

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6605

Bestrahlungsprogramm MANITU

Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche
mit den bis 2,4 dpa bestrahlten Werkstoffen

H.-C. Schneider, B. Dafferner, H. Ries, O. Romer

Institut für Materialforschung

Hauptabteilung Versuchstechnik

Projekt Kernfusion

Association Forschungszentrum Karlsruhe / EURATOM

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2001

KURZFASSUNG

Das Bestrahlungsprojekt MANITU wurde im Rahmen des europäischen Langzeitprogramms für Materialentwicklung für die Kernfusion geplant und durchgeführt. Das Problem der bestrahlungsinduzierten Versprödung bei den in Frage kommenden martensitischen Werkstoffen ist nach wie vor ungelöst. Eine erste Tendenz zeichnete sich jedoch nach der Auswertung der Kerbschlagbiegeversuche an den unbestrahlten miniaturisierten Referenzproben des MANITU-Programms ab. Die neu entwickelten niedrig aktivierbaren 7-10% Cr-W(Ge)VTa-Legierungen weisen gegenüber den modifizierten kommerziellen 10-11% Cr-NiMoVNb-Stählen teilweise bessere mechanische Eigenschaften auf. Nach Auswertung der Kerbschlagbiegeversuche an den in der ersten Phase des MANITU-Programms mit 0,2 und 0,8 dpa bestrahlten Proben zeigten sich deutlich bessere Eigenschaften der 7-10% Cr-W(Ge)VTa-Legierungen. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse aus den instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen der zweiten Phase des MANITU-Programms (Bestrahlungsdosis 2,4 dpa, Bestrahlungstemperaturen 250, 300, 350, 400 und 450°C) analysiert und im Vergleich zu den Ergebnissen der 0,2- und 0,8-dpa-Bestrahlung der ersten Programmphase bewertet. Von den untersuchten Legierungen (MANET-I/II, K-Charge, OPTIFER-Ia/II, F82H, ORNL 3791) zeigt der ORNL-Stahl das mit Abstand beste Versprödungsverhalten nach Neutronenbestrahlung.

ABSTRACT

Irradiation Programme MANITU: Results of impact tests with the irradiated materials (2.4 dpa)

The irradiation project MANITU was planned and carried out in the frame of the European Long-term Fusion Materials Development Programme. The problem of the irradiation induced embrittlement of possible martensitic alloy candidates is still unsolved. But after the evaluation of sub-size Charpy tests with the unirradiated reference specimens of MANITU a first tendency was recognizable. The mechanical properties of the newly developed low activation 7-10% Cr-W(Ge)VTa alloys are partly better compared to the modified commercial 10-11% Cr-NiMoVNb steels. After the evaluation of subsized Charpy tests with specimens irradiated up to 0.2 and 0.8 dpa in the first phase of the MANITU programme, better mechanical properties of the 7-10% Cr-W(Ge)VTa alloys were obvious. In the present report the results of instrumented impact tests within the second phase of the MANITU programme (irradiation dose 2.4 dpa, irradiation temperatures 250, 300, 350, 400, and 450°C) are analysed and assessed in comparison to the results of the irradiation up to 0.2 and 0.8 dpa in the first phase of the project. Among the examined alloys (MANET-I/II, K-Heat, OPTIFER-Ia/II, F82H, ORNL 3791) the ORNL steel shows the very best embrittlement behaviour after neutron irradiation.

ABSTRACT	
1 EINLEITUNG.....	1
2 VERSUCHS- UND AUSWERTETECHNIK.....	2
3 DAS BESTRAHLUNGSPROGRAMM MANITU	6
3.1 ÜBERBLICK, INTENTION, AKTUELLER STAND	6
1.2 VERSUCHSMATERIALIEN	8
1.2.1 CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG.....	9
1.2.2 BEARBEITUNGSSCHRITTE	11
3.3 PROBENHERSTELLUNG.....	12
3.4 BESTRAHLUNGSDATEN UND PARAMETER.....	13
4 VERGLEICH DER MATERIALKENNWERTE	15
4.1 SCHLAGARBEIT IN DER HOCHLAGE (USE).....	15
4.2 SPRÖDBRUCHÜBERGANGSTEMPERATUR (DBTT).....	17
4.3 NIEDRIGSTE TEMPERATUR IN DER HOCHLAGE (LTUS)	20
4.4 DYNAMISCHE STRECKGRENZE ($\sigma_{YD, 100^{\circ}C}$).....	21
4.5 VERSPRÖDUNG UND FESTIGKEIT	23
5 VERGLEICH DES BESTRAHLUNGSEINFLUSSES.....	26
5.1 REDUKTION DER ENERGIE IN DER HOCHLAGE	26
5.2 ERHÖHUNG DER SPRÖDBRUCHÜBERGANGSTEMPERATUR	27
5.3 ERHÖHUNG DER LTUS	28
5.4 ERHÖHUNG DER DYNAMISCHEN STRECKGRENZE.....	29
5.5 VERSPRÖDUNGS- UND FESTIGKEITZUNAHME	30
6 DISKUSSION	32
6.1 RELEVANZ DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE.....	32
6.2 BEWERTUNG DER EINZELNEN LEGIERUNGEN	34
6.3 BOR-GEHALT UND VERSPRÖDUNG	40

6.4	DOSIS- UND TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES BESTRAHLUNGSEINFLUSSES	42
6.4.1	MANET-I.....	43
6.4.2	MANET-II.....	44
6.4.3	KASTEN-CHARGE	45
6.4.4	OPTIFER-IA.....	46
6.4.5	OPTIFER-II.....	47
6.4.6	F82H.....	48
6.4.7	ORNL.....	49
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	50
8	DANKSAGUNG.....	52
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	53
10	ANHANG	56
10.1	VERSUCHSERGEBNISSE UND PROBENZUORDNUNG.....	56
10.1.1	MANET-I.....	56
10.1.2	MANET-II.....	66
10.1.3	OPTIMAR	76
10.1.4	K-CHARGE	79
10.1.5	OPTIFER-IA.....	89
10.1.6	OPTIFER-II.....	98
10.1.7	OPTIFER-IV	107
10.1.8	F82H.....	110
10.1.9	ORNL 3791.....	120
10.1.10	GA3X	130
10.2	AUSWERTEERGEBNISSE	133
10.2.1	MANET-I.....	133
10.2.2	MANET-II.....	140
10.2.3	OPTIMAR	147
10.2.4	K-CHARGE	151
10.2.5	OPTIFER-IA.....	158
10.2.6	OPTIFER-II.....	165
10.2.7	OPTIFER-IV	172

10.2.8	F82H	176
10.2.9	ORNL 3791	183
10.2.10	GA3X.....	190
10.3	PROBENZEICHNUNG.....	194
10.4	CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG	195

1 EINLEITUNG

Mit dem MANITU-(Manet Irradiation for Fusion Applications)-Bestrahlungsprogramm werden innerhalb der Materialforschung für Anwendungen auf dem Gebiet der Kernfusion mehrere Ziele verfolgt.

Grundsätzlich wird in dem als Niederdosisexperiment (Bestrahlungsdosen zwischen 0,2 und 2,4 dpa) konzipierten Bestrahlungsprogramm die Materialversprödung im Bestrahlungstemperaturbereich von 250°C bis 450°C bei unterschiedlichen martensitischen Stahllegierungen untersucht. Dabei soll die Datenbasis der kommerziellen 9-12 % Cr-NiMoVNb-Legierungen, die bei früheren Bestrahlungsprogrammen äußerst unbefriedigende Ergebnisse lieferten, vervollständigt werden. Der Schwerpunkt des MANITU-Programms liegt jedoch bei der Untersuchung der bestrahlungsinduzierten Versprödung von niedrig aktivierbaren 7-10 % Cr-WVTa-Legierungen. Diese Stahltypen könnten außer den Vorteilen, die sich durch die niedrige Aktivierung ergeben, ein wesentlich besseres Versprödungsverhalten aufweisen und damit für Kernfusionsanwendungen ideale Strukturwerkstoffe abgeben. Die Ergebnisse des MANITU-Programms werden zumindest im Bereich der verwendeten Versuchsparameter zeigen, inwieweit diese Vermutung zutrifft.

In der ersten Bestrahlungsphase wurden Kerbschlagproben von insgesamt sieben verschiedenen Legierungen bis zu einer Dosis von je 0,2 und 0,8 dpa bestrahlt, in der zweiten Bestrahlungsphase wurden Kerbschlagproben von diesen Legierungen bis zu einer Dosis von 2,4 dpa und u.a. Proben von drei weiteren Legierungen bis zu einer Dosis von 0,8 dpa bestrahlt. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeuntersuchungen mit den bis 2,4 dpa bestrahlten Proben der zweiten Bestrahlungsphase dokumentiert, die übrigen Ergebnisse sind in [1, 2, 3, 4] vorgestellt worden. Im Vordergrund steht hierbei der Vergleich der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur bei den bestrahlten Legierungen.

Da dieser Bericht das Bestrahlungsprogramm MANITU abschließt, sind im Anhang zusammenfassend sämtliche Ergebnisse aller verschiedenen Bestrahlungsdosen für alle untersuchten Materialien zusammengestellt. Dies geschieht sowohl in Form der einzelnen Proben mit ihren Prüfparametern als auch in Form der daraus abgeleiteten Auswerteergebnisse. Um eine Vergleichbarkeit älterer Ergebnisse mit neueren sicherzustellen, wurde eine erneute

Ermittlung der aus den einzelnen Probenresultaten gewonnenen Auswertungsergebnissen vorgenommen, was gegenüber früheren Veröffentlichung [2, 3] zu leichten Verschiebungen führen kann, die die Aussage der Ergebnisse aber keinesfalls verändern.

Im vorliegenden Bericht erfolgt hauptsächlich eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Bestrahlungsphase mit einer Dosis von 2,4 dpa, von der auch eine Bewertung der Materialien abgeleitet wird. Auf die Materialeigenschaften nach Bestrahlung bei niedrigeren Dosen (0,2 / 0,8 dpa) wird in den Fällen eingegangen, in denen sich gegenüber früheren Berichten [2, 3] in Hinblick auf das Verhalten nach Bestrahlung bis 2,4 dpa neue Aspekte ergeben.

Als Prüfverfahren wurde der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch mit miniaturisierten Proben eingesetzt. Um sämtliche Einflüsse, die die Versprödungsuntersuchungen negativ beeinflussen könnten, auszuschalten, wurde ein nicht unerheblicher Aufwand bei der Probenherstellung und Prüfung betrieben. Dadurch konnte trotz einer geringen Probenanzahl pro Versuchsparameter ein genauer Vergleich zwischen einigen aussichtsreichen Legierungskandidaten angestellt werden.

2 VERSUCHS- UND AUSWERTETECHNIK

Alle Kerbschlagbiegeversuche wurden mit derselben, im IMF-II entwickelten Versuchsanlage in den Heißen Zellen durchgeführt. Dadurch wurden bei der Auswertung anlagenspezifische Einflüsse auf die Meßergebnisse unterdrückt. Die Anlage ist in Abbildung 1 dargestellt, wobei in der linken Bildhälfte der Hammer und das Probenwiderlager zu erkennen sind.

Der verwendete Probentyp (s. Abbildung 2) ist in der DIN 50115 unter der Bezeichnung KLST spezifiziert.

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden instrumentiert durchgeführt, d.h., zu jedem Versuch wurde ein Kraft-Durchbiegungs-Verlauf aufgezeichnet. Die im vorliegenden Bericht angegebenen Schlagenergiewerte wurden über die Integration dieser Kraft-Durchbiegungs-Verläufe ermittelt.

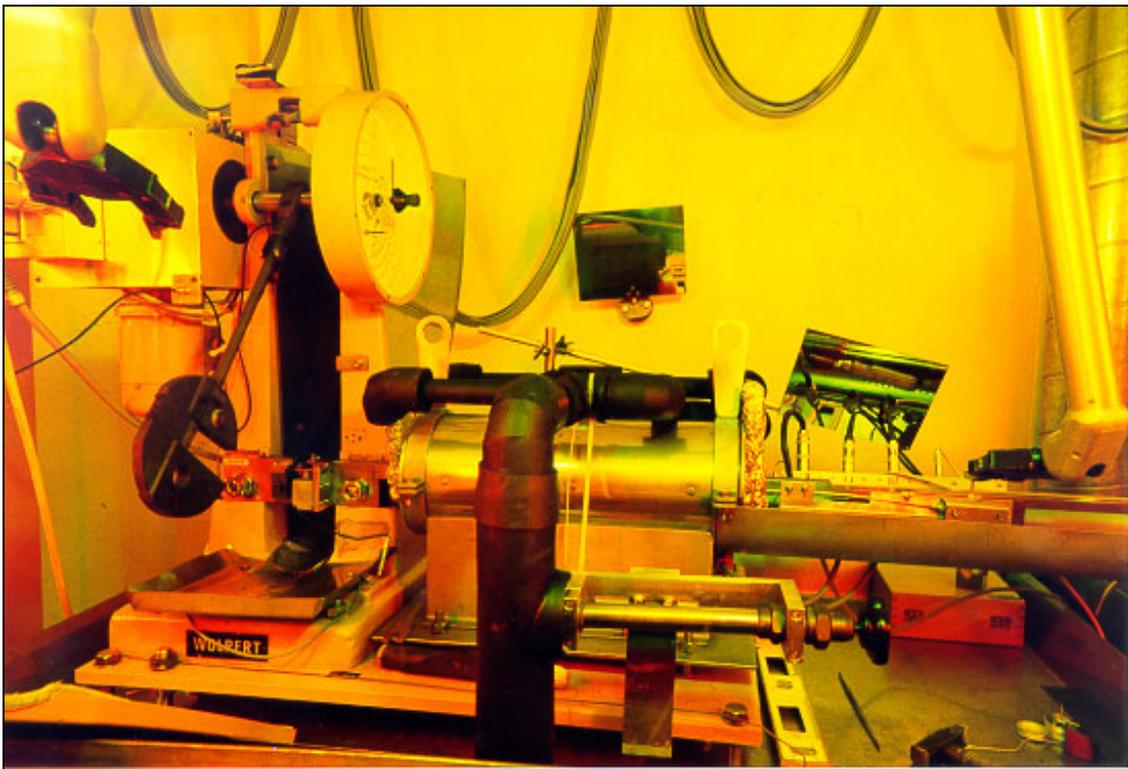


Abbildung 1: Kerbschlagbiegeanlage in der Prüfwelle bei HVT/HZ

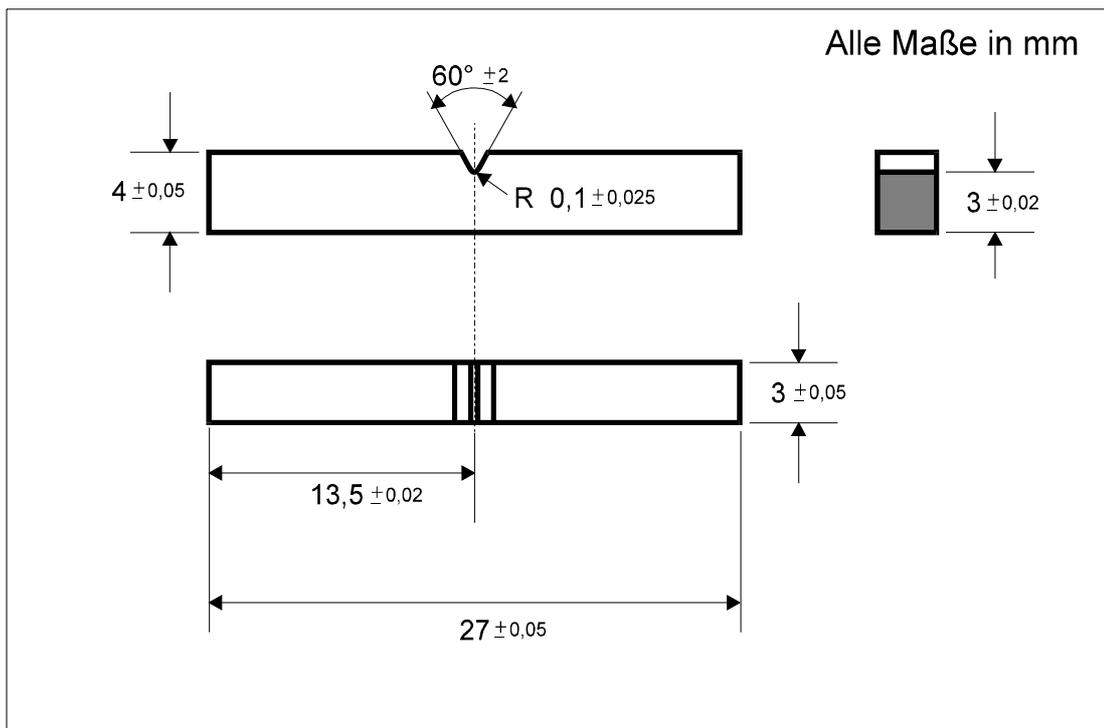


Abbildung 2: Probengeometrie

Die Auslegung der Prüfanlage übertrifft die Anforderungen in DIN 50115, DIN 51222, DVM 001 und EN DIN 10045. Die technischen Daten sind im nachfolgenden Kasten zusammengefaßt.

Technische Daten

15 J Pendelschlagwerk
 Hammerfinnenradius 2 mm
 Widerlagerabstand 22 mm
 Schlaggeschwindigkeit 3,85 m/s
 Kraftmeßeinrichtung in der Hammerfinne
 Meßwerterfassungsrate 1 MHz
 Meßverstärkerbandbreite 1 MHz (-3dB)
 A/D-Wandlerauflösung 1,2 mV
 Halbautomatische Probenbeladevorrichtung
 Beladeverzugszeit max. 2 sec
 PC-gesteuerte Versuchsdurchführung
 Prüftemperaturbereich -180°C bis +600°C

Für die Charakterisierung der Kerbschlageigenschaften wurden die experimentell ermittelten Schlagarbeit-Prüftemperatur-Kurven herangezogen. Daraus wurden drei Kenngrößen ermittelt: zum einen die Schlagarbeit in der Hochlage

(Upper Shelf Energy, USE) als Maximalwert der Schlagarbeit bei vollständig duktilem Materialverhalten, zum anderen die Spröbruchübergangstemperatur (Ductile-to-Brittle Transition Temperature, DBTT). Dieser Temperaturwert charakterisiert für jeden Werkstoff die Materialversprödung in Abhängigkeit von der Temperatur. Im vorliegenden Bericht wurden die DBTT-Werte an den Stellen aus den Schlagarbeit-Prüftemperatur-Diagrammen abgelesen, an denen die Schlagarbeit genau die Hälfte der Hochlagenenergie annimmt. Bei dieser Temperatur treten Mischbrüche auf. Dabei ist der Anteil von Spröbrüchen und Brüchen durch duktile Rißverlängerung ungefähr gleich.

Zusätzlich zur Spröbruchübergangstemperatur (DBTT) wurde ein weiterer Temperaturkennwert ermittelt, der für Designüberlegungen besser geeignet ist. Dabei handelt es sich um die niedrigste Prüftemperatur bei der gerade noch duktiler Materialverhalten auftritt (Lowest Temperature in Upper Shelf, LTUS). Damit schreibt der LTUS-Werte die niedrigst mögliche Einsatztemperatur für eine Konstruktion aus dem betreffenden Material vor, wenn dabei die im Betrieb auftretenden dynamischen Belastungen mit denen des miniaturisierten Kerbschlagbiegeversuchs vergleichbar sind. Weitere Überlegungen zu den LTUS-Werten findet man in [4].

Ein weiterer Kennwert bei instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen ist die Fließkraft F_{gy} . Sie charakterisiert den Übergang vom rein elastischen zum elastisch-plastischen Bereich, also den Beginn des Fließens. Die Bestimmung der Fließkraft aus der Kraft-Durchbiegungs-Kurve ist in SEP 1315 definiert. Dabei wird zunächst eine Gerade durch den mittleren Verlauf der ersten drei Schwingungen des gemessenen Kraftsignals gezogen und in den weiteren Kraftverlauf wird eine Mittelwertkurve gezeichnet. Die Fließkraft ist dann durch die Höhe der Mittelwertkurve am Schnittpunkt der Geraden mit der oberen

Tangente der Mittelwertkurve bestimmt. Der Nachteil dieser Methode besteht in der mangelnden Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, bedingt durch unterschiedliche Prüfanlagen und durch die Subjektivität des Auswerter. Nach [6] liegt die Standardabweichung bei der Ermittlung der Fließkraft bei Kerbschlagbiegeversuchen mit ISO-V-Proben zwischen 4 und 5 %. Für miniaturisierte Proben (z.B. KLST) sind noch höhere Abweichung zu erwarten. Deshalb wurden die Oszillationen aus den gemessenen Kraftkurven mit dem „Störgrößenkompensationsverfahren“ [7] extrahiert. Die so gewonnenen schwingungsfreien Kraftkurven ermöglichen eine reproduzierbare Bestimmung der Fließkräfte mittels der in Abbildung 3 dargestellten Tangentenmethode.

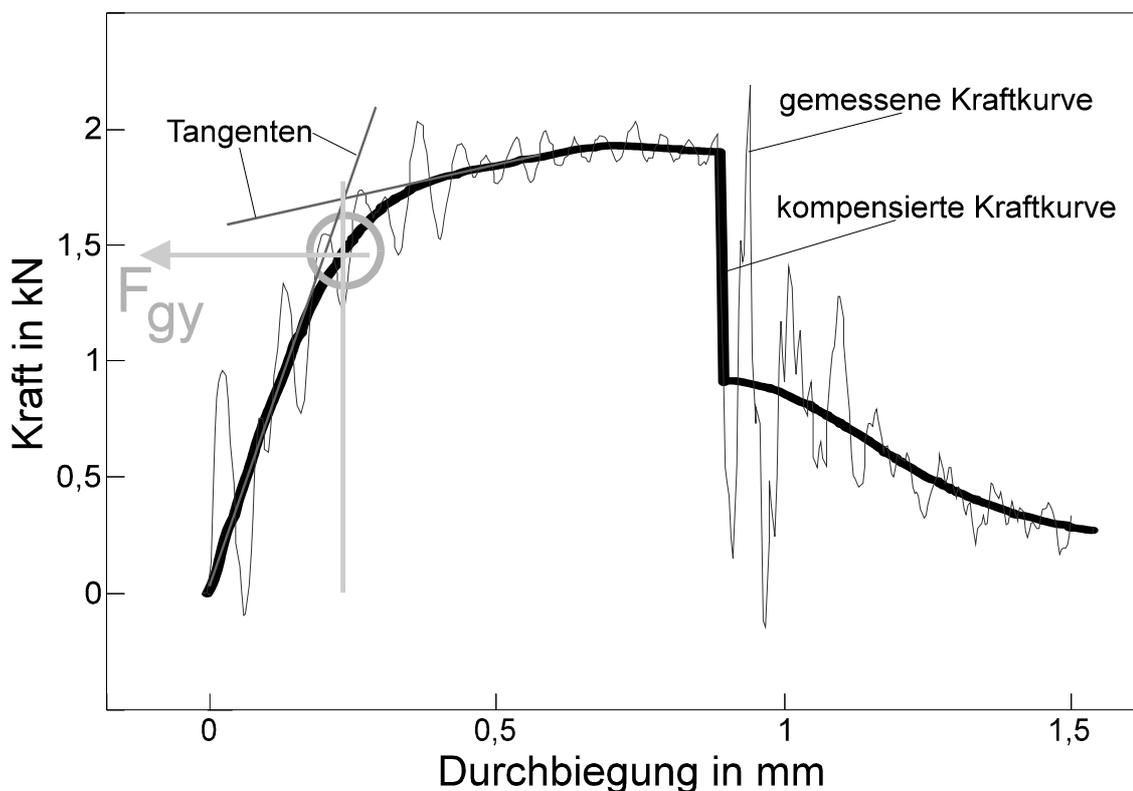


Abbildung 3: Ermittlung der Fließkraft F_{gy}

Die Bestimmung der Fließkraft ist vor allem deshalb interessant, weil damit aufgrund vereinfachter theoretischer Überlegungen die dynamische Streckgrenze σ_{yd} abgeschätzt werden kann. Nach [8] gilt bei Proben mit V-Kerben für die Streckgrenze und das Biegemoment folgende Beziehung:

$$\sigma_{yd} = C_g M_{bgy} / \{B (W-a_0)^2\}$$

C_g , Constraint Faktor

M_{bgy} , Biegemoment an der Fließgrenze

W , Probenhöhe (4 mm)

B , Probenbreite (3 mm)

a_0 , Kerbtiefe (1 mm)

Weiterhin gilt beim Kerbschlagbiegeversuch für das Biegemoment und die gemessenen Fließkraft:

$$M_{bgy} = F_{gy} l / 4$$

F_{gy} , gemessene Fließkraft

M_{bgy} , Biegemoment an der Fließgrenze

l , Widerlagerabstand (22 mm)

Bei der Ermittlung der dynamischen Streckgrenzen wurde für den Constraint Faktor C_g nach [9] ein Wert von 2,99 verwendet.

Für den charakteristischen Spannungswert zum Vergleich der verschiedenen Legierungen und Bestrahlungszustände wurde die dynamische Streckgrenze bei einer Prüftemperatur von 100°C ($\sigma_{yd, 100^\circ C}$) gewählt. Diese Wahl ist willkürlich. Die Mehrzahl der durchgeführten Prüfungen fand jedoch in diesem Temperaturbereich statt. Deshalb konnte die dynamische Streckgrenze bei 100°C für alle Materialien und Zustände am genauesten ermittelt werden. Lediglich für einige untersuchte Stähle mußte aufgrund des niedrigen Niveaus der Versprödungstemperaturen die dynamische Streckgrenze bei einer niedrigeren Prüftemperatur bestimmt werden. Wenn dies geschehen ist, ist es im Text und auch im Anhang vermerkt. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde in diesen Fällen eine Extrapolation der Kurven der dynamischen Streckgrenze über der Temperatur auf 100°C durchgeführt.

Zur Beurteilung des Bestrahlungseinflusses auf die unterschiedlichen Legierungen ist die Differenz der charakteristischen Kenngrößen (DBTT, LTUS, USE, $\sigma_{yd, 100^\circ C}$) vor und nach Bestrahlung von Interesse. Im vorliegenden Bericht ist diesen Differenzwerten ein Δ vorangestellt ($\Delta DBTT$, $\Delta LTUS$, ΔUSE , $\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$).

3 DAS BESTRAHLUNGSPROGRAMM MANITU

3.1 ÜBERBLICK, INTENTION, AKTUELLER STAND

Im Rahmen des Bestrahlungsprogramms MANITU wird der Einfluß der Neutronenbestrahlung auf die Tieftemperaturmaterialversprödung bei

verschiedenen neu entwickelten und modifizierten martensitischen Stählen untersucht. Die Untersuchungen sollen zeigen, in wieweit martensitische Stahllegierungen für den Einsatz als Erste-Wand- und Strukturwerkstoffe bei zukünftigen Fusionskraftwerken geeignet sind. Trotz einiger wesentlicher Vorteile der Martensite gegenüber anderen Werkstoffen gibt es bei den kommerziellen martensitischen Stählen einen erheblichen Nachteil. Sie verspröden, verstärkt durch Neutronenbestrahlung bei Temperaturen unterhalb von ca. 370°C, so stark, daß sie bei Fusionsanwendungen nur sehr begrenzt einsetzbar wären.

Bei dem vorangegangenen Bestrahlungsprojekt FRUST/SIENA [11] wurde an einer Legierung (MANET-I) der Einfluß der Wärmebehandlung und der Bestrahlungstemperatur bei hohen Bestrahlungsdosen (5, 10 und 15 dpa) ermittelt. Dabei wurde festgestellt, daß die bestrahlungsinduzierte Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur ($\Delta DBTT$) beim MANET-I-Stahl unabhängig von der Wärmebehandlung ist. Die Ergebnisse zeigten weiterhin, daß eine vorübergehende Sättigung der Materialversprödung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis schon bei sehr kleinen Werten (deutlich unter 5 dpa) erreicht wird. Bei Zugversuchen wurde eine Sättigungsgrenze bei Dosiswerten von ca. 2 dpa gefunden [12].

Das Bestrahlungsprogramm MANITU wurde ausgehend von diesen Ergebnissen als Niederdosisexperiment mit Dosiswerten von 0,2 sowie 0,8 und 2,4 dpa durchgeführt. Weiterhin wurde auf die Untersuchung von Wärmebehandlungseinflüssen verzichtet. Dadurch konnte die gesamte Bestrahlungskapazität für insgesamt 10 verschiedene Legierungen ausgenutzt werden.

Die Untersuchung der niedrig aktivierbaren Legierungen soll zeigen, ob durch deren unterschiedlich modifizierte chemische Zusammensetzung die bestrahlungsinduzierte Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur verringert werden kann und ob eine Absenkung der Sprödbruchübergangstemperaturen auf unter 200°C generell möglich ist.

Tabelle 1: Legierungen der 2. Bestrahlungsphase von MANITU, Dosis 2,4 dpa

9-12% CrMoV(Nb) kommerziell	7-10% CrWVTa niedrig aktivierbar
MANET-I	OPTIFER Ia, II
MANET-II	F82H
K-Charge	ORNL 3791

Die Bestrahlung wurde in zwei Phasen im High-Flux-Reactor (HFR) des European Joint Research Centre in Petten, Niederlande, durchgeführt [13]. Die für den vorliegenden Bericht relevante zweite

Bestrahlungsphase umfaßt insgesamt 180 KLST-Proben aus sieben Legierungen (s. Tabelle 1), die bei Temperaturen von 250, 300, 350, 400 und 450°C bis zu einer Dosis von 2,4 dpa bestrahlt wurden. Die Prüfung dieser Proben ist abgeschlossen. Die Ergebnisse werden im folgenden dargestellt und diskutiert.

3.2 VERSUCHSMATERIALIEN

Die drei verwendeten 9-12% CrMoVNb-Legierungen wurden im IMF aus dem kommerziellen Stahl X 18 CrMoVNb 12 1 (DIN 1.4914) weiterentwickelt. Die beiden MANET-Legierungen wurden speziell für Fusionszwecke konzipiert [10, 11, 15, 16], während die K-Charge für Brennelementkästen des Schnellen Brütters entwickelt wurde [17, 18, 19, 20, 21]. Alle drei Chargen wurden bei der Firma ARBED-SAARSTAHL erschmolzen. Die MANET- und K-Chargen wurden zu Blechen in unterschiedlicher Dicke verarbeitet.

Aus den mit der Legierung CETA (Ch. 858) gemachten Erfahrungen heraus wurden am IMF die OPTIFER-Legierungen mit deutlich verbesserten Kerbschlageigenschaften entwickelt. Die für grundsätzliche Untersuchungen erschmolzene Vorcharge stellte sich dabei als so gut heraus, daß sie als OPTIFER-IV in die OPTIFER-Reihe übernommen wurde [24]. Aus dieser Vorcharge wurden die beiden hier untersuchten Legierungen OPTIFER-Ia und OPTIFER-II abgeleitet.

Vom Oak Ridge National Laboratory (Dr. R. Klueh) wurde für das MANITU-Programm ein 6,4 mm starkes Blech des 9Cr-2WVTa Stahls ORNL 3791 zur Verfügung gestellt.

Der von Japan für Fusionsanwendungen favorisierte Werkstoff ist die F82H-Legierung. Hiervon wurde 1994 eine modifizierte Großcharge (F82H mod.)

weltweit für die Fusionsforschung verteilt. Uns wurde vorab vom Japan Atomic Energy Research Institute (Dr. A. Hishinuma) ein Blech einer F82H-Charge, die nur geringfügig von der modifizierten Großcharge abweicht, für die MANITU-Bestrahlung zur Verfügung gestellt.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht aller im Rahmen des MANITU-Programms bestrahlten Werkstoffe und ihre Dokumentation in wissenschaftlichen Berichten des Forschungszentrums Karlsruhe.

Tabelle 2: Materialien im MANITU-Bestrahlungsprogramm

Werkstoff	unbestrahlt	0,2 dpa	0,8 dpa	2,4 dpa
K - Charge	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
MANET I	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
MANET II	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
OPTMAR	FZKA 5550	nicht bestrahlt	FZKA 6519	nicht bestrahlt
OPTIFER Ia	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
OPTIFER II	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
OPTIFER IV	FZKA 5550	nicht bestrahlt	FZKA 6519	nicht bestrahlt
F82H	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
ORNL	FZKA 5550	FZKA 5750	FZKA 5619	dieser Bericht
GA3X	FZKA 5550	nicht bestrahlt	FZKA 6519	nicht bestrahlt

3.2.1 Chemische Zusammensetzung

In Tabelle 3 ist die prozentuale chemische Zusammensetzung der einzelnen Legierungen der 2,4 dpa-Bestrahlung angegeben. Die Angaben stammen entweder vom Hersteller oder aus IMF-eigenen Analysen.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der einzelnen Legierungen in Prozent

	9-12 % Cr-NiMoVNb Stähle			niedrig aktivierende Legierungen			
	K-Charge ¹	MANET I ²	MANET II ²	OPTIFER Ia ¹	OPTIFER II ¹	F82H ²	ORNL ¹
	51482	53645	50805	664	668	std.	3791
Cr	10,5	10,8	9,94	9,3	9,43	7,73	8,9
W				0,965	0,005	2,06	2,01
Ge					1,1		
N	0,003	0,02	0,023	0,015	0,016	0,0027	0,0215
C	0,17	0,14	0,1	0,1	0,125	0,092	0,11
Mn	0,64	0,76	0,79	0,5	0,5	0,083	0,44
Ta				0,066	ca. 0,02	0,018	0,06
P	0,005	0,005	<0,006	0,0047	0,004	0,003 ¹	0,015
S	0,005	0,004	<0,007	0,005	0,002	0,003 ¹	0,008
V	0,25	0,2	0,22	0,26	0,28	0,189	0,23
B	0,002	0,0085	0,007	0,006	0,006	0,003 ¹	<0,001
Si	0,31	0,37	0,14	0,06	0,038	0,09 ¹	0,21
Ni	0,87	0,92	0,66	0,005	0,005	0,032	<0,01
Mo	0,56	0,77	0,59	0,005	0,005	0,0053	0,01
Al	0,05	0,054	<0,02	0,008	0,008	0,01	0,017
Co	0,02	0,01	<0,02			0,0024	0,012
Cu	0,01	0,015	<0,01	0,035	0,007	0,0059	0,03
Nb	0,2	0,16	0,14	0,009	0,009	0,0057	
Zr		0,059	0,034				<0,001
Ce				<0,001	<0,001		
Ti	0,007			0,007	0,007	0,0104	<0,01
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest

¹ Herstellerangabe² IMF-Analyse

Die Reihenfolge der chemischen Elemente hat für die niedrig aktivierenden Legierungen eine besondere Bedeutung. Im oberen Drittel der Tabelle 3 stehen die Elementgehalte, bei denen sich die vier Stähle wesentlich unterscheiden und von denen ein erheblicher Einfluß auf die Kerbschlageigenschaften bekannt ist. Die OPTIFER-Ia-Legierung wurde dabei willkürlich zum Referenz-

material gewählt. Bei den anderen Legierungen sind jeweils die Werte, die von der OPTIFER-Ia-Charge abweichen dunkel unterlegt.

Im unteren Drittel sind die Gehalte der Elemente, die für niedrige Aktivierungswerte ausschlaggebend sind, aufgeführt. Im mittleren Teil der Tabelle stehen die restlichen Legierungselemente.

Die OPTIFER-II-Legierung unterscheidet sich von der OPTIFER-Ia-Charge hauptsächlich in einem Punkt. Der Wolframgehalt wurde hier vollständig durch Germanium ersetzt.

Auch beim ORNL-Stahl tritt im wesentlichen nur ein Unterschied auf. Der Wolframgehalt liegt mit 2 % doppelt so hoch wie bei der OPTIFER-Ia-Legierung.

Am größten sind die Unterschiede zwischen dem F82H-Stahl und der OPTIFER-Ia-Charge. Der Chromgehalt von 7,7 % liegt beim F82H niedriger, der Wolframgehalt ist doppelt so hoch und der Stickstoffanteil von 27 ppm fünfmal geringer.

Die bei den 9-12 % Cr-NiMoVNb-Stählen für die Kerbschlageigenschaften maßgeblichen Unterschiede der chemischen Zusammensetzung sind schnell aufgeführt. Beim MANET-II-Stahl wurde im Vergleich zum MANET-I der Zirkon- und Kohlenstoffgehalt abgesenkt. Die K-Charge ist mit nur 30 ppm nahezu frei von Stickstoff. Die chemische Zusammensetzung der ausschließlich bis 0,8 dpa bestrahlten Legierungen (OPTIFER-IV, OPTIMAR, GA3X) ist im Anhang gegeben.

3.2.2 Bearbeitungsschritte

Je nach Ausgangsmaterial waren vor der Probenherstellung noch einige Kaltwalzschritte mit nachfolgender Glühung notwendig. Die Endwärmebehandlung wurde bei allen Stählen im IMF durchgeführt.

Die Legierungen, die in Blechform vorlagen, wurden auf ein einheitliches Endmaß kaltgewalzt. Dadurch ergab sich je nach Dicke des Ausgangsmaterials ein unterschiedlicher Kaltverformungsgrad vor der Endwärmebehandlung. Abschließend wurde von jedem Materialstück die Härte gemessen (s. Tabelle 3). Der Gefügestand der einzelnen Legierungen vor der Probenherstellung ist in [4] dokumentiert.

Tabelle 4: Materialzustand vor der Probenherstellung

Werkstoff	Kaltverformungsgrad	Endwärmebehandlung	Härte HV2	Korngröße in μm
K – Charge	27%	1075°C/ 0,5h + 765°C/2h	238	30 \pm 5
MANET I	23%	980°C/2h + 1075°C/ 0,5h + 750°C/2h	279	30 \pm 5
MANET II	27%	965°C/2h + 1075°C/ 0,5h + 750°C/2h	274	40 \pm 5
OPTIFER Ia	--	1075°C/ 0,5h + 780°C/2h	199	50 \pm 5
OPTIFER II	--	950°C/2h + 780°C/2h	206	55 \pm 5
F82H	20%	1040°C/ 0,5h + 750°C/2h	227	35 \pm 5
ORNL	22%	1050°C/ 0,5h + 750°C/1h	245	25 \pm 5

3.3 PROBENHERSTELLUNG

Die Herstellung der KLST-Kerbschlagbiegeproben erfolgte unabhängig von der Form des Ausgangsmaterials einheitlich mittels Drahterodieren längs zur Walzrichtung in L-T-Orientierung. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren wurden durch Voruntersuchungen bestätigt und sind in [4] ausführlich dargestellt.

Eine detaillierte Probenzeichnung mit allen Toleranzangaben ist im Anhang enthalten. Sämtliche Proben sind vor Einsatz auf Erfüllung der festgelegten Toleranzen überprüft worden.

3.4 BESTRAHLUNGSDATEN UND PARAMETER

Für das Bestrahlungsexperiment MANITU wurde eine sog. TRIO-Kapsel verwendet [22]. Diese Bestrahlungskapsel kann mit drei Probenhaltern bestückt werden. Die MANITU-Probenhalter sind in jeweils fünf Etagen aufgeteilt; die Bestrahlungstemperatur kann in jeder Etage separat geregelt werden. Pro Etage wurden beim MANITU-Programm jeweils 36 KLST-Proben bestrahlt. Die Anordnung der einzelnen Etagen mit der jeweiligen Bestrahlungstemperatur ist in Abbildung 4 dargestellt (s.a. [13]).

Die TRIO-Kapsel für das MANITU-Experiment wurde innerhalb des HFR-Kerns auf die randnahe Position F2 gesetzt. In dieser Position beträgt der Fluß für schnelle Neutronen ($E > 1 \text{ MeV}$) auf der Höhe der Core Centre Line $1,01 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und für thermische Neutronen ($E > 0,1 \text{ MeV}$) $1,90 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [22].

Die zweite Bestrahlungsphase bis zu einer Nenndosis von 2,4 dpa lief unter der Experimentnummer D 271-03 und erfolgte in zwölf Zyklen vom 19.05.1994 bis 12.06.1995. Durch die vertikale Anordnung der Proben im Probenhalter weichen die tatsächlichen Dosiswerte in den einzelnen Etagen entsprechend der Flußverteilung in der Reaktorposition F2 [22] von der Nenndosis ab (s. Tabelle 5). Der Maximalwert der Dosis betrug für die schnellen Neutronen ($E > 1 \text{ MeV}$) $1,887 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$ und für die thermischen Neutronen ($E > 0,1 \text{ MeV}$) $3,965 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$.

Dies entspricht einem Versetzungsschaden von 2,926 dpa.

Die in der Tabelle 5 angegebenen Istwerte der Bestrahlungstemperatur wurden sowohl über den gesamten Bestrahlungszeitraum als auch über die Anzahl der Meßfühler gemittelt. Die Werte der Temperaturabweichungen gelten für mehr als 95 % der Betriebsdauer. Kurzfristig traten geringfügig höhere Abweichungen auf.

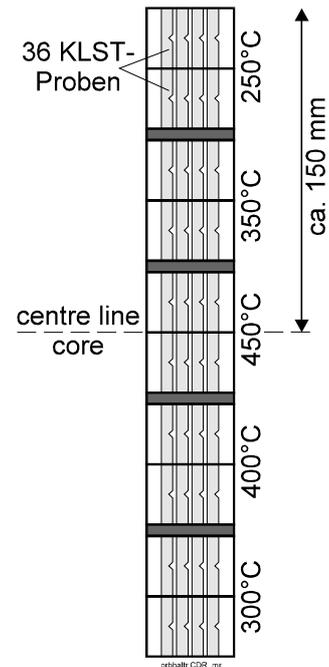


Abbildung 4: MANITU-Probenhalter

Tabelle 5: Soll- und Istwerte der Bestrahlungsparameter

Bestrahlungstemperatur		Bestrahlungsdosis	
Sollwert in °C	Istwert in °C	Sollwert in dpa	Istwert in dpa
250	251 +5 / -7	2,4	2,487
300	296 +4 / -5	2,4	2,633
350	342 +4 / -7	2,4	2,809
400	407 +4 / -7	2,4	2,809
450	444 +4 / -7	2,4	2,926

4 VERGLEICH DER MATERIALKENNWERTE

Die Versuchsdurchführung und Auswertung der Meßergebnisse erfolgte gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.

Sämtliche Versuchs- und Auswerteergebnisse sind in tabellarischer und grafischer Form detailliert und unter Angabe der Probenzuordnung im Anhang dargestellt.

Im Folgenden werden die charakteristischen Kenngrößen der einzelnen Legierungen in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur einander gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Versuche an den unbestrahlten Werkstoffen sind in [4] dokumentiert. Die aufgenommenen Kraft-Durchbiegungs-Verläufe wurden für diesen Bericht erneut ausgewertet, um eine Vergleichbarkeit mit der Auswertung der bestrahlten Proben sicherzustellen. Dabei traten keine relevanten Unterschiede zu [4] zutage.

4.1 SCHLAGARBEIT IN DER HOCHLAGE (USE)

Die Betrachtung der USE-Verläufe der verschiedenen Stähle über der Bestrahlungstemperatur in Abbildung 5 liefert für 2,4 dpa ein ähnliches Bild wie schon für 0,8 dpa [2]. Die Cr-NiMoVNb-Legierungen (MANET-I, -II, K-Charge) zeigen eine niedrigere Energie in der Hochlage als die niedrig aktivierbaren Legierungen, ebenso ist ihre Anfälligkeit gegenüber tieferen Bestrahlungstemperaturen deutlicher ausgeprägt.

Lag für die Cr-NiMoVNb-Legierungen bei 0,8 dpa der stärkste Abfall in der Hochlage noch im Bestrahlungstemperaturbereich zwischen 400°C und 350°C, gilt dies hier zwar noch MANET-I; MANET-II und die K-Charge zeigen dagegen einen recht gleichmäßigen Abfall über den gesamten Temperaturbereich von 400°C bis 250°C.

Von den Cr-NiMoVNb-Stählen zeigt die K-Charge die höchsten Schlagarbeitswerte und kann bei 400 – 450 °C an die Werte von ORNL und OPTIFER-II heranreichen. Die USE-Werte von OPTIFER-Ia und F82H liegen jedoch noch deutlich darüber. MANET-II zeigt wie schon in der 0,8 dpa Bestrahlung 1 bis 2 J höhere Schlagenergiewerte als MANET-I.

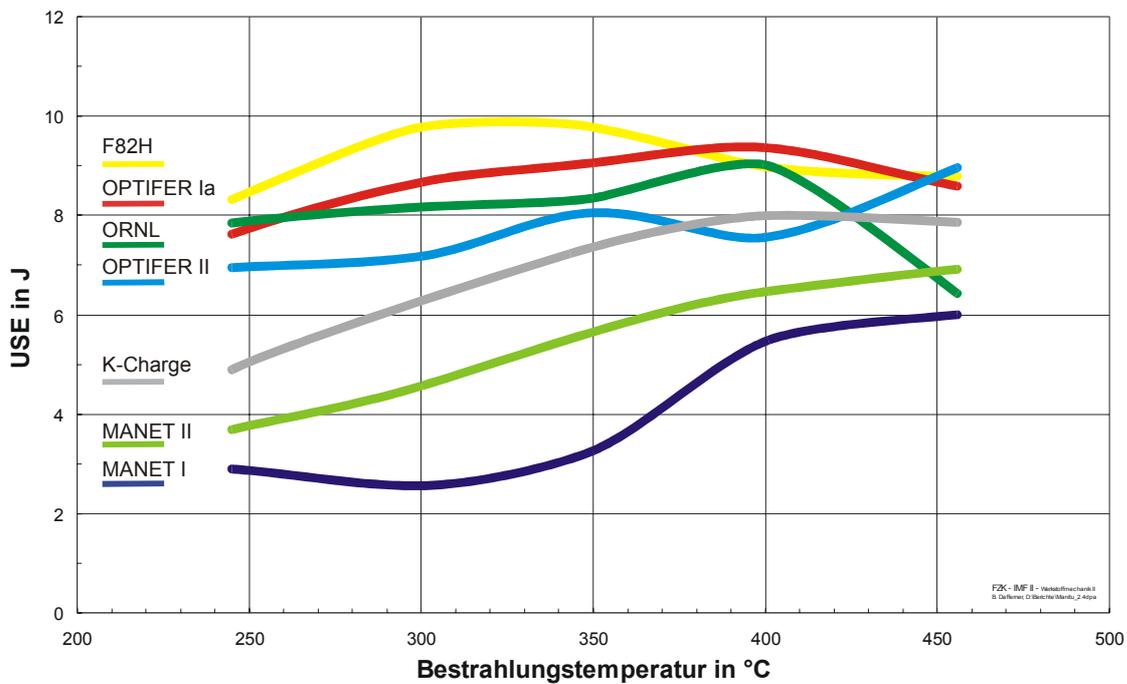


Abbildung 5: Vergleich der USE in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur

Die 9Cr-1GeVTa-Legierung OPTIFER-II zeigt ein uneinheitliches Bild, generell nimmt die USE mit steigender Bestrahlungstemperatur zu, aber bei 400°C liegt die Energie unter den bei 350 und 450 °C gefundenen.

Die höchsten USE-Werte werden (in absteigender Reihenfolge) für F82H, OPTIFER-Ia und ORNL ermittelt. Grundsätzlich ähneln die Ergebnisse denen der 0,8 dpa-Bestrahlung, mit dem Unterschied, daß OPTIFER-Ia und ORNL bei 450°C niedrigere USE-Werte als bei 400°C liefern.

OPTIFER Ia besitzt ähnlich hohe USE-Werte wie nach 0,8 dpa Bestrahlung, lediglich der Abfall bei 250°C ist deutlich stärker. Der 9Cr-2WVTa-Stahl ORNL besitzt bei 450°C ein ausgeprägtes USE-Minimum, das sogar bis zum Wert von MANET-II herunterreicht, während im niedrigen Bestrahlungstemperaturbereich kein Abfall feststellbar ist.

Die 8Cr-2WVTa-Legierung F82H weist von allen untersuchten Stählen die höchsten Schlagarbeitswerte in der Hochlage auf, lediglich im Bereich von 400 bis 450°C kann OPTIFER-I mit ähnlichen Werten aufwarten.

Beim Einsatz von martensitischen Legierungen in zukünftigen Fusionsanlagen ist aufgrund der Materialversprödung der Temperaturbereich von 250-350°C von besonderem Interesse. Bei höheren Bestrahlungstemperaturen (400-450°C) beobachtet man bei den meisten Stählen geringere Bestrahlungs-

effekte. In Abbildung 6 sind die USE-Werte der einzelnen Legierungen, getrennt für den unteren und oberen Temperaturbereich, in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

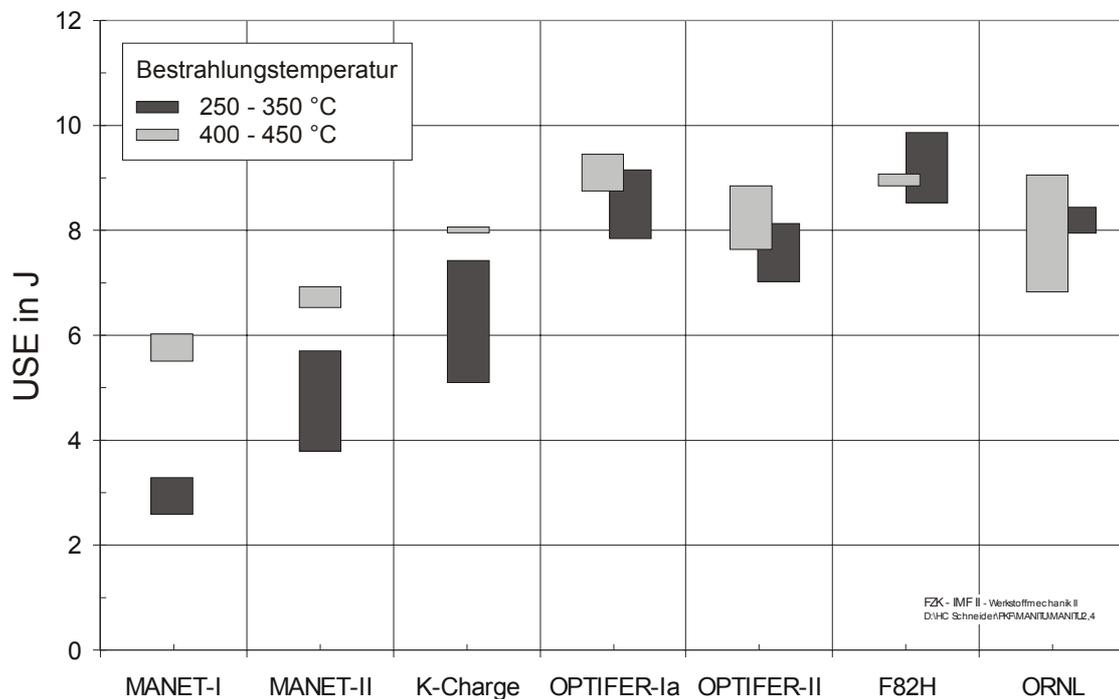


Abbildung 6: USE im unteren und oberen Bereich der Bestrahlungstemperatur

Die Variationen in der USE sind hierbei deutlich größer als die für 0,8 dpa gefundenen. Nur beim ORNL-Stahl ist der Unterschied in der USE bei höheren Bestrahlungstemperaturen signifikant größer als bei niedrigeren. Hierbei lassen sich in der Abhängigkeit der USE von der Bestrahlungstemperatur von links nach rechts drei Gruppen bilden: zum ersten die kommerziellen 9-12% CrMoV(Nb)-Legierungen MANET-I/II und K-Charge mit einer deutlichen Trennung zwischen Energien nach niedrigerer oder höherer Bestrahlungstemperatur. Als zweites die niedrig aktivierbaren OPTIFER-Legierungen mit geringfügig höherer Energie bei höherer Bestrahlungstemperatur, und schließlich die F82H- und ORNL-Stähle ohne ausgeprägte Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur.

4.2 SPRÖDBRUCHÜBERGANGSTEMPERATUR (DBTT)

In der Abbildung 7 ist die Versprödungscharakteristik der untersuchten Legierungen, gemessen an der Sprödbbruchübergangstemperatur, in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur dargestellt.

Bei allen untersuchten Legierungen nahmen die DBTT-Werte ab 400°C mit sinkender Bestrahlungstemperatur stetig zu. Dagegen liegen die Übergangstemperaturen für alle Stähle bis auf OPTIFER-II und MANET-I bei 450°C Bestrahlungstemperatur höher als bei 400°C. Im niedrigen Temperaturbereich liegen die Übergangstemperaturen nach Bestrahlung bis 2,4 dpa um bis zu 100°C höher als nach 0,8 dpa [2].

MANET-I und MANET-II zeigen, gefolgt von der K-Charge, im Temperaturbereich 250 bis 350°C mit Abstand den schlechtesten Verlauf, während bei den beiden höheren Temperaturen alle untersuchten Werkstoffe relativ dicht beieinander liegen. Hier kann die K-Charge die mit weitem Abstand niedrigsten DBTT-Werte aufweisen; ein Ergebnis, das sich in der 0,8 dpa-Bestrahlung noch nicht in solcher Deutlichkeit gezeigt hatte.

Die nach 0,8 dpa bei der OPTIFER-II-Legierung gefundene Stagnation der DBTT-Zunahme unterhalb von ca. 300°C kann nach 2,4 dpa nicht beobachtet werden, die Charakteristik der Kurve entspricht mit ihrem linearen linken Bereich und dem Minimum bei höheren Temperaturen der von OPTIFER-Ia, wenn auch auf höherem Niveau.

Beim ORNL-Stahl fällt die DBTT-Kurve zwischen 450°C und 350°C und steigt bei weiter sinkenden Temperaturen wieder an, auch F82H zeigt ein solches Verhalten. Im unteren Bereich der Bestrahlungstemperatur (250-350°C) zeigt der ORNL-Stahl mit Abstand den besten DBTT-Verlauf, gefolgt von F82H und OPTIFER-Ia.

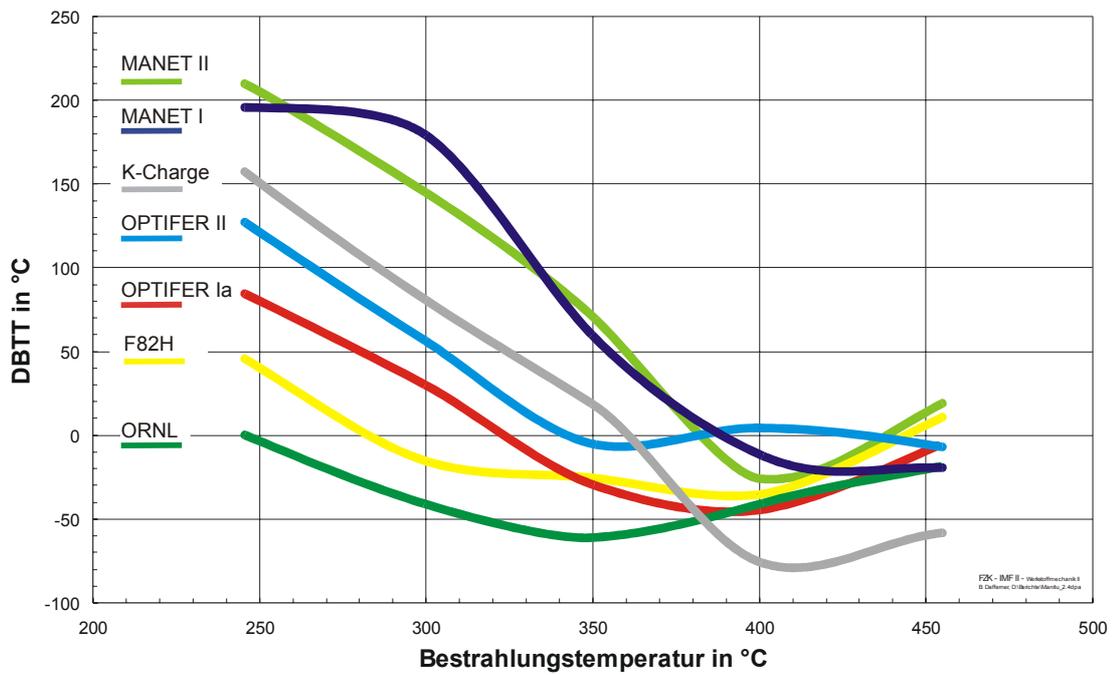


Abbildung 7: Vergleich der DBTT in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur

In der Abbildung 8 sind die DBTT-Werte für den oberen und unteren Bereich der Bestrahlungstemperatur der einzelnen Legierungen als Balkendiagramm dargestellt.

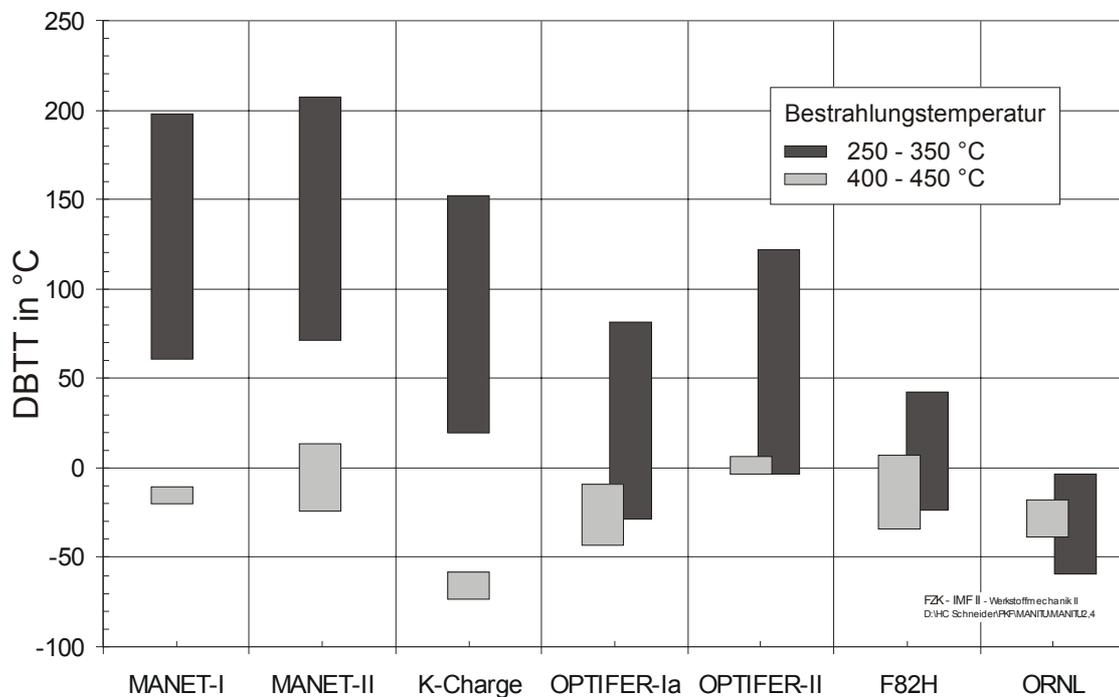


Abbildung 8: DBTT im unteren und oberen Bereich der Bestrahlungstemperatur

4.3 NIEDRIGSTE TEMPERATUR IN DER HOCHLAGE (LTUS)

Abbildung 9 zeigt die designorientierte Versprödungstemperatur (LTUS) der einzelnen Stähle in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur.

Nach 0,8 dpa Bestrahlung war aufgefallen, daß bei den meisten Legierungen bei Temperaturen unterhalb von ca. 300°C eine Sättigung eintritt, was sich nach 2,4 dpa nicht beobachten läßt. Die LTUS-Werte steigen bei sinkender Bestrahlungstemperatur nochmals kräftig an, um 50 bis 100°C, nur bei der K-Charge bleibt die designorientierte Versprödungstemperatur konstant, während sie bei MANET-I sogar deutlich fällt.

Die Verläufe der LTUS ähneln stärker als bei geringeren Bestrahlungsdosen den DBTT-Kurven, es gelten im Wesentlichen die dazu gemachten Aussagen.

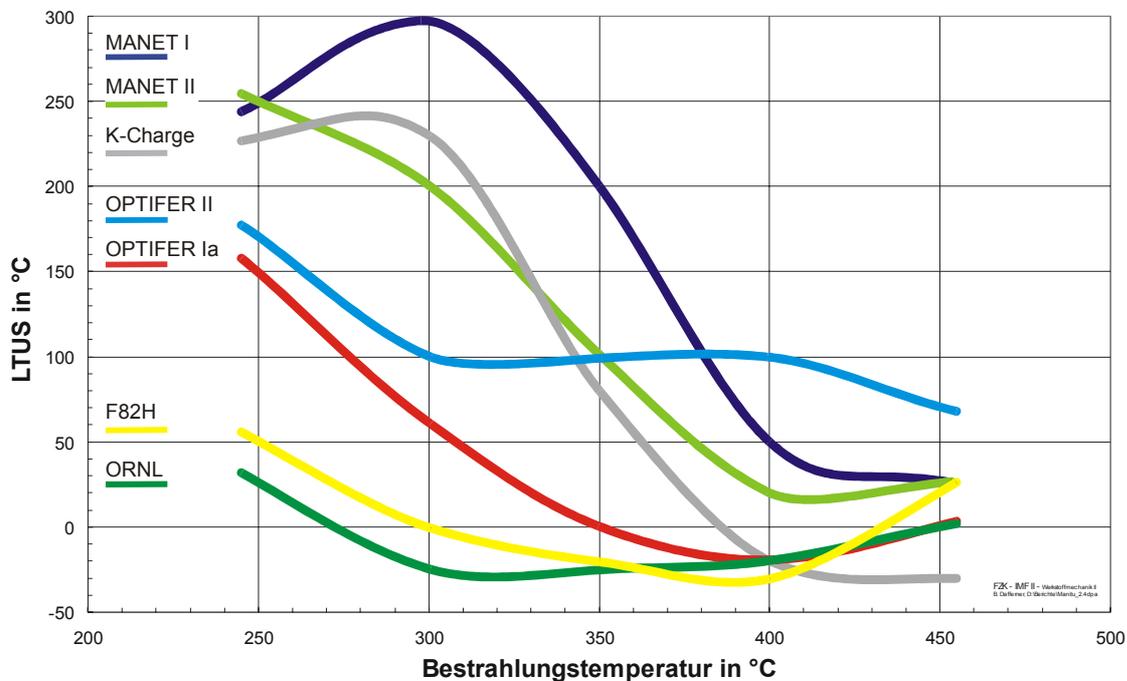


Abbildung 9: Vergleich der LTUS in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur

Im unteren Bereich der Bestrahlungstemperatur (250-350°C) zeigt der ORNL-Stahl mit Abstand den besten DBTT-Verlauf, gefolgt von F82H und OPTIFER-Ia, während die K-Charge im oberen Temperaturbereich wieder den unteren Abschluß des Spektrums darstellt.

Auffällig ist weiterhin, daß OPTIFER-II nach 0,8 dpa noch einen deutlichen Abfall der LTUS von etwa 30°C zwischen 300 und 250 °C Bestrahlungstemperatur gezeigt hatte, während nun nach 2,4 dpa ein signifikanter Anstieg von etwa 70°C festzustellen ist.

Das gute Abschneiden von ORNL und F82H im Niedertemperaturbereich geht anschaulich mit der Aufteilung in einen oberen und unteren Bestrahlungstemperaturbereich aus der Abbildung 10 hervor, auch hier finden sich wieder die bei der USE und DBTT gefundenen Gruppierungen der untersuchten Werkstoffe.

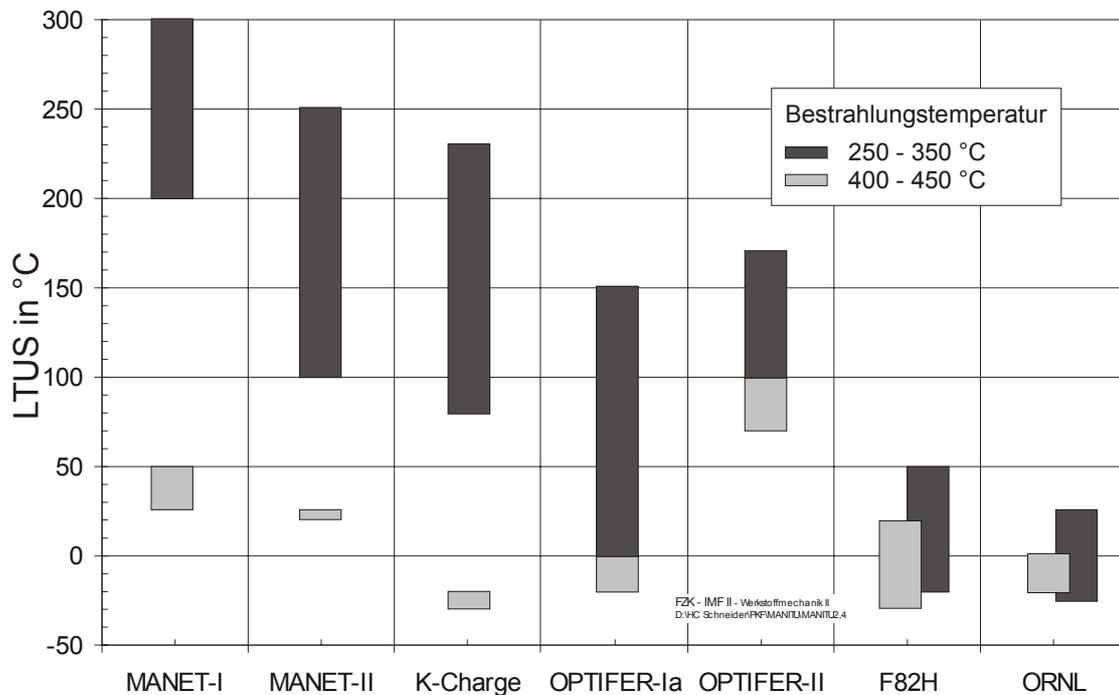


Abbildung 10: LTUS im unteren und oberen Bereich der Bestrahlungstemperatur

4.4 DYNAMISCHE STRECKGRENZE ($\sigma_{YD, 100^\circ C}$)

Die bei einer Prüftemperatur von 100°C ermittelten Werte der dynamischen Streckgrenze in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur sind in der Abbildung 11 dargestellt.

Aufgrund der Charakteristik des Kraftsignals des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchs ist nicht aus jedem Kraft-Durchbiegungs-Verlauf einwandfrei eine dynamische Streckgrenze zu ermitteln. Ebenso lagen die Übergangstemperaturen einiger Legierung so, daß aufgrund der beschränkten Probenanzahl zugunsten einer sicheren Bestimmung der DBTT auf eine Bestimmung der dynamischen Streckgrenze durch einen Versuch bei 100°C verzichtet wurde. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die dynamische Streckgrenze bei 100°C abzuschätzen, z.B., indem man den Kurvenverlauf im Vergleich mit den benachbarten Bestrahlungstemperaturen oder mit anderen Bestrahlungsergebnissen extrapoliert. Wo dies geschehen ist, wurde die durchgezogene um

eine punktierte Kurve ergänzt, die sich aus den auf 100°C extrapolierten Werten der dynamischen Streckgrenzenkurven im Anhang ergibt. So gewonnene Werte sind im tabellarischen Anhang deutlich als solche gekennzeichnet. In der Hauptsache trifft dies für die höheren Bestrahlungstemperaturen der Legierungen F82H und ORNL zu.

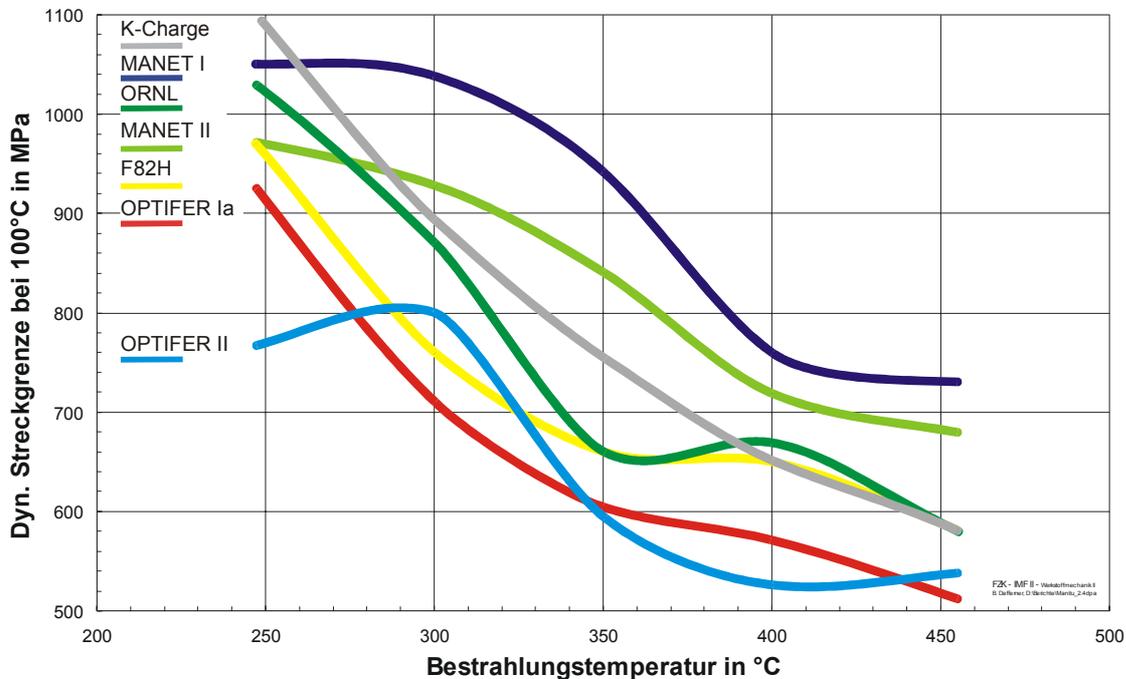


Abbildung 11: $\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur

Im Allgemeinen gilt bei den martensitischen Legierungen für die Versprödungs- und Festigkeitseigenschaften die gegensätzliche Beziehung „je besser die Versprödungstemperaturwerte, desto schlechter die Festigkeit“.

In [2] waren deshalb bereits die relativ hohen Werte der F82H- und ORNL-Legierung nach 0,8 dpa Bestrahlung hervorgehoben worden, wobei für 2,4 dpa dasselbe Resultat gefunden wird: beide Legierungen zeigen ungefähr denselben Verlauf der dynamischen Streckgrenze bei 100°C über der Bestrahlungstemperatur. Ihre Werte liegen oberhalb derer der OPTIFER-Legierungen, obwohl sie – zumindest bis 400°C - deutlich bessere Versprödungstemperaturen aufweisen.

Am besten sind die Streckgrenzen der MANET-Stähle, die wiederum die schlechtesten Spröbruchübergangstemperaturen zeigen.

Eine Aufteilung in hohe und niedrige Bestrahlungstemperaturen zeigt Abbildung 12. Hierbei wird nochmals deutlich, daß die Legierungen F82H und ORNL zwar keine signifikant höhere Versprödung bei tiefen Temperaturen zeigen, dafür

aber sehrwohl eine deutlich stärkere Verfestigung. Außerdem wird augenfällig, daß die Balken für hohen und niedrigen Bestrahlungstemperaturbereich sich fast nicht überschneiden, was beiden anderen Kennwerten der niedrig aktivierbaren Legierungen sehrwohl der Fall war.

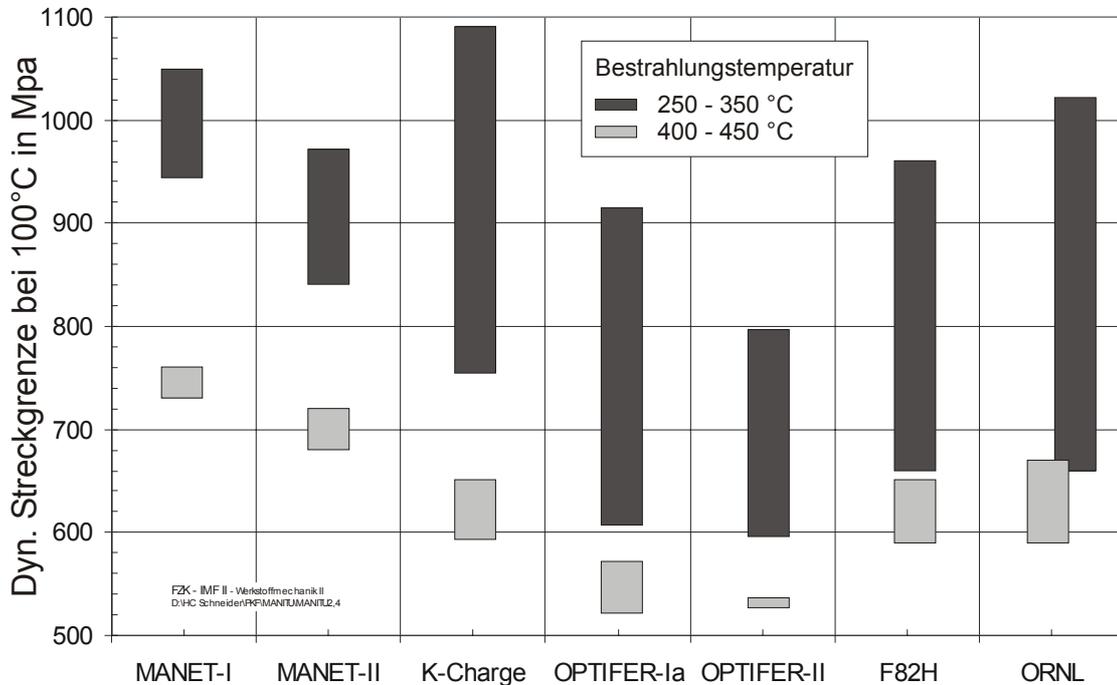


Abbildung 12: $\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ im unteren und oberen Bereich der Bestrahlungstemperatur

4.5 VERSPRÖDUNG UND FESTIGKEIT

Zur abschließenden Beurteilung der aus dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch ermittelten mechanischen Materialeigenschaften ist es sinnvoll, die Versprödungskennwerte (DBTT und LTUS) über den Festigkeitswerten (hier die dynamische

die durch Versprödung entstehenden Risiken nicht durch eine gesteigerte Festigkeit ausgeglichen werden können. Deshalb muß bei der Materialbewertung den Versprödungskennwerten ein höherer Stellenwert als den Festigkeitswerten eingeräumt werden. Dies gilt im besonderen Maße für die hier untersuchten martensitischen Werkstoffe.

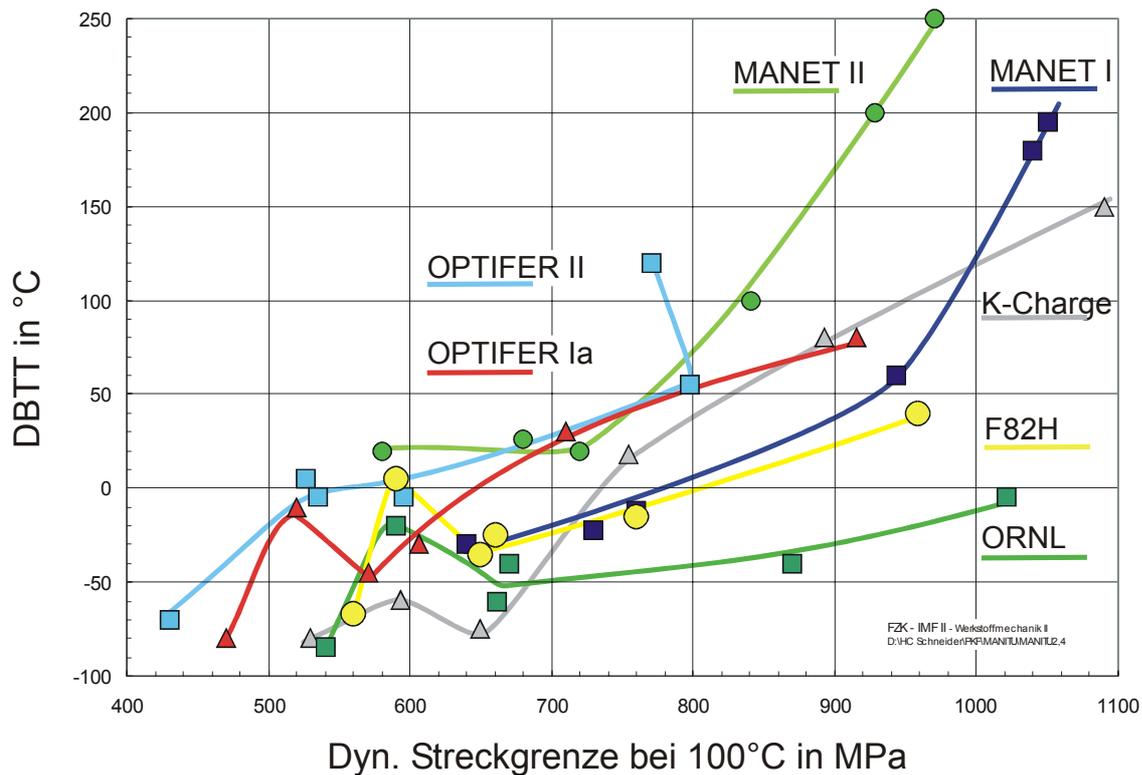


Abbildung 13: DBTT über $\sigma_{yd, 100^\circ C}$

In der Abbildung 13 sind die Spröbruchübergangstemperaturen der verschiedenen Legierungen über den entsprechenden dynamischen Streckgrenzenwerten aufgetragen und mit Linien verbunden, die als Orientierung von Streubändern aufgefaßt werden können. In der Abbildung 14 sind die niedrigsten Temperaturen in der Hochlage über der Streckgrenze eingezeichnet. Bei jedem Material wurde der niedrigste Meßpunkt aus dem unbestrahlten Zustand gewonnen; die fünf Punkte darüber repräsentieren die Ergebnisse nach Bestrahlung. Die Länge der Streubänder ist ein Maß für den Einfluß der Bestrahlung auf die mechanischen Eigenschaften. Je nach Steigung der Streubänder überwiegt entweder die bestrahlungsinduzierte Versprödung oder Verfestigung. Weisen bei verschiedenen Stählen die Versprödung-Verfestigungsgeraden ungefähr gleiche Steigungen auf, dann nimmt bei diesen Stählen die Festigkeit im selben Verhältnis wie die Versprödung zu.

In der Abbildung 13 erkennt man sowohl den starken Bestrahlungseinfluß als auch die hohen Festigkeitswerte der Cr-NiMoV-Stähle gegenüber den Cr-W- bzw. Cr-Ge-Legierungen, wobei sich die MANET-Stähle zusätzlich durch ihre hohen Versprödungswerte hervorheben.

Mit Ausnahme der OPTIFER-II- und ORNL-Legierungen ist die Steigung der Versprödung-Verfestigungsgerade im mittleren und rechten Teil des Diagramms ungefähr gleich. Damit nimmt bei diesen Stählen die Festigkeit im selben Verhältnis wie die Versprödung zu.

Beim OPTIFER-II-Stahl findet, ausgehend vom unbestrahlten Zustand, zunächst eine stärkere Versprödung und mit sinkenden Bestrahlungstemperaturen eine überwiegende Verfestigung statt, bei 250°C ist eine starke weitere Versprödung zu beobachten, gepaart mit einer leichten Entfestigung. Die ORNL-Legierung zeigt unter Bestrahlung fast ausschließlich Verfestigung.

Die Praxistauglichkeit der Legierungen wird noch deutlicher, wenn man die Versprödung nach der niedrigsten Temperatur in der Hochlage charakterisiert (s. Abbildung 14).

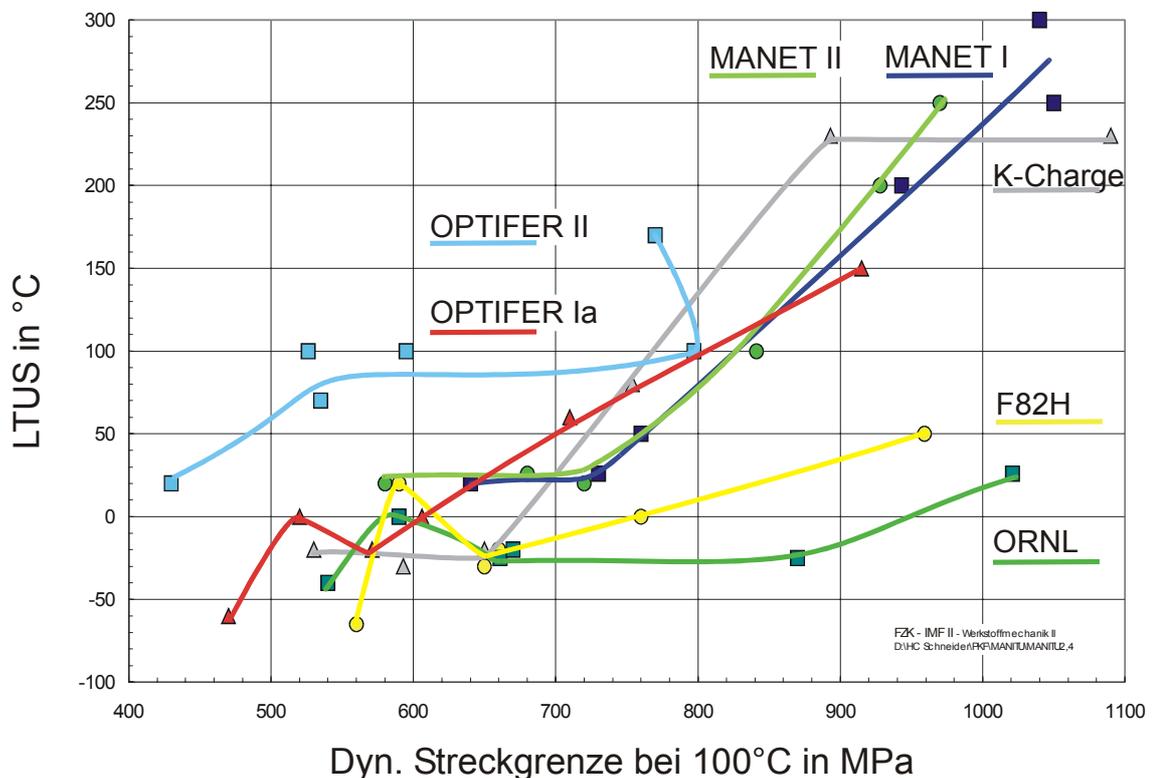


Abbildung 14: LTUS über $\sigma_{yd, 100^\circ C}$

GA3X weist wie ORNL eine abweichende Kurvenform auf. Die insgesamt als flach zu bezeichnenden Kurven zeigen eine über den ganzen Temperaturbereich fast ausschließlich Verfestigung.

Das mit Abstand beste Versprödungsverhalten bei hoher Festigkeit zeigt sich bei den Stählen F82H und ORNL. Bei der OPTIFER-Ia-Legierung und bei der Kastencharge tritt eine stärkere Versprödung ein, wobei die K-Charge deutlich

höhere Streckgrenzenwerte aufweist. Die OPTIFER-II-Legierung hebt sich vor allem durch ihre niedrigen Festigkeitswerte von den anderen Werkstoffen ab.

Bei der Versprödungscharakterisierung nach der LTUS trat nach 0,8 dpa Bestrahlung gegenüber dem DBTT- $\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ -Diagramm noch ein anderer Effekt auf. Bei den Legierungen MANET-I und -II, OPTIFER-II, ORNL und bei der K-Charge setzte bei niedrigen Bestrahlungstemperaturen eine Sättigung bei der Versprödung (LTUS) ein. In diesen Bereichen fand ausschließlich bestrahlungsinduzierte Verfestigung statt. Dieses Ergebnis findet sich für 2,4 dpa so nicht wieder, eine Sättigung ist nur noch bei der K-Charge festzustellen.

5 VERGLEICH DES BESTRAHLUNGSEINFLUSSES

5.1 REDUKTION DER ENERGIE IN DER HOCHLAGE

In der Abbildung 15 ist die durch Neutronenbestrahlung bedingte Reduktion der Hochlagenenergie als prozentuale Abweichung vom unbestrahlten Zustand eingezeichnet. Im Gegensatz zu früheren Veröffentlichungen wurde hier nun die Skalierung der Ordinate umgekehrt: der Verlust an Energie in der Hochlage führt zu einem nach unten verschobenen Verlauf der Kurve.

Im Bereich von 250-350°C der Bestrahlungstemperatur ist der Bestrahlungseinfluß auf die USE beim F82H-Stahl, gefolgt von der ORNL- und OPTIFER-Ia-Legierung, mit weniger als -22 % am geringsten. Beim OPTIFER-II-Stahl, der Kastencharge und der MANET-II-Legierung liegt die Reduktion zwischen -12 und -48 %. Die MANET-I-Legierung zeigt hier mit -50 bis -62 % den stärksten Bestrahlungseinfluß.

Im oberen Bestrahlungstemperaturbereich geht der Einfluß der Bestrahlung auf die USE allgemein zurück, die Reduktion liegt zwischen etwa -5 und -20 %, nur der ORNL-Stahl bildet eine Ausnahme durch seine starke USE-Reduktion bei 450 °C (- 25%) und die nicht meßbare Reduktion bei 400 °C. Von den anderen Stählen zeigen hier F82H, OPTIFER-II und MANET-I den stärksten Verlust.

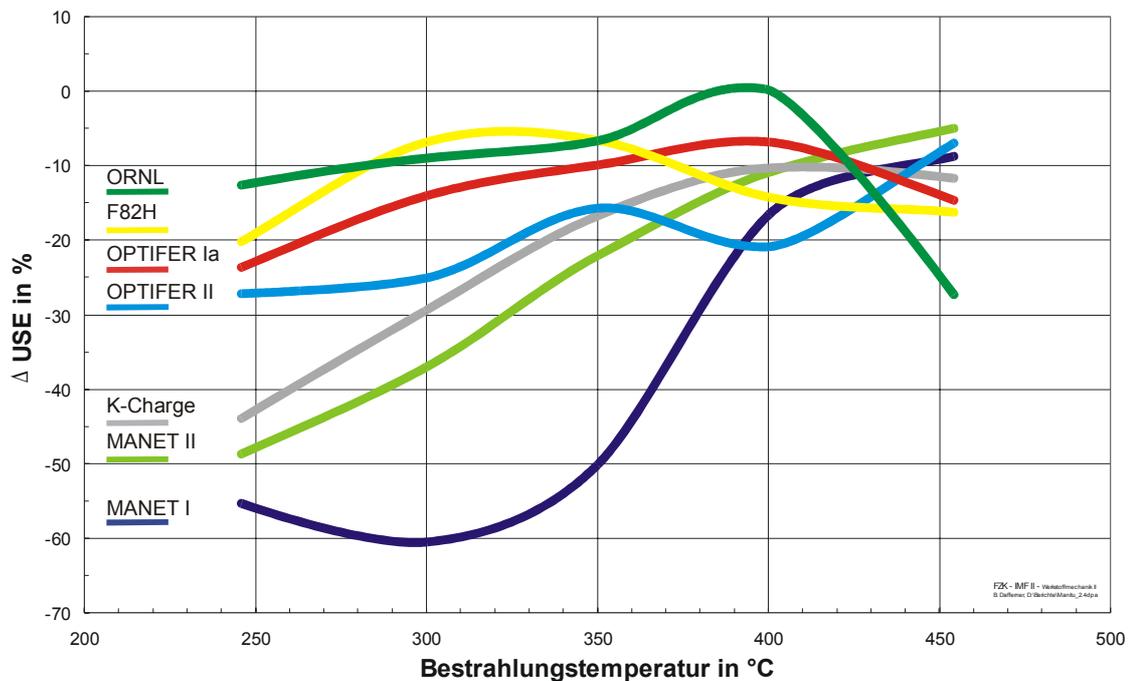


Abbildung 15: Bestrahlungsinduzierte Reduktion der Hochlagenenergie

5.2 ERHÖHUNG DER SPRÖDBRUCHÜBERGANGSTEMPERATUR

Über den gesamten Temperaturbereich finden sich in der Reihenfolge des abnehmenden Einflusses drei charakteristische Gruppen mit ähnlichem Verhalten: die Cr-NiMoVNb-Stähle MANET-I/II und K-Charge, die OPTIFER-Legierungen und schließlich ORNL und F82H. Innerhalb dieser Gruppen zeigt sich ungefähr derselbe Einfluß der Bestrahlungstemperatur auf die DBTT-Verschiebung (s. Abbildung 16).

Unterhalb von 350°C ist der Bestrahlungseinfluß bei den Cr-NiMoVNb-Stählen am höchsten und ab 400°C geringsten.

Bei der OPTIFER-Ia-Legierung ist die DBTT-Verschiebung über den ganzen Temperaturbereich geringfügig geringer als bei der OPTIFER-II-Legierung.

Deutlich weniger Einfluß auf die DBTT-Verschiebung zeigt sich bei der F82H-Legierung und der absolut niedrigste Δ DBTT-Verlauf im unteren Bereich der Bestrahlungstemperatur tritt beim ORNL-Stahl auf.

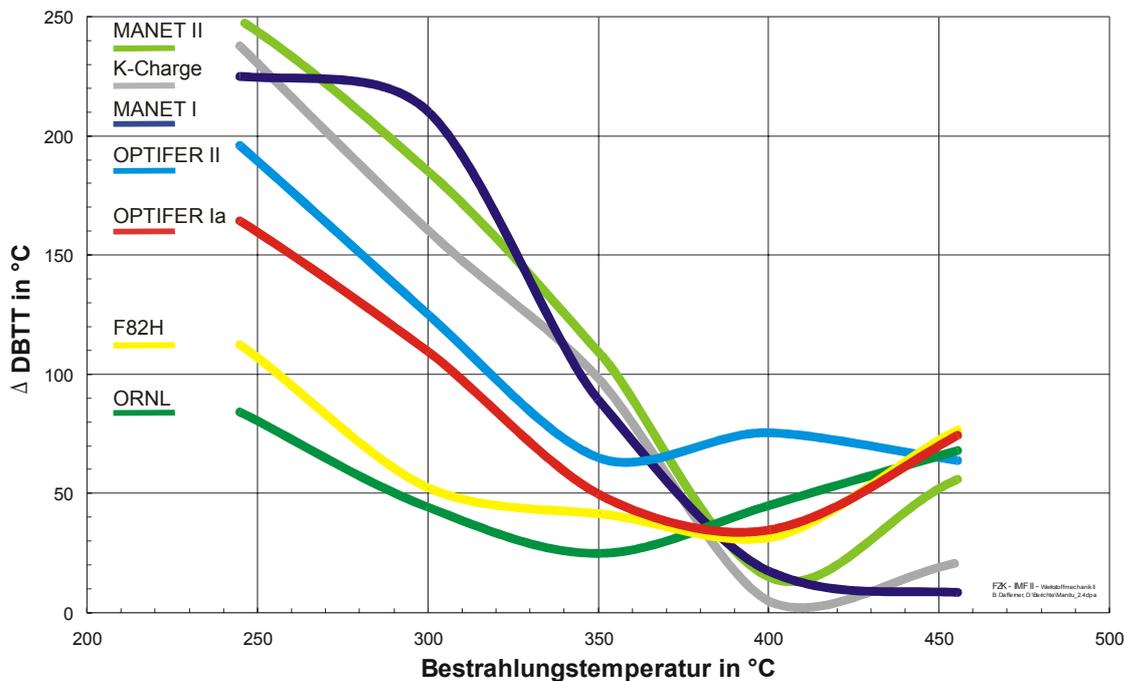


Abbildung 16: Bestrahlungsinduzierte Verschiebung der DBTT

5.3 ERHÖHUNG DER LTUS

Beim Einfluß der Bestrahlung auf die LTUS ergeben sich gegenüber der bestrahlungsinduzierten DBTT-Verschiebung einige deutliche Unterschiede. Die entsprechenden Kurvenverläufe sind in der Abbildung 17 dargestellt.

Zunächst fällt auf, daß die drei oben erwähnten Gruppen nicht mehr so deutlich abgrenzbar sind.

MANET-I, K-Charge und MANET-II zeigen in dieser Reihenfolge eine stark unterschiedliche (bis zu 100 °C) Verschiebung der LTUS. MANET-II liegt dabei im unteren Bestrahlungstemperaturbereich nicht mehr weit von OPTIFER-Ia entfernt.

Die OPTIFER-Legierungen erfahren eine geringere Verschiebung der LTUS im Bereich bis 350°C, wobei bis 300°C OPTIFER-II die geringeren Werte aufweist, bei höheren Temperaturen OPTIFER-I.

Im unteren Temperaturbereich weist die ORNL-Legierung von allen Stählen den kleinsten Bestrahlungseinfluß auf. Oberhalb von 400°C zeigt die K-Charge zusammen mit MANET-II die geringsten LTUS-Verschiebungen.

Dennoch schneidet die ORNL-Legierung mit ihren durchweg bemerkenswert geringen Verschiebungen insgesamt am besten ab.

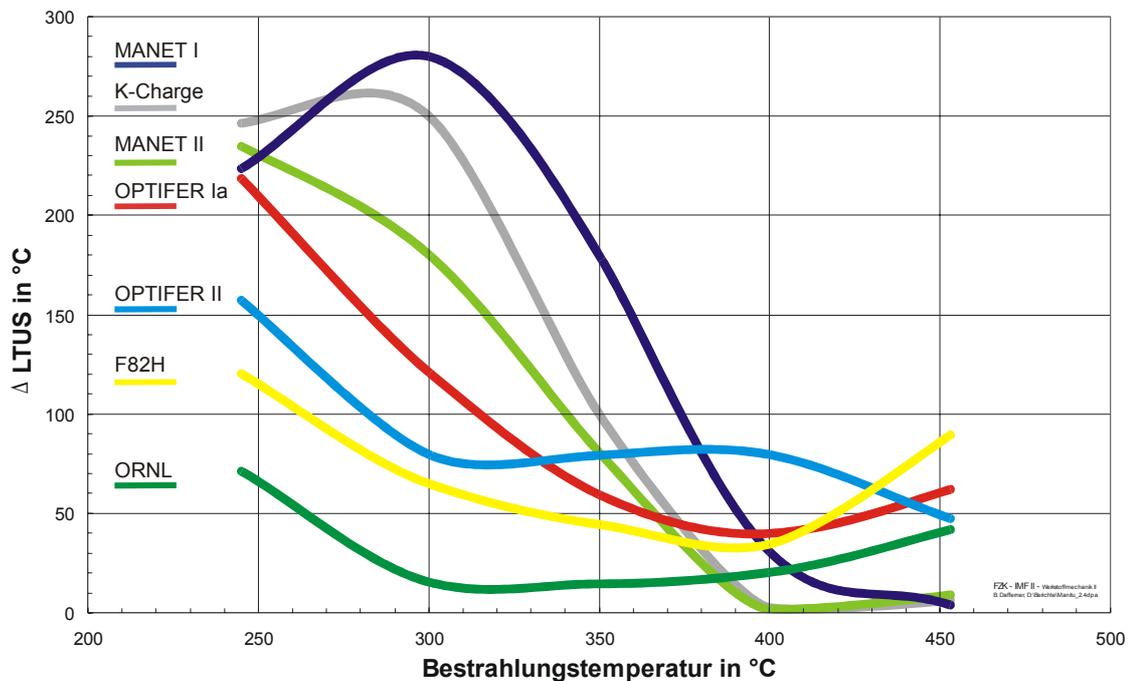


Abbildung 17: Bestrahlungsinduzierte Verschiebung der LTUS

5.4 ERHÖHUNG DER DYNAMISCHEN STRECKGRENZE

Durch die Neutronenbestrahlung erhöht sich bei den martensitischen Legierungen die dynamische Streckgrenze gegenüber dem unbestrahlten Ausgangszustand. Die Verläufe der Festigkeitszunahme sind in der Abbildung 18 in Abhängigkeit von der Bestrahlungstemperatur eingetragen.

Hierbei ergibt sich für alle untersuchten Legierungen ein relativ einheitliches Bild. In erster Näherung kann man davon sprechen, daß die bestrahlungsinduzierte Erhöhung der dynamischen Streckgrenze mit steigender Bestrahlungstemperatur abnimmt und über den untersuchten Temperaturbereich linear approximierbar ist.

Die MANET-Legierungen und die K-Charge weisen die höchsten Verfestigungen auf, nur bei 250°C liegen alle Werkstoffe relativ dicht beieinander und die Verschiebung der dynamischen Streckgrenze ist bei OPTIFER-I und ORNL größer als bei den MANET-Stählen.

OPTIFER-II erfährt bei 250°C erstaunlicherweise eine geringere Erhöhung der Streckgrenze als bei 300°C; die geringste Verfestigung abgesehen davon hat durchgängig F82H.

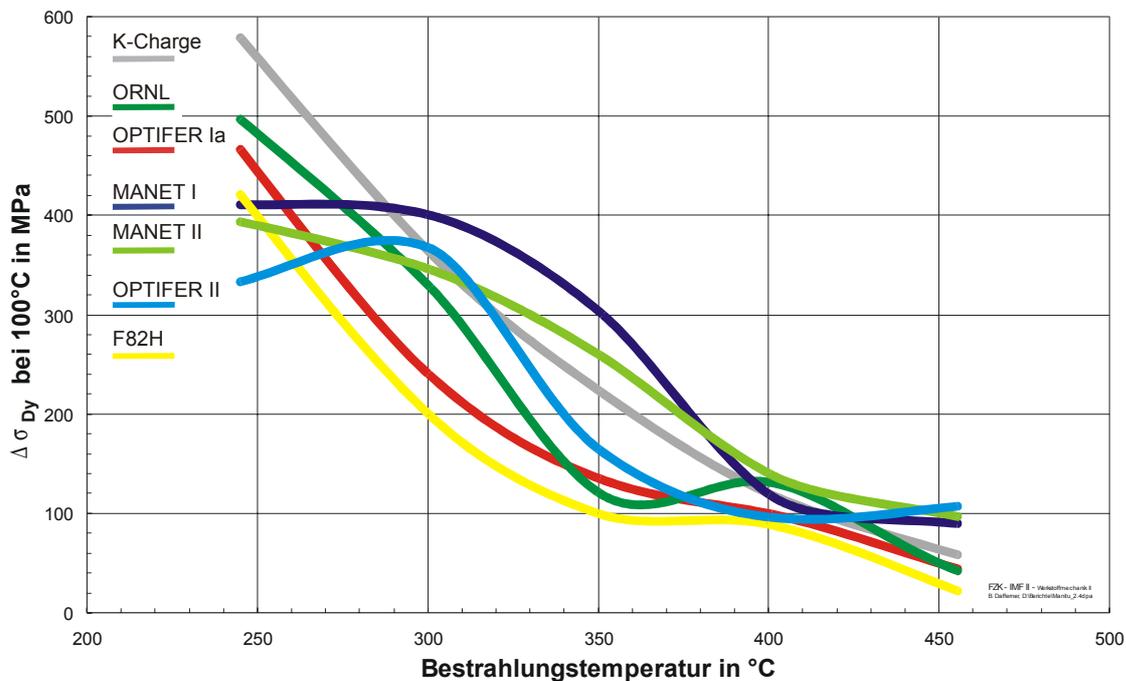


Abbildung 18: Bestrahlungsinduzierte Verschiebung der dynamischen Streckgrenze

5.5 VERSPRÖDUNGS- UND FESTIGKEITZUNAHME

In der Abbildung 19 ist die bestrahlungsinduzierte Versprödung über der Verfestigung aufgetragen. Nach 0,8 dpa ergab sich für die niedrig aktivierbaren Legierungen noch eine maximale Verfestigung von 140-150 MPa, während die Cr-NiMoVNb-Stähle Werte zwischen 270 und 300 MPa erreichten. Nach 2,4 dpa zeigt sich kein so deutlicher Unterschied mehr, alle untersuchten Legierungen erfahren eine Verfestigung in der Größenordnung von 400 MPa, OPTIFER-I, ORNL und die K-Charge erreichen mit 450, 480 bzw. sogar 550 MPa deutlich höhere Werte. Dies ist insofern bemerkenswert, als z.B. beim OPTIFER-I trotz höherer Verfestigung im Vergleich zu MANET keine relativ dazu gesehene stärkere Versprödung eintritt.

In der Differenzdarstellung ist deutlicher als in der Darstellung der absoluten Werte zu erkennen, daß die Steigung der Geraden für alle Materialien mit Ausnahme von MANET ähnlich ist und damit ungefähr derselbe Zusammenhang zwischen Versprödung und Verfestigung gilt. Bei MANET-I und MANET-II überwiegt dagegen die Versprödung gegenüber der Festigkeitszunahme.

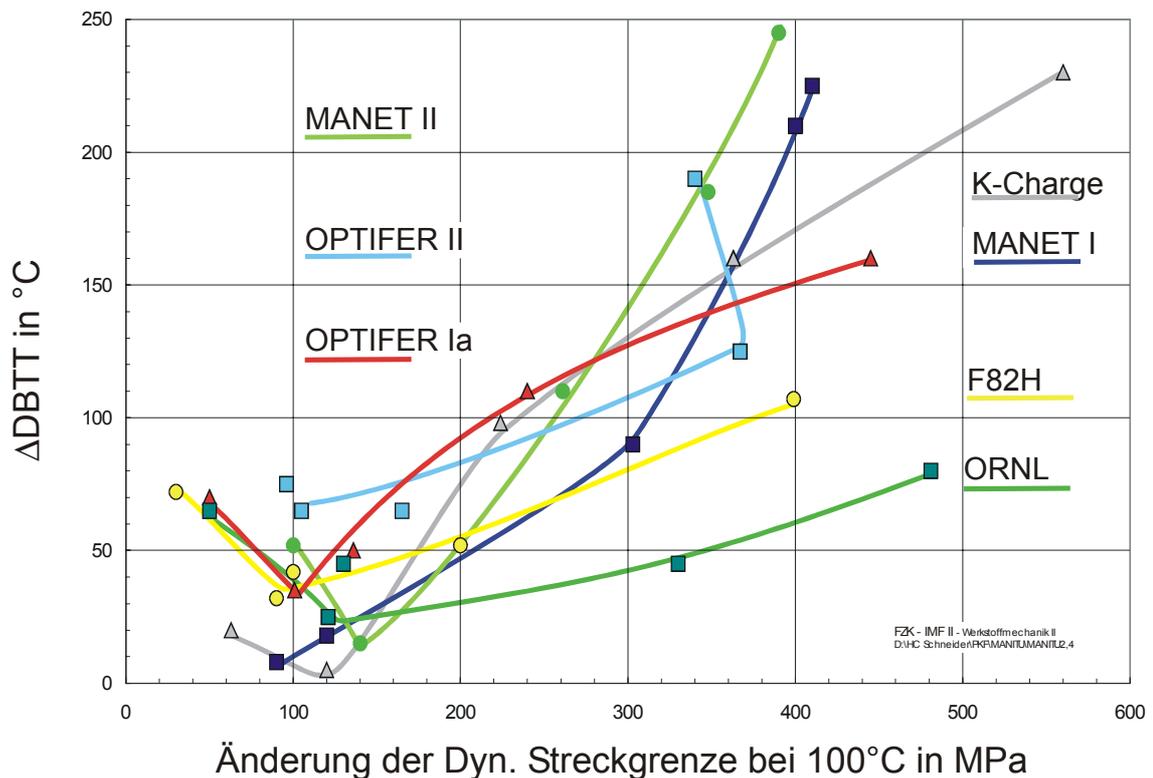


Abbildung 19: DBTT-Verschiebung in Abhängigkeit von der Verfestigung

Auffällig ist, daß bis auf OPTIFER-II und MANET-I alle untersuchten Stähle einen nach unten zeigenden Haken im linken Bereich der Kurve aufweisen. Bei geringem Bestrahlungseinfluß sinkt zunächst die Versprödung mit steigender Festigkeit, eine Beobachtung, die in den bisherigen Untersuchungen noch nicht gemacht werden konnte und den wieder ansteigenden Übergangstemperaturen bei 450 Bestrahlungstemperatur zuzuschreiben ist.

Die etwas seltsam anmutende Form der OPTIFER-II Kurve im oberen Bereich muß im Zusammenhang mit dem Einbruch an Festigkeit bei 450°C gesehen werden, s. dazu auch Abbildung 11.

Während OPTIFER-I und auch die K-Charge eine Abschwächung der Versprödungszunahme mit steigender Verfestigung zeige, steigert sich die Versprödung bei MANET-I noch; für MANET-I und die K-Charge wird somit qualitativ das gleiche Ergebnis für 0,8 und 2,4 dpa gefunden.

Insgesamt betrachtet wirkt sich die Neutronenbestrahlung bei den Cr-NiMoVNb-Stählen am stärksten aus. Sie zeigen die höchsten Versprödungs- aber nicht zwangsläufig die höchsten Verfestigungswerte im Vergleich zu den niedrig aktivierbaren Legierungen. Dabei zeigt der ORNL-Stahl über einem weiten Bereich die niedrigsten Versprödungswerte bei gleichzeitiger Verfestigung.

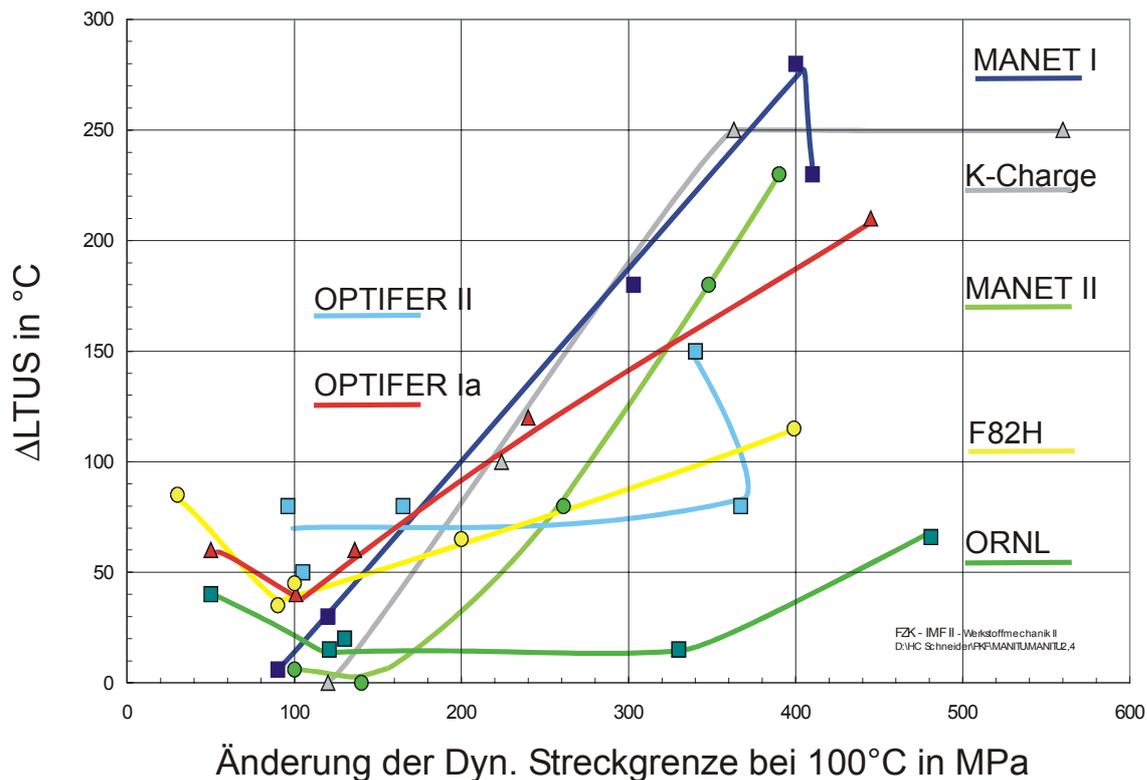


Abbildung 20: LTUS-Verschiebung in Abhängigkeit von der Verfestigung

Die Abbildung 20 zeigt die bestrahlungsinduzierte Zunahme der LTUS in Abhängigkeit von der Verfestigung. Gegenüber der Abbildung 19 ist kein prinzipieller Unterschied zu erkennen, sieht man davon ab, daß die anhand der LTUS charakterisierte Versprödung beim OPTIFER-II nun unter der des OPTIFER-Ia bleibt und die geringe Versprödungsneigung des ORNL bei starker Verfestigung noch deutlicher zu sehen ist.

6 DISKUSSION

6.1 RELEVANZ DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Für die Bewertung der Einsatztauglichkeit der untersuchten Legierungen sind die im Kapitel 4 dargestellten Absolutkennwerte ausschlaggebend. Diese hängen jedoch nicht nur von der Legierungszusammensetzung, sondern auch von der jeweils angewandten Wärmebehandlung ab. Aus früheren Untersuchungen [23] ist wiederum bekannt, daß verschiedene Anlaßwärmehandlungen zumindest beim MANET-I-Stahl keine Auswirkung auf den Bestrahlungseinfluß haben. Dieses Ergebnis kann mit ziemlicher Sicherheit auch auf andere ferritisch-martensitische Legierungen übertragen werden.

Bisher wurde aber noch nicht untersucht, ob und wie sich der Einfluß der Neutronenbestrahlung in Abhängigkeit unterschiedlicher Austenitisierungswärmebehandlungen ändert. Da sich die Austenitisierungstemperatur und -dauer direkt auf das Gefüge (v.a. Korngröße) der Werkstoffe auswirkt, ist anzunehmen, daß hierbei ein gewisser Zusammenhang mit dem Bestrahlungseinfluß auf die mechanischen Eigenschaften besteht.

Umfangreiche Untersuchungen [10, 24, 25] an verschiedenen martensitischen Chromstählen (MANET-II, OPTIFER-IV, F82H mod.) haben gezeigt, daß durch eine bestimmte Kombination von Austenitierungs- und Anlaßwärmebehandlung jeweils ein optimaler Zustand mit niedriger Versprödungstemperatur und hohen Festigkeitswerten erreicht werden kann. In diesem optimierten, relativ genau definierten Materialzustand könnten die mechanischen Eigenschaften von unterschiedlich legierten Stählen vor und nach Bestrahlung aussagekräftig miteinander verglichen werden.

Da bei keiner der im Rahmen des MANITU-Programms untersuchten Legierungen eine optimierte Wärmebehandlung durchgeführt wurde, können weder aus den absoluten noch aus den bestrahlungsinduzierten Materialkennwerten sichere Rückschlüsse auf den Einfluß der unterschiedlichen Legierungselemente gezogen werden. Die nachfolgende Bewertung der mechanischen Eigenschaften der einzelnen Legierungen ist deshalb nur in Zusammenhang mit den Tabelle 3 angegebenen Werkstoffzuständen gültig.

Gegen den Einsatz martensitischer Stähle in zukünftigen Fusionsanlagen spricht vor allem die Materialversprödung bei niedrigen Temperaturen. Dabei ist zu befürchten, daß die Versprödungstemperatur von Strukturelementen durch hochenergetische Neutronenbestrahlung auf Werte ansteigt, die oberhalb der Betriebstemperatur liegen. Deshalb wird bei der Materialbewertung nur der unterste Bestrahlungstemperaturbereich von 250-300°C betrachtet. Bei der Ermittlung charakteristischer Versprödungstemperaturen aus dem Kerbschlagbiegeversuch ist jedoch zu beachten, daß die Versprödungstemperaturen nur für dynamische Belastungen, so wie sie in der verwendeten Prüfanlage auftreten, gültig sind. So wurden in quasistatischen Zugversuchen bei vergleichbaren Prüfungen von Zug- und Kerbschlagproben aus einer gemeinsamen Bestrahlungskapsel zum Teil unterschiedliche Temperaturen für die Verfestigungs- und Versprödungsmaxima gefunden [26]. Reale Bauteile

können durch eine andere Geometrie oder durch andere Belastungsfälle höhere oder auch niedrigere Versprödungstemperaturen aufweisen.

Ein weiterer Punkt, den man sich bei der Bewertung der Ergebnisse vor Augen halten muß, betrifft die Bestrahlungsdosis und das Neutronenspektrum. Zum einen werden Strukturkomponenten zukünftiger Fusionsanlagen Bestrahlungsdosen erreichen, die weit über den im MANITU-Programm erreichten 2,4 dpa liegen. Andererseits tritt bei der Kernfusion ein hochenergetisches Linienspektrum auf, während die spektrale Neutronenverteilung im HFR sehr breit gefächert ist. Da sich sowohl die Bestrahlungsdosis als auch das Neutronenspektrum bei jeder Legierung unterschiedlich auswirken könnte, darf aus den hier vorgestellten Versuchsergebnissen nicht automatisch auf fusionsrelevante Betriebsbedingungen geschlossen werden.

Hier darf man, zumindest was die Strahlendosis betrifft, von den künftigen Hochdosis-Bestrahlungsprogrammen SPICE / HFR IIB (250 - 450°C, 15dpa, [5]) und ARBOR / Bor 60 (330°C, 30 dpa) weitere Aufschlüsse erwarten. Was das Neutronenspektrum anbelangt, ist man weiterhin auf künftige Fusionsanlagen angewiesen, um Sicherheit zu gewinnen.

6.2 BEWERTUNG DER EINZELNEN LEGIERUNGEN

In die Bewertung der einzelnen Legierungen wurden auch jene drei Legierungen aufgenommen, von denen nur Erkenntnisse über das Verhalten nach Bestrahlung bis 0,8 dpa vorliegen [1]. Hier sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß keine sicheren Rückschlüsse auf das Verhalten nach 2,4 dpa möglich sind, da der Bestrahlungseinfluß sich mit steigender Dosis ändern kann, aber zumindest kann eine grobe Einordnung im Vergleich der Werte nach 0,8 dpa geschehen.

In Abbildung 21 sind die Schlagenergiewerte in der Hochlage der einzelnen Legierungen von links nach rechts in aufsteigender Reihenfolge für die Ergebnisse nach 2,4 dpa Bestrahlung dargestellt. Ausschlaggebend für die Bewertung sind die niedrigsten USE-Werte im Bestrahlungstemperaturbereich von 250-300°C (schwarze Balken). Zum Vergleich und zur Beurteilung des Bestrahlungseinflusses sind ebenfalls die Werte der unbestrahlten Werkstoffe sowie die Ergebnisse der Bestrahlungen mit niedrigeren Dosen eingezeichnet.

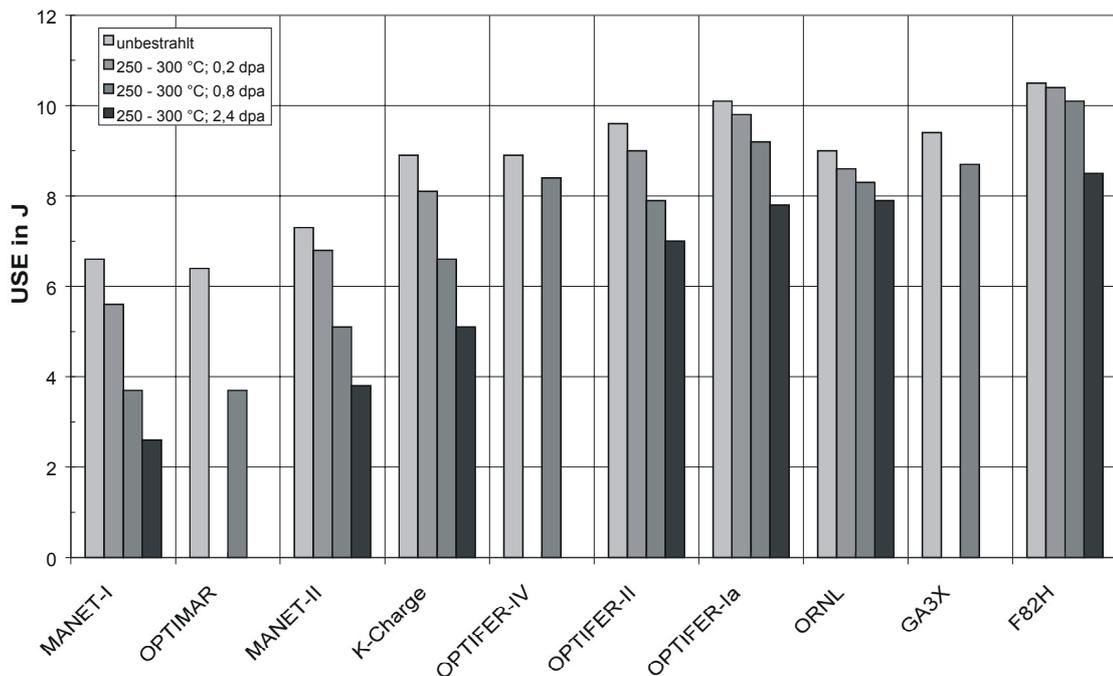


Abbildung 21: Bewertung der Legierungen nach der Hochlagenenergie

Die Energie in der Hochlage ist ein Maß für die maximal mögliche Kerbschlagzähigkeit eines Werkstoffs. Die USE-Werte sind jedoch für die Auslegung von Bauteilen ungeeignet, da aus ihnen keine kritischen Kenngrößen für praxisrelevante Belastungsfälle abgeleitet werden können. Trotzdem kann man die hier aufgeführten Legierungen anhand der USE (s. Abbildung 21) deutlich in zwei Gruppen mit unterschiedlichem Bestrahlungsverhalten aufteilen. Bei den Cr-NiMoVNb-Stählen ist der bestrahlungsinduzierte Zähigkeitsverlust sehr viel höher als bei den Cr-WVTa-Legierungen. Dieses Verhalten ist unabhängig von der Höhe des USE-Werts der unbestrahlten Werkstoffe, wie in [2] gezeigt wurde.

Die K-Charge, die man bezüglich der Kerbschlageigenschaften als optimierte 10-11 % Cr-NiMoVNb-Legierung bezeichnen kann, liegt im unbestrahlten Ausgangszustand auf demselben Zähigkeitsniveau wie die Stähle OPTIFER-II und ORNL. Nach Bestrahlung sind die niedrig aktivierbaren Legierungen jedoch eindeutig besser. Besonders zäh sind hierbei der F82H- ORNL- und OPTIFER-Ia-Stahl.

Abbildung 22 zeigt den auf die Ausgangszustände normierten prozentualen Verlust, der weniger eine konkrete Materialeigenschaft als vielmehr den Bestrahlungseinfluß charakterisiert. Hierbei ergeben sich einige Verschiebungen in der Wertung, wobei die bemerkenswertesten sind, daß F82H schlechter abschneidet als ORNL und daß das sehr gute Abschneiden

von OPTIFER IV nach 0,8 dpa auch auf herausragende Eigenschaften nach 2,4 dpa hoffen läßt.

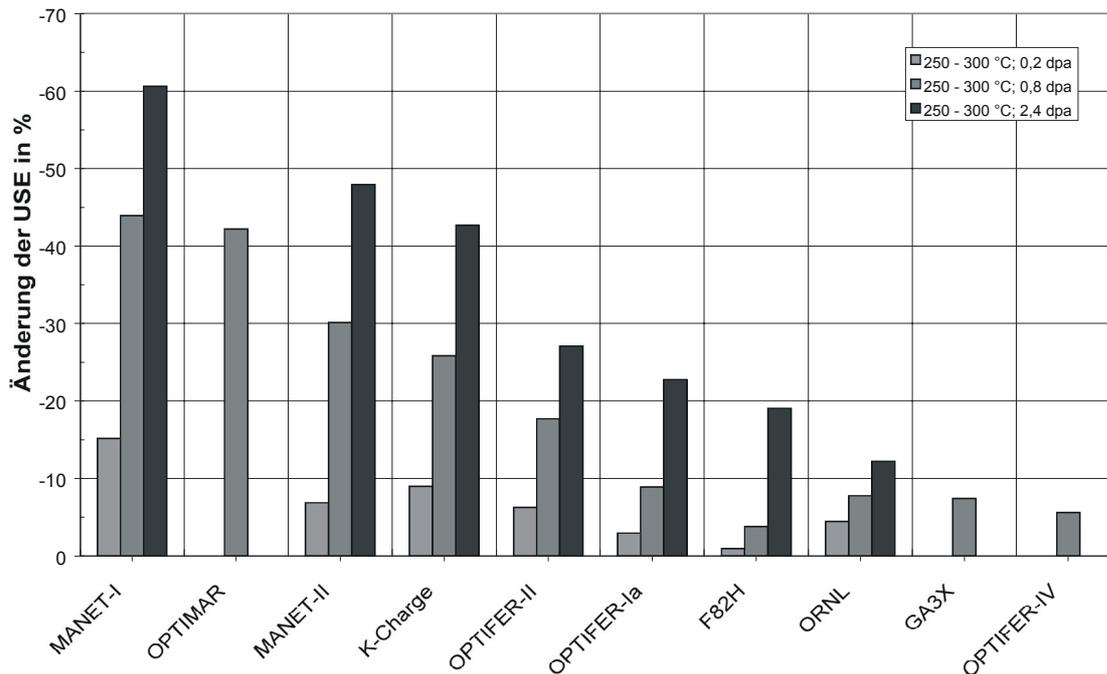


Abbildung 22: Bewertung der Legierungen nach dem Verlust in der Hochlagenenergie

Nach 2,4 dpa betragen die Einbußen an Hochlageenergie bei den konventionellen Stählen das doppelte von denen der niedrig aktivierbaren Legierungen, eine Beobachtung, die auch schon bei niedrigeren Bestrahlungsdosen gemacht werden konnte.

Wertet man die Versprödung nach dem klassischen DBTT-Verfahren aus, so ergibt sich für die Werkstoffe ein vergleichbares Bild (s. Abbildung 23).

Im unbestrahlten Zustand ist die Spröbruchübergangstemperatur der Kastencharge genauso niedrig oder sogar niedriger als die der niedrig aktivierbaren Stähle. Die bestrahlungsinduzierte Versprödung wirkt sich bei den Cr-NiMoVNb-Legierungen jedoch stärker aus. Die beiden Legierungen mit einem Wolframgehalt von 2% (ORNL, und F82H) zeigen den geringsten Bestrahlungseinfluß sowie die niedrigsten DBTT-Werte.

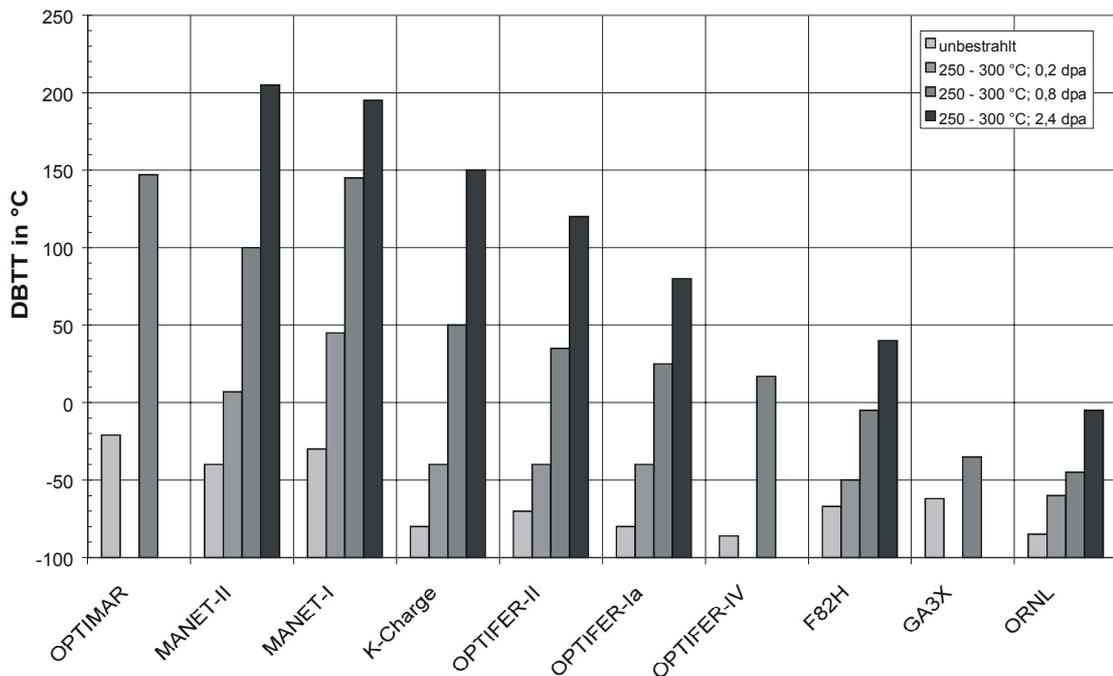


Abbildung 23: Bewertung der Legierungen nach der Sprödbruchübergangstemperatur

Zeigten in [2] nach 0,8 dpa schon die beiden Legierungen mit einem Wolframgehalt von 2% (ORNL und F82H) den geringsten Bestrahlungseinfluß sowie die niedrigsten DBTT-Werte, so plaziert sich in [1] mit GA3X ein weiterer 2%-W-Stahl dazwischen.

OPTIFER-IV lag nach 0,8 dpa im Bereich von OPTIFER-Ia und war sowohl im bestrahlten als auch im unbestrahlten Zustand geringfügig besser, gesicherte Aufschlüsse über sein Verhalten nach 2,4 dpa wird aber erst die Auswertung der Programme HFR IA und IB ergeben.

Durch die designorientierte Charakterisierung der Versprödung nach der niedrigsten Temperatur in der Hochlage verschieben sich erwartungsgemäß die Werte der unbestrahlten Werkstoffe gegenüber dem DBTT-Kriterium. Zwar bleiben die drei charakteristischen Gruppen (MANET/OPTIMAR/K-Charge; OPTIFER und F82H/ORNL/GA3X) erhalten, aber die Reihenfolge der einzelnen Materialien in der Bewertung ändert sich geringfügig, wie in Abbildung 24 ersichtlich ist.

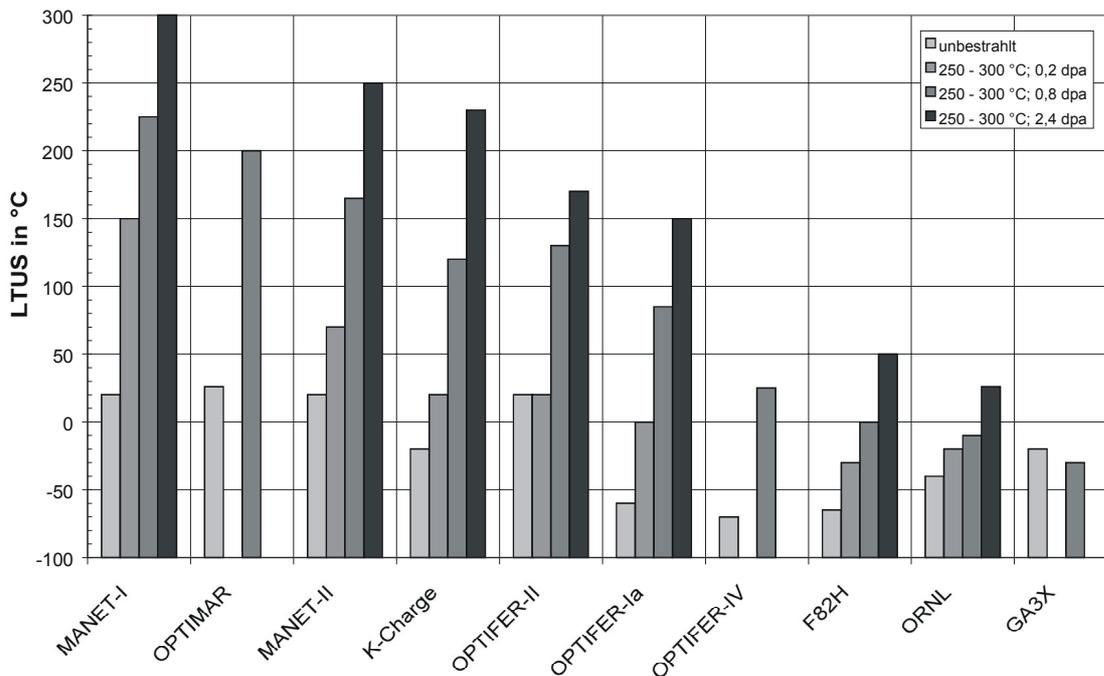


Abbildung 24: Bewertung der Legierungen nach der LTUS

Die MANET-Stähle verschlechtern sich gegenüber den beiden anderen konventionellen Legierungen, die Reihenfolge bei OPTIFER bleibt erhalten und der GA3X-Stahl zeigt die niedrigste Temperatur in der Hochlage von allen untersuchten Legierungen (wobei die weiter oben geäußerten Vorbehalte zu den Rückschlüssen aus den 0,8 dpa-Ergebnissen gelten).

Die sehr tiefen Versprödungstemperaturen der drei niedrig aktivierbaren Stählen mit 2 % Wolfram (GA3X, ORNL und F82H) bleiben erhalten, im unbestrahlten Zustand zeigte die Legierung OPTIFER-IV den besten LTUS-Wert, versprödet jedoch deutlich stärker als z.B. GA3X.

Bei der Bewertung der Festigkeit der unbestrahlten und mit 2,4 dpa bestrahlten Werkstoffe liegt die der Cr-NiMoVNb-Stähle am höchsten (s. Abbildung 25), die 0,8-dpa-Ergebnisse für OPTIFER-IV und GA3X lassen ein gewisses Potential dieser Legierungen erwarten. Liegen die übrigen niedrig aktivierbaren Legierungen mit ihrer Streckgrenze im unbestrahlten Zustand zum Teil noch deutlich, darunter, fällt der Unterschied nach Bestrahlung relativ gesehen nicht mehr so groß aus.

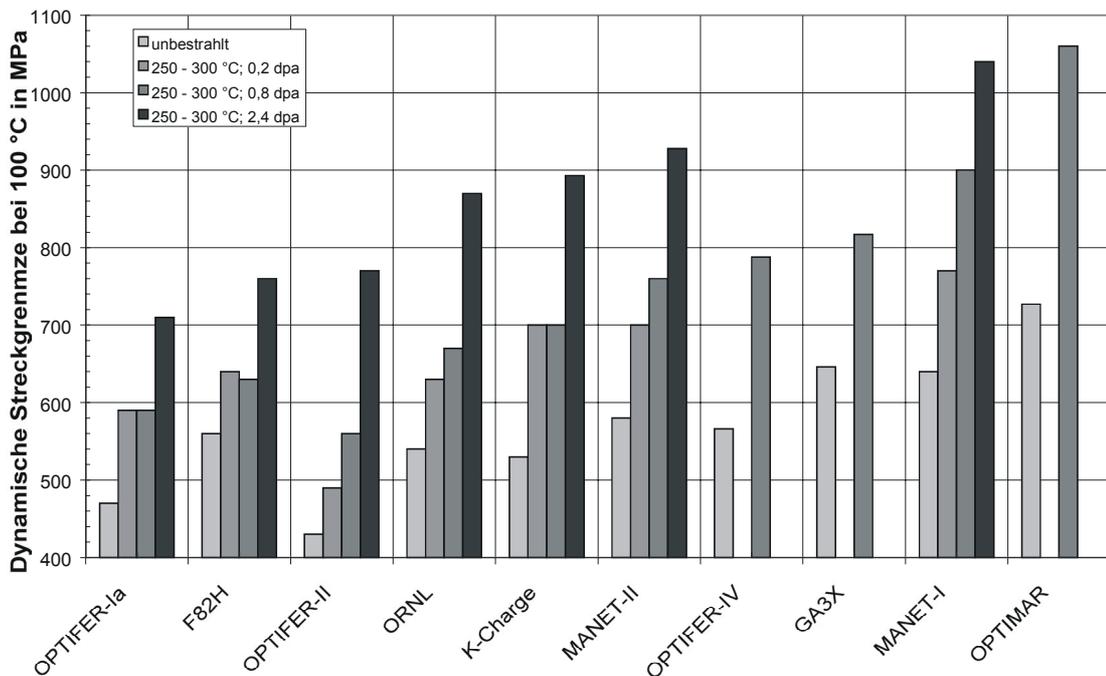


Abbildung 25: Bewertung der Legierungen nach der dynamischen Streckgrenze

So weist ORNL eine dynamische Streckgrenze auf, die durchaus das Niveau von MANET-II und der K-Charge erreicht. Der Sprung in der Verfestigung von 0,8 zu 2,4 dpa ist bei OPTIFER-II deutlich stärker ausgebildet als bei den anderen Legierungen.

Betrachtet man die mechanischen Eigenschaften der unbestrahlten Werkstoffe, so sind die K-Charge, OPTIFER-Ia-, ORNL- und annähernd F82H-Legierung gleichwertig. Nach Neutronenbestrahlung bis zu einer Dosis von 2,4 dpa bei Temperaturen zwischen 250 und 300°C zeigt der ORNL-Stahl bei allen untersuchten Materialeigenschaften den geringsten Bestrahlungseinfluß. Gleichzeitig liegt die Versprödungstemperatur bei diesem Stahl nach der Bestrahlung am tiefsten und die Festigkeit auf einem relativ hohen Niveau. Deshalb muß man unter den in Kapitel 6.1 gesetzten Voraussetzungen die ORNL-Legierung, dicht gefolgt vom F82H-Stahl, für Fusionsanwendungen am geeignetsten bezeichnen.

Läßt man die Ergebnisse aus der 0,8 dpa-Nachbeladung [1] mit einfließen, so muß auf jeden Fall auch der GA3X-Stahl berücksichtigt werden, der bei dieser Dosis herausragende Eigenschaften besitzt. Die Legierung OPTIFER-IV konnte sich im untersuchten Zustand deutlich von den anderen beiden OPTIFER-Stählen absetzen und zur Gruppe der vier besten Legierungen, gebildet aus GA3X, ORNL, F82H und eben OPTIFER-IV aufschließen.

6.3 BOR-GEHALT UND VERSPRÖDUNG

In [14] wurde ein Modell vorgestellt, das einen Zusammenhang zwischen dem Bor-Gehalt der untersuchten Stähle und deren Versprödungsverhalten herstellt.

Abbildung 26 zeigt dazu die Umwandlung des ^{10}B -Isotops unter Bestrahlungseinfluß sowie die Anhebung der DBTT einzelner Legierungen, hier am Beispiel für 300°C Bestrahlungstemperatur. Das aus [14] bekannte Diagramm wurde hier noch um die für OPTIMAR, OPTIFER-IV, und GA3X nach 0.8 dpa erhaltenen Werte ergänzt.

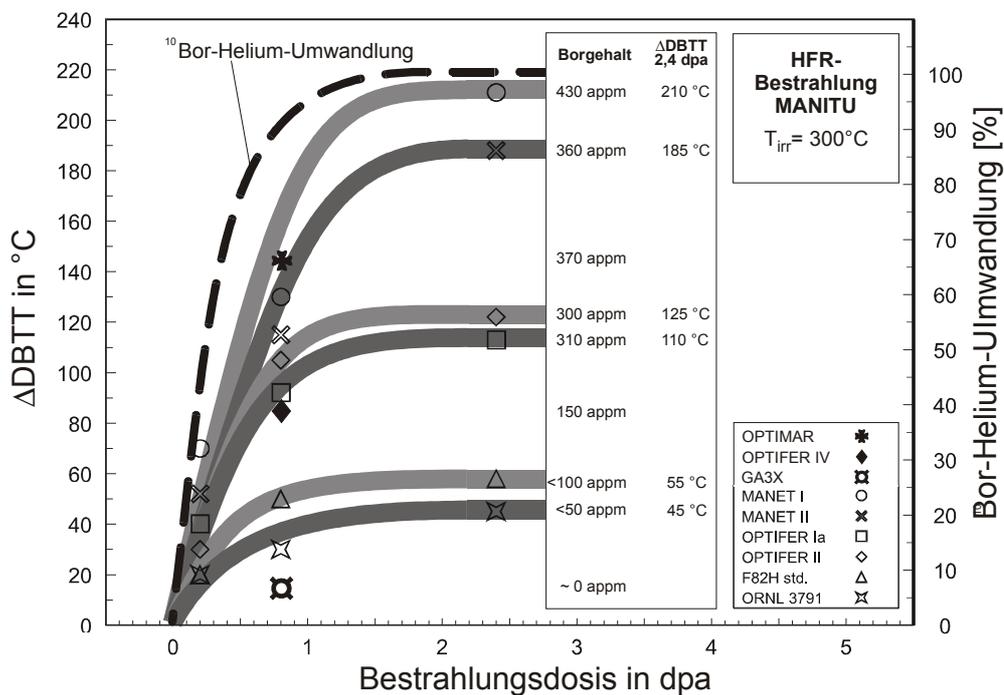


Abbildung 26: Bestrahlungsinduzierte Anhebung der Übergangstemperatur und ^{10}B -He-Umwandlung über der Bestrahlungsdosis

Es zeigt sich, daß die Anhebung der DBTT für alle Stähle in ähnlicher Art und Weise geschieht, nur mit verschiedenen vertikalen Streckungsfaktoren der Kurven.

In [23] war ein Helium-Einfluß auf die Kerbschlagergebnisse bestrahlter Proben vermutet worden. Detailliert wurde er in [14] beschrieben: der Bor-Gehalt scheint ein bestimmender Faktor für die bestrahlungsinduzierte Anhebung der Übergangstemperatur DBTT zu sein. Das ^{10}B Isotop, das immerhin 20% der natürlichen Bor-Zusammensetzung darstellt, ist ein starker Absorber für

thermische Neutronen. Es wandelt sich hierbei schon bei relativ geringen Neutronenflußdichten in Helium und Lithium um.

Helium kann in Form von Bläschen in den Bruchflächen bestrahlter Proben nachgewiesen werden. Ergänzende Untersuchungen, die Helium-dotierte Charpy-V-Proben verwendeten [27] zeigten einen Versprödungseffekt durch höhere Heliumgehalte, der bei weitem die bestrahlungsinduzierte Versprödung des Ausgangsmaterials übertraf. So stieg z.B. bei F82H nach 0,2 dpa Bestrahlung die Anhebung der Übergangstemperatur $\Delta DBTT$ von 18 auf 42°C.

In [14], wurde eine exponentielle Wachstumsfunktion zur Berechnung der bestrahlungsbedingten ^{10}B -Umwandlung herangezogen, wobei deren Konstanten aus den Neutronen-Berechnungen am HFR Petten bestimmt wurden [22]:

$$N(\text{He}) = N_0(^{10}\text{B}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{D}{\tau}} \right)$$

Hierbei sind:

$N(\text{He})$: Anzahl der He-Atome

$N_0(^{10}\text{B})$: ursprüngliche Anzahl der ^{10}B -Atome

D : Bestrahlungsdosis in dpa

τ : Dosiskonstante für den ^{10}B -Abbrand

Die Dosiskonstante τ wurde dabei so festgelegt, daß nach etwa 0,34 dpa noch $e^{-1} = 36,8\%$ des ursprünglichen ^{10}B vorhanden sind. Nach etwa 1,6 dpa sind somit 99,3% des ursprünglichen ^{10}B abgebrannt.

Die Bor-Helium-Umwandlungskurve ist in Abbildung 26 eingezeichnet worden und kann mit den Versprödungskurven der bestrahlten Materialien verglichen werden. Die Bor-Gehalte, wie sie in Tabelle 3 bzw. Anhang 10.4 gegeben sind, wurden den Kurven der einzelnen Legierungen auf der Höhe von 2,4 dpa (bzw. auf Höhe der Einzelpunkte, wo nur Werte bei 0,8 dpa vorlagen) zugeordnet.

Das Ergebnis ist offensichtlich: je höher der Bor-Gehalt der einzelnen Legierungen ist, desto steiler verlaufen die Kurven. Dieser Effekt übertrifft alle anderen Einflußfaktoren, insbesondere die Variation der einzelnen Legierungen im Chromgehalt, welche unter unbestrahlten Bedingungen noch eine erhebliche Rolle spielte.

Die DBTT-Anhebung der drei nur mit 0,8 dpa bestrahlten Werkstoffe fügt sich bei dieser Bestrahlungsdosis sehr gut in das Diagramm und somit die bisherigen Untersuchungsergebnisse und läßt sich ebenfalls mit dem Bor-Gehalt in Verbindung bringen.

6.4 DOSIS- UND TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES BESTRAHLUNGSEINFLUSSES

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der 7 mit allen drei Dosen bestrahlten Legierungen in dreidimensionaler Form dargestellt. Dies sind MANET-I/II, K-Charge, OPTIFER-Ia/II, F82H und ORNL 3791.

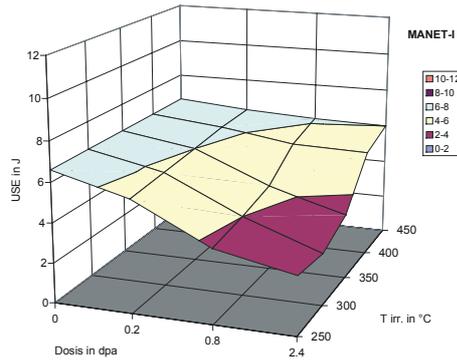
Als Parameter dienen die Bestrahlungsdosis (0; 0,2; 0,8; 2,4 dpa) und die Bestrahlungstemperatur (250, 300, 350, 400, 450 °C). Dargestellt sind die Energie in der Hochlage USE, die prozentuale Änderung der Energie in der Hochlage Δ USE, die Übergangstemperatur DBTT, die tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS sowie die dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} .

Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Diagramme in der Ordinate für alle Materialien trotz ihrer erheblich unterschiedlichen Wertebereiche gleich skaliert, was auch für die Farbgebung der dreidimensionalen Oberfläche gilt.

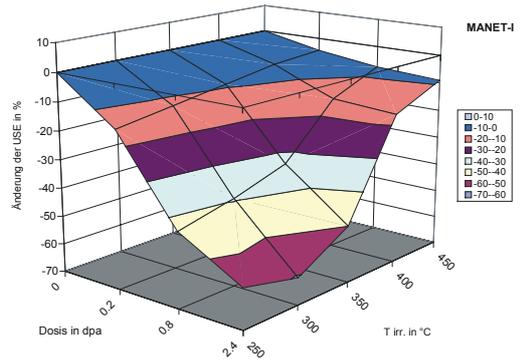
Zu beachten ist, daß die Diagramme für die unterschiedlichen Bestrahlungsdosen äquidistant skaliert sind, obwohl deren Abstufung mit 0,2; 0,6 und 1,6 dpa dies nicht ist. Außerdem sind im Dienste einer besseren Ablesbarkeit die Abszissen in den beiden Diagrammen für USE und Δ USE in umgekehrter Richtung skaliert als in den drei übrigen Diagrammen.

Sehr deutlich ist auf den nachfolgenden Bildern zu erkennen, daß im Bereich bis 2,4 dpa dem Temperatureinfluß bei den untersuchten Legierungen eine genauso große Bedeutung zukommt wie der Bestrahlungsdosis. Ebenso wird augenfällig, wie gering die Bestrahlungseinflüsse auf den ORNL-Stahl verglichen z.B. mit MANET sind.

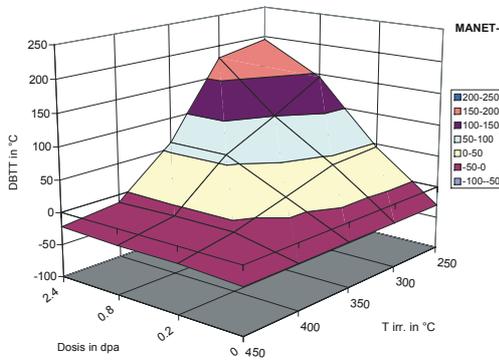
6.4.1 MANET-I



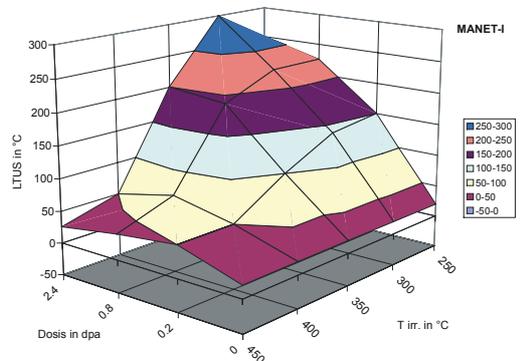
a) Energie in der Hochlage USE in J



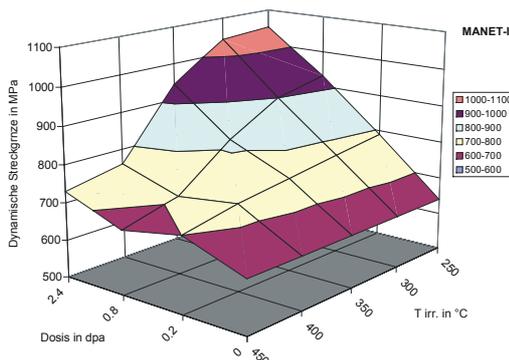
b) Änderung der Hochlageenergie ΔUSE in %



c) Sprödbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C

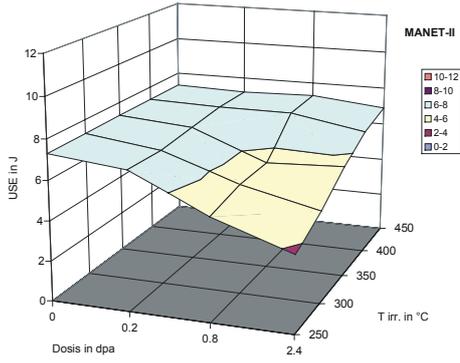


e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

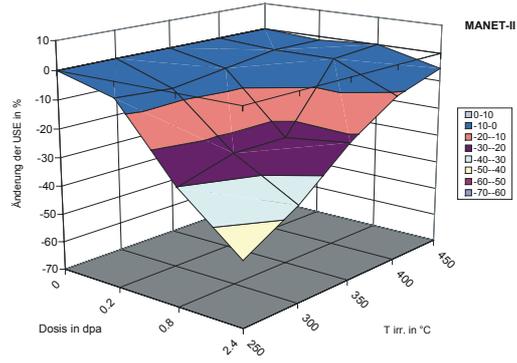
MANET-I
 1.4914, Chg. 53645
 980°C/2h + 1075°C/0,5h
 + 750°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 27: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf MANET-I

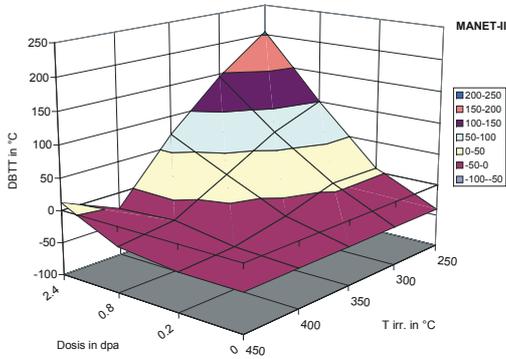
6.4.2 MANET-II



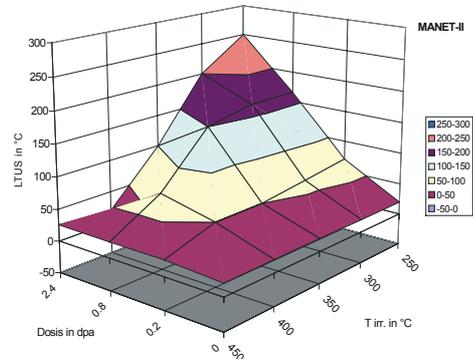
a) Energie in der Hochlage USE in J



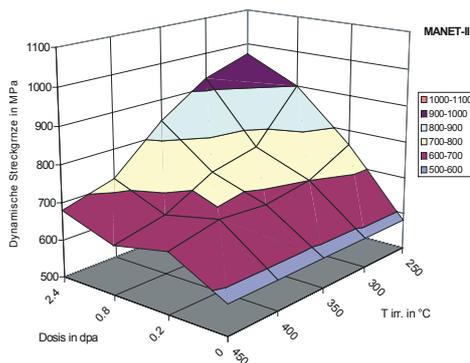
b) Änderung der Hochlageenergie ΔUSE in %



c) Spröbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C

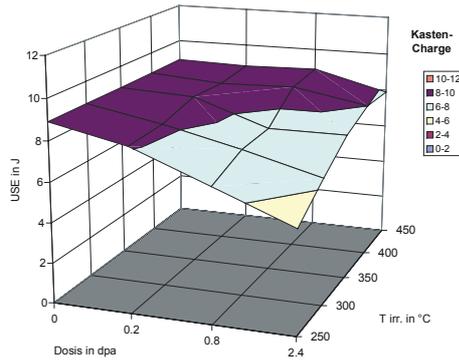


e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

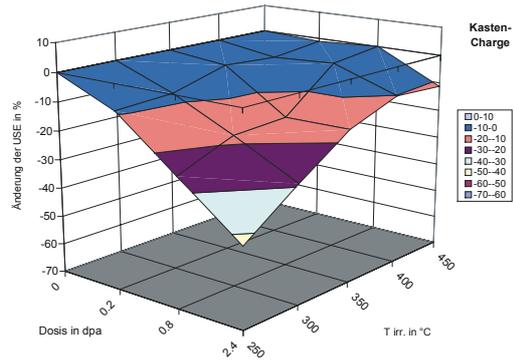
MANET-II
 1.4914, Chg. 50805
 965°C/2h + 1075°C/0,5h
 + 750°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 28: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf MANET-II

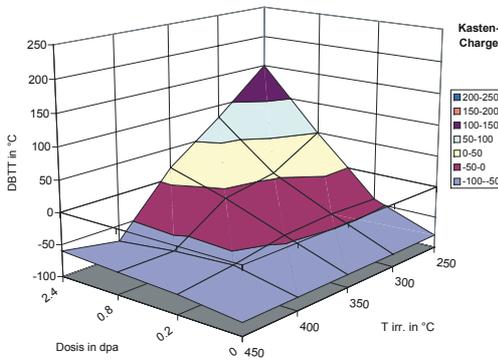
6.4.3 Kasten-Charge



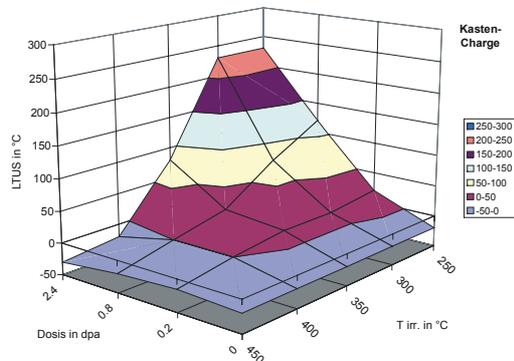
a) Energie in der Hochlage USE in J



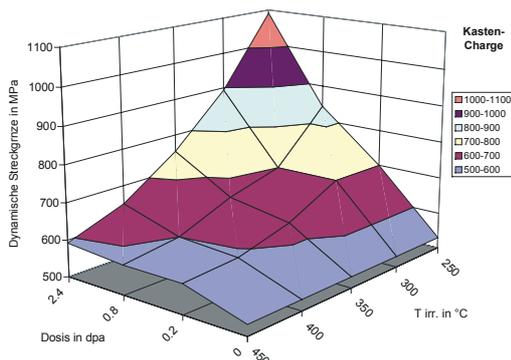
b) Änderung der Hochlageenergie ΔUSE in %



c) Sprödbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C

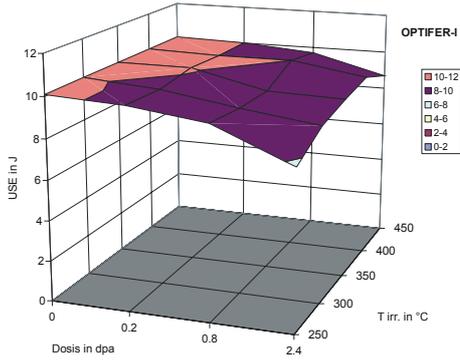


e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

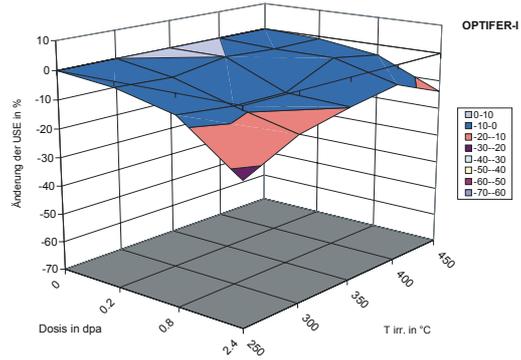
Kasten-Charge
 1.4914, Chg. 51482
 1075°C/0,5h + 765°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 29: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf die Kasten-Charge

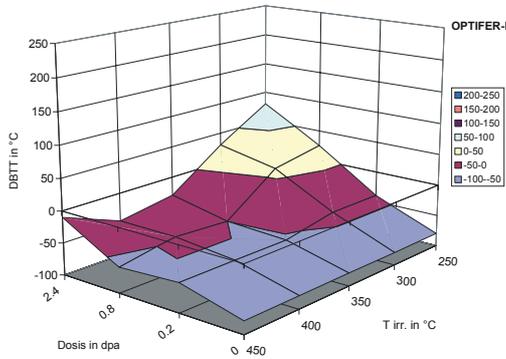
6.4.4 OPTIFER-Ia



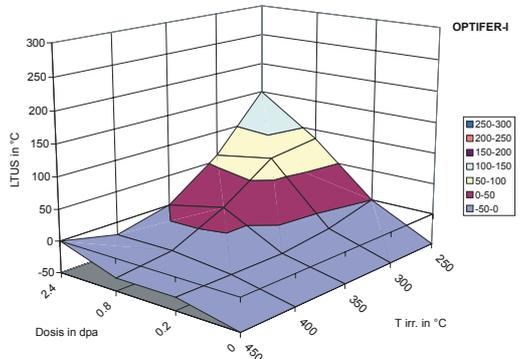
a) Energie in der Hochlage USE in J



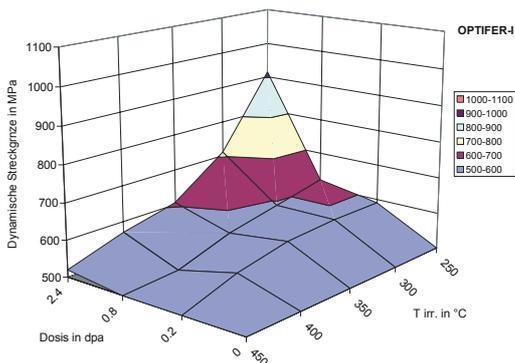
b) Änderung der Hochlageenergie ΔUSE in %



c) Sprödbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C

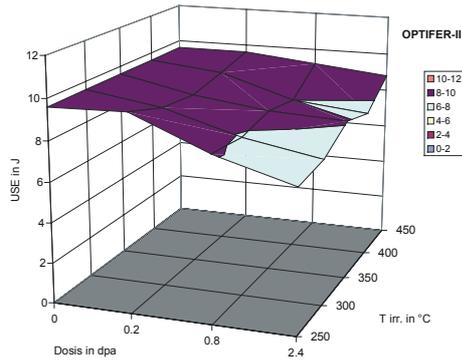


e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

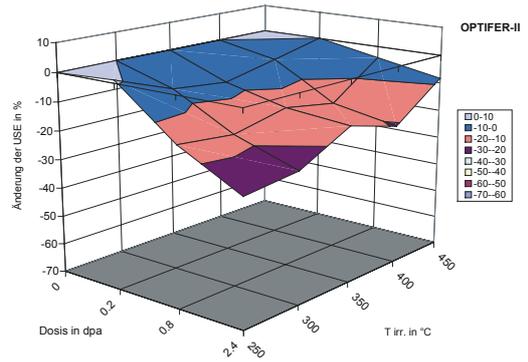
OPTIFER-Ia
 Chg. 664
 1075°C/0,5h + 780°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 30: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf OPTIFER-Ia

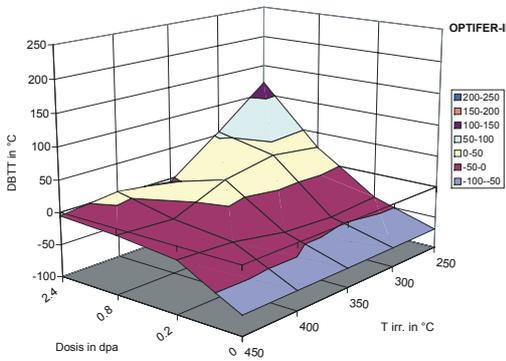
6.4.5 OPTIFER-II



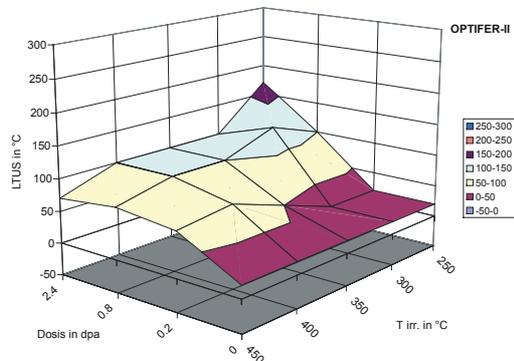
a) Energie in der Hochlage USE in J



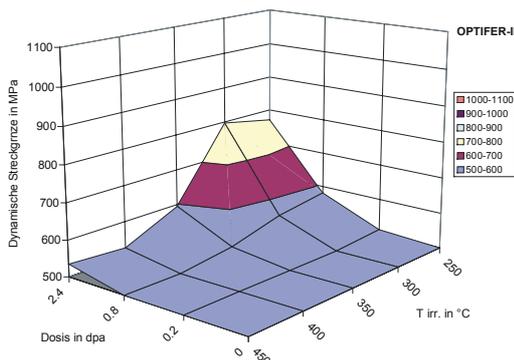
b) Änderung der Hochlageenergie ΔUSE in %



c) Sprödbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C

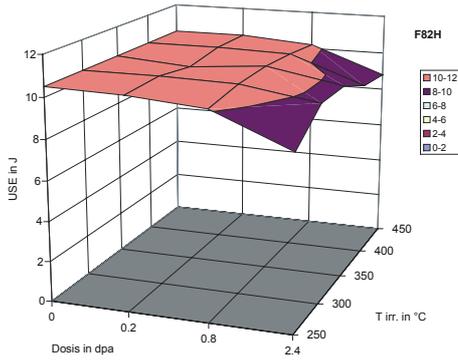


e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

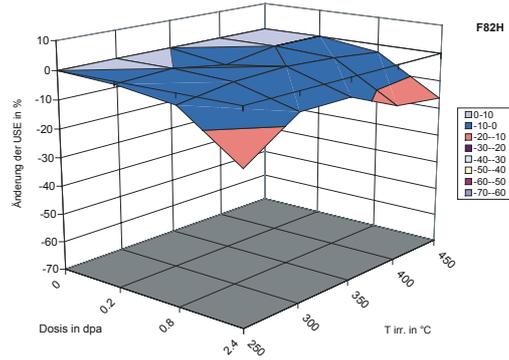
OPTIFER-II
 Chg. 668
 950°C/0,5h + 780°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 31: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf OPTIFER-II

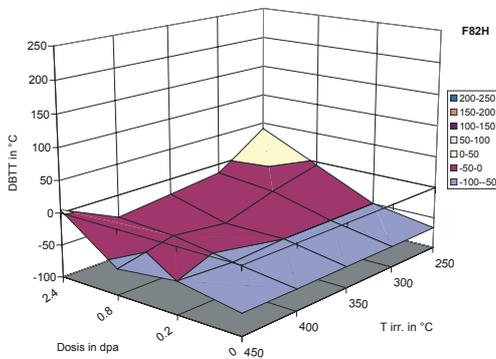
6.4.6 F82H



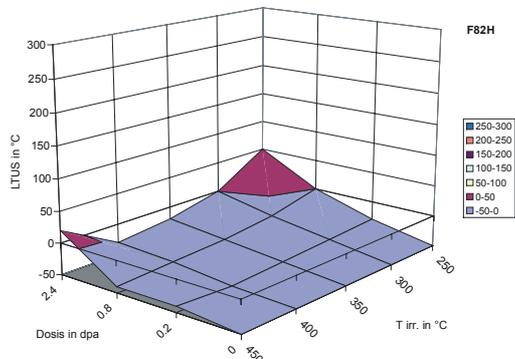
a) Energie in der Hochlage USE in J



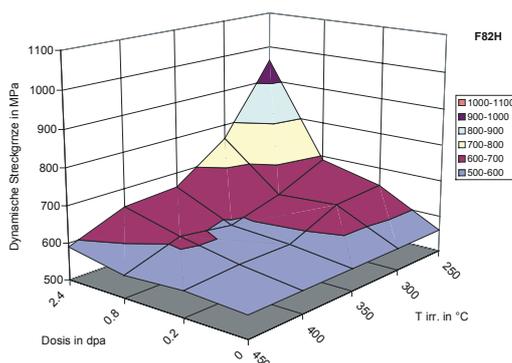
b) Änderung der Hochlageenergie Δ USE in %



c) Spröbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C

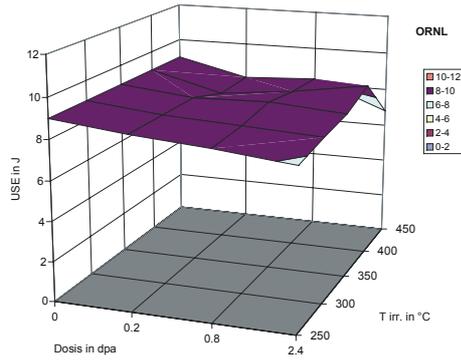


e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

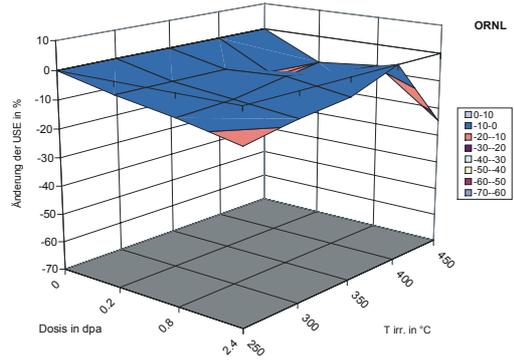
F82H
 Pre-Chg.
 1040°C/0,5h + 750°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 32: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf F82H

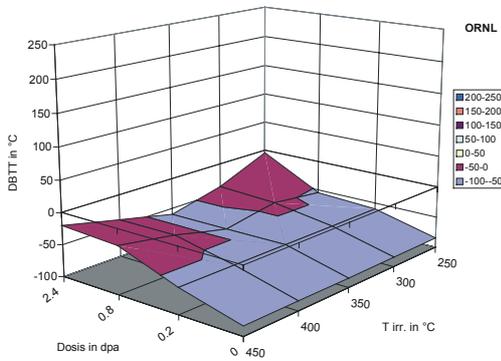
6.4.7 ORNL



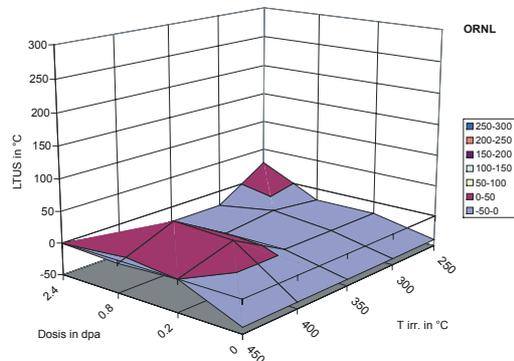
a) Energie in der Hochlage USE in J



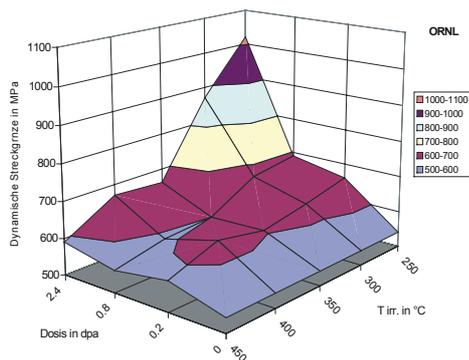
b) Änderung der Hochlageenergie ΔUSE in %



c) Sprödbruchübergangstemperatur DBTT in °C



d) tiefste Temperatur in der Hochlage LTUS in °C



e) Dynamische Streckgrenze bei 100°C σ_{Dy} in MPa

ORNL 3791
 Chg. 3791
 1040°C/0,5h + 750°C/2h
 unbestrahlt; 0,2; 0,8; 2,4 dpa
 250, 300, 350, 400, 450 °C

Abbildung 33: Dosis- und Temperaturabhängigkeit des Bestrahlungseinflusses auf ORNL 3791

7 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der zweiten Phase des Bestrahlungsprogramms MANITU wurden drei 10-11 % Cr-NiMoVNB-Stähle und vier niedrig aktivierbare 7-9 % Cr-WVTa- bzw. Cr-GeVTa-Legierungen nach Bestrahlung bis zu einer Dosis von 2,4 dpa untersucht. Aus instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen mit miniaturisierten Proben wurden die mechanischen Eigenschaften (Schlagarbeit in der Hochlage, Sprödbruchübergangstemperatur, niedrigste Temperatur in der Hochlage und dynamische Streckgrenze) in Abhängigkeit von Bestrahlungstemperaturen zwischen 250 und 450°C ermittelt.

Aus der Untersuchung der unbestrahlten Proben ergab sich, daß die niedrig aktivierbaren Legierungen den kommerziellen Cr-NiMoVNB-Stählen bezüglich der Kerbschlagzähigkeit und designrelevanten Versprödungstemperatur überlegen sind. Dies gilt in besonderem Maße dann, wenn man beachtet, daß die untersuchte Kastencharge aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Wärmebehandlung vermutlich die maximal möglichen Kerbschlag-eigenschaften unter den 10-11 % Cr-NiMoVNB-Stähle aufweist und wenn man berücksichtigt, daß keine der untersuchten niedrig aktivierbaren Legierungen einer optimierten Wärmebehandlung unterzogen wurde.

Beim Einsatz von martensitischen Stählen in zukünftigen Kernfusionsanlagen ist das Versprödungsverhalten bei niedrigen Bestrahlungstemperaturen das ausschlaggebende Kriterium für die Materialauswahl. Nach Neutronenbestrahlung zeigen von den zehn insgesamt untersuchten Legierungen vier – ORNL, GA3X, F82H und OPTIFER-IV - ein in dieser Reihenfolge zu sehendes überragendes Versprödungsverhalten im Temperaturbereich zwischen 250 und 300°C. Allerdings muß der Vorbehalt gelten, daß die GA3X- und OPTIFER-IV-Stähle nur bei einer Dosis von 0,8 dpa, dort aber mit sehr guten Ergebnissen, vorlagen.

Dies gilt für beide Versprödungstemperaturen (DBTT und LTUS) als Absolutwerte sowie für den Bestrahlungseinfluß auf diese Größen. Die beiden frühen OPTIFER-Legierungen Ia und II und die Kastencharge weisen nach Bestrahlung deutlich schlechtere Versprödungswerte auf. Die höchste bestrahlungsinduzierte Versprödung tritt bei den beiden MANET- und OPTIMAR-Stählen auf.

Bei den niedrig aktivierbaren Legierungen ist der Bestrahlungseinfluß auf die mechanischen Eigenschaften geringer als bei den Cr-NiMoVNB-Stählen ausgeprägt. Dies gilt vor allem für die Energie in der Hochlage und die dynamische Streckgrenze.

Die höchste Festigkeit wird durch Molybdän erreicht. Etwas niedrigere Festigkeitswerte zeigen die Legierungen mit Wolfram, wobei ein höherer Wolframgehalt nicht zwangsläufig eine höhere Festigkeit bedeutet.

Dafür ist eindeutig, daß die Stähle mit 2% Wolframgehalt die niedrigsten Versprödungstemperaturen aufweisen.

Ebenso fällt auf, daß OPTIFER-IV gegenüber OPTIFER-Ia einen halbierten Bor-Gehalt und bessere Versprödungseigenschaften besitzt. Die Anhebung der Versprödungstemperaturen fügt sich in die in [14] gemachten Ausführungen, die einen Zusammenhang zwischen der ^{10}Bor -Helium-Umwandlung und der Versprödungstemperatur vermuten.

Keiner der untersuchten Stähle besitzt eine für Kerbschlageigenschaften optimierte Wärmebehandlung. Dennoch darf nicht außer Acht gelassen werden, daß die Wärmebehandlungen der miteinander verglichenen Legierungen nicht identisch sind. Im Vergleich zu MANET-I besitzt OPTIMAR eine niedrigere Anlaßtemperatur, die eine höhere Versprödungstemperatur begünstigt [11].

Die Untersuchung der martensitischen Stähle im Rahmen der beiden Phasen des Bestrahlungsprogramms MANITU hat gezeigt, daß niedrig aktivierbare Cr-W- und Cr-Ge-Legierungen nach Neutronenbestrahlung nicht generell ein erheblich besseres Versprödungsverhalten aufweisen als kommerzielle, modifizierte 10-11 % Cr-NiMoVNB-Legierungen. Allerdings unterscheiden sich hierbei der GA3X- und ORNL-Stahl ganz besonders von allen anderen untersuchten Legierungen. Bei diesen Werkstoffen tritt bei Bestrahlungstemperaturen unterhalb von 350°C nur zwar erhebliche bestrahlungsinduzierte Verfestigung, jedoch relativ geringe Versprödung ein. Da der ORNL- und GA3X-Stahl zudem die niedrigsten Versprödungstemperaturen bei relativ hoher Festigkeit aufweisen, sind diese Legierung (dicht gefolgt vom F82H- und OPTIFER-IV-Stahl) unter den im Kapitel 6.1 erläuterten und den weiter oben gemachten Vorbehalten für Fusionsanwendungen prädestiniert.

Zukünftige Bestrahlungsprogramme, insbesondere "ARBOR" und "SPICE" [5] werden das Verhalten dieser erfolgversprechenden Legierungen und ihrer Fortentwicklungen (EUROFER97) auch unter höheren Dosisbelastungen zeigen.

8 DANKSAGUNG

Die Autoren danken den Herren Kunisch und Drasl für die tatkräftige Unterstützung bei den Prüfungen und Wartungsarbeiten in den Heißen Zellen.

Besonderer Dank gilt Herrn Rieth, auf dessen Vorarbeit am IMF-II die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse beruhen.

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.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H.-C. Schneider, M. Rieth, B. Dafferner, H. Ries, O. Romer, Bestrahlungsprogramm MANITU: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche mit den bis 0,8 dpa bestrahlten Werkstoffen der zweiten Bestrahlungsphase, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6519, September 2000.
- [2] M. Rieth, B. Dafferner, H. Ries, O. Romer, Bestrahlungsprogramm MANITU: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche mit den bis 0,8 dpa bestrahlten Werkstoffen der ersten Bestrahlungsphase, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5619, September 1995.
- [3] M. Rieth, B. Dafferner, H. Ries, O. Romer, Bestrahlungsprogramm MANITU: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche mit den bis 0,2 dpa bestrahlten Werkstoffen, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5750, April 1997.
- [4] M. Rieth, B. Dafferner, H. Ries, O. Romer, Bestrahlungsprogramm MANITU: Ergebnisse der Voruntersuchungen und der Kerbschlagbiegeversuche mit den unbestrahlten Werkstoffen, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5550, April 1995.
- [5] H.-C. Schneider, Interner Bericht, Institut für Materialforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, Dezember 2000.
- [6] W. Böhme, W. Klemm, Ergebnisse des Ringtests „Kerbform“ der DVM-Arbeitsgruppe „Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch“, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, IWM-Bericht W 7/93, November 1993.
- [7] C. Wassilew, M. Rieth, B. Dafferner, Verfahren zur Störgrößenkompensation bei instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 4796, Oktober 1990.
- [8] J.M. Alexander, T.J. Komoly, On the yielding of a rigid/plastic bar with an IZOD notch, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 10, (1962) 265-275.
- [9] W.L. Server, Impact Three-Point Bend Testing for Notched and Precracked Specimens, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 6, No.1, Jan. 1978, pp. 29-34.
- [10] L.O. Schäfer, H. Kempe, W. Meyer, Zug- und Kerbschlageigenschaften des martensitischen Stahles MANET-II und deren Optimierung, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5245, Oktober 1993.
- [11] M. Rieth, B. Dafferner, C. Wassilew, Der Einfluß von Wärmebehandlung und Neutronenbestrahlung auf die Kerbschlageigenschaften des martensitischen 10,6% Cr-Stahls MANET-I, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5243, September 1993.
- [12] K.K. Bae, K. Ehrlich and A. Möslang, Tensile behaviour and microstructure of the helium and hydrogen implanted 12% Cr steel MANET, J. Nucl. Mater. 191-194 (1992) 905-909.
- [13] P. Fraipont, G.P. Tartaglia, MANITU Project D 271: Design and Safety Report, Joint Research Centre, Institute for Advanced Materials/Petten Site, P/F1/94/12, July 1994.

- [14] M. Rieth, B. Dafferner, H.-D. Röhrig, Embrittlement behaviour of different international low activation alloys after neutron irradiation, *Journal of Nuclear Materials* 258 – 263 (1998) 1147-1152.
- [15] M. Schirra, S. Heger, H. Meinzer, B. Ritter, W. Schweiger, Untersuchungen zum Vergütungsverhalten, Umwandlungsverhalten und der mechanischen Eigenschaften am martensitischen Stahl 1.4914 (NET-Charge MANET-I), Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 4561, Juni 1989.
- [16] M. Schirra, P. Graf, S. Heger, H. Meinzer, W. Schweiger, H. Zimmermann, MANET-II, Untersuchungsergebnisse zum Umwandlungs- und Vergütungsverhalten und Prüfung mechanischer Eigenschaften, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5177, Mai 1993.
- [17] E. Materna-Morris, Mikrostrukturelle Untersuchungen und Fraktographie an einem Nb-haltigen martensitischen 12%-Chromstahl (DIN 1.4914) mit abgesenktem Stickstoffgehalt, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 4288, Juli 1989.
- [18] M. Rieth, B. Dafferner, C. Wassilew, Der Einfluß der chemischen Zusammensetzung verschiedener Hüllkastenwerkstoffe vom Typ 1.4914 auf die Kerbschlageigenschaften vor und nach Neutronenbestrahlung, Jahrestagung Kerntechnik, Deutsches Atomforum e.V., Stuttgart, Mai 1994, 347-350.
- [19] M. Schirra, Charakterisierende thermische und mechanische Untersuchungen an einem Nb-legierten martensitischen 12% Cr-Stahl (W.Nr. 1.4914) mit abgesenktem Stickstoffgehalt, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 3640, August 1984.
- [20] M. Schirra, S. Heger, Der Einfluß des δ -Ferrit-Gehaltes auf die Vergütungseigenschaften und das Zugfestigkeits- und Zeitstandverhalten eines Cr-Ni-Mo-V-Nb-Stahles mit 9-14 % Chrom, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5080, Februar 1994.
- [21] M. Rieth, B. Dafferner, H. Ries, O. Romer, Bestrahlungsprogramm SAMARCANDE, Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5264, August 1994.
- [22] J. Ahlf, A. Zurita, High Flux Reactor (HFR) Petten - Characteristics of the Installation and the Irradiation Facilities, *Nuclear Science and Technology*, EUR 15151 EN, 1993.
- [23] M. Rieth, B. Dafferner, H.D. Röhrig, C. Wassilew, The charpy impact properties of martensitic 10.6% Cr steel (MANET-I) before and after neutron exposure, *Fusion Engineering and Design* 29 (1995) 365-370.
- [24] L. Schäfer, H. Kempe, Metallkundliche und mechanische Untersuchungen an dem schwach aktivierbaren martensitischen Chromstahl OPTIFER-IV, Institut für Materialforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5353, August 1994.
- [25] L. Schäfer, H. Kempe, W. Meyer, Interner Bericht, Institut für Materialforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, Juni 1995.

- [26] H.-C. Schneider, Post-Irradiation Tensile and Impact Properties, MileStone Meeting 5 on Data Base Evaluation RAFM steel, November 2000, ENEA C. R. Brasimone
- [27] R. Lindau, A. Möslang, D. Preininger, M. Rieth, H.D. Röhrig, Influence of helium on impact properties of reduced-activation ferritic/martensitic Cr-steels, Journal of Nuclear Materials. 271-272 (1999) 450-454

10 ANHANG

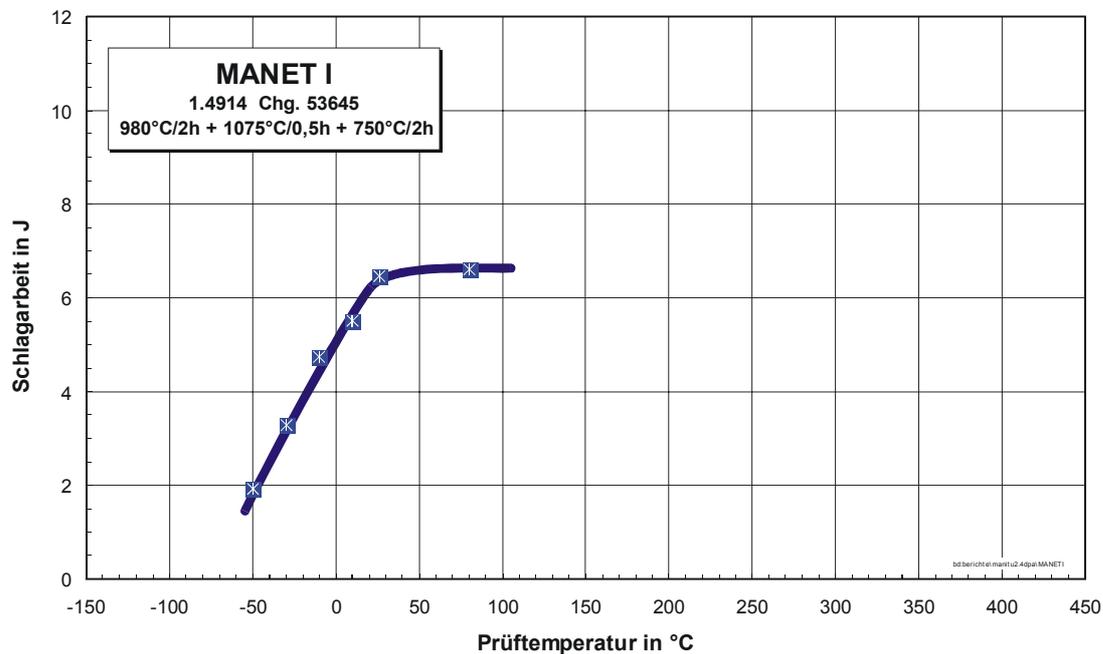
10.1 VERSUCHSERGEBNISSE UND PROBENZUORDNUNG

10.1.1 MANET-I

10.1.1.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
G01	80	6,61	645,5
G02	26	6,46	-
G03	-10	4,74	810,0
G04	-30	3,28	734,9
G05	-50	1,92	818,8
G06	10	5,52	687,8



10.1.1.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A01	0	0,92	966,1
A06	26	1,98	848,9
A02	80	4,05	838,0
A03	150	5,45	760,1
A04	250	5,41	714,8

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A08	0	0,83	848,6
A07	26	2,43	851,9
A09	50	3,17	-
A10	80	4,5	-
A11	150	5,81	780,4
A12	300	5,29	683,6

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A16	-80	0,16	820,3
A15	0	2,26	809,8
A13	27	3,56	789,0
A14	80	5,54	769,0
A17	100	5,85	741,4
A18	350	5,59	605,0

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A21	-30	1,72	906,8
A20	10	4,59	825,8
A19	50	6,20	726,7
A22	100	6,07	723,9
A23	300	5,79	610,1

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A27	-30	2,79	862,8
A26	0	4,71	802,9
A25	26	5,61	856,5
A28	50	6,00	721,8
A29	100	6,28	696,3
A30	300	6,19	595,9

10.1.1.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A33	50	0,33	907,6
A35	100	0,8	925,9
A31	150	2,03	968,6
A32	200	3,34	919,7
A34	250	3,65	871,1

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A41	50	1,17	902,8
A38	100	1,92	895,4
A39	150	2,89	865
A37	200	3,57	816,2
A40	300	3,96	749,2

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A46	-20	0,47	834,5
A44	26	1,5	901,5
A43	100	3,09	816,2
A45	200	4,2	773,6
A47	350	4,41	676,1

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A52	-30	2,01	834,5
A51	0	3,26	828,4
A49	30	4,9	-
A50	100	5,66	706,6
A53	300	5,69	590,8

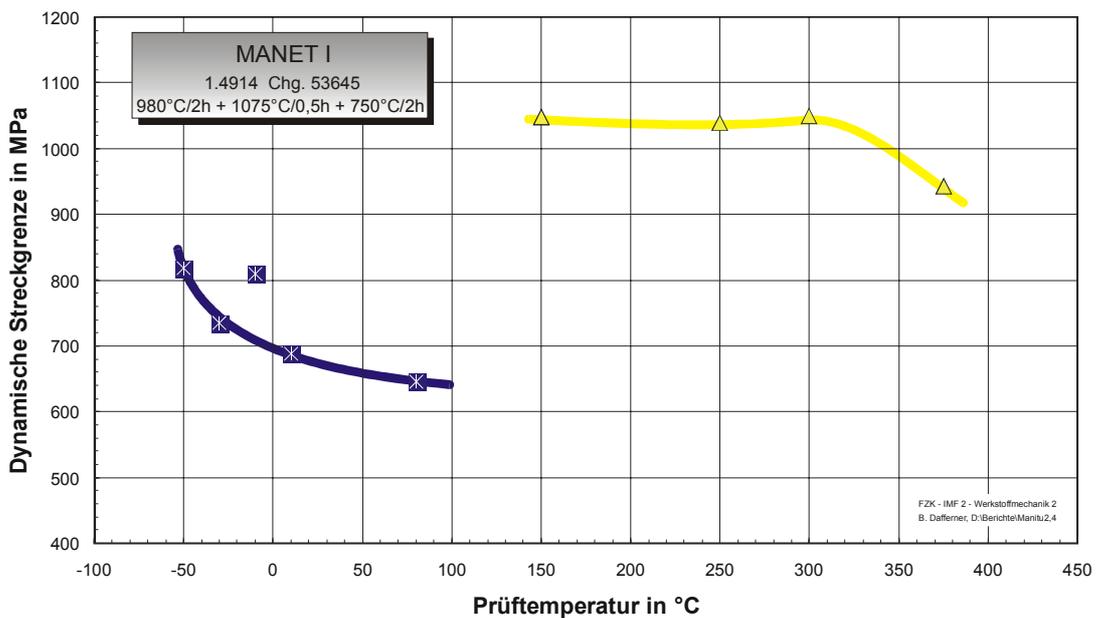
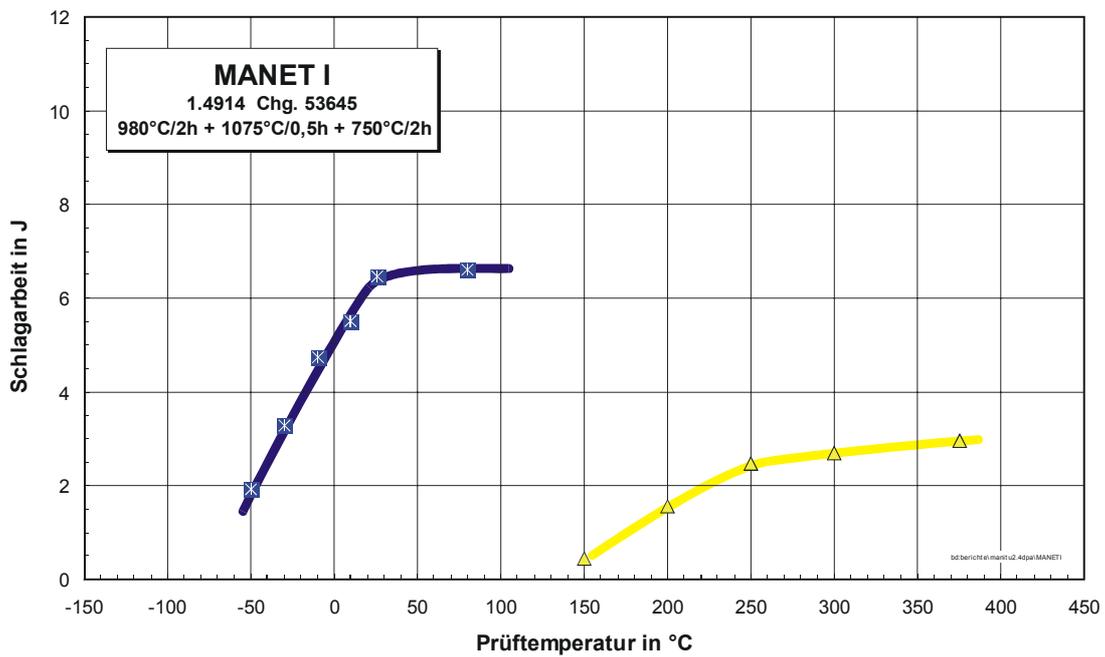
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A55	0	4,81	797,9
A56	-30	2,59	-
A57	26	5,76	737
A58	80	6,07	700,6
A59	-50	1,81	865

10.1.1.4 2,4 dpa

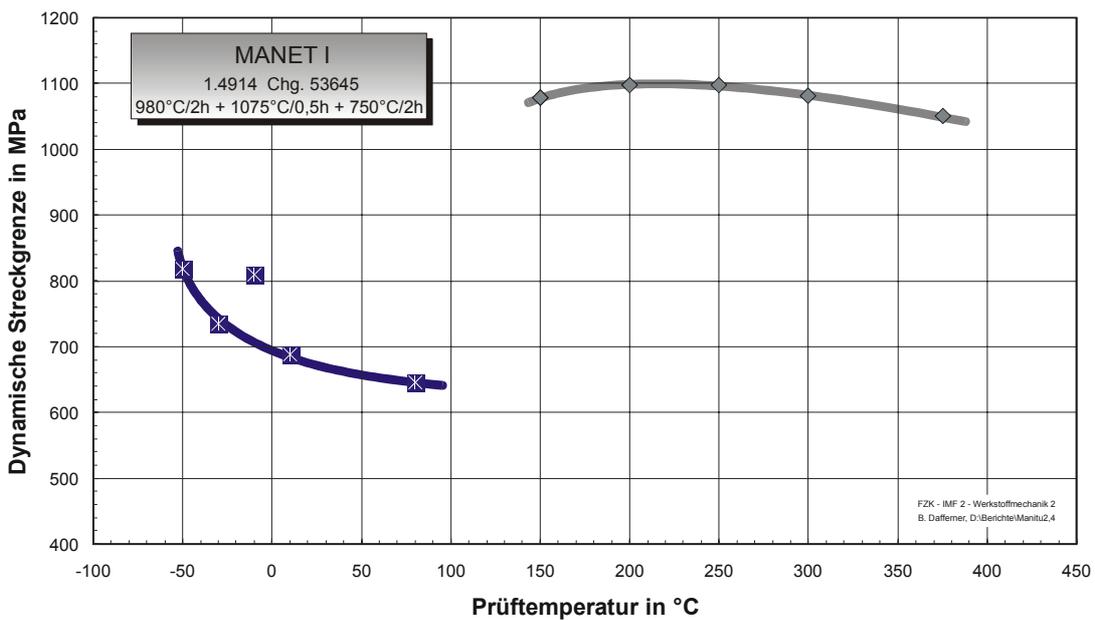
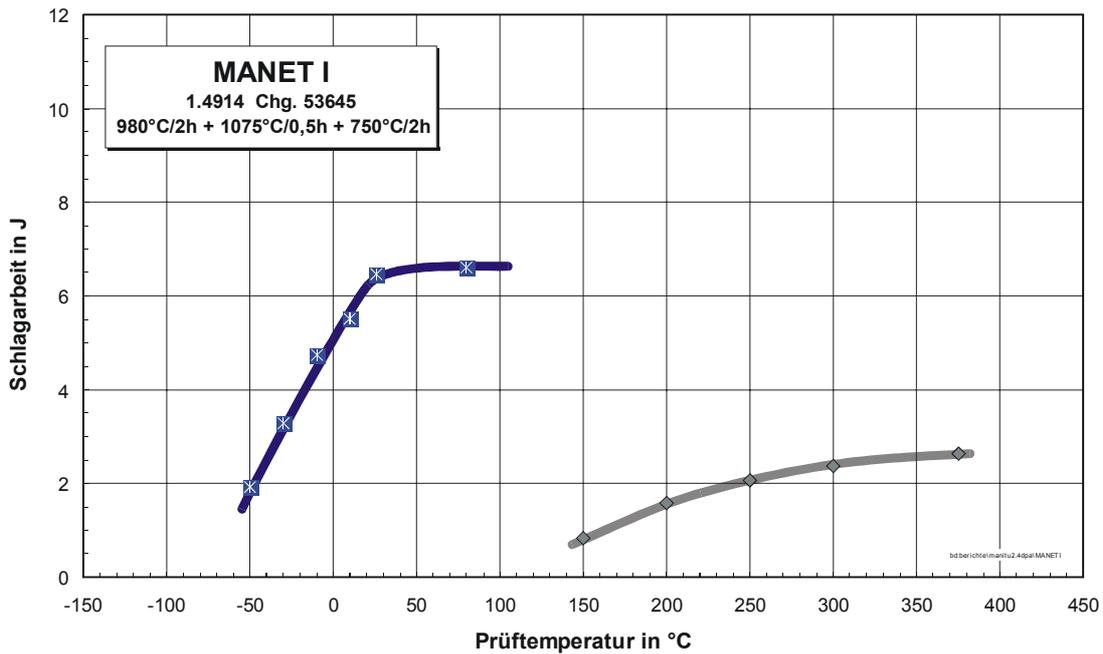
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A63	150	0,45	1048
A61	200	1,56	-
A62	250	2,46	1040
A64	300	2,71	1049
A65	375	2,96	943



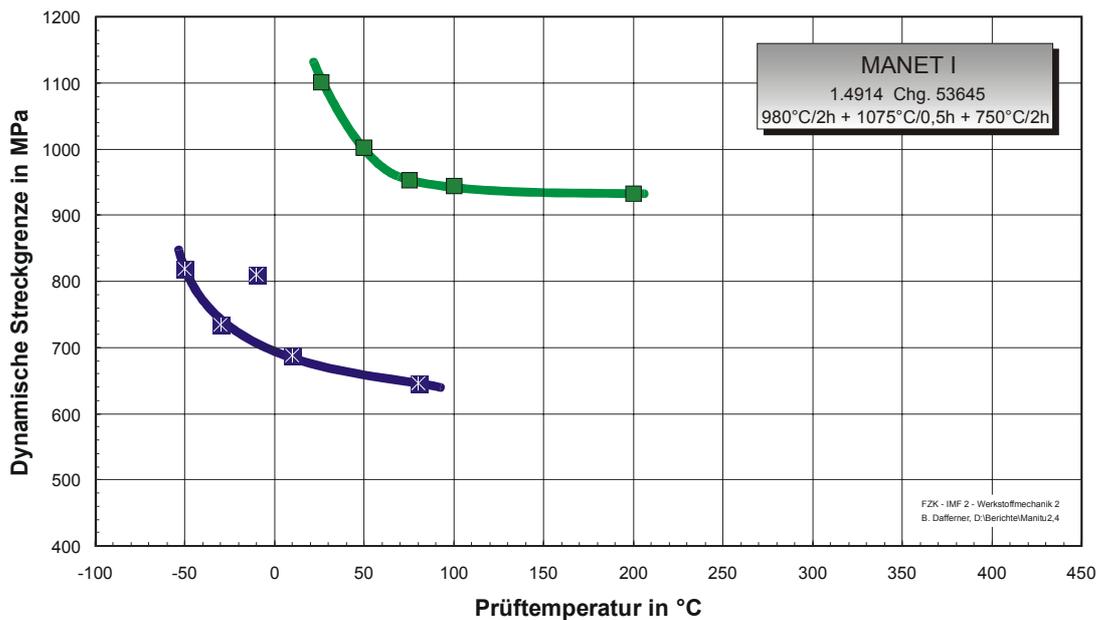
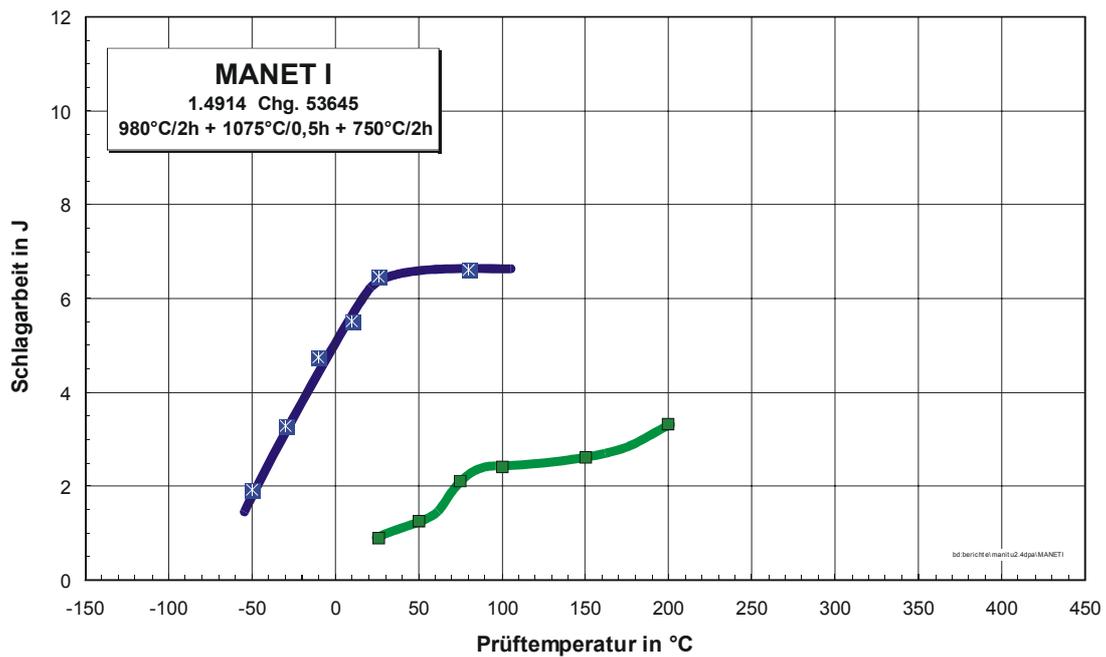
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A68	150	0,83	1079
A67	200	1,58	1098
A70	250	2,06	1098
A69	300	2,37	1082
A71	375	2,63	1051



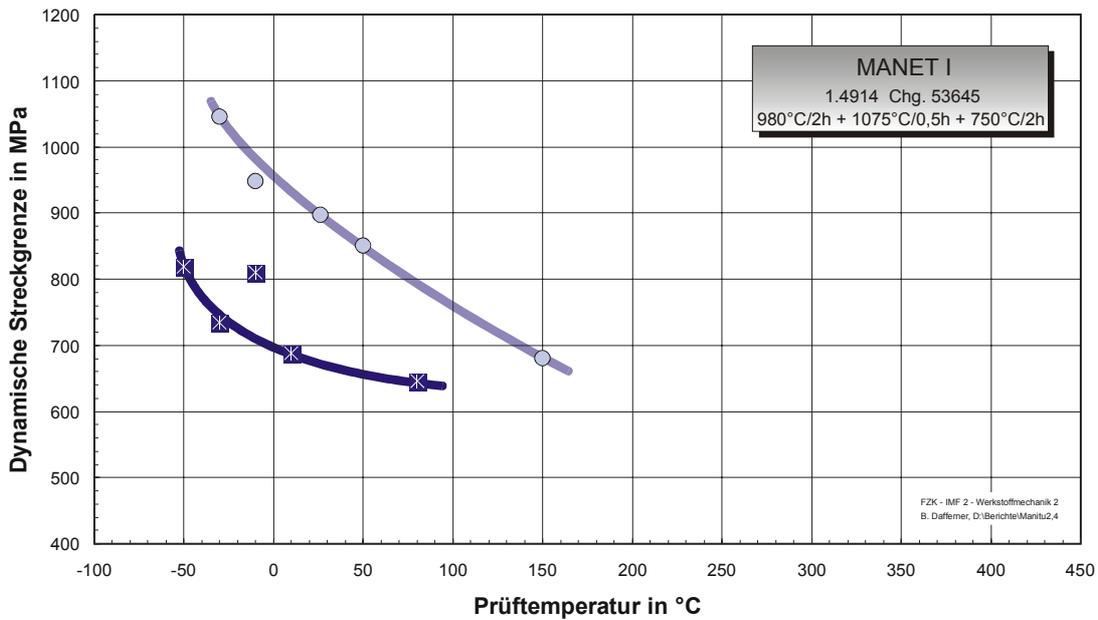
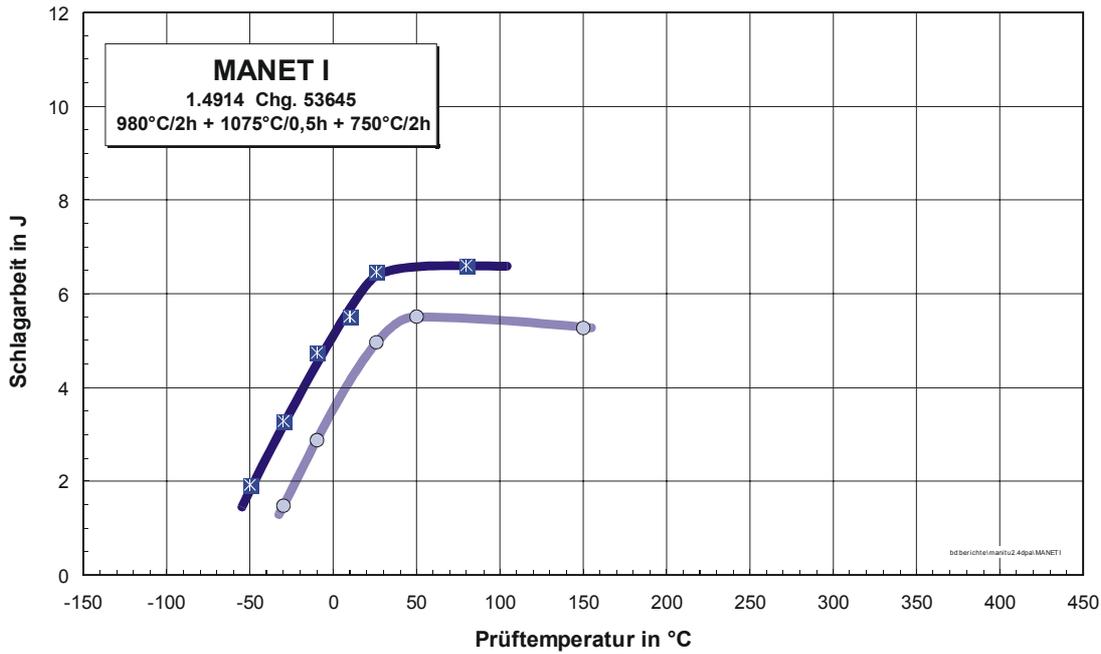
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A75	26	0,90	1102
A76	50	1,25	1003
A77	75	2,12	953
A74	100	2,41	943
A73	150	2,53	-
A78	200	3,33	932



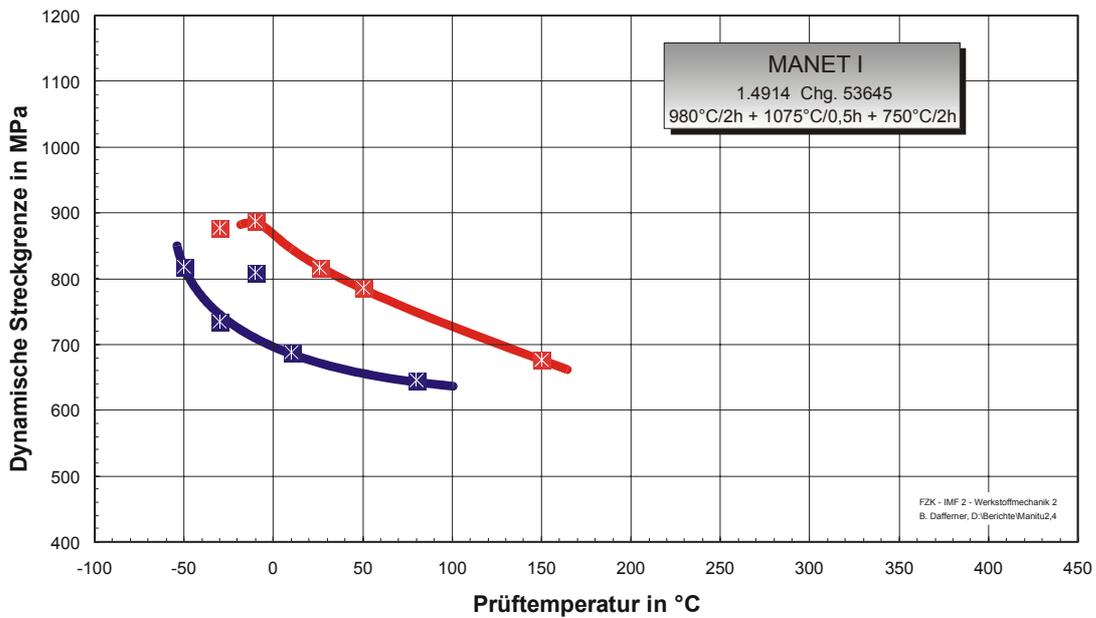
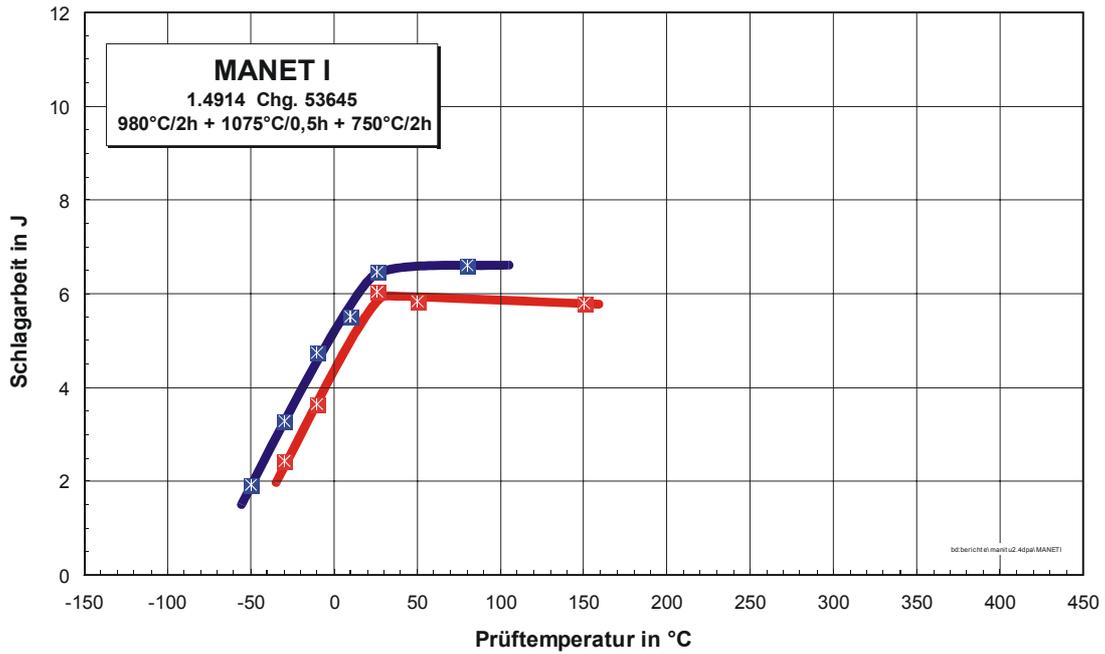
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A80	-30	1,48	1046
A82	-10	2,87	949
A81	26	4,97	898
A80	50	5,51	851
A79	150	5,27	681



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
A89	-30	2,44	877
A88	-10	3,65	886
A87	26	6,04	816
A86	50	5,84	785
A85	150	5,79	676

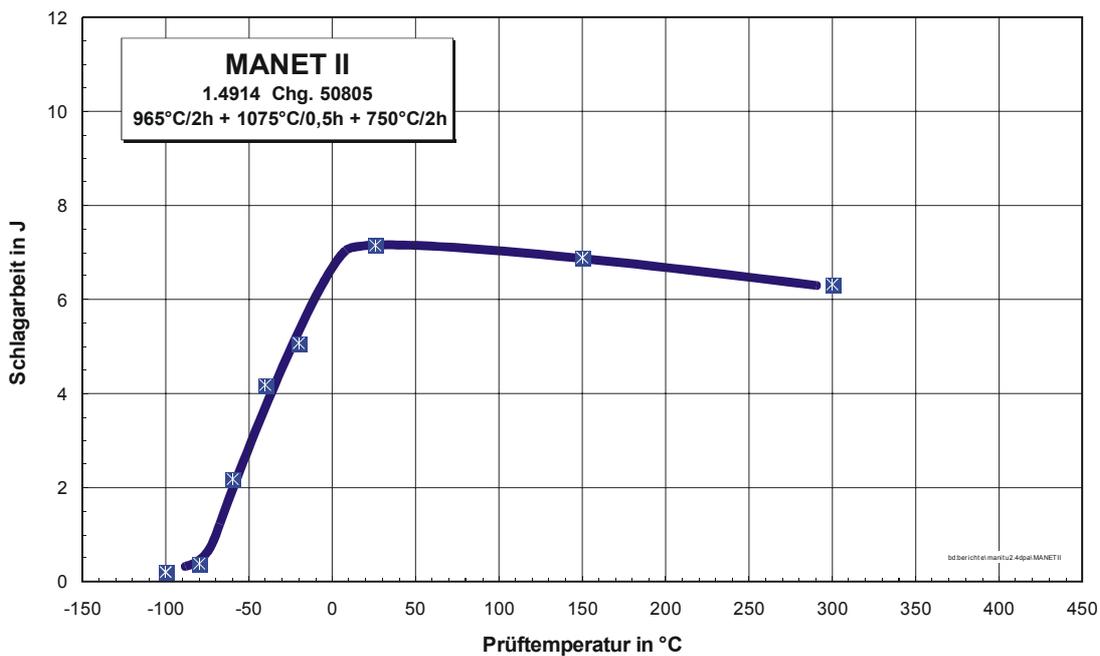


10.1.2 MANET-II

10.1.2.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
H01	26	7,28	663,7
H02	-20	5,14	762,8
H03	-40	4,25	777,9
H04	-60	2,22	814,6
H05	-80	0,39	851,7
H06	-100	0,21	-
H07	150	7	560,9
H08	300	6,42	538,4



10.1.2.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B01	0	2,20	-
B02	28	5,53	798,0
B03	70	6,82	871,6
B04	250	6,49	679,8

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B08	-20	0,50	910,4
B09	0	2,52	931,2
B06	26	5,73	839,8
B07	70	6,73	752,2
B10	300	6,16	622,9

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B14	-60	0,10	552,0
B13	-20	3,32	844,8
B12	0	4,69	816,2
B11	27	6,32	-
B15	100	6,90	701,0

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B18	-60	2,04	880,6
B17	-20	4,65	824,2
B16	26	6,59	756,5
B19	100	7,13	682,1

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B23	-60	2,02	924,8
B22	-30	4,55	919,3
B21	26	7,22	711,3
B24	100	7,17	658,1
B25	300	6,54	570,1

10.1.2.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B29	50	0,52	944,2
B26	100	2,44	901,5
B27	150	4,88	865
B28	250	5,11	791,9

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B32	0	0,43	895,4
B31	50	2,49	822,4
B33	100	3,8	761,5
B34	150	5,2	718,7
B35	300	5,52	676,1

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B36	100	4,92	724,9
B37	26	2,77	834,5
B38	-10	1,34	865
B39	350	5,48	603,1
B40	150	5,38	694,4

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B43	-50	0,26	-
B42	-20	3,8	840,5
B41	28	6,53	688,3
B45	70	7,28	706,6
B44	300	6,59	578,7

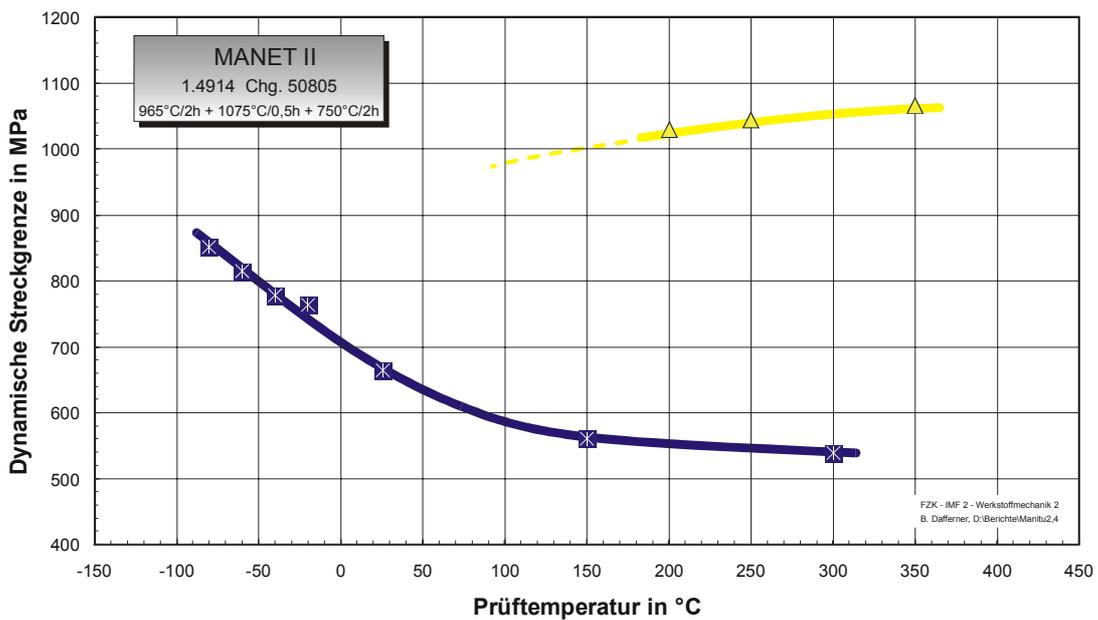
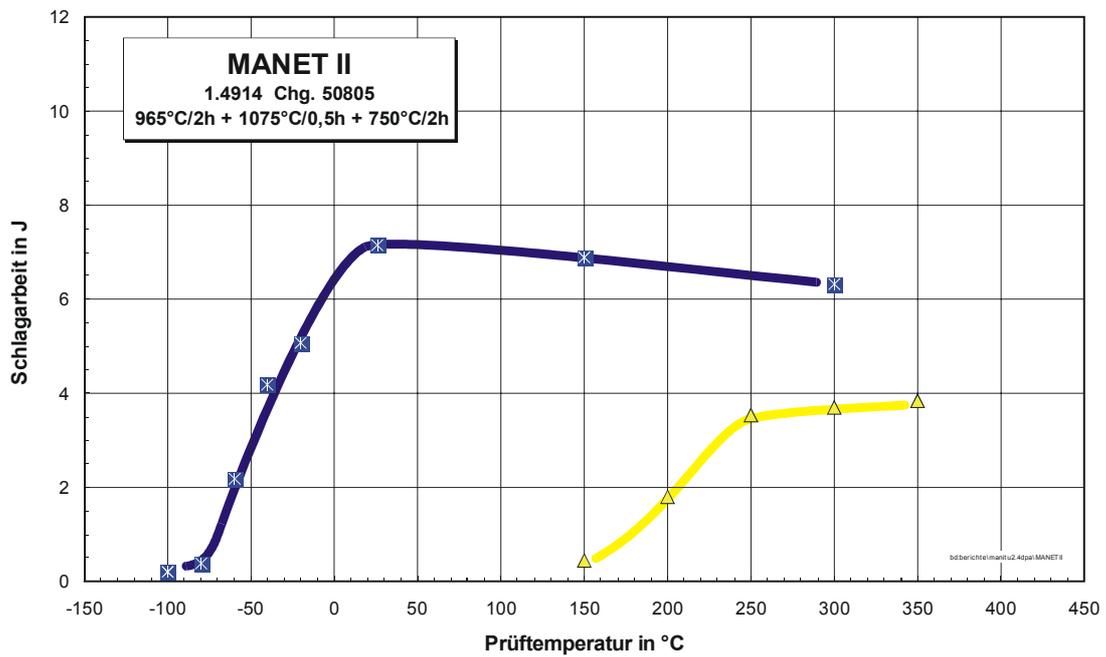
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B47	-50	2,48	852,8
B46	-20	4,21	-
B48	26	7,39	706,6

10.1.2.4 2,4 dpa

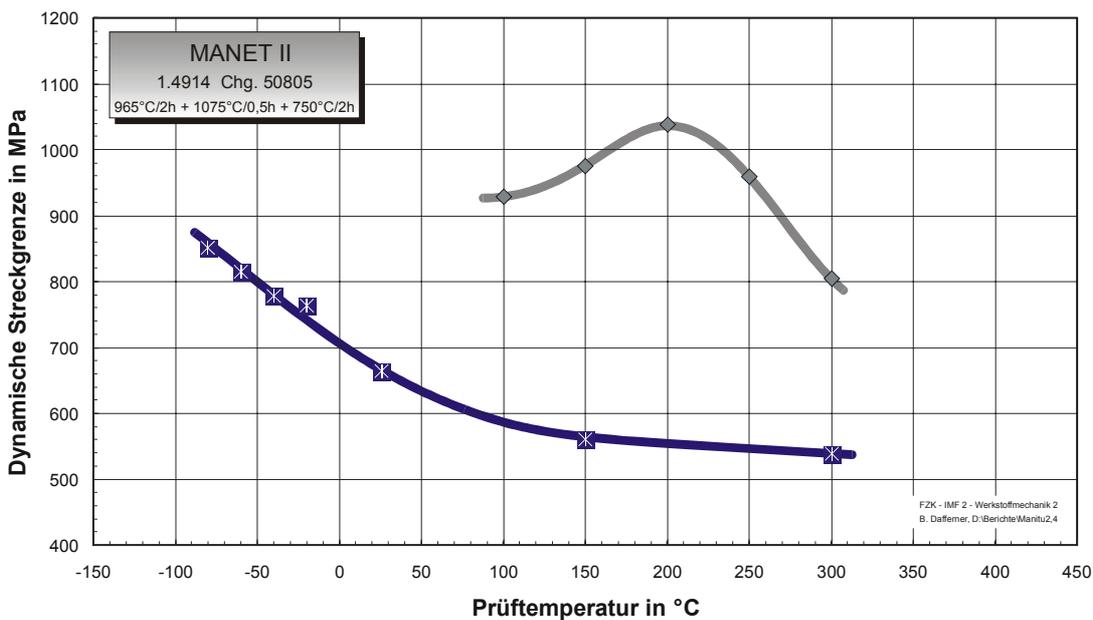
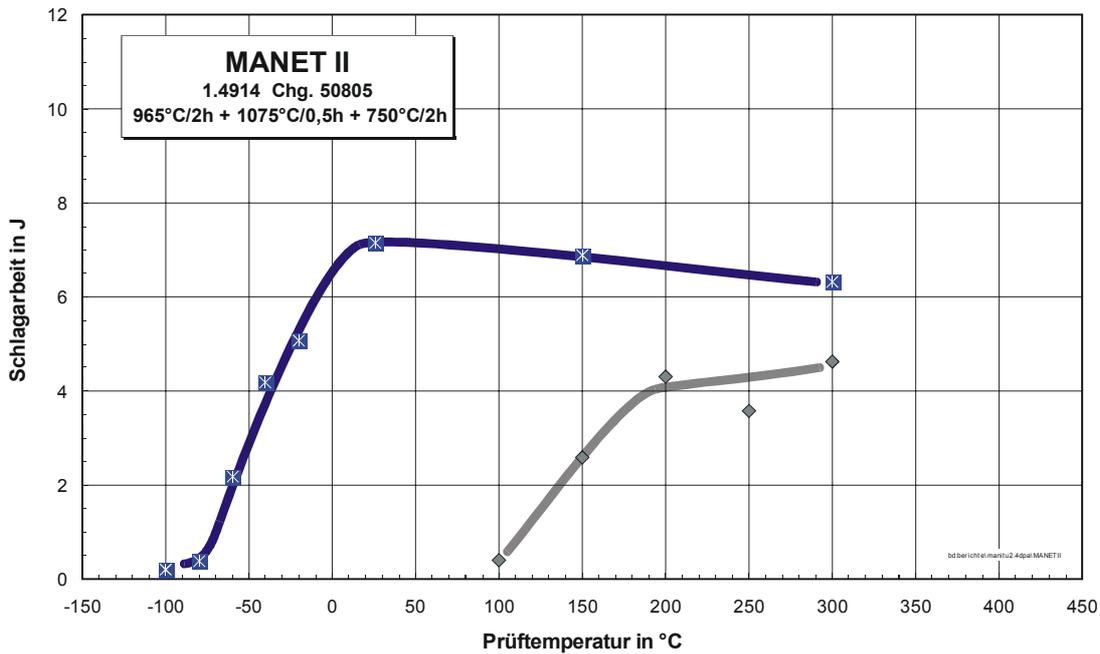
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B51	150	0,45	-
B53	200	1,81	1029
B52	250	3,54	1044
B55	300	3,70	-
B54	350	3,83	1065



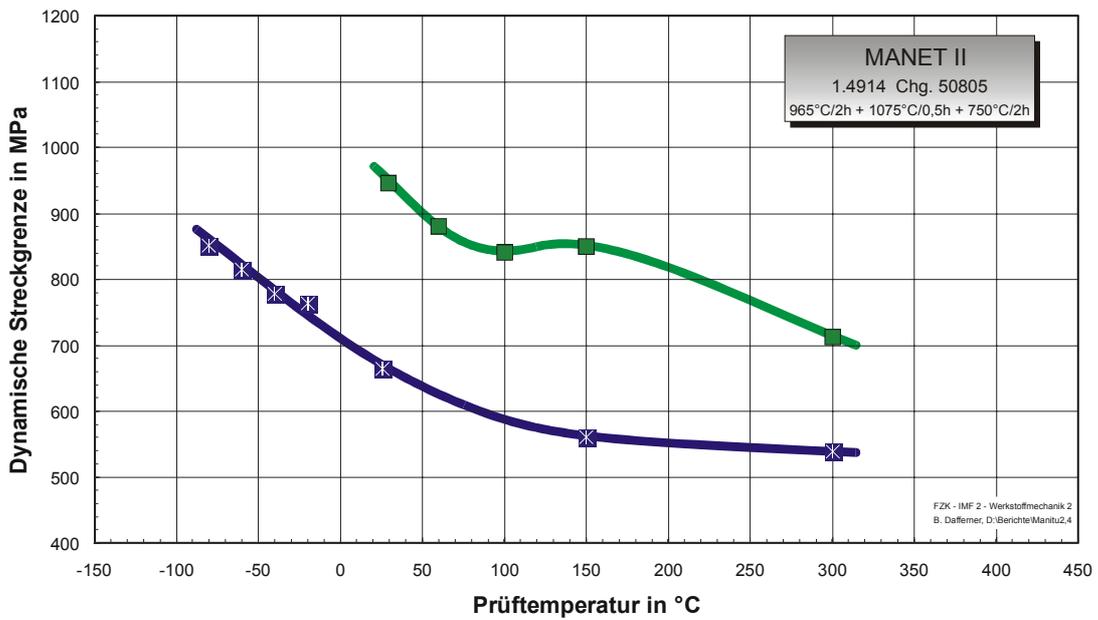
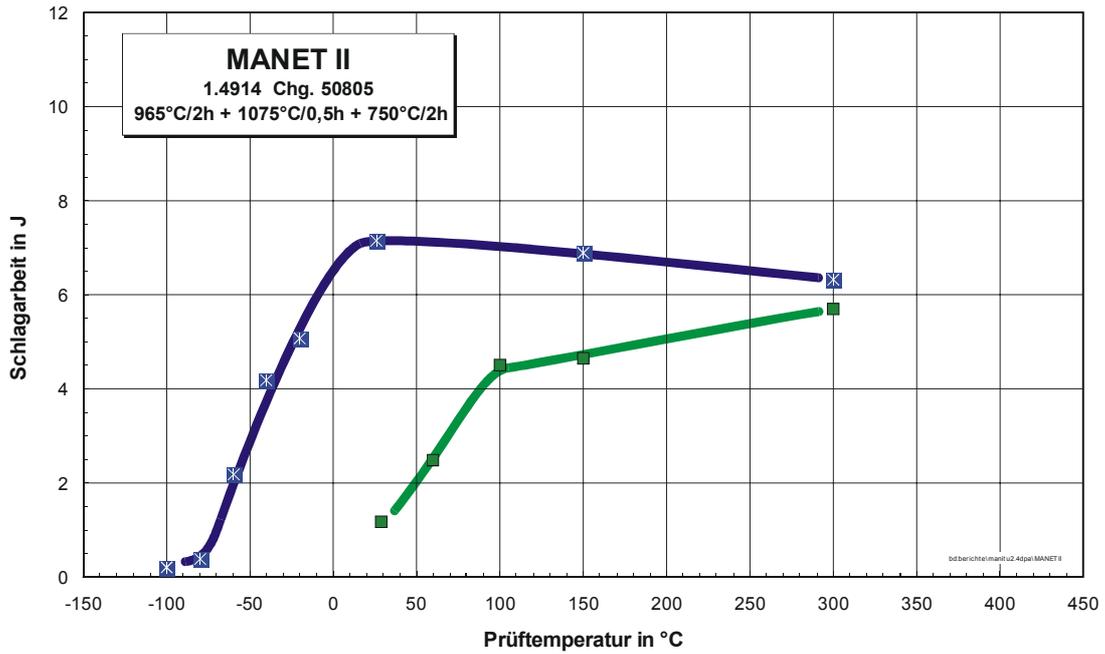
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B57	100	0,41	928
B56	150	2,59	975
B59	200	4,31	1038
B58	250	3,58	959
B60	300	4,63	804



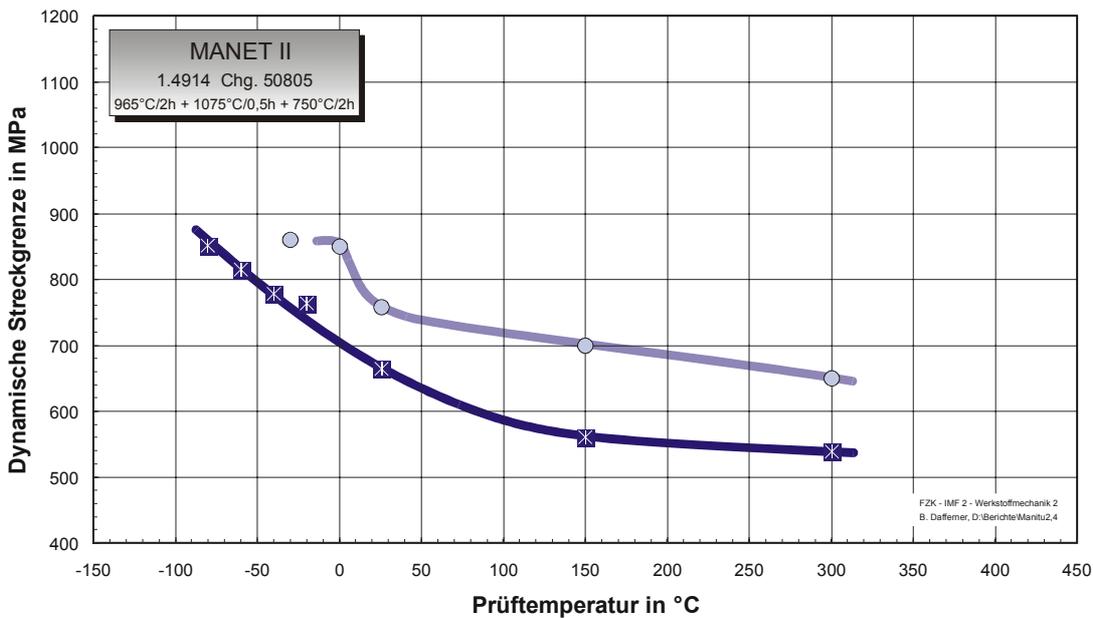
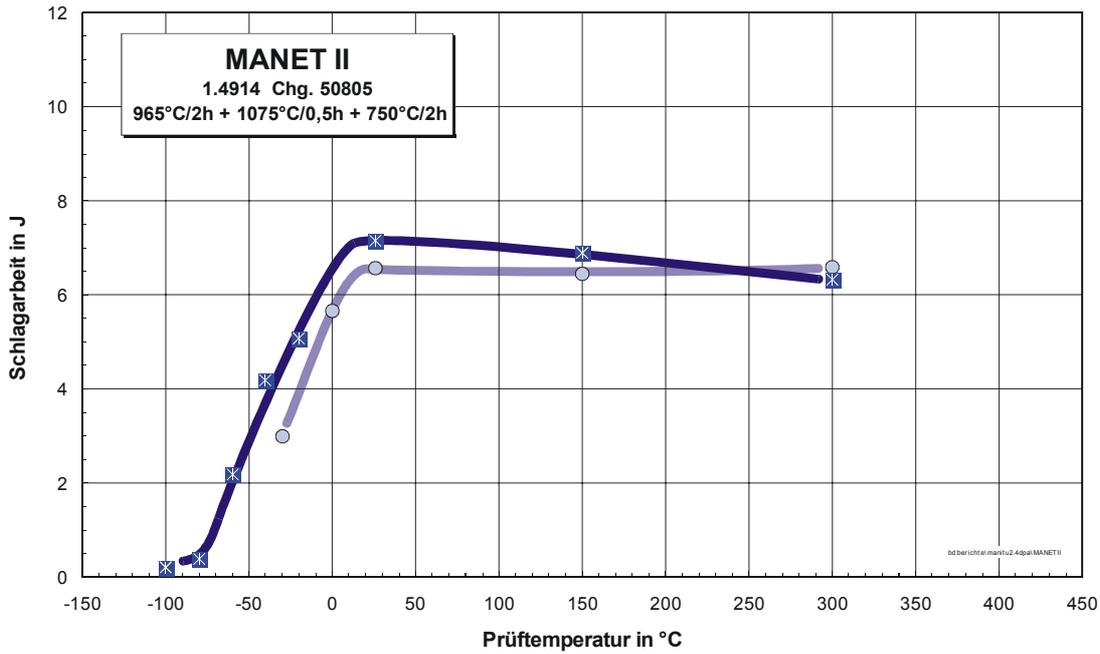
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B62	29	1,18	947
B63	60	2,49	880
B61	100	4,51	841
B64	150	4,66	849
B65	300	5,70	712



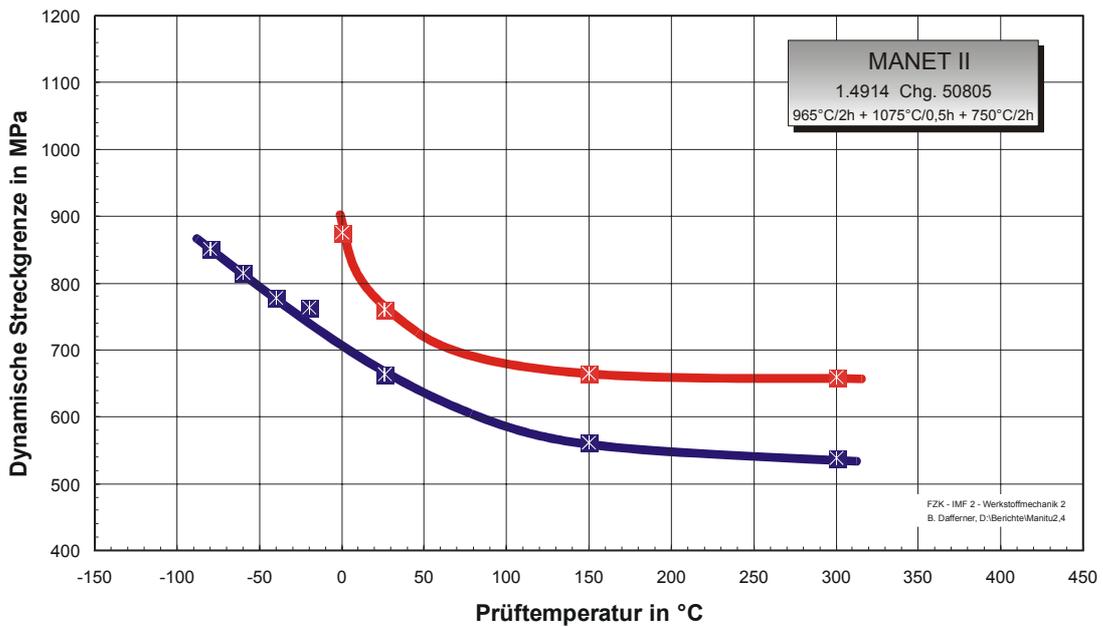
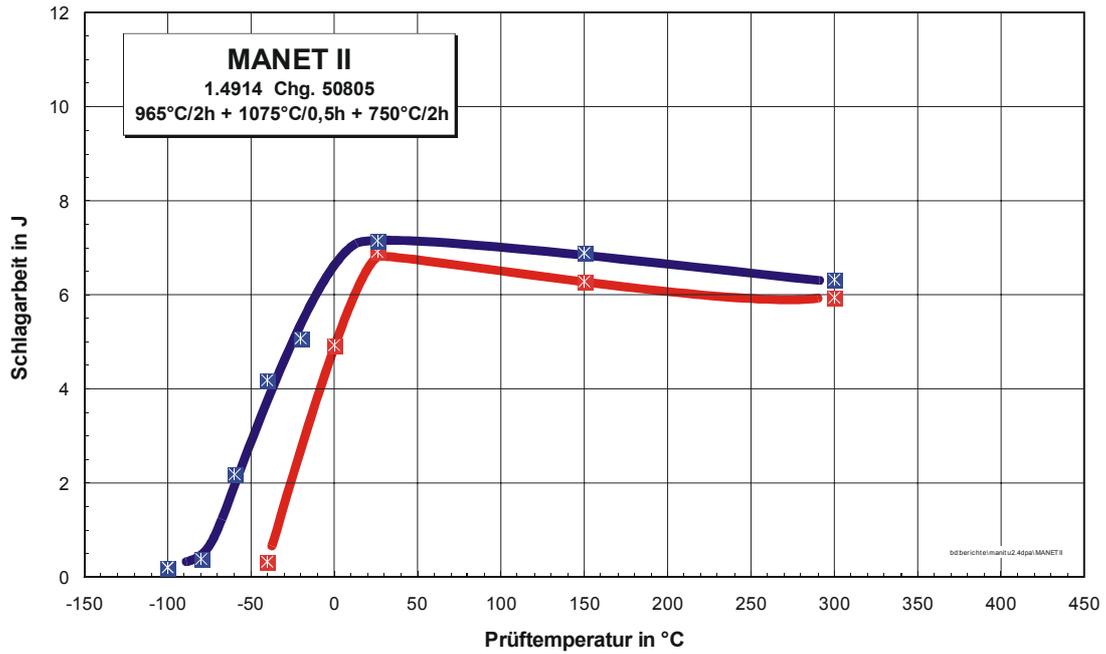
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B68	-30	2,98	860
B67	0	5,65	850
B66	26	6,57	757
B69	150	6,44	699
B70	300	6,59	649



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
B72	-40	0,33	-
B71	0	4,94	876
B73	26	6,91	761
B74	150	6,29	665
B75	300	5,94	659



10.1.3 OPTIMAR

10.1.3.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
T01	-100	0,19	-
T02	-80	0,35	942
T03	-60	1,16	905
T13	-40	2,49	860
T12	-30	3,44	862
T05	-20	3,08	840
T11	-20	3,58	818
T10	-10	3,63	812
T09	0	3,82	778
T06	26	6,46	837
T07	150	5,94	701
T08	300	5,58	653

10.1.3.2 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
P02	125	1,43	1061
P01	150	2,04	1079
P03	200	3,66	995
P04	250	3,77	-
P05	300	4,34	-

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
P07	26	0,61	-
P08	100	0,71	1142
P12	125	1,94	1069
P11	150	3,28	977
P10	200	3,83	-
P09	300	3,21	900

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
P14	50	1,17	976
P13	100	2,21	958
P15	150	3,61	914
P16	200	4,29	-
P17	300	4,34	-

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
P23	-30	0,88	1135
P20	0	2,26	1061
P19	26	3,71	918
P21	50	4,68	943
P22	100	5,13	880

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

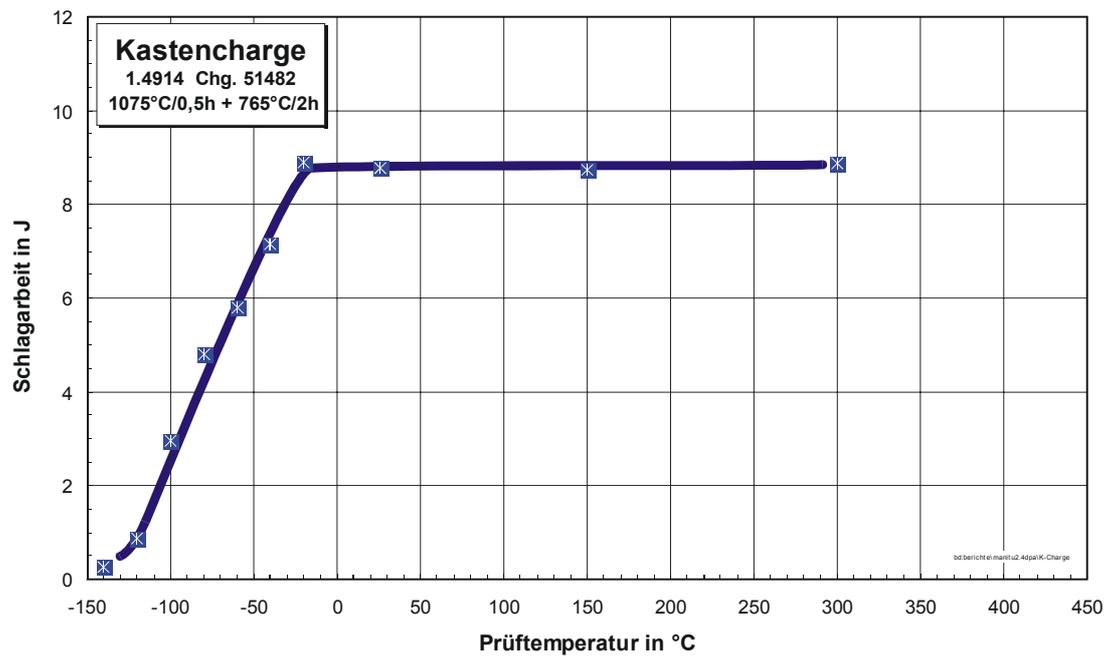
Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
P29	-40	2,51	-
P26	0	3,16	991
P25	26	4,48	962
P27	50	6,00	907
P28	100	5,49	-

10.1.4 K-Charge

10.1.4.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
J10	-140	0,27	946,0
J09	-120	0,86	898,5
J05	-80	4,81	797,0
J04	-60	5,80	749,2
J03	-40	7,16	696,2
J02	-20	8,91	655,1
J01	26	8,78	577,0
J07	150	8,75	495,7
J08	300	8,87	438,8



10.1.4.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C03	-60	3,10	994,0
C05	-40	4,41	1001,2
C02	-20	6,20	780,1
C01	28	7,81	629,5
C04	250	7,88	555,0

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C07	-60	2,32	920,4
C06	-20	5,66	793,1
C08	10	7,61	594,2
C09	50	7,84	868,4
C10	300	7,83	403,0

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C12	-60	3,09	861,0
C11	-20	6,39	766,3
C13	30	8,61	685,9
C14	100	8,44	613,1
C15	350	7,96	487,1

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C18	-80	2,68	886,0
C17	-40	6,99	750,5
C16	0	8,11	693,7
C19	100	8,52	576,1

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C23	-100	2,40	884,4
C22	-60	5,70	776,0
C21	-20	8,19	693,4
C24	26	8,59	623,1
C25	100	8,68	566,0

10.1.4.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C29	0	1,07	968,6
C26	050	3,29	946,8
C27	100	5,69	840,5
C30	150	6,4	828,4
C28	250	6,63	735,6

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C32	-30	1,56	889,4
C34	0	3,31	828,4
C31	50	6,3	791,9
C35	100	7,32	700,6
C33	300	7,14	615,2

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C38	-50	1,26	913,7
C37	-10	1,87	834,5
C39	0	4,25	791,9
C36	26	7	743,2
C40	350	7,52	536

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C43	-90	2,21	907,6
C42	-60	5,02	828,4
C41	-20	8,13	755,3
C45	26	8,64	657,8
C44	300	8,98	493,4

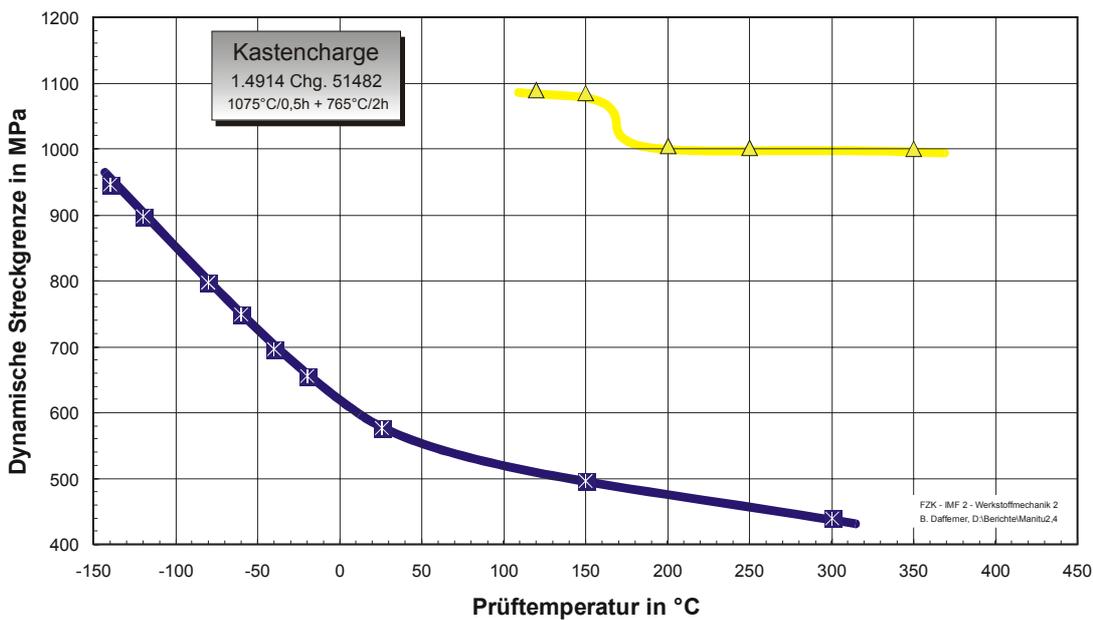
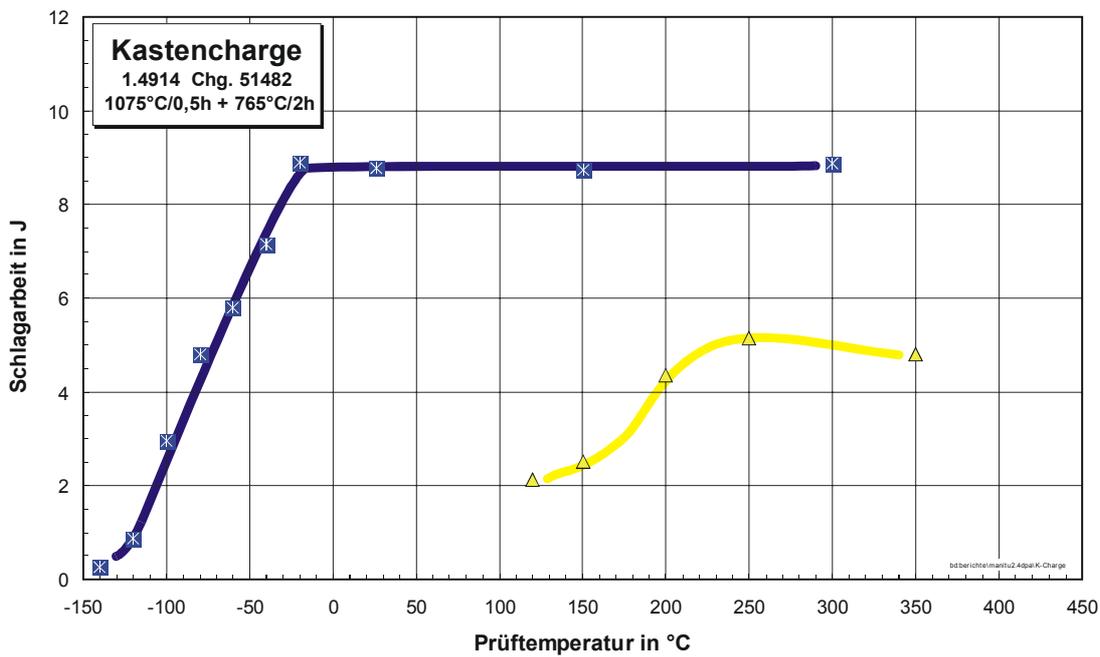
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C48	-90	0,33	-
C49	-90	2,97	858,8
C47	-60	5,19	816,2
C46	-20	8,73	712,7

10.1.4.4 2,4 dpa

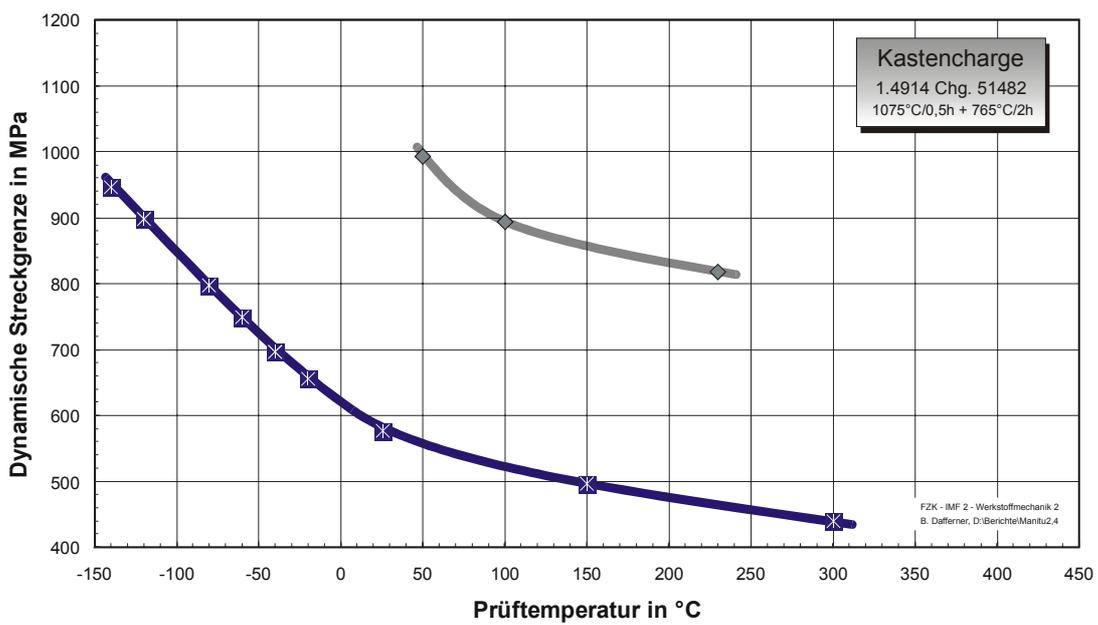
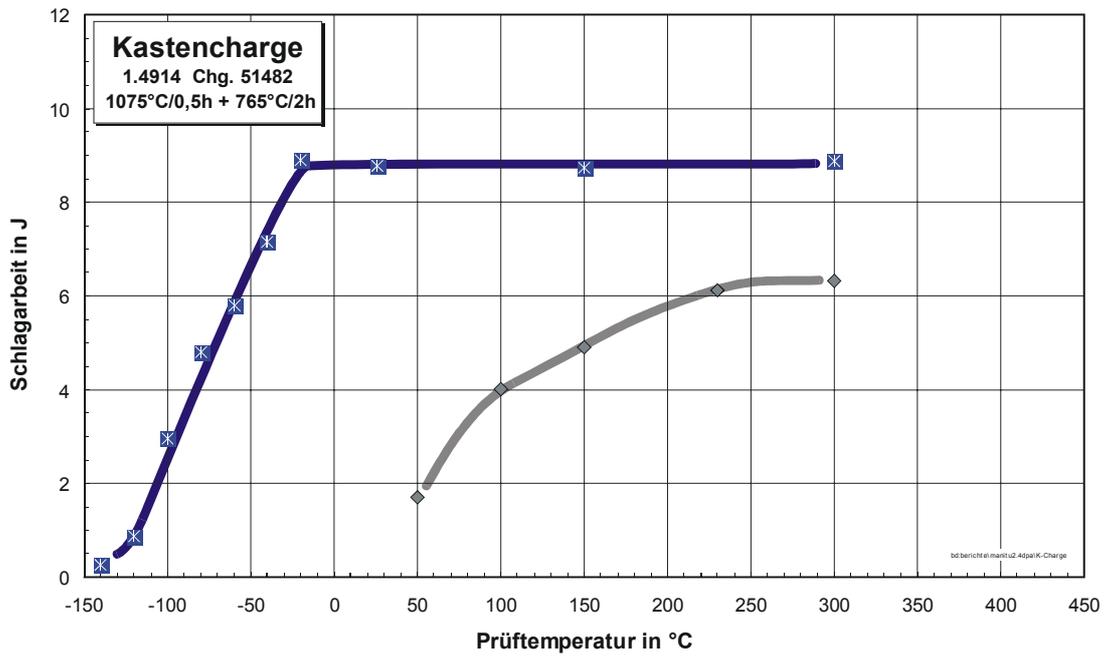
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C55	120	2,12	1089,2
C51	150	2,52	1084,4
C53	200	4,37	1004,5
C52	250	5,15	1001,5
C54	350	4,80	999,9



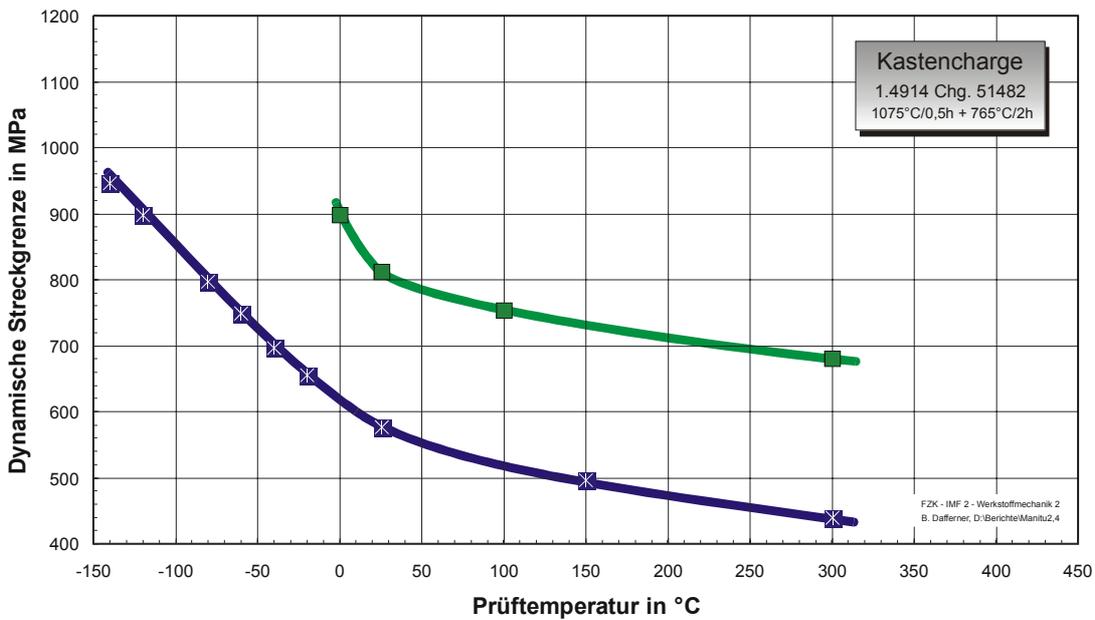
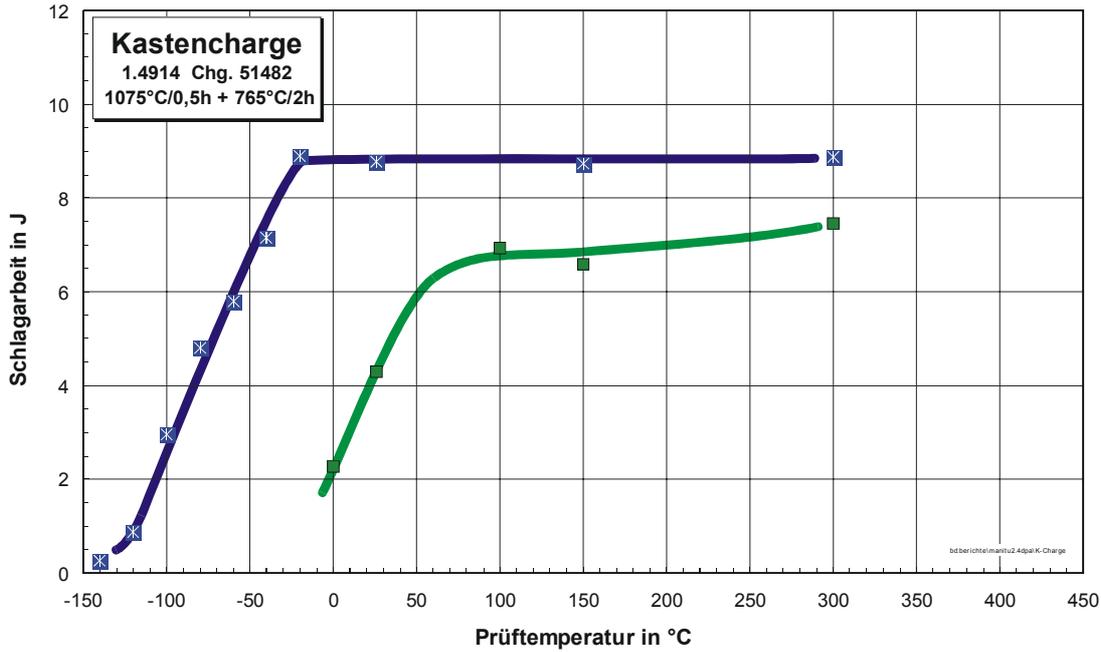
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C57	50	1,70	992,3
C56	100	4,02	893,1
C58	150	4,91	-
C60	230	6,12	817,6
C59	300	6,32	-



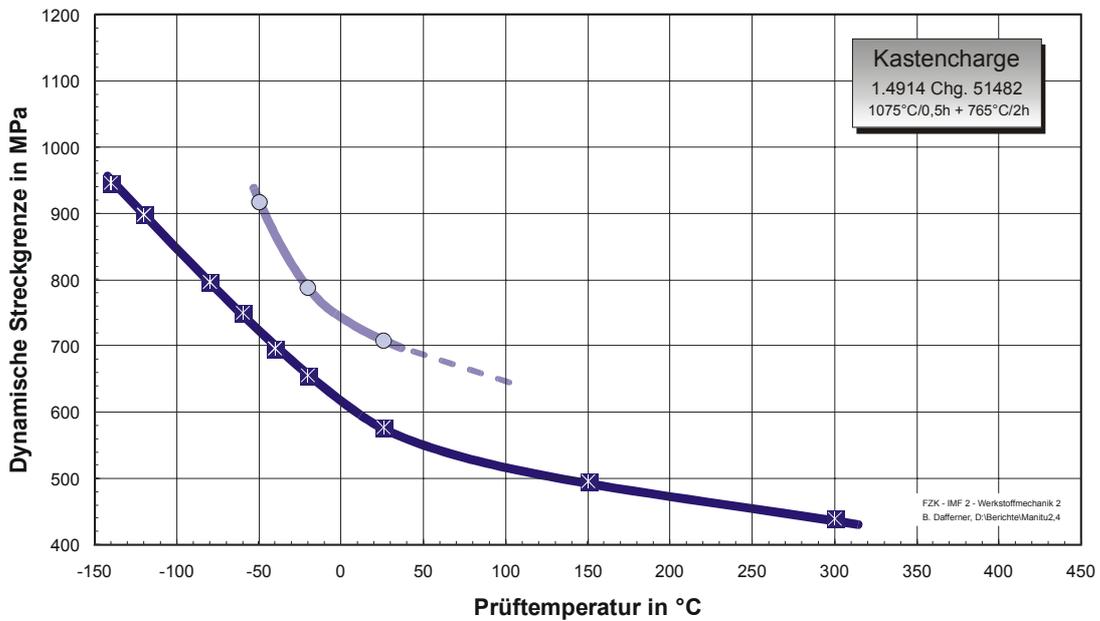
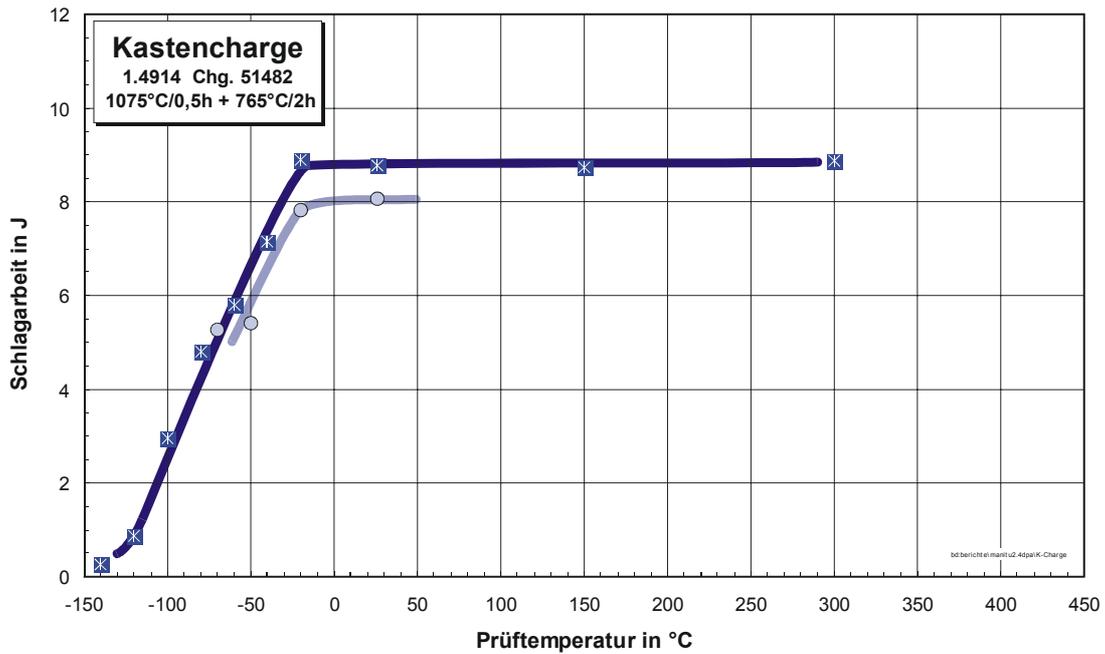
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C62	0	2,27	897,8
C61	26	4,31	811,5
C63	100	6,93	753,8
C65	150	7,05	-
C64	300	7,45	680,7



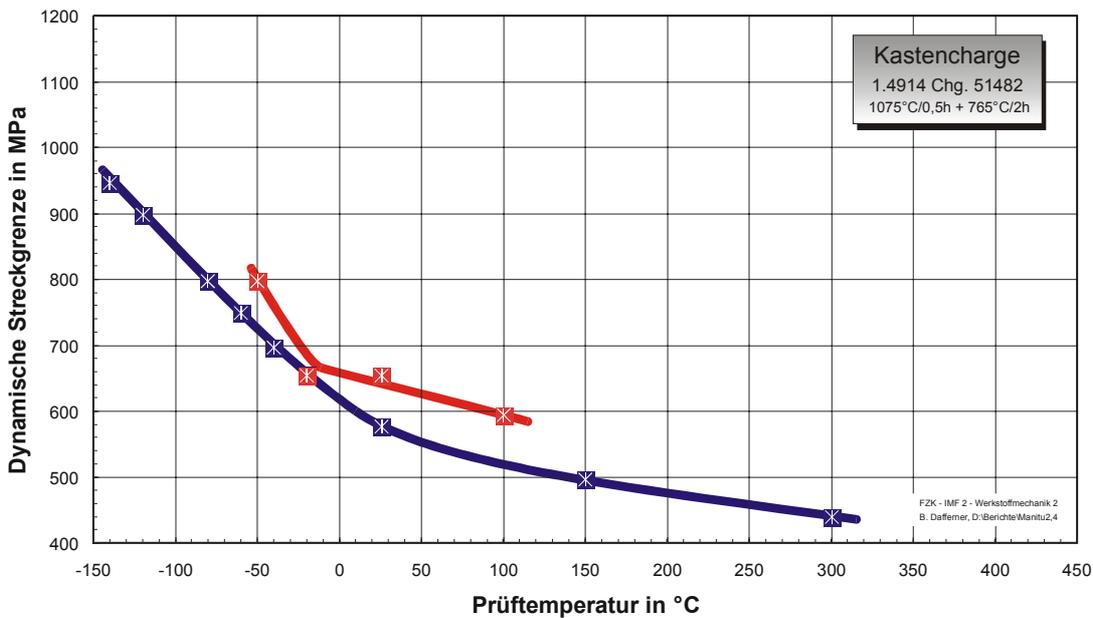
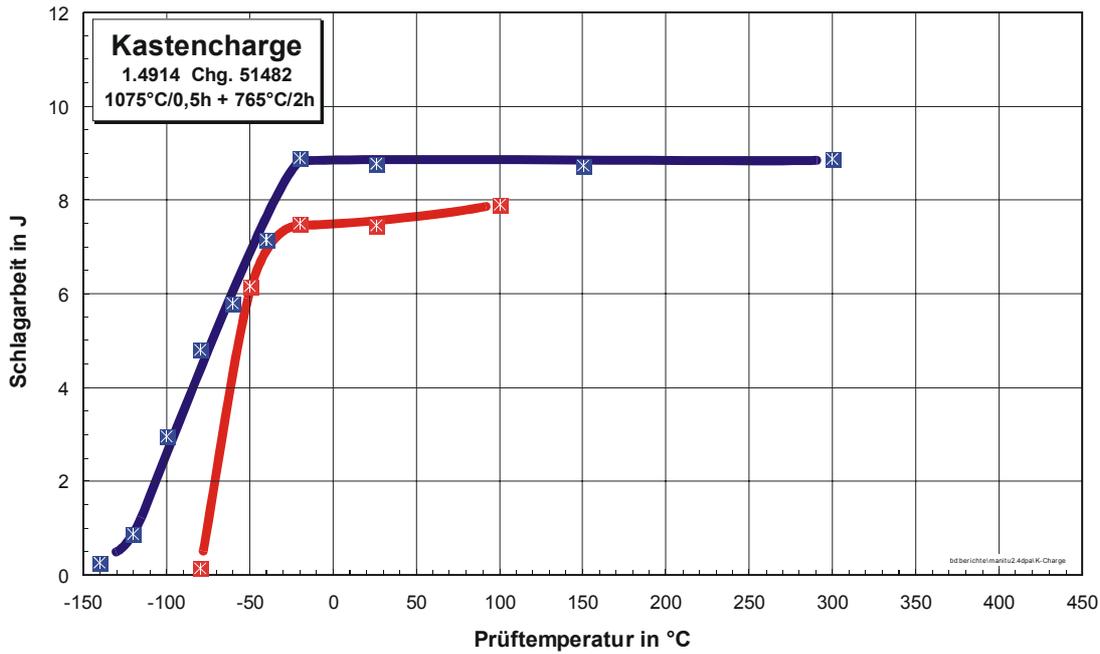
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C70	-70	5,64	-
C68	-50	5,41	917,5
C67	-20	7,82	787,4
C69	26	8,06	707,3



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
C73	-80	0,15	-
C72	-50	6,16	797,3
C71	-20	7,50	639,3
C74	26	7,46	654,0
C75	100	7,91	593,4

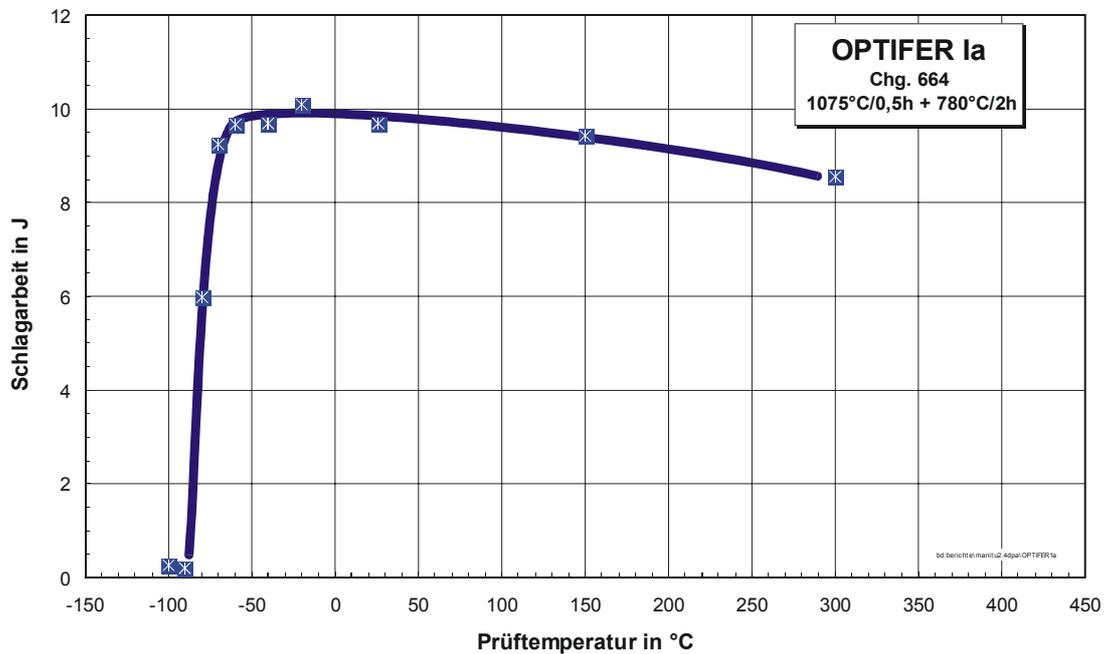


10.1.5 OPTIFER-Ia

10.1.5.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
K206	-100	0,26	-
K208	-90	0,20	-
K205	-80	5,99	784,6
K207	-70	9,24	730,7
K204	-60	9,68	708,6
K203	-40	9,68	663,5
K202	-20	10,10	634,5
K201	26	9,70	543,3
K209	150	9,43	446,4
K210	300	8,56	386,4



10.1.5.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D05	-60	0,41	854,8
D02	-40	4,75	807,1
D01	-20	7,96	774,6
D04	0	9,80	701,6
D03	250	8,67	478,3

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D09	-50	2,63	838,1
D06	-40	3,45	836,1
D08	-30	6,04	779,9
D07	-20	9,64	790,4
D10	300	8,97	465,4

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D13	-60	0,46	835,6
D14	-50	7,13	782,5
D11	-40	7,92	804,2
D12	-20	10,10	737,4
D15	350	8,34	430,8

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D18	-80	0,24	856,2
D17	-60	1,56	780,0
D19	-50	8,11	742,2
D16	-40	8,62	-
D20	-20	9,85	702,3

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D23	-60	1,14	811,0
D21	-50	7,22	762,0
D22	-20	9,86	761,1
D24	100	9,49	477,9
D25	300	8,86	424,8

10.1.5.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D29	-10	0,31	749,2
D27	26	5,6	743,2
D26	50	7,15	700,6
D30	100	9,4	645,7
D28	250	8,37	554,3

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D32	-50	0,18	-
D33	-20	0,56	724,9
D34	10	4,39	718,7
D31	50	8,35	645,7
D35	300	8,06	481,3

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D39	-50	4,67	-
D38	-20	8,31	743,2
D37	0	8,96	694,4
D36	26	9,22	645,7
D40	350	8,38	426,4

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D41	-50	0,6	755,3
D42	-20	10,47	688,3
D43	-40	7,07	718,7
D44	150	9,58	438,6
D45	300	9,77	444,7

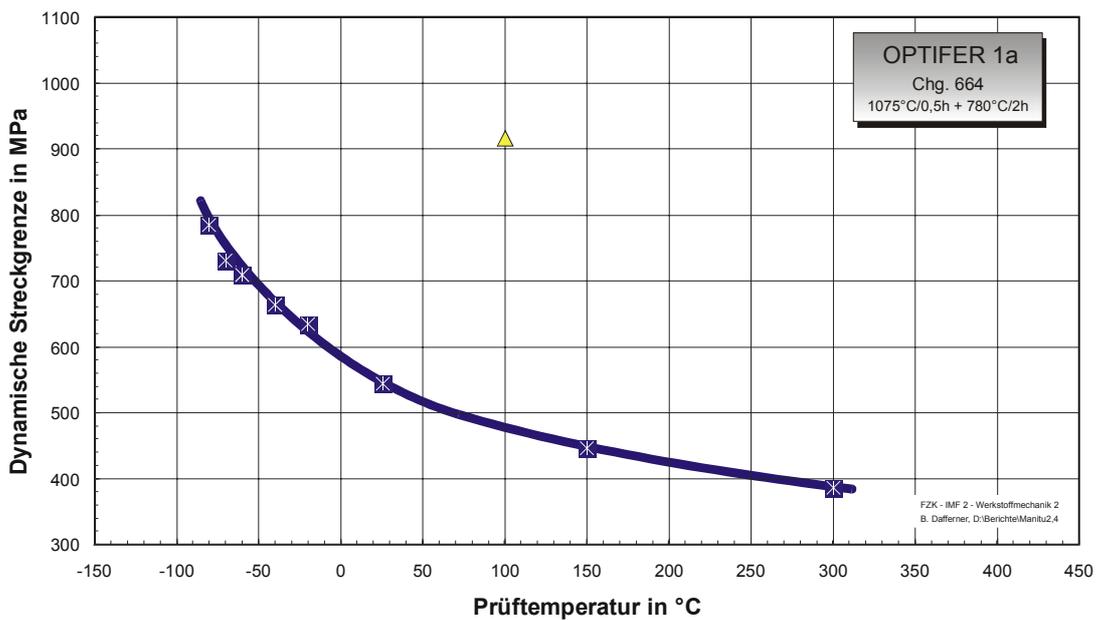
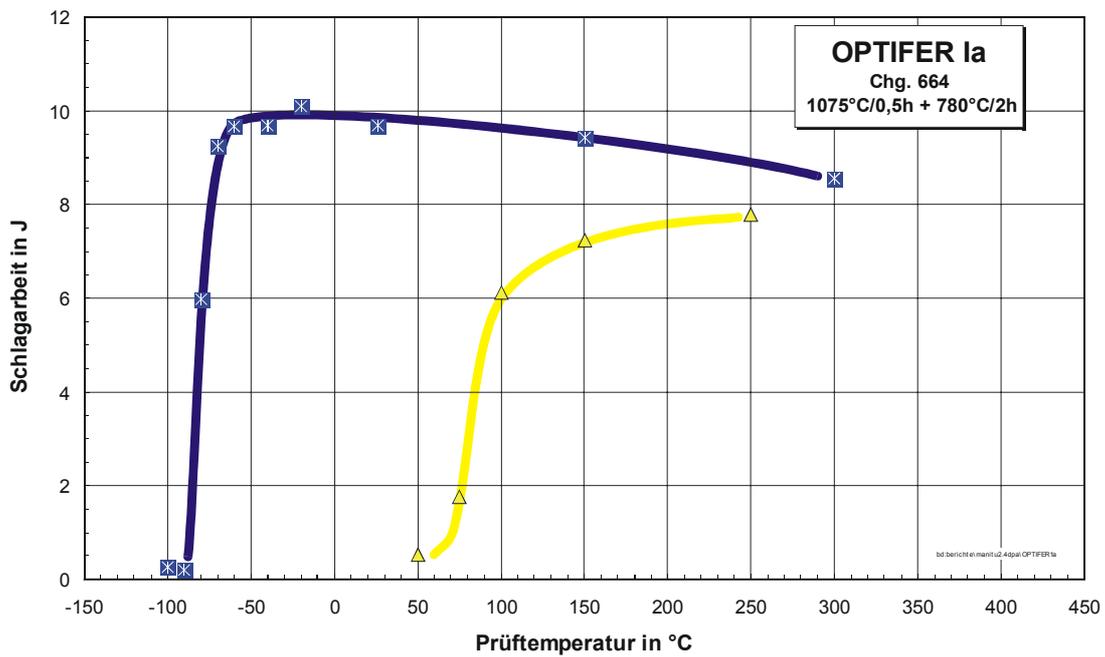
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D48	-70	0,33	816,2
D49	-60	8,02	797,9
D46	-50	8,04	731
D47	-20	9,76	657,8
D50	350	10,71	396

10.1.5.4 2,4 dpa

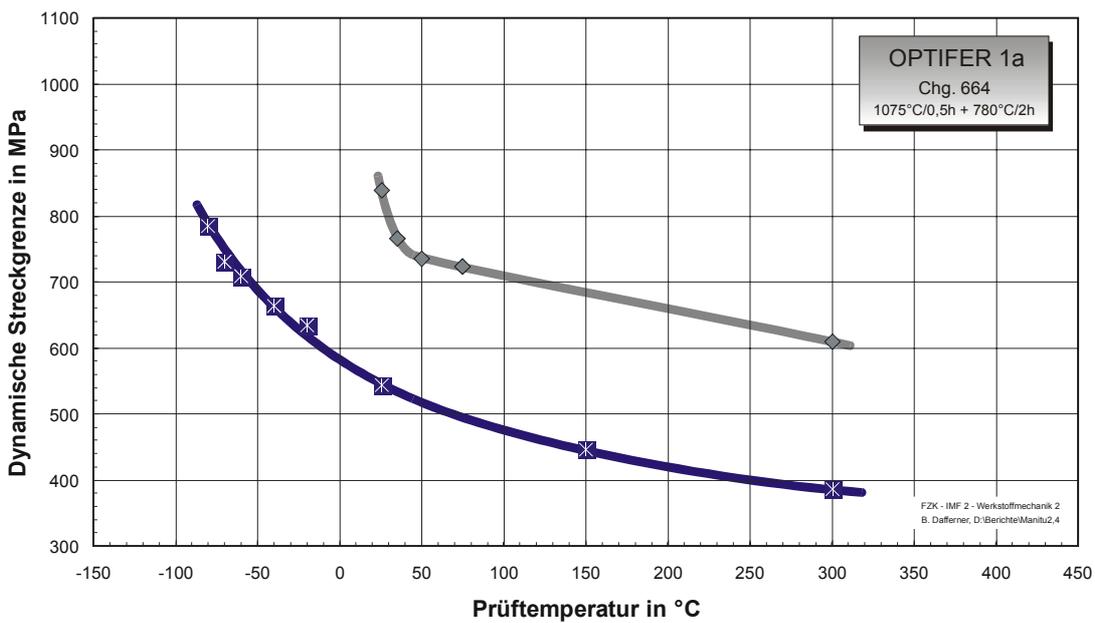
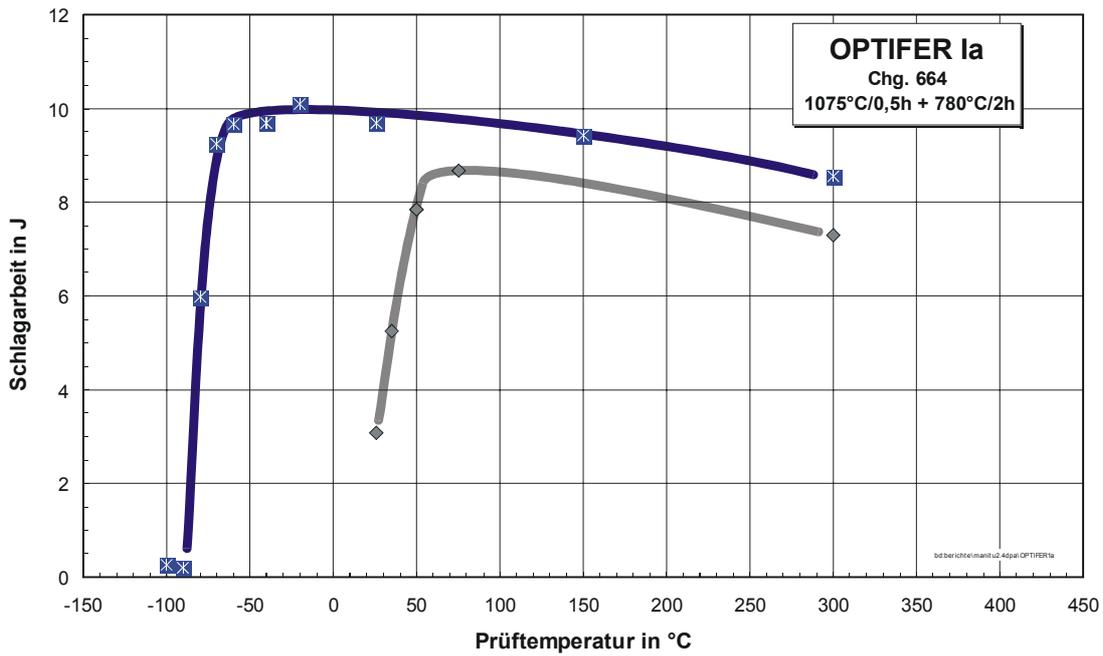
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D51	50	0,52	-
D55	75	1,76	-
D53	100	6,12	915,6??
D54	150	7,23	-
D52	250	7,77	-



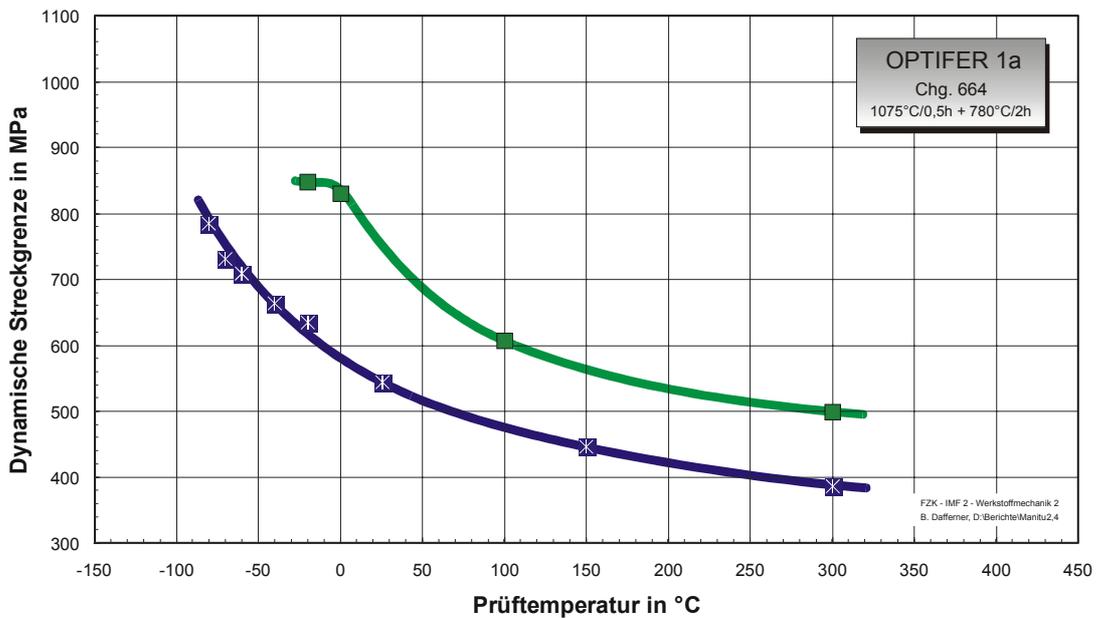
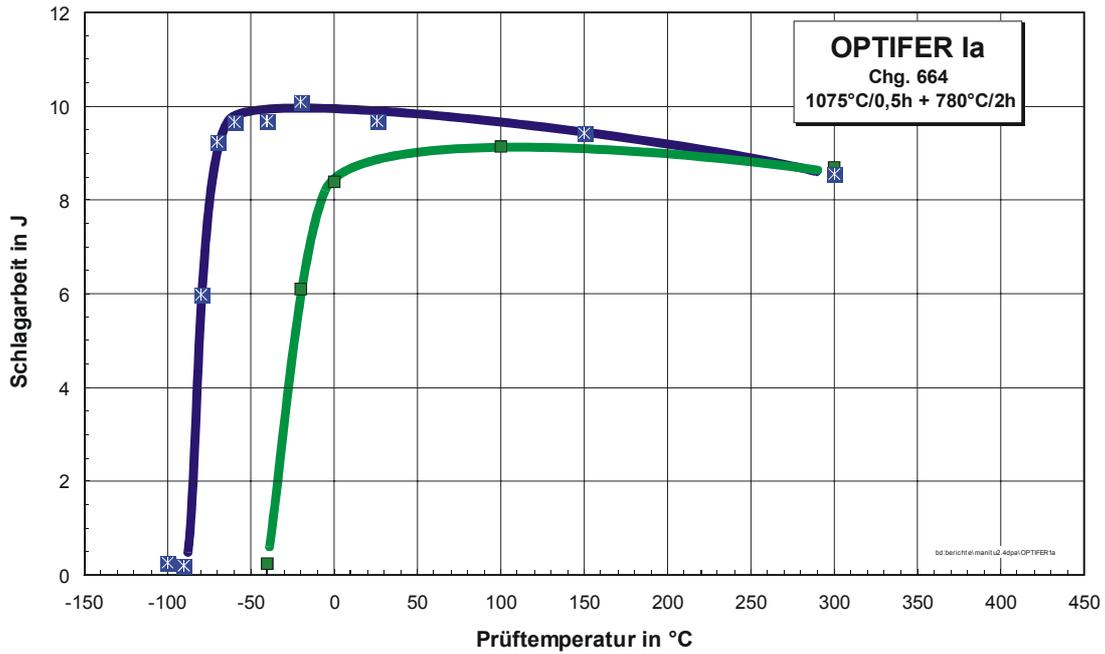
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D57	26	3,09	839
D60	35	5,24	766
D56	50	7,85	735
D58	75	8,68	723
D59	300	7,30	610



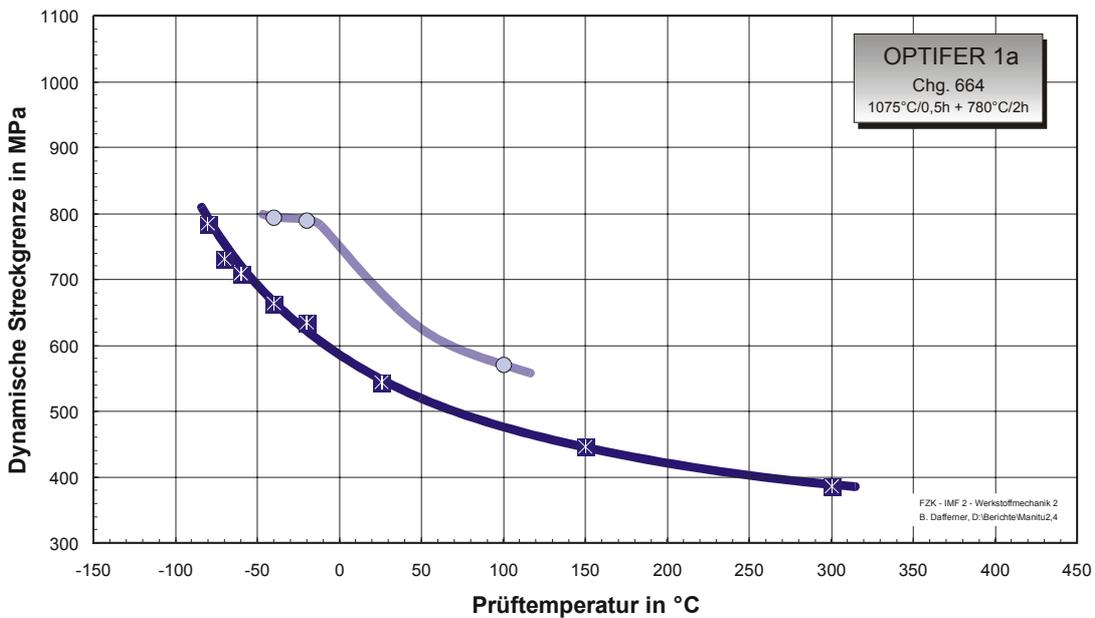
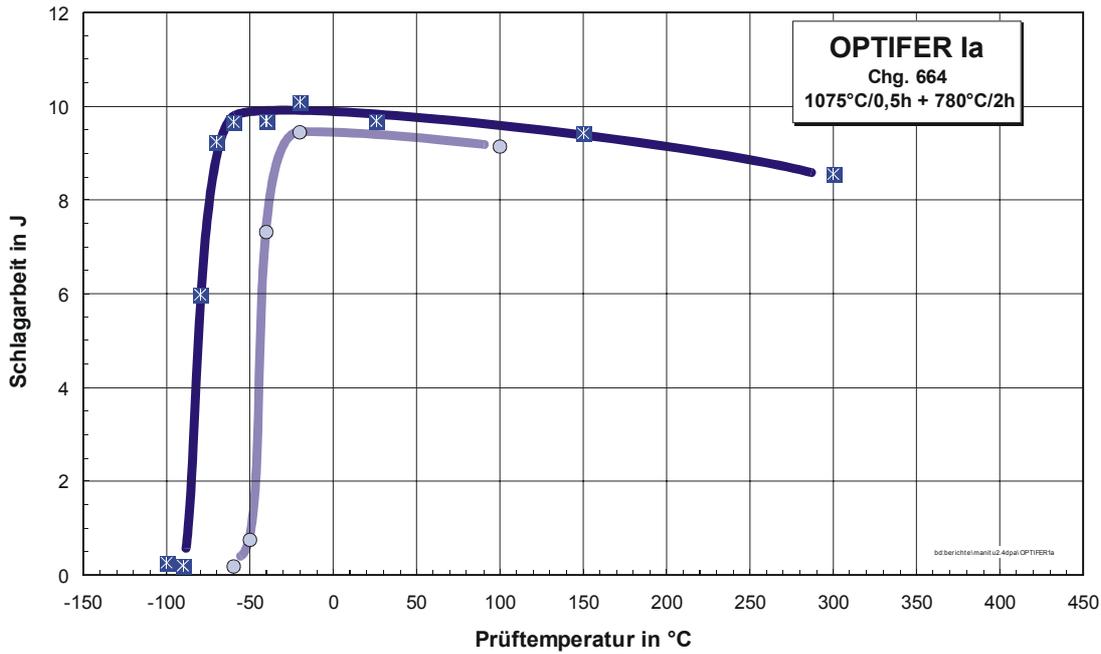
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D63	-40	0,24	-
D62	-20	6,11	847
D61	0	8,40	830
D64	100	9,15	606
D65	300	8,69	499



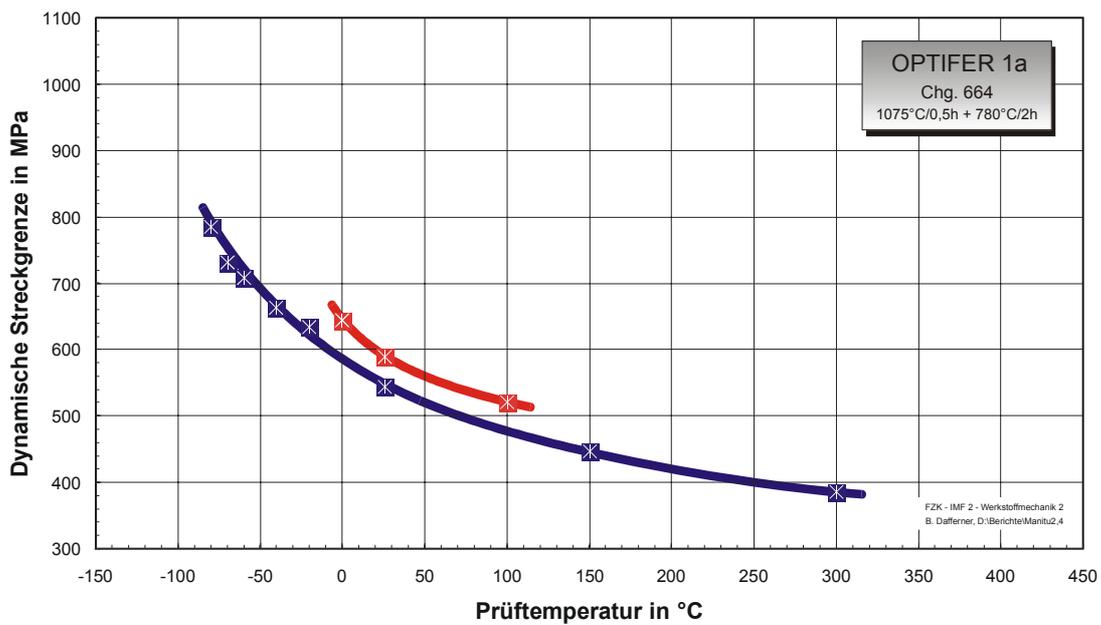
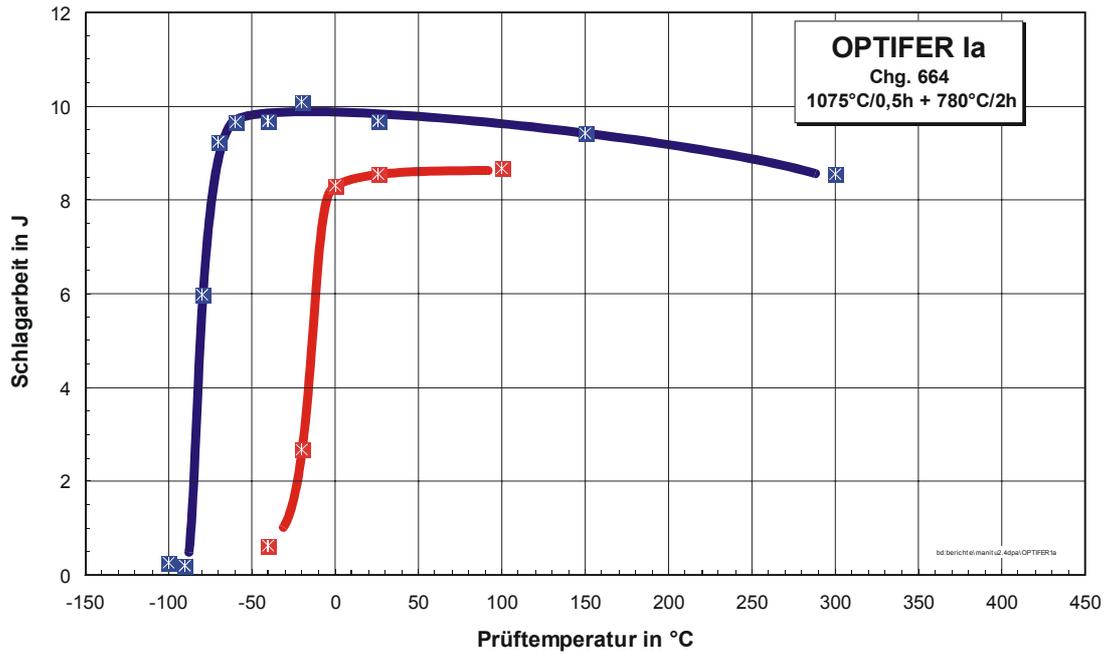
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D68	-60	0,18	-
D70	-50	0,76	-
D67	-40	7,31	793
D66	-20	9,45	790
D69	100	9,15	571



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
D71	-40	0,62	-
D72	-20	2,68	-
D75	0	8,31	644
D73	26	8,55	589
D74	100	8,68	520

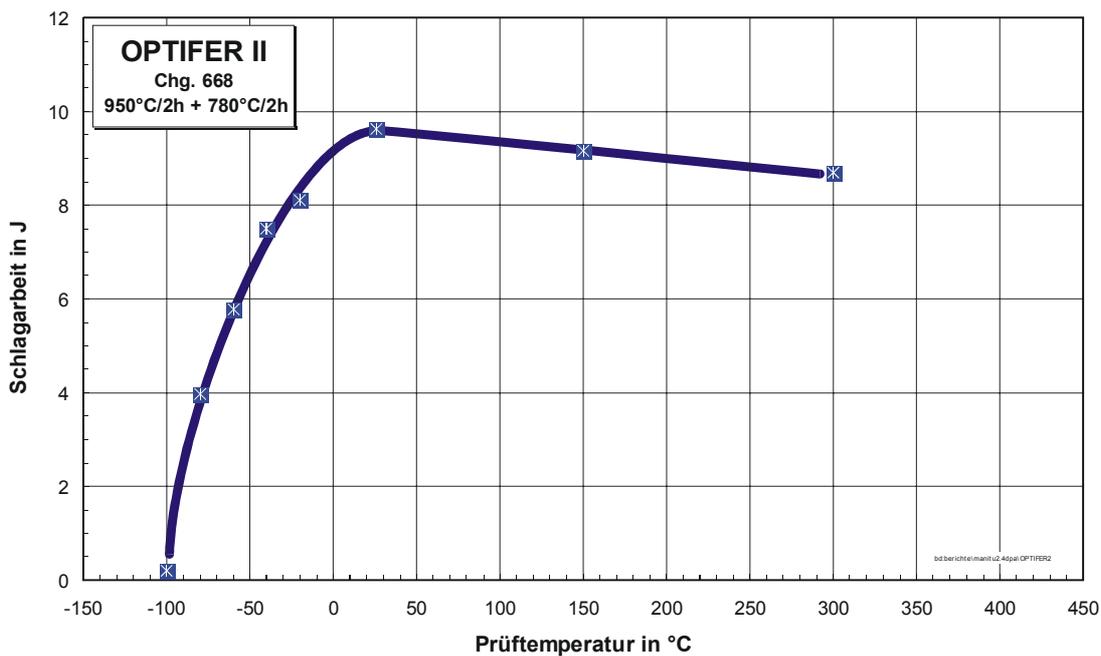


10.1.6 OPTIFER-II

10.1.6.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
N206	-100	0,20	771,7
N205	-80	3,97	750,0
N204	-60	5,77	673,0
N203	-40	7,50	607,1
N202	-20	8,11	591,1
N201	26	9,63	494,5
N207	150	9,17	402,7
N208	300	8,69	361,8



10.1.6.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E05	-60	3,24	802,4
E03	-40	5,59	770,1
E02	-20	6,23	677,8
E01	28	9,67	561,8
E04	250	8,48	410,2

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E07	-60	0,47	827,4
E09	-40	5,33	716,7
E08	-20	7,74	659,4
E06	26	8,98	548,1
E10	300	8,34	369,1

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E13	-80	0,29	910,5
E11	-40	5,48	667,8
E12	0	6,52	574,8
E14	100	8,72	463,0
E15	350	8,34	325,0

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E17	-40	4,20	656,9
E16	0	6,31	598,0
E19	26	8,11	549,9
E21	26	8,47	550,6
E20	100	9,21	488,9

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E22	-40	1,26	671,4
E23	-10	5,81	617,9
E21	26	8,47	529,8
E24	100	9,54	449,0
E25	300	8,41	350,5

10.1.6.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E29	-10	1,89	737
E27	26	4,12	-
E30	70	6,32	621,4
E26	100	8,11	578,7
E28	250	7,91	499,5

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E32	0	1,92	688,3
E31	50	4,92	633,5
E33	100	7,02	560,5
E34	150	7,88	511,6
E35	300	7,95	487,3

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E37	-10	2,41	670
E36	50	6,22	572,6
E38	100	8,24	517,8
E39	350	8,33	426,4

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E43	-60	0,23	-
E41	-20	3,65	657,8
E42	26	6,68	566,5
E44	100	7,65	450,7
E45	300	9,61	463

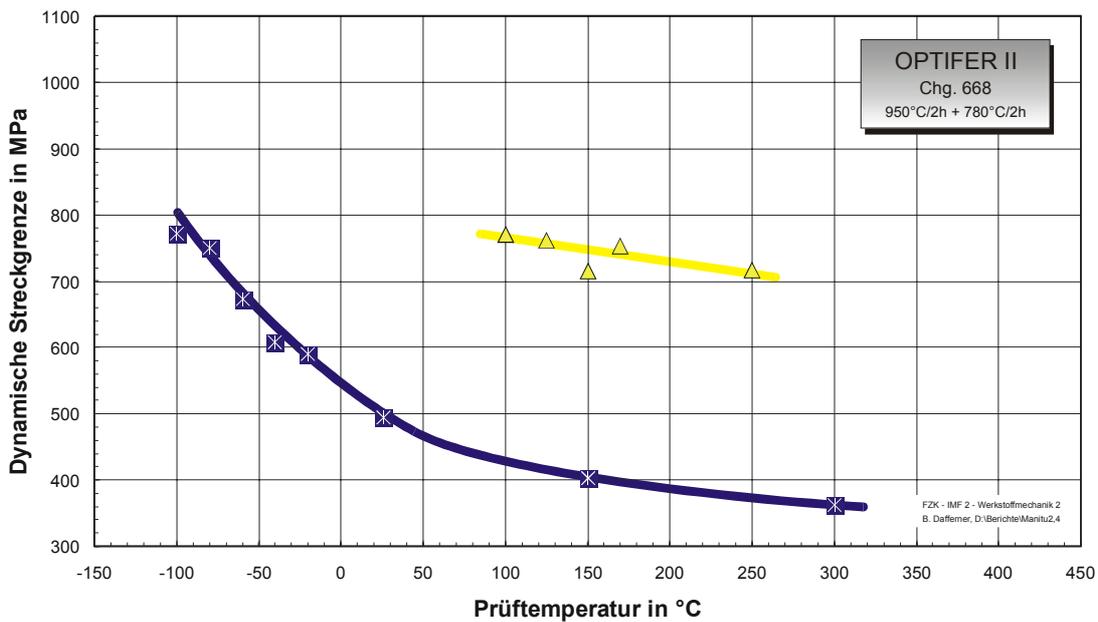
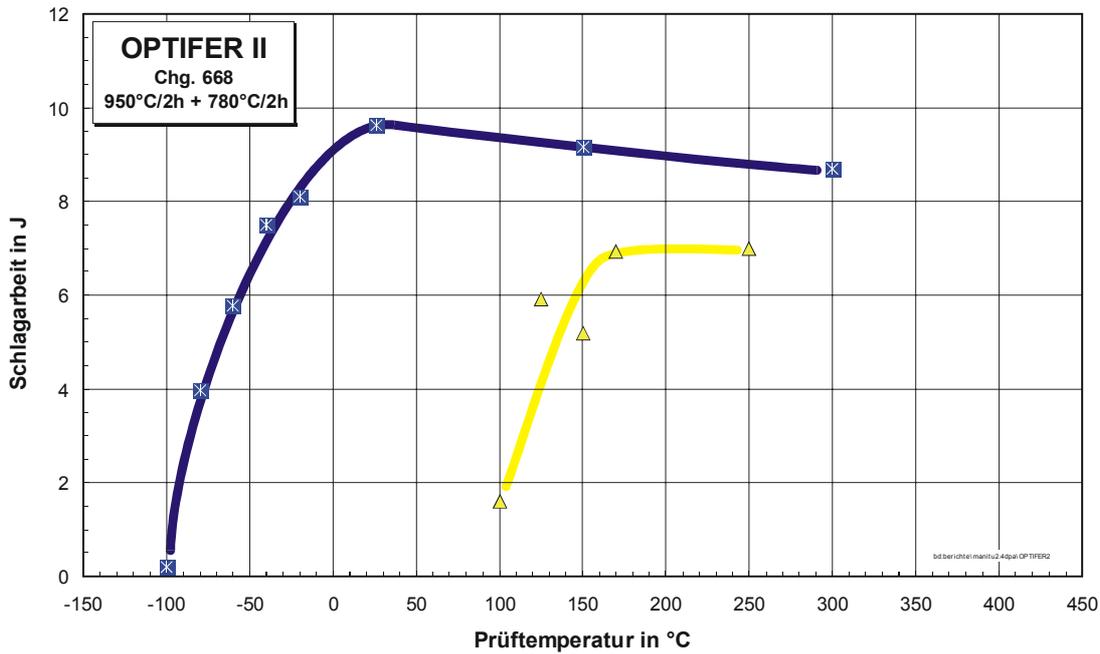
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E48	-50	0,81	682,3
E47	-20	3,87	633,5
E46	26	6,62	529,9
E49	70	8,88	469
E50	350	10,12	371,5

10.1.6.4 2,4 dpa

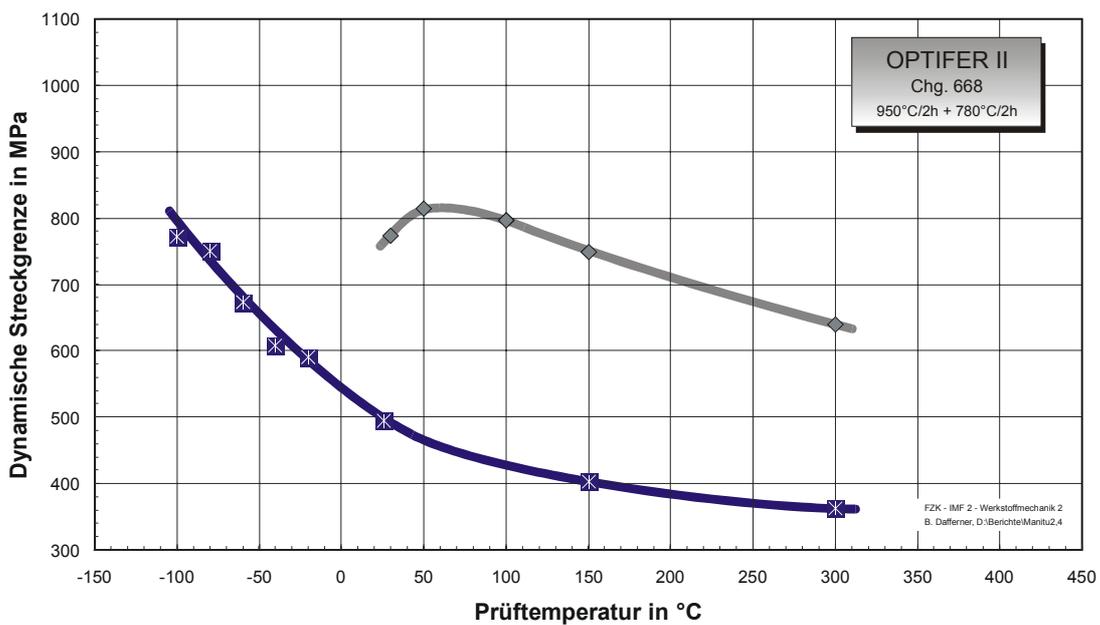
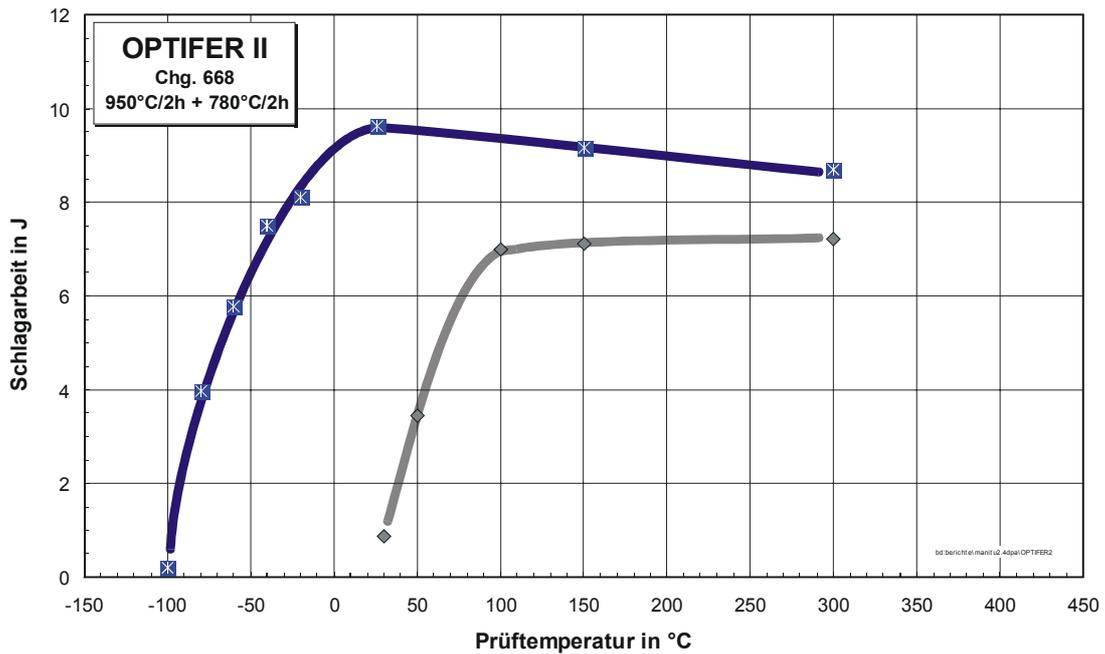
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E51	100	1,60	770
E55	125	5,92	761
E53	150	5,18	716
E54	170	6,93	753
E52	250	6,99	716



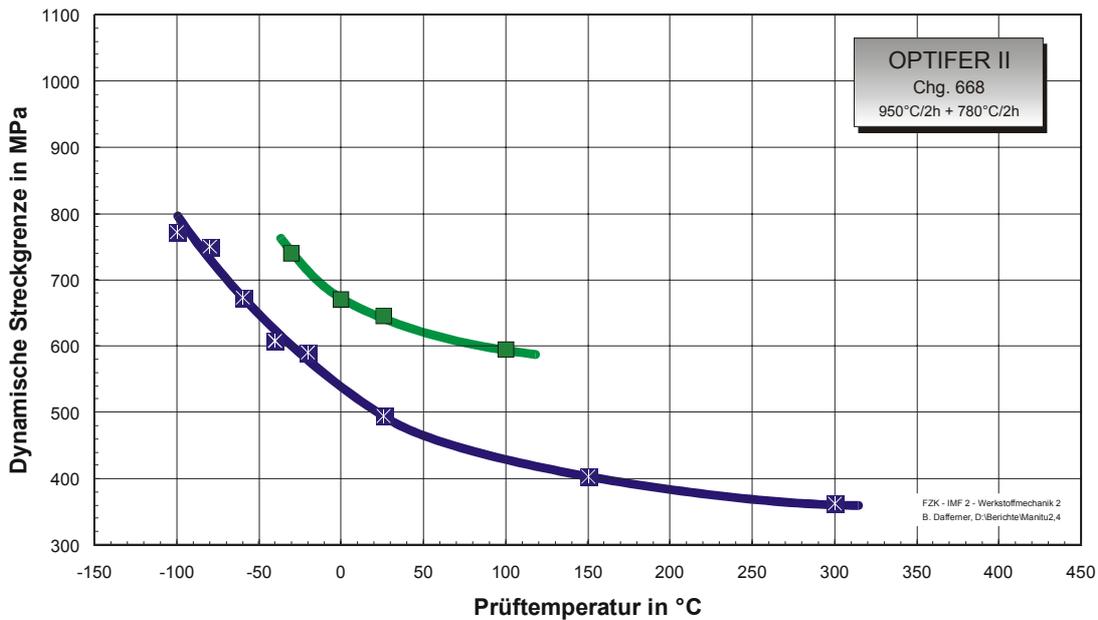
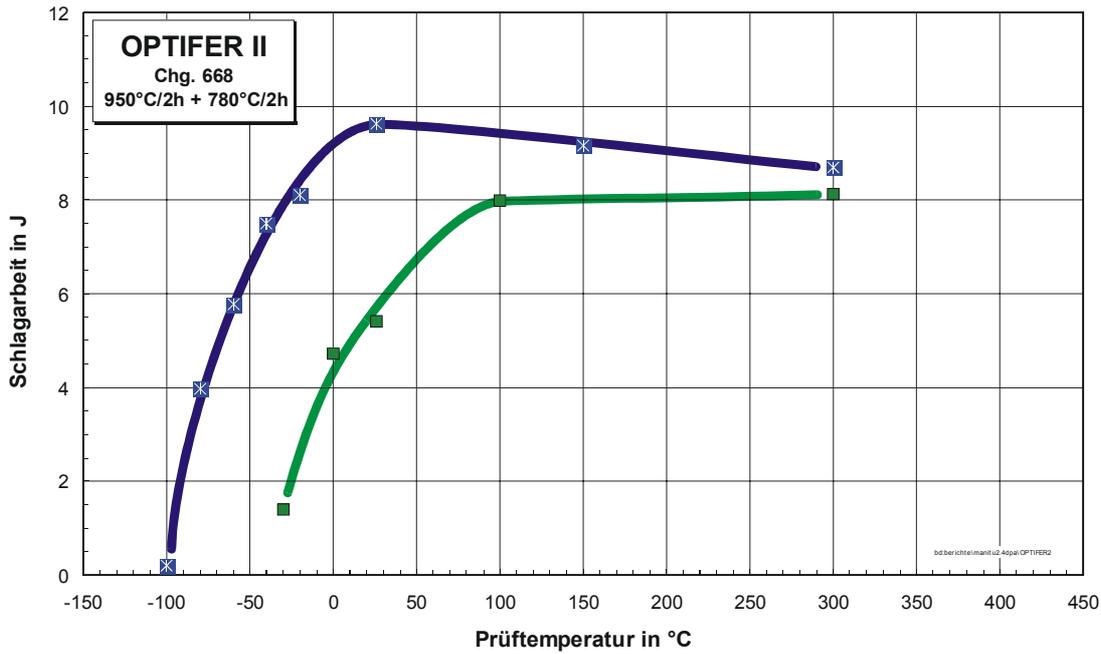
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E60	30	0,86	773
E57	50	3,45	814
E59	100	7,00	797
E56	150	7,11	749
E58	300	7,22	639



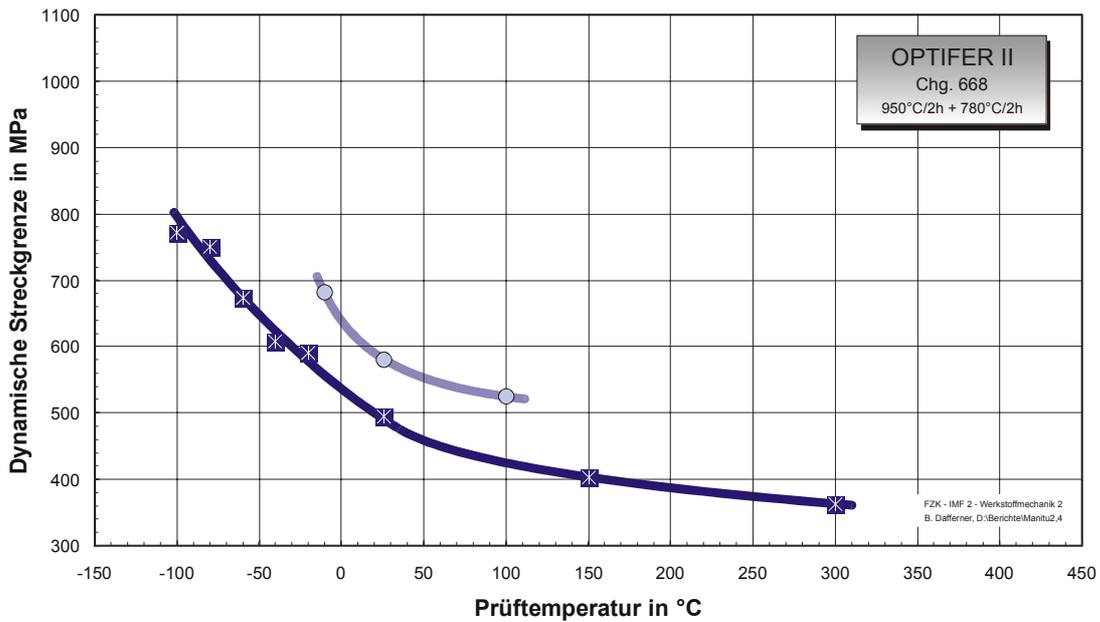
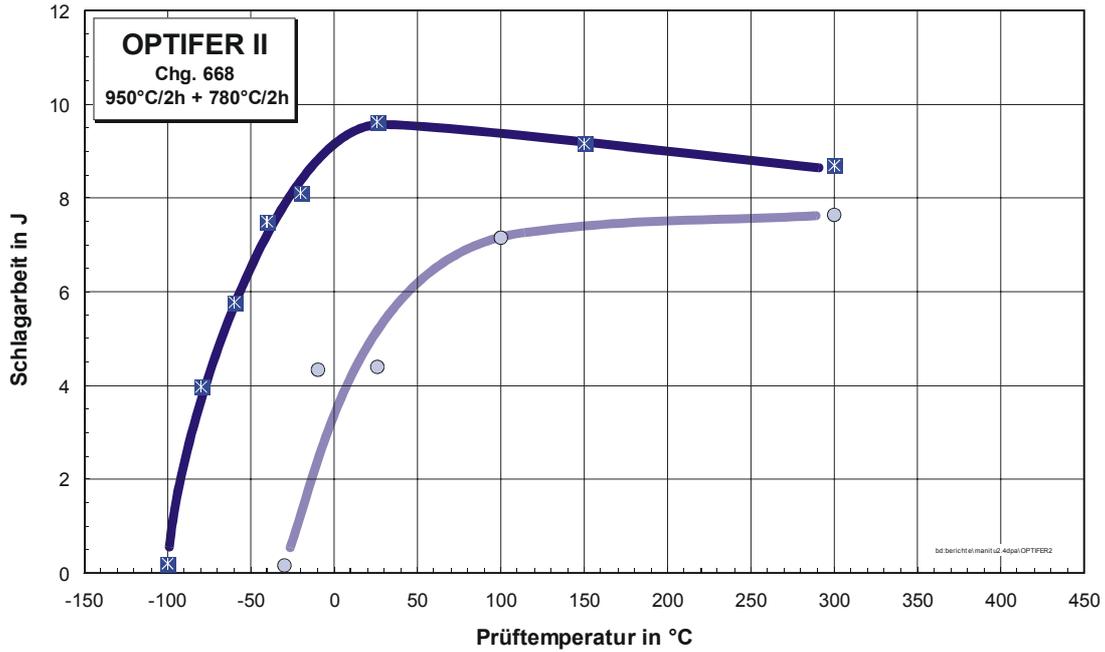
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E62	-30	1,40	739
E63	0	4,72	671
E61	26	5,41	645
E64	100	7,98	595
E65	300	8,12	0



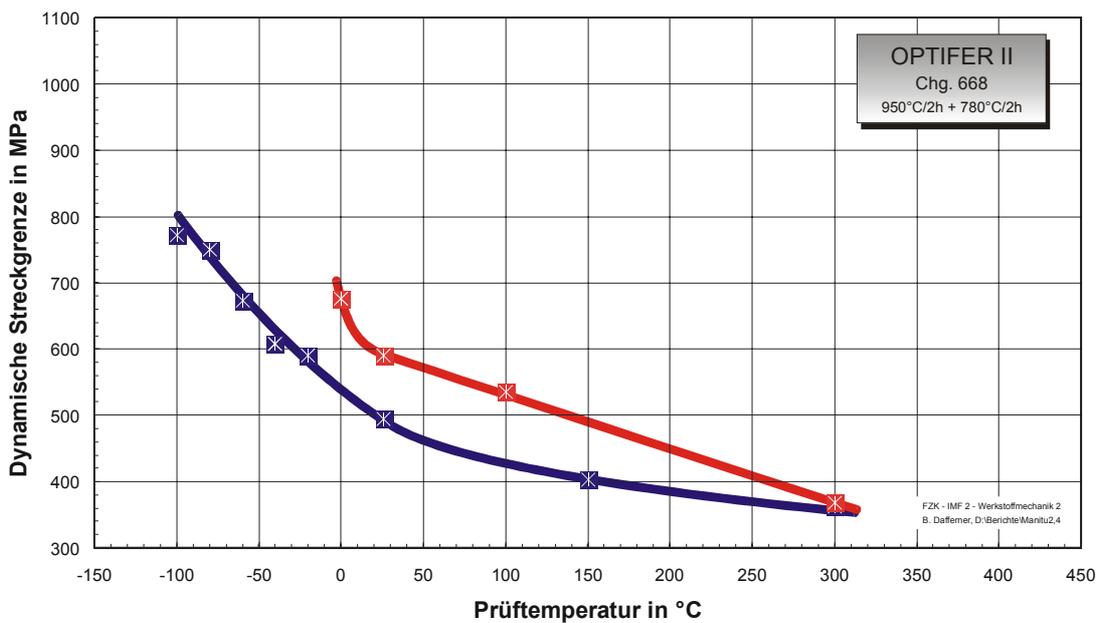
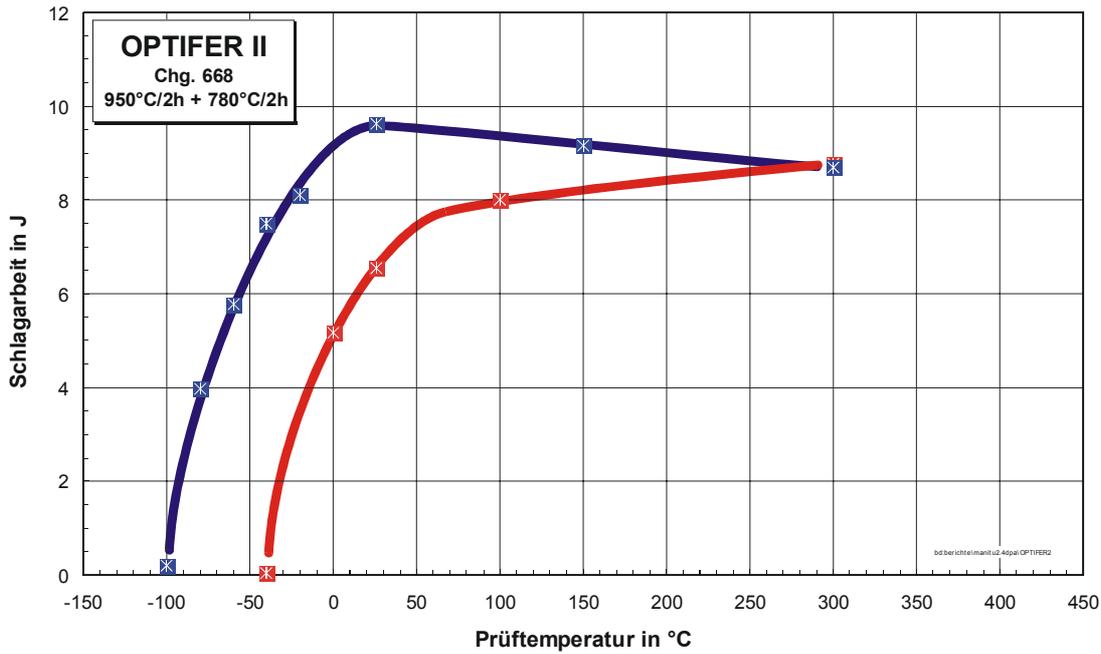
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E69	-30	0,15	-
E67	-10	4,33	682
E66	26	4,41	581
E68	100	7,15	526
E70	300	7,65	-



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
E72	-40	0,04	-
E73	0	5,17	676
E71	26	6,54	591
E74	100	8,01	535
E75	300	8,78	369



10.1.7 OPTIFER-IV

10.1.7.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
V13	-150	0,17	-
V12	-120	1,61	970
V11	-110	3,19	945
V06	-100	4,05	905
V14	-95	4,03	-
V05	-80	4,55	-
V17	-80	6,60	-
V09	-75	8,61	-
V08	-70	8,93	797
V25	-70	6,07	-
V07	-65	6,07	810
V04	-60	8,81	818
V03	-40	8,73	798
V02	-20	8,80	734
V01	25	8,82	626
V20	100	8,88	566
V21	150	8,46	559
V22	200	8,56	538
V23	250	8,29	504

10.1.7.2 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
U02	0	0,55	-
U03	10	1,16	-
U01	26	8,21	940
U04	100	8,46	944
U05	200	8,27	844

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
U09	-30	0,54	1027
U16	-15	2,10	-
U11	0	4,41	963
U14	10	7,73	932
U10	26	8,63	872
U12	100	8,32	788
U15	200	8,39	-
U13	300	8,01	675

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
U20	-50	0,35	-
U18	-20	6,67	981
U17	0	7,31	849
U19	26	8,71	841
U21	100	8,72	694
U22	200	8,48	632

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
U26	-50	3,34	976
U27	-40	5,05	-
U25	-30	7,43	868
U28	0	9,08	-
U29	100	8,56	639
U30	200	8,19	608

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

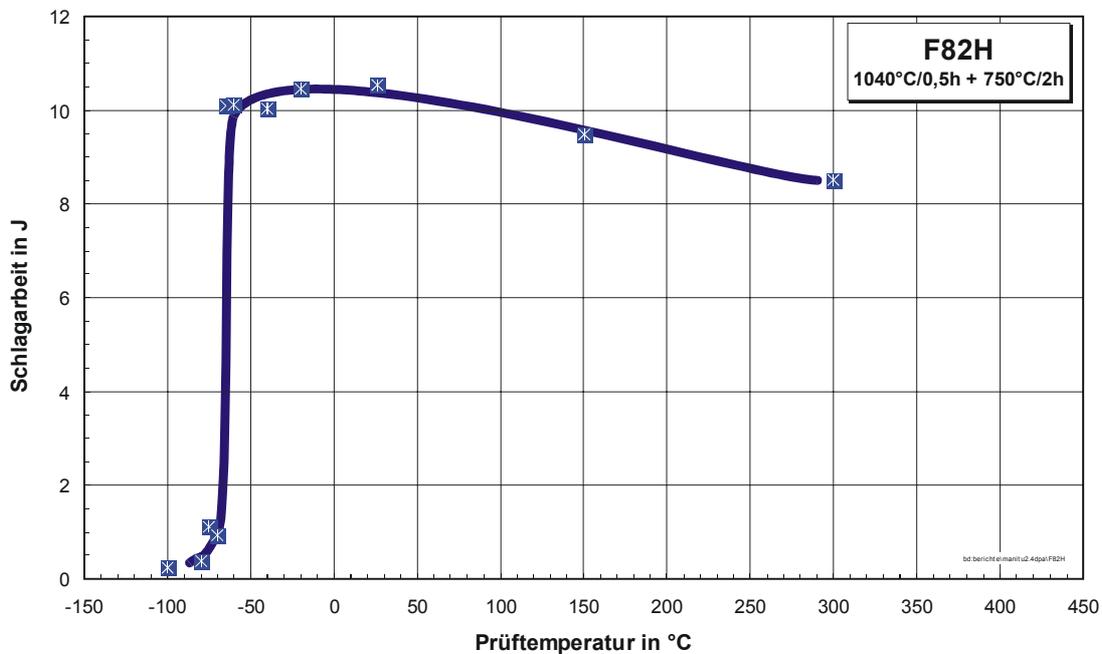
Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
U35	-70	5,12	994
U34	-50	4,83	968
U33	-30	8,80	893
U36	26	8,98	747
U37	100	9,57	624
U38	200	8,34	593

10.1.8 F82H

10.1.8.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
R06	-100	0,25	869,8
R05	-80	0,38	856,6
R09	-75	1,11	838,6
R08	-70	0,94	804,9
R07	-65	10,10	822,0
R04	-60	10,11	801,2
R03	-40	10,03	748,1
R02	-20	10,45	680,1
R01	26	10,54	623,1
R10	150	9,48	522,2
R11	300	8,51	479,0



10.1.8.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F04	-50	5,13	891,9
F03	-40	9,74	862,8
F01	-25	10,36	826,7

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F07	-60	0,53	949,0
F09	-55	0,84	901,4
F08	-50	10,55	883,4
F06	-40	8,93	807,9

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F13	-60	0,39	-
F11	-50	9,27	846,1
F12	-40	9,52	819,7
F14	100	9,76	575,9
F15	350	7,95	457,1

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F17	-70	0,75	847,9
F18	-60	0,71	809,5
F16	-50	9,05	826,4
F20	-20	10,55	-

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F22	-60	1,03	823,2
F21	-50	0,79	810,6
F23	-40	10,30	760,3
F24	100	9,91	568,1
F25	300	9,13	502,2

10.1.8.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F26	-20	0,56	865
F28	-10	0,53	858,8
F27	0	9,88	840,5
F30	100	9,87	687,8
F29	250	8,34	615,2

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F32	-50	0,24	822,4
F34	-35	0,35	-
F33	-20	10,44	816,2
F31	50	9,92	688,3
F35	300	8,79	523,9

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F39	-60	1,96	883,3
F38	-50	9,61	822,4
F37	-45	7,32	822,4
F36	-30	10,37	810,2
F40	350	9,02	481,3

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F41	-50	0,12	-
F43	-45	0,53	-
F42	-35	10,2	822,4
F44	150	9,94	584,8
F45	300	10,37	548,2

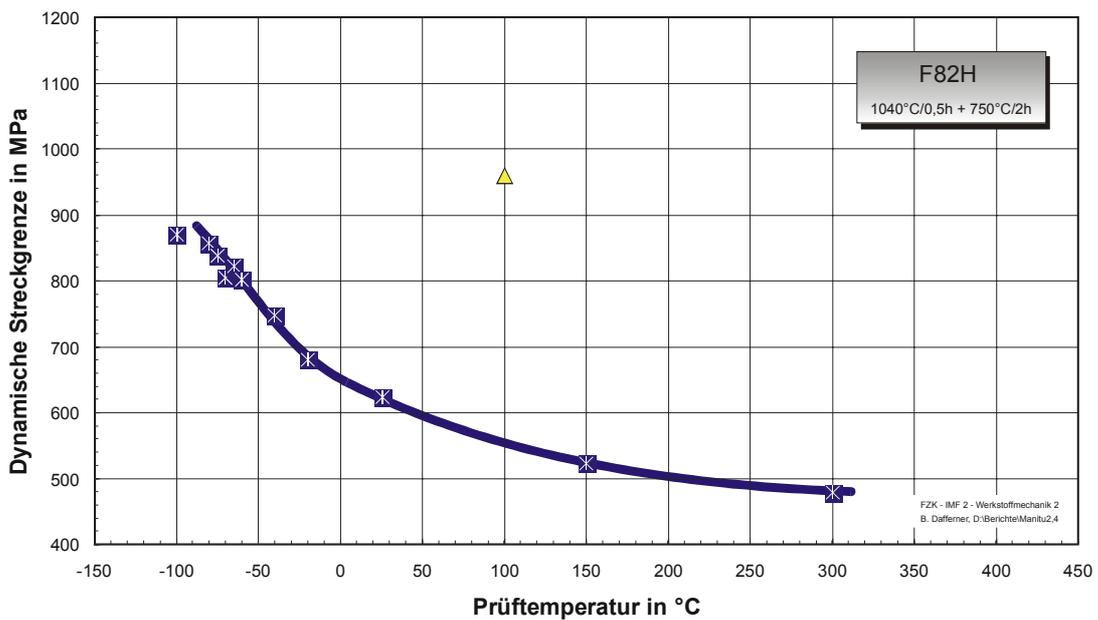
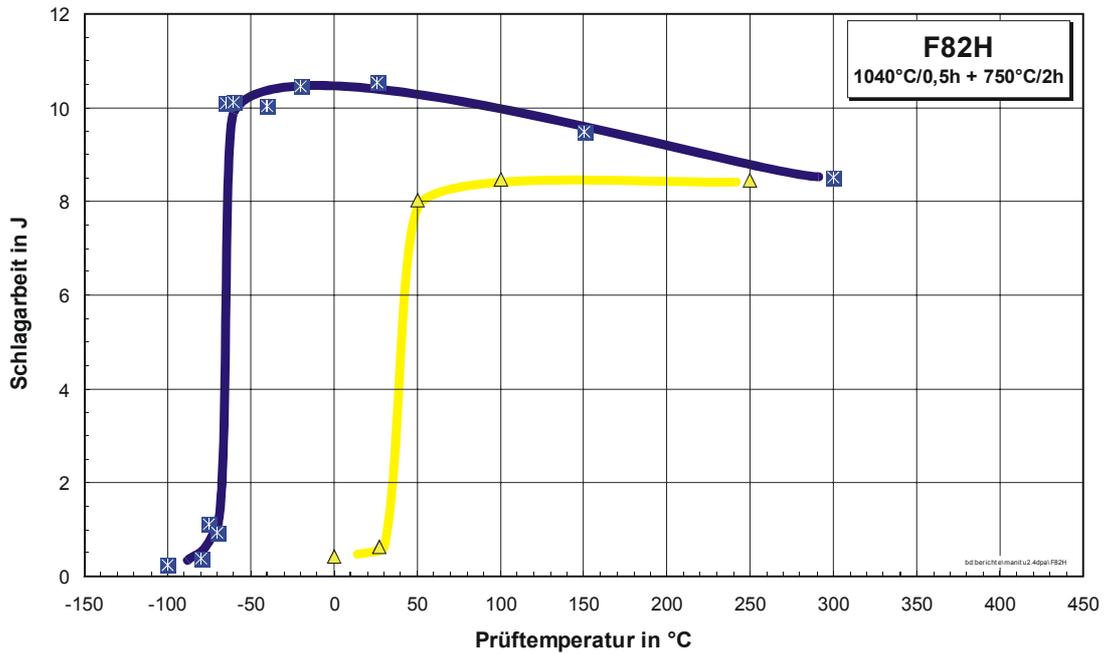
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F48	-70	5,23	889,4
F47	-60	9,5	846,7
F46	-50	8,55	828,4
F50	-20	10,2	737
F49	350	10,05	463

10.1.8.4 2,4 dpa

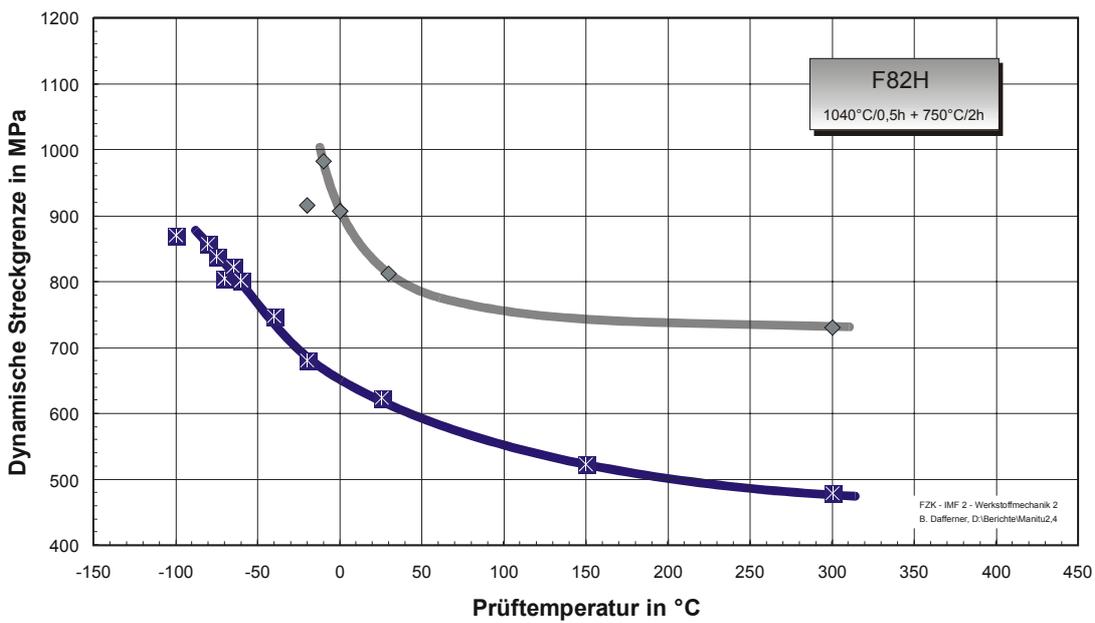
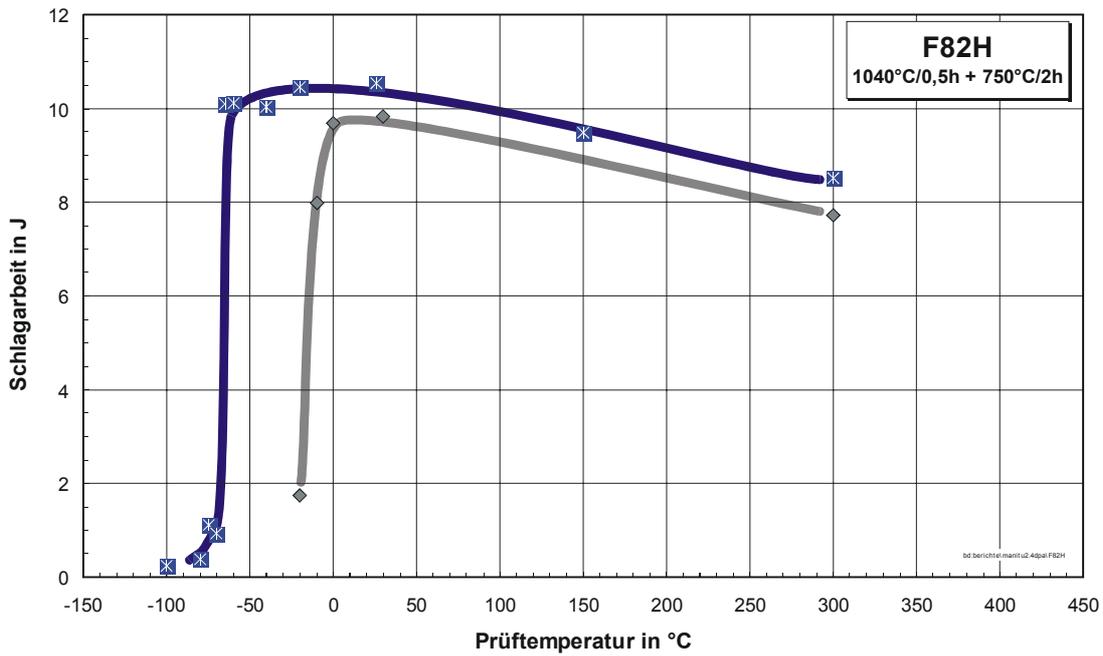
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F51	0	0,42	-
F52	27	0,62	-
F53	50	8,02	-
F55	100	8,47	959
F54	250	8,45	-



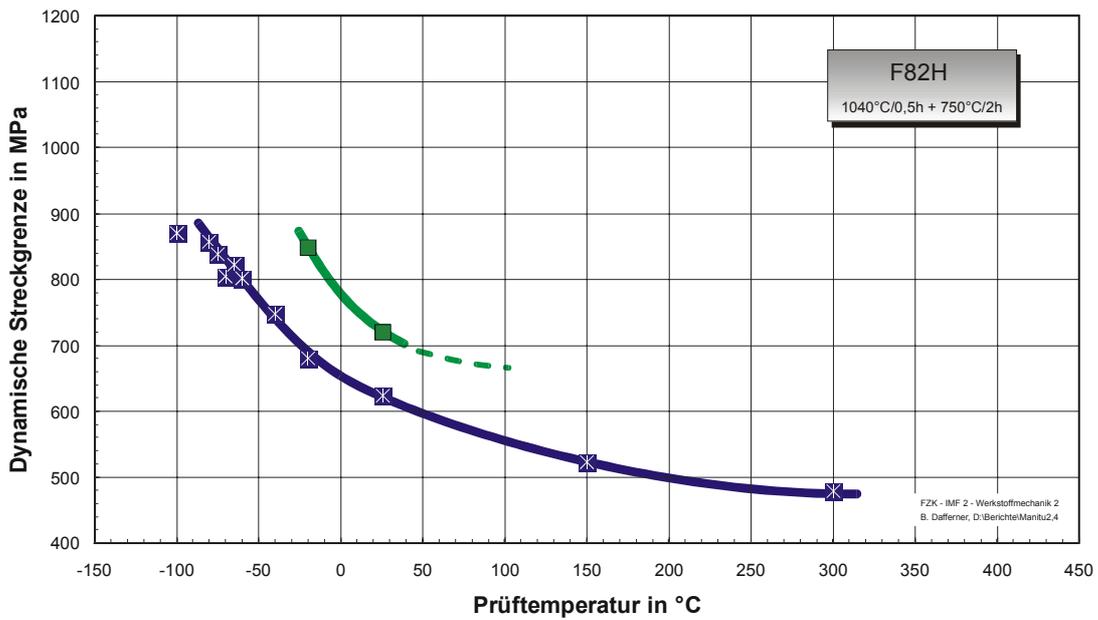
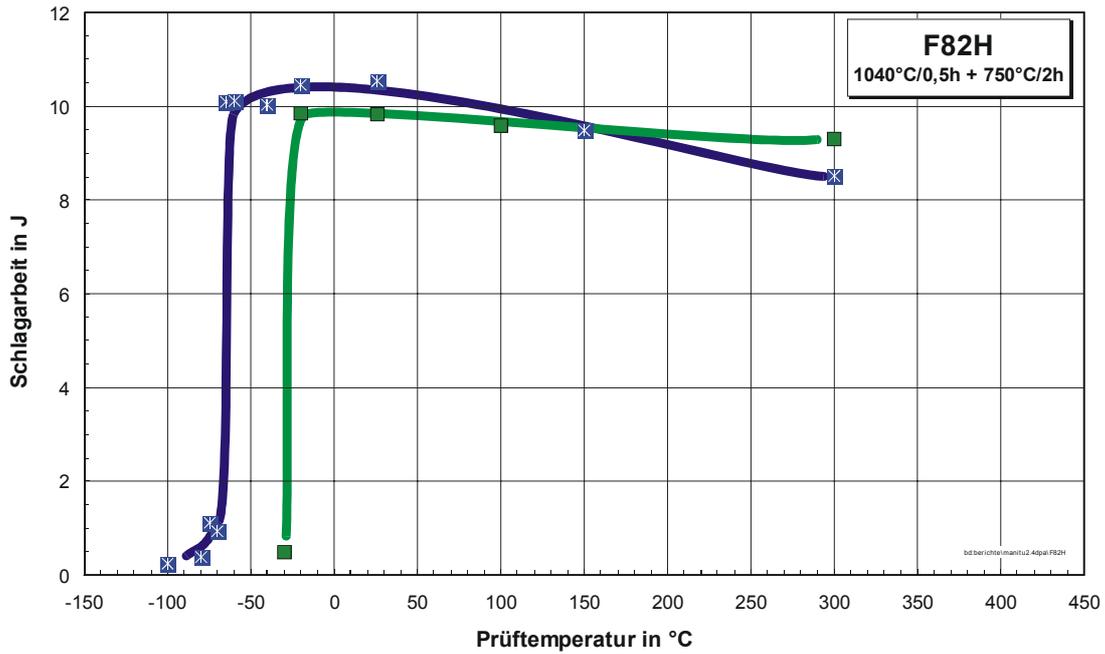
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F57	-20	1,74	916
F58	-10	7,99	982
F56	0	9,70	907
F60	30	9,83	812
F59	300	7,72	730



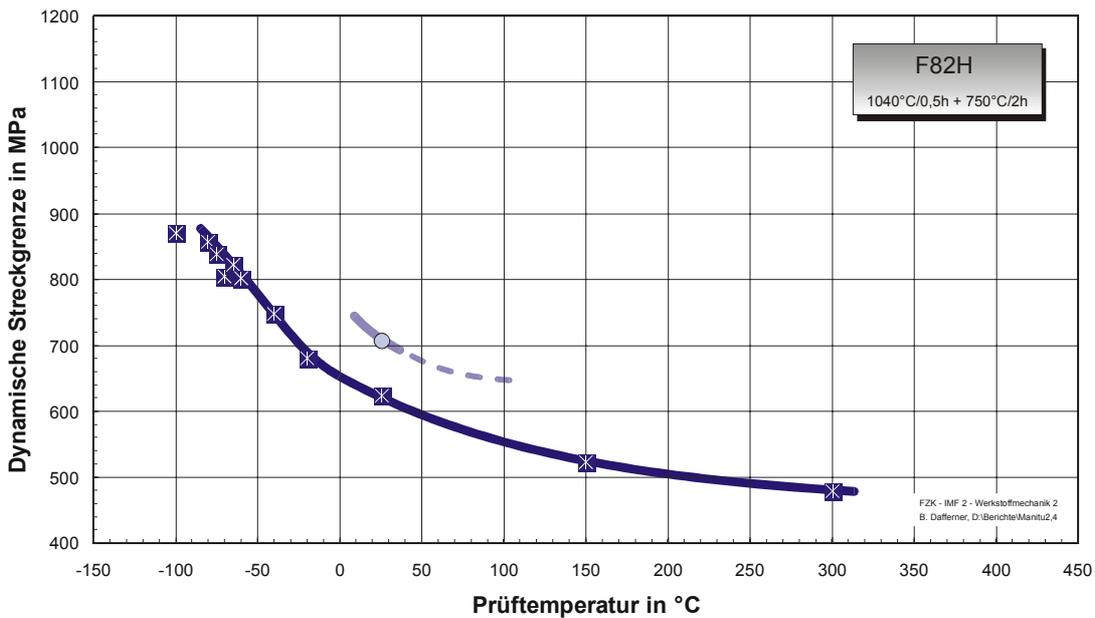
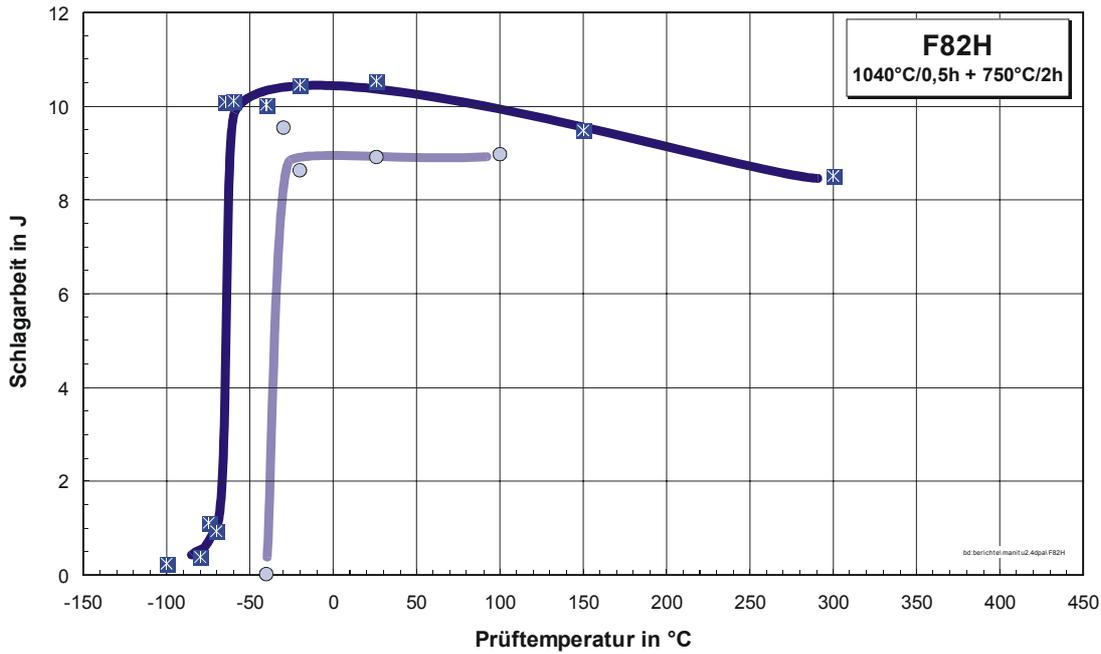
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F62	-30	0,49	-
F61	-20	9,85	-
F63	26	9,84	707
F64	100	9,59	-
F65	300	9,31	-



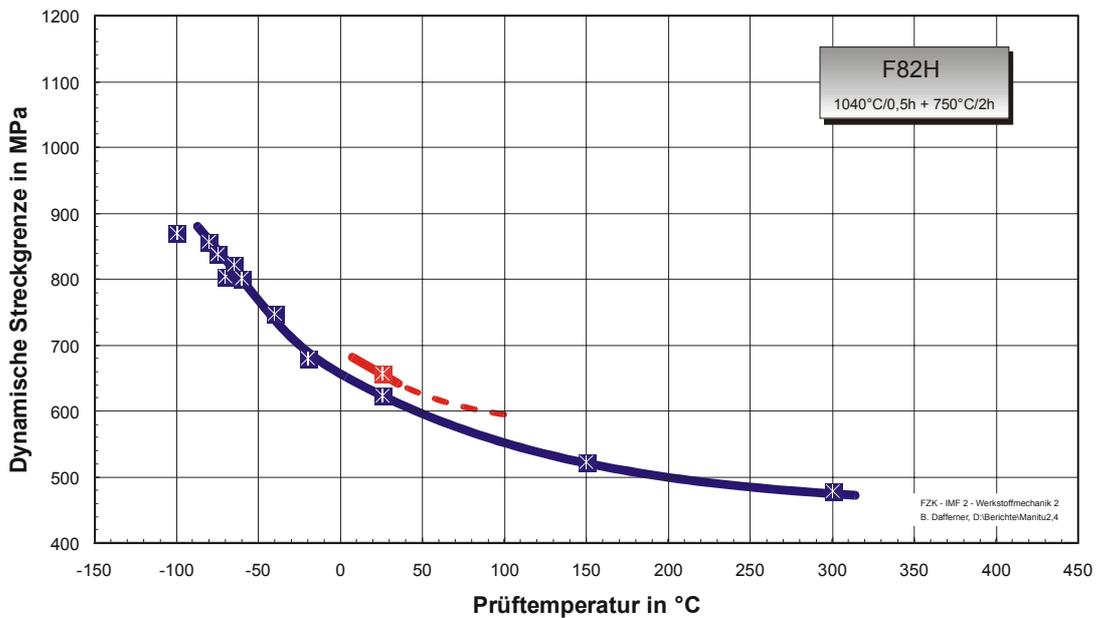
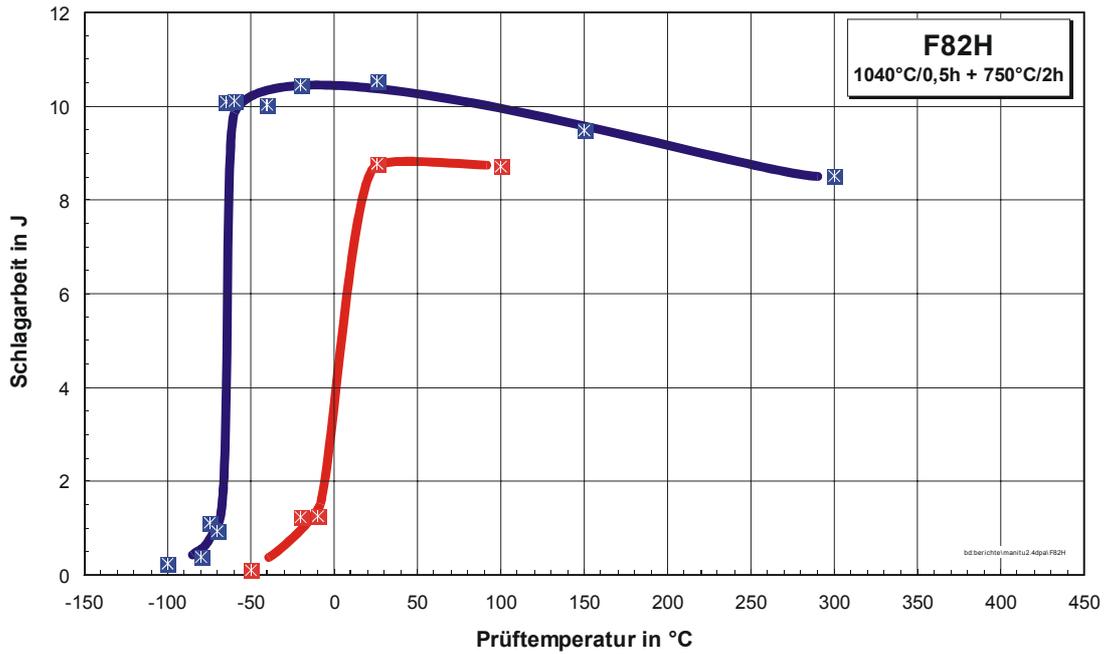
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F66	-40	0,02	-
F70	-30	9,54	-
F67	-20	8,64	-
F68	26	8,92	707
F69	100	8,97	-



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
F71	-50	0,09	-
F72	-20	1,24	-
F75	-10	1,26	-
F73	26	8,78	657
F74	100	8,71	-

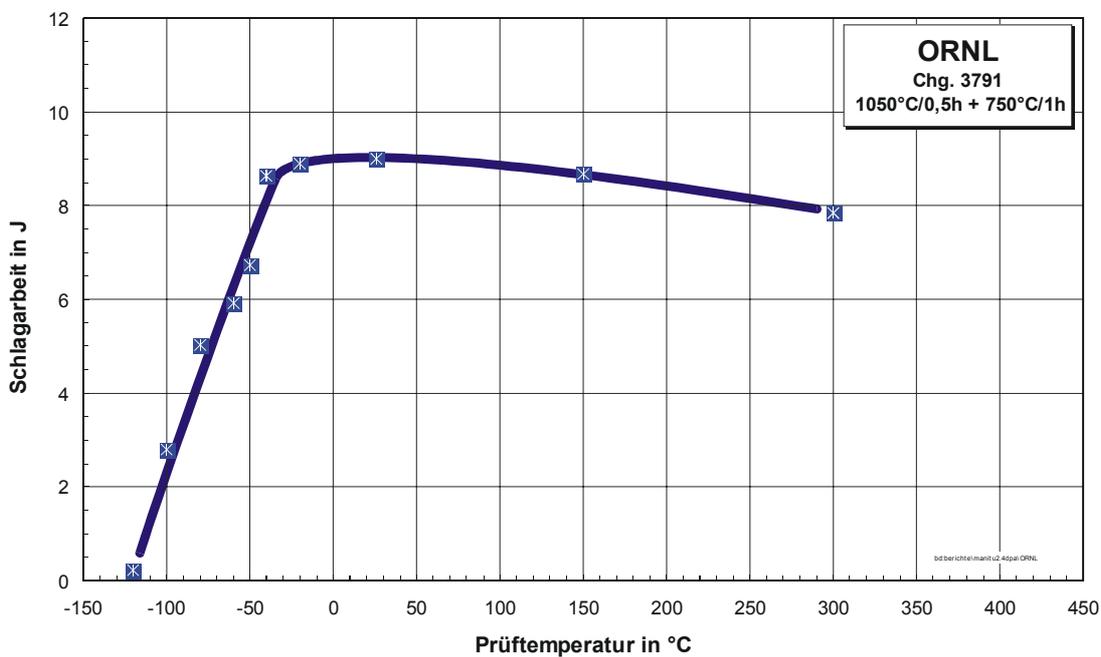


10.1.9 ORNL 3791

10.1.9.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
W08	-120	0,23	879,8
W06	-100	2,79	942,4
W05	-80	5,03	847,6
W04	-60	5,93	770,5
W07	-50	6,73	750,4
W03	-40	8,63	795,7
W02	-20	8,89	686,7
W01	26	9,00	594,9
W10	150	8,67	512,7
W11	300	7,85	465,0



10.1.9.2 0,2 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I03	-90	0,65	1047,3
I01	-60	3,99	971,2
I02	-20	8,57	881,2
I05	250	7,70	543,8

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I08	-80	2,56	1058,3
I09	-60	4,25	953,1
I06	-40	5,51	885,7
I07	-20	8,57	590,4
I10	300	7,75	533,1

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I15	-100	0,17	738,6
I13	-90	3,20	995,2
I11	-40	6,37	845,7
I12	-20	8,53	778,7
I14	100	8,53	604,3

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I18	-100	1,62	1004,3
I17	-60	3,98	850,8
I16	-40	4,66	801,7
I19	-20	6,45	820,0
I20	26	7,93	486,6

Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,2 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I22	-80	2,14	877,6
I21	-20	6,86	732,3
I23	0	7,89	680,3
I25	100	8,04	582,3

10.1.9.3 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I29	-80	0,17	-
I28	-60	4,18	998,9
I27	-40	5,98	974,6
I26	-20	8,29	852,8
I30	250	7,42	627,3

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I35	-70	0,11	-
I32	-50	3,54	998,9
I34	-25	7,73	858,8
I33	0	8,81	822,4
I31	50	8,08	724,9

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I39	-80	0,16	-
I37	-50	6,82	871,1
I36	-30	8,53	785,8
I38	150	8,3	548,2
I40	350	7,63	529,9

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I41	-50	0,25	-
I42	-30	5,79	779,6
I43	26	8,06	645,7
I44	150	8,37	590,8
I45	300	8,44	523,9

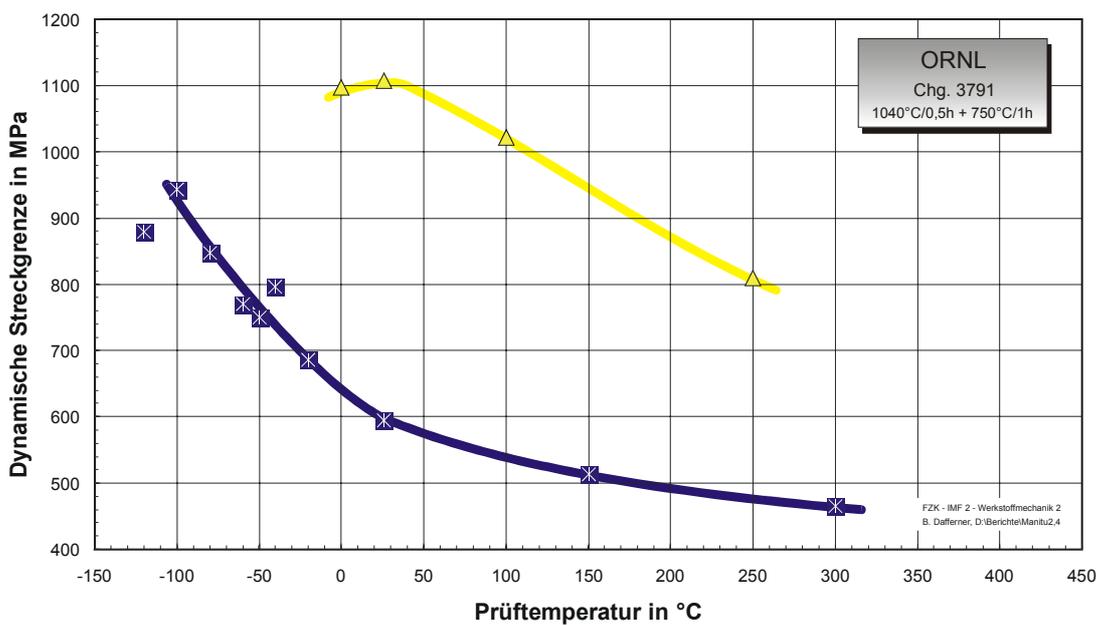
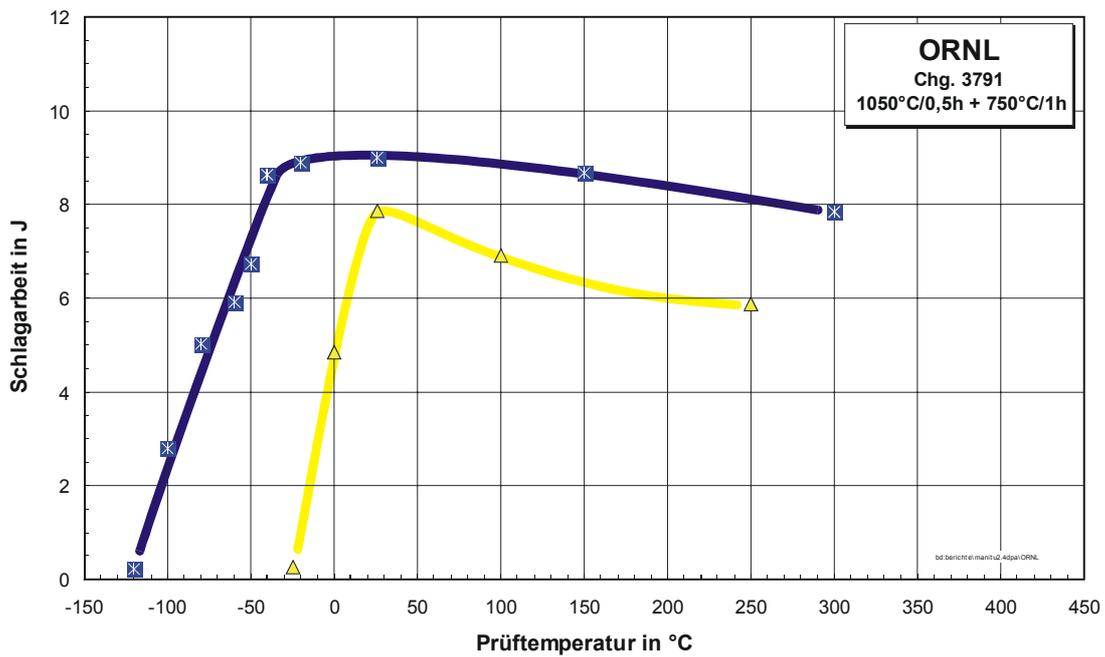
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I46	-50	0,22	-
I47	-30	1,1	718,7
I50	-10	8,16	700,6
I48	26	8,29	633,5
I49	350	7,48	511,6

10.1.9.4 2,4 dpa

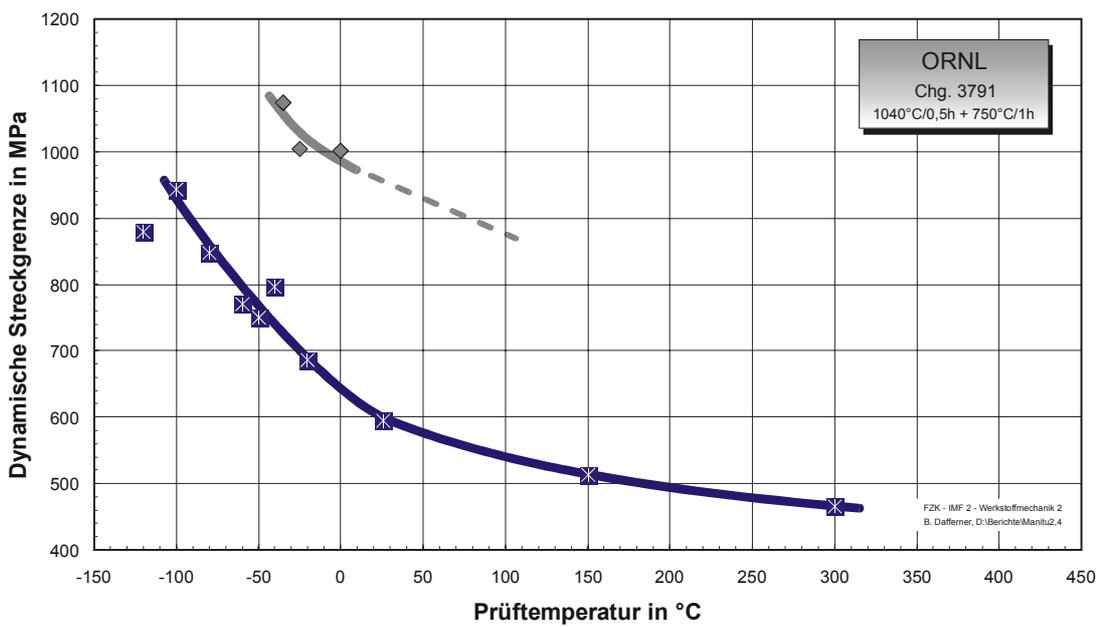
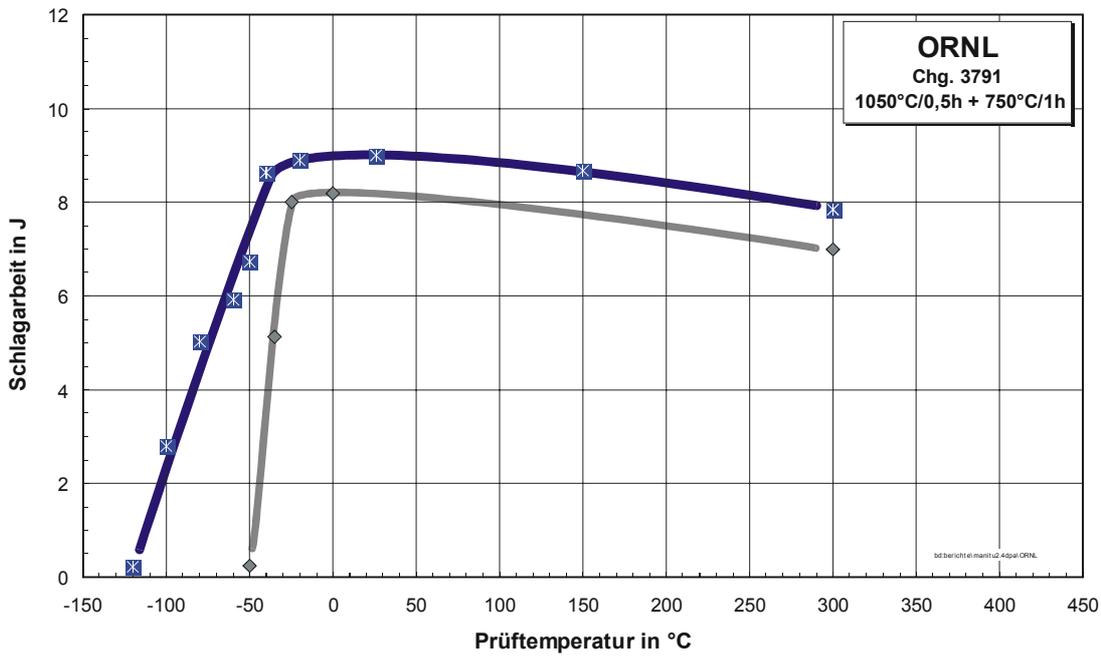
Bestrahlungsparameter: 250°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I51	-25	0,26	-
I52	0	4,83	1098
I53	26	7,87	1108
I55	100	6,92	1021
I54	250	5,89	810



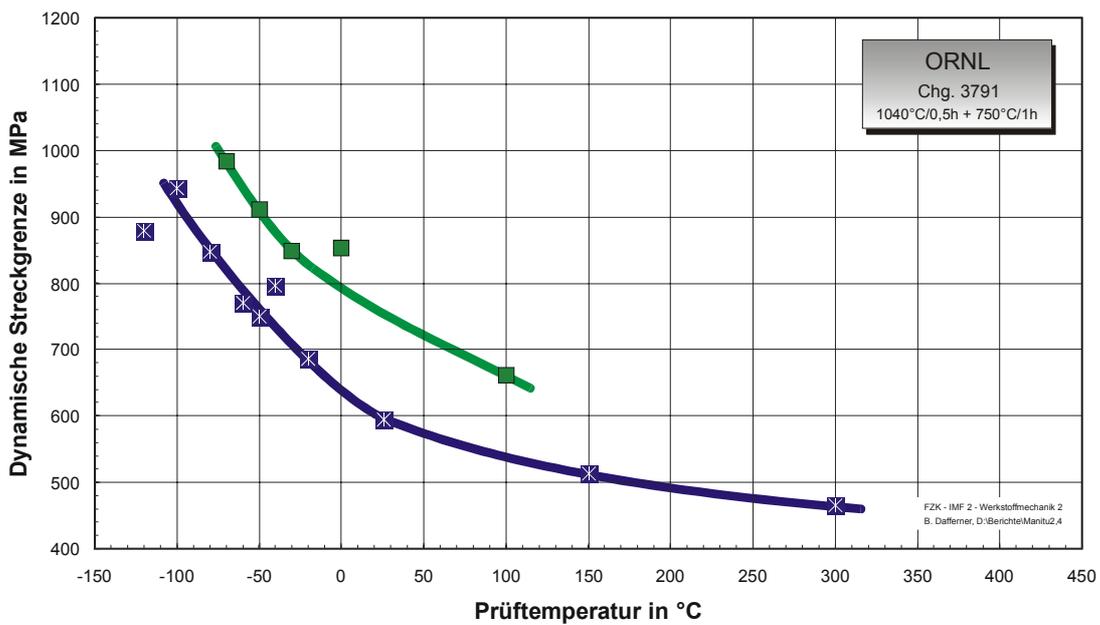
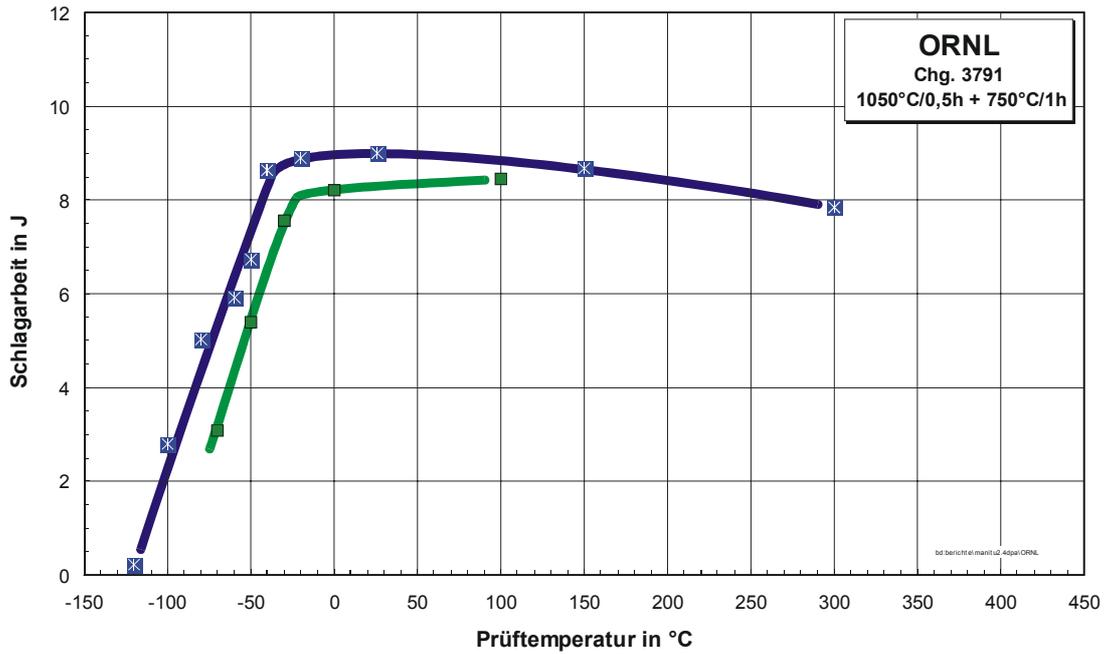
Bestrahlungsparameter: 300°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I57	-50	0,25	-
I60	-35	5,12	1073
I58	-25	8,00	1004
I56	0	8,18	1002
I59	300	6,99	-



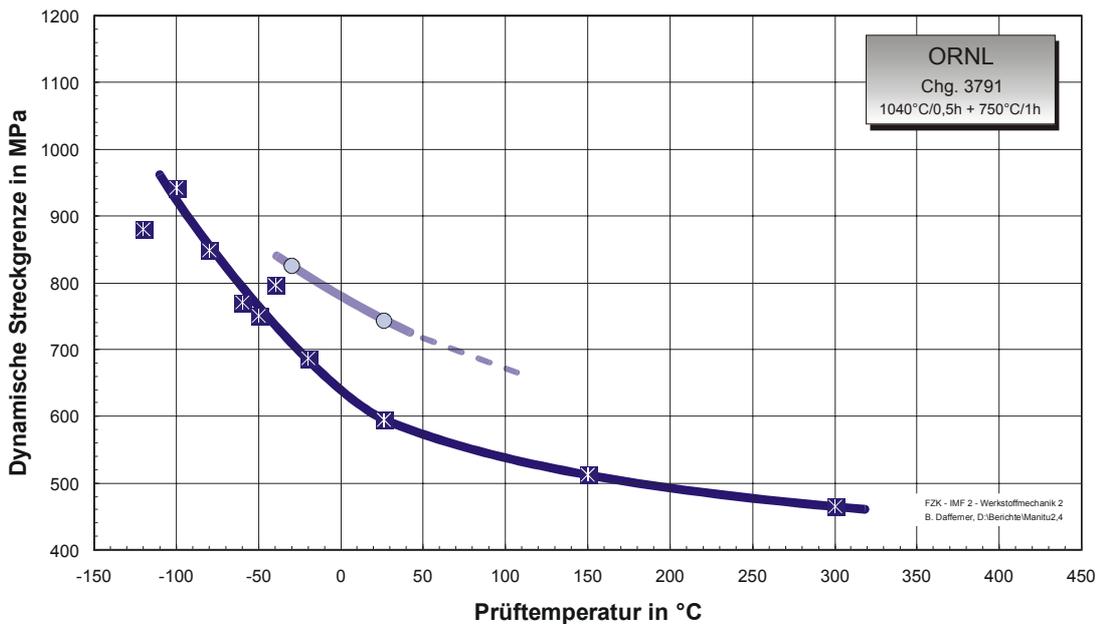
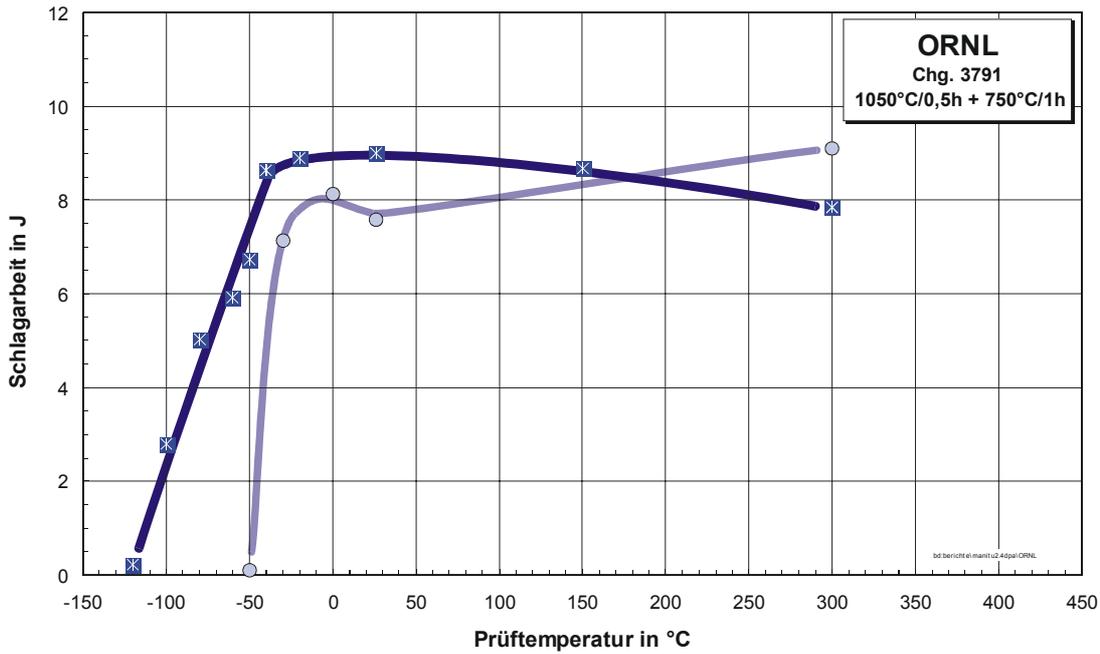
Bestrahlungsparameter: 350°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I63	-70	3,08	984
I61	-50	5,39	910
I62	-30	7,56	849
I64	0	8,22	854
I65	100	8,45	661



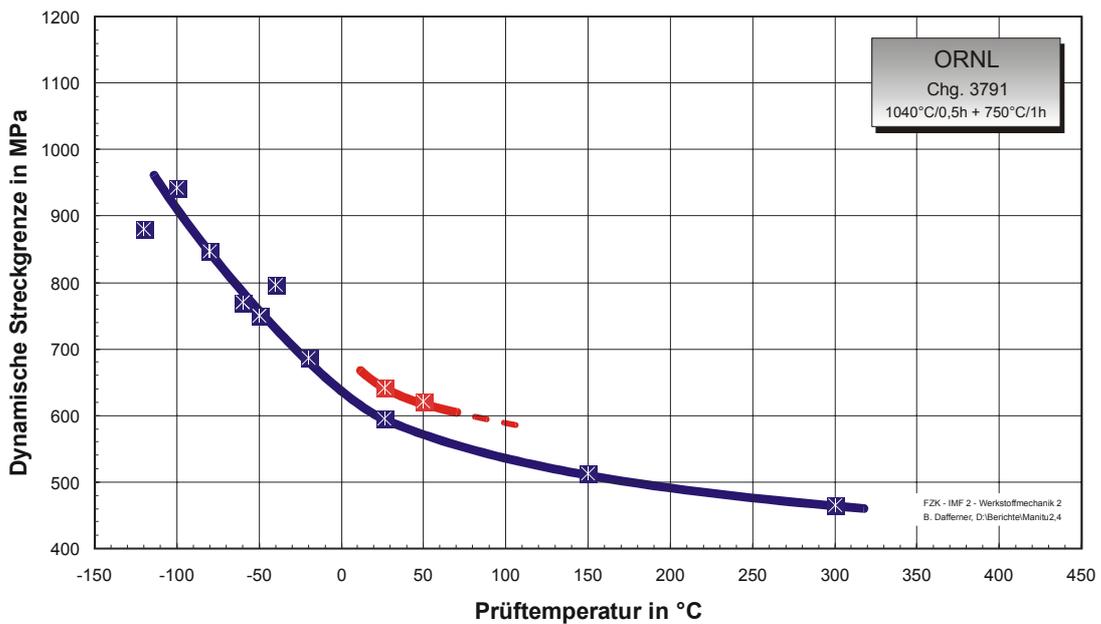
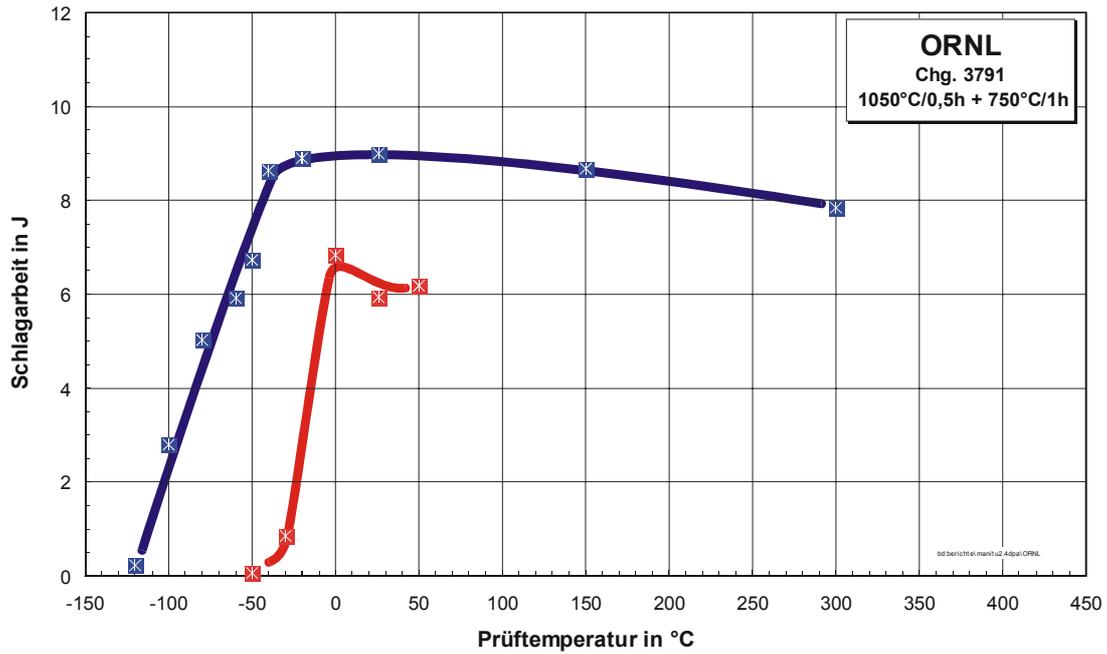
Bestrahlungsparameter: 400°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
I66	-50	0,10	-
I67	-30	7,13	825
I69	0	8,14	-
I68	26	7,58	743
I70	300	9,09	-



Bestrahlungsparameter: 450°C / 2,4 dpa

Proben-Nr.	Prüf­temperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
171	-50	0,06	-
172	-30	0,85	-
174	0	6,82	-
173	26	5,93	642
175	50	6,19	622



10.1.10 GA3X

10.1.10.1 Unbestrahlt

Unbestrahlte Experimente

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
Q06	-100	0,30	1022
Q05	-80	3,62	-
Q04	-60	4,80	881
Q03	-40	7,10	797
Q02	-20	9,35	747
Q01	26	9,33	646
Q07	150	8,57	570
Q08	300	8,35	507

10.1.10.2 0,8 dpa

Bestrahlungsparameter: 250°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
X01	-40	0,11	1034
X04	-30	9,23	-
X02	-10	9,18	-
X03	26	9,29	915

Bestrahlungsparameter: 300°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
X09	-60	0,14	-
X10	-40	7,72	965
X08	-20	8,72	901
X07	30	8,62	823
X12	100	8,97	-

Bestrahlungsparameter: 350°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
X13	-50	0,44	-
X16	-30	0,85	-
X14	-10	8,99	978
X15	26	9,48	787

Bestrahlungsparameter: 400°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
X19	-50	0,43	886
X22	-30	9,43	926
X20	-10	9,02	865
X21	26	9,83	762

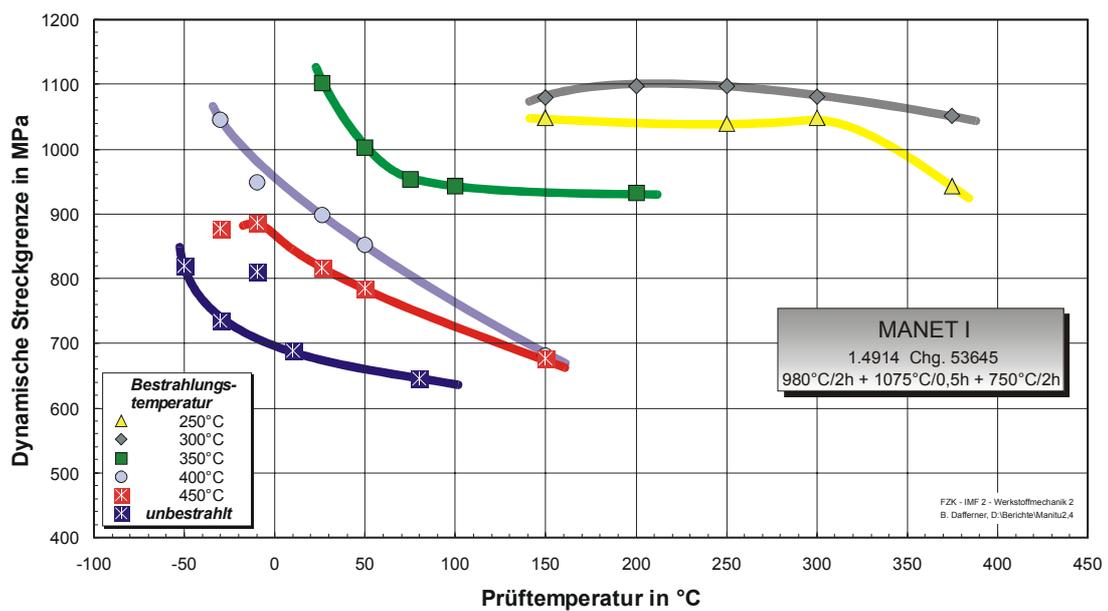
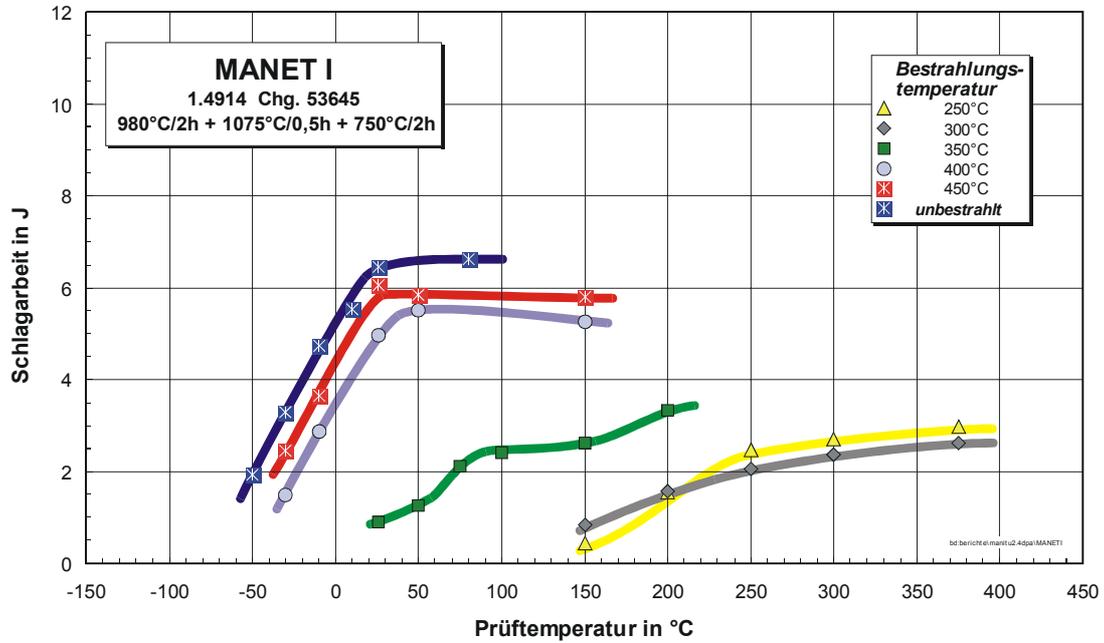
Bestrahlungsparameter: 450°C / 0,8 dpa

Proben-Nr.	Prüftemperatur in °C	Schlagarbeit in J	dyn. Streckgrenze in MPa
X28	-100	0,66	-
X26	-80	4,58	1087
X25	-50	9,14	894
X27	26	9,48	760

10.2 AUSWERTEERGEBNISSE

10.2.1 MANET-I

Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

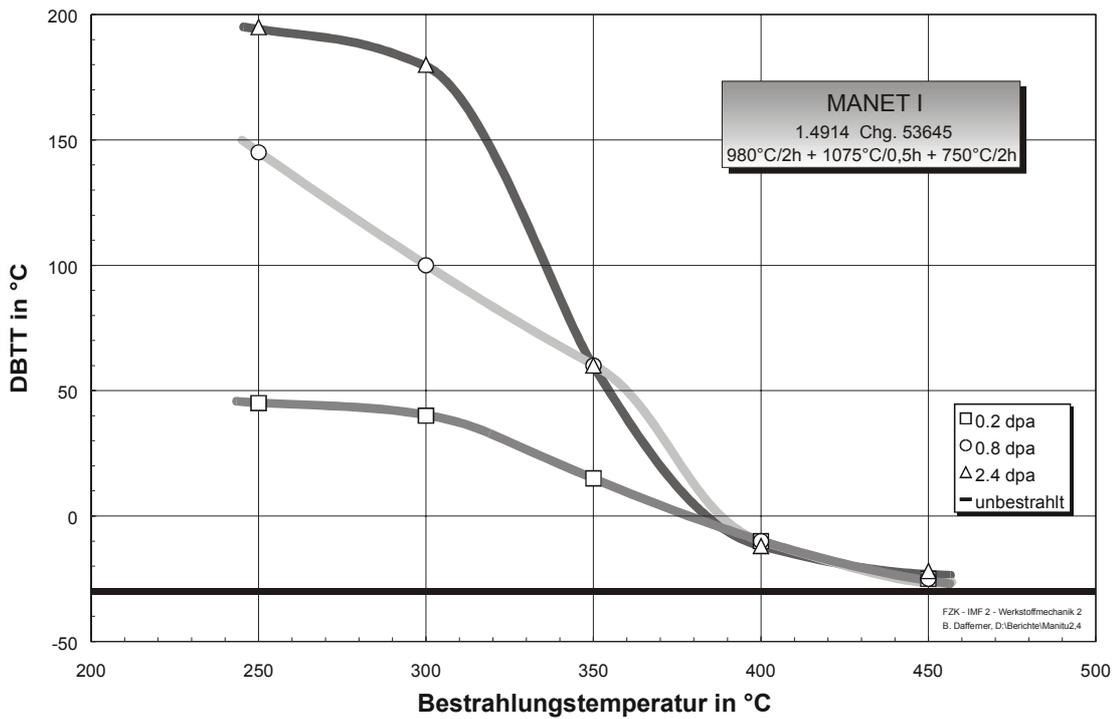
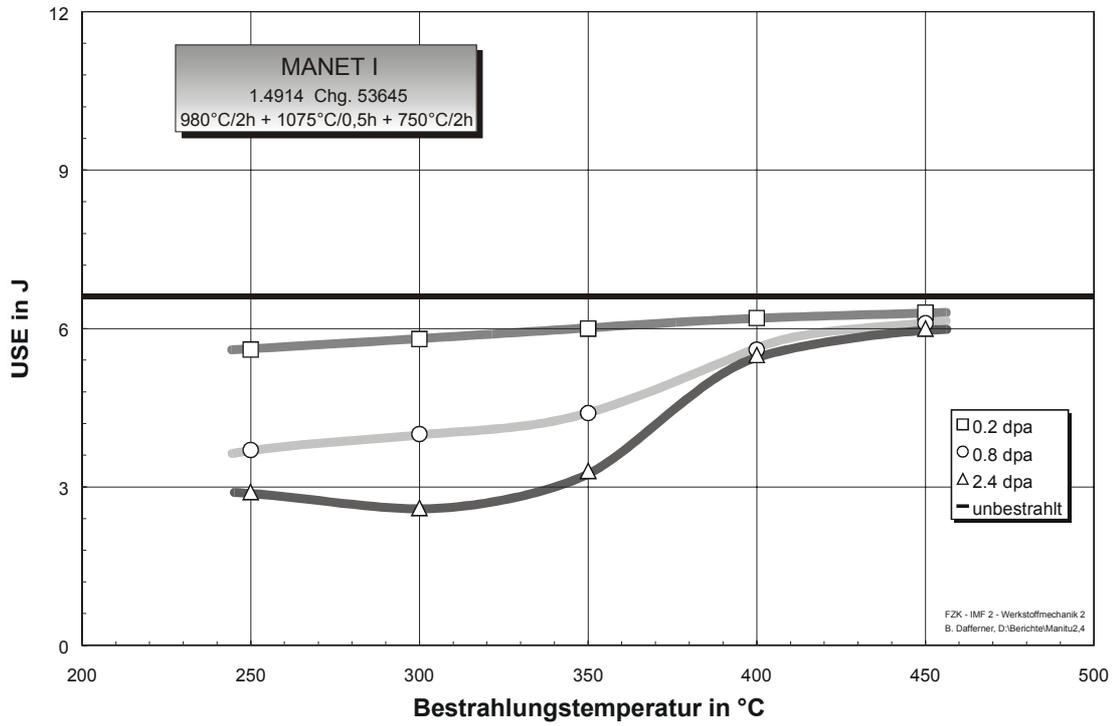


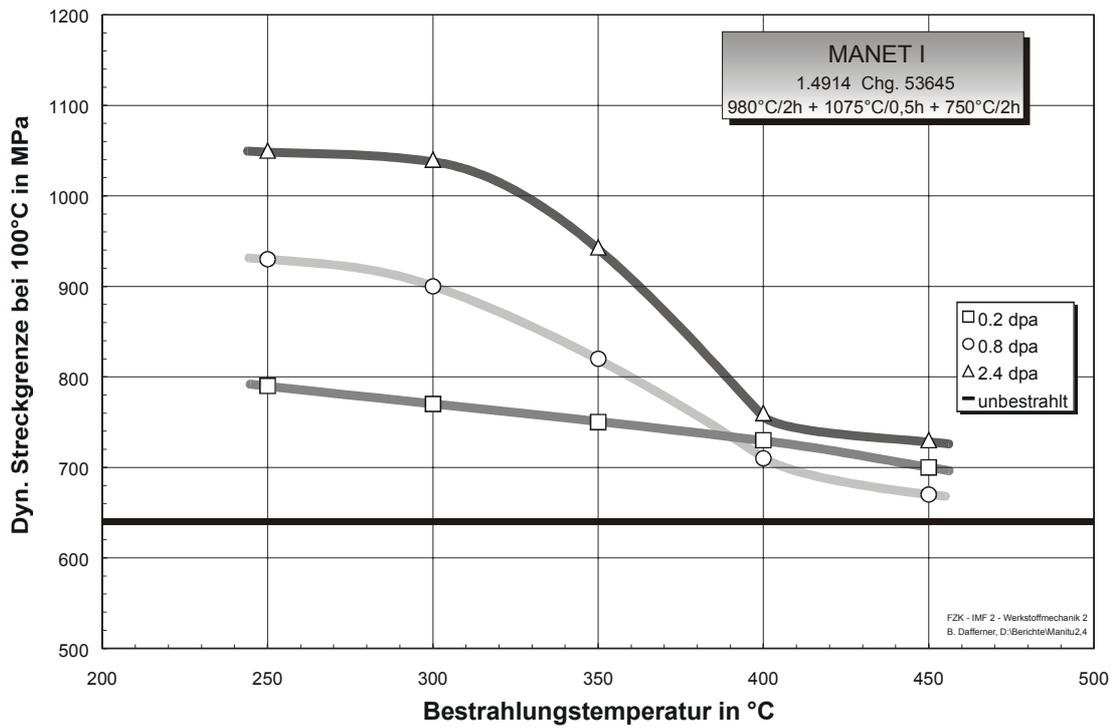
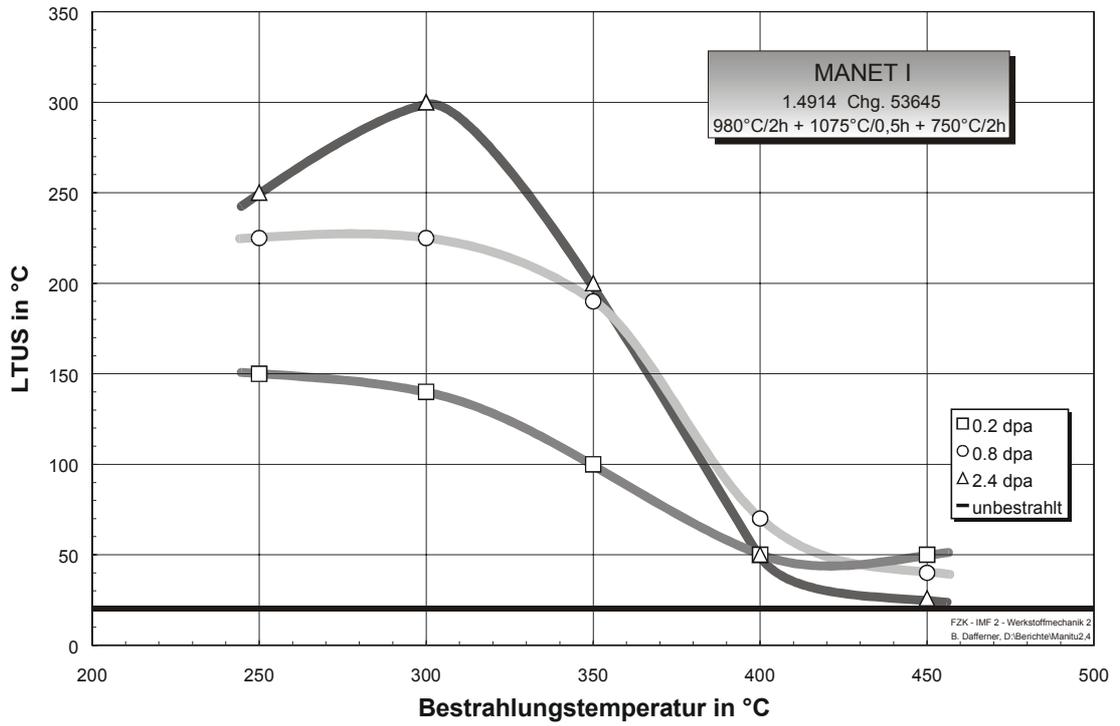
Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	5,6	45	150	790
0,2 dpa / 300 °C	5,8	40	140	770
0,2 dpa / 350 °C	6	15	100	750
0,2 dpa / 400 °C	6,2	-10	50	730
0,2 dpa / 450 °C	6,3	-25	50	700
Unbestrahlt	6,6	-30	20	640

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	3,7	145	225	930
0,8 dpa / 300 °C	4	100	225	900
0,8 dpa / 350 °C	4,4	60	190	820
0,8 dpa / 400 °C	5,6	-10	70	710
0,8 dpa / 450 °C	6,1	-25	40	670
Unbestrahlt	6,6	-30	20	640

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	2,9	195	250	1050 *)
2,4 dpa / 300 °C	2,6	180	300	1040 *)
2,4 dpa / 350 °C	3,3	60	200	943
2,4 dpa / 400 °C	5,5	-12	50	760
2,4 dpa / 450 °C	6	-22	26	730
Unbestrahlt	6,6	-30	20	640

*) aus benachbarten Meßwerten interpoliert

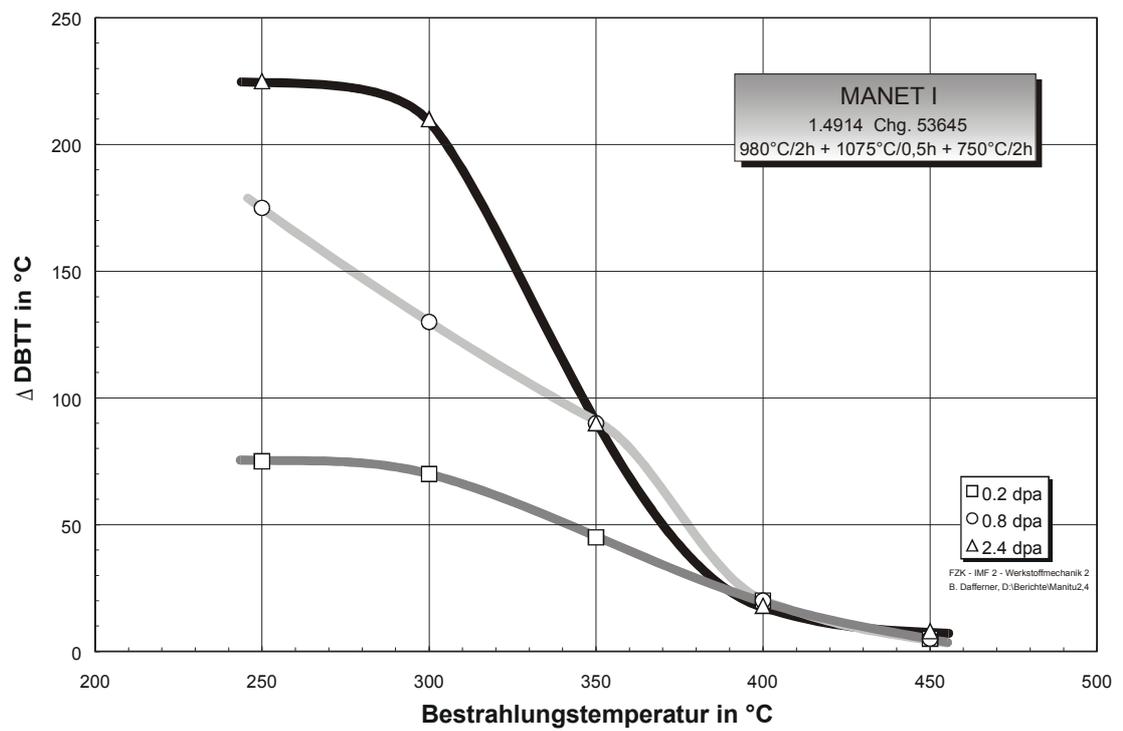
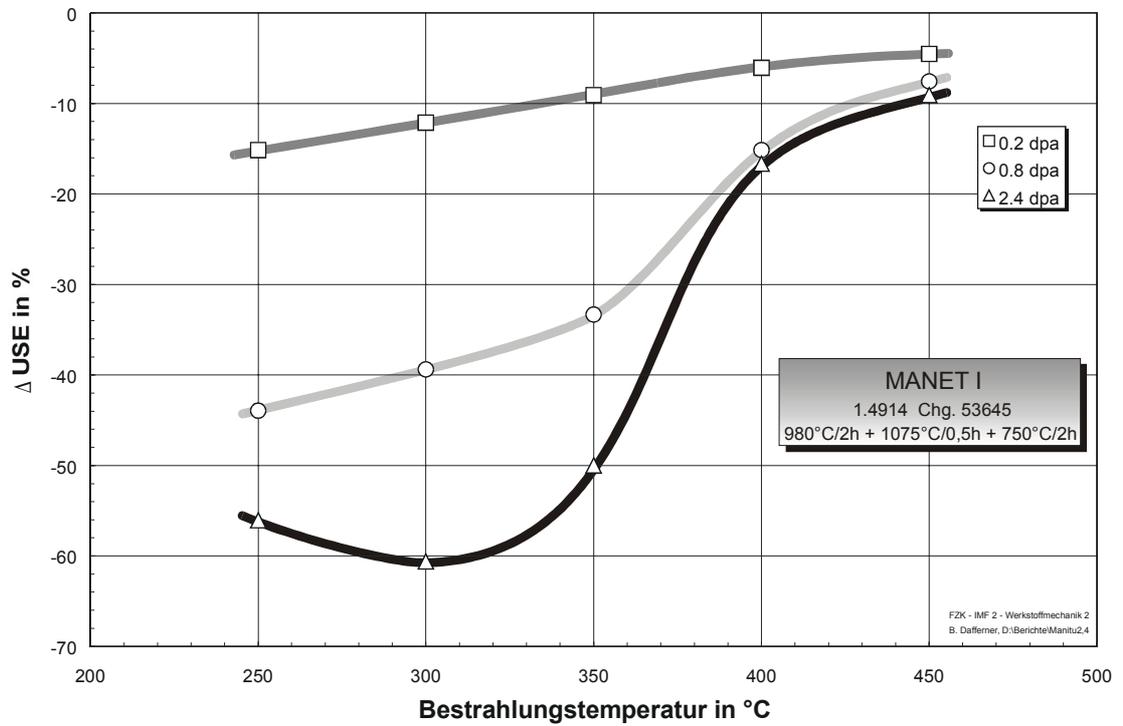


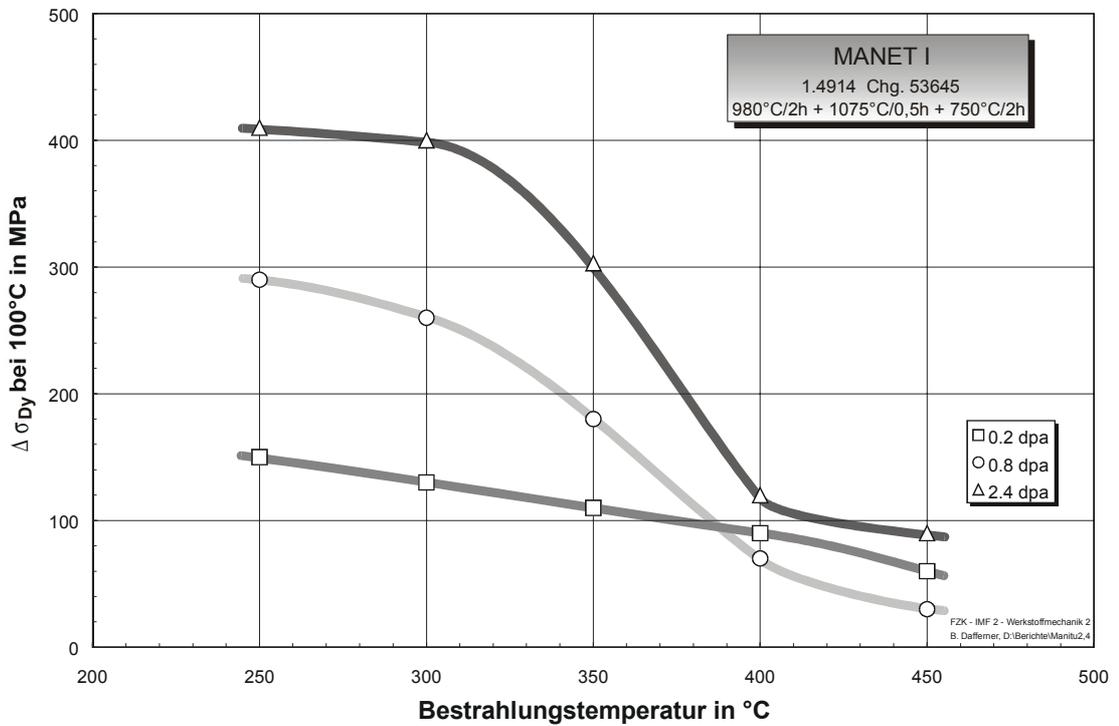
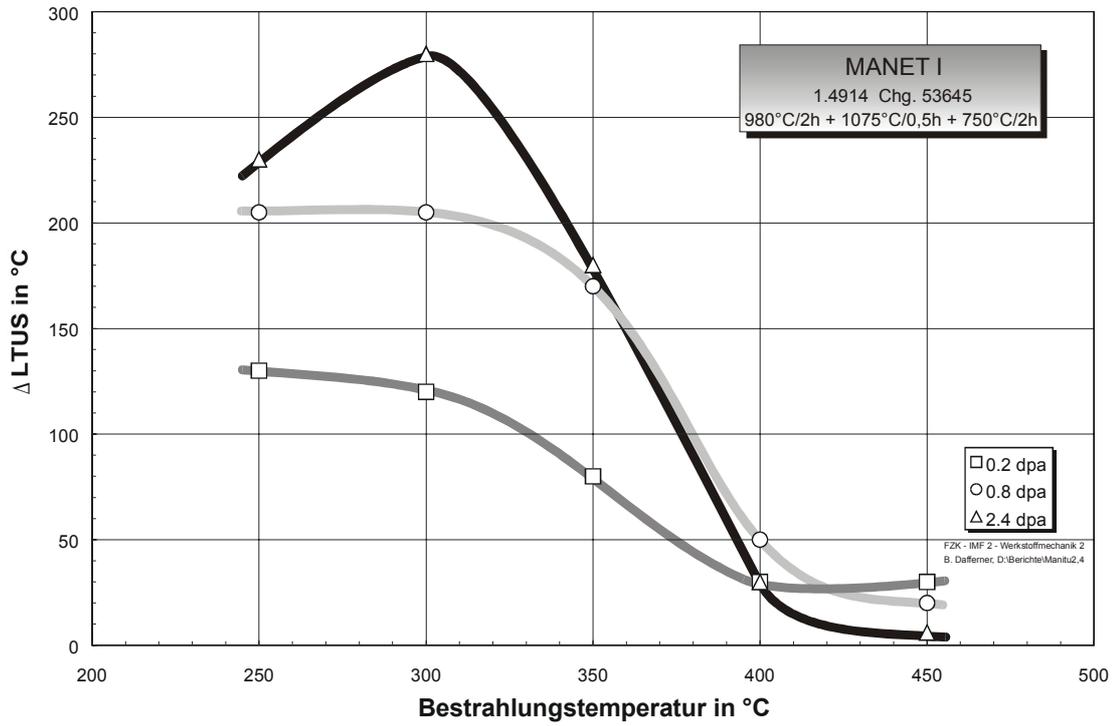


Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	-1	75	130	150
0,2 dpa / 300 °C	-0,8	70	120	130
0,2 dpa / 350 °C	-0,6	45	80	110
0,2 dpa / 400 °C	-0,4	20	30	90
0,2 dpa / 450 °C	-0,3	5	30	60

Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-2,9	175	205	290
0,8 dpa / 300 °C	-2,6	130	205	260
0,8 dpa / 350 °C	-2,2	90	170	180
0,8 dpa / 400 °C	-1	20	50	70
0,8 dpa / 450 °C	-0,5	5	20	30

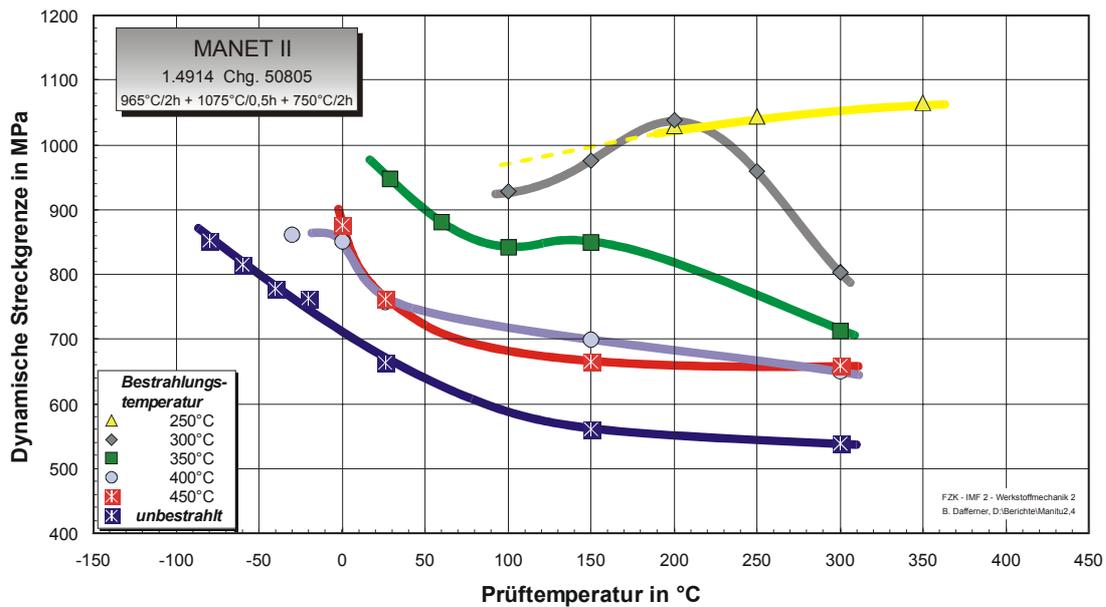
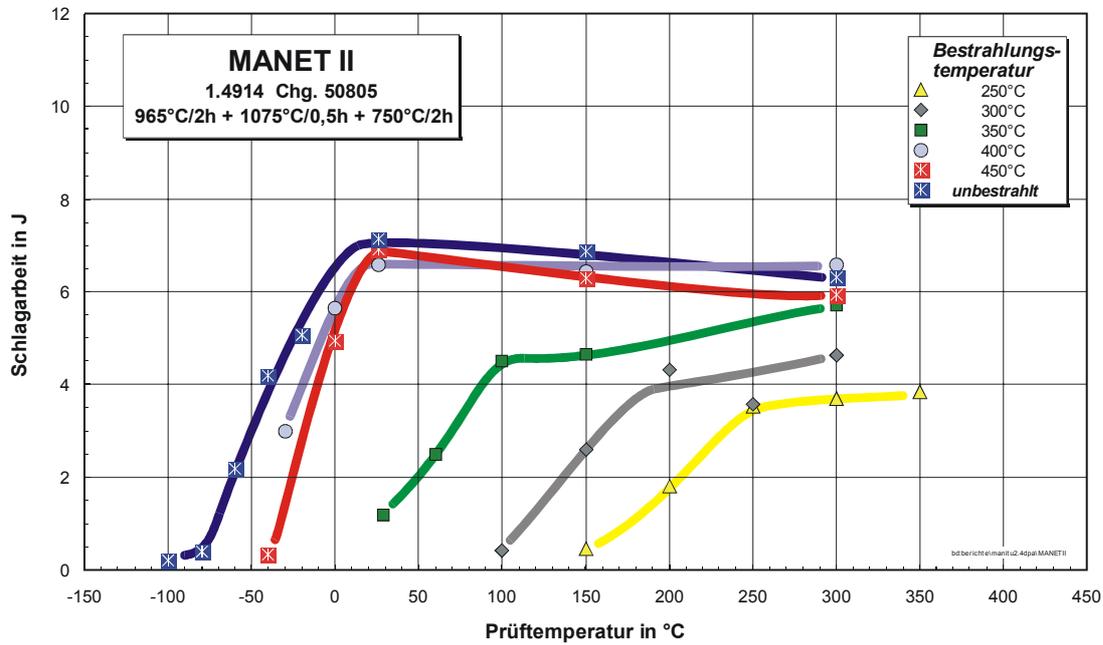
Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-3,7	225	230	410
2,4 dpa / 300 °C	-4	210	280	400
2,4 dpa / 350 °C	-3,3	90	180	303
2,4 dpa / 400 °C	-1,1	18	30	120
2,4 dpa / 450 °C	-0,6	8	6	90





10.2.2 MANET-II

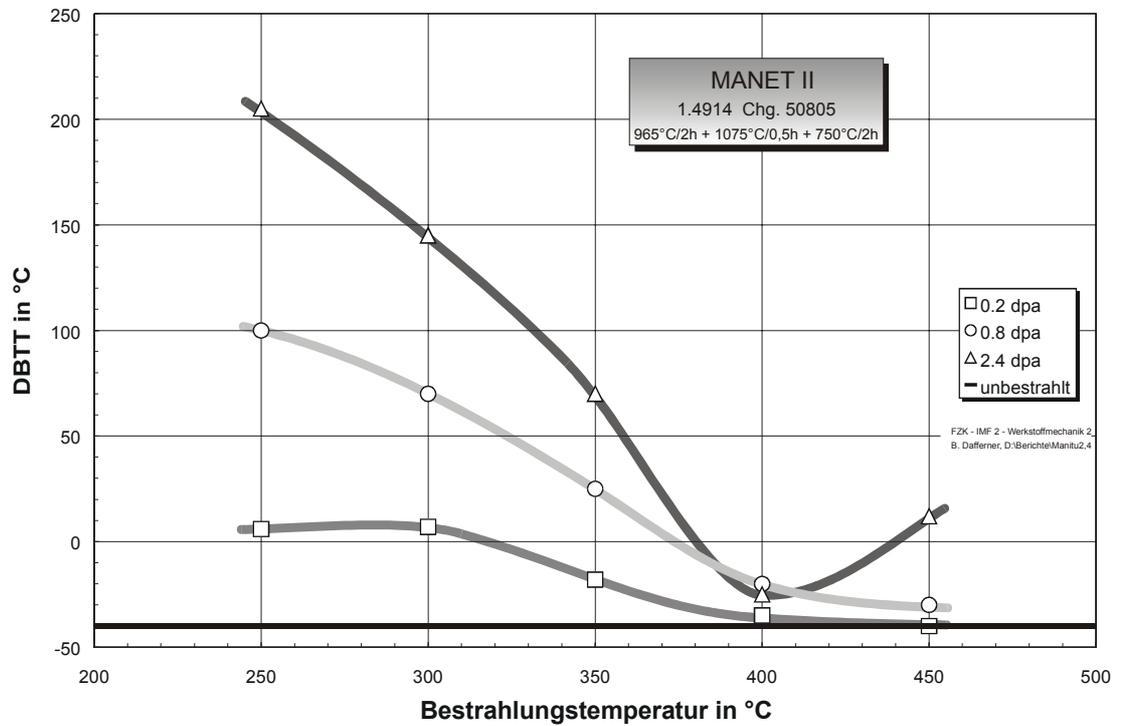
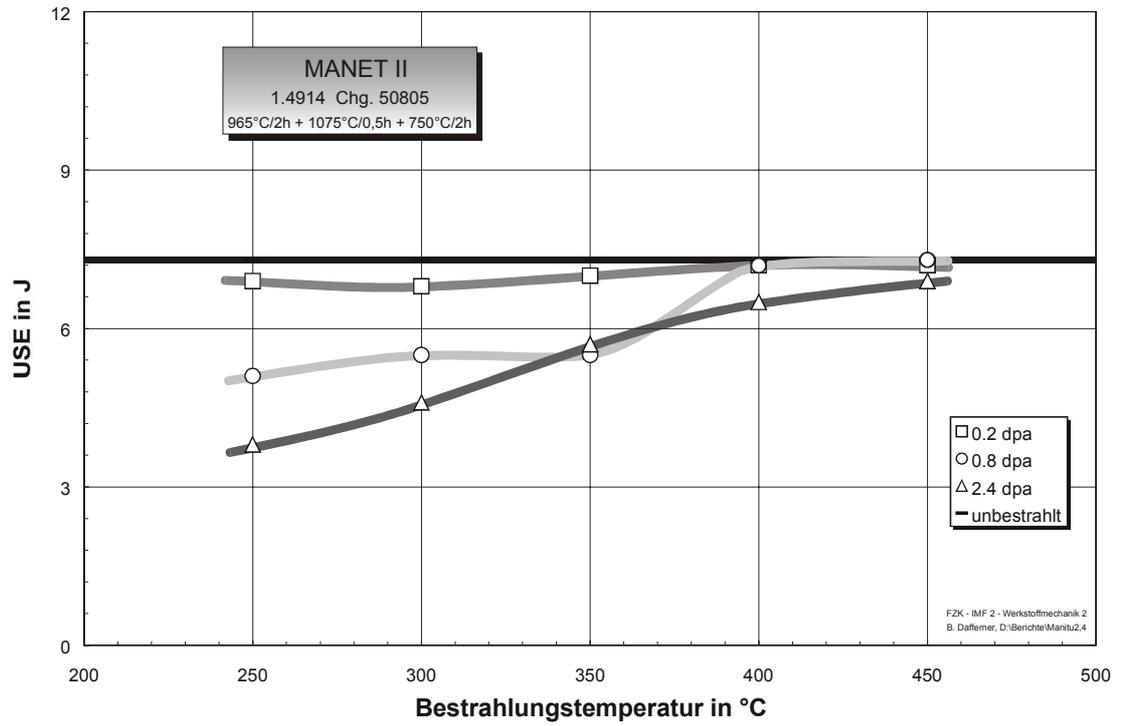
Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

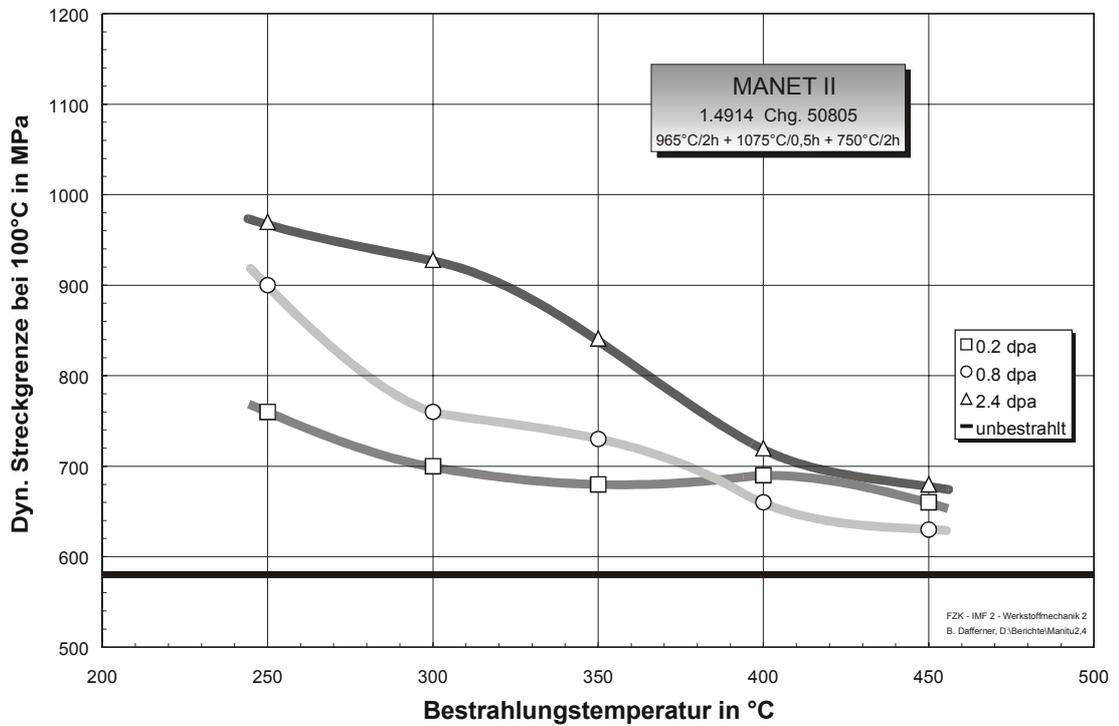
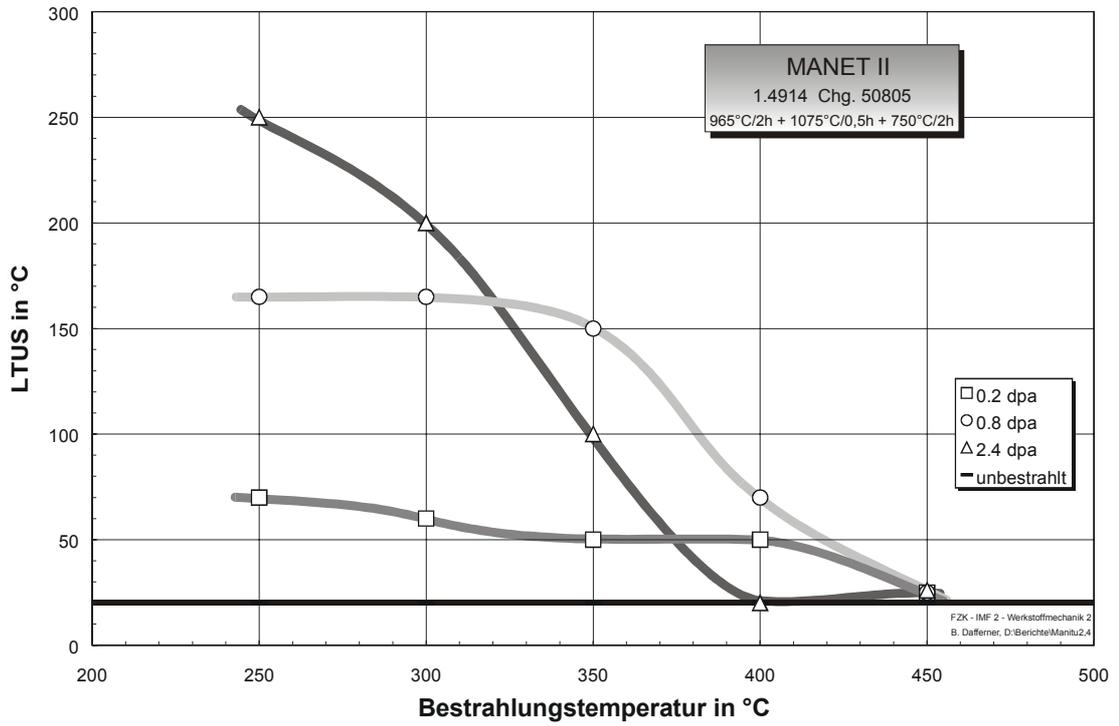


Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	6,9	6	70	760
0,2 dpa / 300 °C	6,8	7	60	700
0,2 dpa / 350 °C	7	-18	50	680
0,2 dpa / 400 °C	7,2	-35	50	690
0,2 dpa / 450 °C	7,2	-40	25	660
Unbestrahlt	7,3	-40	20	580

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	5,1	100	165	900
0,8 dpa / 300 °C	5,5	70	165	760
0,8 dpa / 350 °C	5,5	25	150	730
0,8 dpa / 400 °C	7,2	-20	70	660
0,8 dpa / 450 °C	7,3	-30	25	630
Unbestrahlt	7,3	-40	20	580

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	3,8	205	250	970
2,4 dpa / 300 °C	4,6	145	200	928
2,4 dpa / 350 °C	5,7	70	100	841
2,4 dpa / 400 °C	6,5	-25	20	720
2,4 dpa / 450 °C	6,9	12	26	680
Unbestrahlt	7,3	-40	20	580

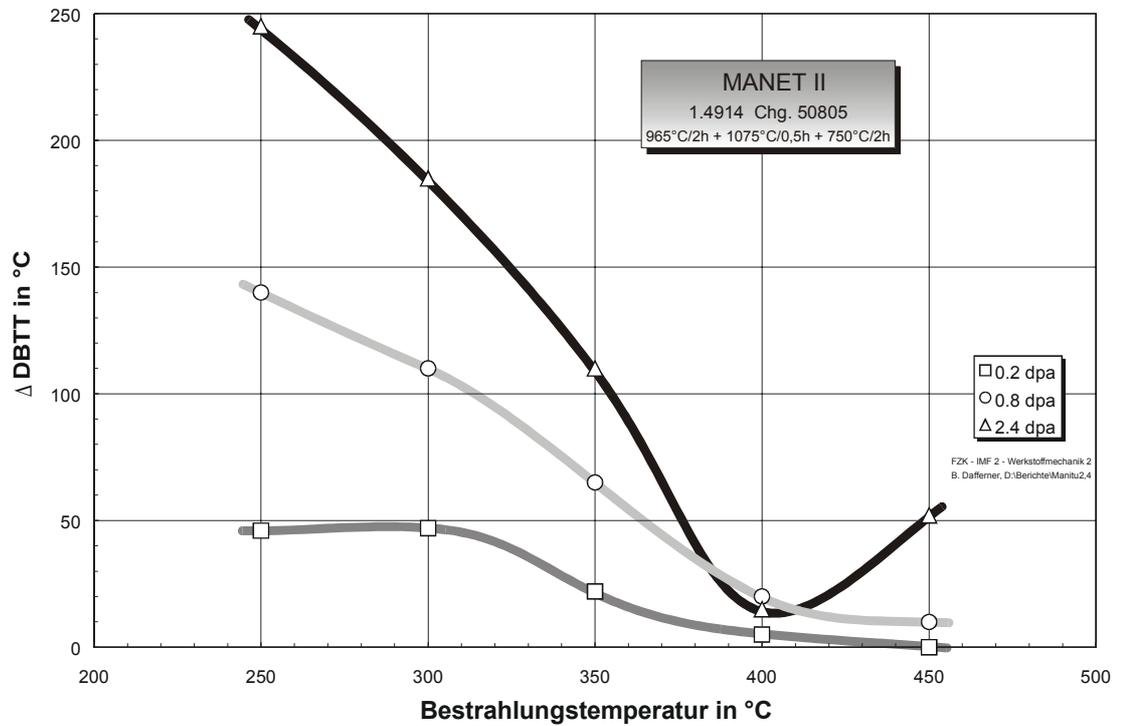
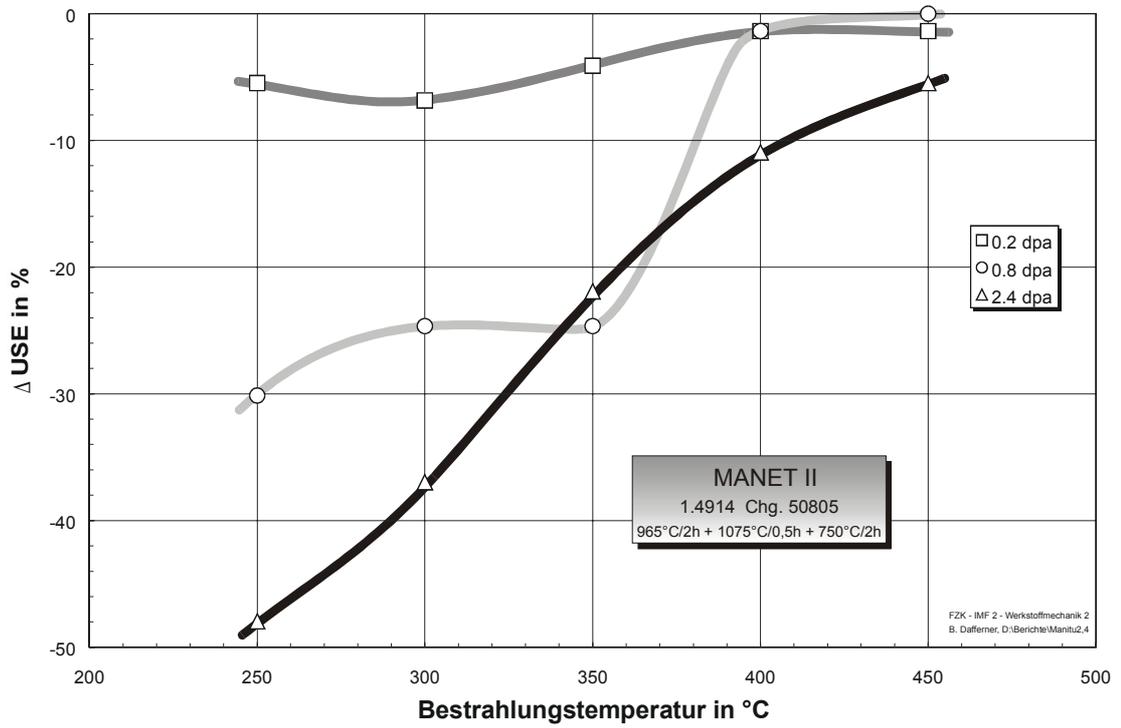


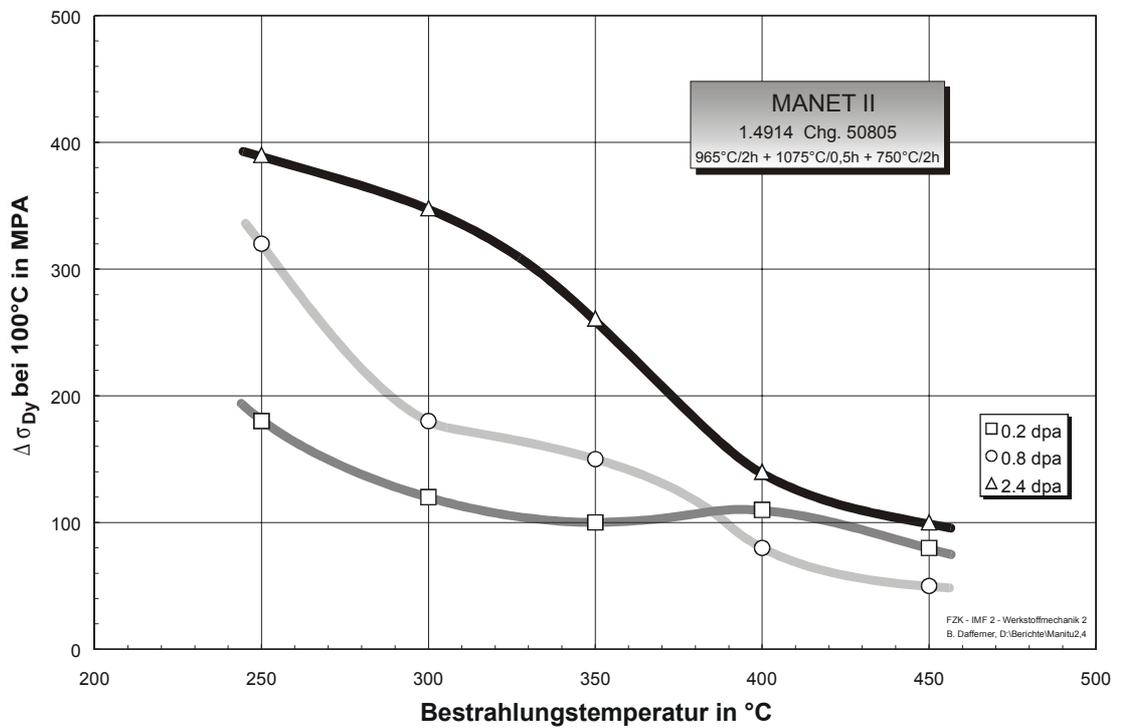
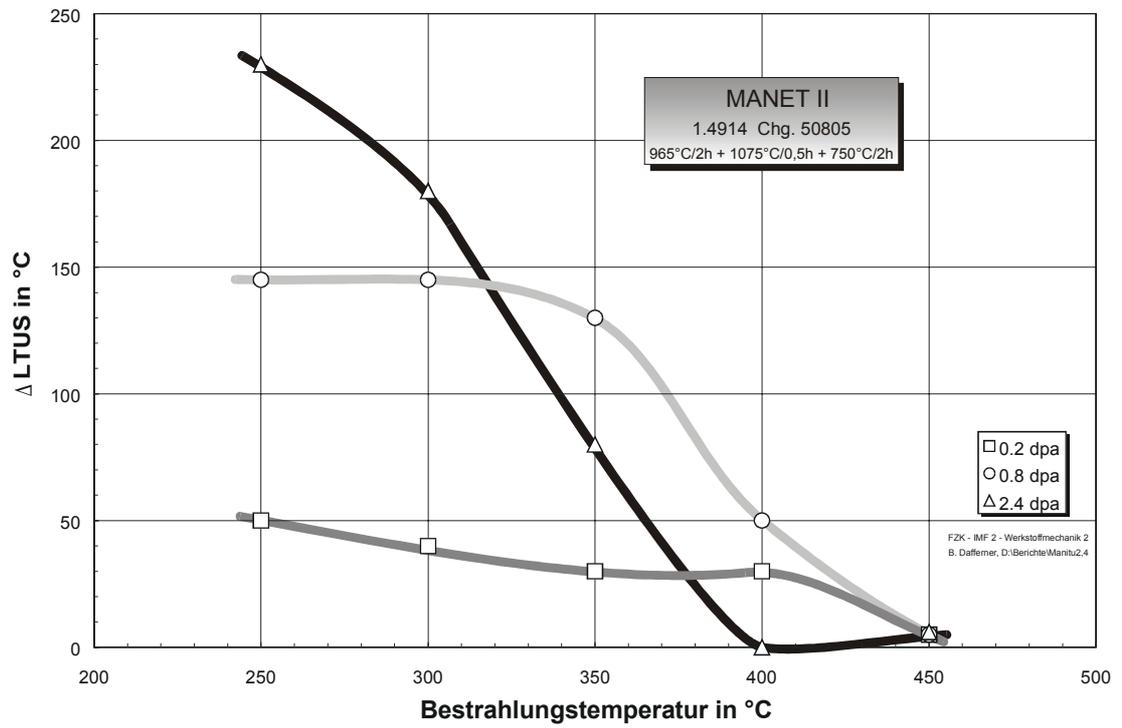


Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	-0,4	46	70	180
0,2 dpa / 300 °C	-0,5	47	40	120
0,2 dpa / 350 °C	-0,3	22	30	100
0,2 dpa / 400 °C	-0,1	5	30	110
0,2 dpa / 450 °C	-0,1	0	5	80

Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-2,2	140	145	320
0,8 dpa / 300 °C	-1,8	110	145	180
0,8 dpa / 350 °C	-1,8	65	130	150
0,8 dpa / 400 °C	-0,1	20	50	80
0,8 dpa / 450 °C	0	10	5	50

Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-3,5	245	230	390
2,4 dpa / 300 °C	-2,7	185	180	348
2,4 dpa / 350 °C	-1,6	110	80	261
2,4 dpa / 400 °C	-0,8	15	0	140
2,4 dpa / 450 °C	-0,4	18	6	100

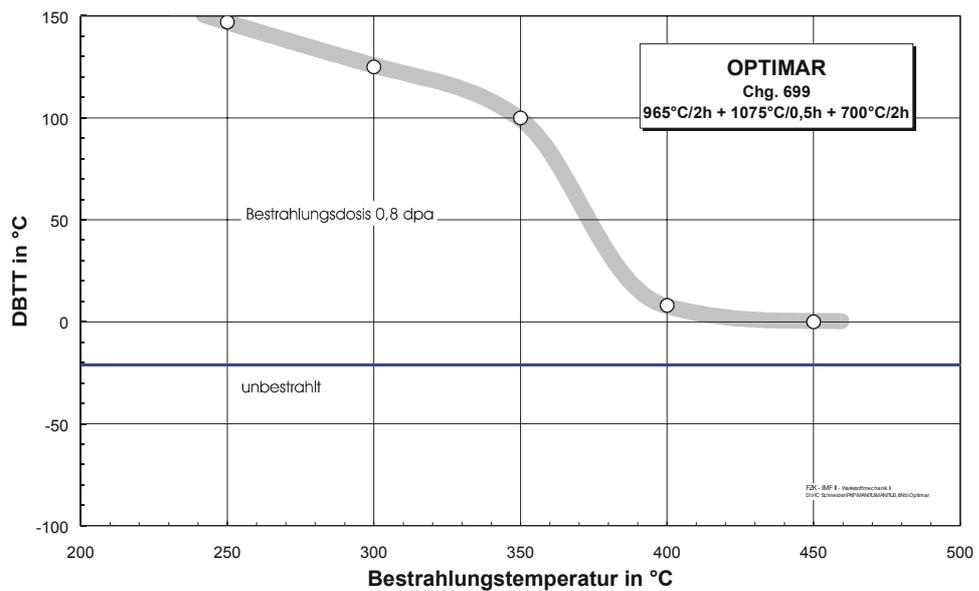
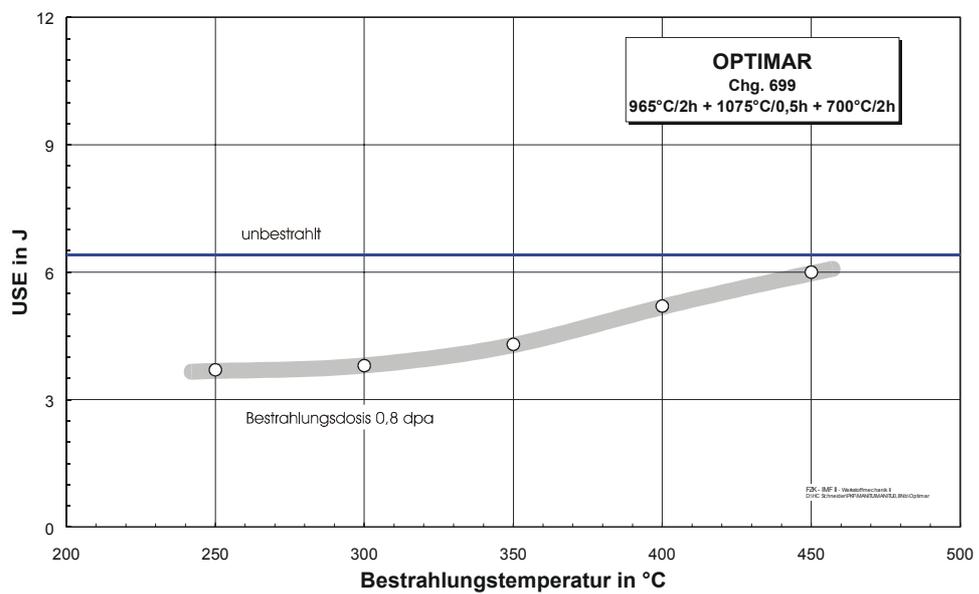


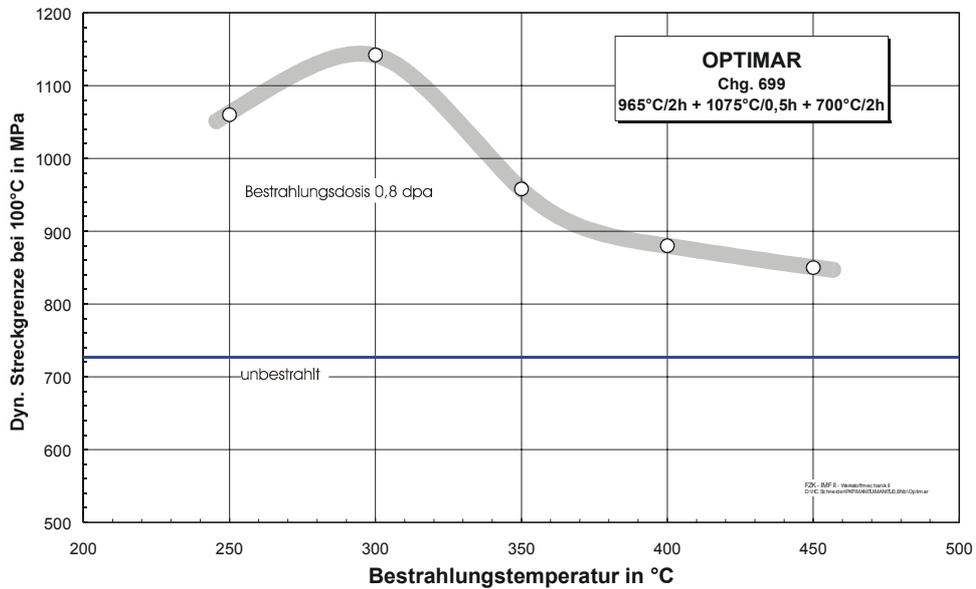
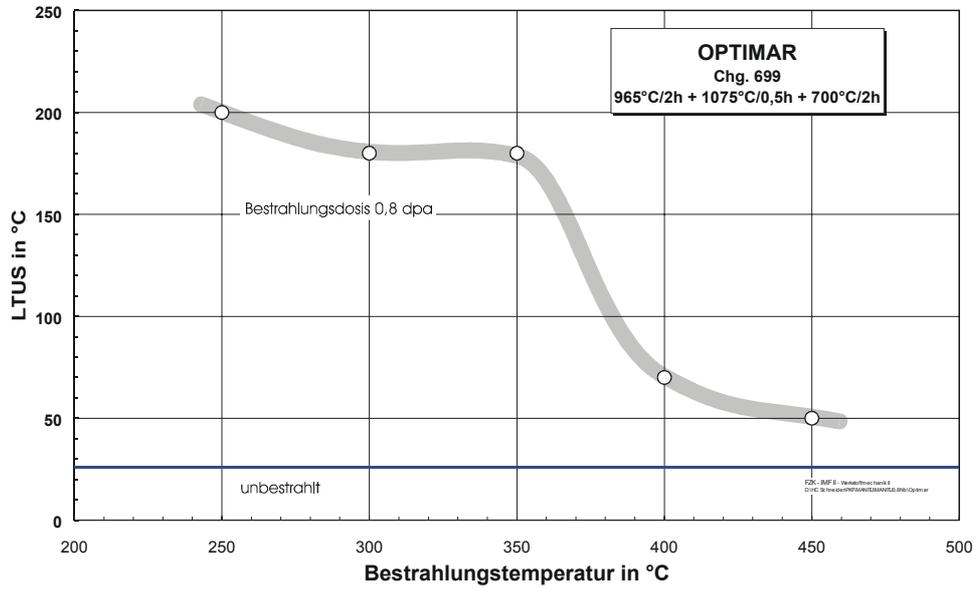


10.2.3 OPTIMAR

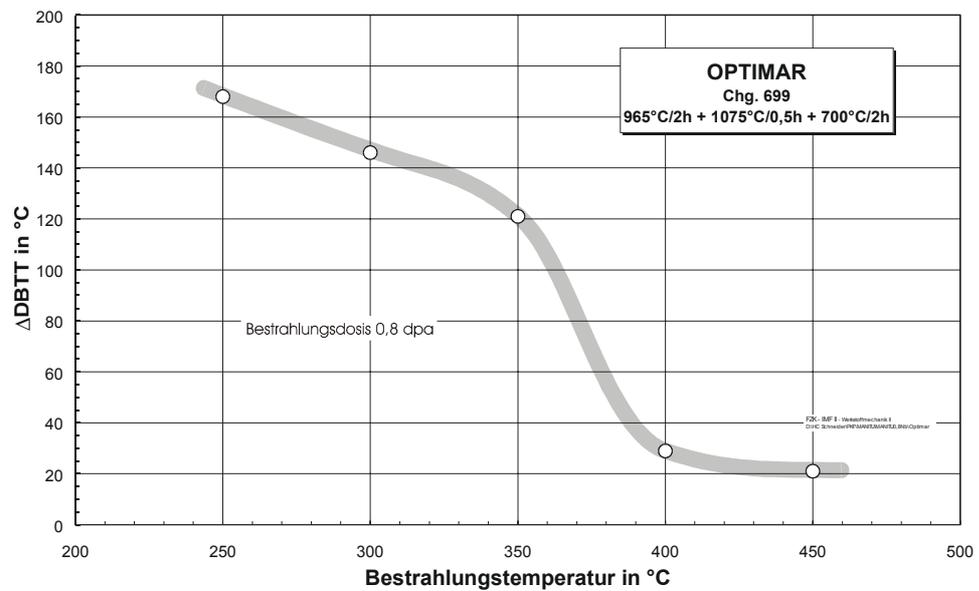
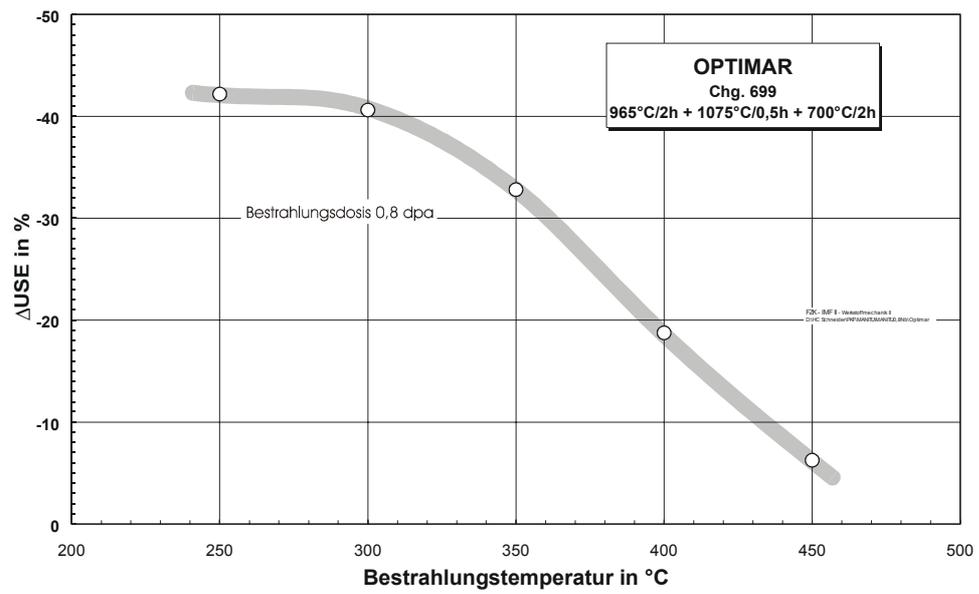
Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	3,7	147	200	1060 *)
0,8 dpa / 300 °C	3,8	125	180	1142
0,8 dpa / 350 °C	4,3	100	180	958
0,8 dpa / 400 °C	5,2	8	70	880
0,8 dpa / 450 °C	6,0	0	50	850 *)
Unbestrahlt	6,4	-21	26	727 *)

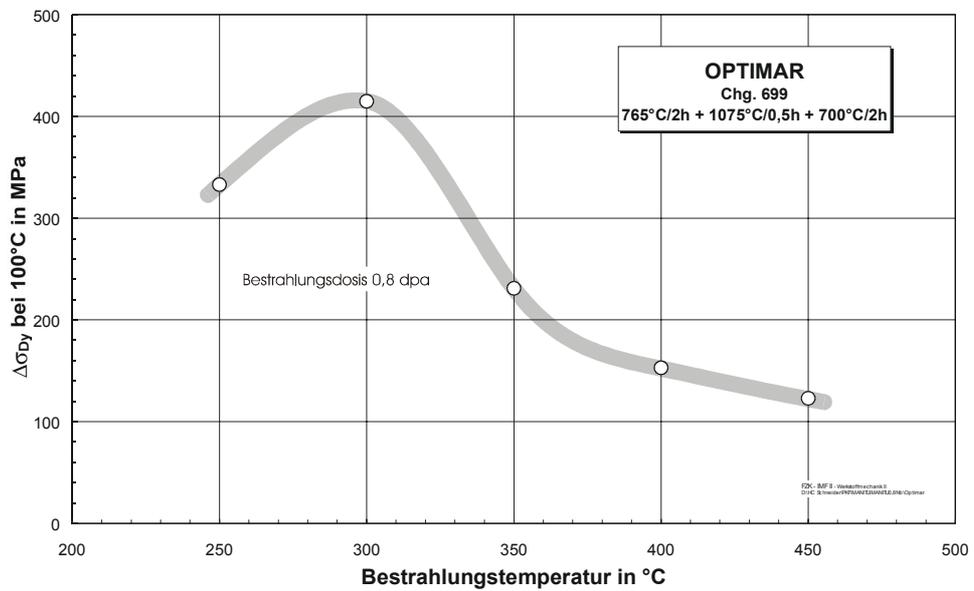
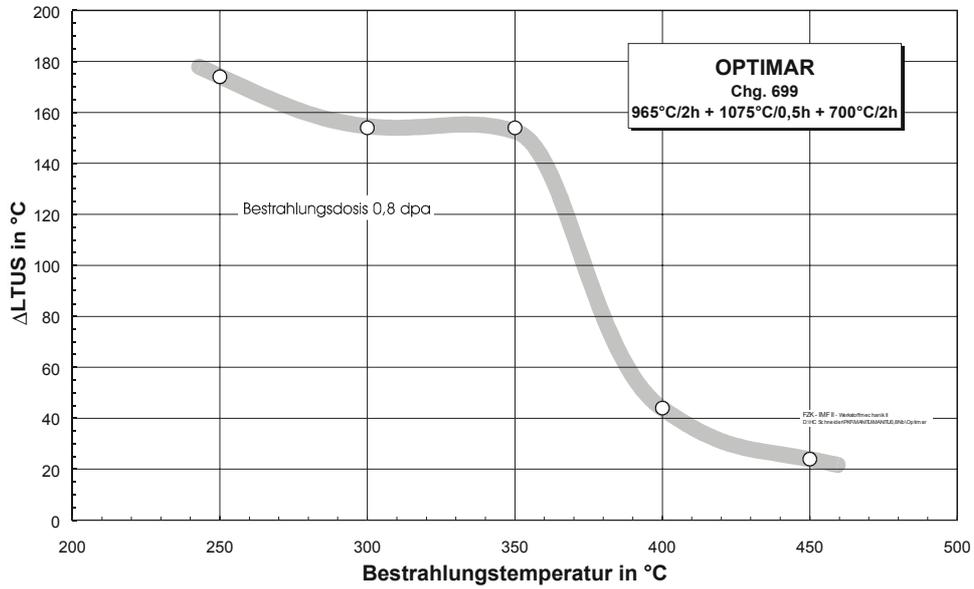
*) aus benachbarten Meßwerten interpoliert





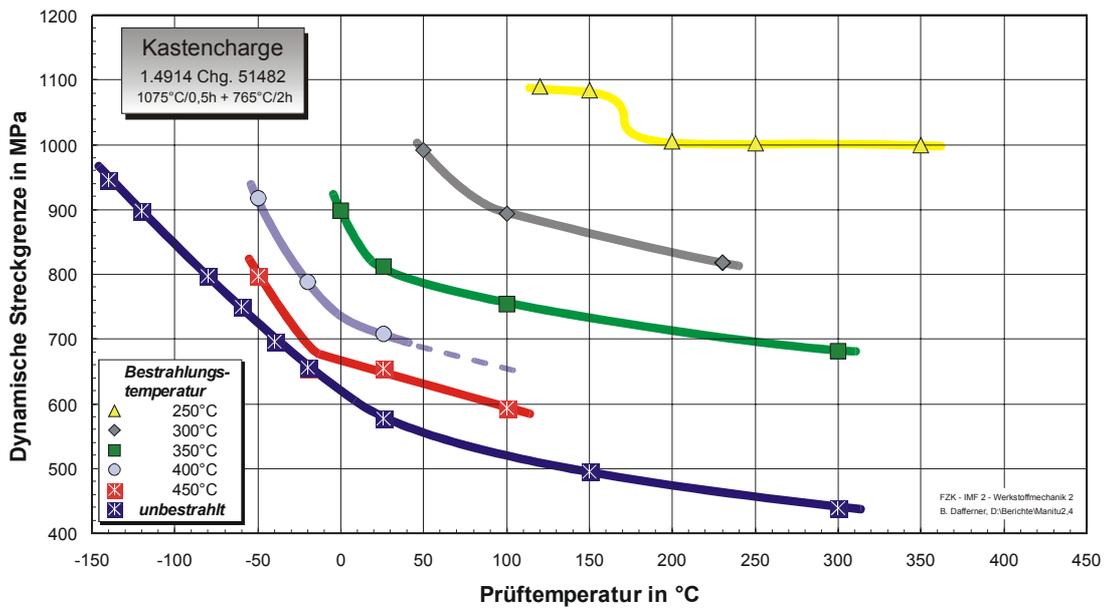
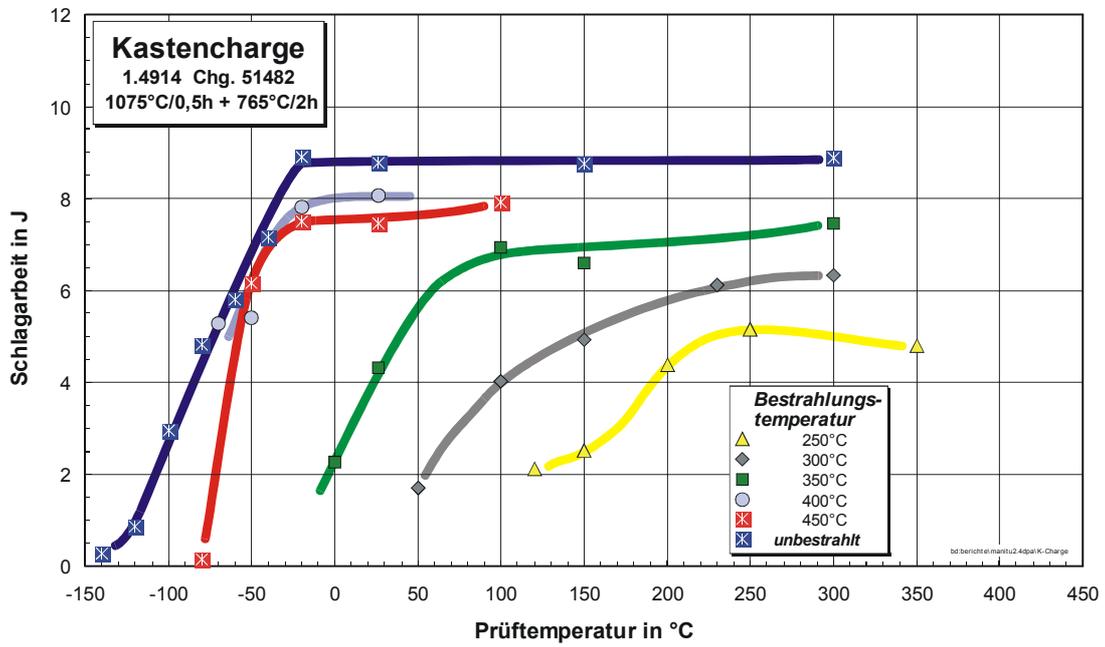
Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in Mpa
0,8 dpa / 250 °C	-2,7	168	174	333
0,8 dpa / 300 °C	-2,6	146	154	415
0,8 dpa / 350 °C	-2,1	121	154	231
0,8 dpa / 400 °C	-1,2	29	44	153
0,8 dpa / 450 °C	-0,4	21	24	123





10.2.4 K-Charge

Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

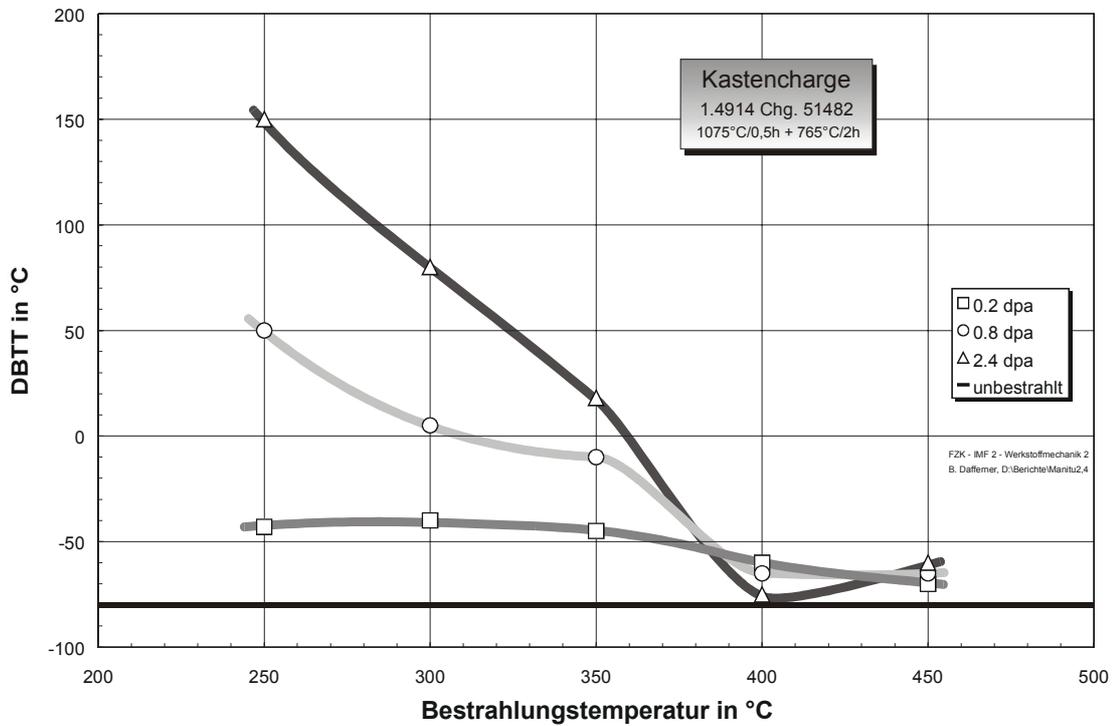
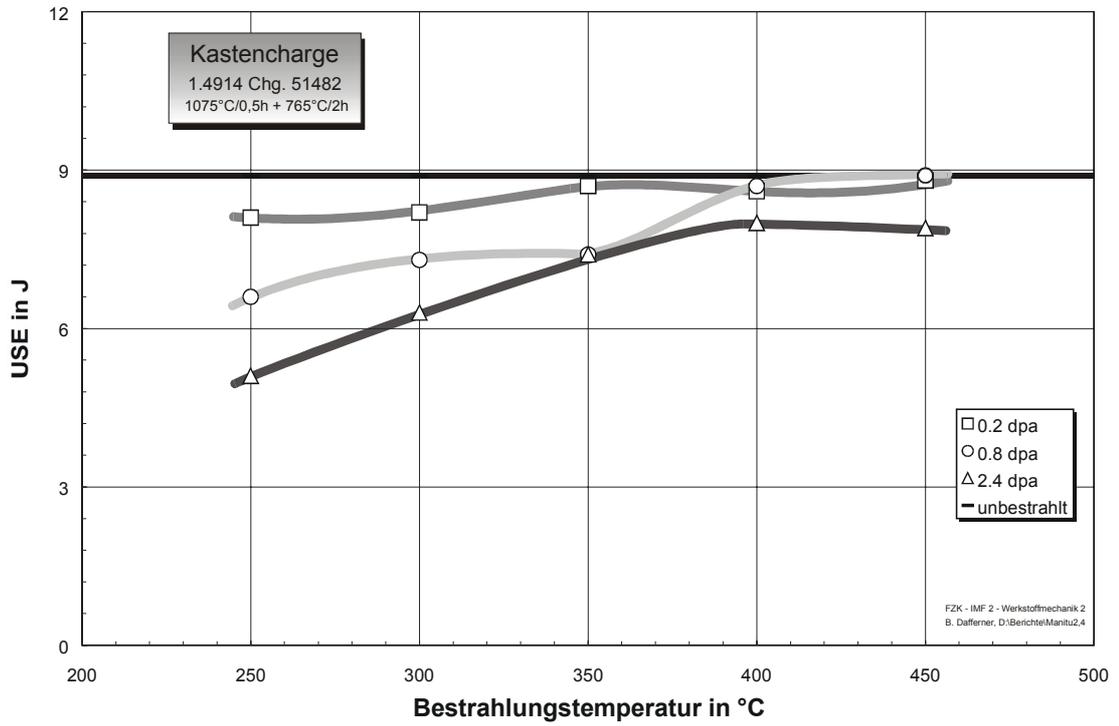


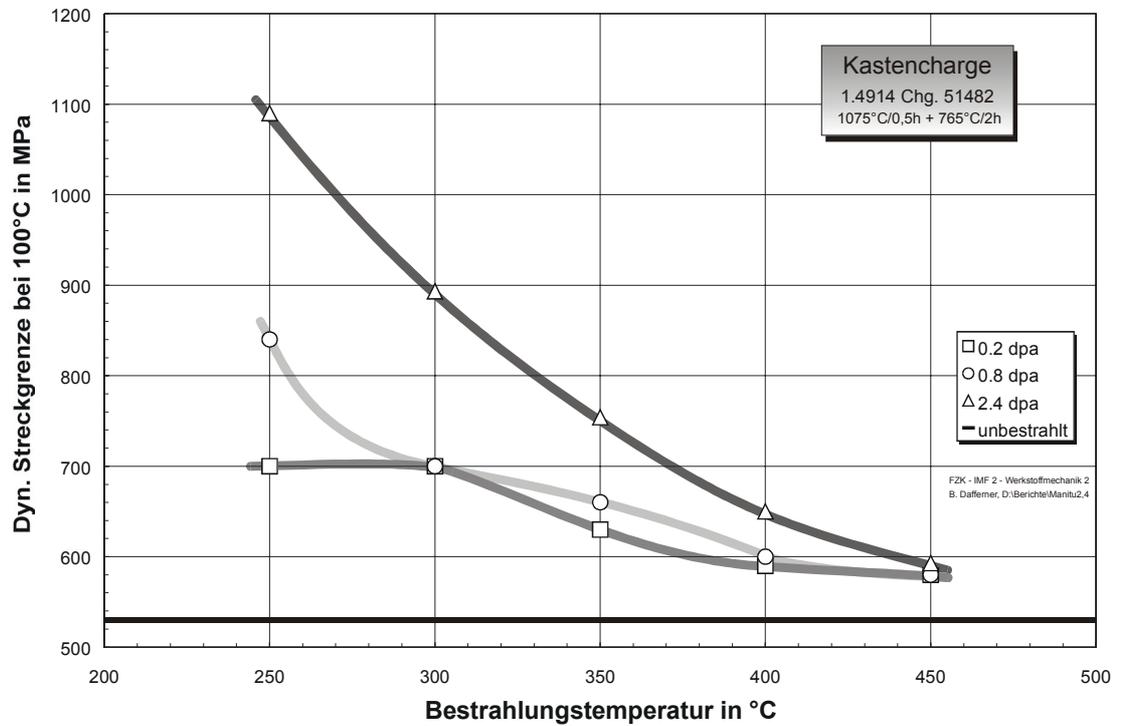
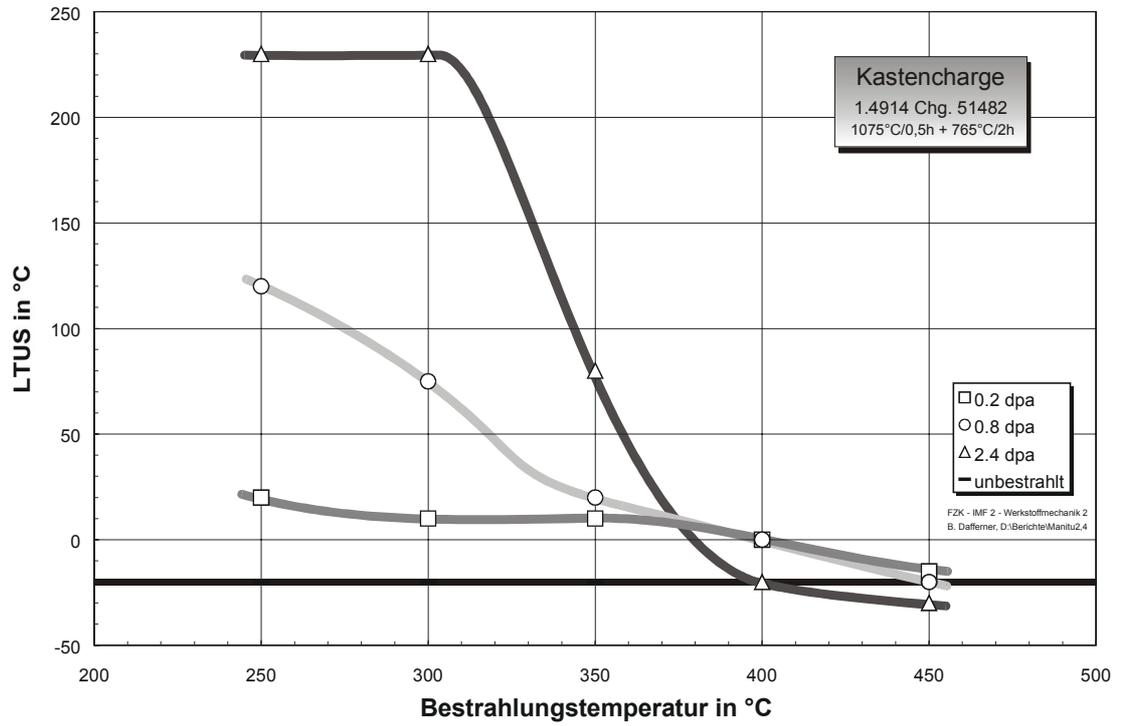
Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	8,1	-43	20	700
0,2 dpa / 300 °C	8,2	-40	10	700
0,2 dpa / 350 °C	8,7	-45	10	630
0,2 dpa / 400 °C	8,6	-60	0	590
0,2 dpa / 450 °C	8,8	-70	-15	580
Unbestrahlt	8,9	-80	-20	530

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	6,6	50	120	840
0,8 dpa / 300 °C	7,3	5	75	700
0,8 dpa / 350 °C	7,4	-10	20	660
0,8 dpa / 400 °C	8,7	-65	0	600
0,8 dpa / 450 °C	8,9	-65	-20	580
Unbestrahlt	8,9	-80	-20	530

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	5,1	150	230	1090
2,4 dpa / 300 °C	6,3	80	230	893
2,4 dpa / 350 °C	7,4	18	80	754
2,4 dpa / 400 °C	8	-75	-20	650 *)
2,4 dpa / 450 °C	7,9	-60	-30	593
Unbestrahlt	8,9	-80	-20	530

*) aus benachbarten Meßwerten interpoliert

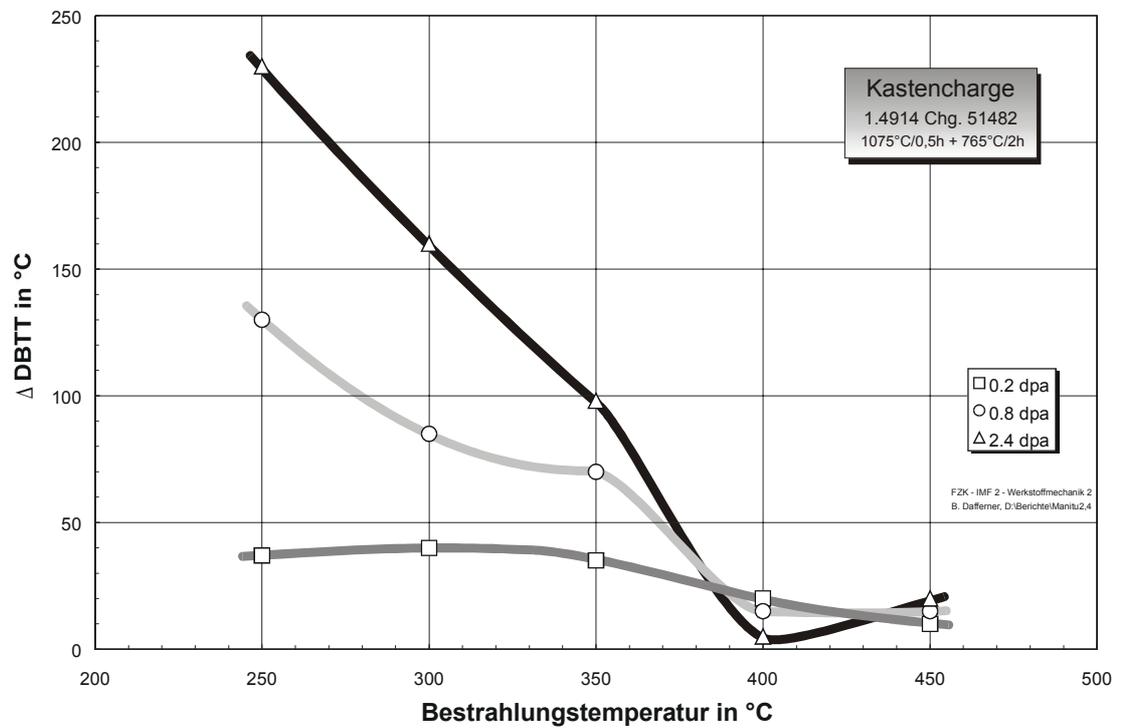
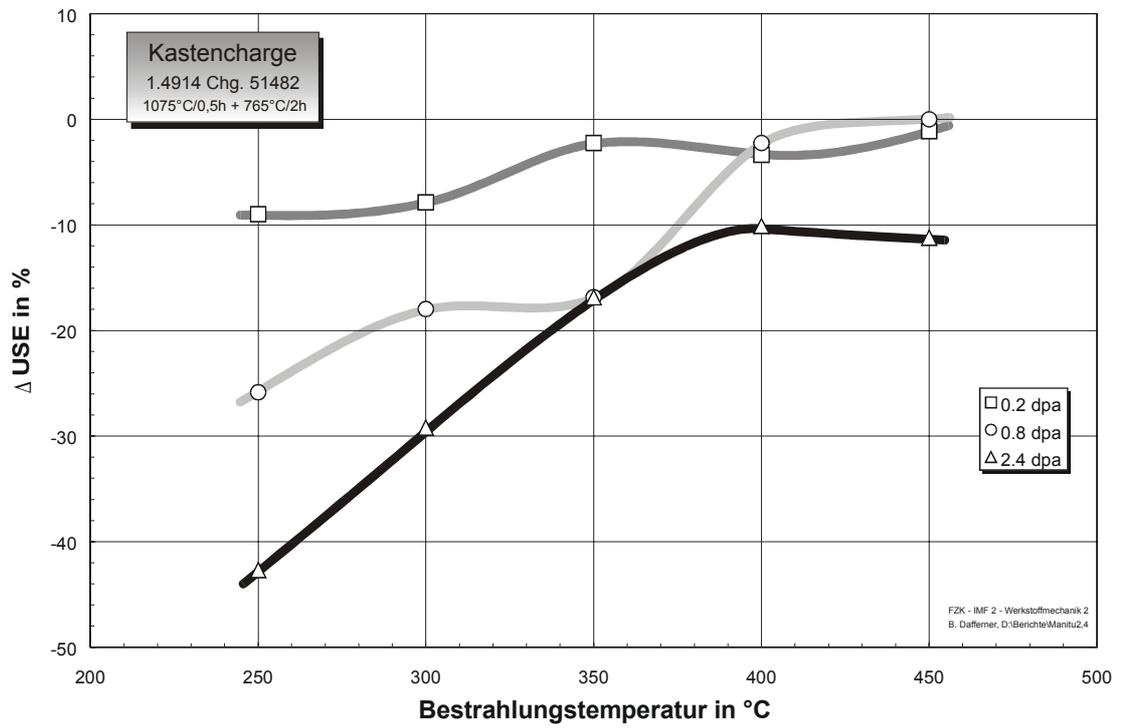


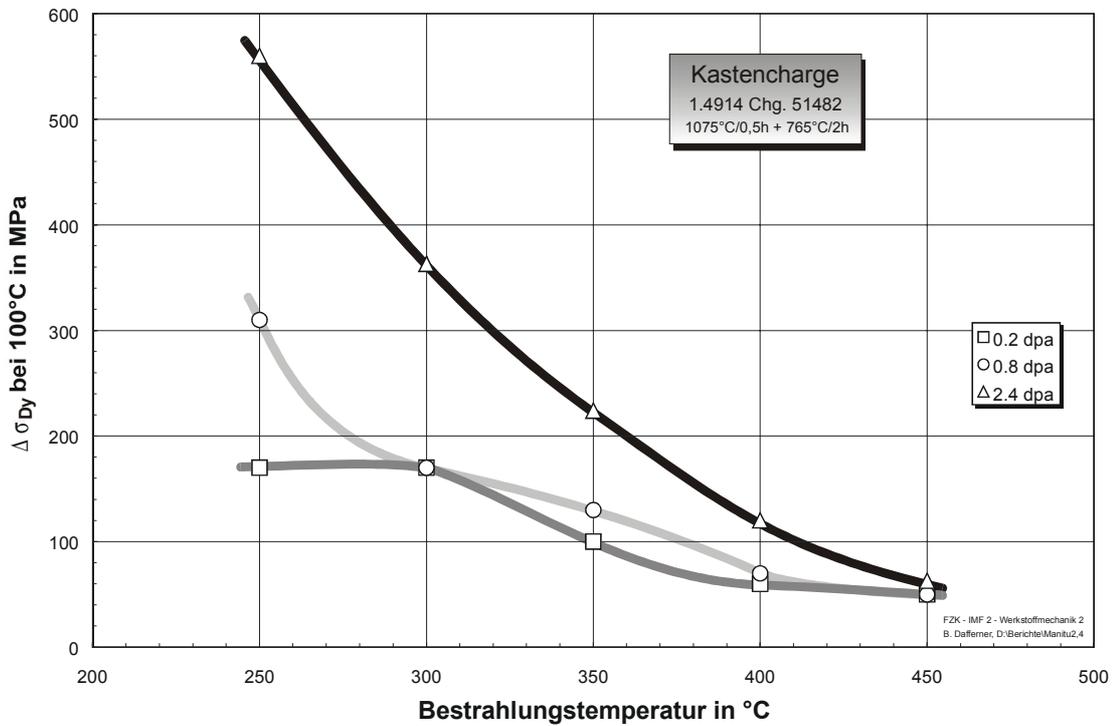
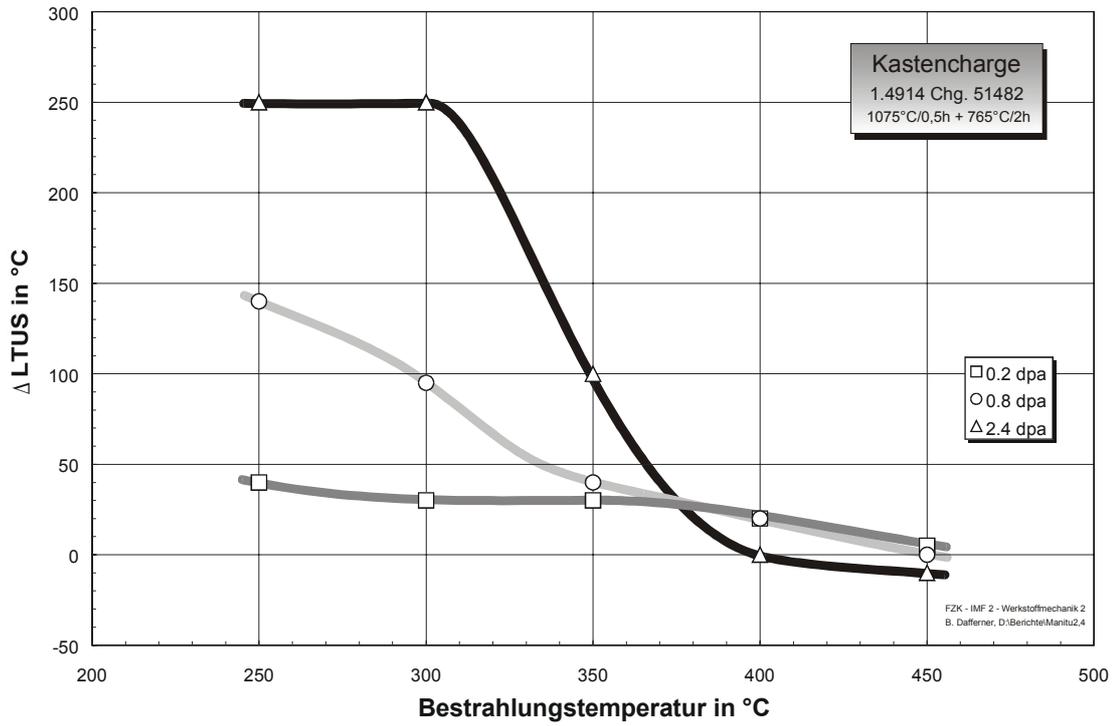


Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	-0,8	37	40	170
0,2 dpa / 300 °C	-0,7	40	30	170
0,2 dpa / 350 °C	-0,2	35	30	100
0,2 dpa / 400 °C	-0,3	20	20	60
0,2 dpa / 450 °C	-0,1	10	5	50

Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-2,3	130	140	310
0,8 dpa / 300 °C	-1,6	85	95	170
0,8 dpa / 350 °C	-1,5	70	40	130
0,8 dpa / 400 °C	-0,2	15	20	70
0,8 dpa / 450 °C	0	15	0	50

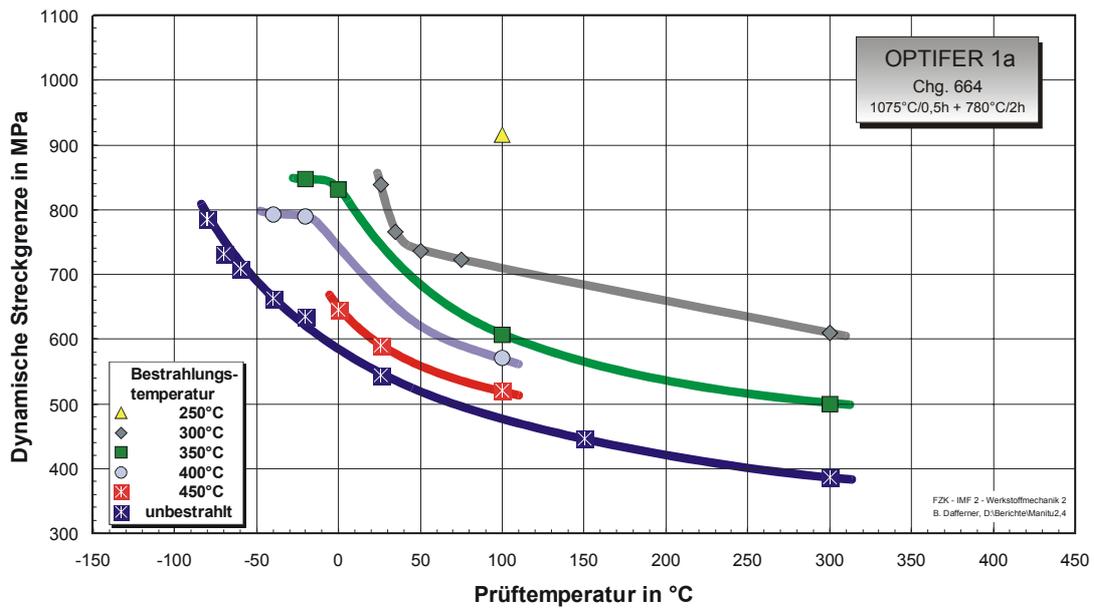
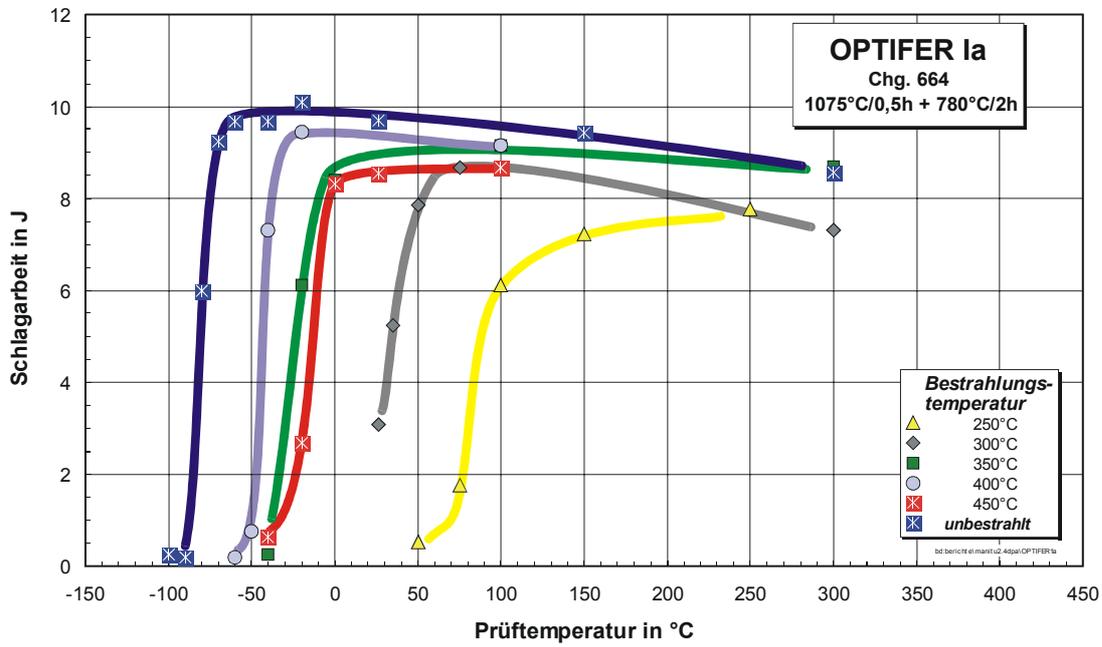
Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-3,8	230	250	560
2,4 dpa / 300 °C	-2,6	160	250	363
2,4 dpa / 350 °C	-1,5	98	100	224
2,4 dpa / 400 °C	-0,9	5	0	120
2,4 dpa / 450 °C	-1	20	10	63





10.2.5 OPTIFER-Ia

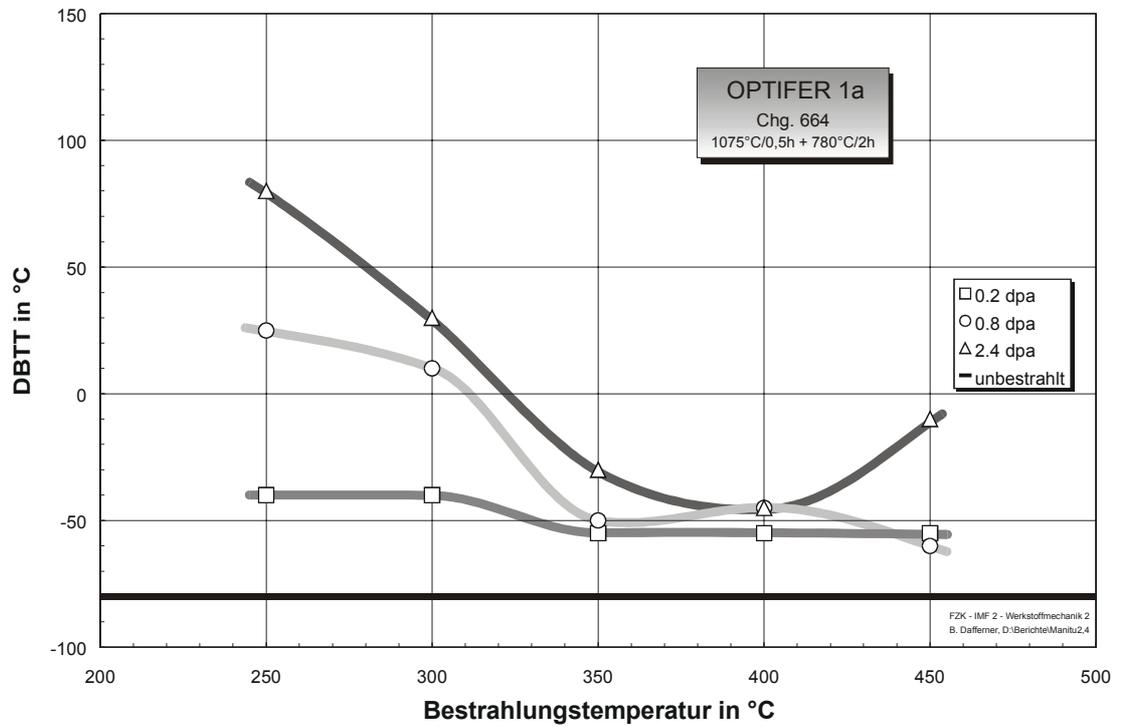
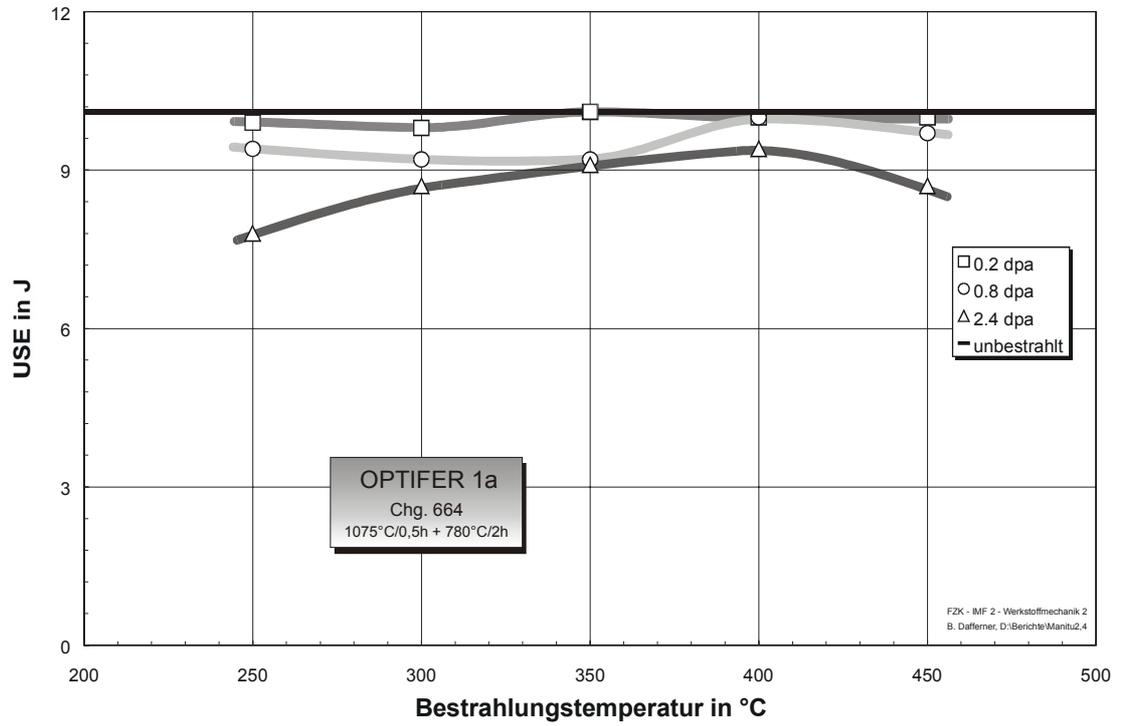
Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

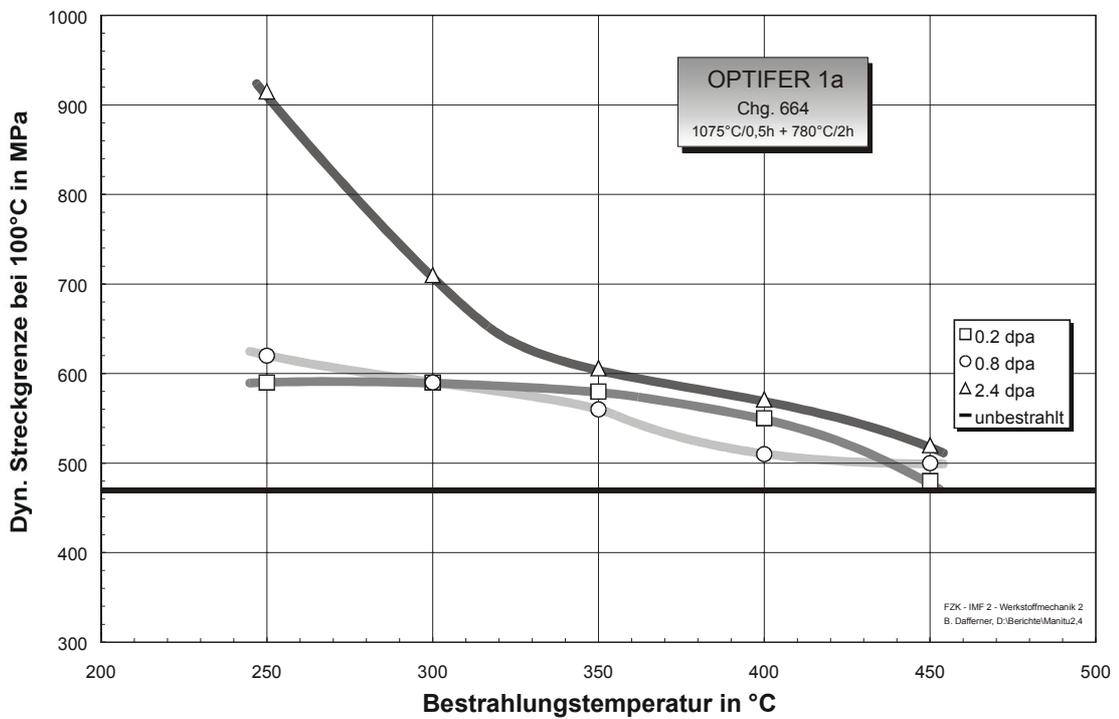
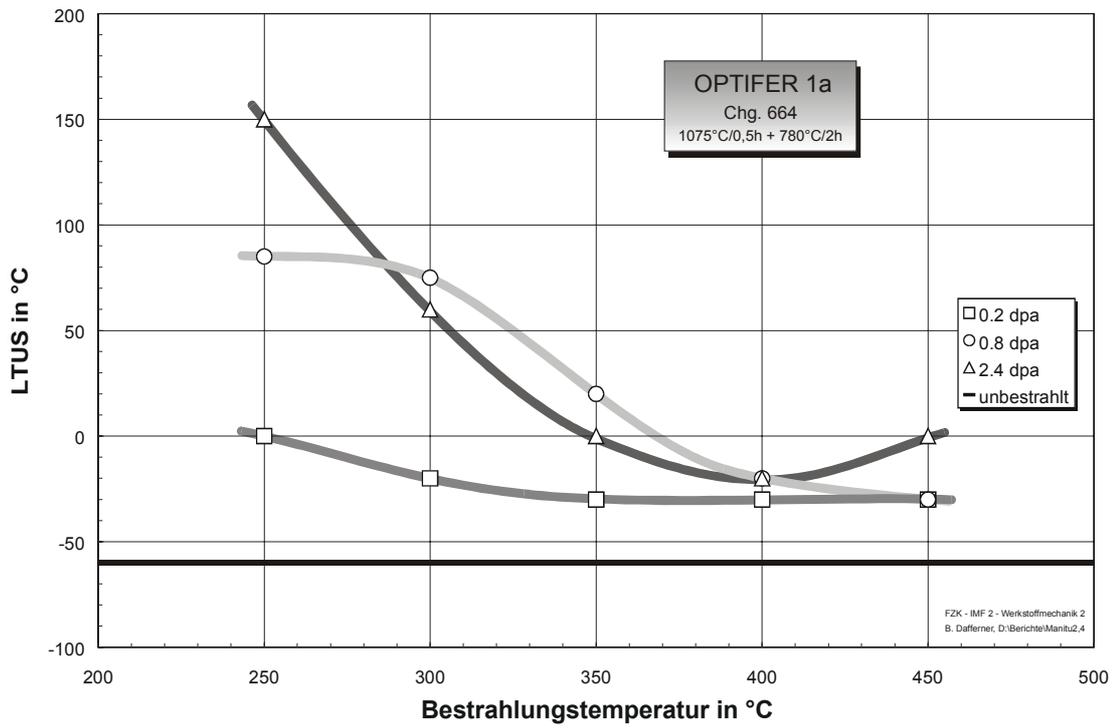


Bestrahlungs- parameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	9,9	-40	0	590
0,2 dpa / 300 °C	9,8	-40	-20	590
0,2 dpa / 350 °C	10,1	-55	-30	580
0,2 dpa / 400 °C	10	-55	-30	550
0,2 dpa / 450 °C	10	-55	-30	480
Unbestrahlt	10,1	-80	-60	470

Bestrahlungs- parameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	9,4	25	85	620
0,8 dpa / 300 °C	9,2	10	75	590
0,8 dpa / 350 °C	9,2	-50	20	560
0,8 dpa / 400 °C	10	-45	-20	510
0,8 dpa / 450 °C	9,7	-60	-30	500
Unbestrahlt	10,1	-80	-60	470

Bestrahlungs- parameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	7,8	80	150	915
2,4 dpa / 300 °C	8,7	30	60	710
2,4 dpa / 350 °C	9,1	-30	0	606
2,4 dpa / 400 °C	9,4	-45	-20	571
2,4 dpa / 450 °C	8,7	-10	0	520
Unbestrahlt	10,1	-80	-60	470

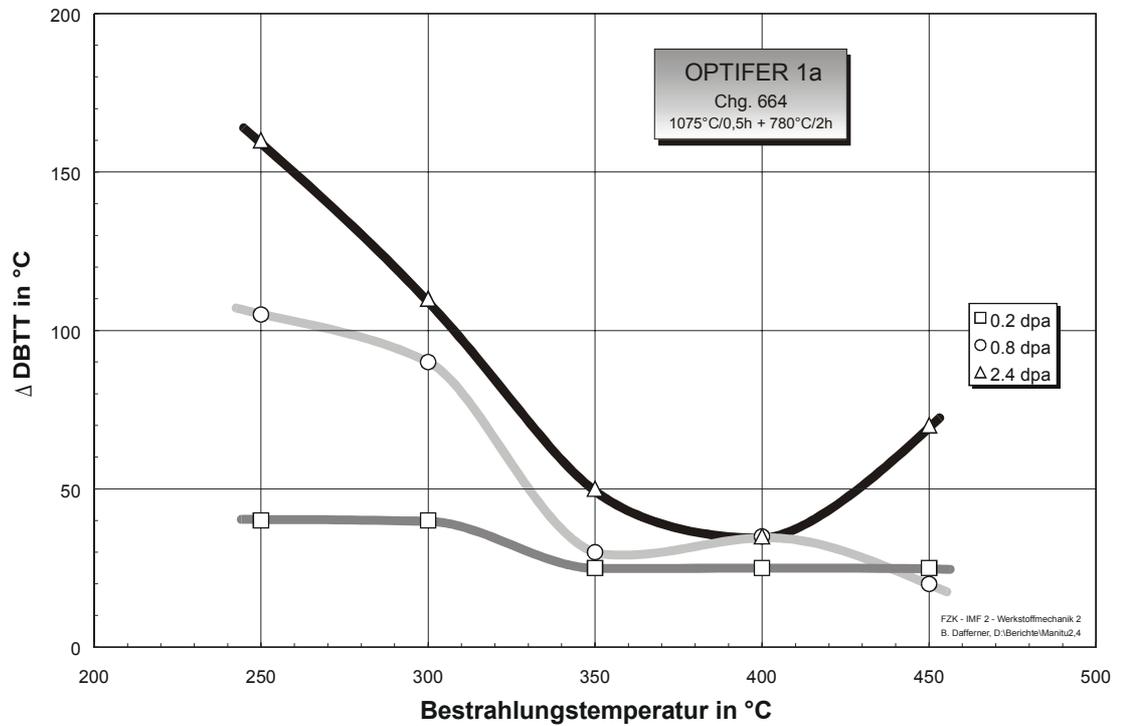
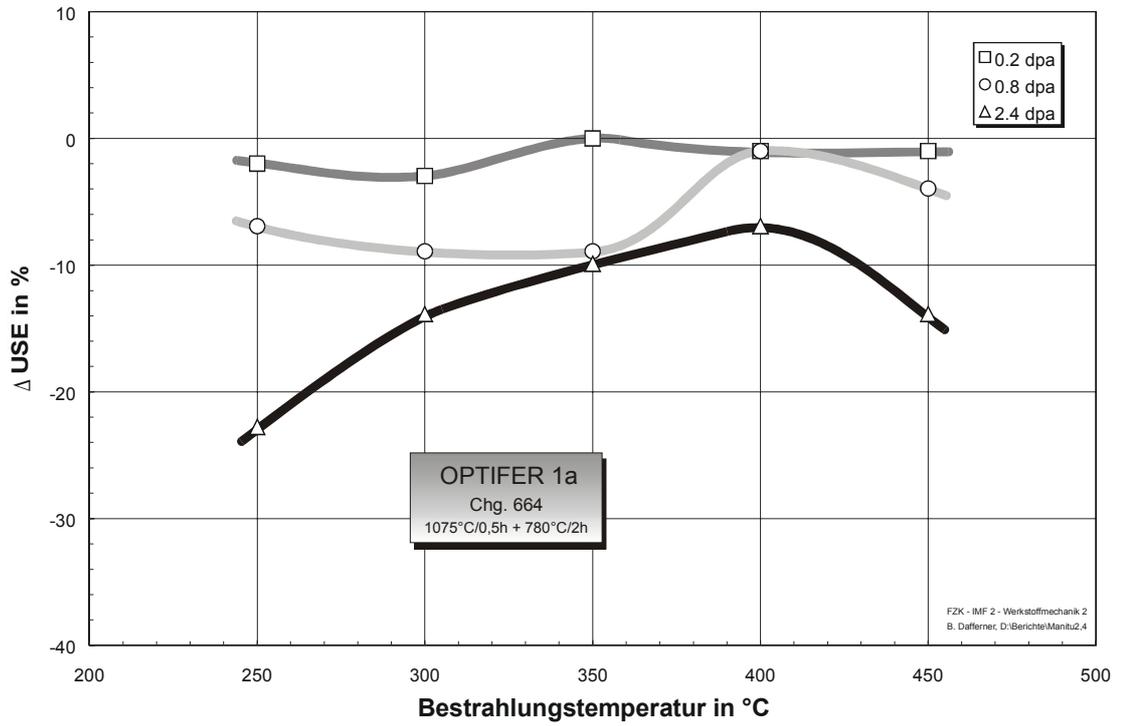


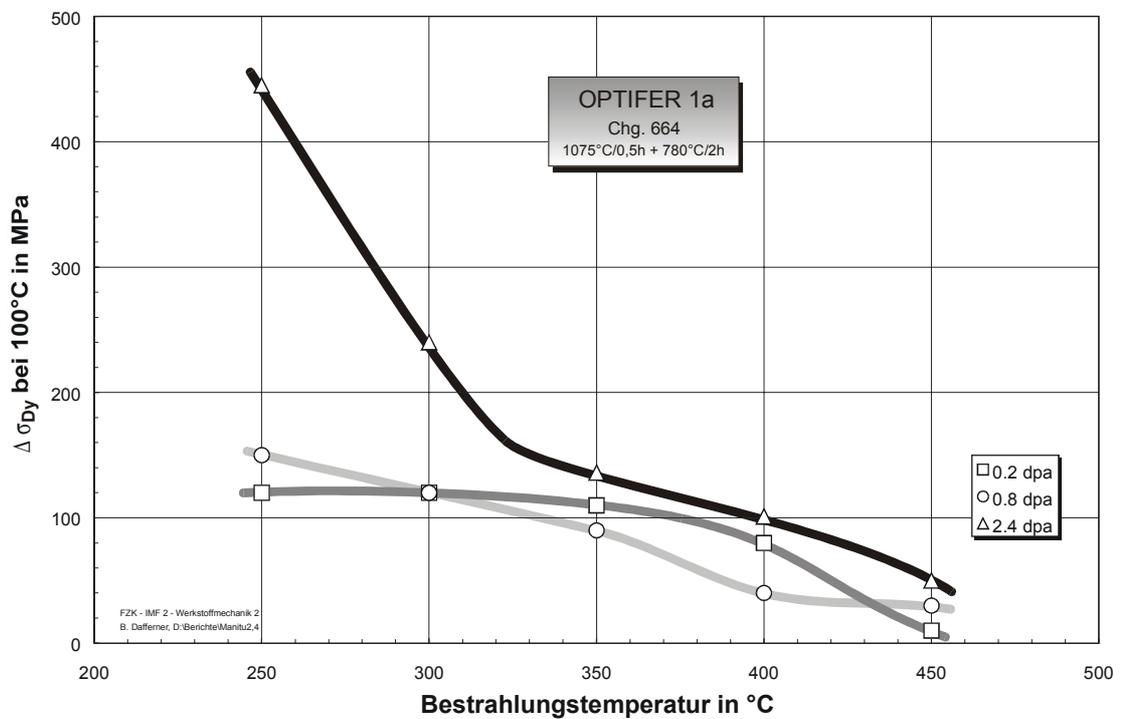
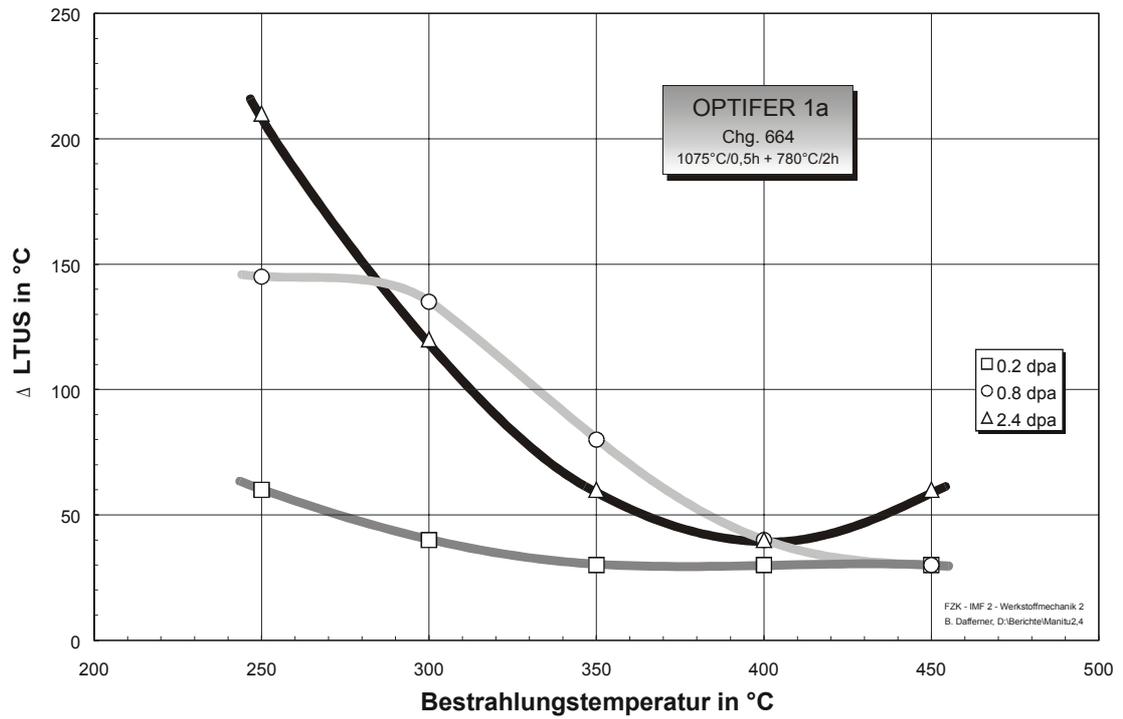


Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	-0,2	40	60	120
0,2 dpa / 300 °C	-0,3	40	40	120
0,2 dpa / 350 °C	0	25	30	110
0,2 dpa / 400 °C	-0,1	25	30	80
0,2 dpa / 450 °C	-0,1	25	30	10

Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-0,7	105	145	150
0,8 dpa / 300 °C	-0,9	90	135	120
0,8 dpa / 350 °C	-0,9	30	80	90
0,8 dpa / 400 °C	-0,1	35	40	40
0,8 dpa / 450 °C	-0,4	20	30	30

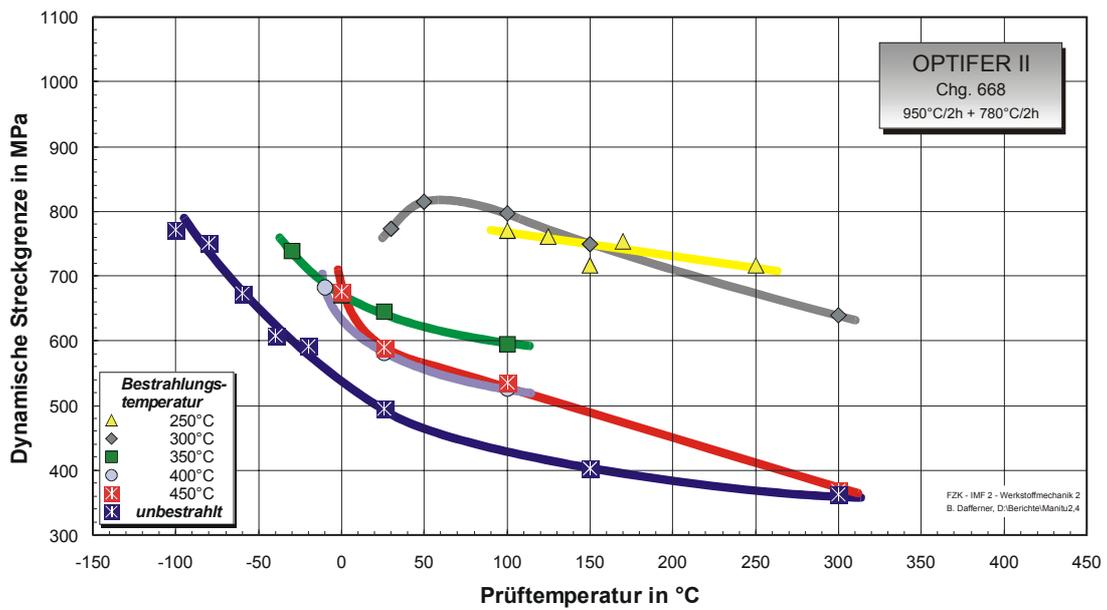
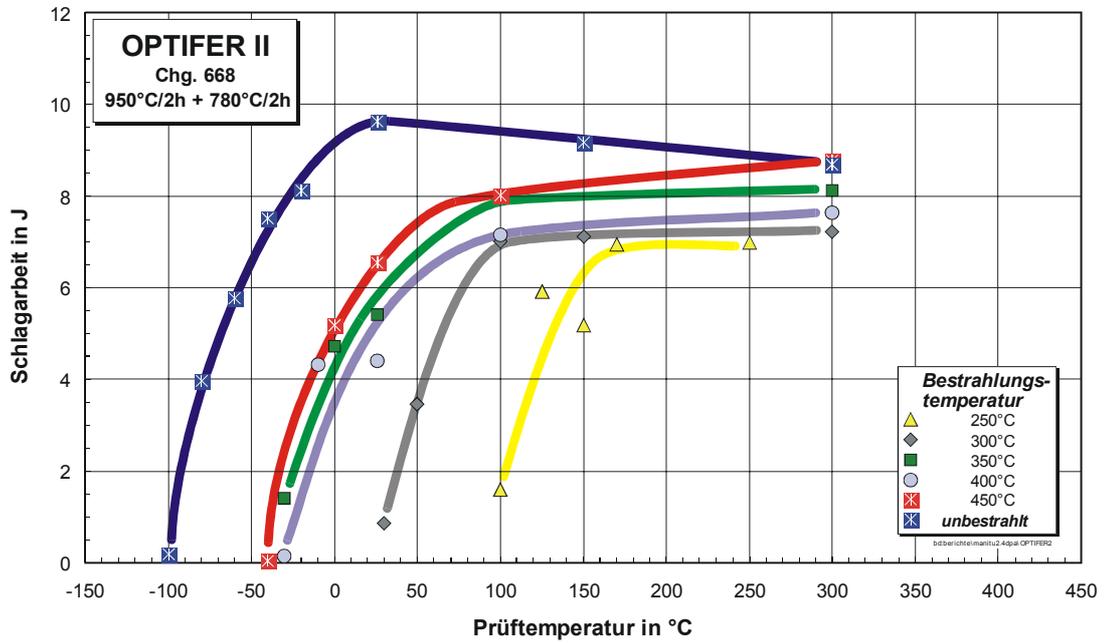
Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-2,3	160	210	445
2,4 dpa / 300 °C	-1,4	110	120	240
2,4 dpa / 350 °C	-1	50	60	136
2,4 dpa / 400 °C	-0,7	35	40	101
2,4 dpa / 450 °C	-1,4	70	60	50





10.2.6 OPTIFER-II

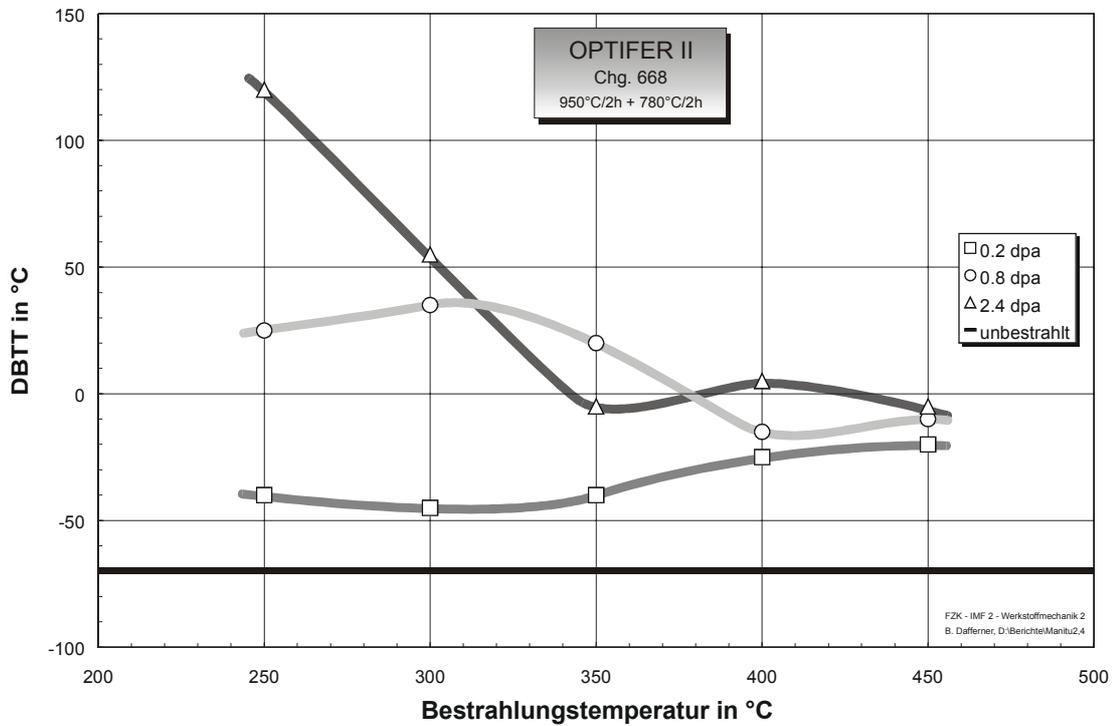
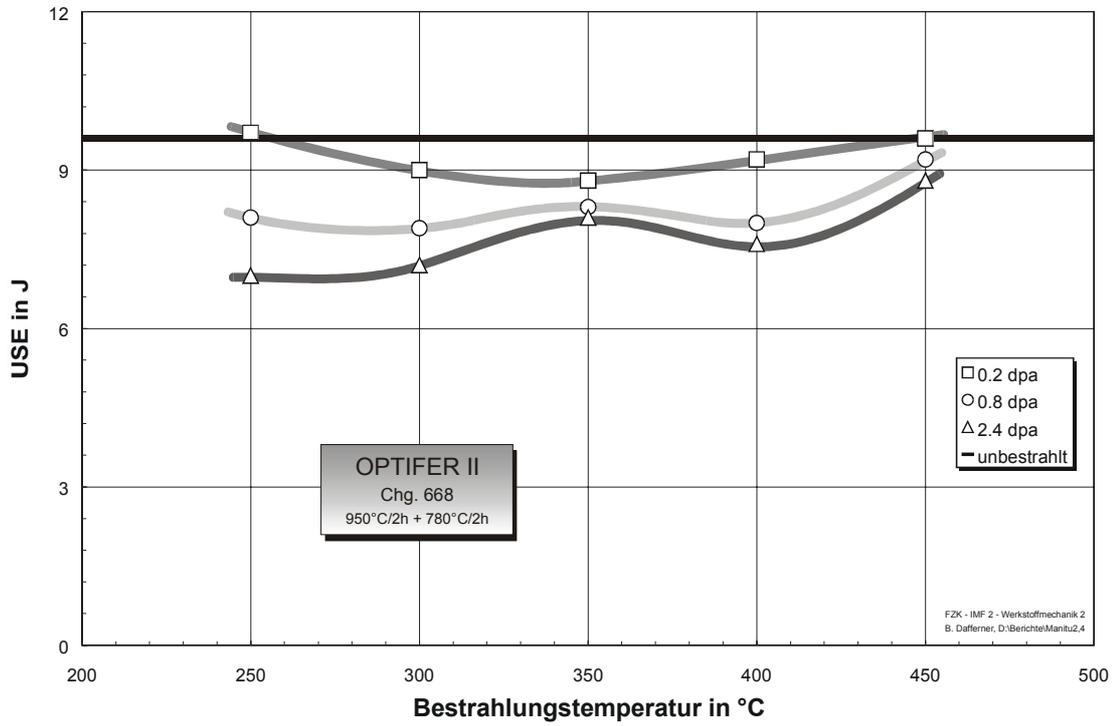
Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

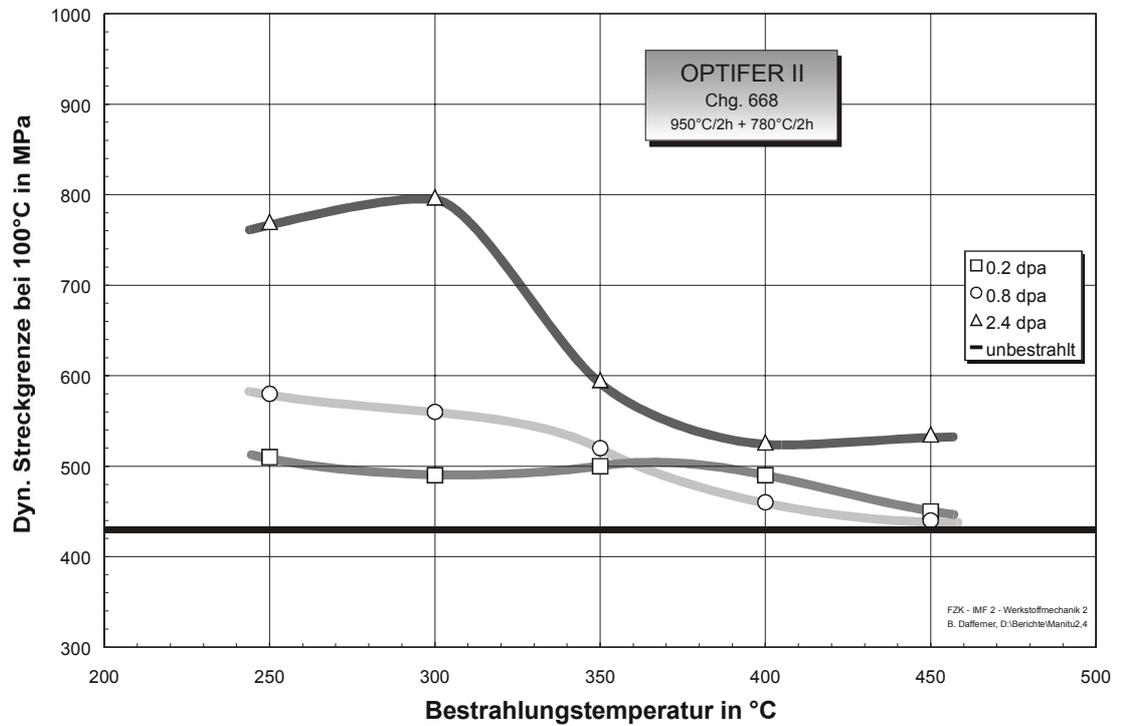
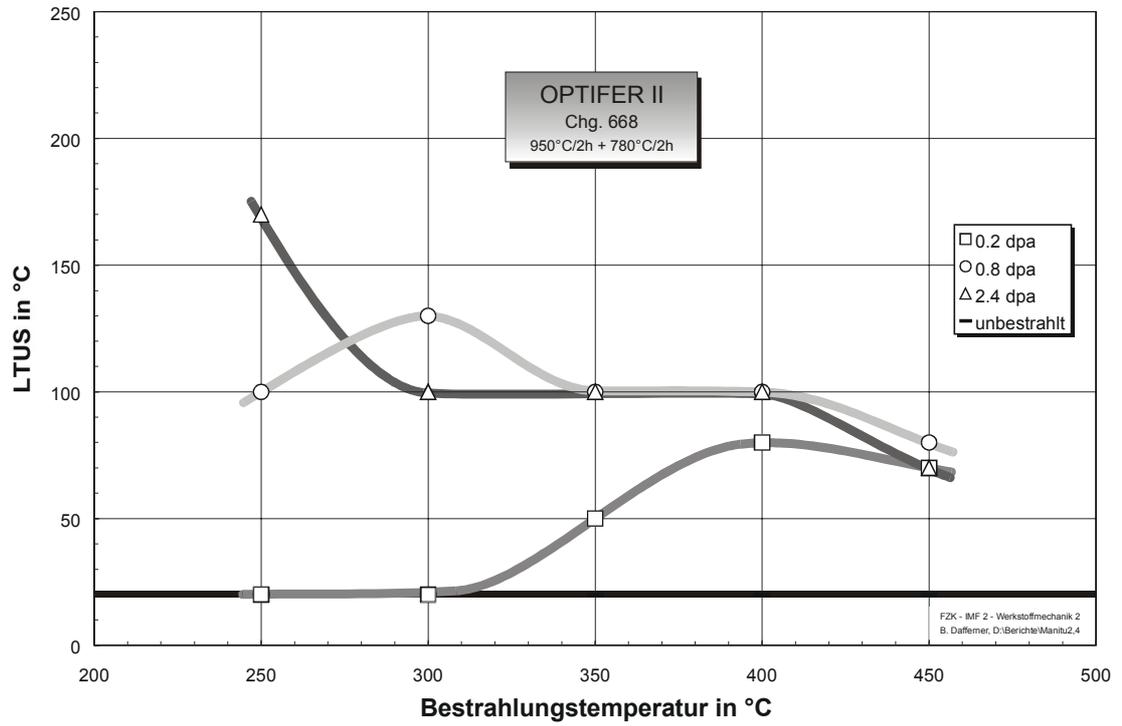


Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	9,7	-40	20	510
0,2 dpa / 300 °C	9	-45	20	490
0,2 dpa / 350 °C	8,8	-40	50	500
0,2 dpa / 400 °C	9,2	-25	80	490
0,2 dpa / 450 °C	9,6	-20	70	450
Unbestrahlt	9,6	-70	20	430

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	8,1	25	100	580
0,8 dpa / 300 °C	7,9	35	130	560
0,8 dpa / 350 °C	8,3	20	100	520
0,8 dpa / 400 °C	8	-15	100	460
0,8 dpa / 450 °C	9,2	-10	80	440
Unbestrahlt	9,6	-70	20	430

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	7	120	170	770
2,4 dpa / 300 °C	7,2	55	100	797
2,4 dpa / 350 °C	8,1	-5	100	595
2,4 dpa / 400 °C	7,6	5	100	526
2,4 dpa / 450 °C	8,8	-5	70	535
Unbestrahlt	9,6	-70	20	430

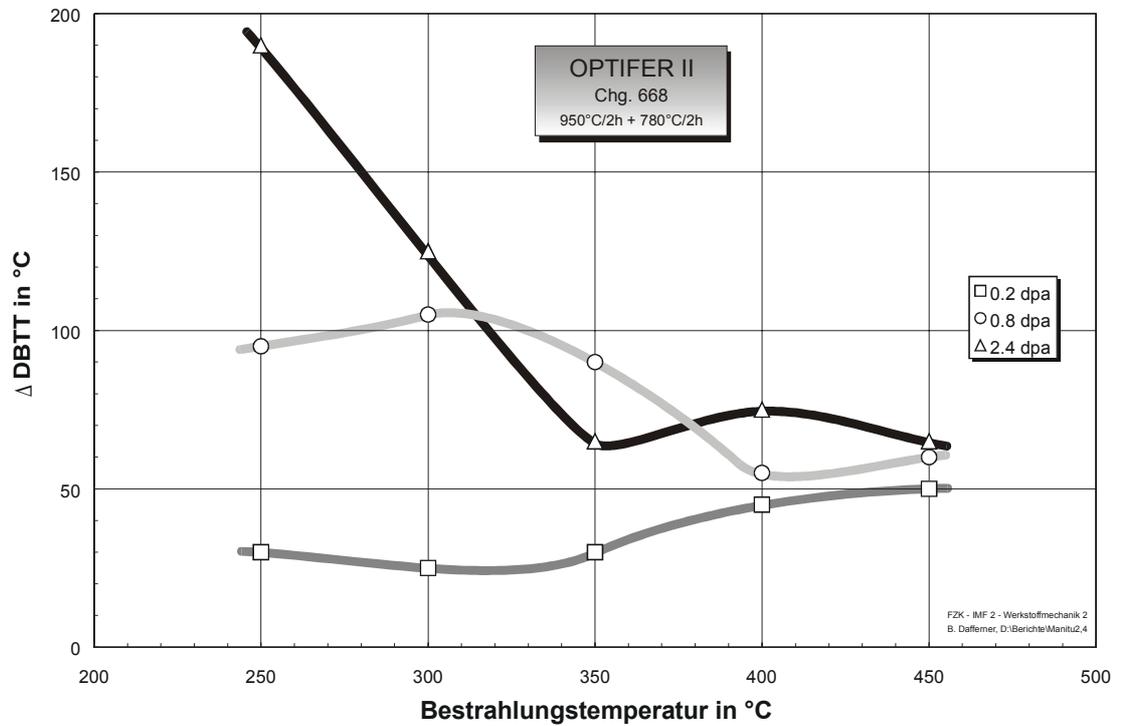
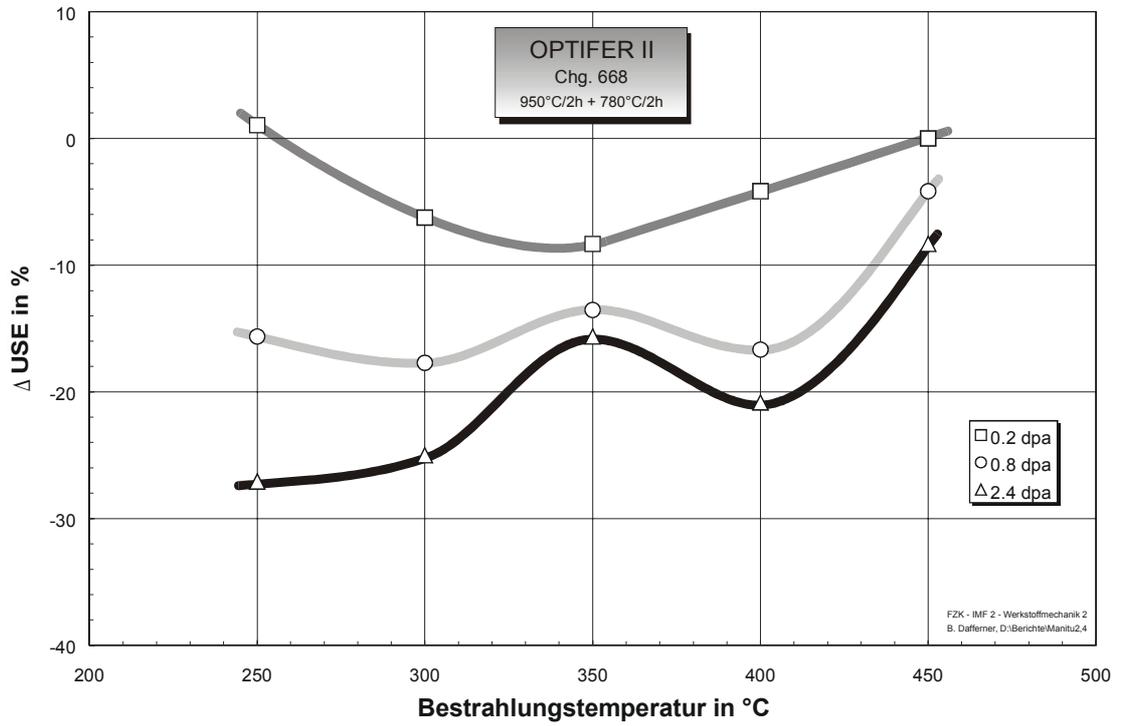


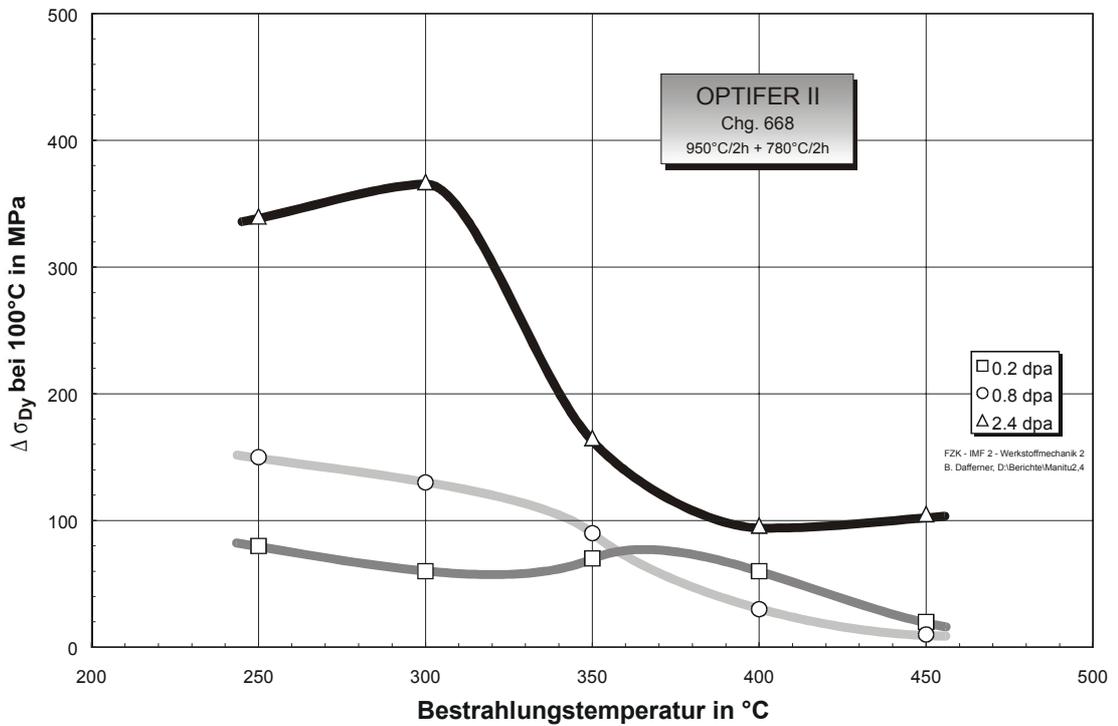
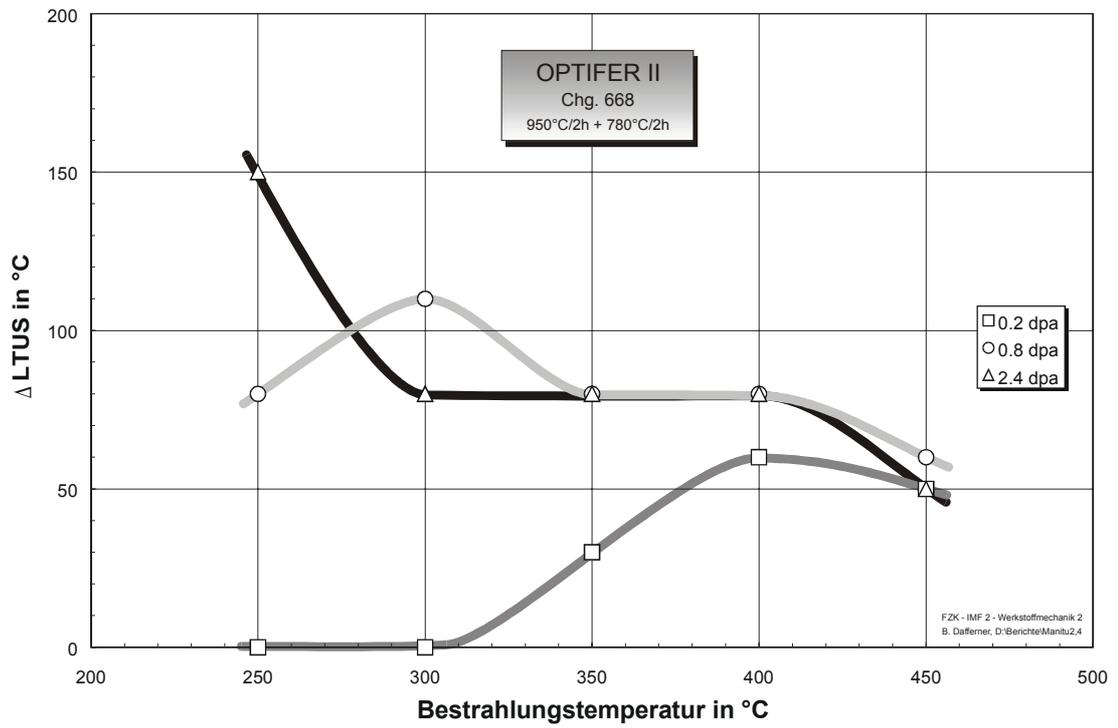


Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	0,1	30	0	80
0,2 dpa / 300 °C	-0,6	25	0	60
0,2 dpa / 350 °C	-0,8	30	30	70
0,2 dpa / 400 °C	-0,4	45	60	60
0,2 dpa / 450 °C	0	50	50	20

Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-1,5	95	80	150
0,8 dpa / 300 °C	-1,7	105	110	130
0,8 dpa / 350 °C	-1,3	90	80	90
0,8 dpa / 400 °C	-1,6	55	80	30
0,8 dpa / 450 °C	-0,4	60	60	10

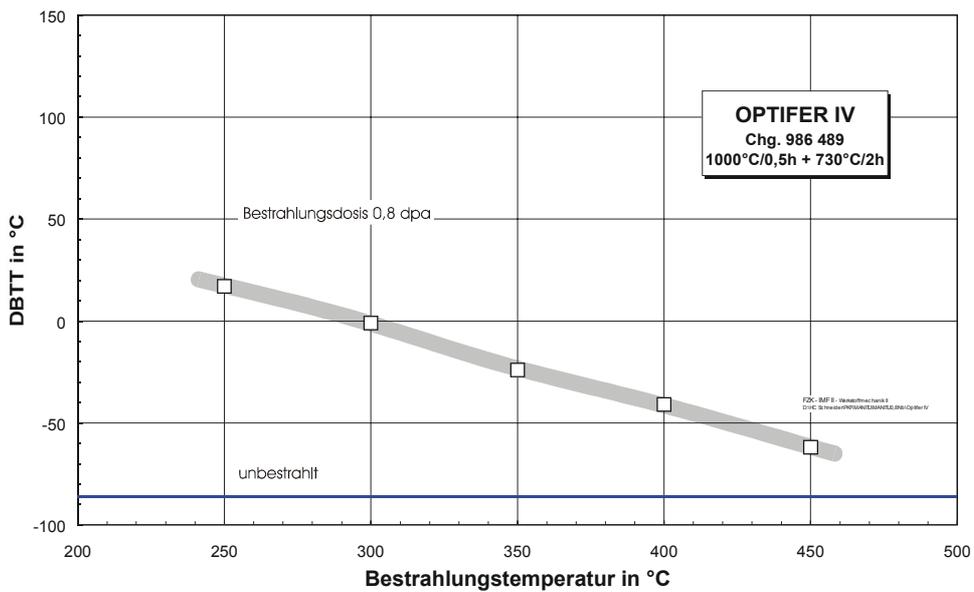
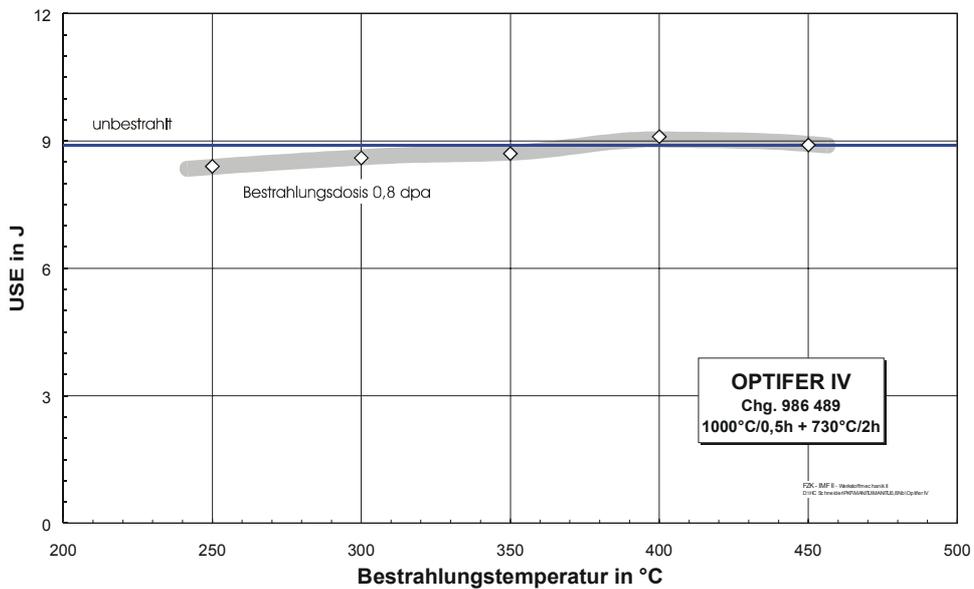
Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-2,6	190	150	340
2,4 dpa / 300 °C	-2,4	125	80	367
2,4 dpa / 350 °C	-1,5	65	80	165
2,4 dpa / 400 °C	-2	75	80	96
2,4 dpa / 450 °C	-0,8	65	50	105

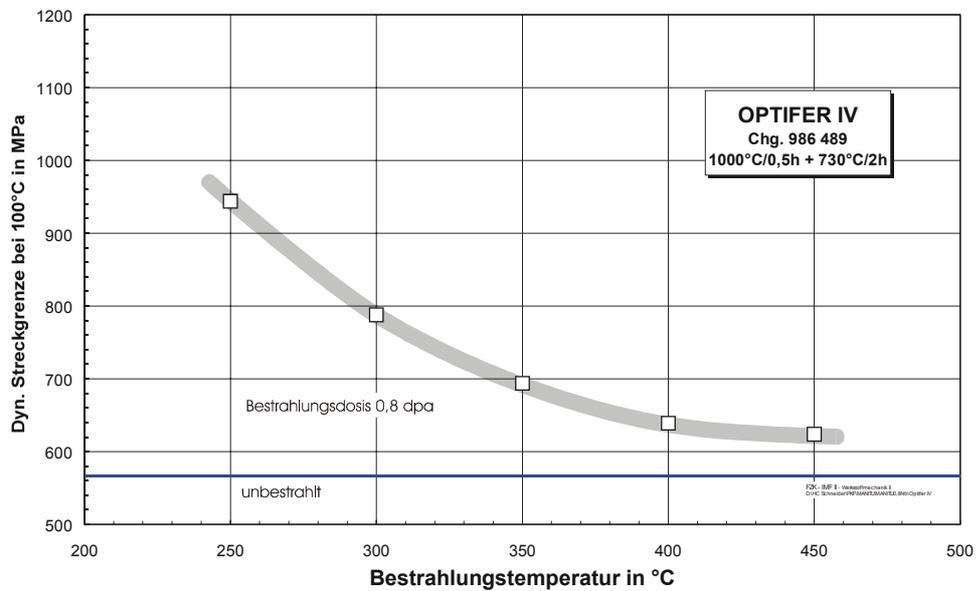
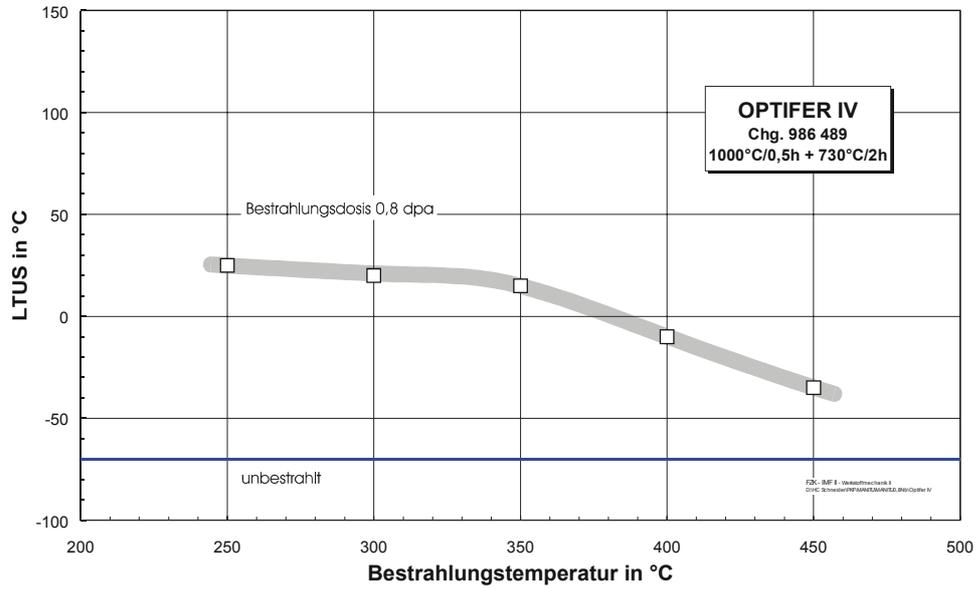




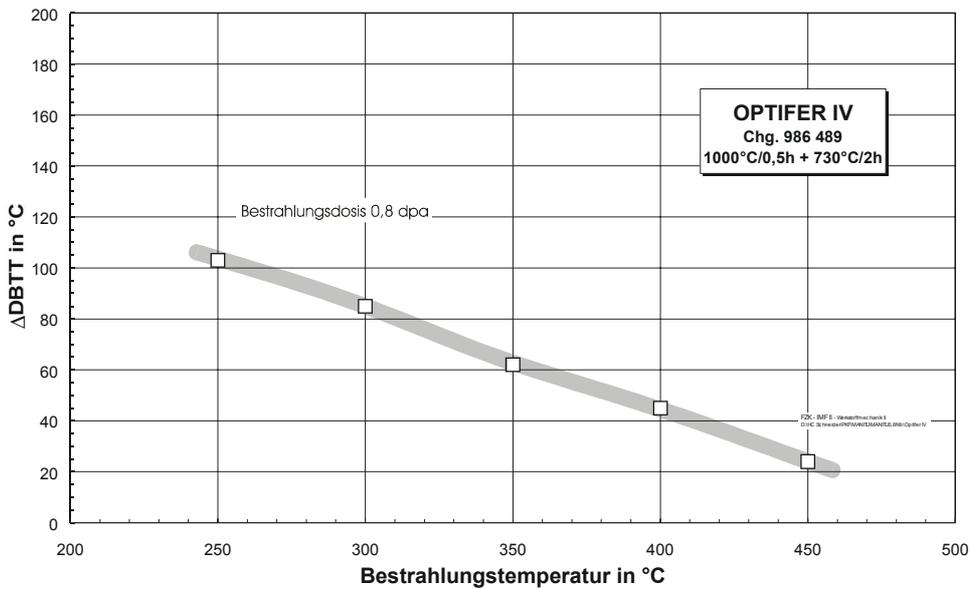
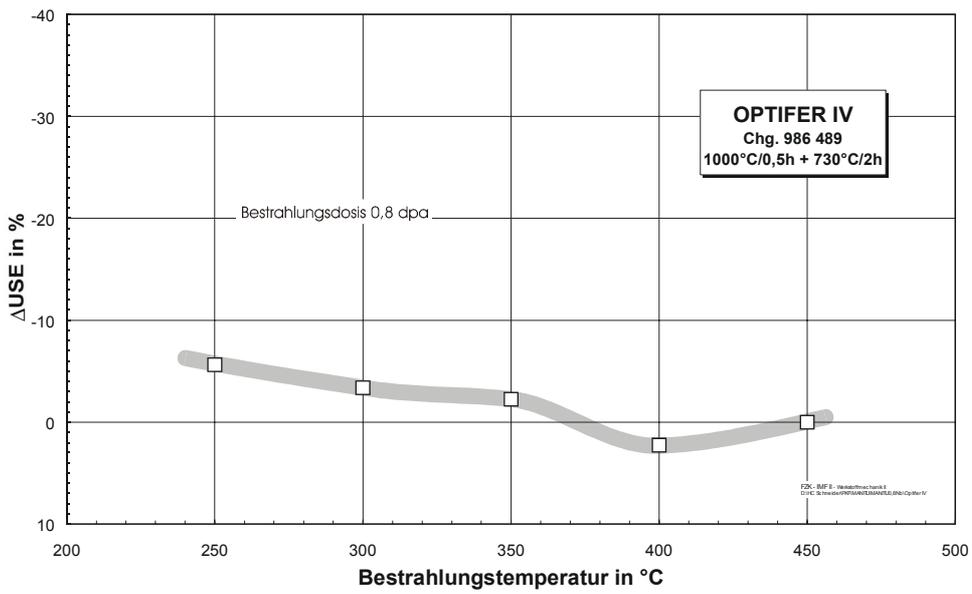
10.2.7 OPTIFER-IV

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	8,4	17	25	944
0,8 dpa / 300 °C	8,6	-1	20	788
0,8 dpa / 350 °C	8,7	-24	15	694
0,8 dpa / 400 °C	9,1	-41	-10	639
0,8 dpa / 450 °C	8,9	-62	-35	624
Unbestrahlt	8,9	-86	-70	566



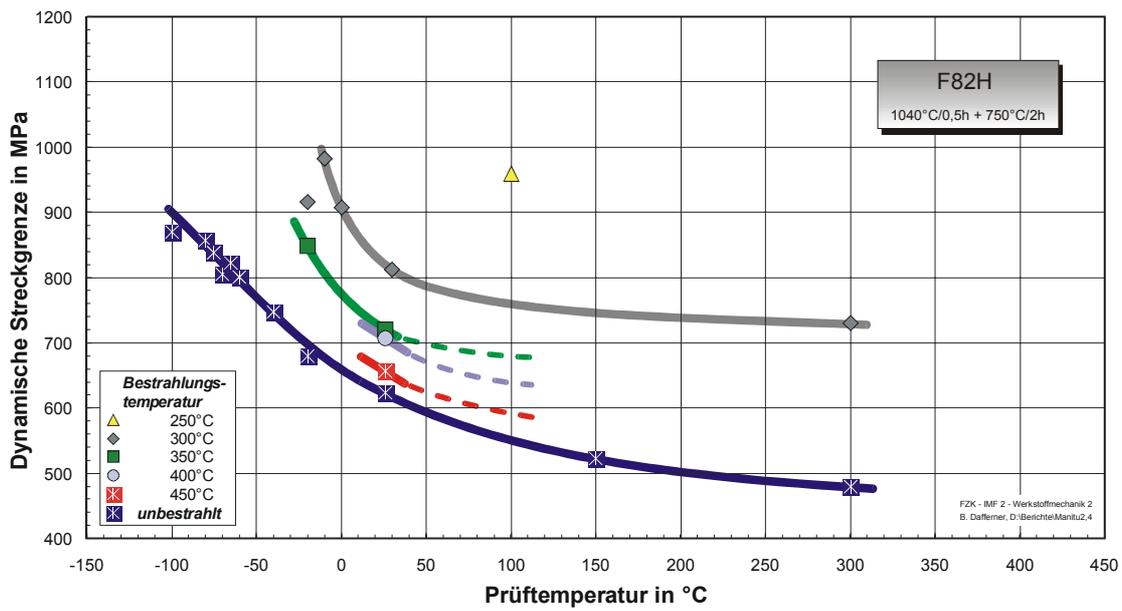
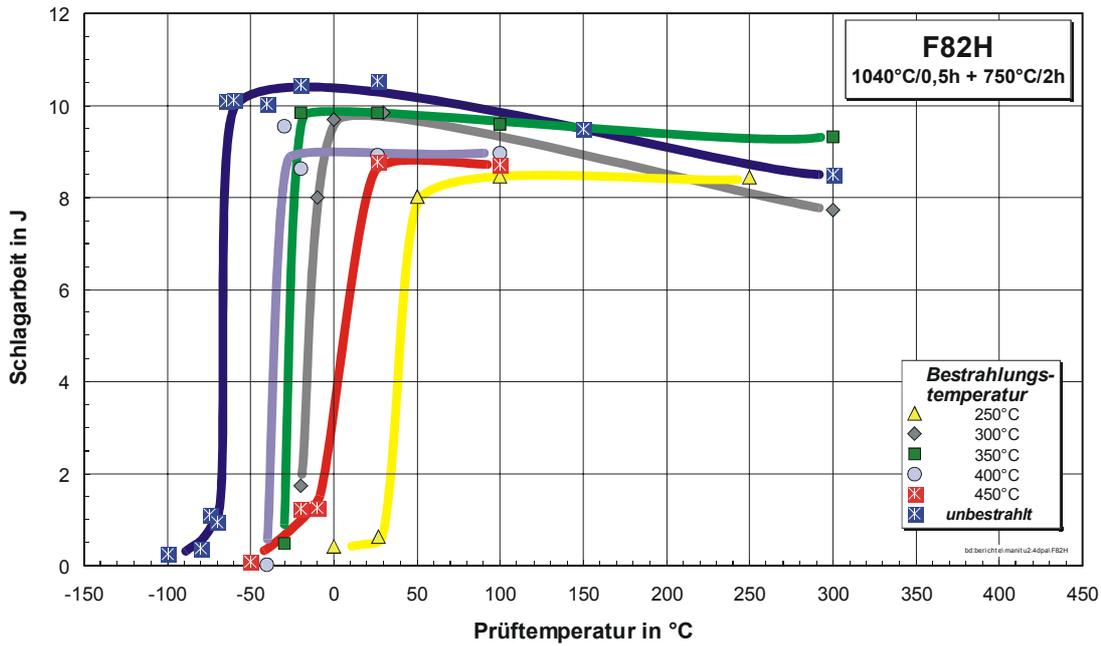


Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-0,5	103	95	378
0,8 dpa / 300 °C	-0,3	85	90	222
0,8 dpa / 350 °C	-0,2	62	85	128
0,8 dpa / 400 °C	0,2	45	60	73
0,8 dpa / 450 °C	0	24	35	58



10.2.8 F82H

Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

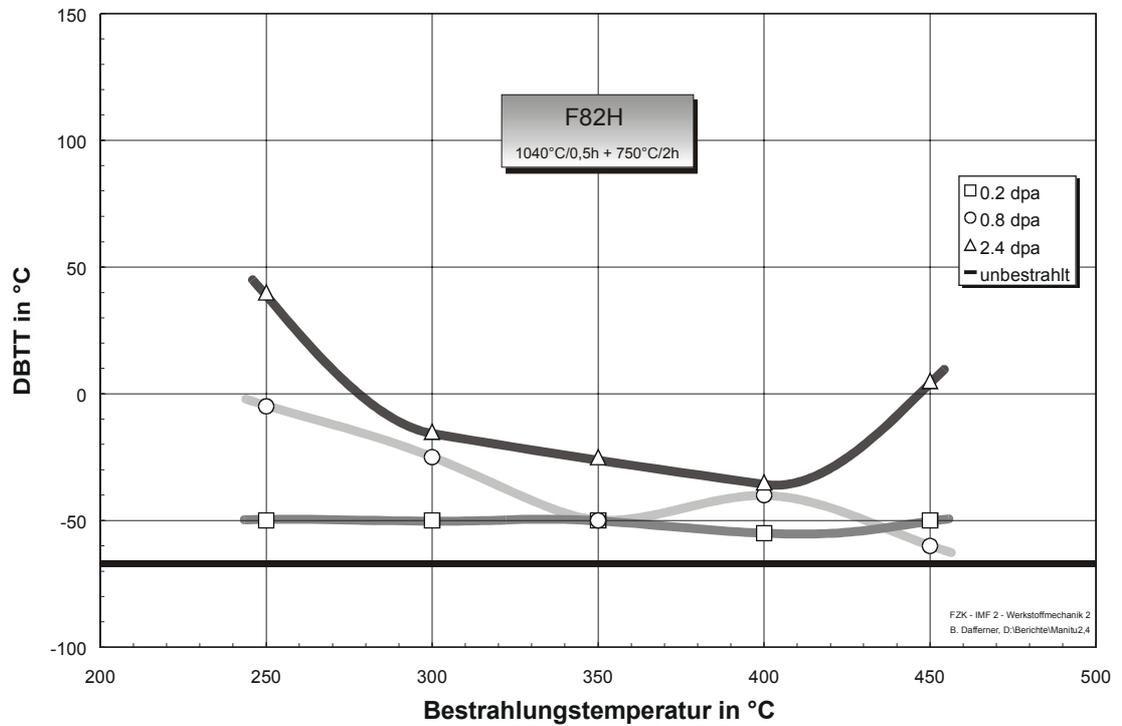
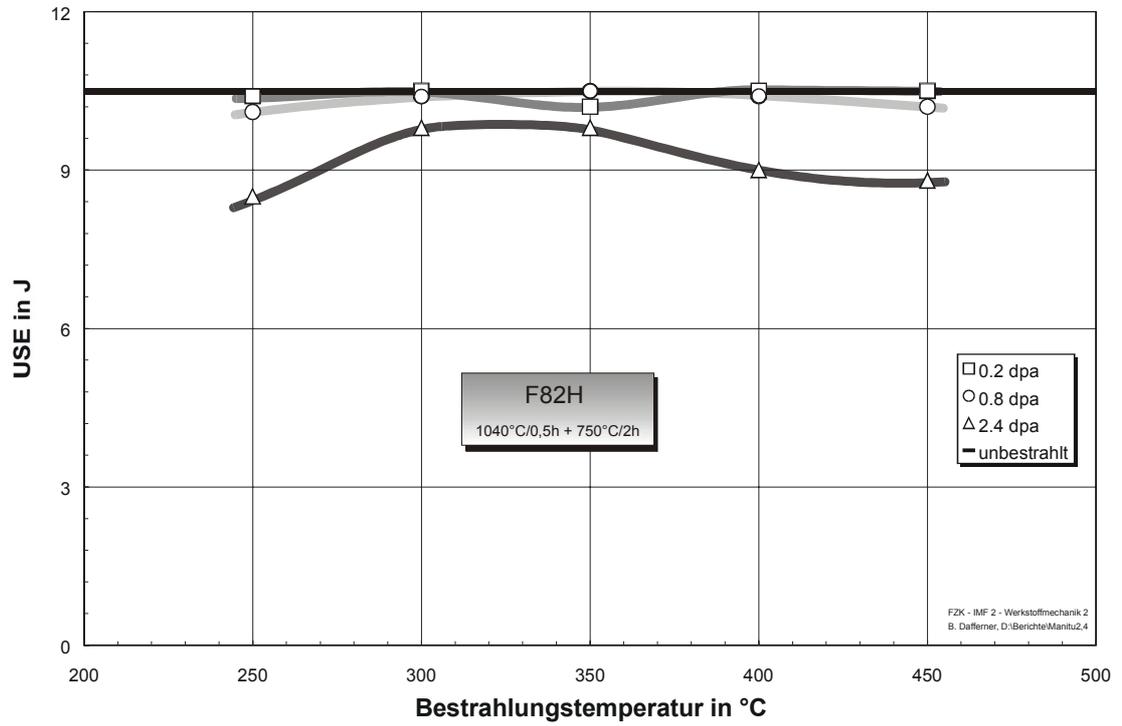


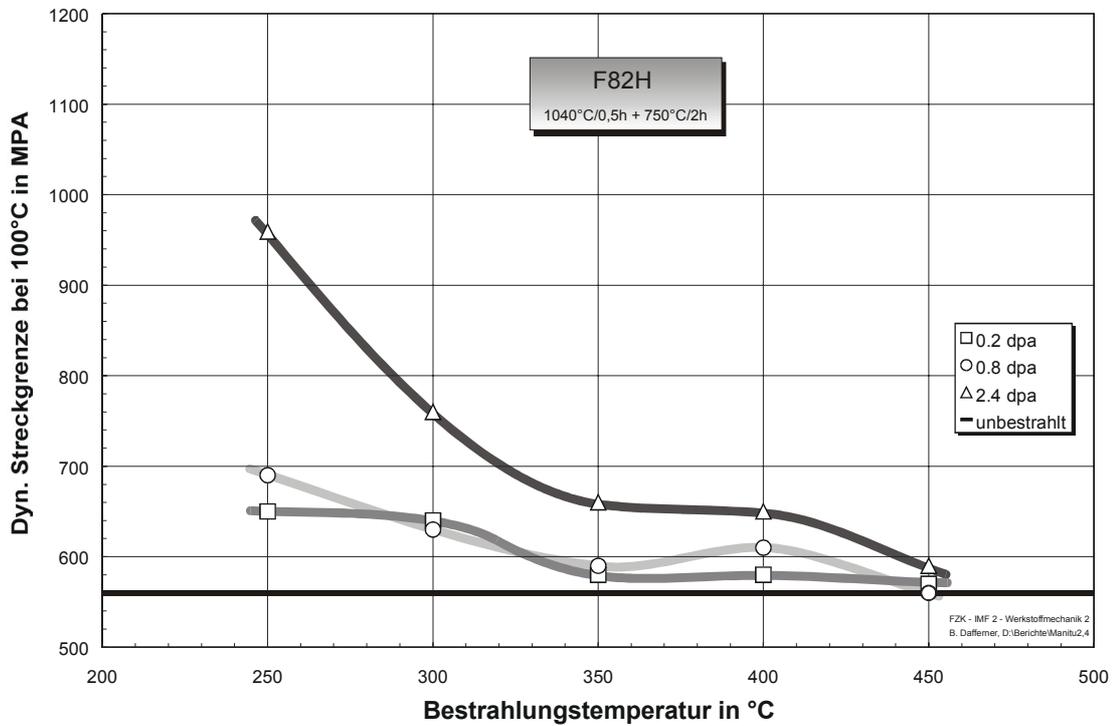
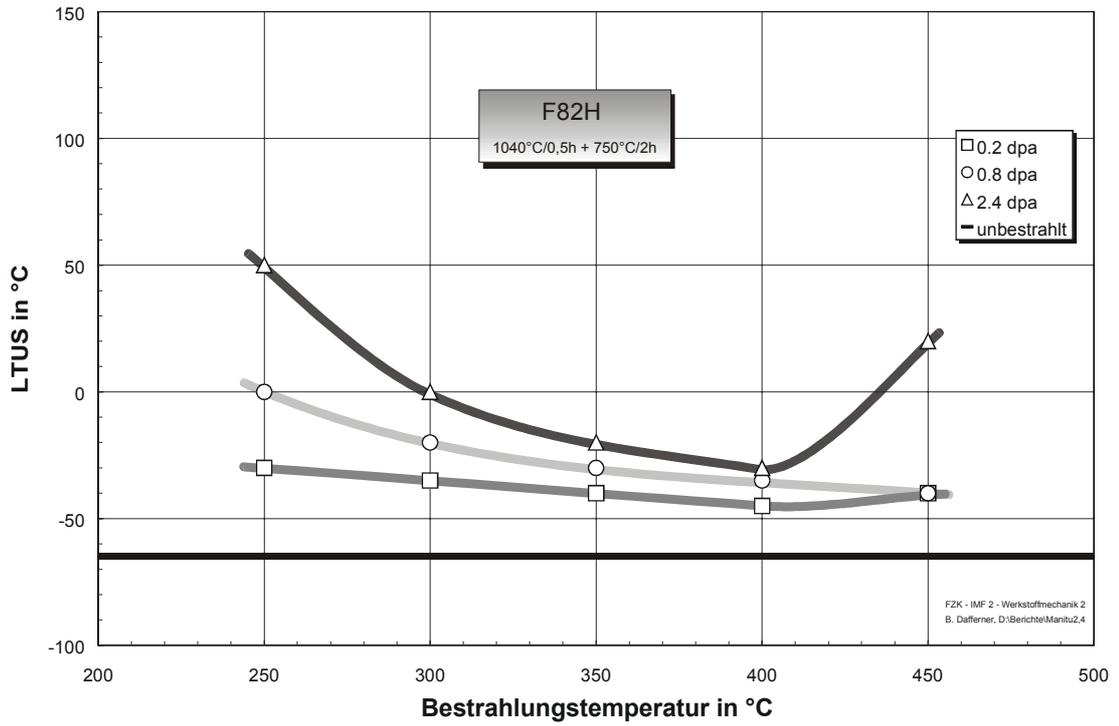
Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	10,4	-50	-30	650
0,2 dpa / 300 °C	10,5	-50	-35	640
0,2 dpa / 350 °C	10,2	-50	-40	580
0,2 dpa / 400 °C	10,5	-55	-45	580
0,2 dpa / 450 °C	10,5	-50	-40	570
Unbestrahlt	10,5	-67	-65	560

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	10,1	-5	0	690
0,8 dpa / 300 °C	10,4	-25	-20	630
0,8 dpa / 350 °C	10,5	-50	-30	590
0,8 dpa / 400 °C	10,4	-40	-35	610
0,8 dpa / 450 °C	10,2	-60	-40	560
Unbestrahlt	10,5	-67	-65	560

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	8,5	40	50	959
2,4 dpa / 300 °C	9,8	-15	0	760
2,4 dpa / 350 °C	9,8	-25	-20	660 *)
2,4 dpa / 400 °C	9	-35	-30	650 *)
2,4 dpa / 450 °C	8,8	5	20	590
Unbestrahlt	10,5	-67	-65	560

*) aus benachbarten Meßwerten interpoliert

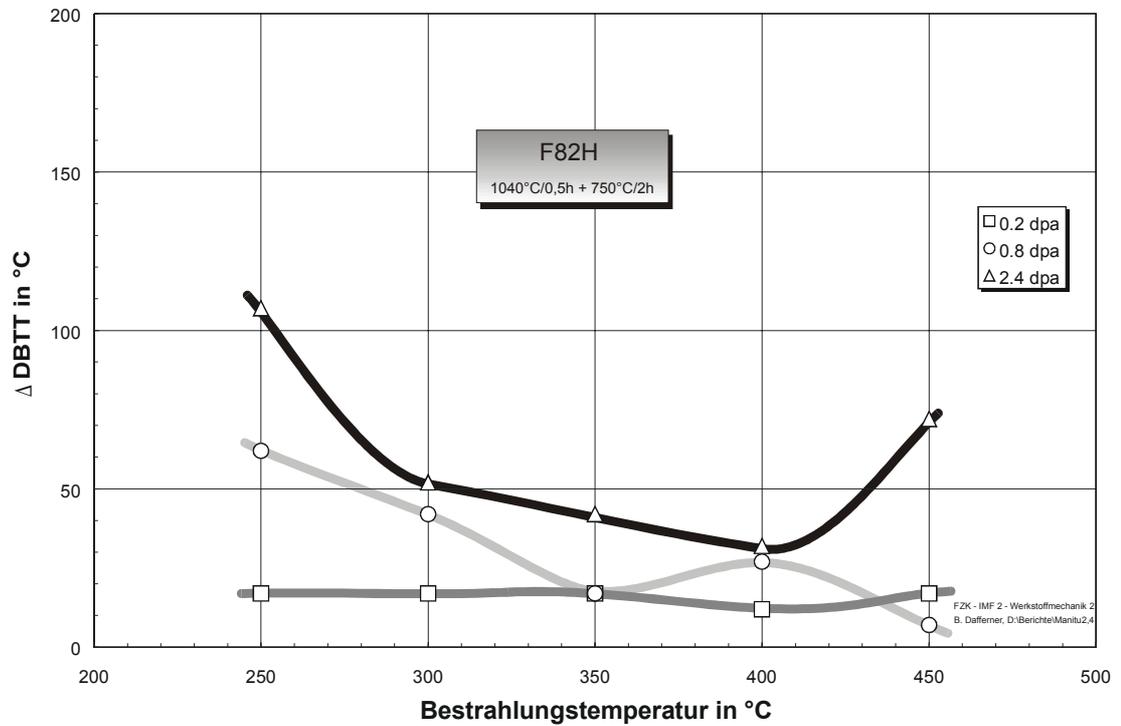
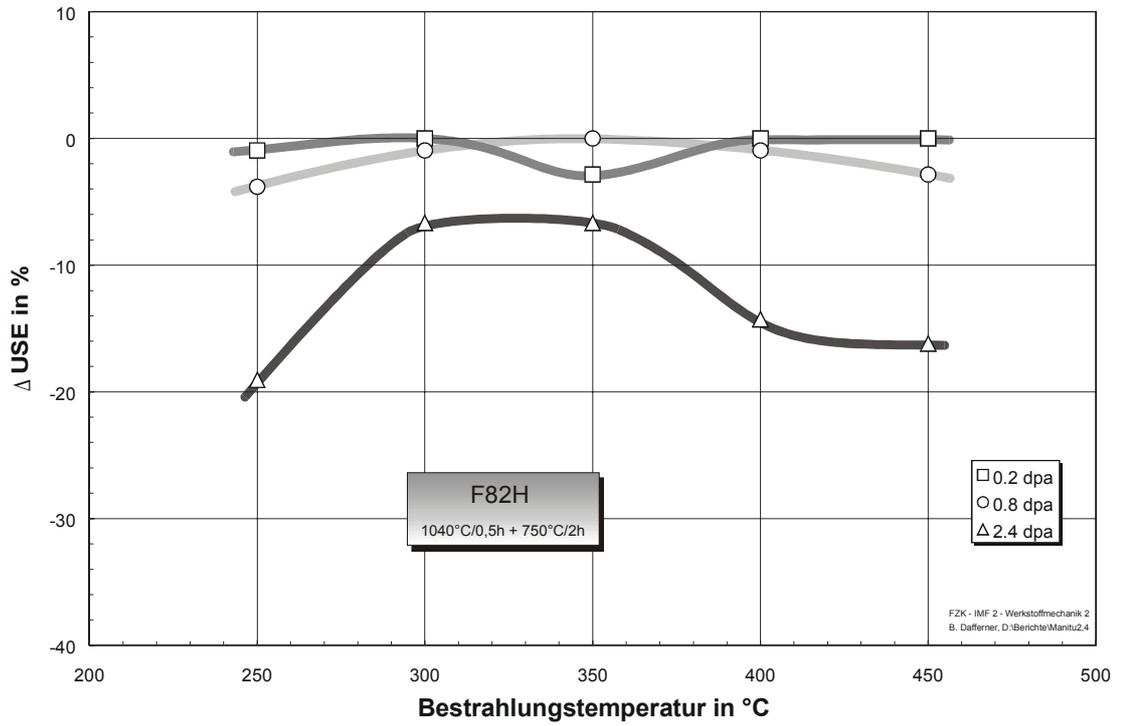


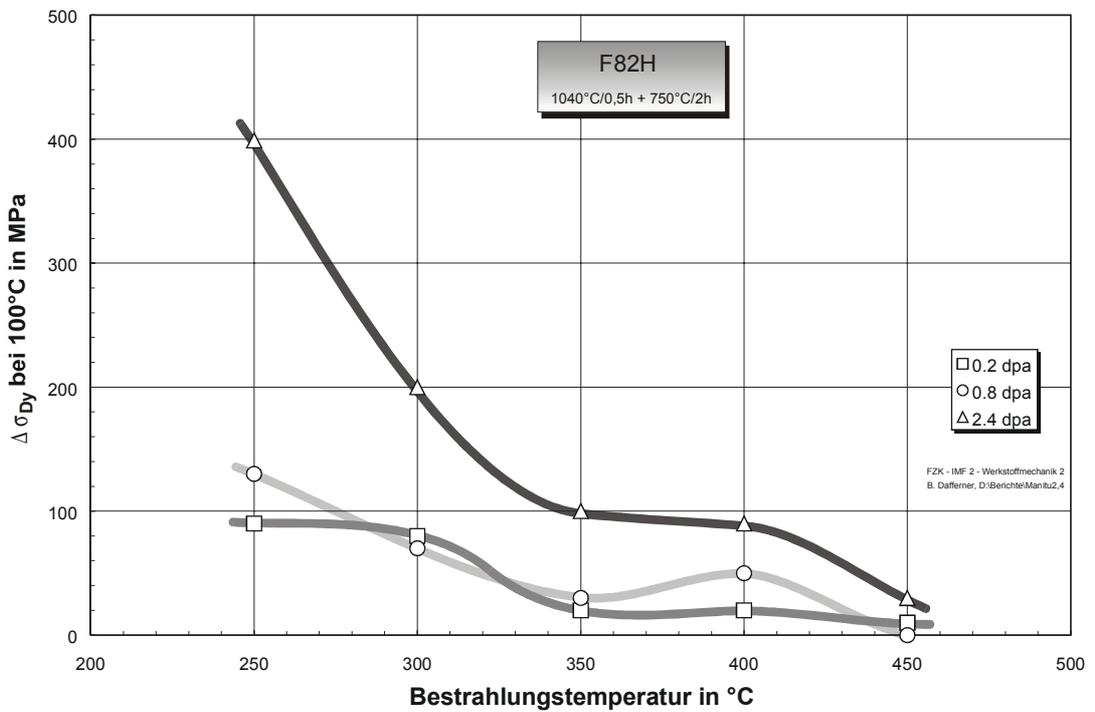
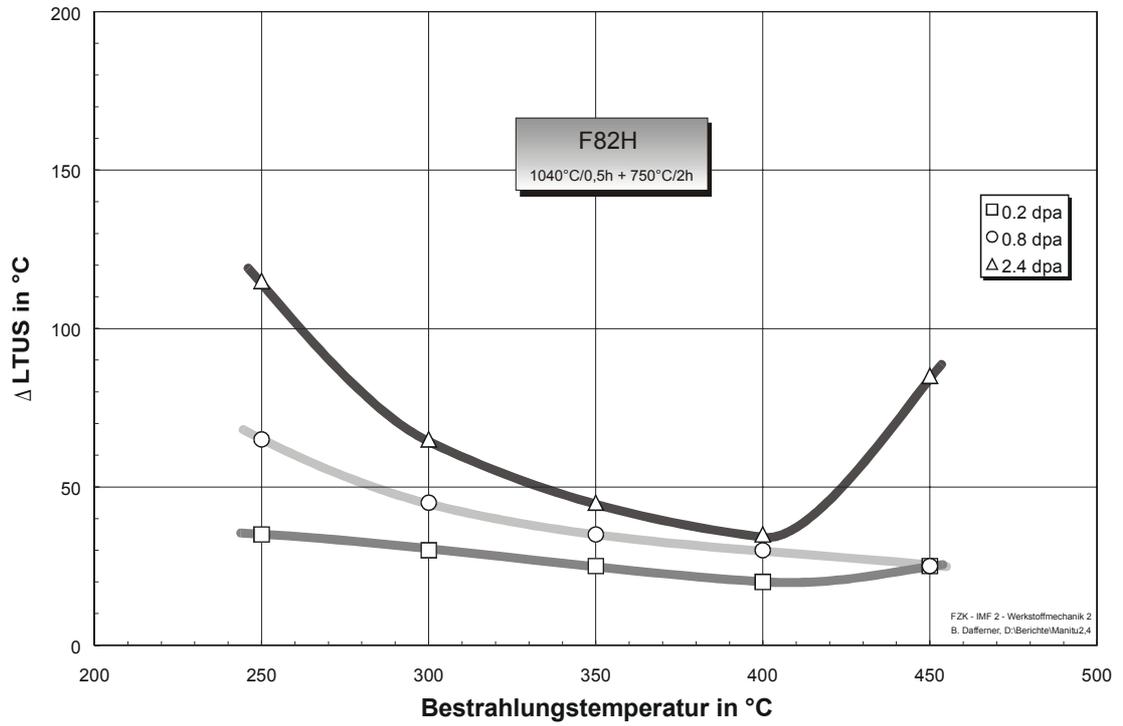


Bestrahlungsparameter	ΔU_{SE} in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	-0,1	17	35	90
0,2 dpa / 300 °C	0	17	30	80
0,2 dpa / 350 °C	-0,3	17	25	20
0,2 dpa / 400 °C	0	12	20	20
0,2 dpa / 450 °C	0	17	25	10

Bestrahlungsparameter	ΔU_{SE} in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-0,4	62	65	130
0,8 dpa / 300 °C	-0,1	42	45	70
0,8 dpa / 350 °C	0	17	35	30
0,8 dpa / 400 °C	-0,1	27	30	50
0,8 dpa / 450 °C	-0,3	7	25	0

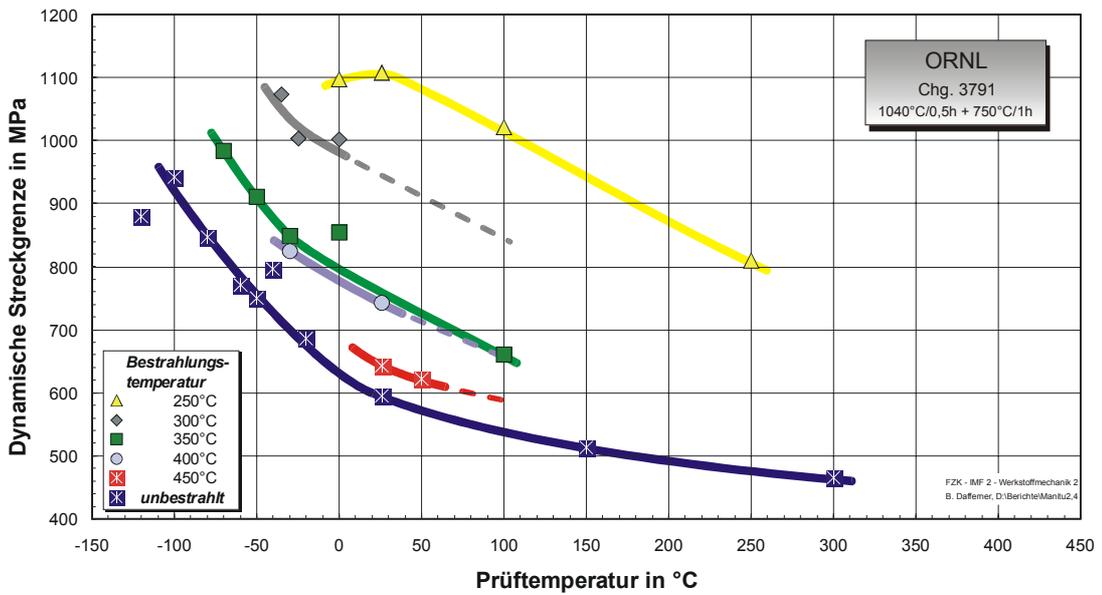
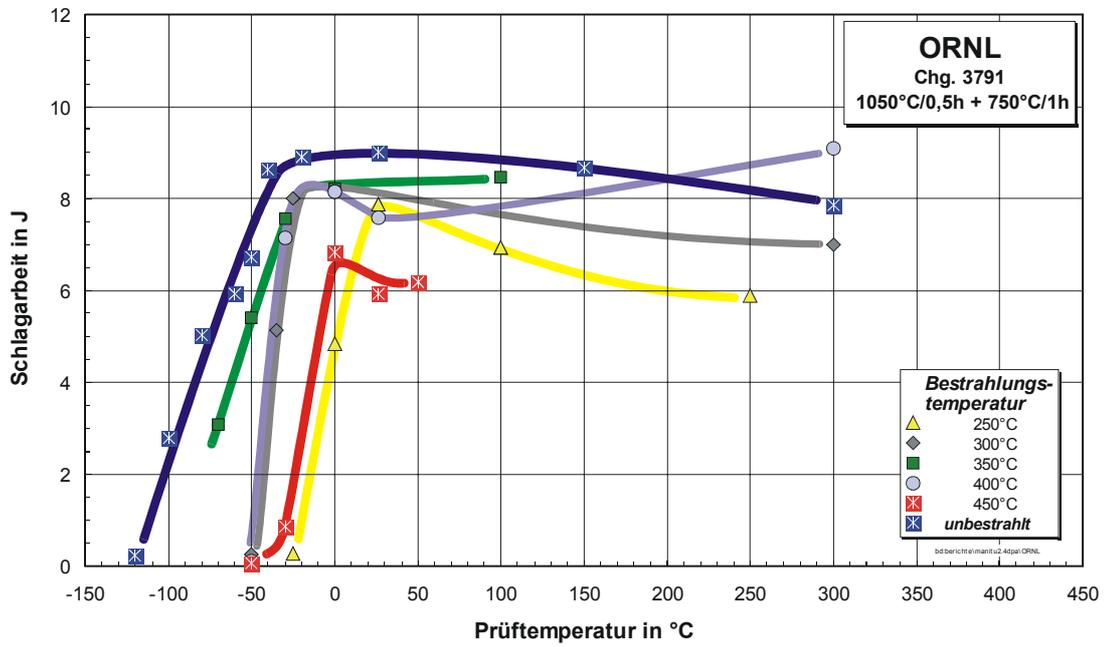
Bestrahlungsparameter	ΔU_{SE} in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-2	107	115	399
2,4 dpa / 300 °C	-0,7	52	65	200
2,4 dpa / 350 °C	-0,7	42	45	100
2,4 dpa / 400 °C	-1,5	32	35	90
2,4 dpa / 450 °C	-1,7	72	85	30





10.2.9 ORNL 3791

Bestrahlungsparameter: 2,4 dpa

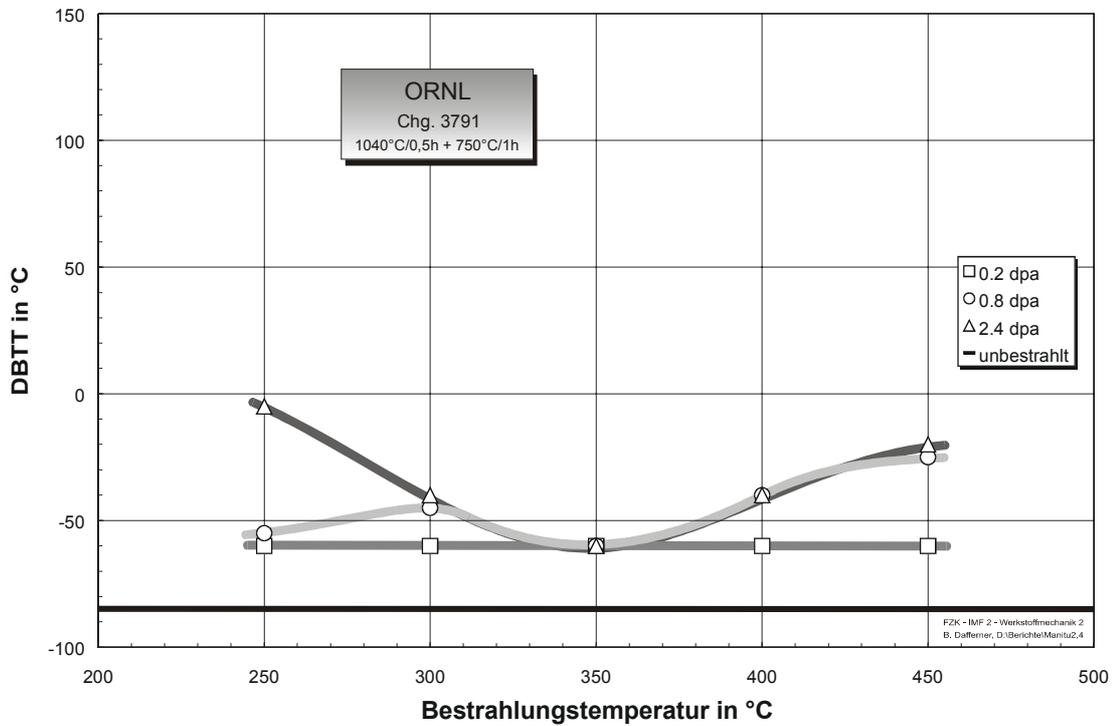
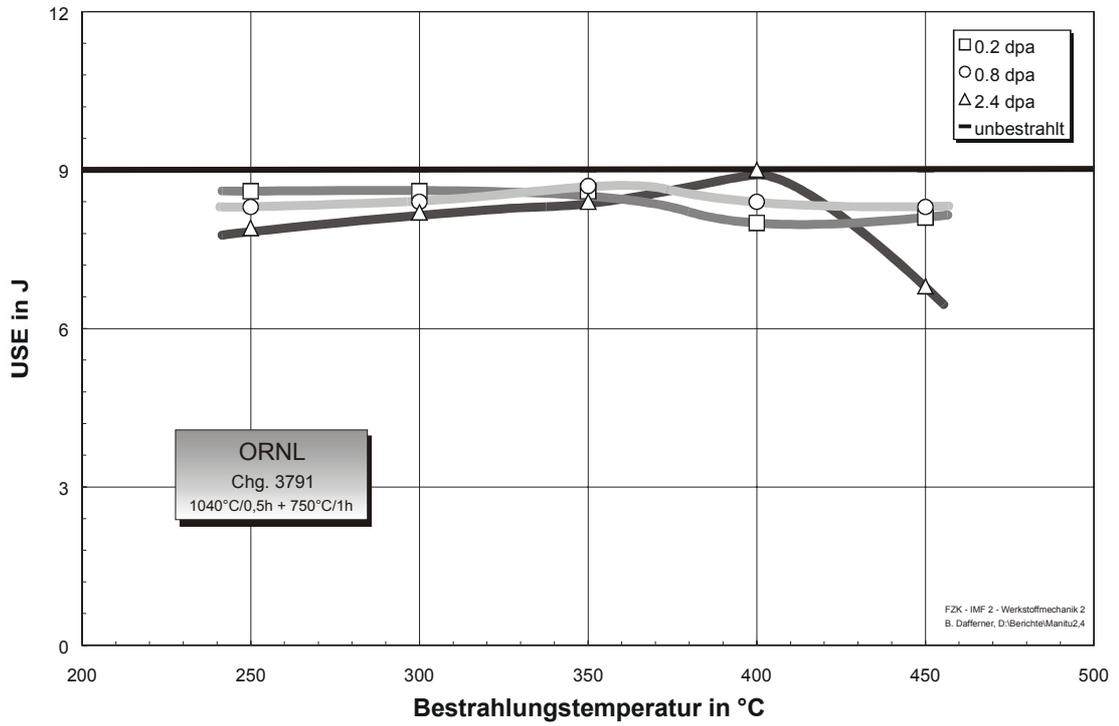


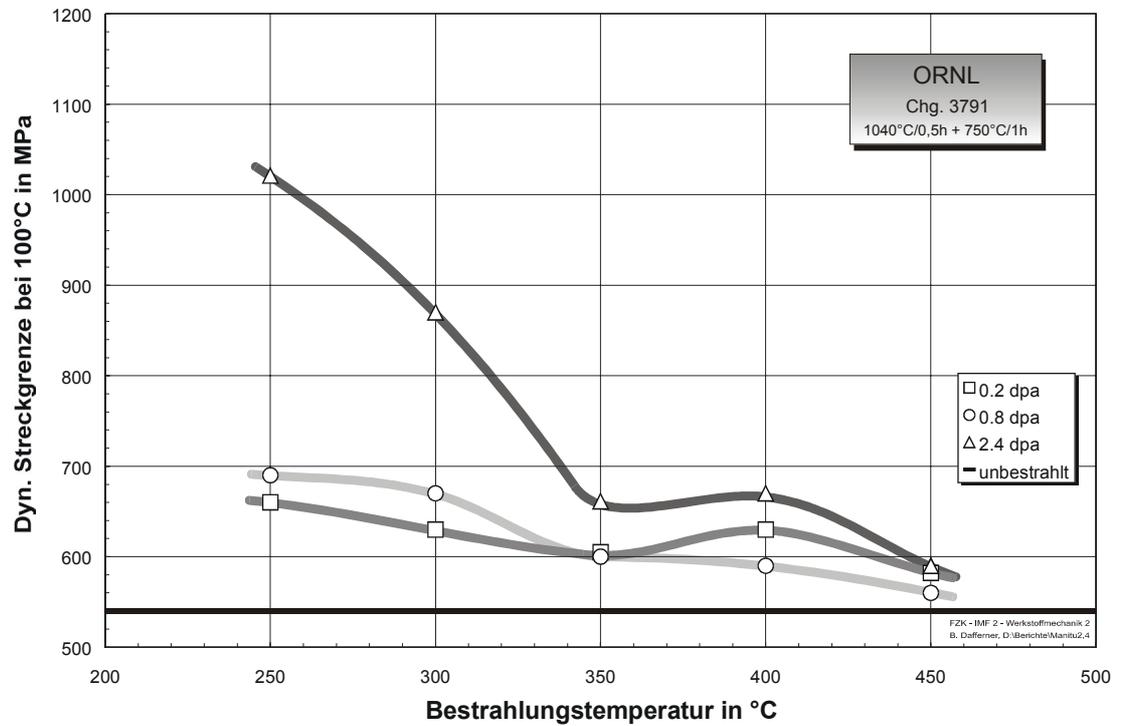
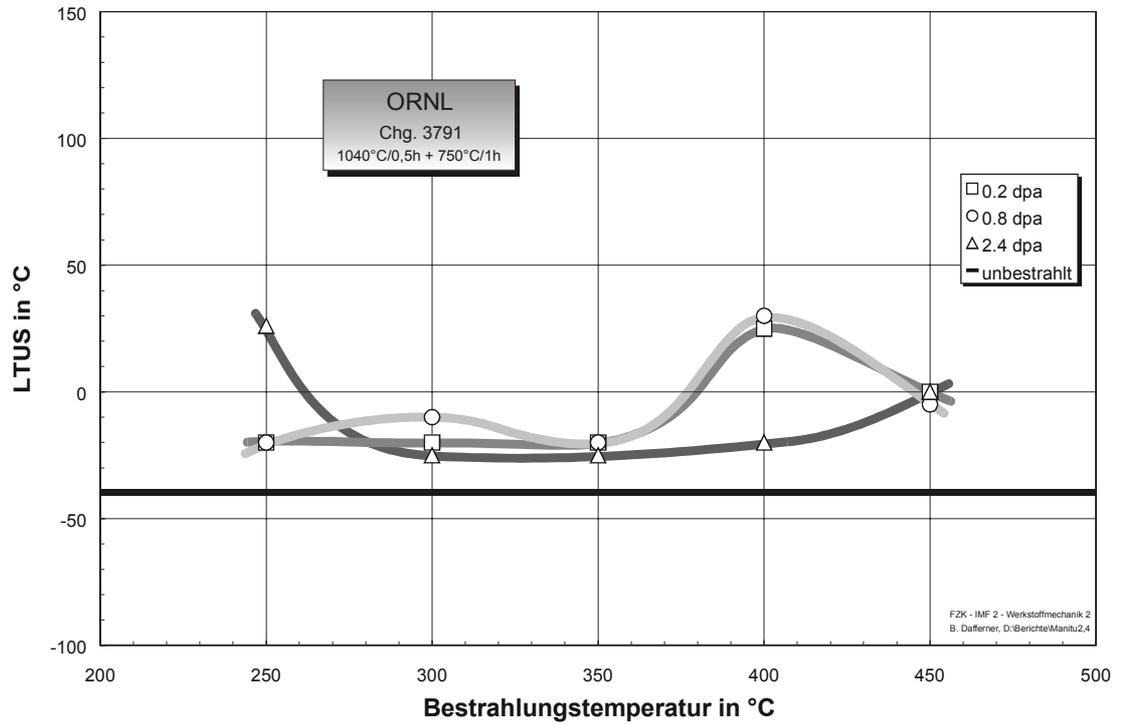
Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	8,6	-60	-20	660
0,2 dpa / 300 °C	8,6	-60	-20	630
0,2 dpa / 350 °C	8,6	-60	-20	605
0,2 dpa / 400 °C	8	-60	25	630
0,2 dpa / 450 °C	8,1	-60	0	582
Unbestrahlt	9	-85	-40	540

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	8,3	-55	-20	690
0,8 dpa / 300 °C	8,4	-45	-10	670
0,8 dpa / 350 °C	8,7	-60	-20	600
0,8 dpa / 400 °C	8,4	-40	30	590
0,8 dpa / 450 °C	8,3	-25	-5	560
Unbestrahlt	9	-85	-40	540

Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 100^\circ\text{C}}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	7,9	-5	26	1021
2,4 dpa / 300 °C	8,2	-40	-25	870 *)
2,4 dpa / 350 °C	8,4	-60	-25	661
2,4 dpa / 400 °C	9	-40	-20	670 *)
2,4 dpa / 450 °C	6,8	-20	0	590 *)
Unbestrahlt	9	-85	-40	540

*) aus benachbarten Meßwerten interpoliert

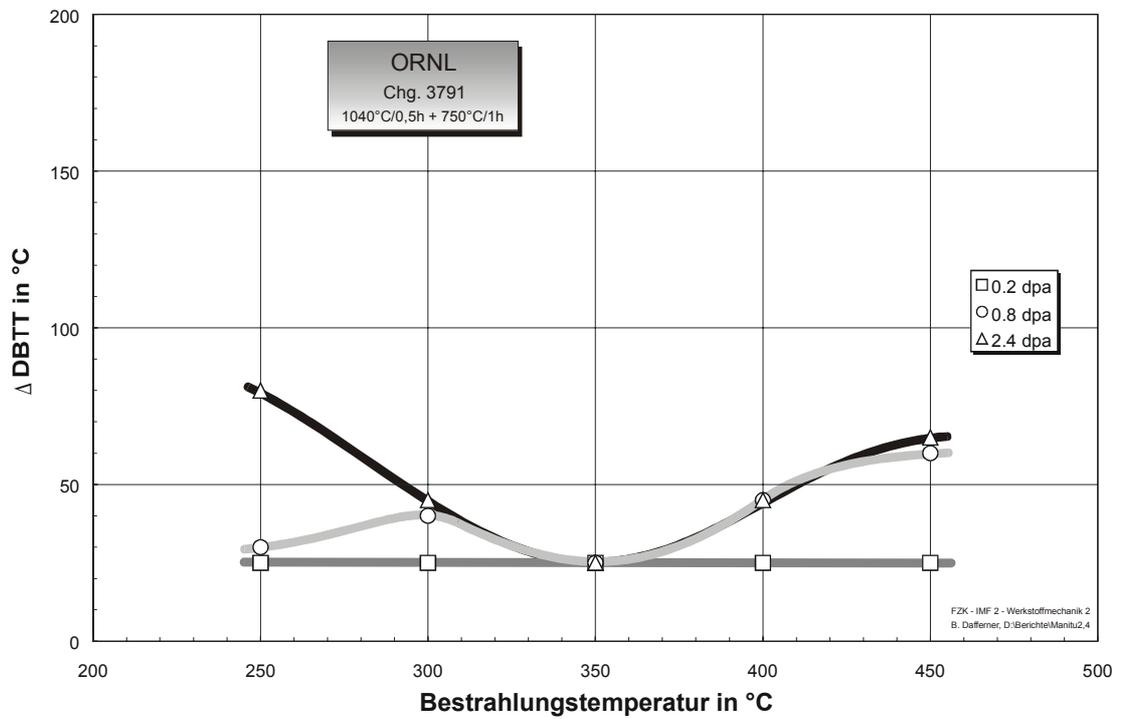
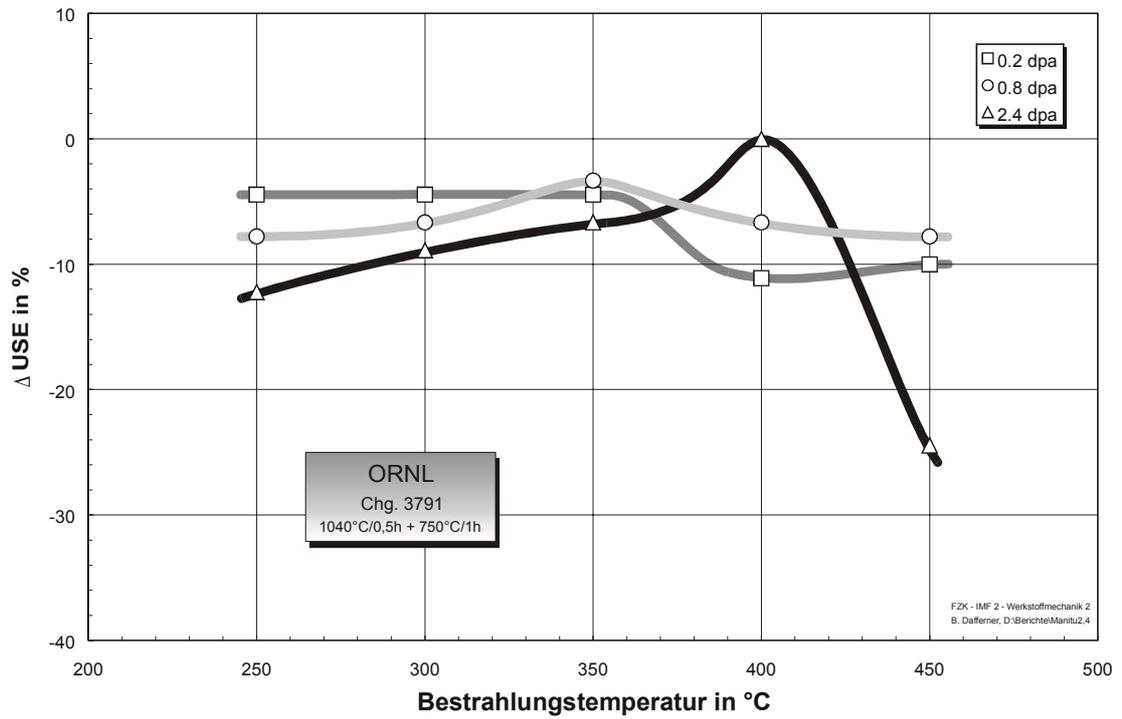


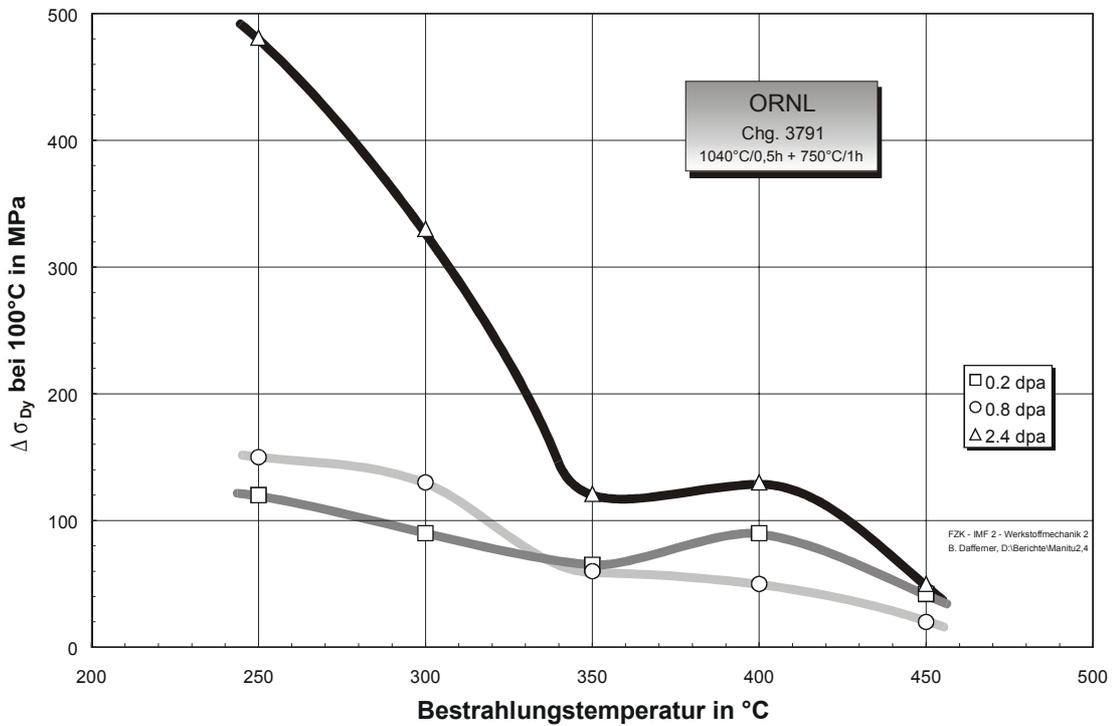
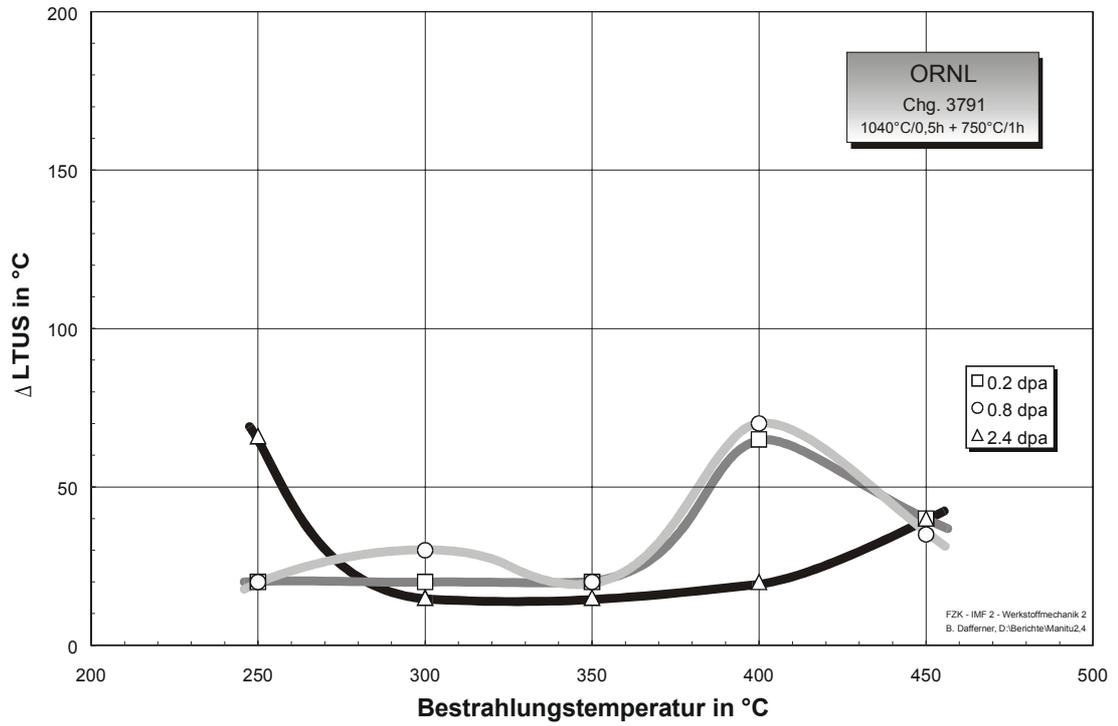


Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,2 dpa / 250 °C	-0,4	25	20	120
0,2 dpa / 300 °C	-0,4	25	20	90
0,2 dpa / 350 °C	-0,4	25	20	65
0,2 dpa / 400 °C	-1	25	65	90
0,2 dpa / 450 °C	-0,9	25	40	42

Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-0,7	30	20	150
0,8 dpa / 300 °C	-0,6	40	30	130
0,8 dpa / 350 °C	-0,3	25	20	60
0,8 dpa / 400 °C	-0,6	45	70	50
0,8 dpa / 450 °C	-0,7	60	35	20

Bestrahlungsparameter	ΔUSE in J	$\Delta DBTT$ in °C	$\Delta LTUS$ in °C	$\Delta \sigma_{yd, 100^\circ C}$ in MPa
2,4 dpa / 250 °C	-1,1	80	66	481
2,4 dpa / 300 °C	-0,8	45	15	330
2,4 dpa / 350 °C	-0,6	25	15	121
2,4 dpa / 400 °C	0	45	20	130
2,4 dpa / 450 °C	-2,2	65	40	50

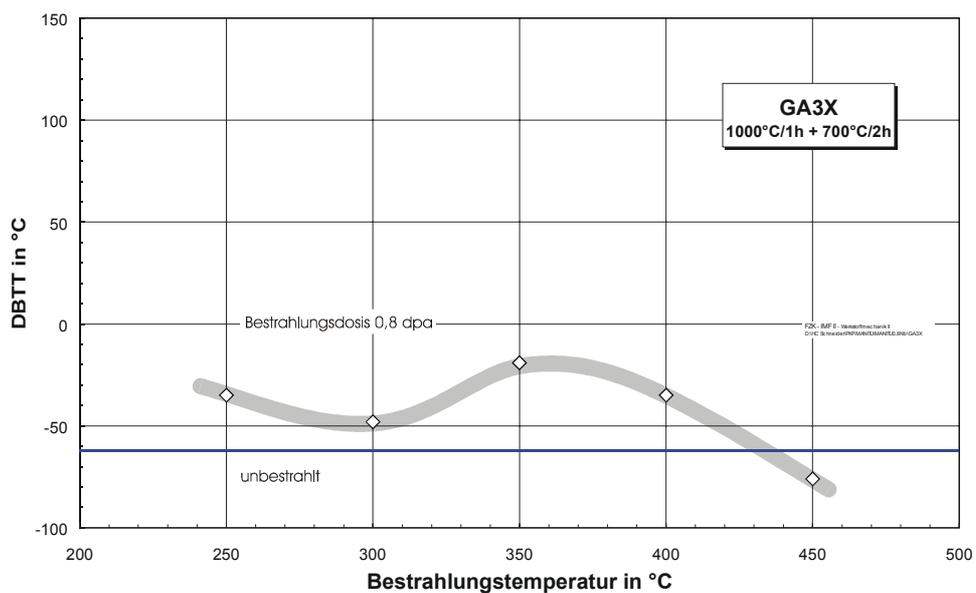
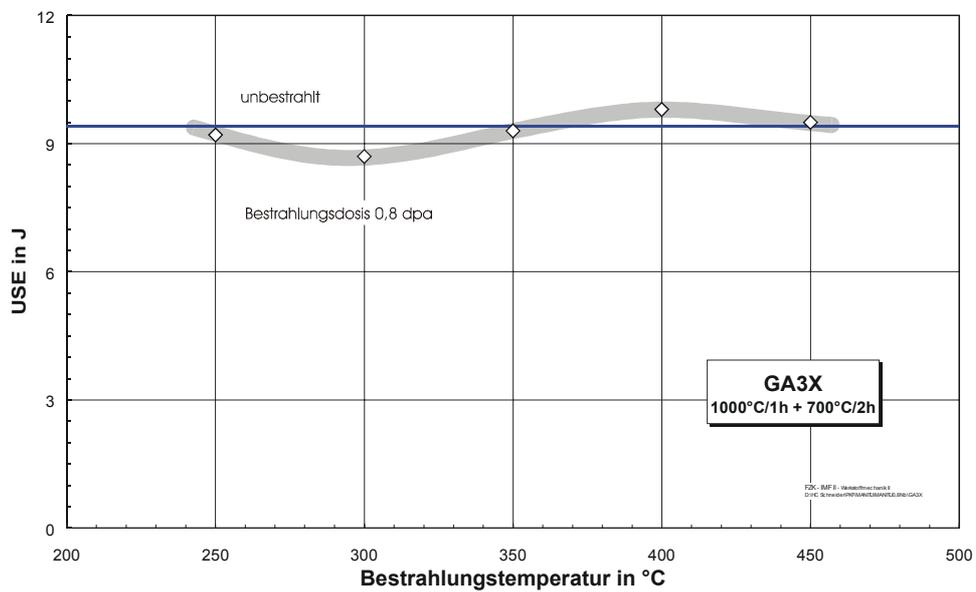


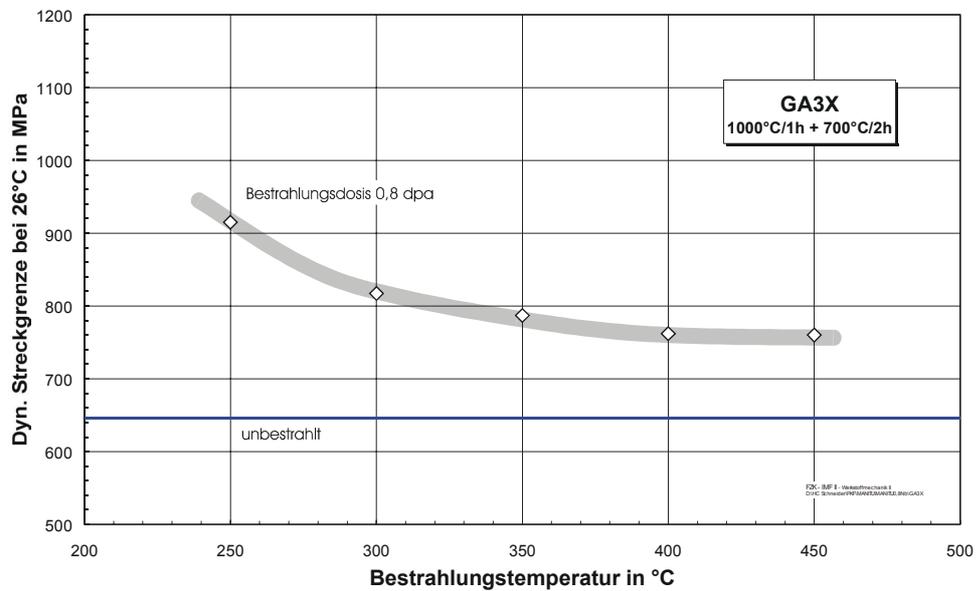
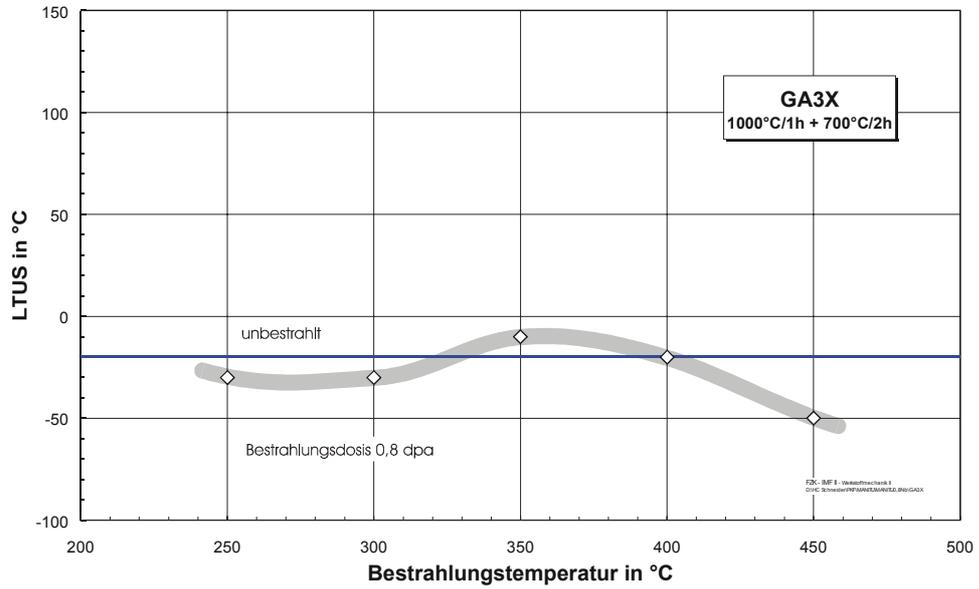


10.2.10 GA3X

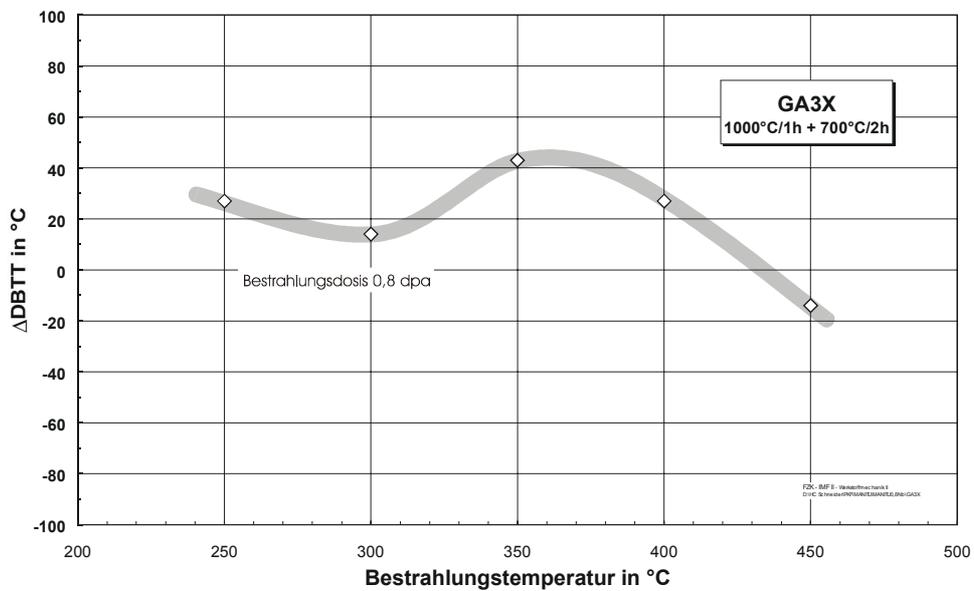
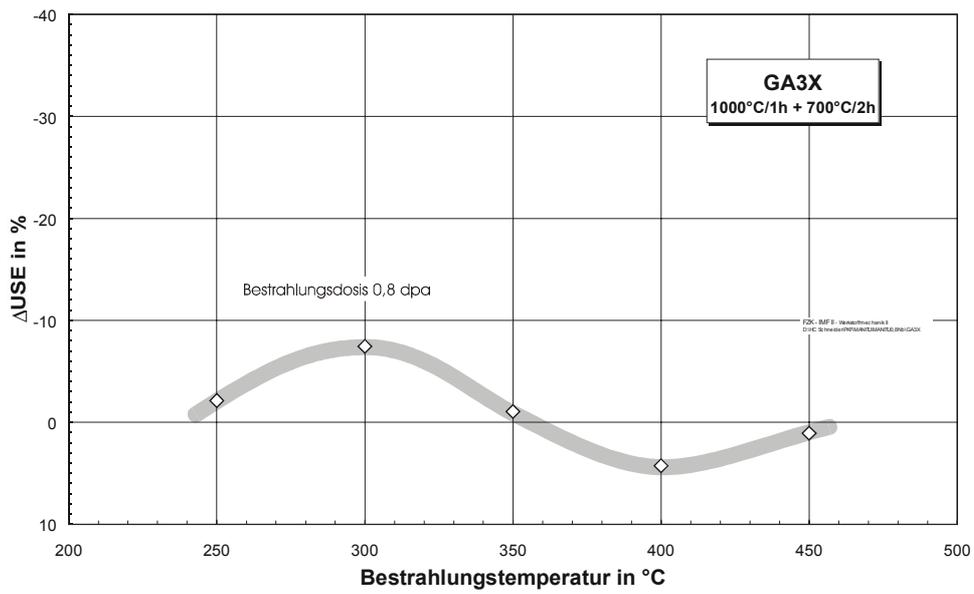
Bestrahlungsparameter	USE in J	DBTT in °C	LTUS in °C	$\sigma_{yd, 26^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	9,2	-35	-30	915
0,8 dpa / 300 °C	8,7	-48	-30	817 *)
0,8 dpa / 350 °C	9,3	-19	-10	787
0,8 dpa / 400 °C	9,8	-35	-20	762
0,8 dpa / 450 °C	9,5	-76	-50	760
Unbestrahlt	9,4	-62	-20	646

*) aus benachbarten Meßwerten interpoliert

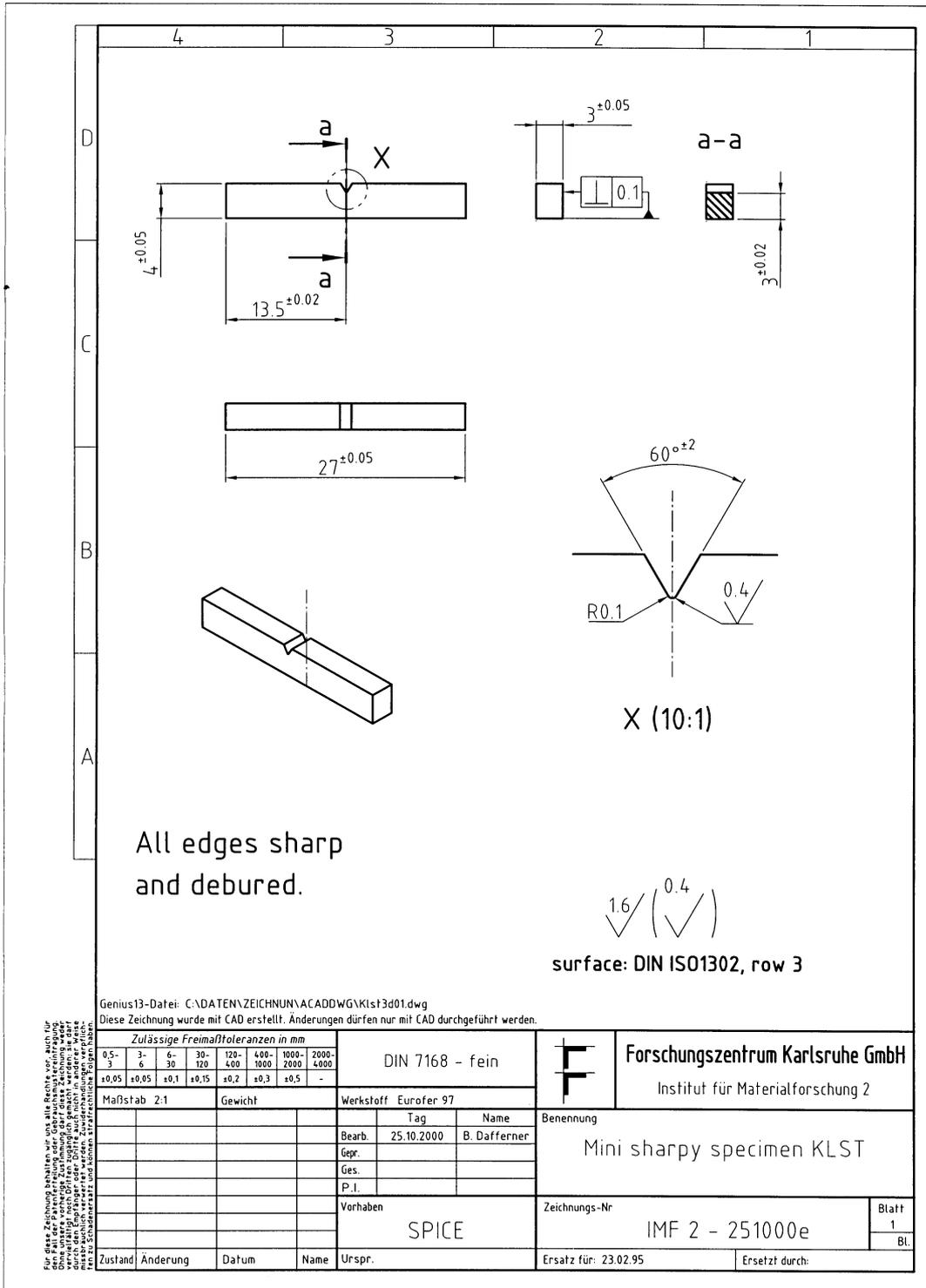




Bestrahlungsparameter	Δ USE in J	Δ DBTT in °C	Δ LTUS in °C	$\Delta\sigma_{yd, 26^\circ\text{C}}$ in MPa
0,8 dpa / 250 °C	-0,2	27	-10	269
0,8 dpa / 300 °C	-0,7	14	-10	171
0,8 dpa / 350 °C	-0,1	43	10	141
0,8 dpa / 400 °C	0,4	27	0	116
0,8 dpa / 450 °C	0,1	-14	-30	114



10.3 PROBENZEICHNUNG



10.4 CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Chemische Zusammensetzung der einzelnen Legierungen in Prozent

	K-Charge ¹	MANET I ²	MANET II ²	OPTIMAR ¹	OPTIFER Ia ¹	OPTIFER II ¹	OPTIFER IV ¹	F82H ²	ORNL ¹	GA3X ²
	51482	53645	50805	699	664	668	986489	std.	3791	
Cr	10,5	10,8	9,94	10,5	9,3	9,43	8,5	7,73	8,9	9,17
W					0,965	0,005	1,16	2,06	2,01	2,12
Ge						1,1	-			-
N	0,003	0,02	0,023	0,033	0,015	0,016	0,06	0,0027	0,0215	0,0018
C	0,17	0,14	0,1	0,11	0,1	0,125	0,11	0,092	0,11	0,159
Mn	0,64	0,76	0,79	1,22	0,5	0,5	0,6	0,083	0,44	0,042
Ta					0,066	ca. 0,02	0,15	0,018	0,06	0,011
P	0,005	0,005	<0,006	0,004	0,0047	0,004	0,004	0,003 ¹	0,015	
S	0,005	0,004	<0,007	0,003	0,005	0,002	0,004	0,003 ¹	0,008	
V	0,25	0,2	0,22	0,21	0,26	0,28	0,23	0,189	0,23	0,314
B	0,002	0,0085	0,007	0,0072	0,006	0,006	0,003	0,003 ¹	<0,001	
Si	0,31	0,37	0,14	0,31	0,06	0,038	-	0,09 ¹	0,21	
Ni	0,87	0,92	0,66	0,60	0,005	0,005		0,032	<0,01	0,021
Mo	0,56	0,77	0,59	0,63	0,005	0,005		0,0053	0,01	0,0077
Al	0,05	0,054	<0,02	0,014	0,008	0,008		0,01	0,017	0,015
Co	0,02	0,01	<0,02	0,003				0,0024	0,012	0,003
Cu	0,01	0,015	<0,01		0,035	0,007		0,0059	0,03	0,0017
Nb	0,2	0,16	0,14	0,21	0,009	0,009		0,0057		0,011
Zr		0,059	0,034						<0,001	
Ce					<0,001	<0,001	-			
Ti	0,007				0,007	0,007	< 0,02	0,0104	<0,01	0,001
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest

¹ Herstellerangabe

² IMF-Analyse