



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5727

Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten auf die Zug- und Kerbschlageigen- schaften martensitischer Chromstähle

L. Schäfer

Institut für Materialforschung

Projekt Kernfusion

Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM

April 1996

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5727

**Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten auf die
Zug- und Kerbschlageigenschaften
martensitischer Chromstähle**

L. Schäfer

Institut für Materialforschung

Projekt Kernfusion

Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1996

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

Kurzfassung

Martensitische Chromstähle mit hohem Chromgehalt neigen häufig zur Bildung von Deltaferrit, der zusätzlich von massiven dendritischen Karbidausscheidungen umgeben sein kann. Beide Phasen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften des Stahles meist in gegenläufiger Weise. Der relativ weiche Deltaferrit verursacht eine Erhöhung der Verformbarkeit und Zähigkeit, während die spröden Karbiddendriten beides erniedrigen. Auf die Festigkeit des Stahles dagegen wirken beide Phasen eher negativ. Je nach dem Mengenverhältnis beider Phasen und der Prüfmethode dominiert der eine oder andere Einfluß. Dies ist der Grund für die sehr unterschiedlichen Angaben in der Literatur. Da die Karbiddendriten so gut wie immer die mechanischen Eigenschaften des Stahles verschlechtern, sollten sie durch eine Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren von mindestens 10^3 K/min weitgehend vermieden werden. Der Deltaferrit dagegen kann allein meist toleriert werden.

Abstract

Influence of deltaferrite and carbide dendrites on the tensile and charpy impact bending properties of martensitic chrome steels

Martensitic chrome steels with high content of chromium incline to form deltaferrite frequently accompanied by massive dendritic carbide precipitations. Both phases mostly influence the mechanical properties of this steel in countercurrent manner. The relative weak deltaferrite causes an increase of ductility and toughness, whilst the brittle carbide dendrites decreases both. Both phases mostly decrease the strength of the steel. One or the other influence will dominate in dependence of the quantitative relation of the two phases. This is the cause for very different statements in the literature. The carbide dendrites should be avoided using a cooling rate of more than 10^3 K/min after the austenitization, because this phase mostly impairs the mechanical properties of the steel. However, the deltaferrite without carbide dendrites can be tolerated mostly.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Versuchsmaterial und Prüfmethode	2
3. Versuchsergebnisse	3
3.1 Instrumentierte Kerbschlagbiegeversuche	3
3.1.1 Vorversuche	3
3.1.2 Meßergebnisse	5
3.1.2.1 Einfluß des Deltaferrit	5
3.1.2.2 Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten	5
3.1.2.3 Einfluß der Karbiddendriten	6
3.1.3 Modellvorstellung zu den Kerbschlagergebnissen	7
3.2 Zugversuche	7
3.2.1 Einfluß des Deltaferrit	7
3.2.2 Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten	8
3.2.3 Einfluß der Karbiddendriten	9
3.2.4 Einflüsse auf die Zähigkeit	10
4. Diskussion	11
4.1 Ergebnisübersicht und Modellvorstellung	11
4.2 Einwände zu den Experimenten	12
5. Zusammenfassung	13
6. Literatur	13
7. Danksagungen, Nomenklatur, Tabellen, Bilder	14

1. Einleitung

Martensitische Chromstähle mit einem hohen Chromäquivalent und einem niedrigen Nickeläquivalent neigen entsprechend dem Schaeffler-Diagramm, Bild 1, zur Bildung von Deltaferrit. Zudem ist gelegentlich beobachtet worden, daß der Deltaferrit nach ungewöhnlichen mechanisch-thermischen Behandlungen des Werkstoffes auch im Einphasenfeld des Martensit auftreten kann. Die Auswirkungen des Deltaferrit auf die mechanischen Eigenschaften des Stahles werden in der Literatur nicht einheitlich und nicht vollständig beschrieben [1 bis 7]. Manche Widersprüche ergaben sich daraus, daß bis vor kurzem ein häufiger Begleiter des Deltaferrit übersehen wurde, der die mechanischen Eigenschaften entscheidend mitbeeinflußt. Es handelt sich dabei um u.U. massive dendritische $M_{23}C_6$ - Ausscheidungen, die den Deltaferrit mehr oder weniger umhüllen [8 bis 10].

In dieser Arbeit soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen (Vergütung) die Karbiddendriten entstehen und wie sie vermieden werden können, und welchen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften des Stahles der Deltaferrit alleine, die Karbiddendriten alleine und beide Phasen zusammen haben.

2. Versuchsmaterial und Prüfmethode

Als Versuchsmaterial standen sechs Schmelzen eines martensitischen Stahls zur Verfügung, bei denen der Chromgehalt von 9 bis 14 % variiert wurde (Tabelle 1, Bild 1). Der sich daraus ergebende Anteil von Deltaferrit liegt zwischen Null und 25 %. Die Chargen wurden von Fa. Saarstahl doppelt vakuumerschmolzen und als geschmiedete 25mm-Vierkantstäbe geliefert. Aus ihnen wurden die Probenrohlinge gefertigt, die bei 1075 °C 30'/L gehärtet und unterschiedlich angelassen wurden. Die Korngröße liegt bei $30 \pm 10 \mu\text{m}$ ($\approx \text{ASTM } 7.5 \pm 1$). Der metallographische Nachweis des Deltaferrits wurde nach der Farbätzmethode von Weck und Leistner durchgeführt, und die Menge wurde sowohl metallographisch als auch über eine Flächenauswertung (MOP) bestimmt.

Deltaferrit ist die erste feste Phase, die sich aus Stahlschmelzen (mit weniger als 0,5 % C) beim Abkühlen ausscheidet. Der Deltaferrit wird anschließend in einer peritektischen Reaktion in γ -Eisen umgewandelt. Diese Umwandlung läuft manchmal aus kinetischen Gründen (bedingt überwiegend durch Legierungselemente des Chromäquivalentes) unvollständig ab, so daß Reste des Deltaferrit im γ -Eisen und bei weiterer Abkühlung im Martensit übrig bleiben.

In rasterelektronenmikroskopischen Mikrostrukturuntersuchungen wurde festgestellt, daß die Versuchsschmelzen mit zunehmendem Deltaferrit-Gehalt auch eine zunehmende Belegung der Phasengrenzen zwischen der Martensitmatrix und dem Deltaferrit mit einem chromreichen Karbid vom Typ M_{23}C_6 haben; siehe Bild 18 [10].

In den Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern, Bild 2, ist deren Bildungsbereich gestrichelt eingezeichnet, wodurch die Abkühlgeschwindigkeit und der Temperaturbereich charakterisiert sind. Die Karbide wachsen aus dem mit Chrom angereicherten Deltaferrit heraus und sind möglicherweise mit ihm semikohärent verbunden. Wegen der hohen Übersättigung und der ungünstigen Keimbildungsbedingungen haben die Karbide häufig eine dendritische Form. Mit zunehmender Deltaferrit-Korngröße wird die Belegung der Phasengrenzen gröber und dichter bis zu einer überwiegend durchgehenden Karbid-Deckschicht. Der Deltaferrit hat eine deutlich niedrigere Härte als der Martensit. Weitere Informationen zur Mikrostruktur sind in einer speziellen Arbeit enthalten [8] [10].

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften wurden der Zug- und der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch gewählt. Der Zugversuch, weil er sozusagen der Standardversuch zur Beurteilung von Festigkeit und Verformbarkeit von Werkstoffen ist, und der Kerbschlagbiegeversuch, weil er bezüglich der Schlagarbeit ein Standardversuch zur Beurteilung der Zähigkeit ist, die hier durch die spröden Karbiddendriten besonders beeinflusst wurde. Durch die Instrumentierung werden Daten zur Festigkeit und Verformbarkeit des Werkstoffes gewonnen, die den Einfluß der untersuchten Phasen auf die Zähigkeit weiter differenzieren und z.T. erklären und die zudem eine Verbindung zu den Aussagen der Zugversuche herstellen.

Die Zugversuche wurden mit einer elektro-mechanischen Universal-Prüfmaschine (Instron 4505) an Luft durchgeführt. Die Prüftemperatur war die Raumtemperatur und die Verformungsgeschwindigkeit betrug $\dot{\epsilon} = 1 \text{ \% / min}$. Ausgewertet wurden die Werkstoffkennwerte Zugfestigkeit R_m , 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$, Bruchdehnung A und Gleichmaßdehnung A_g .

Im instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch wird durch Dehnmeßstreifen in der Finne des Hammers die Kraft gemessen, die die Kerbschlagprobe der Hammerbewegung entgegensetzt. Das liefert ein Kraft-Weg-Diagramm wie es in Bild 3 dargestellt ist. Daraus lassen sich mehrere charakteristische Meßdaten für die Kraft, die Verformung und die verbrauchte Energie ablesen. Hier wurde die Gesamtenergie oder Schlagarbeit A_V als Maß für die Zähigkeit, die Maximalkraft F_m als Maß für die Festigkeit und die Probendurchbiegung bis zum Spröbruch S_u als Maß für die Verformbarkeit verwendet. Die Probenformen sind in Bild 4 dargestellt.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Instrumentierte Kerbschlagbiegeversuche

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 2 enthalten.

3.1.1 Vorversuche

Für die Prüfung im Kerbschlagversuch gibt es folgende relevante Versuchsparameter: Der Deltaferritgehalt des Stahles, die Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren, die Anlaßtemperatur des Martensits und die Prüftemperatur.

Wenn jeder dieser vier Parameter mit sechs Varianten vertreten wäre, wären zur systematischen Untersuchung $6^4 \approx 1.300$ Experimente nötig, was hier nicht praktikabel ist. Daher wurden für Vorversuche folgende Annahmen getroffen: Die Abkühlgeschwindigkeiten von 15 K/min ist entsprechend dem ZTU-Diagramm in Bild 2 geeignet, Karbiddendriten zu erzeugen, und es ist die Wasserabkühlung geeignet, diese zu vermeiden. Die Prüftemperatur $T_p = 100 \text{ °C}$ ist für die Untersuchungen geeignet, weil sie weit genug von einer für alle Proben ungefähr einheitlichen Tief- oder Hochlage der Kerbschlageigenschaften entfernt ist [9]. Nach Bild 2 ist die Anlaßtemperatur $T_{AN} = 520 \text{ °C}$ geeignet, die Ausscheidung weiterer Karbide zu vermeiden, damit deren Effekt nicht den Einfluß der zu untersuchenden Phasen Deltaferrit und Karbiddendriten überlagert. In den Vorversuchen wurde jeweils einer der drei Parameter Abkühlgeschwindigkeit, Anlaßtemperatur und Prüftemperatur variiert, während die übrigen zwei mit $\Delta T/\Delta t = 15 \text{ K/min}$, mit $T_{AN} = 520 \text{ °C}$ und mit $T_p = 100 \text{ °C}$ konstant gehalten wurden.

Bild 5 zeigt die Maximalkraft F_m , die Verformbarkeit S_u und die Schlagarbeit A_v in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit für einen Stahl ohne Deltaferrit und Karbiddendriten (C 831) und einen mit Deltaferrit und dem Potential für Karbiddendriten (C836). In diesem Bild soll zunächst nur festgestellt werden, daß bei dem Stahl mit Deltaferrit und dem Potential zu Karbiddendriten (C 836) bei einer Abkühlgeschwindigkeit von etwa 20 K/min ein auffallendes Minimum in der Verformung bis zum Sprödbruch S_u und in der Schlagarbeit A_v auftritt. Daraus wird geschlossen, daß sich im Bereich dieser Abkühlgeschwindigkeit besonders viele Karbiddendriten bilden, was ja auch mit Bild 2 übereinstimmt. Für die folgenden Hauptexperimente wurde daher die Abkühlgeschwindigkeit von 15 K/min gewählt.

Bild 6 zeigt die Kerbschlageigenschaften in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur für einen Stahl mit mehr (C 835) und einen mit weniger (C 834) Deltaferrit und Karbiddendriten. Die Meßwerte beider Stähle wurden auf die Meßwerte eines deltaferritfreien Stahles (C 832) bezogen, so daß der Einfluß weiterer Karbide eliminiert ist. Der stärkste Effekt auf die Verformung und die Schlagarbeit ist bei einer Anlaßtemperatur von ca. 600 °C zu erzielen. Allerdings ist in diesem Bereich der Einfluß auf die Maximalkraft positiv während er sonst negativ ist. Um möglichst alle negativen Einflüsse (wenn auch nicht so stark) zu erfassen und zudem noch Ergebnisse wie bei den praxisnahen Anlaßtemperaturen von 700 °C zu erzielen, wurde die Anlaßtemperatur $T_{AN} = 520 \text{ °C}$ für die folgenden Hauptexperimente gewählt.

Bild 7 beantwortet die Frage nach einer geeigneten Prüftemperatur in dem Sinne, daß zwar bei höheren Temperaturen als $T_p = 100\text{ °C}$ die Verformung und die Schlagarbeit der verschiedenen Stähle etwas weiter auseinanderliegen, daß sie also besser differenziert werden. Da dies aber kein prinzipieller, sondern nur ein gradueller kleiner Vorteil ist, kann die anvisierte Prüftemperatur von $T_p = 100\text{ °C}$ auch für die folgenden Hauptexperimente verwendet werden.

Für die Hauptexperimente sind also eine Abkühlgeschwindigkeit von $\Delta T/\Delta t = 15\text{ K/min}$, eine Anlaßtemperatur von $T_{AN} = 520\text{ °C}$ und eine Prüftemperatur von $T_p = 100\text{ °C}$ brauchbar.

3.1.2 Meßergebnisse

3.1.2.1 Einfluß des Deltaferrit

Um den Einfluß des Deltaferrit (alleine) auf die Kerbschlageigenschaften zu erfassen, wurden Proben bei $1075\text{ °C} - 0,5\text{ h}$ austenitisiert, in Wasser abgeschreckt und bei $520\text{ °C} - 2\text{ h}$ angelassen. Mit dieser Vergütung ist sichergestellt, daß sich weder die massiven Karbiddendriten noch andere Karbide in relevanter Menge ausscheiden. In Bild 8 sind die Kerbschlageigenschaften solcher Proben in Abhängigkeit von Ihrem Gehalt an reinem Deltaferrit (ohne Karbiddendriten) dargestellt. Wie schon in Bild 5 bei der Abkühlung in Wasser, so ist auch aus Bild 8 etwas detaillierter zu entnehmen, daß mit zunehmendem Deltaferritgehalt die Maximalkraft abnimmt und die Verformbarkeit S_u und die Schlagarbeit zunehmen. Dies ist der unmittelbare Einfluß der weicheren Phase Deltaferrit (siehe auch [9]).

3.1.2.2 Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten

Wählt man eine langsame Abkühlgeschwindigkeit, z.B. 15 °C/min , so scheiden sich beim Abkühlen um den Deltaferrit herum massive Karbiddendriten aus [8], die zusammen mit dem Deltaferrit die in Bild 9 dargestellten Kerbschlageigenschaften verursachen. Mit zunehmendem Anteil an Deltaferrit und damit (bei niedriger Abkühlgeschwindigkeit) auch zunehmendem Anteil an Karbiddendriten nehmen alle hier gemessenen Kerbschlageigenschaften (Maximalkraft, Verformung S_u und Schlagarbeit) ab, d.h. die Karbiddendriten haben einen dominanten Einfluß auf die Kerbschlageigenschaften, der auch den positiven Einfluß

des Deltaferrit auf die Verformung S_u und die Schlagarbeit ins Negative überkompensiert.

3.1.2.3 Einfluß der Karbiddendriten

Aus den Ergebnissen von Bild 8 und 9 läßt sich rechnerisch abschätzen, welchen Einfluß die Karbiddendriten alleine ohne Deltaferrit ausüben würden. Der Einfluß von (hier beispielsweise 25 %) Deltaferrit (Δ) oder der dazugehörigen Menge Karbiddendriten (KD) oder beider Phasen ($\Delta + KD$) wird als Quotient einer Kerbschlageigenschaft aus Proben mit und ohne diese Phasen dargestellt (hier bedeuten: W = Wasserabkühlung; O = Ofenabkühlung mit 15 °/min):

- a) Einfluß von Deltaferrit auf die
 Maximalkraft: $F_{m,w}(\Delta)/F_{m,w} = 35 \text{ kN} : 54 \text{ kN} = \underline{0,65}$
 Verformung: $S_{u,w}(\Delta)/S_{u,w} = 1,88 \text{ mm} : 0,82 \text{ mm} = \underline{2,29}$
 Schlagarbeit: $A_{v,w}(\Delta)/A_{v,w} = 52 \text{ J} : 24 \text{ J} = \underline{2,17}$
- b) Einfluß von Deltaferrit + Karbiddendriten auf die
 Maximalkraft: $F_{m,o}(\Delta + KD)/F_{m,o} = 38 \text{ kN} : 45,6 \text{ kN} = \underline{0,83}$
 Verformung: $S_{u,o}(\Delta + KD)/S_{u,o} = 0,91 \text{ mm} : 1,38 \text{ mm} = \underline{0,66}$
 Schlagarbeit: $A_{v,o}(\Delta + KD)/A_{v,o} = 27 \text{ J} : 51 \text{ J} = \underline{0,53}$
- c) Einfluß von Karbiddendriten (allein) auf die
 Maximalkraft: $F_{m,o}(\Delta + KD) \cdot F_{m,w}/F_{m,w}(\Delta) \cdot F_{m,o} = \underline{1,29}$
 Verformung: $S_{u,o}(\Delta + KD) \cdot S_{u,w}/S_{u,w}(\Delta) \cdot S_{u,o} = \underline{0,29}$
 Schlagarbeit: $A_{v,o}(\Delta + KD) \cdot A_{v,w}/A_{v,w}(\Delta) \cdot A_{v,o} = \underline{0,24}$

Die Karbiddendriten alleine erhöhen also die Maximalkraft und erniedrigen stark die Verformung bis zum Sprödbruch und die Schlagarbeit.

Bild 10 zeigt den aus den Mittelwerten der Meßwerte von Bild 8 und 9 berechneten alleinigen Einfluß der Karbiddendriten auf die Kerbschlageigenschaften. Man sieht, daß kleine Mengen an Karbiddendriten, die etwa einem Δ - Ferrit - Gehalt von 5 % entstammen, keinen Einfluß auf die Maximalkraft, aber einen starken Einfluß auf die Schlagarbeit haben, während bei höheren Gehalten an Deltaferrit (z.B. 25 %) und entsprechenden hohen Gehalten an Karbiddendriten eine weitere Vergrößerung ihres Volumenanteiles kaum noch Einfluß auf die Verformbar-

keit und die Schlagarbeit des Werkstoffes, aber zunehmend auf seine Festigkeit hat.

3.1.3 Modellvorstellung zu den Kerbschlagergebnissen

Aus den Kerbschlagversuchen und früheren Strukturuntersuchungen [8], ergibt sich folgende Modellvorstellung: Der reine Martensit hat eine hohe Festigkeit und niedrige Verformbarkeit und Bruchzähigkeit. Mit abnehmender Abkühlgeschwindigkeit scheiden sich wegen der längeren Diffusionszeit des Kohlenstoff im übersättigten Austenit zunehmend Karbide aus, wodurch die Festigkeit des sich bildenden Martensit abnimmt und seine Verformbarkeit und Bruchzähigkeit zunehmen. Der reine Deltaferrit hat eine geringere Festigkeit und höhere Verformbarkeit und Bruchzähigkeit, was sich auch anteilmäßig im Stahl auswirkt. Bei einer kritischen Abkühlgeschwindigkeit von etwa 20 K/min scheiden sich um den Deltaferrit herum sehr spröde Karbiddendriten aus, die die Festigkeit des Stahles erhöhen und dessen Verformbarkeit und Bruchzähigkeit erniedrigen. Die Summe der beiden gegensätzlichen Einflüsse von Deltaferrit und Karbiddendriten kann je nach dem Mengenverhältnis der beiden Phasen sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Kerbschlageigenschaften haben. Gemäß Bild 5 wird die Festigkeit aber in jedem Fall, gleichgültig, ob viel oder wenig Karbiddendriten vorhanden sind, erniedrigt. Offenbar ist der Deltaferrit garnicht in der Lage, so viele Karbiddendriten zu bilden, daß sein festigkeitsmindernder Einfluß kompensiert oder überkompensiert werden könnte. Bezüglich der Verformbarkeit und der Bruchzähigkeit genügen allerdings kleinste Mengen an Karbiddendriten, wie sie schon bei den schnellen Abkühlungen von etwa 100 K/min auftreten, um den verbessernden Einfluß des Deltaferrit zu kompensieren und bei noch langsameren Abkühlgeschwindigkeiten ins Negative überzukompensieren. Bei sehr niedrigen Abkühlgeschwindigkeiten bildet sich statt der Karbiddendriten der feinere Perlit, der wiederum einen Anstieg von Verformbarkeit und Zähigkeit bewirkt.

3.2 Zugversuche

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3 enthalten.

3.2.1 Einfluß des Deltaferrit

Zur Untersuchung des Einflusses des reinen Deltaferrit (ohne Karbiddendriten) auf die Zugeigenschaften wurden Proben mit 20 % Deltaferrit (C 835), mit 25 %

Deltaferrit (C 836) und ohne Deltaferrit (C 832) bei $T_{AU} = 1075 \text{ °C}/0,5 \text{ h}$ austenitisiert und in Wasser abgeschreckt, wodurch die Ausscheidung der Karbiddendriten in den Proben mit Deltaferrit vermieden wurde. Da die Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur dargestellt werden sollten und diese ebenfalls die Zugeigenschaften verändert, wurden die Ergebnisse der Proben mit Deltaferrit durch die Ergebnisse der Proben ohne Deltaferrit dividiert. So läßt sich der reine Deltaferriteinfluß darstellen. Tabelle 4 enthält die Daten. Bild 11 zeigt die relative Zugfestigkeit bzw. 0,2 % - Dehngrenze in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur für die beiden Stähle C 836 und C 835 mit Deltaferrit. Die Werte liegen in der Regel unter dem Wert 1, d.h. der Deltaferrit vermindert die Festigkeit des Stahles, wobei die größere Menge Deltaferrit im Stahl C 836 auch die stärkere Wirkung hat. Die 0,2 % - Dehngrenze wurde stärker beeinflußt als die Zugfestigkeit. Mit zunehmender Anlaßtemperatur wird die Wirkung des Deltaferrit geringer, weil der Festigkeitsunterschied zu dem sich zunehmend entfestigenden Martensit geringer wird.

In Bild 12 ist die relative Bruchdehnung und Gleichmaßdehnung, d.h. der Quotient der Meßdaten aus Proben mit und ohne Deltaferrit, in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur dargestellt. Die Werte liegen im allgemeinen oberhalb 1, d.h. der Deltaferrit erhöht die Verformbarkeit des Stahles, wobei die größere Menge auch die stärkere Wirkung hat. Die Gleichmaßdehnung wurde stärker beeinflußt als die Bruchdehnung. Mit zunehmender Anlaßtemperatur nimmt die Wirkung des Deltaferrit ab, weil der Duktilitätsunterschied zu dem sich zunehmend entfestigenden Martensit geringer wird.

3.2.2 Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten

Zur Untersuchung des Einflusses von Deltaferrit und Karbiddendriten auf die Zugeigenschaften wurden Proben mit 20 % Deltaferrit (C 835), mit 25 % Deltaferrit (C 836) und ohne Deltaferrit (C 832) bei $T_{AU} = 1075 \text{ °C}/0,5 \text{ h}$ austenitisiert und mit einer Abkühlgeschwindigkeit von $\Delta T/\Delta t = 15 \text{ K/min}$ abgekühlt, wobei sich auf der Oberfläche des Deltaferrit, sofern er vorhanden ist, massive Dendriten aus $M_{23}C_6$ bilden. Tabelle 5 enthält die Meßergebnisse. In Bild 13 ist die relative (d.h. auf deltaferritfreie Proben bezogene) Zugfestigkeit bzw. 0,2 % - Dehngrenze der Stähle C 836 und C 835 in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur dargestellt. Die Werte liegen alle unter 1, d.h. der Deltaferrit und die Karbiddendriten zusammen erniedrigen die Festigkeit des Stahles, wobei die größere Menge beider Phasen (im Stahl C 836) auch die stärker erniedrigende Wirkung hat. Die 0,2 % - Dehn-

grenze ist stärker beeinflußt als die Zugfestigkeit. Mit zunehmender Anlaßtemperatur wird die Wirkung der beiden Phasen zusammen geringer, weil der Festigkeitsunterschied des hier dominanten Deltaferrit zu dem sich zunehmend entfestigenden Martensit geringer wird.

In Bild 14 ist die relative (d.h. auf C 832 bezogene) Gleichmaß- und Bruchdehnung der Stähel C 836 und C 835 in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur dargestellt. Die Werte der Gleichmaßdehnung liegen über 1 und die Werte der Bruchdehnung unter 1. Die Deutung ist nur unter Einbeziehung der Bilder 12 und 16 möglich, aus denen hervorgeht, daß der Deltaferrit die Duktilität generell erhöht, während die Karbiddendriten keinen eindeutigen Einfluß auf die Gleichmaßdehnung haben, während die Bruchdehnung deutlich reduziert wird. Die Kombination beider Einflüsse ergibt Bild 14. Mit zunehmender Anlaßtemperatur wird die Wirkung beider Phasen zusammen geringer, weil mit zunehmend weicherem Martensit auch die Wirkung der spröden Karbiddendriten auf die Bruchdehnung und des weichen Deltaferrit auf die Gleichmaßdehnung geringer wird.

3.2.3 Einfluß der Karbiddendriten

Aus den Messungen der relativen Einflüsse von Deltaferrit (Δ) bzw. Deltaferrit plus Karbiddendriten ($\Delta + KD$) wird der Einfluß der Karbiddendriten (KD) allein berechnet. Dabei bedeuten E = Eigenschaft, hier Zugeigenschaft, W = Wasserabkühlung, O = Ofenabkühlung (mit ~ 15 K (min)), (-) = deltaferritfreier Stahl.

$$\text{Relativer Einfluß von Deltaferrit } (\Delta) : E_W (\Delta) : E_W (-) \quad (1)$$

$$\text{Relativer Einfluß von Deltaferrit plus Karbiddendriten: } E_O (\Delta + KD) : E_O (-) \quad (2)$$

$$\text{Relativer Einfluß von Karbiddendriten: } (2) : (1) = (3)$$

$$E_O (\Delta + KD) : E_O (-) / E_W (\Delta) : E_W (-) \quad (3)$$

Ebenso gilt $(1) \cdot (3) = (2)$, d.h. das Produkt der Einzeleinflüsse von Deltaferrit und Karbiddendriten ergibt den Gesamteinfluß von Deltaferrit plus Karbiddendriten. Die Ergebnisse der Berechnungen des relativen Einflusses der Karbiddendriten alleine sind in Tabelle 6 enthalten.

In Bild 15 ist der Einfluß der Karbiddendriten auf die Zugfestigkeit und 0,2 % - Dehngrenze der Stähle C 835 und C 836 in Abhängigkeit von der Anlaßtempera-

tur dargestellt. Die Werte liegen unter 1, d.h. die Karbiddendriten verringern die Festigkeit des Stahles. Dies ist anders als im Kerbschlagbiegeversuch, wo die Festigkeit erhöht wurde. Der hier relevante Unterschied beider Prüfverfahren ist die Verformungsgeschwindigkeit. Die Zusammenhänge sind aber noch unklar. Größere Mengen an Karbiddendriten haben auch hier die stärkeren Wirkungen.

In Bild 16 ist der Einfluß der Karbiddendriten auf die Gleichmaß- und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur dargestellt. Die Bruchdehnung liegt unter dem Wert 1, d.h. die Karbiddendriten führen zu einem vorzeitigen Bruch. Die Gleichmaßdehnung dagegen wurde durch die Karbiddendriten etwas verbessert, was allenfalls ein indirekter Einfluß über den Kohlenstoffverlust des Martensit in der Umgebung der Karbide sein kann.

3.2.4 Einflüsse auf die Zähigkeit

Um einen umfassenden Vergleich der beiden Prüfmethode Zugversuch und Kerbschlagbiegeversuch zu ermöglichen, wurde analog zum Kerbschlagbiegeversuch, wo die Bruchzähigkeit als Schlagarbeit A_v direkt gemessen wurde, eine Zähigkeit im Zugversuch als Produkt aus Zugfestigkeit und Gleichmaßdehnung definiert. Diese Größe ist zwar etwas größer als die eigentlich gemeinte verbrauchte Arbeit bis zum Kraftmaximum, aber da hier immer mit relativen Größen gearbeitet wird, dürfte der Fehler vernachlässigbar klein sein.

In Bild 17 ist als Maß der Zähigkeit das Produkt aus relativer Zugfestigkeit und relativer Gleichmaßdehnung in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur dargestellt. Aus Teilbild a) ist zu entnehmen, daß der reine Deltaferrit die Zähigkeit verbessert. Mit zunehmender Anlaßtemperatur wird der Einfluß geringer, weil der Martensit zunehmend weicher wird und der Unterschied zum Deltaferrit verschwindet. Je mehr Deltaferrit vorhanden ist, desto stärker ist sein Einfluß. Teilbild b) zeigt den Einfluß der Karbiddendriten allein auf die Zähigkeit. Er ist nicht eindeutig, aber überwiegend zähigkeitsmindernd. Der gemeinsame Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten auf die Zähigkeit im Zugversuch ist aus Teilbild c) zu entnehmen. Der gemeinsame Einfluß erhöht die Zähigkeit eindeutig.

Eine analoge Darstellung ist möglich, wenn man zur Berechnung die Bruchdehnung statt der Gleichmaßdehnung verwendet. Dann erhält man statt der für die Gleichmaßdehnung zutreffenden Zähigkeit eine Bruchzähigkeit, und alle Einflüsse, insbesondere die der Karbiddendriten wirken sich zähigkeitsmindernd aus.

Aber die Verknüpfung von Zugfestigkeit und Bruchdehnung ist physikalisch nicht sehr sinnvoll, und deswegen wird auf die grafische Darstellung verzichtet.

4. Diskussion

4.1 Ergebnisübersicht und Modellvorstellung

Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind übersichtsmäßig in Tabelle 7 zusammengefaßt. Der Deltaferrit ist eine relativ weiche Phase im Martensit. Er reduziert die Festigkeit des Stahles, erhöht dessen Verformbarkeit und erhöht (aufgrund der Dominanz der erhöhten Verformbarkeit) dessen Zähigkeit, wenn auch nicht unbedingt die Bruchzähigkeit ($A \cdot R_m$).

Die Karbiddendriten reduzieren als spröde Phase im Martensit sowohl die Verformbarkeit als auch die Zähigkeit des Stahles (wobei eine überwiegend erhöhte Gleichmaßdehnung vorläufig noch unerklärt bleibt). Die Festigkeit wird im Zugversuch erniedrigt und im Kerbschlagversuch erhöht, was auf unterschiedlichen Bruchmechanismen beruht.

Die kombinierte Wirkung von Deltaferrit und Karbiddendriten auf die Festigkeit ist immer negativ, auch im Kerbschlagversuch, weil die festigkeitmindernde Wirkung des Deltaferrit dominiert. Ebenso ist der Einfluß auf Verformbarkeit und Zähigkeit negativ, wenn man den Bruchzustand (S_u , A , A_v u. $R_m \cdot A$) betrachtet. Betrachtet man dagegen einen Verformungszustand deutlich vor dem Bruch (A_g und $R_m \cdot A_g$), dann verbessert der kombinierte Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten die Verformbarkeit und Zähigkeit. Dieser kombinierte Einfluß wurde hier nach einer Abkühlgeschwindigkeit gemessen, die zur maximal möglichen Menge an Karbiddendriten führt. Es sind natürlich auch alle anderen Mischungsverhältnisse von Karbiddendriten zu Deltaferrit möglich, so daß die kombinierte Wirkung von Deltaferrit und Karbiddendriten auch zwischen den hier aufgeführten Wirkungen von reinem Deltaferrit und beiden Phasen zusammen liegen kann.

Die Modellvorstellung umfaßt eine Matrix aus Martensit und zwei eingelagerte Phasen, wovon die eine (der Deltaferrit) weicher, verformbarer, zäher und weniger fest als der Martensit ist und die andere Phase (Karbiddendriten) härter, weniger verformbar, weniger zäh und fester als der Martensit ist. Beide Phasen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften des Stahles im wesentlichen gegen-

läufig. Der reine Deltaferrit erhöht die Verformbarkeit und Zähigkeit des Stahles, während die Karbiddendriten sie erniedrigen. Auf die Festigkeit wirken beide Phasen eher negativ. Zusammen dominiert je nach Mischungsverhältnis von Karbiddendriten zu Deltaferrit und Prüfverfahren bzw. Belastungsart mal die eine und mal die andere Phase. Dies ist auch der Grund für die scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse in der Literatur [1 bis 7].

Da die Karbiddendriten so gut wie immer die mechanischen Eigenschaften des Stahles negativ beeinflussen, sollten sie durch eine Abkühlgeschwindigkeit von mindestens 10^3 K/min weitgehend vermieden werden. Der Deltaferrit alleine kann dagegen oft toleriert werden.

4.2 Einwände zu den Experimenten

Man kann den grundsätzlichen Einwand machen, daß bei den vorliegenden Experimenten nicht nur die Gehalte an Deltaferrit und Karbiddendriten, sondern auch der Chromgehalt zwischen 10 und 14 % variiert wurde, und daß dessen Einfluß den untersuchten Eigenschaften überlagert ist. Dem ist vorläufig nur entgegenzuhalten, daß Kayano et. al. [11] bei solchen Stählen keinen signifikanten Einfluß des Chromgehaltes bei 9 % und 15 % auf die Schlagarbeit im Kerbschlagbiegeversuch gefunden haben. Wenn die Schlagarbeit unbeeinflusst ist, kann man annehmen, daß auch deren Komponenten, die Festigkeit und die Verformbarkeit unverändert sind (die höchst unwahrscheinliche Möglichkeit, daß Festigkeit und Verformbarkeit eine numerisch genau gegenläufige Chromabhängigkeit haben, so daß deren Produkt als Schlagarbeit konstant bleibt, wird hier ausgeklammert). Wenn aber Festigkeit und Verformbarkeit im schnellen Kerbschlagbiegeversuch vom Chromgehalt unabhängig sind, dann darf angenommen werden, daß sie auch im langsamen Zugversuch (bei Raumtemperatur) unbeeinflusst sind.

Ein weiterer Einwand könnte die Raumtemperatur als Prüftemperatur der Zugversuche betreffen, weil sie außerhalb des Bereiches der hier relevanten Anwendungstemperaturen liegt. Da aber ein Hauptanliegen der Nachweis möglichst starker Einflüsse der Karbiddendriten war und diese als versprödende Phase bei tiefen Temperaturen wirksamer sind als bei hohen, wird hier die Raumtemperatur gegenüber einer Prüftemperatur von $T_p = 250 \div 500$ °C als willkommene Verschärfung der Prüfbedingungen angesehen.

5. Zusammenfassung

Die Phase Deltaferrit und ihr häufiger Begleiter, die dendritisch ausgebildeten $M_{23}C_6$ -Ausscheidungen, beeinflussen die mechanischen Eigenschaften eines martensitischen Chromstahls meist in gegenläufiger Weise. Der relativ weiche Deltaferrit verursacht eine Erhöhung der Verformbarkeit und Zähigkeit des Stahles während die spröden Karbiddendriten beides erniedrigen. Auf die Festigkeit dagegen wirken beide Phasen eher negativ. Je nach dem Mengenverhältnis der beiden Phasen und der Belastungsart bzw. Prüfmethode dominiert der eine oder andere Einfluß. Dies ist der Grund für die sehr unterschiedlichen Angaben in der Literatur. Da die Karbiddendriten so gut wie immer die mechanischen Eigenschaften des Stahles verschlechtern, sollten sie durch eine Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren von mindestens 10^3 K/min weitgehend vermieden werden. Der Deltaferrit alleine kann dagegen meist toleriert werden.

6. Literatur

- [1] E.A. Loria, "Influence of Delta-Ferrite-Carbide Segregates on the Properties of 12 % Chromium Steel", Trans. ASM 54 (1961), S. 31 - 49.
- [2] E.A. Loria, Trans. ASM 54 (1961), 705 - 719.
- [3] E. Krainer, H. Scheidl, Radex-Rundschau Heft 3 (1977), S. 246.
- [4] E.A. Little, D.R. Harries, F.B. Pickering, in: Proc. Int. Conf. on Ferritic Steels for Fast Reactor Steam Generators (BNES, London, 1978), S. 136.
- [5] E.A. Little, D.R. Arkell, D.R. Harries, G.R. Lewthwaite, T.M. Williams, in: Proc. Int. Conf. on Irradiation Behaviour of Metallic Materials for Fast Reactor Core Components (CEA, Ajaccio, France, 1979), S. 31.
- [6] R.L. Klueh, P.I. Maziasz, J. Nucl. Mater. 155 - 157, (1987) 602.
- [7] W. Wessling, "Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften der hochwarmfesten Vergütungsstähle mit 12 % Cr". Sie und Wir, Siegen, Bd. 17/1976, S. 4 - 14.

- [8] E. Materna-Morris, "The Development of Dendritic Carbides in a Dual-Phase Martensitic/Ferritic Steel, Scanning Microscopy, Vol. 4, Nr. 2, 1990, 287 - 296.
- [9] K. Anderko, L. Schäfer, E. Materna-Morris, "Effect of the δ -ferrite phase on the impact properties of martensitic chromium steels. Journal of Nuclear Materials, 179 - 181, (1991), 492 - 295.
- [10] E. Materna-Morris, L. Schäfer, K. Anderko, "Der Einfluß der Deltaferritphase auf das Bruchverhalten von 9 - 14 % Chromstählen im instrumentierten Kerbschlagversuch", Sonderbände der Praktischen Metallographie, Bd. 20, Dr. Riederer-Verl. (1989), S. 283 - 294.
- [11] H. Kayano, A. Kimura, M. Narui, Y. Sasaki, Y. Suzuki, S. Ohta, J. Nucl. Mater. 155 - 157 (1988), 978.

7. Danksagung, Nomenklatur, Tabellen, Bilder

Der Autor dankt Herrn Ing. M. Schirra für die Überlassung der Zugproben und Herrn H. Kempe für die Durchführung der Zugversuche und die thermische Behandlung der Kerbschlagproben.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projekts Kernfusion des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt und ist ein von den Europäischen Gemeinschaften geförderter Beitrag im Rahmen des Fusionstechnologieprogramms.

A	[%]	Bruchdehnung
A _g	[%]	Gleichmaßdehnung
A _v		Schlagarbeit
C 831 - C 836		untersuchte Schmelzen
KD		Karbiddendriten
E		Eigenschaft, hier Zugeigenschaft
F _m		Maximalkraft
L		Luftabkühlung
O		Ofenabkühlung
R _m	[MPa]	Zugfestigkeit
R _{p0,2}	[MPa]	0,2 % - Dehngrenze (Streckgrenze)
S _u		Verformung bis zum Sprödbruch

t_{AN}	h	Anlaßzeit
T_{AN}	°C	Anlaßtemperatur
t_{AU}	h	Austenitisierungszeit
T_{AU}	°C	Austenitisierungs (Härtungs-) temperatur
T_p	-	Prüftemperatur
W	-	Wasserabkühlung
$\dot{\epsilon}$	%/min.	Verformungsgeschwindigkeit
Δ	-	Deltaferrit
$\Delta T/\Delta t$	K/min	Abkühlgeschwindigkeit

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der martensitischen Chromstähle mit unterschiedlichem Gehalt an Deltaferrit (und Karbidndriten) in Gew. %.

Charg.-Nr.	C831	C832	C833	C834	C835	C836
C	0.13	0.13	0.13	0.135	0.14	0.14
Si	0.38	0.34	0.34	0.34	0.33	0.30
Mn	0.66	0.65	0.62	0.61	0.60	0.62
P	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006
S	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004
Cr	9.15	10.03	11.03	12.10	13.00	14.00
Ni	0.67	0.65	0.63	0.65	0.64	0.64
Mo	0.61	0.60	0.59	0.59	0.59	0.58
V	0.28	0.28	0.26	0.28	0.26	0.27
Nb	0.18	0.17	0.17	0.19	0.18	0.18
Al	0.075	0.100	0.070	0.097	0.090	0.085
B	0.005	0.005	0.004	0.0046	0.004	0.004
N	0.006	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005
Co	0.005	0.005	0.004	0.004	0.002	0.002
Cu	0.01	0.01	0.014	0.015	0.01	0.014
Ti	0.005	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006
Deltaferrit-Anteil	-	-	0.5 %	5 %	20 %	25 %

Tabelle 2: Kerbschlageigenschaften der martensitischen Chromstähle C831 bis C836 mit unterschiedlichem Gehalt an Deltaferrit.

Stahl-Nr. (Δ -F.)	Proben- kenn- zeichn.	Prüf- Nr.	$\Delta T/\Delta t$ in K/min	T_{AN} in °C	T_p in °C	A_v in J	F_m in kN	S_u in mm
C831	1·	540	15	520	100	36	43,8	1,19
(0 %)	1·W	541	2·10 ⁴	520	100	24	62,0	0,53
	1··	478	15	520	60	21	48,7	0,67
	1··	481	15	520	80	25	38,3	0,99
	1··	562	15	520	100	36		
	1··	485	15	520	120	51	44,0	1,45
	1··	488	15	520	140	64	41,0	1,69
	1··W	542	2·10 ⁴	520	100	29	44,0	1,06
	1···W	537	2·10 ⁴	520	100	27	53,3	0,82
	1···L	535	400	520	100	80 ?	57,6	1,89
	1···O	536	100	520	100	34	45,7	1,08
	1···25	529	25	520	100	36	50,0	1,15
	1···	530	15	520	100	50	48,0	1,48
	1···9	538	9	520	100	54	48,0	1,55
C832	2·	552	15	520	100	40	44,0	1,28
(0 %)	2·W	553	2·10 ⁴	520	100	29	45,6	0,98
	2··	508	15	500	100	51	47,0	1,49
	2··	554	15	520	100	40	47	1,21
	2··	512	15	550	100	64	42,5	1,62
	2··	501	15	580	100	198	26,5	>8,76
	2··	516	15	610	100	248	47,0	>6,2
	2··	520	15	650	100	237	22,3	>21,3
	2··	524	15	700	100	260	27,0	>13,7
	2··	528	15	750	100	282	30,2	>11,8
	2··W	539	2·10 ⁴	520	100	18	64,5	0,47
C833	3·	534	15	520	100	52	48,2	1,45
(0,5 %)	3·W	551	15	520	100	22	75	0,43

Tabelle 2 (Fortsetzung 1): Kerbschlageigenschaften der martensitischen Chromstähle C831 bis C836 mit unterschiedlichem Gehalt an Deltaferrit.

Stahl-Nr. (Δ -F.)	Proben- kenn- zeichn.	Prüf- Nr.	$\Delta T/\Delta t$ in K/min	T_{AN} in °C	T_p in °C	A_v in J	F_m in kN	S_u in mm
C834	4 · · ·	-						
(5 %)	4 · W	531	15	520	100	40	40,6	1,44
	4 · ·	477	15	520	60	25	42,1	0,90
	4 · ·	480	15	520	80	32	40,2	1,08
	4 · ·	560	15	520	100	44		
	4 · ·	483	15	520	120	44	39,5	1,48
	4 · ·	487	15	520	140	54	36,5	1,72
	4 · ·	490	15	520	160	62	38,7	1,77
	4 · · W	561	15	520	100	30		
	4 · · W	484	15	520	120	46	43,0	1,43
	4 · · W	491	15	520	160	50	19,7	2,1
	4 · · ·	506	15	500	100	40	42,8	1,32
	4 · · ·	532	15	520	100	35	43,0	1,15
	4 · · ·	510	15	550	100	40	39,5	1,38
	4 · · ·	502	15	580	100	85	29,0	2,41
	4 · · ·	514	15	610	100	190	32,5	>6,9
	4 · · ·	518	15	650	100	188	22,5	>16,4
	4 · · ·	522	15	700	100	210	21,8	>16,7
	4 · · ·	526	15	750	100	226	21,2	<19,8
	4 · · · W	507	2·10 ⁴	500	100	23	59,9	0,69
	4 · · · W	533	2·10 ⁴	520	100	22	75,8	0,45
	4 · · · W	511	2·10 ⁴	550	100	24	66,3	0,53
	4 · · · W	504	2·10 ⁴	580	100	227	30,1	9,96
	4 · · · W	515	2·10 ⁴	610	100	235	43,5	>6,5
	4 · · · W	519	2·10 ⁴	650	100	205	22,3	>23,2
	4 · · · W	523	2·10 ⁴	700	100	206	21,9	>17
	4 · · · W	527	2·10 ⁴	750	100	223	18,7	15,6

Tabelle 2 (Fortsetzung 2): Kerbschlageigenschaften der martensitischen Chromstähle C831 bis C836 mit unterschiedlichem Gehalt an Deltaferrit.

Stahl-Nr. (Δ -F.)	Proben- kenn- zeichn.	Prüf- Nr.	$\Delta T/\Delta t$ in K/min	T_{AN} in °C	T_p in °C	A_v in J	F_m in kN	S_u in mm
C835	5 ·	550	15	520	100	34	48,8	1,0
(20 %)	5 · W	555	2·10 ⁴	520	100	33	46,5	1,03
	5 · ·	476	15	520	60	19	32,9	0,85
	5 · ·	479	15	520	80	21	39,9	0,79
	5 · ·	559	15	520	100	26		
	5 · ·	482	15	520	120	24	35,4	0,96
	5 · ·	486	15	520	140	31	33,5	1,10
	5 · ·	489	15	520	160	40	35,5	1,23
	5 · · W	556	2·10 ⁴	520	100	51	38,5	1,80
	5 · · ·	505	15	500	100	30	37,0	1,12
	5 · · ·	557	15	520	100		90,2	0,80
	5 · · ·	509	15	550	100	28	39,9	1,01
	5 · · ·	503	15	580	100	53	27,2	1,6
	5 · · ·	513	15	610	100	65	27,7	1,85
	5 · · ·	517	15	650	100	76	23,3	2,28
	5 · · ·	521	15	700	100	154	21,8	>12,7
	5 · · ·	525	15	750	100	180	20,5	7,9
	5 · · · W	558	15	520	100	64	37,0	>2,35
C836	6 ·	543	15	520	100	26	35,1	0,99
(25 %)	6 · · W	546	2·10 ⁴	520	100	52	35,3	1,88
	6 · · L	544	400	520	100	36	45,5	1,13
	6 · · O	545	100	520	100	57	39,5	1,87
	6 · · · 25	548	25	520	100	24	38,8	0,84
	6 · · ·	549	15	520	100	27	43,0	0,86
	6 · · 9	547	9	520	100	34	28,8	1,62

Tabelle 3: Zugeigenschaften der martensitischen Chromstähle C832/5/6 mit und ohne Deltaferrit ($T_p = RT$; $\dot{\epsilon} = 1 \text{ \%}/\text{min}$; $T_{AU} = 1075 \text{ °C}$ 30 min; $t_{AN} = 2 \text{ h}$)

Stahl-Nr. (Δ -Ferr.)	T_{AN} in °C	Abkühlung in			$R_{p0,2}$ in MPA	R_m in MPA	A_g in %	A in %
		Wasser	Luft	Ofen				
C 832 (0 %)	500	W			1328	1329	-	-
	520	"			1137	1332	4,0	16,4
	540	"			1100	1276	3,6	16,1
	560	"			1073	1212	3,7	15,7
	580	"			992	1099	3,5	15,5
	600	"			908	997	3,2	14,8
	750	"			566	707	6,9	21,5
	650			L	829	928	4,6	17,0
	700			"	724	829	5,8	18,4
	500				1048	1382	4,5	15,4
	520			O	1073	1359	4,2	16,4
	540			"	1070	1292	3,5	15,5
	560			"	1009	1173	3,5	15,2
	580			"	891	999	3,7	16,0
	600			"	816	920	4,2	16,5
	750			"	575	711	6,3	21,5
	C 835 (20 %)	520	W			942	1214	5,0
540		"			940	1160	4,8	15,4
560		"			894	1047	4,0	16,3
580		"			856	979	4,2	16,5
650				L	759	877	5,4	17,6
700				"	713	831	5,3	16,8
750				"	587	724	7,4	19,2
500				O	795	1139	6,0	14,3
520				"	851	1111	5,3	14,0
540				"	811	1029	4,6	12,9
560				"	771	935	4,3	14,7

Tabelle 3 (Fortsetzung 1): Zugeigenschaften der martensitischen Chromstähle C832/5/6 mit und ohne Deltaferrit ($T_p = RT$; $\dot{\epsilon} = 1 \text{ \%}/\text{min}$; $T_{AU} = 1075 \text{ °C } 30 \text{ min}$; $t_{AN} = 2 \text{ h}$)

Stahl-Nr. (Δ -Ferr.)	T_{AN} in °C	Abkühlung in			$R_{p0,2}$ in MPA	R_m in MPA	A_g in %	A in %
		Wasser	Luft	Ofen				
C 835 (20 %)	580			O	704	847	4,8	14,8
	600			"	686	831	5,0	15,4
	620			"	677	820	5,1	15,2
	720			"	578	725	6,6	19,5
	750			"	511	678	8,0	21,0
	780			"	396	600	12,7	26,0
C 836 (25 %)	500	W			802	1095	6,0	15,7
	520	"			837	1108	5,7	17,2
	540	"			799	1033	5,3	16,9
	560	"			784	946	4,9	17,0
	580	"			761	899	5,1	17,9
	600	"			725	857	5,0	17,7
	720	"			580	721	6,4	18,1
	750	"			524	675	7,4	20,5
	650		L		670	796	6,0	16,0
	700		"		622	757	7,0	19,2
	750		"		531	677	8,6	20,0
	520			O	599	866	6,3	13,5
	540			"	611	837	6,5	15,6
	560			"	610	790	5,5	14,2
600			"	549	725	6,7	16,4	

Tabelle 4 : Einfluß des Deltaferrit auf die Zugeigenschaften (Proben mit Wasserabschreckung).

Stahl-Nr.	T _{AN} in °C	E _w (Δ) : E _w (-)					
		R _{p0,2}	R _m	A _g	A	R _m · A	R _m · A _g
<u>C 835</u>	520	0,829	0,911	1,250	1,012	0,922	1,14
C 832	540	0,855	0,909	1,333	0,957	0,870	1,21
	560	0,833	0,864	1,081	1,038	0,897	0,934
	580	0,863	0,891	1,200	1,065	0,949	1,069
	600	0,909	0,953	1,406	1,135	1,082	1,34
	650	0,916	0,945	1,174	1,035	0,978	1,11
	700	0,985	1,002	0,914	0,913	0,915	0,916
	750	1,037	1,024	1,072	0,893	0,914	1,098
<u>C 836</u>	500	0,604	0,824	1,500	-	0,824	1,24
C 832	520	0,736	0,832	1,425	1,049	0,873	1,186
	540	0,726	0,810	1,472	1,050	0,851	1,192
	560	0,731	0,781	1,324	1,083	0,846	1,034
	580	0,767	0,818	1,457	1,155	0,945	1,192
	600	0,799	0,860	1,563	1,196	1,029	1,344
	650	0,808	0,858	1,304	0,941	0,807	1,119
	700	0,859	0,913	1,207	1,043	0,952	1,102
	720	0,853	0,913	1,085	0,958	0,875	0,991
	750	0,926	0,955	1,072	0,954	0,911	1,024

Tabelle 5 : Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten auf die Zugeigenschaften (Ofenabkühlung).

Stahl-Nr.	T _{AN} in °C	E _o (Δ + KD) : E _o (-)					
		R _{p0,2}	R _m	A _g	A	R _m · A	R _m · A _g
<u>C 835</u>	500	0,759	0,824	1,333	0,929	0,766	1,098
C 832	520	0,793	0,818	1,262	0,854	0,699	1,032
	540	0,758	0,796	1,314	0,832	0,662	1,046
	560	0,764	0,797	1,229	0,967	0,771	0,980
	580	0,790	0,848	1,297	0,925	0,784	1,10
	600	0,841	0,903	1,190	0,933	0,843	1,075
	620	0,868	0,921	1,133	0,884	0,814	1,043
	750	0,889	0,954	1,270	0,997	0,951	1,212
<u>C 836</u>	520	0,558	0,637	1,500	0,823	0,524	0,9555
C 832	540	0,571	0,648	1,857	1,006	0,652	1,203
	560	0,605	0,674	1,571	0,934	0,630	1,016
	580	0,651	0,761	1,649	0,944	0,718	1,255
	600	0,673	0,788	1,595	0,994	0,783	1,257

Tabelle 6 : Einfluß der Karbidendriten auf die Zugeigenschaften (berechnet).

Stahl-Nr.	T _{AN} in °C	E _o (Δ + KD) : E _o (-) / E _w (Δ) : E _w (-)					
		R _{p0,2}	R _m	A _g	A	R _m · A	R _m · A _g
<u>C 835</u>	520	0,957	0,897	0,971	0,843	0,756	0,871
C 832	540	0,887	0,876	0,986	0,870	0,762	0,864
	560	0,917	0,923	1,136	0,932	0,860	1,049
	580	0,915	0,952	1,081	0,869	0,827	1,029
	600	0,923	0,948	0,846	0,822	0,779	0,802
	750	0,857	0,931	1,184	1,094	1,019	1,102
<u>C 836</u>	520	0,759	0,767	1,052	0,785	0,602	0,807
C 832	540	0,786	0,800	1,261	0,959	0,767	1,009
	560	0,828	0,863	1,186	0,863	0,745	1,024
	580	0,849	0,930	1,132	0,818	0,761	1,053
	600	0,842	0,917	1,021	0,831	0,762	0,936

Tabelle 7: Übersicht über die Wirkung von Deltaferrit und massiven Karbiddendriten einzeln und gemeinsam auf die Festigkeit, Verformbarkeit und Zähigkeit eines martensitischen Chromstahls (+ + = starke Erhöhung; + = Erhöhung; 0 = kein Einfluß; - = Erniedrigung; -- = starke Erniedrigung).

		Deltaferrit	Karbiddendriten	Δ -F. + KD
Festigkeit	F_m	-	+	-
	R_m	-	-	-(-)
	$R_{p0,2}$	--	-	--
Verformbarkeit	S_u	+ +	--	-
	A	+	-(-)	-
	A_g	+ +	+	+ +
Zähigkeit	A_v	+ (+)	--	-(-)
	$A \cdot R_m$	-	-	--
	$A_g \cdot R_m$	+ (+)	0 (-)	+

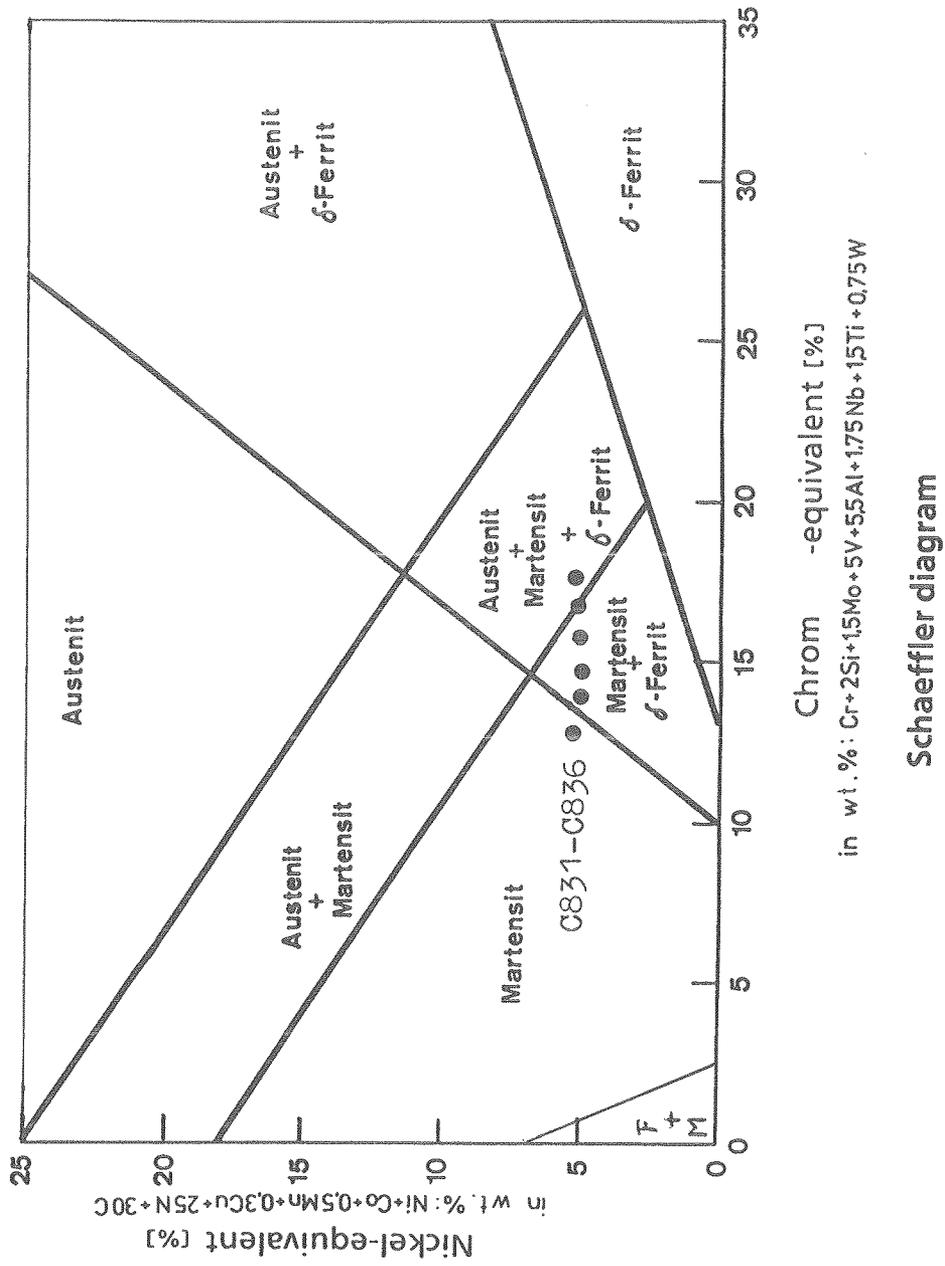
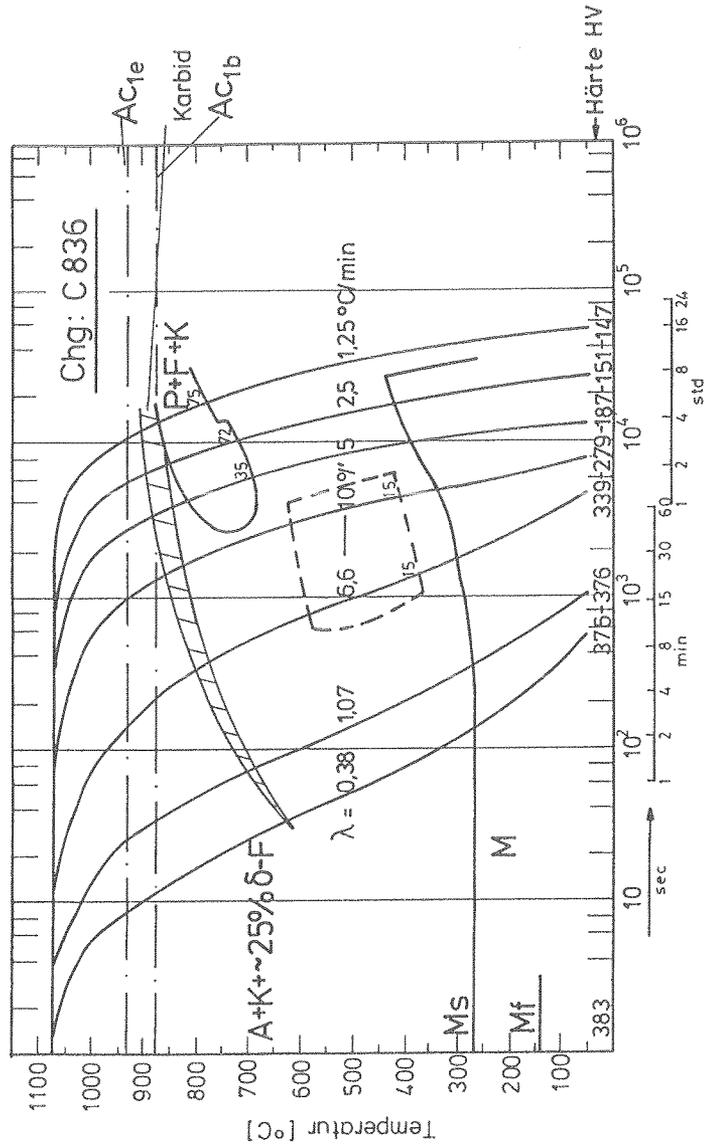


Bild 1: Lage der sechs untersuchten Stähle C 831 - C 836 (von links nach rechts) im Schaeffler Diagramm.



A+K=Bereich des Austenits u. Karbids 1 - 100 = Gefügeanteile in %
 F+K= " der Ferrit-u. Karbidbildung 0,38 - 6,6 = Abkühlungsparameter λ
 P= " " Perlitbildung
 M= " " Martensitbildung

Bild 2: Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU-Diagramm) des martensitischen Chromstahls C 835 mit 20 % Deltaferrit und Karbidendriten.

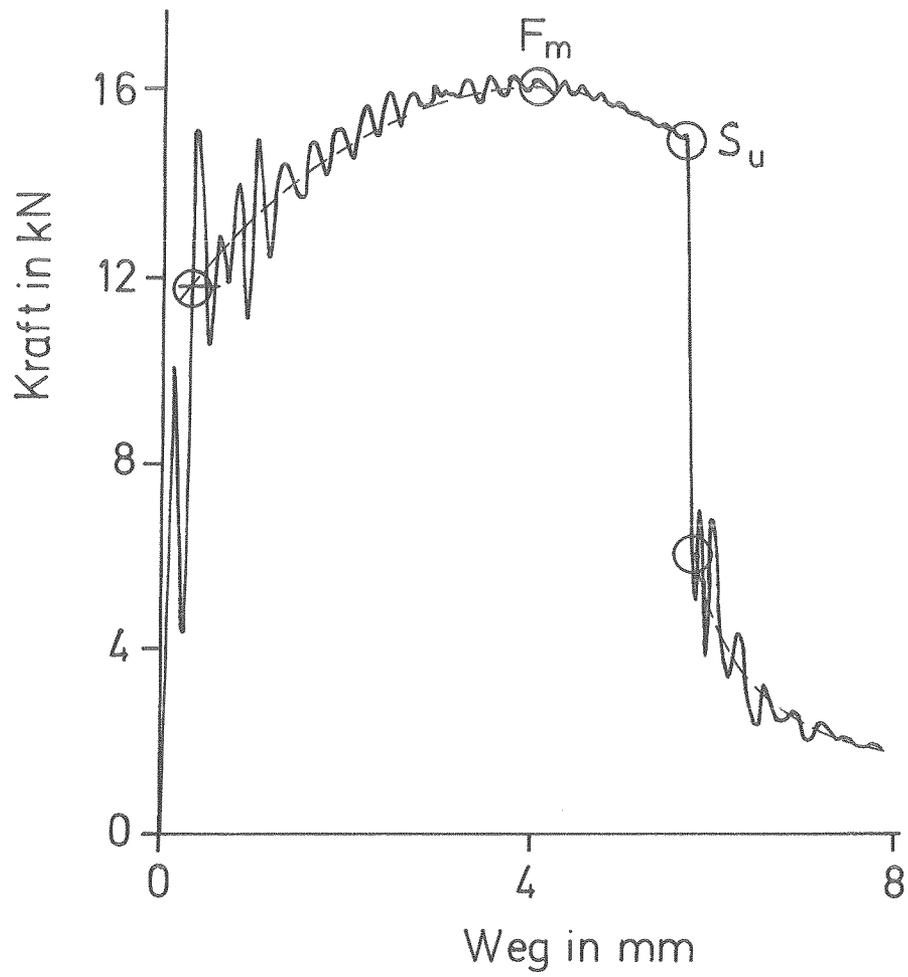


Bild 3: Kraft-Weg-Diagramm aus dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch mit der Maximalkraft F_m und der Verformung bis zum Sprödbruch S_u .

a) ISO-Spitzkerbenprobe (ISO-V)

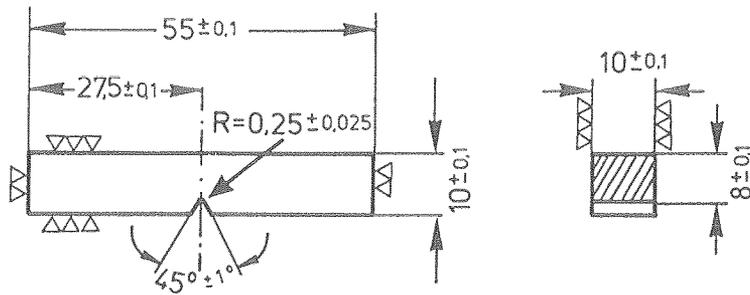
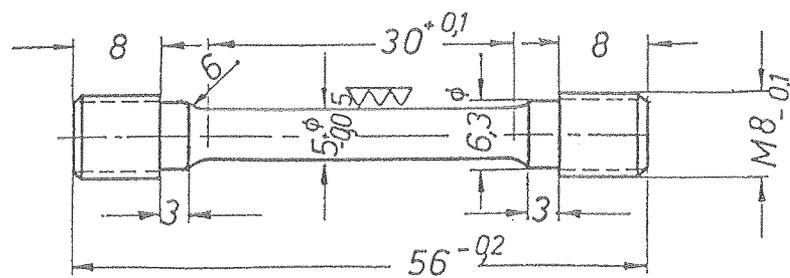
b) Zugprobe 5 \varnothing x 30 mm

Bild 4: Probenformen: a) ISO-Spitzkerbenprobe, b) Zugprobe

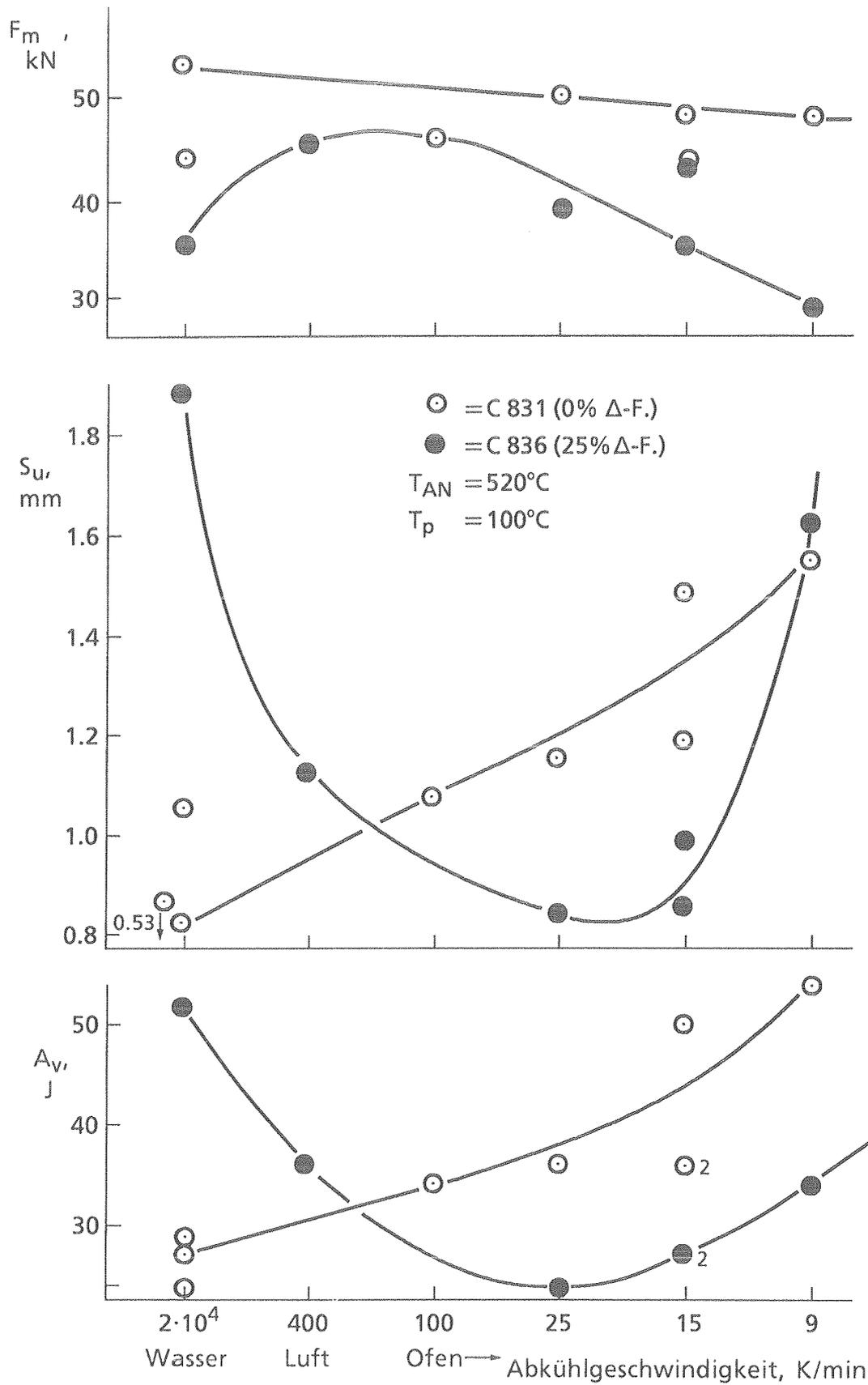


Bild 5: Maximalkraft F_m , Verformung bis zum Sprödbruch S_u und Kerbschlagarbeit A_v der Stähle C 831 und C 836 in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren.

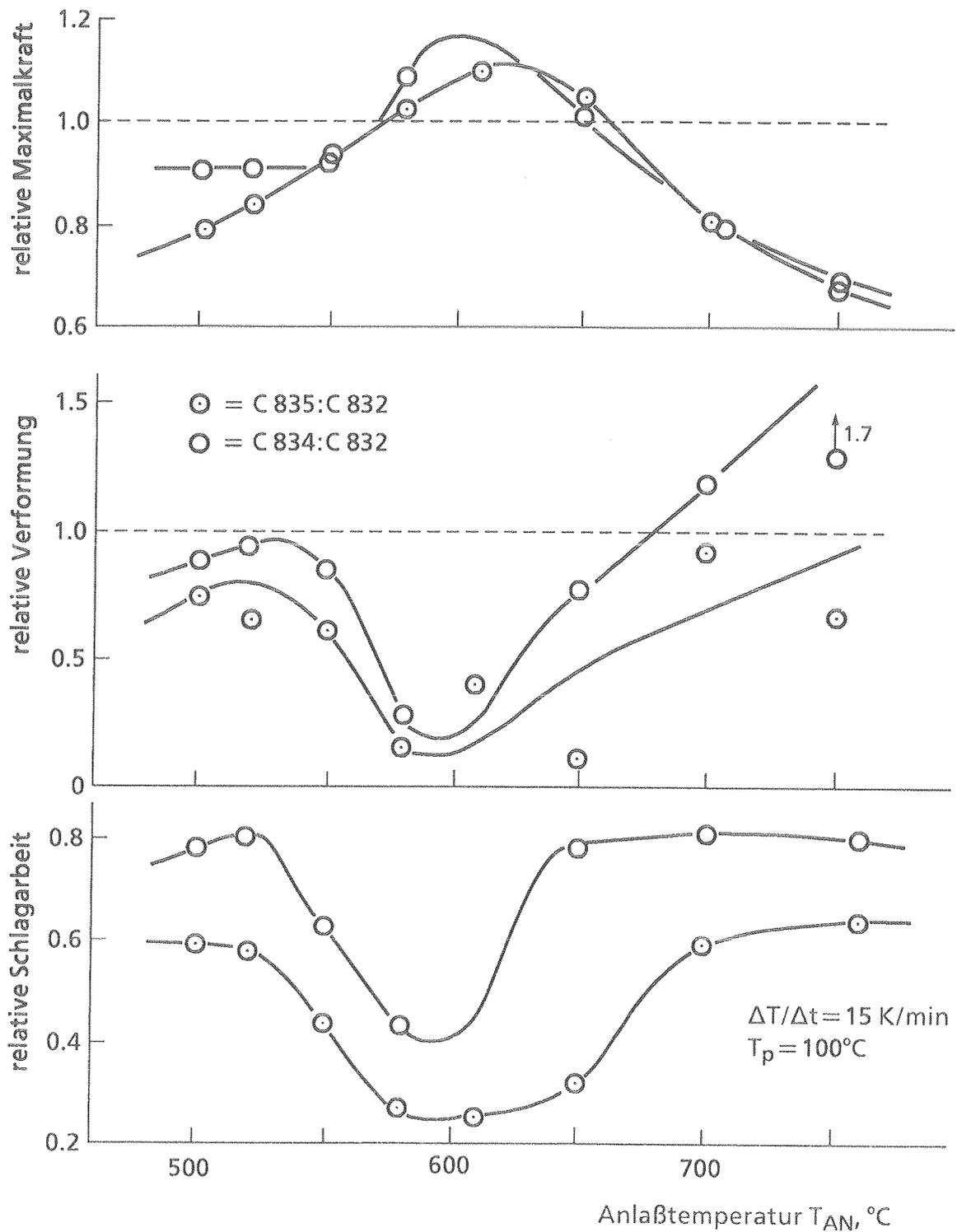


Bild 6: Relative Werte (auf C 832 bezogen) von Maximalkraft, Verformung und Kerbschlagarbeit der Stähle C 834 und C 835 in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur. $T_{AN} = 520^\circ\text{C}$ ist brauchbar.

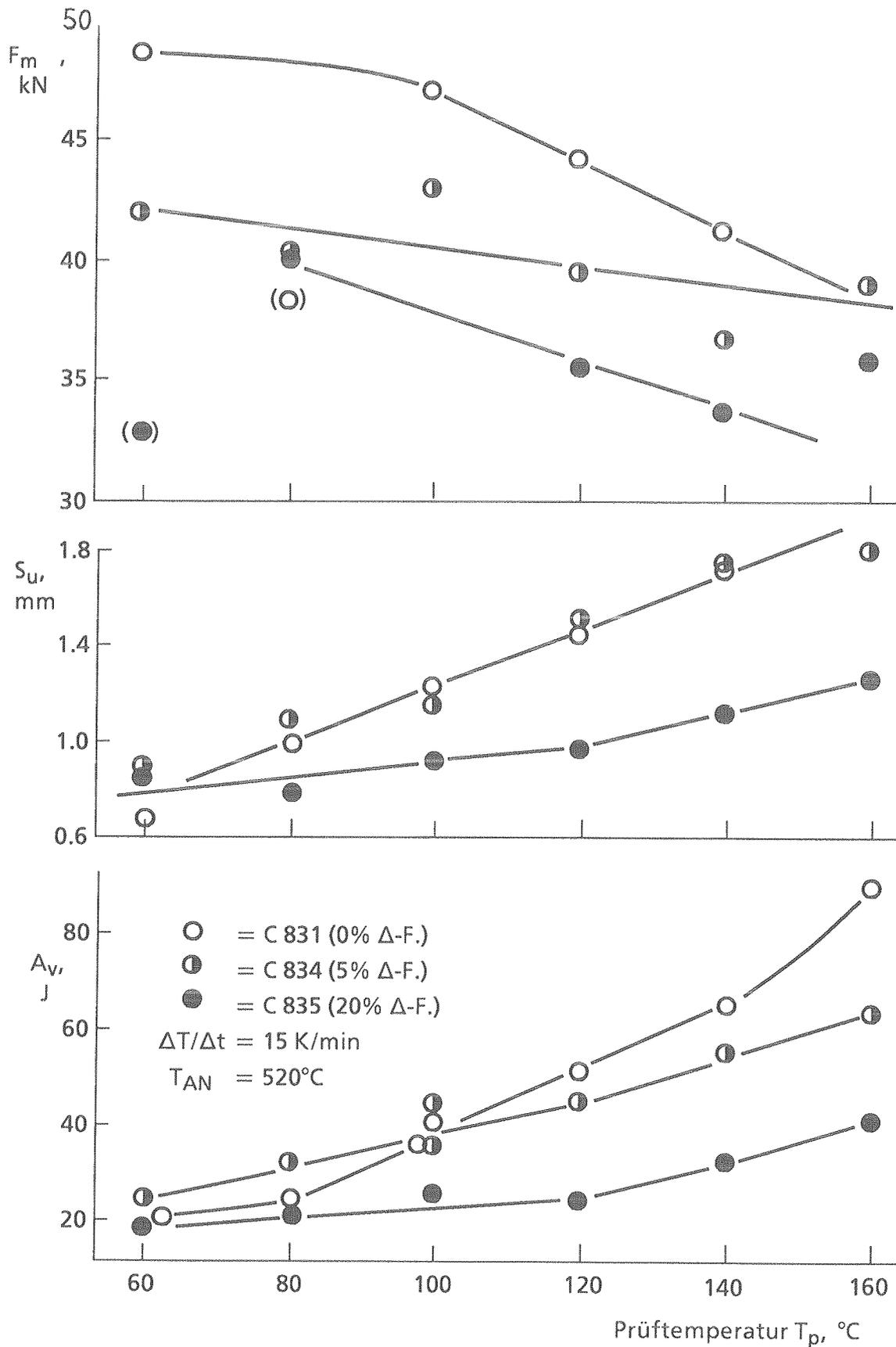


Bild 7: Maximalkraft F_m , Verformung bis zum Sprödbruch S_u und Kerbschlagarbeit A_v der Stähle C 831/4/5 in Abhängigkeit von der Prüf­temperatur. $T_p = 100^\circ\text{C}$ ist brauchbar.

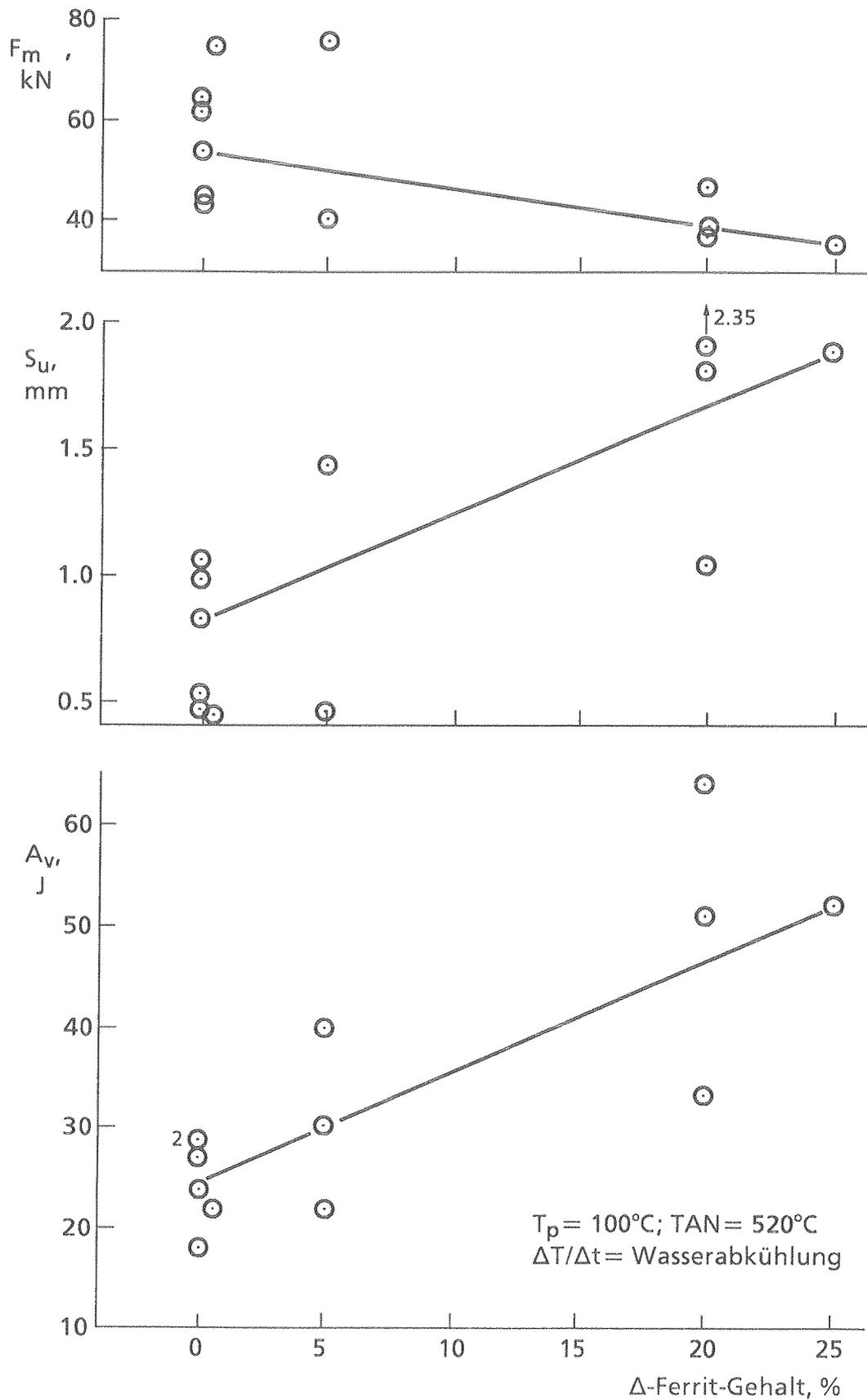


Bild 8: Maximalkraft F_m , Verformung bis zum Sprödbruch S_u und Kerbschlagarbeit A_v für alle wasserabgekühlten Stähle C 831 - C 836 in Abhängigkeit von ihrem Deltaferritgehalt (ohne Karbiddendriten).

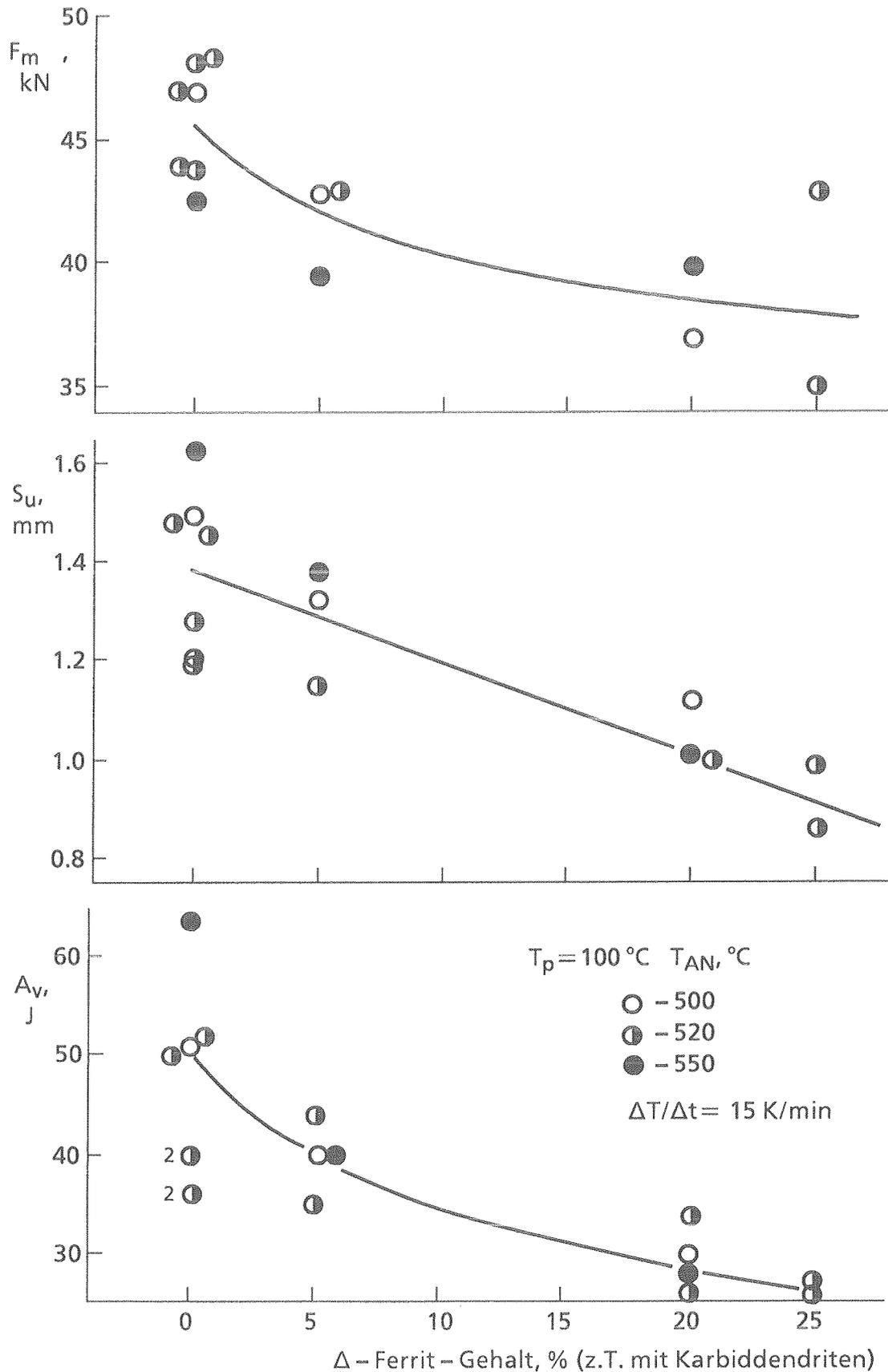


Bild 9: Maximalkraft F_m , Verformung bis zum Sprödbruch S_u und Kerbschlagarbeit A_v für alle mit $\Delta T/\Delta t = 15\text{ K/min}$ ofenabgekühlten Stähle C 831 - C 836 in Abhängigkeit vom Deltaferritgehalt.

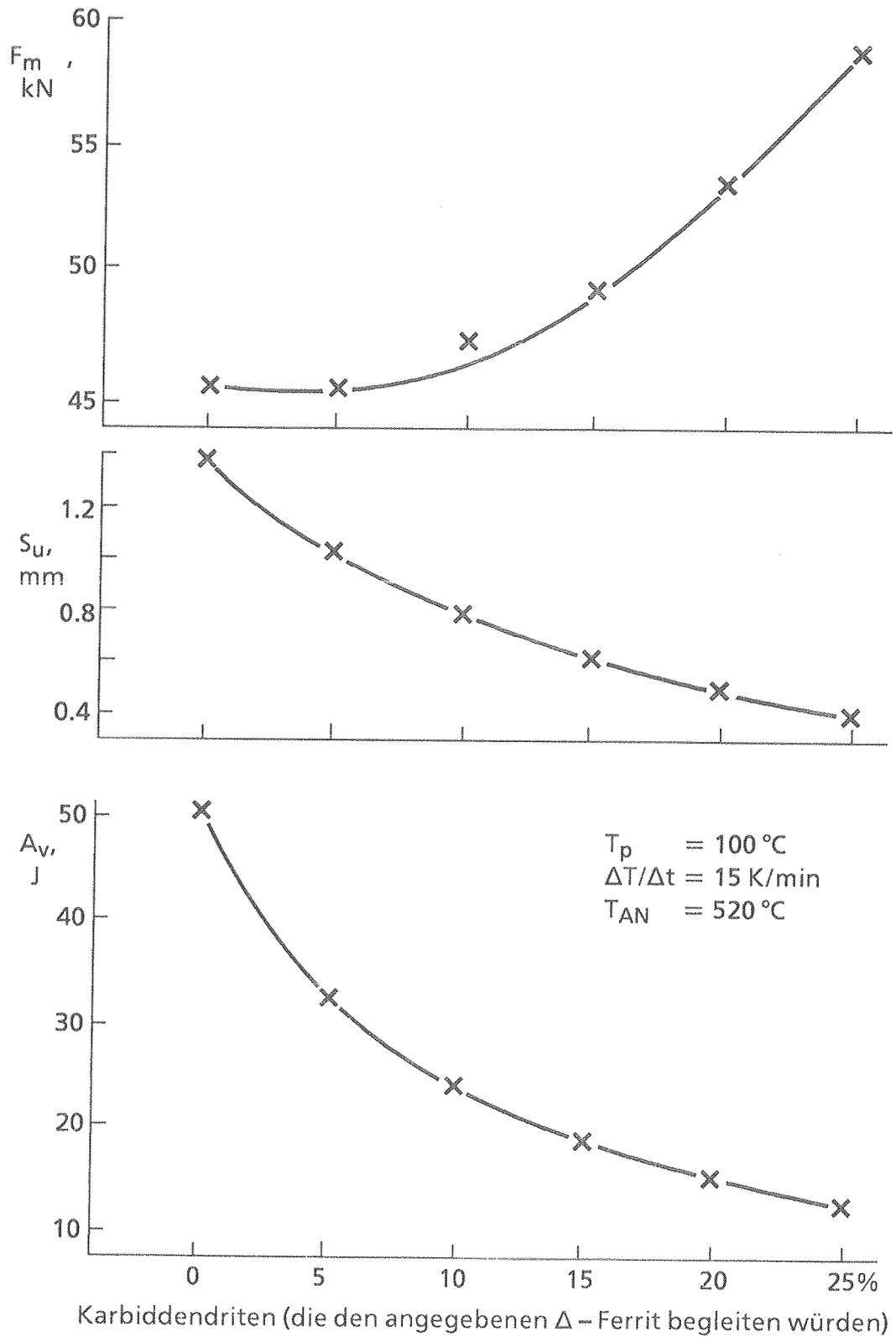


Bild 10: Berechnete Maximalkraft F_m , Verformung bis zum Sprödbruch S_u und Kerbschlagarbeit A_v für Stahl mit den Mengen an Karbidendriten, die zu den angegebenen Mengen an Deltaferrit gehören, wenn die Abkühlgeschwindigkeit $\Delta T/\Delta t = 15\text{ K/min}$ beträgt.

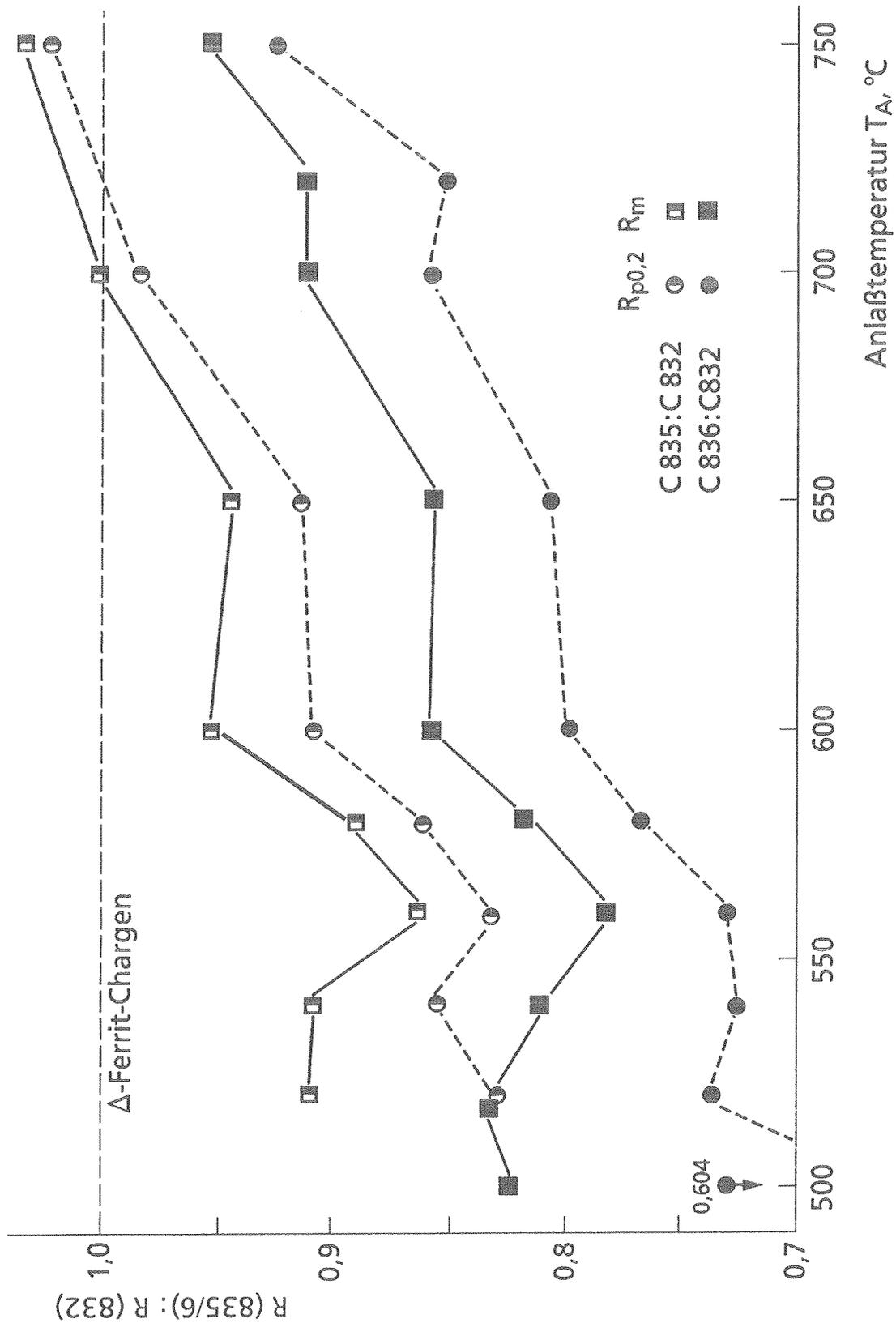


Bild 11: Relative Werte (auf C 832 bezogen) der 0,2 %-Dehngrenze und der Zugfestigkeit der Stähle C 835/6 nach Wasserabkühlung (zur Unterdrückung der Bildung von Karbiddendriten) in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

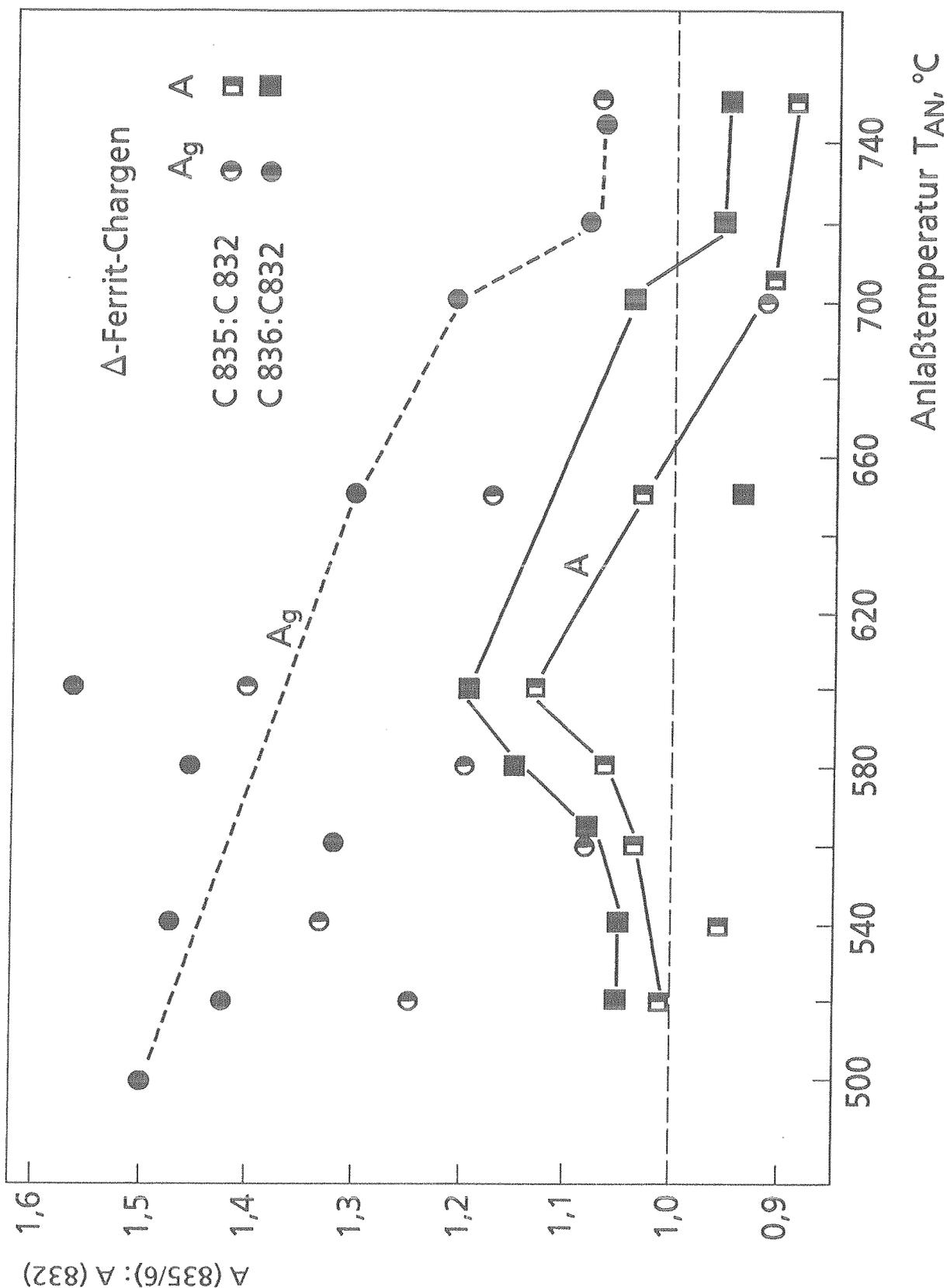


Bild 12: Relative Werte (auf C 832 bezogen) der Gleichmaßdehnung und der Bruchdehnung der Stähle C 835/6 nach Wasserabkühlung (zur Unterdrückung der Bildung von Karbidendriten) in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

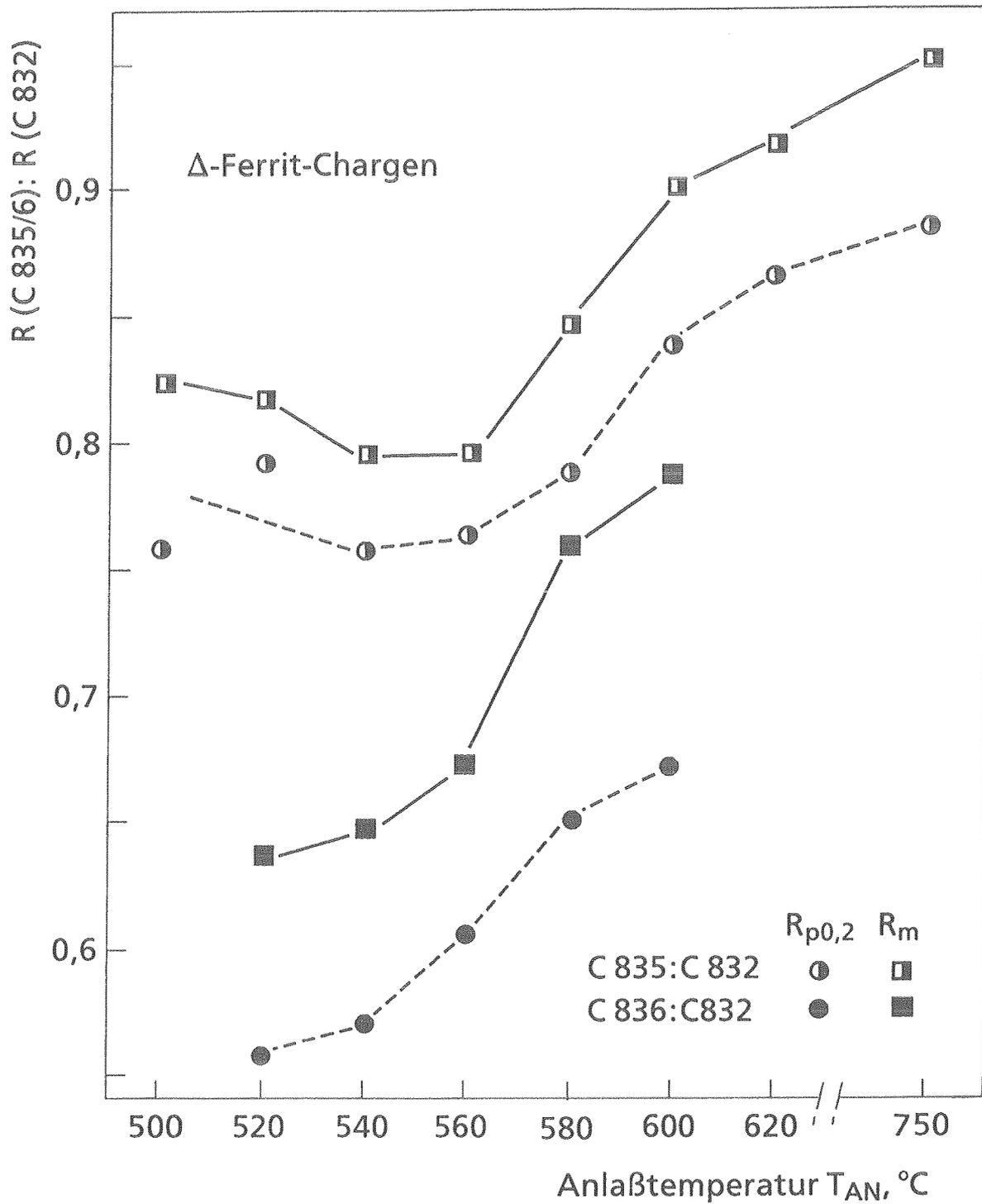


Bild 13: Relative Werte (auf C 832 bezogen) der 0,2 %-Dehngrenze und der Zugfestigkeit der Stähle C 835/6 nach Ofenabkühlung mit 15 K/min (zur Erzeugung von Karbidendriten) in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

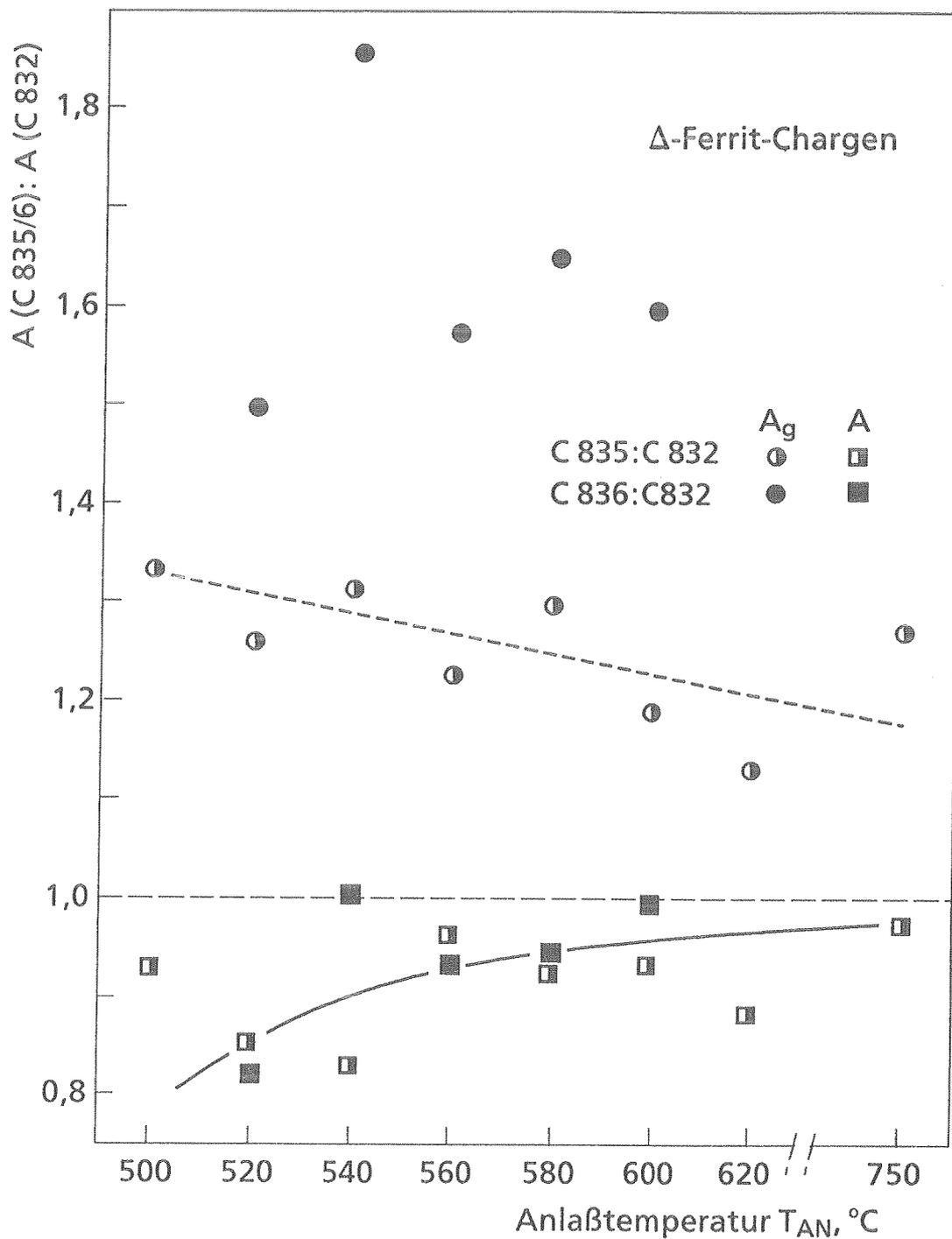


Bild 14: Relative Werte (auf C 832 bezogen) der Gleichmaßdehnung und der Bruchdehnung der Stähle C 835/6 nach Ofenabkühlung mit 15 K/min (zur Erzeugung von Karbiddendriten) in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

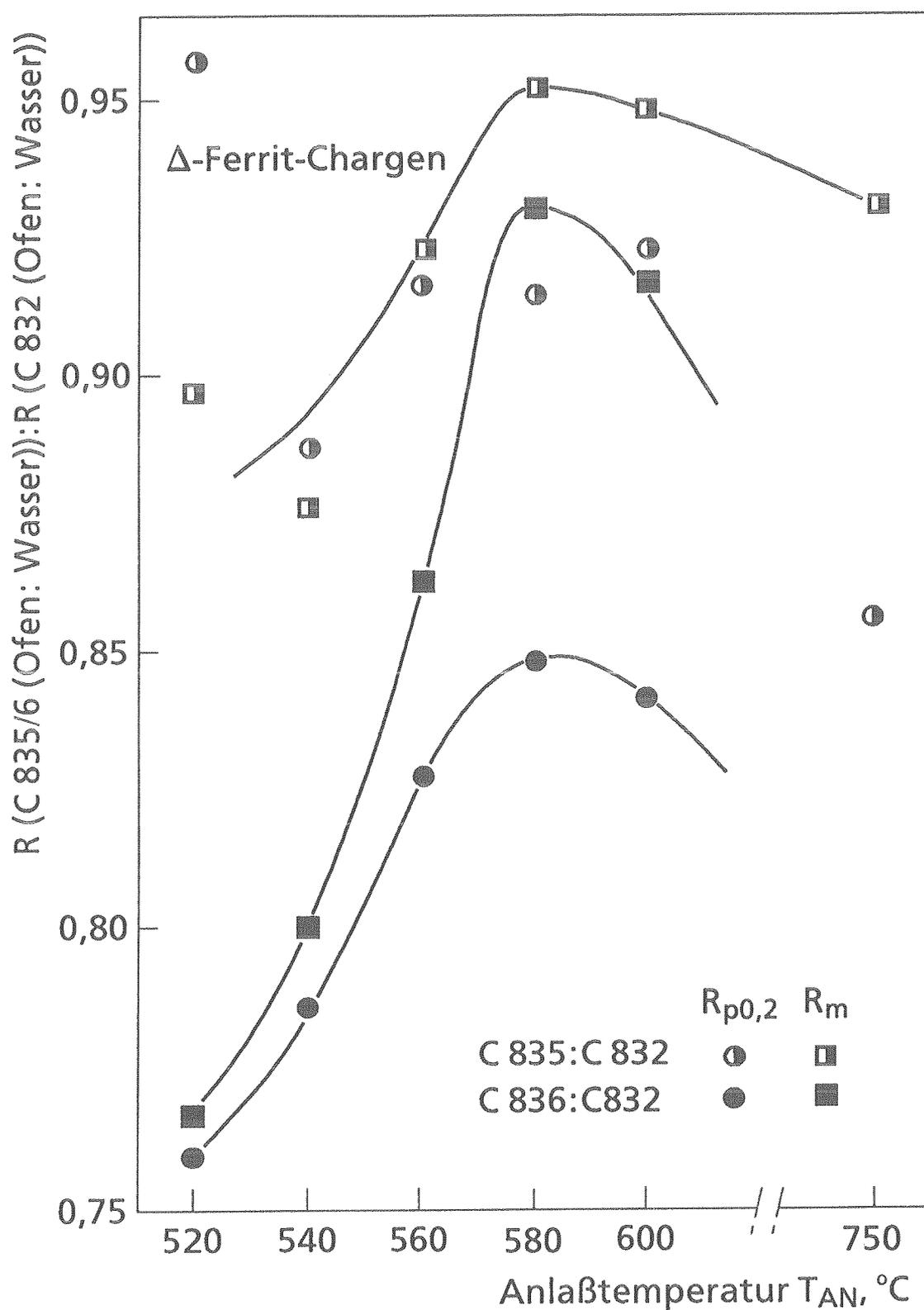


Bild 15: Berechnete relative 0,2 %-Dehngrenze und Zugfestigkeit der Stähle C 835/6 mit ausschließlichem Einfluß der Karbidendriten in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

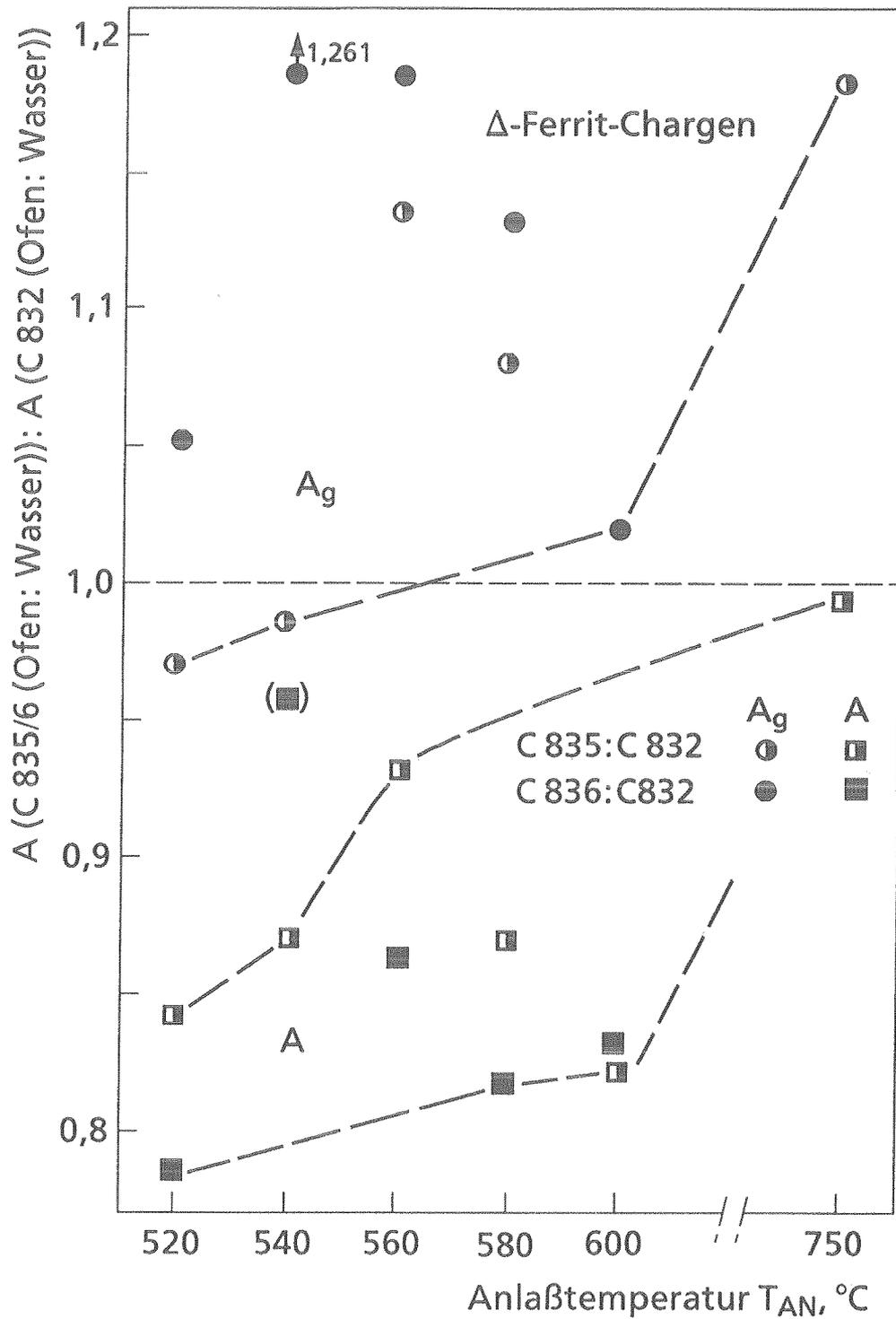


Bild 16: Berechnete relative Gleichmaßdehnung und Bruchdehnung der Stähle C 835/6 mit ausschließlichem Einfluß der Karbidendriten in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

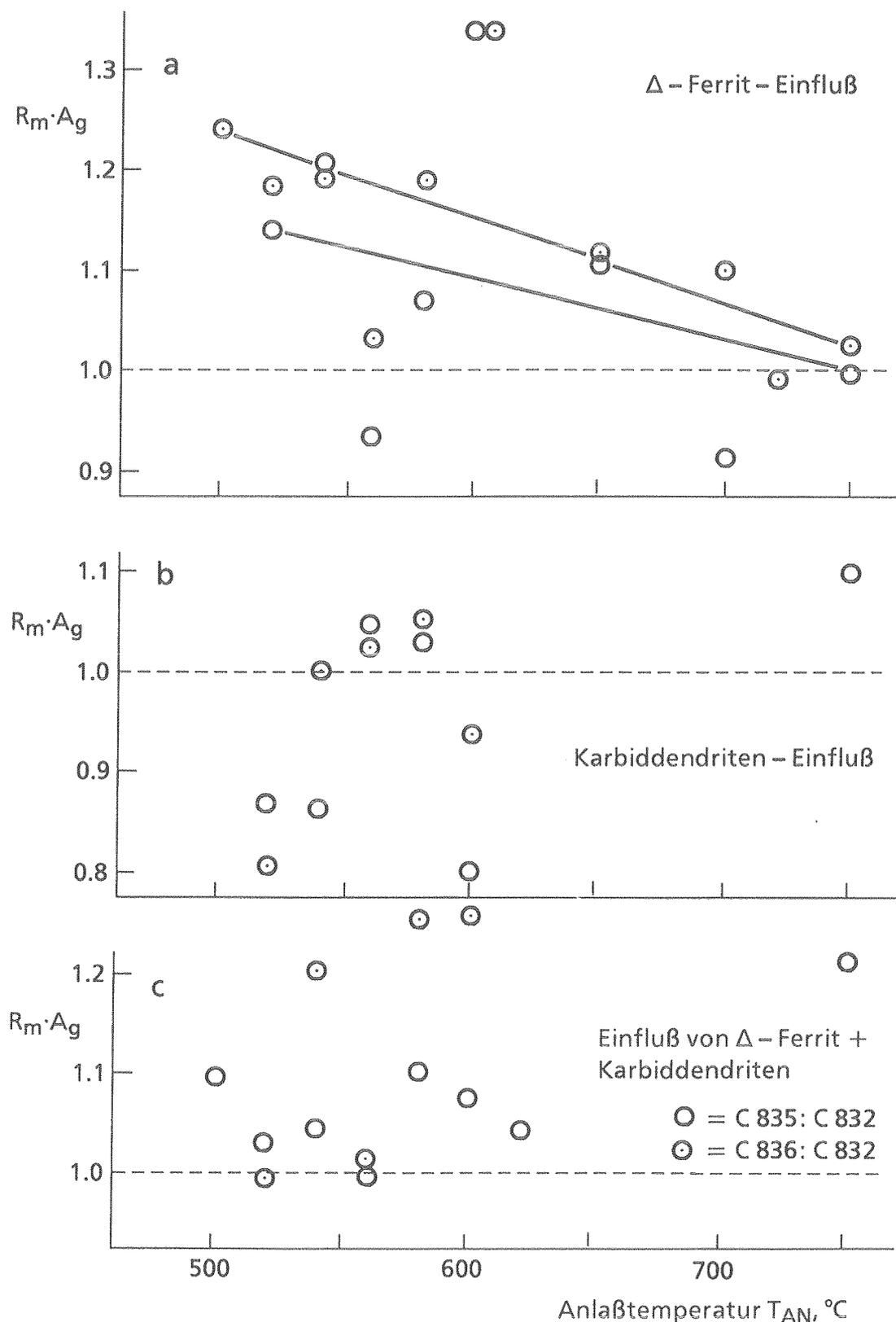


Bild 17: Aus den relativen Werten von Zugfestigkeit mal Gleichmaßdehnung berechnete sogenannte Zähigkeit der Stähle C 835/6 in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur für die Zustände a) wasserabgekühlt mit reinem Deltaferriteinfluß, b) berechnet für reinen Einfluß der Karbiddendriten und c) ofenabgekühlt mit kombiniertem Einfluß von Deltaferrit und Karbiddendriten.

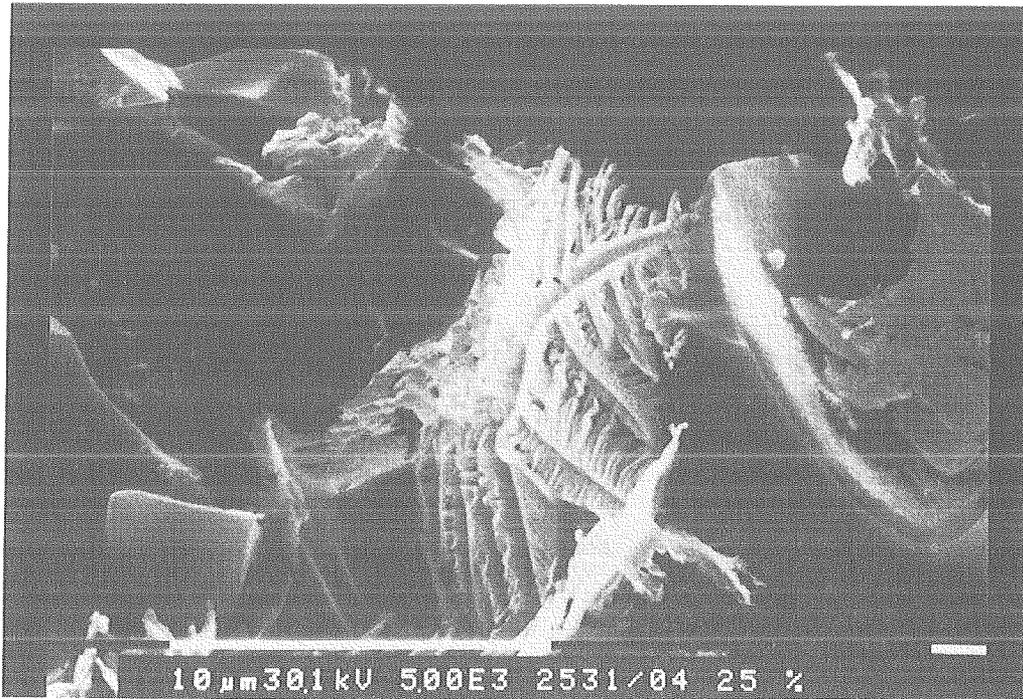


Bild 18: Dendritenstrukturen der $M_{23}C_6$ -Saumkarbide des Deltaferrits beim Stahl C 836. [10]

