



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6551

**Zug- und Kerbschlag-
eigenschaften des Stahles
EUROFER '97
(Vergleich mit OPTIFER)**

L. Schäfer, H. Kempe

Institut für Materialforschung
Projekt Kernfusion

Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM

Dezember 2000

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6551

**Zug- und Kerbschlageigenschaften des Stahles
EUROFER `97 (Vergleich mit OPTIFER)**

L. Schäfer, H. Kempe

Institut für Materialforschung
Projekt Kernfusion

Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2000

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

Kurzfassung

Im Rahmen des Projektes Kernfusion wurde der Stahl EUROFER `97 in der OPTIFER-Reihe entwickelt und als Grosscharge mit hohen Reinheitsanforderungen erschmolzen. Die mechanischen Eigenschaften entsprechen den besseren OPTIFER-Stählen und sind vermutlich noch etwas verbesserungsfähig. Sie können durch Variation der Anlass- und der Austenitierungstemperatur in einem weiten Bereich zwischen hoher Festigkeit und hoher Zähigkeit variiert werden.

Abstract

Tensile and impact bending properties of the steel EUROFER `97 (comparison with OPTIFER)

In the frame of the european fusion technology program the steel EUROFER `97 has been developed following the OPTIFER-steels. It was melted as a large heat with a high demand in purity. The mechanical properties correspond to the improved OPTIFER-steels, but it may be improved. The mechanical properties may be varied in a wide range between high strength and high toughness by varying the austenitizing temperature and the tempering temperature.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Versuchsmaterial	1
3. Versuchsergebnisse	2
3.1 Zugeigenschaften	2
3.2 Kerbschlageigenschaften	2
3.3 Mechanisches Potential	3
3.4 Sonstige Eigenschaften	3
3.5 Entwicklungsmöglichkeiten	3
4. Zusammenfassung	4
5. Literatur, Danksagung, Tabellen, Bilder	4

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes Kernfusion werden niedrigaktivierende martensitische Chromstähle im Institut für Materialforschung (IMF) des Forschungszentrums Karlsruhe seit etwa acht Jahren entwickelt. Sie sollen als Strukturmaterial für die Erste Wand und Blanketteile von Fusionsreaktoren verwendet werden. Nach eingehenden Aktivierungsrechnungen im IMF [1] war der erste Versuch einer solchen Legierung der Stahl CETA, der die Anforderungen aber noch nicht ganz erfüllte [2]. Der zweite Versuch war eine Vorcharge, die wegen ihrer überraschend guten mechanischen Eigenschaften später den Namen OPTIFER-IV erhielt [3,4]. Diese Legierung wurde vielfach variiert, um Verbesserungsmöglichkeiten auszuloten. Dabei entstanden die Varianten OPTIFER-I bis X [5,6,7]. Der Stahl EUROFER `97, über den hier berichtet wird, ist eine Variante, die alle vorliegenden Erfahrungen berücksichtigt und sehr viel weitergehenden Anforderungen bezüglich der radiologisch unerwünschten Verunreinigungen bei industrieller Fertigung stellt. Hier ist auch die sonst übliche Dotierung mit Bor weggelassen worden, um die Hochtemperaturversprödung bei Neutronenbestrahlung zu reduzieren. Die Untersuchung einiger mechanischer Eigenschaften dient hier in erster Linie dazu, deren Abhängigkeit von den Vergütungsparametern herauszufinden und das mechanische Potential des Stahles EUROFER `97 im Vergleich zu zwei anderen OPTIFER-Stählen darzustellen. Nebenbei fallen auch Daten an, die für Auslegungsrechnungen brauchbar sind. Sie sind in den Tabellen enthalten.

2 Versuchsmaterial

Die hier vorgestellten Stähle EUROFER `97 und OPTIFER – IV u. IVc sind martensitische Chromstähle mit Legierungselementen, die eine verminderte Aktivierung nach Neutronenbestrahlung erwarten lassen. Ihre chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 enthalten. Legierungselemente mit einer starken Langzeitaktivierung wie Ni, Mo und Nb wurden eliminiert und teilweise durch solche mit geringerer Langzeitaktivierung wie W u. Ta ersetzt. Die drei Stähle unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Der Stahl EUROFER `97 wurde u.a. als (die hier untersuchte) Charge Nr. 83698 bei Fa. Böhler (Österreich) erschmolzen und gewalzt und mit folgender Vergütung angeliefert: Austenitisieren bei $T_{AU} = 980^{\circ}\text{C}$ 27 min und Anlassen bei $T_{AN} = 760^{\circ}\text{C}$ 1,5 h. Die ursprüngliche Austenitkorngrösse beträgt bis zu einer Austenitisierungstemperatur von 1040°C zwischen 10 und 25 μm [8]. Die Zugversuche wurden mit 6d - Rundzugproben und die Kerbschlagversuche mit 10 x 10 x 55 mm – ISO-V-Proben durchgeführt.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Zugeigenschaften

Die Zugeigenschaften des Stahles EUROFER `97 sind in Tabelle 2 enthalten. Es wurde eingehend der Einfluss der Austenitisierungstemperatur T_{AU} , der Anlasstemperatur T_{AN} und der Prüftemperatur T_P auf die Festigkeit und die Verformbarkeit des Stahles untersucht. In Bild 1 ist die Warmstreckgrenze $R_{p0,2}$ stellvertretend für die Festigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur dargestellt. Man sieht, dass die Festigkeit in einem weiten Bereich durch Variation der Vergütungstemperaturen T_{AU} und T_{AN} variabel ist. Diese Variabilität ist (beispielhaft für eine Prüftemperatur von $T_P = 500^\circ\text{C}$) in Bild 2 in Abhängigkeit von der Austenitisierungstemperatur und der Anlasstemperatur dargestellt. Man sieht, dass mit zunehmender Austenitisierungstemperatur und abnehmender Anlasstemperatur die Warmstreckgrenze zunimmt. Eine ähnliche Abhängigkeit ergibt sich auch für die Zugfestigkeit. Die drei untersuchten Stähle EUROFER `97, OPTIFER-IVc und OPTIFER-IV unterscheiden sich hier nicht signifikant voneinander.

Die Verformbarkeit des Stahles EUROFER `97 ist in Bild 3 und 4 dargestellt. Bild 3 zeigt die Gleichmassdehnung in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, und Bild 4 zeigt die Einschnürdehnung in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Beide Kurvenverläufe sind unterhalb 600°C völlig unterschiedlich. Während die Gleichmassdehnung bei 400°C ein Maximum hat, liegt für die Einschnürdehnung dort ein Minimum. Dieser Vergleich soll darauf hinweisen, dass die Messgrößen für die Verformbarkeit zu sehr unterschiedlichen Masszahlen und Abhängigkeiten führen können. Die Ausleger von Bauteilen wären gut beraten, wenn sie nicht pauschal eine hohe Gleichmassdehnung als Garant für eine gute Verformbarkeit fordern würden. Sehr viel aussagekräftiger ist im allgemeinen nämlich die Einschnürdehnung oder aber eine Dehnung, bei der die Zugfestigkeit ihr Maximum überschritten und beispielsweise um 5 oder 10 % bereits abgenommen hat.

3.2 Kerbschlageigenschaften

Die Ergebnisse der Kerbschlagversuche sind in Tabelle 3 enthalten. Bild 5 zeigt die Schaararbeit A_V des Stahles EUROFER `97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Variiert wurden wie bei den Zugversuchen die Austenitisierungstemperatur und die Anlasstemperatur. Auffallend ist hier, dass mit sehr niedrigen Austenitisierungstemperaturen (900°C) extrem hohe Schlagarbeiten in der Hochlage zu erzielen sind. Die Übergangstemperatur der Schlagarbeit vom spröden zum duktilen Bruch liegt für die günstigeren Vergütungszustände mit $T_{Ü} \approx -80^\circ\text{C}$ nur bei durchschnittlich guten Werten. Da die Schlagarbeit stark von der Vergütung abhängt, ist in Bild 6 die Übergangstemperatur der Schlagarbeit $T_{Ü}$ in Abhängigkeit von der Austenitisierungstemperatur dargestellt, wobei zusätzlich die Anlasstemperatur variiert wurde. Man erkennt, dass die Übergangstemperatur umso besser, d.h. niedriger ist, je niedriger die Austenitisierungstemperatur und je höher die Anlasstemperatur gewählt wurden. Dies gilt für alle untersuchten Stähle. Allerdings kann festgestellt werden, dass die Wirksamkeit der Anlasstemperatur schon bei $T_{AN} = 750^\circ\text{C}$ ihr Maximum erreicht und $T_{AN} = 770^\circ\text{C}$ keinen zusätzlichen Effekt hat, Bild 6 zeigt zudem, dass die besten Übergangstemperaturen der Stähle OPTIFER günstiger liegen als die von EUROFER `97.

3.3 Mechanisches Potential

Wenn repräsentative Masszahlen zur Festigkeit und zur Verformbarkeit eines Werkstoffes zur Verfügung stehen, kann man etwas über dessen Potential an mechanischen Eigenschaften aussagen oder zumindestens auf dieser Ebene einen Vergleich zu ähnlichen Werkstoffen ziehen. Aus dieser Arbeit wären dazu die Zugfestigkeit, die Warmstreckgrenze, die Einschnürung, evtl. die Bruchdehnung und die Übergangstemperatur der Schlagarbeit geeignet. Die höchste Relevanz für diese Stahlsorte und die geplante Anwendung als Strukturmaterial der Ersten Wand und des Blankets von Fusionsreaktoren haben wohl die Warmstreckgrenzen als Mass für die Festigkeit und die Übergangstemperatur der Schlagarbeit als Mass für die Duktilität. In Bild 7 bilden sie die Abszisse und die Ordinate einer grafischen Darstellung, die zeigt in welchem Bereich von Festigkeit (hier $R_{p0,2}$) und Duktilität (hier $T_{\dot{U}}$) durch Variation der Vergütungstemperaturen der Stahl einstellbar ist. Je niedriger die Übergangstemperatur und gleichzeitig höher die Warmstreckgrenze sind, desto höher ist das Potential der mechanischen Eigenschaften dieses Stahles. Sieht man von den drei Wertepaaren mit $T_{AN} = 770^{\circ}\text{C}$ ab, so liegen die Bereiche der Stähle EUROFER `97 und OPTIFER-IVc aufeinander wobei OPTIFER-IVc die tieferen Übergangstemperaturen aufweist, während OPTIFER-IV deutlich das höchste mechanische Potential hat. Ob diese Überlegenheit auch nach Neutronenbestrahlung noch existiert ist eher fraglich.

3.4 Sonstige Eigenschaften

Bei der Herstellung von Komponenten des Fusionsreaktors ist es vorgesehen, verschiedene Bauteile durch Diffusionsschweissen herzustellen. Die Haltbarkeit der Komponenten hängt dadurch oft von der Qualität der Schweissnähte ab, wodurch die Schweissbarkeit zu einer wichtigen Materialeigenschaft wird. Es ist bereits gelungen, durch Diffusionsschweissen eine Schweissnaht herzustellen, die die gleichen Zugeigenschaften hat wie der Grundwerkstoff [9]. Dagegen sind die Kerbschlageigenschaften der Schweissnaht generell schlechter als die des Grundwerkstoffes. Eigene Untersuchungen [9] verschiedener martensitischer Chromstähle ergaben (gemessen an der Kerbschlagzähigkeit) folgende Reihenfolge mit zunehmend guter Schweissbarkeit: MANET-II, F82H mod., OPTIFER-IV und EUROFER `97. In den besten Fällen beträgt beim Stahl OPTIFER-IV die Kerbschlagzähigkeit der Schweissnaht etwa 70 % von der des Grundwerkstoffes, und beim Stahl EUROFER `97 sind es einmal ~ 70 % und in einem anderen Experiment nahezu 100 % [9].

Eine weitere nicht zu unterschätzende Werkstoffeigenschaft ist die Wärmeleitfähigkeit. Hierzu sei nur angemerkt, dass beim Übergang von 8,5 % auf 9,5 % Cr (Gew. %) die Wärmeleitfähigkeit um 10 % abnimmt, die Korrosionsresistenz dagegen zunimmt.

3.5 Entwicklungsmöglichkeiten

Im gegenwärtigen Stand der Untersuchungen fehlen noch Ergebnisse aus Bestrahlungsversuchen, um eine abschliessende Bewertung des Stahles EUROFER `97 vornehmen und individuelle Weiterentwicklungen vorschlagen zu können. Daher können vorläufig nur allgemeine Vermutungen ausgesprochen werden, wo wahrscheinlich noch Entwicklungsmöglichkeiten liegen:

a) Bezüglich der chemischen Zusammensetzung:

1. Beschränkung des Cr-Gehaltes auf 8,0 – 8,4 % (wegen Wärmeleitfähigkeit)
2. Erhöhung des W-Gehaltes auf 1,2 – 1,4 % (wegen Warmfestigkeit)
3. Beschränkung des Ta-Gehaltes auf 1,0 – 1,2 % (wegen Primärkarbiden)
4. Erhöhung des N-Gehaltes auf 0,04 % (Ziel: VNC-Ausscheidung)

Es sollte mit etwa 3 Laborschmelzen herausgefunden werden, wieviel Phosphor der Stahl verträgt, ohne zu verspröden. Wenn dies deutlich mehr als die bisherige Verunreinigungsmenge ist, könnten Phosphide als Heliumfallen erprobt werden. Wenn dies erfolgreich ist, könnte der Stahl auch wieder höher mit Bor legiert werden, was seinen mechanischen Eigenschaften insbesondere im unbestrahlten Zustand zugute kommt.

b) Bezüglich der mechanisch-thermischen Behandlung:

Wegen der enormen Bedeutung einer möglichst geringen Austenit-Korngrösse, sollte auf niedrige Schmiedetemperaturen geachtet werden und zusätzlich erprobt werden, ob eine sogenannte Austenitformhärtung durchführbar und effektiv ist.

4 Zusammenfassung

Gemessen an den bisher untersuchten Stählen der OPTIFER-Entwicklungsreihe [7] zeigt der Stahl EUROFER `97 ein durchschnittlich gutes Potential für mechanische Eigenschaften, wobei die ganz tiefen Übergangstemperaturen der Schlagarbeit ($T_{\dot{\sigma}} < - 80^{\circ}\text{C}$) nur schwierig einstellbar sind. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich in einem weiten Bereich variieren, wobei wie üblich im allgemeinen hohe Anlasstemperaturen und niedere Austenisierungstemperaturen die Zähigkeit verbessern, während umgekehrt die Festigkeit erhöht wird. Obwohl zur Charakterisierung des Stahles EUROFER `97 noch die Daten aus Bestrahlungsversuchen fehlen, lässt sich schon ungefähr abschätzen, dass in der chemischen Zusammensetzung und der mechanisch-thermischen Behandlung noch ein gewisses Entwicklungspotential steckt, das auch für etwas höhere Warmfestigkeiten genutzt werden könnte.

5 Literatur, Danksagung, Tabellen, Bilder

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projektes Kernfusion des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt und ist ein von der Europäischen Gemeinschaft geförderter Beitrag zum Fusionstechnologieprogramm.

Literatur

- [1] S. Cierjacks and J. Hino: J. Nucl. Mater. 170 (1990) 134.
- [2] K. Anderko et al.: CETA, ein Entwicklungsschritt zu einem schwach aktivierbaren martensitischen Chromstahl. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5060 (1993).
- [3] L. Schäfer, H. Kempe: Metallkundliche und mechanische Untersuchungen an dem schwach aktivierbaren martensitischen Chromstahl OPTIFER-IV, Chg. 986489. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5353 (1994).
- [4] L. Schäfer: OPTIFER-IV, a martensitic 9% Cr-steel with high impact toughness. Fusion Technology 1994 (SOFT 1994). Eds. K. Herschbach, W. Maurer and J.E. Vetter, pp. 1293 – 1296.
- [5] L. Schäfer, M. Schirra, K. Ehrlich: Mechanical properties of low activating martensitic 8 – 10 % Cr-WV Ta steels of type OPTIFER. J. Nucl. Mater. 233 – 237 (1996) 264 – 269.
- [6] M. Schirra et al.: OPTIFER, ein weiterer Schritt zur Entwicklung niedrigaktivierender martensitischer Stähle. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5624 (1995).
- [7] L. Schäfer: Tensile and impact behaviour of the reduced-activation steels OPTIFER and F82H mod., J. Nucl. Mater.: in Vorbereitung 2000.
- [8] R. Lindau und M. Schirra: Erste Ergebnisse zur Charakterisierung einer Grosscharge des niedrigaktivierbaren ferritisch-martensitischen Stahls EUROFER `97. Jahrestagung Kerntechnik `00, Bonn, KTG u. Deutsches Atomforum e.V., Tagungsbericht, INFORUM-Verl. Bonn (2000) S. 613 – 616.
- [9] L. Schäfer, H. Kempe: Mechanische Eigenschaften von Diffusionsschweisverbindungen martensitischer Chromstähle, Forschungszentrum Karlsruhe T.u. U. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6459 (2000)

Bildunterschriften:

Bild 1: Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Stahles EUROFER `97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Durch Variation der Austenitisierungs- und Anlasstemperatur werden unterschiedliche Festigkeiten erzeugt.

Bild 2: Abhängigkeit der Warmstreckgrenze $R_{p0,2}$ (500°C) der Stähle EUROFER `97, OPTIFER-IV und IVc von der Austenitisierungstemperatur T_{AU} und der Anlasstemperatur T_{AN} . Mit zunehmender Austenitisierungstemperatur und abnehmender Anlasstemperatur nimmt die Festigkeit zu.

Bild 3: Gleichmassdehnung A_g des Stahles EUROFER `97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Bei $T_p \leq 400^\circ\text{C}$ liegt ein Maximum.

Bild 4: Einschnürdehnung Z des Stahles EUROFER `97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Bei $T_p \leq 400^\circ\text{C}$ liegt ein Minimum.

Bild 5: Schlagarbeit A_V des Stahles EUROFER `97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Durch Variation der Austenitisierungstemperatur T_{AU} und der Anlasstemperatur T_{AN} können z.T. extrem hohe Schlagarbeiten ($A_V \approx 300 \text{ J}$) mit guten Übergangstemperaturen um -80°C erzeugt werden.

Bild 6: Abhängigkeit der Übergangstemperatur der Schlagarbeit $T_{\ddot{U}}$ der Stähle EUROFER `97, OPTIFER-IV und IVc von der Austenitisierungstemperatur T_{AU} und der Anlasstemperatur T_{AN} . Mit zunehmender Anlasstemperatur und abnehmender Austenitisierungstemperatur wird die Übergangstemperatur verbessert.

Bild 7: Abhängigkeit der Übergangstemperatur der Schlagarbeit $T_{\ddot{U}}$ der Stähle EUROFER `97, OPTIFER-IV und IVc von der Warmstreckgrenze $R_{p0,2}$ (500°C). Die Streufelder geben an, in welchem Bereich beliebige Kombinationen von $T_{\ddot{U}}$ und $R_{p0,2}$ (500°C) durch bestimmte Austenitisierungs- und Anlasstemperaturen eingestellt werden können. Die höchste Festigkeit und Zähigkeit liefert der Stahl OPTIFER-IV. EUROFER `97 zeigt ein gutes Mittelmaß.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung in Gew. %.

Stahl Charge	EUROFER `97 E 83698	OPTIFER-IV 986489	OPTIFER-IVc 986778
Cr	8,87	8,5	9,05
W	1,09	1,16	1,00
Mn	0,48	0,6	0,52
V	0,20	0,23	0,25
Ta	0,14	0,1	0,09
C	0,12	0,11	0,13
N	0,02	0,06	-
B	<0,001	0,003	-

Tabelle 2: Zugeigenschaften des Stahles EUROFER '97; Chg. 83698

T _{AU} °C	T _{AN} °C	T _P °C	KE- Nr.	R _{P0,2} MPa	R _M MPa	A _g %	A %	Z %
900	700	400	1082	525	568	2,1	13,2	76,9
900	700	500	1083	471	485	1,2	17,6	87,0
900	700	600	1084	292	312	0,8	35,4	95,5
900	730	400	1085	426	483	3,4	15,4	79,5
900	730	500	1086	376	402	1,7	20,4	89,0
900	730	600	1087	257	272	1,2	33,5	95,3
900	750	23	1088	480	606	7,3	21,5	81,5
900	750	250	1089	416	509	4,8	16,7	84,6
900	750	400	1090	390	460	4,9	17,7	82,0
900	750	450	1091	385	434	2,8	19,9	84,3
900	750	500	1092	361	389	1,4	23,8	92,2
900	750	550	1093	309	324	0,6	29,8	92,6
900	750	600	1094	256	267	1,0	32,7	95,6
900	750	650	1095	179	194	1,9	34,0	97,2
900	750	700	1096	109	134	2,5	56,2	98,2
900	770	400	1097	367	445	5,3	18,1	86,3
900	770	500	1118	325	362	2,5	24,5	90,0
900	770	600	1119	241	254	0,9	32,3	95,1
950	700	400	1120	569	618	1,8	12,4	76,9
950	700	500	1121	498	522	1,1	20,3	84,9
950	700	600	1122	332	355	1,0	28,0	92,4
950	730	400	1123	457	512	2,4	13,2	82,0
950	730	500	1124	401	428	1,1	17,7	87,3
950	730	600	1125	283	295	1,0	25,5	94,2
950	750	25	1126	510	638	6,4	18,9	80,1
950	750	250	1127	467	551	3,3	14,3	80,6
950	750	400	1128	428	491	3,4	14,7	79,5
950	750	450	1129	409	461	2,2	18,2	81,2
950	750	500	1130	385	414	1,5	20,6	88,4
950	750	550	1131	330	346	1,3	23,9	91,9
950	750	600	1132	265	280	0,9	29,7	95,8
950	750	650	1133	190	211	1,9	32,9	96,3
950	750	700	1134	127	153	2,9	37,2	97,5
950	770	400	1135	402	475	4,9	17,2	80,6
950	770	500	1136	355	388	2,5	21,1	87,7
950	770	600	1137	255	271	1,0	30,8	94,9
980	760	25	1047	529	660	5,5	16,5	75,0
980	760	250	1048	473	556	2,9	13,3	77,7
980	760	400	1049	438	500	2,6	13,5	82,3
980	760	450	1050	422	466	2,1	15,3	82,6
980	760	500	1051	385	420	1,3	25,3	85,6
980	760	550	1052	339	360	1,1	21,2	92,4
980	760	600	1053	270	288	0,8	25,5	96,3
980	760	650	1054	192	217	1,6	30,5	96,9
980	760	700	1055	131	159	3,0	35,3	97,9
1000	700	400	1145	593	639	2,2	12,4	74,4
1000	700	500	1146	506	528	0,9	18,7	86,1
1000	700	600	1147	354	369	1,1	26,9	91,4
1000	730	400	1148	473	527	2,2	12,3	75,7
1000	730	500	1149	427	451	1,2	19,5	89,1
1000	730	600	1150	292	306	0,7	32,3	93,8

Tabelle 2, Fortsetzung 1: Zugeigenschaften EUROFER `97.

1000	750	400	1151	430	497	3,4	15,0	76,7
1000	750	500	1152	379	411	1,5	21,4	89,8
1000	750	600	1153	270	281	0,65	27,3	95,1
1000	770	400	1154	399	475	4,5	16,2	80,6
1000	770	500	1155	358	394	1,7	27,3	89,1
1000	770	600	1156	257	274	0,9	29,1	94,9
1050	730	400	1157	508	556	1,9	12,9	81,2
1050	730	500	1158	441	464	1,0	19,3	87,7
1050	730	600	1159	302	317	1,3	26,9	91,9
1050	750	400	1160	443	504	3,1	14,8	78,9
1050	750	500	1161	391	421	1,3	19,2	88,7
1050	750	600	1162	270	282	1,0	34,2	95,2
1050	770	400	1163	403	476	4,6	16,4	83,7
1050	770	500	1164	354	391	1,7	21,8	87,6
1050	770	600	1165	255	273	0,9	30,0	94,2

Tabelle 3: Kerbschlagarbeit A_V des Stahles EUROFER `97, Chg. 83698, in den Zuständen:
Anlieferzustand AZ bzw. AZ + 1075°C 0,5 h + 750°C 2h

T_{AU} °C	T_{AN} °C	T_P °C	A_V J		T_{AU} °C	T_{AN} °C	T_P °C	A_V J
980	760	-100	12		1075	750	-80	15
980	760	-80	75		1075	750	-70	15
980	760	-60	156		1075	750	-60	21
980	760	-40	189		1075	750	-55	168
980	760	-30	207		1075	750	-50	171
980	760	-20	246		1075	750	-40	183
980	760	-20	192		1075	750	-20	204
980	760	-10	243		1075	750	0	234
980	760	0	240		1075	750	+23	255
980	760	+23	240		1075	750	+40	264
980	760	+40	255		1075	750	+60	273
980	760	+60	246		1075	750		
Anlieferzustand AZ + 1075°C + 750°C								

Tabelle 3, Fortsetzung 1: Kerbschlagarbeit A_V des Stahles EUROFER `97, Chg. 83698, in verschiedenen Anlasszuständen bei $T_{AU} = 900^\circ\text{C}$

T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J		T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J
900	700	-80	18		900	730	-100	15
900	700	-60	144		900	730	-80	189
900	700	-40	192		900	730	-60	210
900	700	-30	261		900	730	-40	270
900	700	-20	279		900	730	-20	285
900	700	0	273		900	730	+23	294
900	700	+23	255		900	730	+60	300
900	700	+60	261		900	730		
900	750	-100	21		900	770	-100	18
900	750	-80	192		900	770	-80	222
900	750	-60	219		900	770	-60	300
900	750	-40	279		900	770	-40	309
900	750	-20	297		900	770	-20	306
900	750	0	312		900	770	0	300
900	750	+23	300		900	770	+23	303
900	750	+60	300		900	770	+60	327

Tabelle 3, Fortsetzung 2: Kerbschlagarbeit A_V des Stahls EUROFER `97, Chg. 83698, in verschiedenen Anlasszuständen bei $T_{AU} = 950^\circ\text{C}$

T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J		T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J
950	700	-70	12		950	730	-80	24
950	700	-60	51		950	730	-60	183
950	700	-40	102		950	730	-50	174
950	700	-20	186		950	730	-40	273
950	700	-10	177		950	730	-20	264
950	700	0	231		950	730	0	258
950	700	+23	231		950	730	+23	252
950	700	+60	228		950	730	+60	240
950	750	-100	15		950	770	-90	15
950	750	-80	159		950	770	-80	114
950	750	-60	180		950	770	-60	192
950	750	-40	210		950	770	-40	264
950	750	-20	246		950	770	-20	261
950	750	0	252		950	770	0	261
950	750	+23	267		950	770	+23	261
950	750	+60	261		950	770	+60	267

Tabelle 3, Fortsetzung 3: Kerbschlagarbeit A_V des Stahls EUROFER '97, Chg. 83698, in verschiedenen Anlasszuständen bei $T_{AU} = 1000^\circ\text{C}$

T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J		T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J
1000	700	-60	18		1000	730	-80	30
1000	700	-50	39		1000	730	-60	117
1000	700	-40	141		1000	730	-40	195
1000	700	-20	177		1000	730	-30	231
1000	700	0	192		1000	730	-20	240
1000	700	+23	216		1000	730	0	237
1000	700	+60	213		1000	730	+23	231
					1000	730	+40	246
					1000	730	+60	246
1000	750	-100	15		1000	770	-80	75
1000	750	-80	117		1000	770	-60	174
1000	750	-60	168		1000	770	-40	225
1000	750	-40	237		1000	770	-20	231
1000	750	-20	240		1000	770	0	252
1000	750	0	243		1000	770	0	225
1000	750	+23	261		1000	770	+23	231
1000	750	+60	258		1000	770	+23	216
					1000	770	+40	219
					1000	770	+60	216

Tabelle 3, Fortsetzung 4: Kerbschlagarbeit A_V des Stahls EUROFER '97, Chg. 83698, in verschiedenen Anlasszuständen bei $T_{AU} = 1050^\circ\text{C}$.

T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J		T_{AU} $^\circ\text{C}$	T_{AN} $^\circ\text{C}$	T_P $^\circ\text{C}$	A_V J
					1050	730	-80	15
					1050	730	-60	153
					1050	730	-40	177
					1050	730	-30	225
					1050	730	-10	225
					1050	730	0	249
					1050	730	+10	228
					1050	730	+23	234
					1050	730	+40	249
					1050	730	+60	249
1050	750	-90	33		1050	770	-100	12
1050	750	-80	105		1050	770	-90	69
1050	750	-60	180		1050	770	-80	102
1050	750	-40	213		1050	770	-60	177
1050	750	-20	261		1050	770	-50	198
1050	750	-20	243		1050	770	-40	246
1050	750	0	240		1050	770	-20	261
1050	750	0	249		1050	770	0	270
1050	750	+23	270		1050	770	+23	279
1050	750	+60	252		1050	770	+60	270

Tabelle 4: Warmstreckgrenze und Übergangstemperatur der Schlagarbeit der Stähle EUROFER `97, OPTIFER-IV und IVc.

		EUROFER `97		OPTIFER-IV/IVc	
T _{AU} °C	T _{AN} °C	R _{PO,2} (500°C) MPa	T _Ü °C	R _{PO,2} (500°C) MPa	T _Ü °C
860	750			380/-	-123/-
900	700	471	-62	456/431	-97/-68
900	670			536/	-70/-
900	730	376	-82	408/379	-109/-93
900	750	361	-82	389/351	-111/-105
900	770	325	-83	-	-
950	670			572/-	-60/-
950	700	498	-37	512/467	-73/-51
950	730	401	-65	410/383	-101/(-74)
950	750	385	-81	394/351	-102/-96
950	770	355	-79	-	-
980	760	385	-70	-	-
1000	700	506	-42	546/549	-60/-30
1000	730	427	-59	451/	-87/-56
1000	750	379	-74	~400/407	-96/-78
1000	770	358	-72	-	-
1050	700			581/-	-20/-
1050	730	441	-65	502/-	-50/-
1050	750	391	-72	435/-	-81/-
1050	770	354	-72	-	-
1075	750		-57	-	-/-58

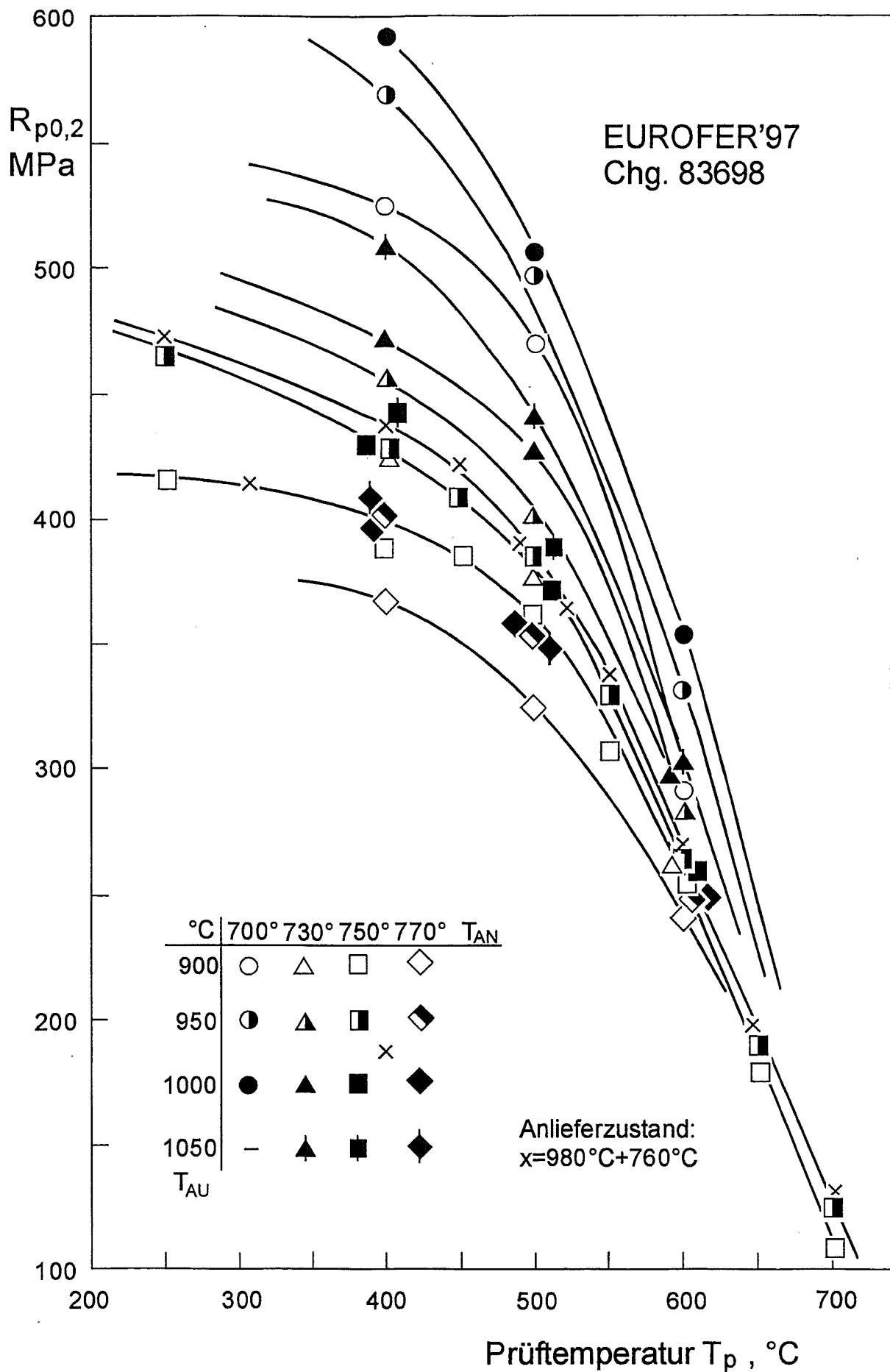


Bild 1: Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Stahles EUROFER '97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Durch Variation der Austenitisierungs- und Anlasstemperatur werden unterschiedliche Festigkeiten erzeugt.

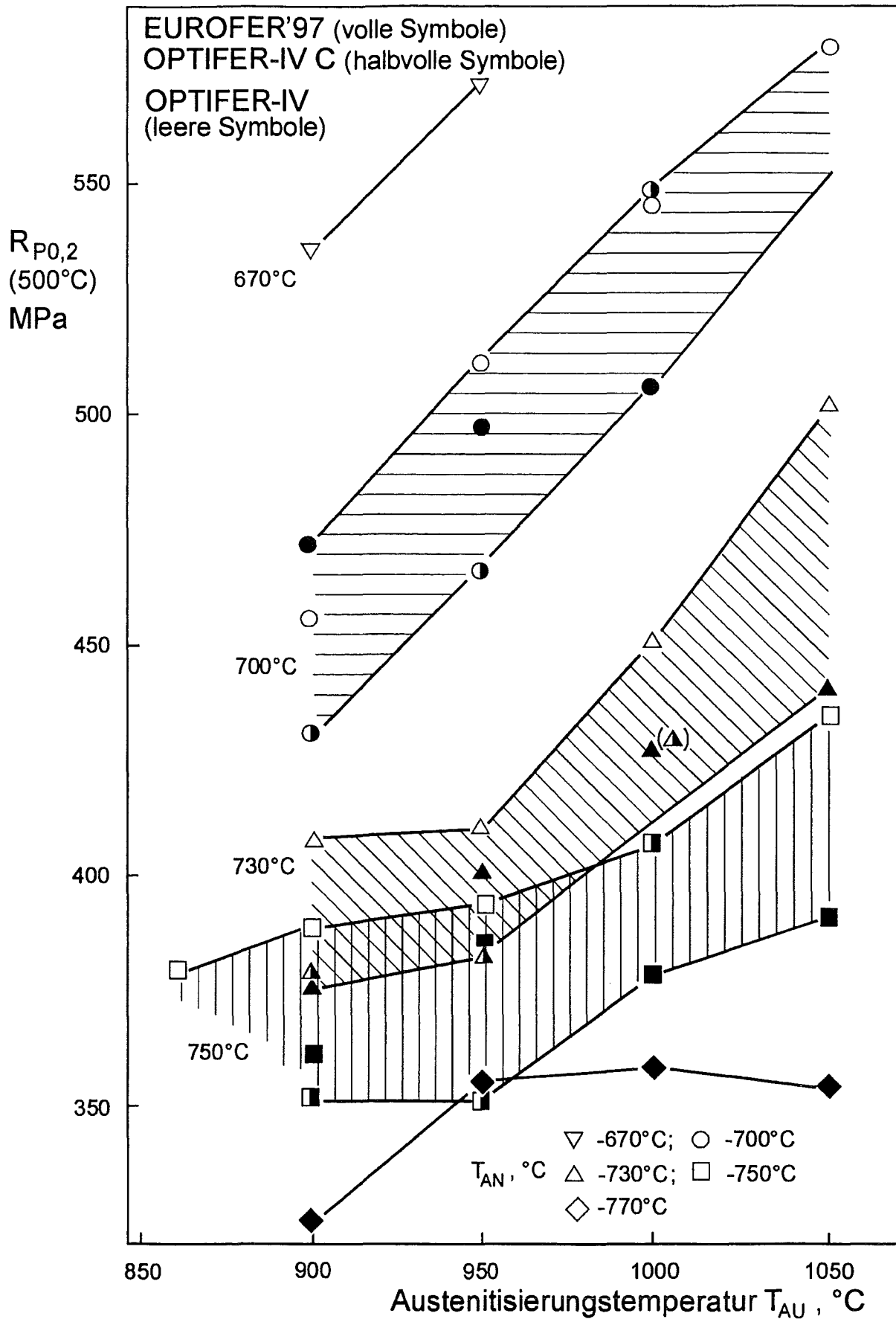


Bild 2: Abhängigkeit der Warmstreckgrenze $R_{p0,2}$ (500°C) der Stähle EUROFER '97, OPTIFER-IV und IVc von der Austenitisierungstemperatur T_{AU} und der Anlasstemperatur T_{AN} . Mit zunehmender Austenitisierungstemperatur und abnehmender Anlasstemperatur nimmt die Festigkeit zu.

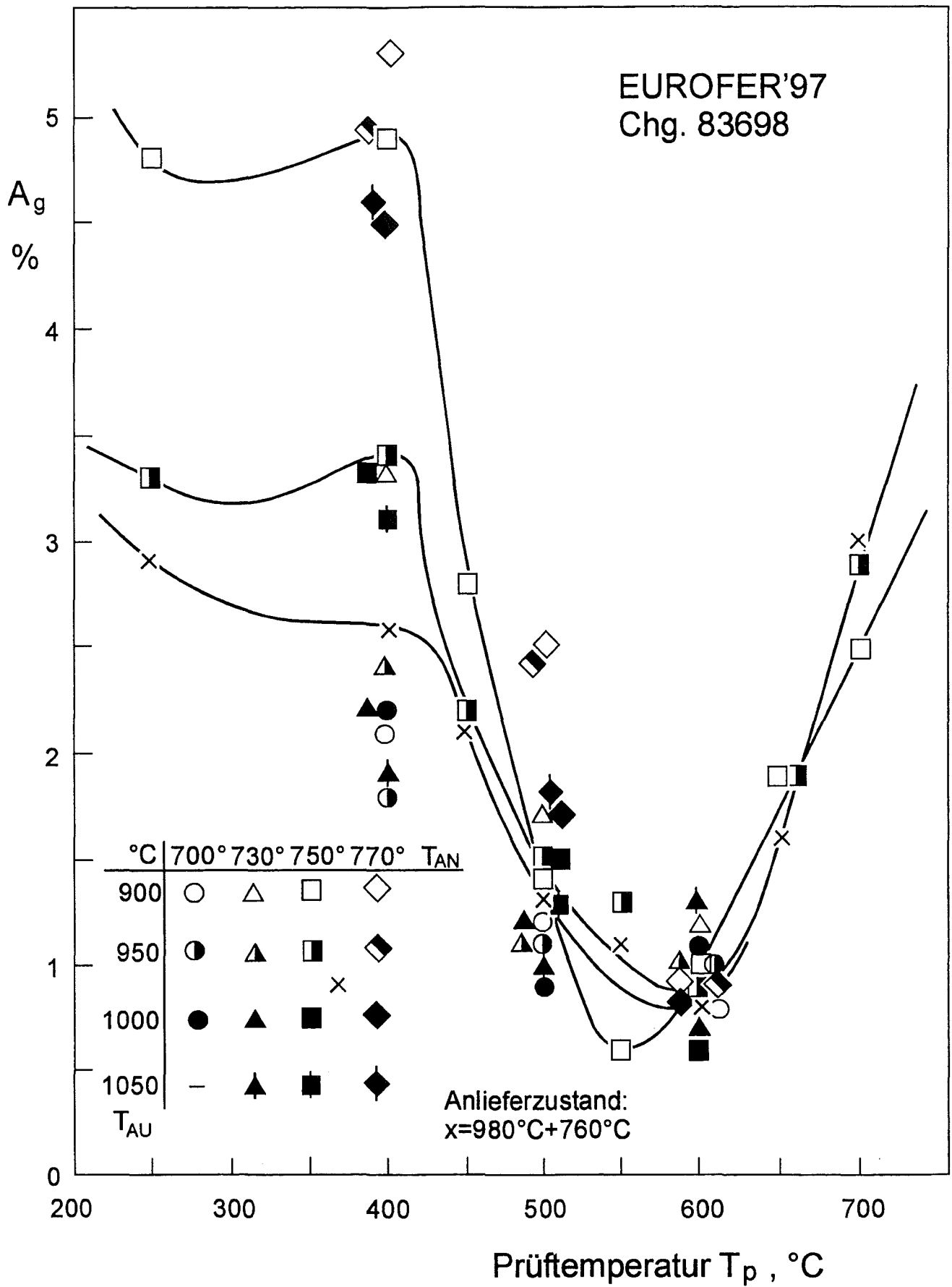


Bild 3: Gleichmassdehnung A_g des Stahles EUROFER '97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Bei $T_p \leq 400^\circ\text{C}$ liegt ein Maximum.

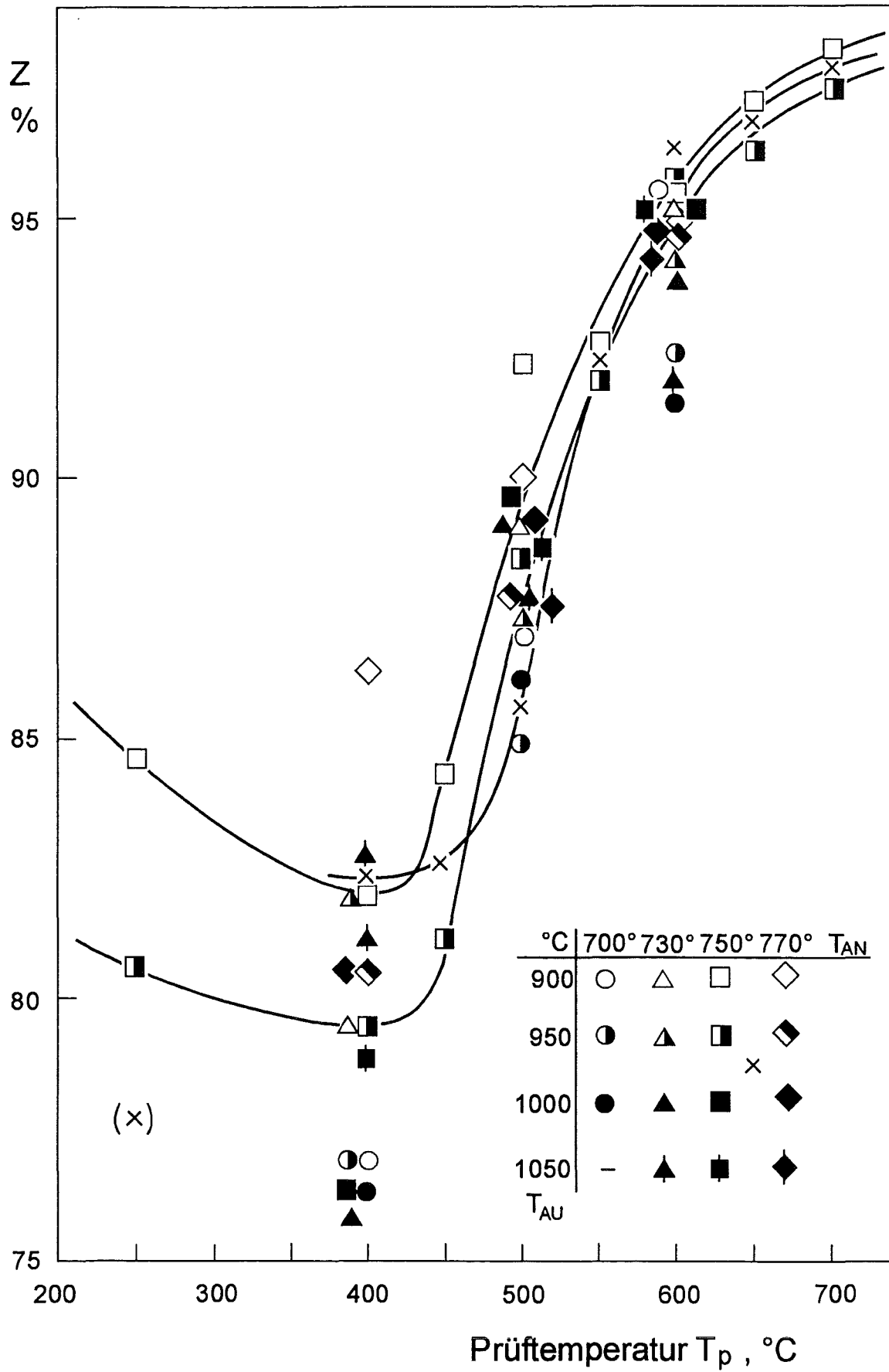


Bild 4: Einschnürdehnung Z des Stahles EUROFER '97 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Bei $T_p \leq 400^\circ\text{C}$ liegt ein Minimum.

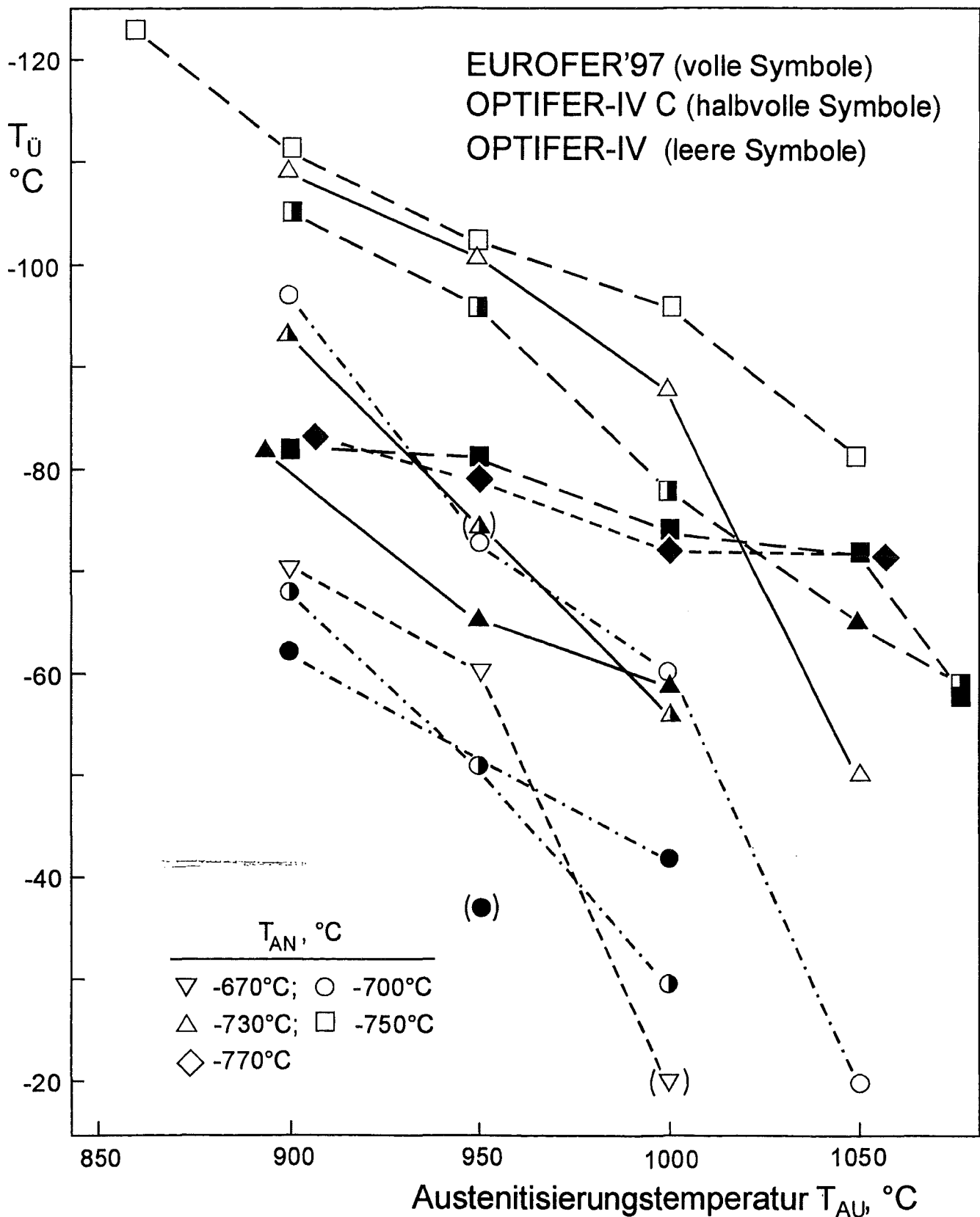


Bild 6: Abhängigkeit der Übergangstemperatur der Schlagarbeit T_U der Stähle EUROFER '97, OPTIFER-IV und IVc von der Austenitisierungstemperatur T_{AU} und der Anlass-temperatur T_{AN} . Mit zunehmender Anlass-temperatur und abnehmender Austenititierungstemperatur wird die Übergangstemperatur verbessert.

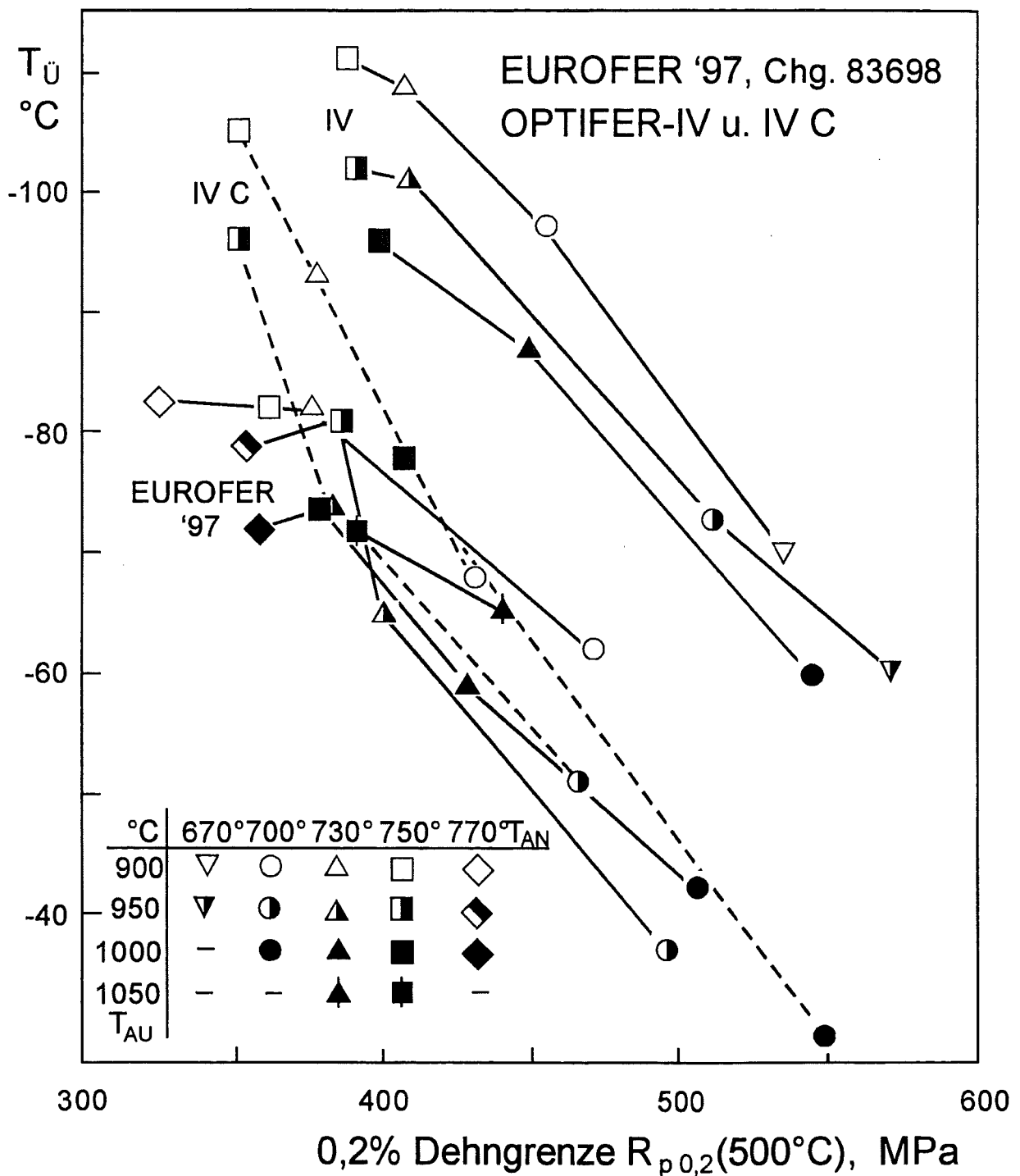


Bild 7: Abhängigkeit der Übergangstemperatur der Schlagarbeit T_U der Stähle EUROFER '97, OPTIFER-IV und IVc von der Warmstreckgrenze $R_{p0,2}$ (500°C). Die Streufelder geben an, in welchem Bereich beliebige Kombinationen von T_U und $R_{p0,2}$ (500°C) durch bestimmte Austenitisierungs- und Anlasstemperaturen eingestellt werden können. Die höchste Festigkeit und Zähigkeit liefert der Stahl OPTIFER-IV. EUROFER '97 zeigt ein gutes Mittelmaß.