeit [Wol03a] wurden aus physikalischen Annahmen Formeln zur Berechnung des Volumen- und Massenanteils der sich bildenden Phase hergeleitet. Es wurde dort gezeigt, dass aufgrund der geringen Dichteunterschiede der Phasen im Stahl sich Massen- und Volumenanteile wenig unterscheiden.
Ziel dieser Arbeit ist es, anhand von konkreten Dilatometerdaten für die Stähle 100Cr6 und C80 die Massen- und Volumenanteile des Perlits nach unterschiedlichen Formeln zu berechnen und zu vergleichen.
Es wird gezeigt, dass die Unterschiede zwischen Massen- und Volumenanteilen kleiner als 0,5% sind. Die Unterschiede zwischen dem Volumenanteil und dem sogenannten Umwandlungsgrad können hingegen zu Beginn der Umwandlung zehn Prozent überschreiten.
Störende thermische und metallurgische Effekte sowie Messfehler beeinflussen die numerischen Ergebnisse, besonders beim Beginn und zum Ende der Umwandlungen.
Diese Arbeit entstand mit teilweiser Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG über den Sonderforschungsbereich 570 „Distortion Engineering“ an der Universität Bremen. Die Dilatometerversuche wurden am Institut für Werkstofftechnik (IWT) Bremen durchgeführt.
Wir danken Herrn Dipl.-Ing. Holger Surm (IWT Bremen) sehr herzlich für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen.

Abstract: The actuell phase composition of steel specimen exposed to controled heat change is calculated from the measured length changes in a dilatomenter experiment. In the paper [Wol03a] formulas have been derived from physical assumptions which allow to calculate the mass and volume fraction of the forming phase. There it was shown for steel that the mass and volume fraction differ only a little because of the small differences of the phases‘ densities.
It is the aim of the present paper to calculate and compare mass and volume fractions for the pearlite of the steels 100Cr6 (SAE52100) and C80 by different formulas using dilatometer data.
It will be shown that the differences between the mass and volume fractions are less than 0,5%. Contrary to this, the differences between the volume fraction and the so-called degree of transformation can be larger than 10%.
Disturbing thermical and metallurgical effects and measurement errors influence the numerical results, especially at the beginning and at the end of transformation.
This work has partially been supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) via the Collaborative Research Centre SFB 570 „Distortion Engineering“. The measurements have been done at the Institut für Werkstofftechnik (IWT) Bremen.
We would like to thank Mr. Dipl.-Ing. Holger Surm (IWT Bremen) for the stimulating discussions and suggestions.

Inhalt

1. Einführung

2. Zur Berechnung von Massen- und Volumenanteilen aus den Messdaten

3. Ergebnisse der Rechnungen und Auswertungen

4. Weitere Auswertung und Schlussfolgerungen

1. Einführung

Auf der Grundlage der im Dilatometer gemessenen Längenänderungen von kleinen Stahlproben wird allgemein experimentell die Evolution der Phasenanteile bestimmt. Dabei wird angenommen, dass die Probe während des Experiments eine homogene Verteilung der Temperatur und Phasenanteile aufweist und die Umwandlung spannungsfrei abläuft. Daher spielen die wichtigen Phänomene des spannungsabhängigen Umwandlungsverhaltens und der Umwandlungsplastizität in dieser Arbeit keine Rolle (vgl. hierzu z.B. [Den97, 02], [Ahr02], [Wol03b] und die dort zitierten Quellen).

Wir betrachten in dieser Arbeit die vollständige Umwandlung des Austenits in den Perlit für die Stähle 100Cr6 und C80 bei nicht-isothermer Umwandlung, obwohl viele Aussagen allgemeingültig für vollständige Umwandlungen in einem Zwei-Phasen-System sind (vgl. [Wol03a]). Als gängige Formel zur Berechnung des Volumenanteils des Perlits wird

$$p_p(t) = \frac{l(\theta(t)) - l_a(\theta(t))}{l_p(\theta(t)) - l_a(\theta(t))} \tag{1.1}$$

verwendet. Dabei sind $p_p(t)$ der Volumenanteil des Perlits, $l(\theta(t))$ die aktuelle Länge der Probe zur aktuellen Temperatur $\theta(t)$, $l_a(\theta(t))$ und $l_p(\theta(t))$ die entsprechenden Längen, wenn die Probe nur aus Austenit bzw. Perlit bestünde. Die Formel (1.1) folgt aus der Annahme einer linearen Mischungsregel bezüglich der Volumenanteile auf die aktuelle Länge der Probe und wird verschiedentlich als Umwandlungsgrad bezeichnet (vgl. z.B. [Mit92, 02]). Der Vorteil der Formel (1.1) liegt in der leichten Handhabbarkeit. Die Messdaten vom Dilatometer liefern die aktuelle Länge der Probe und die zugehörige Temperatur. Vor dem Beginn der Umwandlung wird die Länge als Funktion der Temperatur für den Austenit, nach Beendigung der Umwandlung für den Perlit erhalten. Durch Extrapolation in den für die Umwandlung relevanten Temperaturbereich werden die in (1.1) vorkommenden Funktionen $l_a = l_a(\theta)$ und $l_p = l_p(\theta)$ erhalten.

In der Arbeit [Wol03a] wurde der Dilatometerversuch auf der Grundlage der Kontinuumsmechanik modelliert. Es wurden dabei thermoelastisches Verhalten mit Phasenumwandlungen, die schon angesprochene Homogenität der Probe während der Umwandlung sowie Stahl als koexistierende Mischung ohne Diffusion der Phasen untereinander zugrunde gelegt (vgl. [Wol03a] für ausführliche Darlegungen). Es wurden Formeln erhalten, mit deren Hilfe aus den Messdaten und den Dichten

der Phasen als Funktionen der Temperatur sowohl der Massen- als auch der Volumenanteil des Perlits berechnet werden kann. Es stellen sich damit die Fragen nach dem Vergleich zwischen Massen- und Volumenanteilen sowie zwischen dem nach (1.1) sowie nach der weiter unten angeführten Formel berechneten Volumenanteil. In der Werkstofftechnik wird mit Volumenanteilen der Phasen gearbeitet, in der Mischungstheorie oft mit Massenanteilen.

Ziel dieser Arbeit ist es, für konkrete Dilatometerversuche nach verschiedenen Formeln die Massen- und Volumenanteile des sich bildenden Perlits bei den Stählen 100Cr6 und C80 bei nicht-isothermer vollständiger Umwandlung zu berechnen und damit zu vergleichen. Modelle für die Phasenumwandlungen selbst spielen in dieser Arbeit keine Rolle (Ausführliche Übersichten finden sich in [Böh03b] sowie für diffusionsgesteuerte Umwandlungen in [Rét97]).

In [Wol03a] wurde gezeigt, dass aufgrund der geringen Dichteunterschiede der Phasen beim Stahl der Unterschied (genauer der relative Fahler) zwischen Massen- und Volumenanteilen unter einem Prozent liegt. Die von uns in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Rechnungen zu konkreten Dilatometerdaten für den 100Cr6 und den C80 bestätigen diese theoretische Abschätzung.

In [Wol03a] wurde auch gezeigt, dass für isotherme Umwandlungen die Größe in (1.1), der Umwandlungsgrad, näherungsweise (vgl. weiter unten) gleich dem Massenanteil des Perlits ist. Bei nicht-isothermer Umwandlung ist für unsere Daten die Abweichung des Umwandlungsgrades vom berechneten Volumenanteil wesentlich größer als der Unterschied zwischen Massen- und Volumenanteil, besonders zu Beginn der Umwandlung.

Störende thermische und metallurgische Effekte sowie Messfehler beeinflussen die numerischen Ergebnisse, besonders beim Beginn und zum Ende der Umwandlungen. Dabei sind aufgrund der Karbidbildung die Störungen bei 100Cr6 größer als beim C80. Die Ergebnisse auch davon abhängig, wie die Längen (und somit die Dichten) für die Phasen extrapoliert werden. Wir gehen weiter unten darauf ausführlicher ein.

Der Wälzlagerstahl 100Cr6 wird im SFB 570 „Distortion Engineering“ an der Universität Bremen intensiv untersucht (vgl. hierzu [Hof02] zum SFB selbst sowie [Hun99], [Böh02], [Böh03a], [Dac03] zum Umwandlungsverhalten des 100Cr6 sowie zum Vergleich verschiedener Umwandlungsmodelle).

2. Zur Berechnung von Massen- und Volumenanteilen aus den Messdaten

In diesem Abschnitt sollen nur die nötigen Formeln angegeben werden, nach denen die Rechnungen erfolgen. Ausführliche Herleitungen und Begründungen finden sich in [Wol03a].

Wir betrachten Stahl als koexistierende Mischung seiner Phasen. In unserer Situation der vollständigen Umwandlung des Austenits in den Perlit für den 100Cr6 sowie den C80 seien mit p_a, p_p die Volumenanteile des Austenits bzw. des Perlits und mit χ_a, χ_p entsprechend die Massenanteile bezeichnet. Nach den Annahmen der Mischungstheorie sind diese Größen in jedem Punkt eines Körpers und zu jeder Zeit definiert, wobei wir für die Dilatometerproben bezüglich des Ortes Homogenität annehmen. Dann gelten bekanntlich die Bilanzen

$$p_a + p_p = 1, \quad \chi_a + \chi_p = 1, \quad p_a, p_p, \chi_a, \chi_p \geq 0 \tag{2.1}$$

sowie der Zusammenhang zwischen Massen- und Volumenanteilen

$$\chi_a = \frac{\rho_a}{\rho} p_a, \qquad \chi_p = \frac{\rho_p}{\rho} p_p, \tag{2.2}$$

wobei ρ_a, ρ_p und ρ die Dichten des Austenits, Perlits bzw. des Gesamtgemischs seien. Wir bemerken noch, dass die Massenanteile bei Abwesenheit von Phasenumwandlungen von der Temperatur unabhängig sind, während die Volumenanteile (beim Stahl nur schwach) temperaturabhängig sind. Für die Gesamtdichte gilt die lineare Mischungsregel bezüglich der Volumenanteile, für die reziproke Dichte bezüglich der Massenanteile:

$$\rho = \rho_a p_a + \rho_p p_p, \qquad \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_a} \chi_a + \frac{1}{\rho_p} \chi_p. \tag{2.3}$$

Der Zusammenhang zwischen der relativen Längenänderung der Dilatometerprobe und der Dichteänderung lautet bei angenommener Isotropie

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \sqrt[3]{1 + \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}} - 1, \tag{2.4}$$

wobei der Ausgangslänge l_0 die Ausgangsdichte ρ_0 und der aktuellen Länge l die aktuelle Dichte ρ entsprechen. Bei kleinen Dichteänderungen folgt aus (2.4) durch Linearisierung

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \frac{1}{3} \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}. \tag{2.5}$$

Ausgehend von der Annahme, dass sich die Dilatometerprobe linear thermoelastisch verhält und unter Beachtung der Phasenumwandlung vom Austenit zum Perlit

erhalten wir auf der Basis von (2.4) folgende Formel zur Berechnung des Massenanteils des Perlits (vgl. [Wol03a])

$$(2.6) \qquad \chi_p(t) = \{ \frac{\rho_a(\theta)}{\rho_a(\theta_0)} (1 + \frac{l(t) - l_0}{l_0})^3 - 1 \} \frac{\rho_p(\theta)}{\rho_a(\theta) - \rho_p(\theta)}.$$

Dabei wird die Anfangstemperatur θ_0 so gewählt, dass sich noch kein Perlit gebildet hat, z.B. oberhalb der Perlit-Starttemperatur. Dieser Temperatur entsprechen die Länge l_0 sowie die Zeit $t = 0$. Die Formel (2.6) ist mit dieser Wahl verträglich, da nach ihr zum Zeitpunkt $t = 0$ kein Perlit vorhanden ist. In theoretischen Hinsicht hat die Wahl von l_0 und θ_0 (oberhalb der Perlit-Starttemperatur) keinen Einfluss auf die Ergebnisse, in praktischer Hinsicht wegen Störungen und Messfehlern schon.

Wir betrachten nur den Temperaturbereich, in dem die Dichte des Austenits – bei gleicher Temperatur – größer als die des Perlits ist (was bei Anwendungen der Fall ist). Mit Hilfe der Formeln (2.4) und (2.6) lässt sich dann zeigen, dass die durch die Formel (2.6) errechneten Werte stets zwischen null und eins liegen. Solange noch keine Umwandlung stattfindet, also die Gesamtdichte gleich der des Austenits ist, ist der nach (2.6) errechnete Massenanteil gleich null. Nach Abschluss der Umwandlungen, wenn also die Gesamtdichte gleich der des Perlits ist, liefert (2.6) den Anteil eins. (Analoge Aussagen gelten in Bezug auf die Formel (2.8) sowie auf (2.7) und (2.9) in Verbindung mit (2.5).) Störende Effekte und Messfehler können in der Praxis zu Abweichungen vom theoretisch zu erwartendem Bild führen, wie an späterer Stelle ausgeführt wird.

Wird statt der Wurzel in (2.4) mit dem linearisierten Ausdruck in (2.5) gearbeitet, so ergibt sich anstelle von (2.6) die Formel

$$(2.7) \qquad \chi_p(t) = \{ (3 \frac{l(t) - l_0}{l_0} + 1) \frac{\rho_a(\theta)}{\rho_a(\theta_0)} - 1 \} \frac{\rho_p(\theta)}{\rho_a(\theta) - \rho_p(\theta)}.$$

Zusammen mit dem Zusammenhang (2.2) und der Mischungsregel (2.3) folgt aus (2.6) die Formel für den Volumenanteil (ohne Linearisierung der Wurzel)

$$(2.8) \quad p_p(\theta(t), t) = \{ (\frac{l(t) - l_0}{l_0} + 1)^3 \rho_a(\theta(t)) - \rho_a(\theta_0) \} \{ (\frac{l(t) - l_0}{l_0} + 1)^3 (\rho_a(\theta(t)) - \rho_p(\theta(t))) \}^{-1}.$$

Wird die Linearisierung (2.5) anstelle von (2.4) benutzt, so erhalten wir

$$(2.9) \quad p_p(\theta(t), t) = \{ (3 \frac{l(t) - l_0}{l_0} + 1) \rho_a(\theta(t)) - \rho_a(\theta_0) \} \{ (3 \frac{l(t) - l_0}{l_0} + 1) (\rho_a(\theta(t)) - \rho_p(\theta(t))) \}^{-1}.$$

Wir bemerken noch, dass für vollständige isotherme Umwandlungen sich aus (2.7) für den Massenanteil

(2.10) $$\chi_p(t) = \frac{(1 + \frac{l(t) - l_0}{l_0})^3 - 1}{(1 + \frac{l_1 - l_0}{l_0})^3 - 1}$$

bzw. und nach Linearisierung

(2.11) $$\chi_p(t) = \frac{l(t) - l_0}{l_1 - l_0}$$

ergeben, wobei mit l_1 die Länge der Probe nach der Umwandlung (bei der konstanten Umwandlungstemperatur gemessen) bezeichnet sei. In (2.11) steht der in der Einleitung in (1.1) aufgeführte Umwandlungsgrad im Falle einer konstanten Umwandlungstemperatur.

Sollen die Massen- bzw. Volumenanteile für die sich bildende Phase – bei uns Perlit – für nicht-isotherme Umwandlungen nach den Formeln (2.6) bis (2.9) berechnet werden, benötigt man neben den Messdaten für die Temperatur und die Längenänderung die Dichten der beiden beteiligten Phasen als Funktionen der Temperatur. In den Formeln (2.6) – (2.9) tritt die Differenz der Dichten im Nenner auf, daher ist eine möglichst genaue Kenntnis dieser Dichten erforderlich, um den möglichen Fehler nicht zu groß werden zu lassen.

Wir bestimmten die Dichten wie folgt: Vor dem Dilatometerexperiment wurden die (zylindrischen Voll-) Proben gewogen, vermessen und die Dichte der Probe bei 20° C bestimmt. Aufgrund der Annahme über Isotropie und Homogenität kann die Dichte der Probe dann für jede Temperatur berechnet werden, für die die entsprechende Länge bekannt ist. Es gilt also

(2.12) $$\rho(\theta) = \rho(20) \left(\frac{l(20)}{l(\theta)}\right)^3.$$

Oberhalb der Perlit-Starttemperatur ist die gemäß (2.12) berechnete Dichte die des Austenits, nach Ende der Umwandlung die des Perlits.

Analog ist die Funktion $l(\theta)$ oberhalb der Perlit-Starttemperatur die Länge der aus Austenit bestehenden Probe und nach Ende der Umwandlung die des Perlits. Durch lineare Regression wurde diese Funktion linear in den Bereich unterhalb der Perlit-Starttemperatur fortgesetzt. Durch quadratische Regression in den oberen Temperaturbereich wurde die Länge der aus Perlit bestehenden Probe als Funktion der Temperatur erhalten (vgl. die Bilder 1 und 2).

Die Ergebnisse der Rechnungen können davon abhängen, welche Bereiche bei dieser Regression berücksichtigt wurden.

3. Ergebnisse der Rechnungen und Auswertungen

Es werden zwei Dilatometerversuche für den 100Cr6 und ein Versuch für den C 80 betrachtet. Die beide Proben für den 100Cr6 wurden wie folgt austenitisiert. Bis 700 °C wurde mit 10 K/s, danach mit 0,25 K/s auf 980 °C aufgeheizt und bei dieser Temperatur 10 Minuten gehalten.

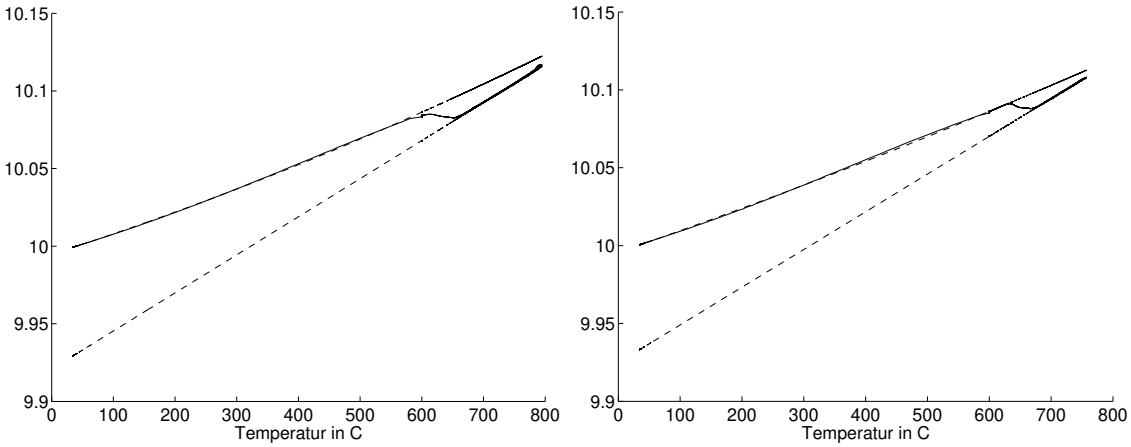
Danach wurde mit den beiden Proben unterschiedlich verfahren.

* Probe 1 wurde wie folgt abgeschreckt: Mit 100 K/s auf 800 °C, anschließend mit 1 K/s auf 600 °C abgekühlt und bei dieser Temperatur 15 Minuten gehalten, danach wurde schnell auf Raumtemperatur abgekühlt.

* Probe 2 wurde wie folgt abgeschreckt: Mit 100 K/s auf 800 °C, anschließend exponentiell in 5 Minuten auf 600 °C abgekühlt und bei dieser Temperatur 15 Minuten gehalten, danach wurde schnell auf Raumtemperatur abgekühlt.

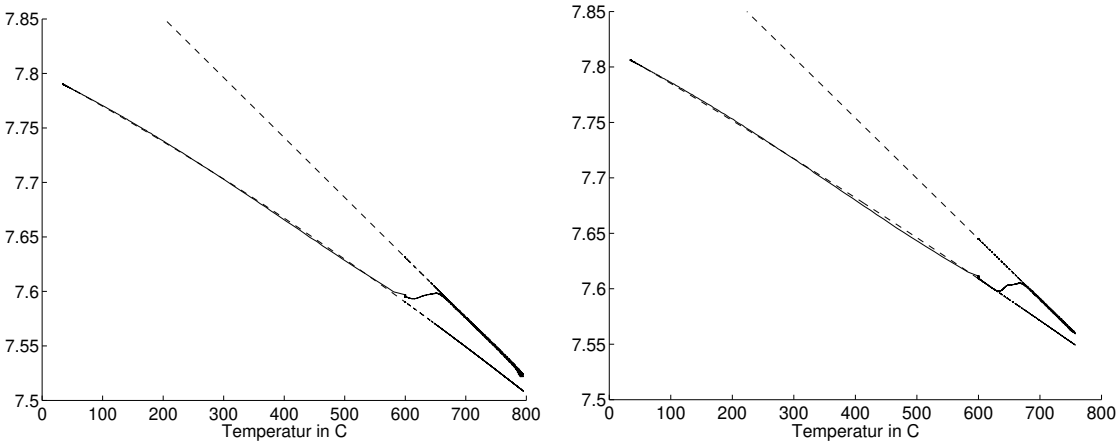
Die Probe 3 aus C80 wurde in 3 Minuten bei 800 °C austenitisiert. Die Abschreckung erfolgte in 100s exponentiell auf 500 °C, danach wurde schnell auf Raumtemperatur abgekühlt.

In den Bildern 1, 2 und 5 wird die vom Dilatometer aufgenommene Länge in mm unterhalb von 800 °C während der Umwandlung vom Austenit zum Perlit für die Proben 1, 2 und 3 gezeigt (durchgezogene Kurve). Jeweils gestrichelt sind die Längen für den Austenit und Perlit dargestellt, die sich aus linearer bzw. quadratischer Regression ergeben. Entscheidend für die weiteren Rechnungen ist die Auswahl der Punkte, die für die Berechnung der Regressionskurven herangezogen werden. Es muss festgelegt werden, ab wann die Umwandlung als abgeschlossen gilt.



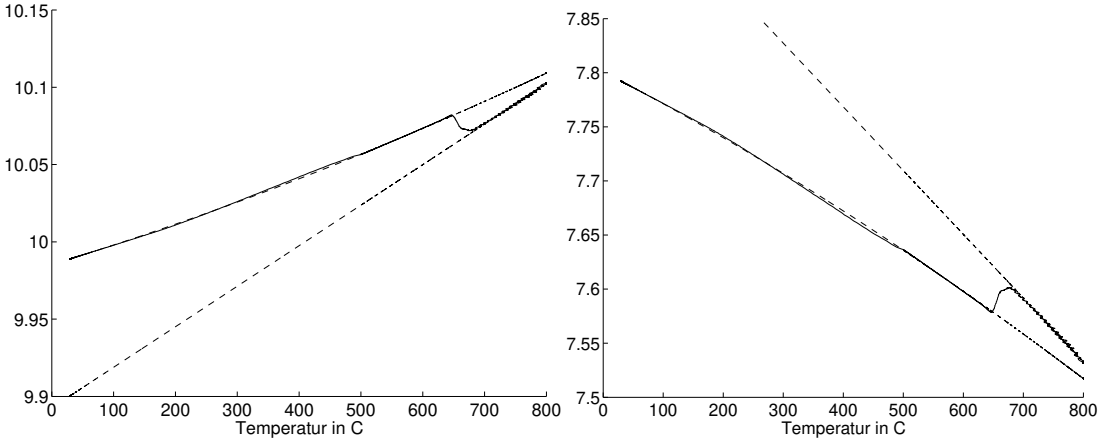
Bilder 1 und 2: Gemessene Länge in mm über der Temperatur für Probe 1 (links) und 2.

Aus diesen gemessenen Längen und der für 20 °C ermittelten Dichte ergibt sich die Dichte der jeweiligen Probe als Funktion der Temperatur nach Formel (2.12) (Bilder 3, 4 und 6). Aus den für den Austenit und den Perlit durch Extrapolation ermittelten Längen (s. die gestrichelten Linien in den Bildern 1 und 2) lassen sich nach derselben Formel auch die Dichten für den Austenit und Perlit als Funktionen der Temperatur erhalten (Tabelle 1). Durch gestrichelte Linien wurden wiederum die extrapolierten Werte angegeben.



Bilder 3 und 4: Dichte in g/cm^3 über der Temperatur für Probe 1 (links) und 2.

In den Bildern 1 und 3 für die Probe 1 des 100Cr6 wird sichtbar, dass die aufgenommene Kurve für die Länge und die daraus berechnete für die Dichten am Ende des Umwandlungsbereiches eine kleine Delle aufweist. Diese Delle schlägt sich in den Folgerechnungen nieder und hinterlässt ihre Spur in den späteren Bildern 7, 9, 13 (vgl. weiter unten sowie die Schlussfolgerungen).



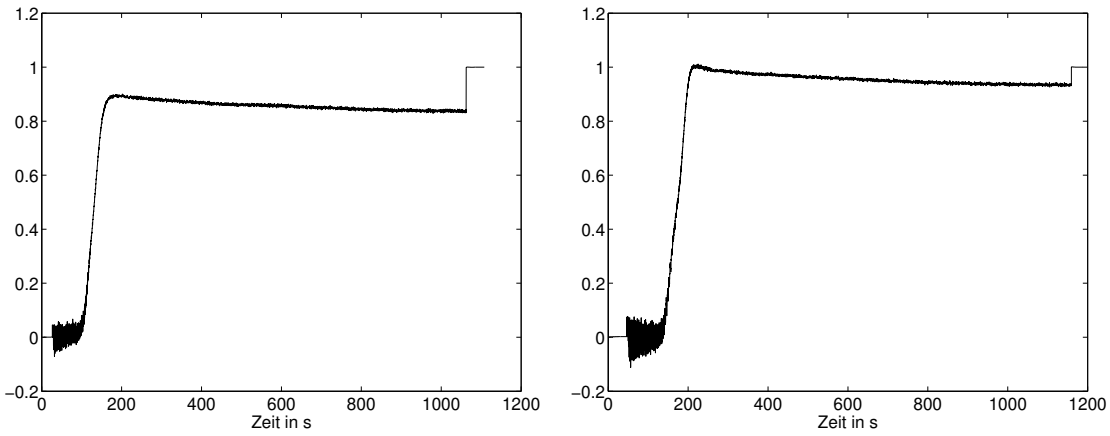
Bilder 5 und 6: Gemessene Länge (links, in mm) und Dichte (in g/cm^3) über der Temperatur für die Probe 3.

Die Tabelle 1 zeigt, dass die Dichten der beiden 100Cr6-Proben, obwohl aus der gleichen Charge, sich leicht unterscheiden. Abgesehen von möglichen Messfehlern zeigt sich der Einfluss der Karbide auf die Dichten, da die Karbidbildung von der Temperaturführung abhängt. Einen Einfluss hat auch die Wahl der bei der Regression zu berücksichtigenden Werte.

	Dichte des Austenits (in g/cm^3)	Dichte des Perlits (in g/cm^3)
Probe 1	$-5{,}498\cdot10^{-4}\cdot\theta + 7{,}961$	$-8{,}513\cdot10^{-8}\cdot\theta^2 - 2{,}999\cdot10^{-4}\cdot\theta + 7{,}800$
Probe 2	$-5{,}445\cdot10^{-4}\cdot\theta + 7{,}972$	$-4{,}279\cdot10^{-8}\cdot\theta^2 - 3{,}221\cdot10^{-4}\cdot\theta + 7{,}818$
Probe 3	$-5{,}891\cdot10^{-4}\cdot\theta + 8{,}004$	$-8{,}194\cdot10^{-8}\cdot\theta^2 - 2{,}893\cdot10^{-4}\cdot\theta + 7{,}801$

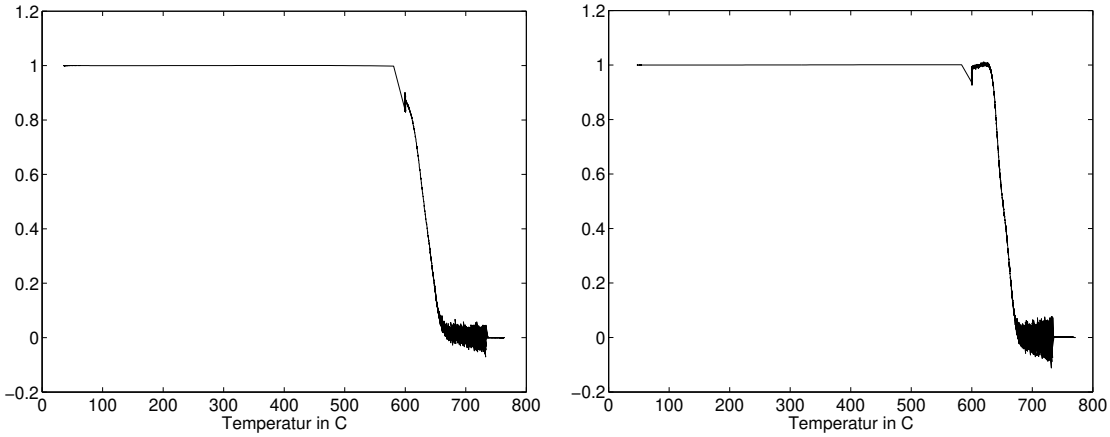
Tabelle 1: Phasendichten für Probe 1, 2 (100Cr6) und 3 (C80), Temperatur θ in °C.

Mit Hilfe der Formel (2.6) können die Massenanteile des Perlits als Funktionen der Zeit (Bilder 7, 8 und 11) sowie als Funktionen der Temperatur (Bilder 9, 10 und 12) für die Proben berechnet werden. Beim 100Cr6 sind vor und nach der Umwandlung die Abweichungen der vom Dilatometer gemessenen Länge von der durch Regression erhaltenen Länge für den Perlit bzw. Austenit größer als beim C80. Um diesen störenden Einfluss auf die Rechnungen auszuschließen, wurde bei den Proben 1 und 2 (100Cr6) außerhalb eines Bereiches, der die Umwandlung umfasst, statt der gemessenen die durch Regression errechnete Länge in der Formel (2.6) (und den folgenden anlogen) verwendet. In den Bildern 7, 8, 9, 10, 13, 14 sind die Werte außerhalb dieses ausgewählten Bereiches identisch null bzw. identisch eins. Da beim C80 die störenden Einflüsse geringer – aber ebenso vorhanden – sind, wurde in den Rechnungen die gemessene Länge verwendet. Daher sind in den Bildern 11, 12, 15 die Werte nach der Umwandlung nur näherungsweise gleich eins.

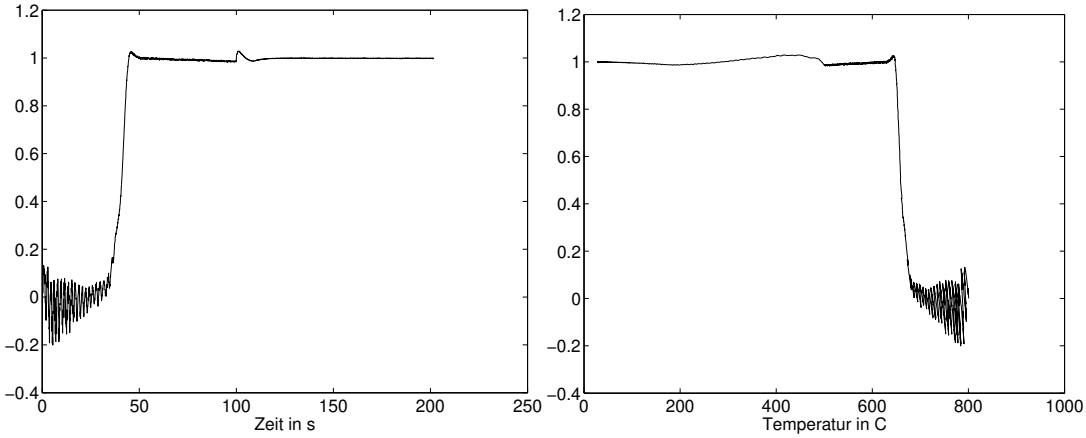


Bilder 7 und 8: Massenanteile des Perlits für Probe 1 (links) und 2 als Funktionen der Zeit, berechnet nach der Formel (2.6).

In einigen Bildern treten besondere Effekte auf, die wir kommentieren möchten.
Im Bild 7 (und schwächer sichtbar im Bild 9) tritt zum Ende der Umwandlungen (nach etwa 1100 s bzw. bei 600 °C) ein Sprung im Phasenanteil auf, der von der Theorie her nicht erklärbar ist. Hier macht sich das bereits oben erwähnte Verhalten der Länge (und somit der Dichte) der Probe 1 (Bilder 1 und 3) bemerkbar. Neben Messfehlern kommen thermische und metallurgische Effekte wie inhomogene Abkühlung von Probe und Gestänge und Relaxation nach Beendigung der Umwandlungsvorgänge in Frage.
Diese Einflüsse können in der Darstellung (z.B. Bild 7) als zusätzliche Umwandlung erscheinen. Auf der Basis metallkundlichen Wissens muss der Umwandlungsbereich so ausgewählt werden, dass diese Störeinflüsse nicht als fälschliche Umwandlung erscheinen. Bei der Probe 2 und 3 ist diese Auswahl offenbar besser gelungen als bei der Probe 1. Im Bild 8 ist die Umwandlung nach etwa 200s beendet, das leichte Absinken der Kurve ist Störeffekten geschuldet.



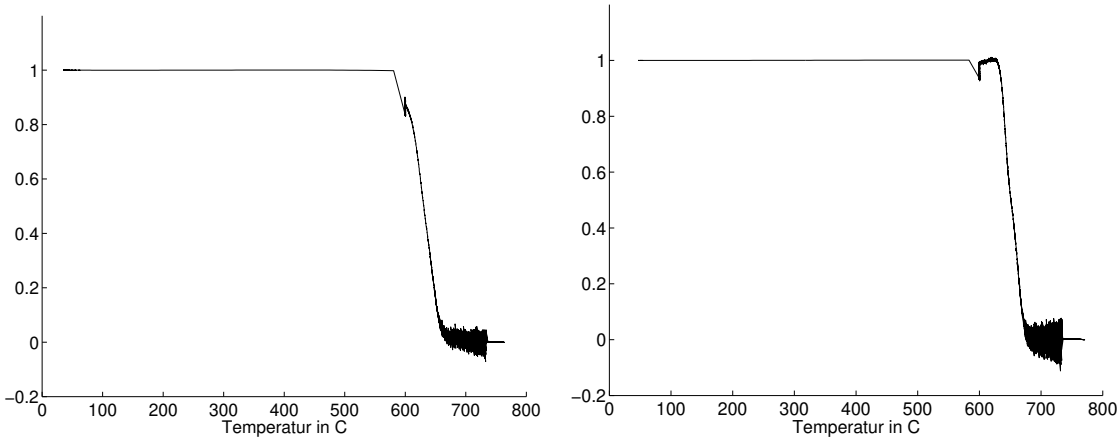
Bilder 9 und 10: Massenanteile des Perlits für Probe 1 (links) und 2 als Funktionen der Temperatur, berechnet nach der Formel (2.6).



Bilder 11 und 12: Massenanteil des Perlits für Probe 3 über der Zeit (links) und der Temperatur, berechnet nach (2.6).

Des Weiteren widerspiegeln sich in den Bildern 7 bis 18 die numerischen Probleme beim Verwenden der Formel (2.6) (wie auch der folgenden). Zum einen ist der Nenner $\rho_a(\theta) - \rho_p(\theta)$ klein, besonders zu Beginn der Umwandlung. Zum anderen ist die geschweifte Klammer in (2.6) zu Beginn der Umwandlung null und bleibt danach klein. Somit wirken sich Schwankungen und Messfehler zu Beginn der Umwandlung stärker aus, was in den nachfolgenden Bildern auch für den Volumenanteil und den Umwandlungsgrad zu beobachten ist. Eine Konsequenz bestünde im Entrauschen der Eingangs- oder Ergebnisdaten, was wir in dieser Arbeit nicht tun.

Nach der Formel (2.8) lassen sich die Volumenanteile des Perlits berechnen. Wir stellen sie als Funktionen der Temperatur dar (Bilder 13, 14 und 15). Dabei wurden für die Proben 1 und 2 wiederum außerhalb der Umwandlungsbereiche die durch Regression erhaltenen Längen benutzt.



Bilder 13 und 14: Volumenanteile des Perlits für Probe 1 (links) und 2 als Funktion der Temperatur, berechnet nach der Formel (2.8).

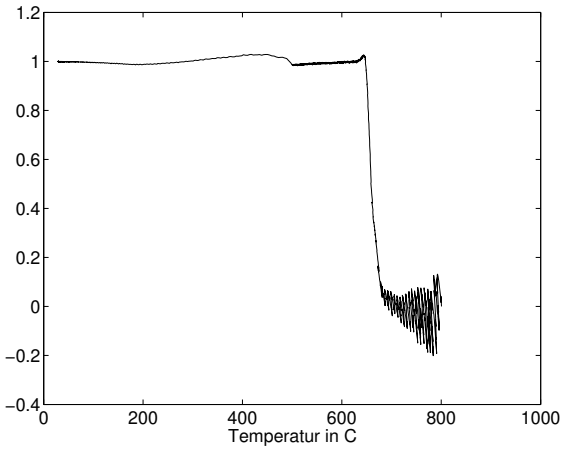
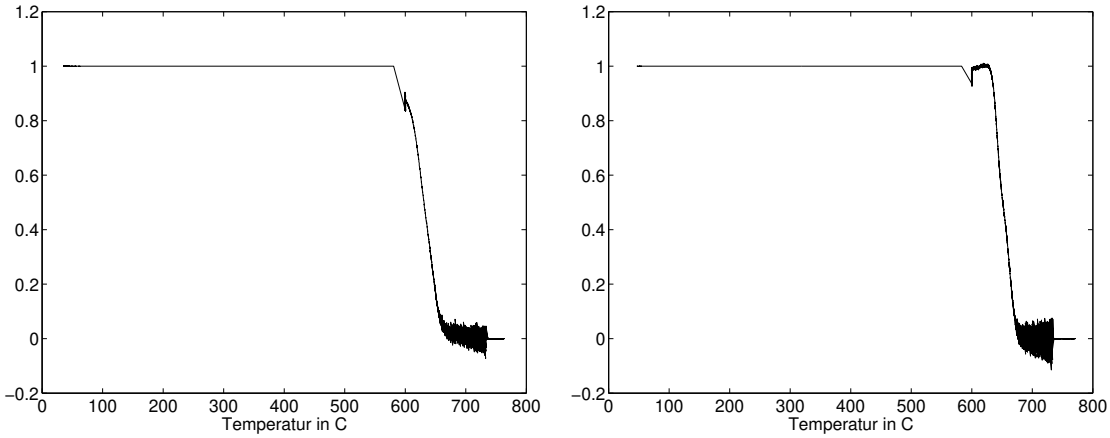


Bild 15: Volumenanteil des Perlits für Probe 3, berechnet nach der Formel (2.8), als Funktion über der Temperatur.

Die Massen- und Volumenanteile lassen sich ebenso mit den linearisierten Formeln (2.7) bzw. (2.9) berechnen. Im nächsten Punkt geben wir die relativen Fehler an, diese sind in der graphischen Darstellung kaum zu sehen. Daher verzichten wir auf die graphische Darstellung der nach den linearisierten Formeln berechneten Massen- und Volumenanteile.

Mit Hilfe der gemessenen und durch Extrapolation erhaltenen Längen (vgl. die Bilder 1, 2 und 5) lässt sich nach der Formel (1.1) der Umwandlungsgrad berechnen (Bilder 16, 17 und 18).



Bilder 16 und 17: Nach der Formel (1.1) berechneter Umwandlungsgrad für Probe 1 und 2 als Funktion der Temperatur.

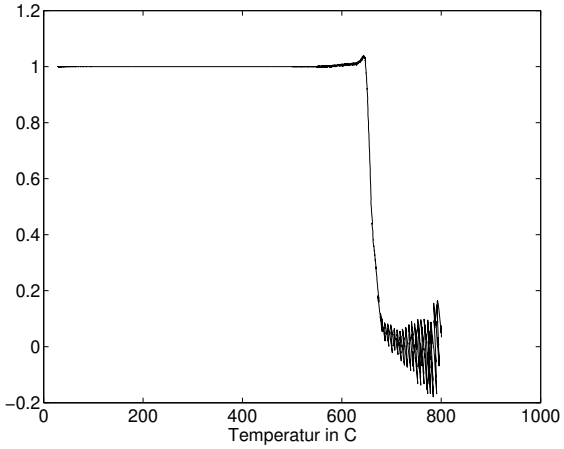


Bild 18: Nach der Formel (1.1) berechneter Umwandlungsgrad für Probe 3 als Funktion der Temperatur.

4. Weitere Auswertungen und Schlussfolgerungen

Wir wollen uns nun der wichtigen Frage nach den Unterschieden zwischen Massen- und Volumenanteilen, zwischen den nach verschiedenen Formeln berechneten Anteilen sowie zwischen Umwandlungsgrad und Volumenanteil zuwenden.

Eine generelle Feststellung ist, dass zu Beginn der Umwandlungen die aus den Messwerten berechneten Massen-, Volumenanteile und Umwandlungsgrade schnell und stark schwanken. Nach etwa 100s bzw. 150s für die Proben 1 und 2 sowie nach 50s für die Probe 3 zeigt sich ein ruhiger Verlauf. Für die Zukunft wollen wir prüfen, ob ein Vorbehandeln der Daten („Entrauschen“) dazu führt, dass die Werte zu Beginn der Umwandlungen besser aus den Daten berechnet werden können.

Selbst Proben der gleichen Charge können geringe Dichteunterschiede aufweisen, die sich in den nachfolgenden Berechnungen merklich niederschlagen können, da durch die Differenz der Dichten dividiert wird (vgl. die Formeln (2.6) – (2.9)). Daher ist ein separates Bestimmen der Probendichten vor den Versuchen angeraten (vgl. Punkt 2).

Wir geben die relativen Fehler in Tabellenform an. Die Einträge in Tabelle 1 erklären sich dabei wie folgt:

- Die Brüche in der linken Spalte stehen für die relativen Fehler, so z.B. die erste Formel für den Quotienten aus der Differenz zwischen Volumenanteil (nach (2.8) berechnet) und Massenanteil (nach Formel (2.6) berechnet) und dem Volumenanteil (nach Formel (2.8) berechnet.
- Die Abkürzungen va, ma und ug stehen für Volumen- und Massenanteil sowie Umwandlungsgrad.

	Probe 1	Probe 2	Probe 3
$\frac{va\ /2.8/ - ma\ /2.6/}{va\ /2.8/}$	nach 0,01	nach 0,01	nach 0,14
	≤ 0,004	≤ 0,004	≤ 0,0045
$\frac{va\ /2.9/ - ma\ /2.7/}{va\ /2.9/}$	nach 0,01	nach 0,01	nach 0,14
	≤ 0,004	≤ 0,004	≤ 0,0045
$\frac{va\ /2.9/ - va\ /2.8/}{va\ /2.8/}$	nach 0,08	nach 0,01	nach 0,14
	≤ 0,09	≤ 0,06	≤ 0,04
$\frac{ma\ /2.7/ - ma\ /2.6/}{ma\ /2.6/}$	nach 0,08	nach 0,01	nach 0,14
	≤ 0,09	≤ 0,06	≤ 0,04
$\frac{ug\ /1.1/ - va\ /2.8/}{va\ /2.8/}$	nach 0,11	nach 0,09	nach 0,17
	≤ 0,09	≤ 0,05	≤ 0,12

Tabelle 2: Relative Fehler für Massen-, Volumenanteile und Umwandlungsgrad.

- Aufgrund der starken Schwankungen der Werte zu Beginn der Umwandlungen ist eine Berechnung des relativen Fehlers nur nach Ende dieser Schwankungen

sinnvoll. Der Ausdruck „nach 0,08“ bedeutet daher, dass der relative Fehler erst nach der Bildung eines Anteils von 0,08 berechnet wurde.

Zur Auswertung der Tabelle 1 lässt sich feststellen:

(i) Die durchgeführten Rechnungen zeigen, dass die relativen Fehler zwischen Massen- und Volumenanteilen bei den durchgeführten Experimenten kleiner als 0,45% sind. Das gilt sowohl bei Verwendung der Formeln (2.6) und (2.8) als auch bei Verwendung der entsprechenden linearisierten Formeln (2.7) und (2.9). Somit wird die in [Wol03a] deduktiv erhaltenden Aussage bestätigt, dass beim Stahl die Unterschiede zwischen Volumen- und Massenanteile klein und somit vernachlässigbar seien.

(ii) Der relative Fehler zwischen Volumenanteil (nach Formel (2.8)) und dem Umwandlungsgrad (nach Formel (1.1)) ist dagegen wesentlich größer und scheint zu Beginn besonders der schnelleren Umwandlungen der Proben 1 und 3 nicht mehr vernachlässigbar zu sein. Wegen (i) trifft diese Aussage auch auf den Vergleich zwischen Umwandlungsgrad und Massenanteil zu.

In der Praxis wird der Umwandlungsgrad meist verwendet, um den Volumenanteil der sich bildenden Phase zu berechnen und um Modelle für Phasenumwandlungen zu testen (vgl. z.B. [Böh02, 03a], [Dac03]). Aufgrund der möglichen großen Abweichung zwischen Umwandlungsgrad und Volumenanteil stellt sich die Frage, ob für „schnelle“ Umwandlungen die Modelle nicht auf der Basis des Volumenanteils getestet werden sollten.

(iii) Beträchtlich können auch die Abweichungen zwischen den Massenanteilen, alternativ nach den Formeln (2.6) und (2.7) berechnet, sein. Ähnliches trifft für die nach (2.8) und (2.9) berechneten Volumenanteile zu. Im Zusammenhang mit (i) ergibt sich als Empfehlung, die Formeln (2.6) und (2.8) den linearisierten (2.7) bzw. (2.9) vorzuziehen.

(iv) Für alle aufgeführten relativen Fehler ist zu bemerken, dass sie ihr Maximum zu den von uns in der Tabelle angegebenen Anteilen (z.B. 0,08) erreichen und dann wesentlich kleiner werden (bis auf verschiedene „Ausreißer“). Wir zeigen exemplarisch die graphische Darstellung des relativen Fehlers $\frac{va\ /2.8/ - ma\ /2.6/}{va\ /2.8/}$

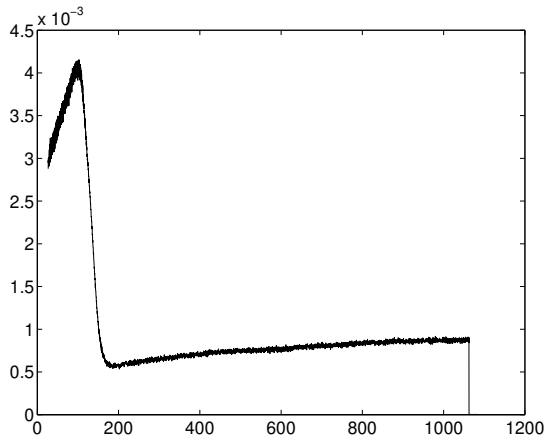


Bild 19: Relativer Fehler zwischen Massen- und Volumenanteil, berechnet nach den Formeln (2.6) und (2.8).

Abschließend möchten wir nochmals darauf hinweisen, dass die verwendeten Formeln unter der Annahme hergeleitet wurden, dass während der Umwandlungen die Proben in Temperatur- und Phasenverteilung homogen seien. Diese Voraussetzungen stellen Idealisierungen dar, weil sich ein Temperaturgradient nicht ganz vermeiden lässt und weil die Phasen in mesoskopischer Hinsicht nicht homogen verteilt sind. Insofern steht die Frage, wie genau sich die Phasenanteile überhaupt ermitteln lassen. Zusätzlich kommen noch die Fehler in Betracht, die beim Messen der aktuellen Länge der Probe, offenbar besonders zu Beginn der Umwandlung, auftreten. Überdies unterliegt das Dilatometer selbst kleinen thermischen Dehnungen. Der Einfluss von Karbidbildung beim Stahl 100Cr6 sei ebenso noch einmal erwähnt.

Als Resümee lässt sich festhalten, dass eine Verwendung der in Punkt 2 angegebenen Formeln zur Auswertung von Dilatometermessdaten möglich ist, wobei metallkundliches Wissen in die Auswertung, besonders in die Auswahl des Umwandlungsbereiches, einfließen muss. Ob ein Entrauschen der Daten die Störeffekte zu Beginn der Umwandlung wesentlich verringern kann, ist noch zu überprüfen, auch anhand weiteren Datenmaterials.

Literatur

[Ahr02]	Ahrens, U., Besserdich, G., Maier, H. J.: Sind aufwändige Experimente zur Beschreibung der Phasenumwandlungen von Stählen noch zeitgemäß? HTM, 57, 99-105, 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.

[Böh03a]	Böhm, M., Hunkel, M., Schmidt, A., Wolff, M.: Evaluation of various phase-transition models for 100Cr6 for application in commercial FEM programs, Proceedings of the 2nd Intern. Conf. on Thermal Process Modelling and Computer Simulation, Nancy, France, 2003, eingereicht zu J. de Physique IV
[Böh03b]	Böhm, M.; Dachkovski, S.; Hunkel, M.; Lübben, T.; Wolff, M.: Phasenumwandlungen im Stahl – Übersicht über einige makroskopische Modelle. Berichte aus der Technomathematik, FB 3, Universität Bremen, Report 03-09, 2003.
[Dac03]	Dachkovski, S.; Böhm, M.; Schmidt, A.; Wolff, M.: Comparison of several kinetic equations for pearlite transformation in 100Cr6 steel. Berichte aus der Technomathematik, FB 3, Universität Bremen, Report 03-07, 2003.
[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.
[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 54, 6, pp. 365-372, 1999.
[Mit02]	Mittemeijer, E. J., Sommer, F.: Solid state phase transformation kinetics: a modular transformation model, Z. Metallkunde 93, 5, 352-361, 2002.
[Mit92]	Mittemeijer, E. J.: Review – Analysis of the kinetics of phase transformations, Journal of Materials science 27, 3977-3987, 1992
[Rét97]	Réti, T.; Horváth, L.; Felde, I.: A comparative study of methods used for the prediction of nonisothermal austenite decomposition. J. of Mat. Eng. and Performance 6, 4, S. 433-442, 1997.
[Wol03a]	Wolff, M., Dachkovski, S., Böhm, M.: Volumenanteile versus Massenanteile – der Dilatometerversuch aus der Sicht der Kontinuumsmechanik, Berichte aus der Technomathematik, FB 3, Universität Bremen, Report 03-01, 2003.
[Wol03b]	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,

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: 15. 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. Torsten Köhler, Peter Maaß, Peter Wust, Martin Seebass:
Efficient methods in hyperthermia treatment planning, Januar 2001.

01-02. Peter Benner, Ralph Byers, Rafael Mayo, Enrique S. Quintana-Ortí, Vicente Hernández:
Parallel Algorithms for LQ Optimal Control of Discrete-Time Periodic Linear Systems, 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, July 2002.

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

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

02-10. Torsten Köhler, Peter Maaß, Jan Kalden:
Time-series forecasting for total volume data an 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.

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, March 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 in100Cr6 steel, July 2003.

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

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

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

03-11 Michael Wolff, Bettina Suhr:
Zum Vergleich von Massen- und Volumenanteilen bei der perlitischen Umwandlung der Stähle 100Cr6 und C80, September 2003.