

SPANNUNGEN IN KUGELFÖRMIGEN Brennelementen eines HTR

K. EHLERS,

*Technische und physikalische Abteilungen,
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Mannheim, Germany*

ABSTRACT

This paper presents the analysis of the stresses in the spherical fuel elements of a helium cooled high temperature reactor during operation, which are generated by temperature gradients, irradiation induced shrinking of the graphite, nonsymmetrical heat generation and heat transfer conditions, and insertion of the control rods.

1. Einleitung

In den heliumgekühlten graphitmoderierten Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR-300 MWe sind bzw. werden kugelförmige Brennelemente aus Graphit, die Brennstoff in Form von beschichteten Uran-Thorium-Kernen enthalten, eingesetzt. Die Kugeln haben einen Brennstoffkern von 50 mm Durchmesser, der von einer 5 mm dicken brennstofffreien Schale mit gleichen Materialeigenschaften umgeben ist. Die Elemente werden kontinuierlich umgewälzt und durchlaufen den Reaktor mehrmals. Während des Betriebes bauen sich in den Elementen Spannungen über Temperaturgradienten, strahlungsinduziertes Schrumpfen des Graphits, ungleichmäßige Brennstoffverteilung und unsymmetrischer Wärmeübergang und Druckbelastungen beim Einfahren der Kontrollstäbe auf, die im einzelnen mit Hilfe verschiedener Rechenmodelle analysiert werden.

2. Wärme- und Wignerspannungen

2.1 Beschreibung des physikalischen und mathematischen Modells

Spannungen in einer isotropen, homogenen Kugel ergeben sich nur über radiale Temperaturgradienten, und zwar direkt wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung und indirekt über die Temperaturabhängigkeit der Dimensionsänderung des Graphits unter Bestrahlung mit schnellen Neutronen (s. Abb. 1).

Die rein thermischen Spannungen treten auf, wenn im Brennelement Wärme erzeugt wird und folgen jeder Leistungsänderung spontan. Die Wignerspannungen, welche durch dosis- und temperaturabhängige Dimensionsänderungen des Graphits entstehen, bauen sich bei den für Hochtemperaturreaktoren typischen Leistungsdichten relativ langsam auf. Auch eine plötzliche Erhöhung des schnellen Neutronenflusses verändert die Spannungen nicht direkt, es erhöht sich nur die Spannungsänderung pro Zeiteinheit.

Das Kriechen führt über längere Zeiten immer dazu, daß sich ein Gleichgewicht einstellt zwischen Spannungszunahme durch die Dosis schrumpfung des Graphits und Spannungsabnahme durch die Kriechdehnung. Dem überlagern sich die thermischen Spannungen, die sich schnell mit der Zeit ändern können und über längere Zeit betrachtet mit der Leistung, d. h. dem Abbrand des Elements, abnehmen. Zur Analyse dieser Spannungen wurde in Anlehnung an Scott und Prados $\sqrt{}$ ein Rechenmodell entwickelt, welches die Spannungen und Dehnungen im Brennelement in Zeitabhängigkeit berechnet. Dabei wird das Brennelement als Kugel mit konzentrischer kugelförmiger oder kugelschalenförmiger Brennstoffzone im Inneren behandelt. Für die Materialeigenschaften wird Isotropie vorausgesetzt, eine Annahme, die aufgrund der Herstellungsart dieser Elemente recht gut erfüllt ist. Folgende Eigenschaften des Graphites, die zu Spannungen in den Brennelementen führen, werden berücksichtigt:

- zeitliche Temperatur- und Dosisabhängigkeit des E-Moduls
- zeitliche Temperatur- und Dosisabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten
- Dimensionsänderung durch Bestrahlung mit schnellen Neutronen unter Berücksichtigung des Temperaturgradienten
- Kriechen im schnellen Neutronenfluß, was zu viskoelastischem Verhalten führt.

Für die verschiedenen Zonen können unterschiedliche Materialeigenschaften

angenommen werden.

Die Reaktorverhältnisse, insbesondere der mehrmalige Durchlauf der Brennelemente durch das Core, wird wie folgt simuliert:

Durch Vorgabe der der jeweiligen Durchlaufzone entsprechenden Neutronen- und Gastemperaturverhältnisse für jeden Zeitschritt berechnet sich das Programm aus dem Schwermetalleinsatz den Abbrand und damit die Leistung und schließlich die Temperaturverteilung. Nach jedem Durchlauf wird das Brennelement beim Verlassen des Cores von Gasaustrittstemperatur auf Gas-eintrittstemperatur abgekühlt. Durch Prüfung des Abbrandes wird entschieden, an welcher Stelle das Element erneut in den Reaktor eingegeben wird oder ob es ausgeschieden wird.

Zur mathematischen Beschreibung (in [2] für rein thermische Spannungen) des Modells dienen die viskoelastischen Gleichungen in Kugelgeometrie:

$$\begin{aligned} \epsilon_r - \left\{ \alpha (T - T_0) + \int_0^t \eta \Phi \, d\tau + C \int_0^t (\sigma_r - \sigma_t) \Phi \, d\tau \right\} \\ = \frac{1}{E} [\sigma_r - 2\nu \sigma_t] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_t - \left\{ \alpha (T - T_0) + \int_0^t \eta \Phi \, d\tau - \frac{C}{2} \int_0^t (\sigma_r - \sigma_t) \Phi \, d\tau \right\} \\ = \frac{1}{E} [(1 + \nu) \sigma_t - \nu \sigma_r] \end{aligned} \quad (2)$$

- | | |
|---|--|
| ϵ | - Dehnungen |
| σ | - Spannungen |
| ν | - Poisson-Zahl |
| E | - Elastizitätsmodul |
| $\alpha (T - T_0)$ | - thermische Ausdehnung |
| $\int_0^t \eta \Phi \, d\tau$ | - Dosis-Schrumpfung |
| $C \int_0^t (\sigma_r - \sigma_t) \Phi \, d\tau$ | - Kriechdehnung in radialer Richtung |
| $-\frac{C}{2} \int_0^t (\sigma_r - \sigma_t) \Phi \, d\tau$ | - Kriechdehnung in tangentialer Richtung |

Die Indices r und t stehen für radial bzw. tangential.

Die Kompatibilitätsbedingungen werden durch Einführung der radialen Ver-

schiebungen u erfüllt:

$$\epsilon_t = \frac{u}{r} \quad \epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (3a,b)$$

Die Gleichgewichtsbedingung für die isotrope Kugel lautet:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r} (\sigma_r - \sigma_t) = 0 \quad (4)$$

Dieses Gleichungssystem läßt sich unter der Annahme, daß E-Modul und Poisson-Zahl nicht von der Radialkoordinate r abhängen, exakt lösen. Sind diese Größen von r abhängig, muß auf numerische Lösungsverfahren zurückgegriffen werden.

2.2 Spannungsverlauf in Brennelementen eines Leistungsreaktors

Zur Analyse der Wigner- und Wärmespannungen wurden die in Tabelle 1 angegebenen Reaktordaten des THTR-Prototypkernkraftwerkes zugrundegelegt. In Tabelle 2 sind die benutzten Materialwerte zusammengestellt, und in den Abb. 1 bis 3 sind die Änderungen der Linearabmessungen, des E-Moduls und der thermischen Ausdehnung als Funktion der schnellen Neutronendosis für verschiedene Bestrahlungstemperaturen aufgetragen. Es wurden insgesamt 7 Durchläufe betrachtet, von denen 4 auf das Außencore und drei auf das Innencore entfallen. Die Durchlaufzeiten betragen 220 Tage bzw. 100 Tage.

Die maximale Kugelleistung liegt etwa bei 3 kW und wird während des ersten Durchlaufs erreicht.

Da die Leistungsgeschichte des Elementes und die Materialdaten wegen ihrer Dosisabhängigkeit relative komplexe Funktionen der Zeit sind, wird in Abb. 4 zur besseren Übersicht der Verlauf der Tangentialspannung an der Oberfläche für die Wärme- und die Wignerspannungen mit und ohne Berücksichtigung des Kriechens jeweils getrennt dargestellt. Kurve (1) zeigt den Verlauf der Wärmespannungen ohne Kriechen, sie folgen unmittelbar der jeweiligen Leistung des Brennelements und verschwinden während der Abschaltungen nahezu. (Die verbleibende Restspannung entspricht der Restwärmeleistung). Kurve (3) gibt die Wärmespannungen unter Berücksichtigung des Kriechens an. Aus der Differenz der Kurven (1) und (3) ist der durch Kriechen abgebaute thermische Spannungsanteil ablesbar. Er addiert sich in den Abschaltphasen mit umgekehrten Vorzeichen auf den jeweiligen Spannungswert der Kurve (1). Der Vergleich der Kurven (1) und (3) zeigt, daß sich bei Berücksichtigung des Kriechens im letzten Drittel der ersten Durchläufe eine Spannungsumkehr einstellt. Dies liegt darin begründet, daß die Spannungen durch die Wärmedehnungen erzwungen werden, die, wie man am Verlauf der Spannungen für den elastischen Fall erkennt, ein Maxi-

mum durchlaufen und danach abnehmen. Wird Kriechen mitberücksichtigt, so werden die den Dehnungen entsprechenden Zugspannungen im ersten Teil des Durchlaufes abgebaut. Danach verringern sich die Dehnungen weiter - verursacht durch die Abnahme der Leistung und damit der Temperaturdifferenzen - und bauen dadurch im letzten Drittel Druckspannungen auf.

Der Verlauf der Wignerspannung ist in Kurve (2) zunächst unter Vernachlässigung des Kriechens dargestellt. Im Bereich niedriger Fluenzen ($< 2 \cdot 10^{21}$ n/cm² EDN) hängt die Dimensionsänderung des Brennelementgraphites (s. Abb. 1) parabolisch von der Temperatur ab, d. h. bei Temperaturen kleiner als 500°C ergeben sich stärkere Änderungen als im Bereich zwischen 500 und 700°C, so daß im niedrigeren Temperaturniveau des oberen Reaktorcores die Außenzone des Elementes stärker als das heißere Kugelzentrum schrumpft. Im Zentrum entstehen Druckspannungen, während sich in der Außenzone Zugspannungen aufbauen. Mit ansteigendem Temperaturniveau drehen sich dann während des ersten Durchlaufes die Schrumpfungsverhältnisse über dem Radius um und die Zugspannungen an der Oberfläche nehmen ab. Mit zunehmender Fluenz nehmen die Schrumpfraten mit der Temperatur zu, so daß die Schrumpfung im Zentrum am größten ist und sich dann an der Oberfläche Druckspannungen aufbauen. Kurve (4) zeigt schließlich die Wignerspannungen unter Berücksichtigung des Kriechens, das zu einem Abbau der Spannungen und zu einer Umkehr des Vorzeichens wie bei den thermischen Spannungen führt. Während der Abschaltphasen bleiben die Wignerspannungen konstant.

Eine Überlagerung der Kurven (3) und (4) ergibt dann den effektiven Verlauf der Tangentialspannung, wie er für den 1., 2. und letzten Durchlauf in Abb. 5 für den Kugelmittelpunkt, die Begrenzung der Brennstoffzone und die Kugeloberfläche dargestellt ist. An der Kugeloberfläche treten die größten Zugspannungen während des ersten Durchlaufs im oberen Drittel des Cores auf. Sie liegen bei 50 kp/cm². Im weiteren Verlauf wechseln die örtlichen Kugelspannungen das Vorzeichen. Nicht kritisch sind die während der Reaktorabschaltungen auftretenden Spannungen. Wegen der axialen Unsymmetrie der Leistungsverteilung ergeben sich Sprünge zwischen den Spannungszuständen am Ende und Beginn zweier aufeinanderfolgender Durchläufe.

3. Ungleichmäßige Brennstoffverteilung und unsymmetrische Wärmeübergangsverhältnisse

3.1 Beschreibung des physikalischen und mathematischen Modells

Aufgrund von Sedimentationseffekten bei der Herstellung der Brennelemente können gewisse ungleichmäßige Verteilungen des Brennstoffes, die zu zusätzlichen Temperaturgradienten und Spannungen im Element führen nicht

ausgeschlossen werden. Desgleichen sind lokale Schwankungen der Wärmeübergangszahl an den Brennelementen nach [3] in Abhängigkeit von der Anströmrichtung und der Reynoldszahl zu berücksichtigen. Auch hier treten die gleichen Effekte wie oben beschrieben auf.

Zur Berechnung der aus diesen Temperaturgradienten resultierenden Spannungen wurde das Finite-Element Programm FEATS [4] benutzt, welches die Behandlung rotationssymmetrischer, elastischer Aufgaben mit temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften bei Aufbringung äußerer Lasten erlaubt.

Bedingt durch das Kugelfließen verändern sich die Unsymmetrien des Wärmeüberganges am Brennelement ständig, so daß die Behandlung mit einem rein elastischen Modell gerechtfertigt ist. Die Abschätzung der Spannungen aufgrund der ungleichmäßigen Brennstoffverteilung mit einem elastischen Modell führt zu leicht pessimistischen Aussagen.

3.2 Ungleichmäßige Brennstoffverteilung

Für die Rechnungen wurden die Materialdaten aus Tabelle 2 benutzt, die Leistung der Kugel wurde zu 3,2 kW, die Gasttemperatur mit 796°C und die Wärmeübergangszahl zu $\alpha_0 = 0.0665 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec grad}$ angesetzt, damit ergibt sich bei gleichmäßiger Brennstoffverteilung eine Oberflächentemperatur von 897°C. Bezüglich der Brennstoffverteilung wurde angenommen, daß in der einen Hälfte 70 % des Brennstoffes konzentriert sind, während die andere Hälfte 30 % enthält. (Die in der Praxis gefundenen Abweichungen sind kleiner als 20 %). Unter diesen extremen Bedingungen erhöht sich die Zugspannung von 46 kp/cm² bei gleichmäßiger Verteilung auf 58 kp/cm². Orientiert man sich an den in der Praxis gefundenen Werten für die Brennstoffverteilung, so sind die daraus resultierenden Erhöhungen der Spannungen ohne Bedeutung.

3.3 Unsymmetrische Wärmeübergangsverhältnisse

Entsprechend den Ergebnissen in [3] wurde die Wärmeübergangszahl für die eine Kugelhälfte auf $\alpha = 0.85 \alpha_0$ reduziert und für die andere Hälfte auf $\alpha = 1.15 \alpha_0$ erhöht. Damit ergibt sich über die Oberfläche des Elementes ein Temperaturunterschied von 60°C und die Zugspannung erhöht sich von 46 kp/cm² bei gleichmäßiger Verteilung auf 56 kp/cm².

Kombiniert man beide Fälle und zwar so, daß die Zone höchster Brennstoffkonzentration mit der der kleineren Wärmeübergangszahl zusammenfällt, so ergeben sich die in Abb. 6 gezeigten Temperatur- und Spannungsvorläufe. In diesem Fall beträgt die dadurch bedingte Spannungserhöhung 16 kp/cm².

4. Äußere Belastungen

Neben der Belastung durch den Kugelhaufen selbst erfahren die Brennelemente Beanspruchungen durch die direkt in das Core einfahrenden Abschaltstäbe. Die dabei auftretenden Kräfte hängen ab von der Eintauchtiefe und der Art des Stoßes und überschreiten im Mittel 800 kp nicht. Zur Berechnung der Spannungsverteilung wird wieder das unter 3.1 skizzierte Programm FEATS [4] herangezogen.

Abb. 7 zeigt die Verteilung der größten Hauptspannung in der Kugel für eine Belastung mit Einzellasten von 1000 kp an den Polen. An der Kugeloberfläche treten in der Nähe der Lasteinleitungsstelle lokale Spannungsspitzen auf, die die im Zugversuch gemessene Festigkeit des Werkstoffes überschreiten. Zerdrückversuche, bei denen die Kugeln zwischen parallelen Platten belastet wurden, ergaben jedoch, daß die Kugeln Lasten größer 2000 kp standhalten und schließlich dadurch zerstört werden, daß sie in der Mitte durchbrechen, nachdem sie an den Lasteinleitungsstellen Abplattungen und einen ausgeprägten Schubkeil zeigen.

Abb. 8, in dem die Last von 1000 kp über einen kreisförmigen Bereich um die Kugel verteilt wurde, zeigt, daß zwar mit zunehmender Abplattung der Kugel die Spannungsspitzen in der Nähe der Lasteinleitungsstellen erhalten bleiben, daß aber zusätzlich im Kugelinneren Zugspannungen auftreten, die den beobachteten Bruchmechanismus hervorrufen können.

Es kann damit geschlossen werden, daß nicht die an der Kugeloberfläche auftretenden Zugspannungen für die Festigkeit der Kugel maßgebend sind, (sie werden evtl. durch Auftreten kleiner Risse abgebaut) sondern daß die Kugeln durch die im Inneren sich mit zunehmender Abplattung aufbauenden Zugspannungen zerstört werden. Die hierfür notwendigen Kräfte sind wesentlich größer als die durch Einfahren der Kontrollstäbe auftretenden Lasten.

5. Diskussion der Ergebnisse

Zur Abschätzung der in den Brennelementen maximal auftretenden Spannungen sind Einzelbelastungen aus Wärme- und Wignerspannungen, ungleichmäßiger Brennstoffverteilung, unsymmetrischer Wärmeübergangsverhältnisse und äußeren Lasten sinnvoll zu überlagern.

Die im normalen Leistungsbetrieb zu erwartenden maximalen Spannungen ergeben sich durch Überlagerung der Wärme- und Wignerspannungen gemäß Abschnitt 2 und der nach 3.1 und 3.2 durch ungleichmäßige Brennstoffverteilung

lung und unsymmetrische Wärmeübergangsverhältnisse bedingten Spannungen. Sie betragen maximal 66 kp/cm^2 und liegen damit weit unterhalb der für das einzusetzende Material typischen Zugspannungswerte von 120 kp/cm^2 , welche nach Bestrahlung sogar auf ca. 150 kp/cm^2 ansteigen.

Die maximalen äußeren Belastungen durch die direkt einfahrenden Abschaltstäbe treten nur im leistungslosen Reaktor auf, so daß bei der Ermittlung der Gesamtspannungen nur die Wignerspannungen zu berücksichtigen sind. Die rechnerisch ermittelte Spannungsverteilung nach Abb. 8 läßt - in Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen - den Schluß zu, daß beim Aufbringen äußerer Lasten die Brennelemente durch sich im Inneren über Schubkräfte aufbauende Zugspannungen zerstört werden. Andererseits entstehen aufgrund der Wignerspannungen im Inneren der Elemente während der ersten Durchläufe (gegen Ende der Lebensdauer der Elemente sind die Wignerspannungen über Kriechen nahezu völlig abgebaut) Druckspannungen (vgl. Abb. 4), so daß die bruchauslösenden Zugspannungen in gewissem Umfang kompensiert werden. Für die Beurteilung des Bruchverhaltens der Brennelemente durch die Abschaltstäbe ist es also hinreichend, sich auf Bruchfestigkeitsuntersuchungen unbestrahlter Brennelemente zu konzentrieren.

Literatur

- 1 J.W. Prados, J.L. Scott, "Analysis of Stress and Strain in Spherical Shells of Pyrolytic Carbon", ORNL 3553 (June 1964)
- 2 S. Timoshenko, N.J. Goodier, "Theory of Elasticity", Mc Graw Hill 1951
- 3 J.M. Rhodes, F.N. Peebles, "Total Rates of Mass Transfer from Sheres in Ordered Arrays", A.I.Ch.E. Journal 1965, Vol. 11, No. 3
- 4 J.A. Swanson, "FEATS, A Computer Program for the Finite Element Thermal Stress Analysis", Westinghouse Astronuclear Laboratory WANL - TME - 1888

Tabelle 1

Reaktordaten

mittlere Leistungsdichte	6 MW/m ³
Gaseintrittstemperatur	262°C
Kühlmittel	He
mittlerer Kühlmitteldruck	40 b
mittlere Gasaustrittstemperatur	750°C
U-235-Gehalt	0.96 g/Brennelement
Th-Gehalt	9.62 g/Brennelement
Anreicherung	0.93
mittlere Verweilzeit	3 Jahre
mittlere schnelle Dosis	2,8 · 10 ²¹ n/cm ² (EDN)
maximale Leistung pro Kugel	3,2 kW
mittlerer Abbrand (fima)	0,12
mittlere Zahl der Durchläufe	6
Durchmesser des Brennelementes	60 mm
Durchmesser der Brennstoffzone	50 mm

Tabelle 2

Materialdaten

E-Modul	0,8 · 10 ⁵ kp/cm ²
Poisson-Zahl	0.2
Kriechkonstante	4 · 10 ⁻²⁶ (kp/cm ²) ⁻¹ (n/cm ²) ⁻¹
thermische Ausdehnung	0,30 · 10 ⁻⁵ 1/°C
thermische Leitfähigkeit (bestrahlt)	0.06 cal/°C cm sec

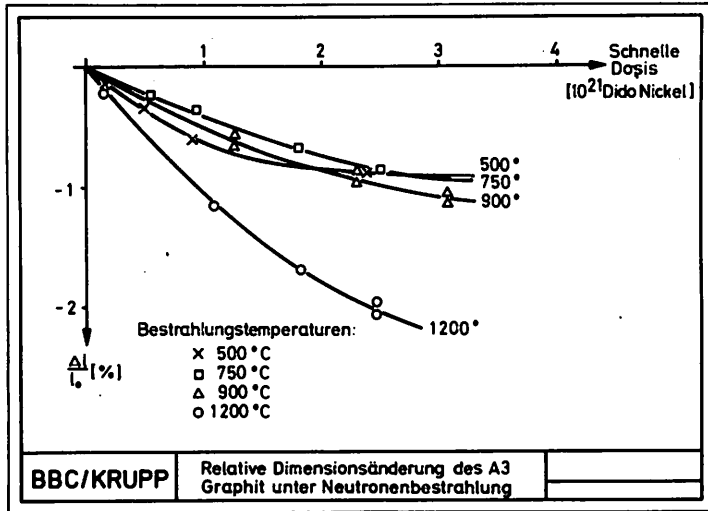


Abb. 1:

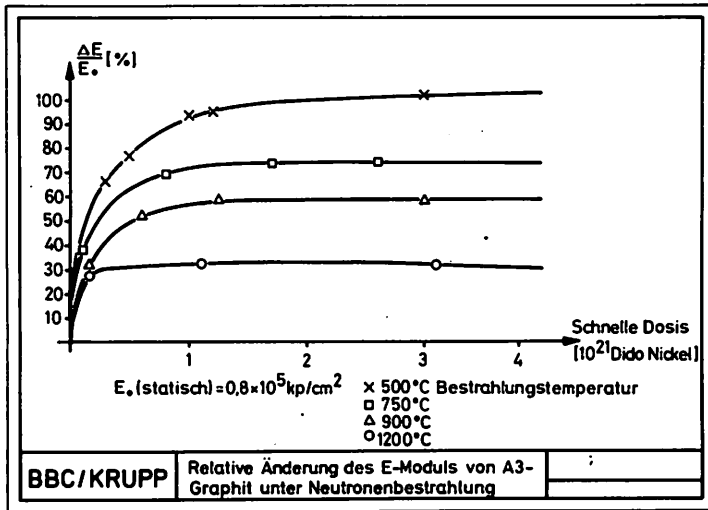


Abb. 2:

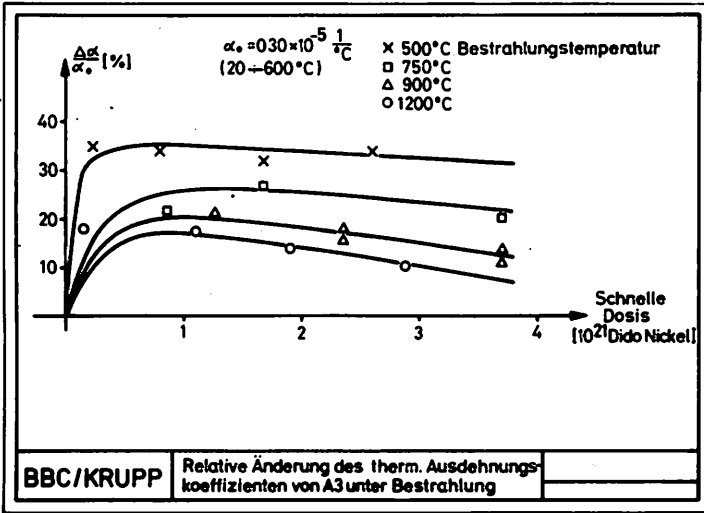


Abb. 3:

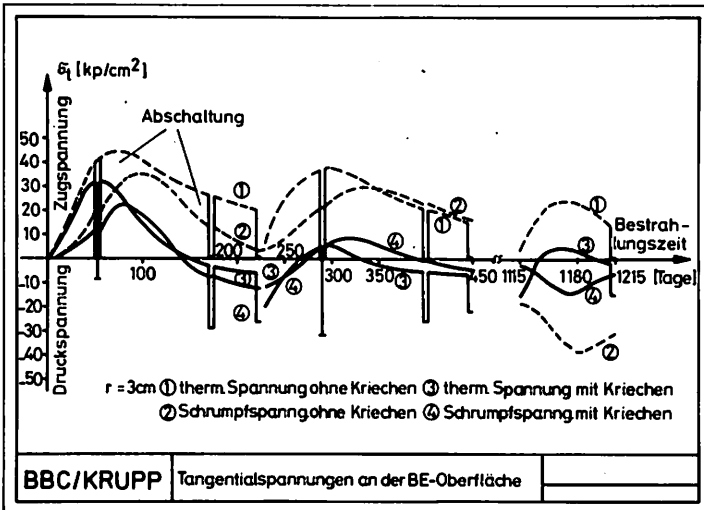


Abb. 4:

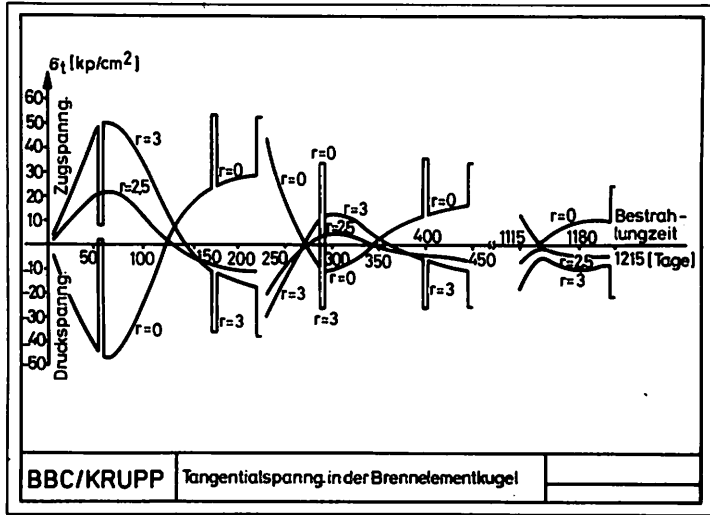


Abb. 5:

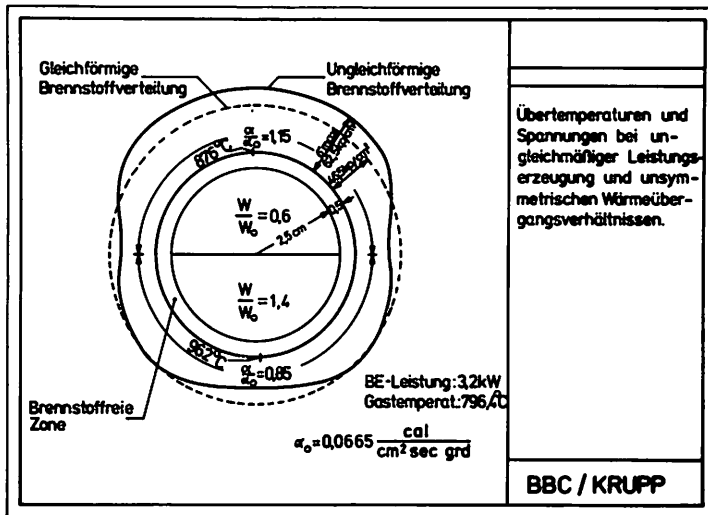


Abb. 6:

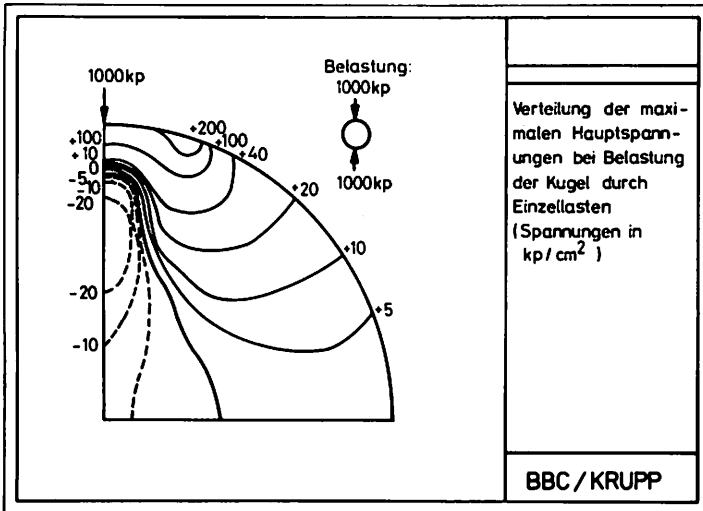


Abb. 7:

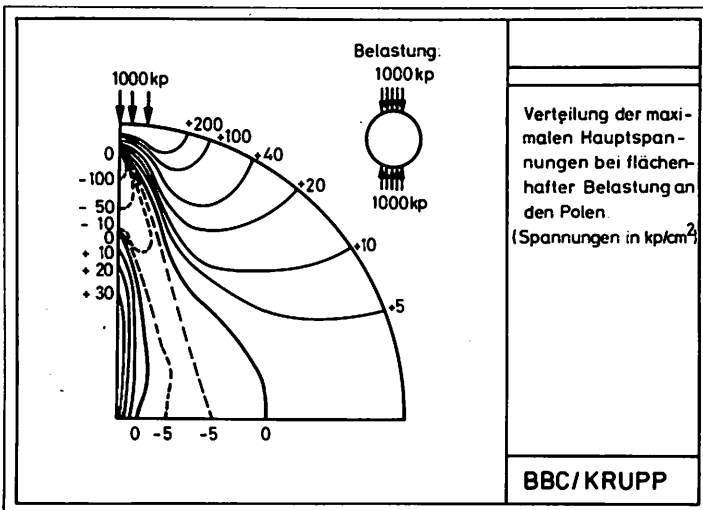


Abb. 8:

DISCUSSION

R. HAUSERMANN, Switzerland

Q

How did you account for the rotation of the sphere while it travels through the core ? I think that the heat transfer will vary. Particularly, since a sphere passes the core more than once.

K. EHLERS, Germany

A

Graphite has, compared to other ceramics, a very high thermal conductivity. Therefore, non-uniformities of the heat transfer coefficient will not result in temperature peaks.

Furthermore, due to the rotating the temperature peaks are moving over the sphere, which can be considered as a favorable effect.

V. LUNGAGNANI, JRC Petten, The Netherlands

Q

Did you consider in your calculations the case of anisotropy ?

K. EHLERS, Germany

A

We did not consider the case of anisotropy because the used material is rather isotropic. Irradiation tests have shown that for irradiation doses higher than $4.5 \cdot 10^{21}$ (EDN) the highest and smallest shrinkage values are 1.8% and 1.5%, respectively.