

**ABRIEB-BEANSPRUCHUNG AM
REFLEKTOR EINES KUGELHAUFENREAKTORS
(ABRASION LOAD ON THE REFLECTOR OF A
PEBBLE BED REACTOR)**

C. ELTER

Technischer Überwachungsverein Baden, D-6800 Mannheim, Germany

N. MATENTZOGU

Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, D-5000 Köln, Germany

SUMMARY

The pebble filling of a pebble bed reactor is pressed on the reflector by the following:

- a) its dead-weight,
- b) pressure differences of the cooling gas in the core, and
- c) the additional larger pressures resulting from bringing the core control rods into the pebble bed.

During the exchange of pebbles in the reactor core the pebbles slide with force acting against the reflector over the planes and joints of the graphite blocks, over the edges of the disorder trays, and over the cooling gas holes of the core bottom blocks.

The varying forces by which the pebbles are pressed on the reflector cause a local stress due to the contact pressure and to the shearing by movement of the pebble bed during the exchange of pebbles. Moreover, the edges of the reflector blocks are loaded by shearing.

Based on theoretical considerations the geometric relations are presented. They are used to design the reflector surface by which the load at the reflector planes and edges is within the allowable range.

To determine the abrasion effects between the pebble bed and the reflector a pilot stand was erected. It is reported, how it is possible to adjust the abrasive effect in relation to the reactor's operation age.

In order to determine the abrasion as realistic as possible it is required to create a number of conditions as they exist in the reactor. The most important of them are:

- a) the extent of forces between the single pebble and the reflector;
- b) the number of load cycles of a surface element;
- c) the friction factor;
- d) the elements of which the reflector surface exists.

On the basis of the theoretical considerations about the structure of the reflector surface and the test results it becomes possible to design the reflector in such a way that it will remain capable for function during the required operation time.

EINLEITUNG

Die Kugelfüllung eines Kugelhaufenreaktors (Abb. 1) wird durch ihr Eigengewicht, verstärkt durch den Druckabfall des Kühlgases im Core und die zusätzlich größeren Drücke, die beim Einfahren der Corestäbe in den Kugelhaufen entstehen, auf den Reflektor [1], [2].

Bei der Umwälzung der Kugeln im Reaktorcore eines Kugelhaufenreaktors rutschen die Kugeln unter Anpreßkraft, herrührend von ihrem Eigengewicht und dem Druckabfall des Kühlgases im Core, an den Flächen und Trennfugen der Graphitsteine, an den Kanten der Störmulden und an den Löchern der Bodensteine des Cores vorbei.

Die unterschiedlichen hohen Einzelkräfte, mit denen die Kugeln auf den Reflektor drücken, beanspruchen ihn örtlich durch Flächenpressung (Hertz'sche Pressung) und Schub durch die Bewegung des Kugelhaufens beim Kugelabziehen. Außerdem werden die Kanten der einzelnen der Reflektorsteine auf Abscheren beansprucht.

Die von den Kugeln berührte Oberfläche des Reflektors wird dabei so ausgebildet, daß

- 1) die Kugeln keine Kanten und Ecken berühren können. Die Berührungspunkte der Kugeln haben dabei einen bestimmten Abstand von den Kanten und Ecken, damit die Schubbeanspruchung, die zum Abbrechen der Kanten führen kann, im zulässigen Bereich bleibt.
- 2) Nicht vermeidbare Kanten werden abgerundet, um die Hertz'schen Pressungen und die örtlichen Schubbeanspruchungen durch die Reibungskraft möglichst klein zu halten.

Bei der Auslegung der Reflektoroberfläche müssen außer der Größe der auftretenden Kräfte, folgende Veränderungen der Reflektoroberfläche im Laufe des Reaktorbetriebes berücksichtigt werden:

- 1) Durch Wigner-Schrumpfen im Oberflächenbereich des Graphitreflektors entstehen zwischen zwei benachbarten Graphitblöcken je nach örtlicher Dosis Spalte, die einige cm in den Reflektor reichen [3].
- 2) Die durch Korrosion bedingte Oberflächenabtragung wirkt vergrößern auf die Trennfugen und Kühlgasbohrungen.
- 3) Durch Abrieb der auf der Reflektoroberfläche vorbeirutschenden Brennelementkugeln wird ebenfalls die Geometrie an den Trennfugen und Kühlgasbohrungen verändert, wodurch der Abstand der Brennelementkugel von der Kante kleiner wird.

GEOMETRISCHE BEZIEHUNGEN ZUR AUSLEGUNG DER REFLEKTORBERFLÄCHE

In Abb. 2 sind Abmessungen und Winkel dargestellt, die bei der Ausbildung der Kanten eine Rolle spielen. Bei der Abtragung der Oberfläche um das Maß s_A verändern sich die Abstände der Kraftangriffspunkte A_0 und A_1 von der Kante zu A_{0A} und A_{1A} , wobei die Änderung dieser Größen außer durch den Abrundungsradius r und den anfänglichen Berührungswinkel auch durch den Anfaswinkel beeinflußt werden kann.

Bei zunehmendem Abrieb wandert der Berührungspunkt auf dem Bogen des Radius r zur Kante hin. Würde der Anfaswinkel gleich dem anfänglichen Berührungswinkel gewählt werden, so würde der Berührungspunkt bei zunehmendem Abrieb auf der angeschrägten Ebene schneller zur Kante hin wandern, so daß der minimal zulässige Kantenabstand eher erreicht wird. Würde der Abrundungsradius bis zur Kante hin durchgezogen werden, so bewegt sich der Berührungspunkt zwar langsamer zur Kante hin, bei dem maximal zu berücksichtigenden Abrieb bleibt jedoch weniger Material an der Kante stehen, was wiederum aus Festigkeitsgründen nicht erwünscht ist.

Als optimale Auslegung wird daher die angesehen, die ab dem bei maximalem Abrieb zu erwartenden Berührungspunkt die Anfasung gerade (und nicht bogenförmig) unter dem Winkel zur Kante hin führt.

Für die geometrische Veränderung der Reflektoroberfläche werden drei Annahmen gemacht, die durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden müssen.

- 1) Der Abrieb auf der ebenen Fläche ist s_{AF} . Dem entspricht ein Abrieb im Spalt von s_{AT} , wobei $s_{AF} = s_{AT} = s_A$ ist.
- 2) Bei einer Kante, die durch Abrieb entstanden ist, ist die Neigung der Berührungsebene an der vordersten Stelle des Graphitblockes identisch mit der Neigung der Tangente in Abb. 2 unter dem Winkel α_A der an dieser Stelle berührenden Kugel.

Die Kugel befindet sich dabei genau im Spalt, d.h. sie berührt beide Kanten.

- 3) Der Übergang der durch den Abrieb ausgebildeten Kante in die Reflektorebene wird durch den Radius r_A gebildet.

Daraus ergeben sich die allgemeinen geometrischen Beziehungen mit denen dann die speziellen Fälle für die einzelnen Oberflächenelemente des Reflektors mit und ohne Berücksichtigung des Abriebs abgeleitet werden können:

$$\frac{c + \frac{3}{2}}{\cos \gamma} = (R + r) \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

$$(R + r) \cdot \sin \alpha = R \cdot \sin \alpha_A + r \cdot \sin \delta \quad (2)$$

$$(R + r) \cdot \cos \alpha - r + \tau_A + s_{AF} = (R + \tau_A) \cdot \cos \alpha_A + s_{AT} \quad (3)$$

$$r(1 - \cos \delta) = \tau_A (1 - \cos \alpha_A) + s_{AF} \quad (4)$$

$$c = A_{oA} \frac{\cos(\delta - \gamma)}{\cos \delta} + r \cdot \sin(\delta - \gamma) \quad (5)$$

$$c = A_{oA} \frac{\cos(\delta + \gamma)}{\cos \delta} + r \cdot \sin(\delta + \gamma) \quad (6)$$

Aus den Gleichungen (1) bis (6) erhält man die implizite Funktion von r und δ

$$R^2 - \left[A_{oA} \frac{\cos(\delta - \gamma)}{\cos \delta} + \frac{3}{2} + r \sin(\delta - \gamma) - r \sin \delta \right]^2 = \left\{ \sqrt{(R + r)^2 - \left[A_{oA} \frac{\cos(\delta - \gamma)}{\cos \delta} + \frac{3}{2} + r \sin(\delta - \gamma) \right]^2} - r \cos \delta - s_{AT} \right\}^2 \quad (7)$$

$$R^2 - \left[A_{oA} \frac{\cos(\delta + \gamma)}{\cos \delta} + \frac{3}{2} + r \sin(\delta + \gamma) - r \sin \delta \right]^2 = \left\{ \sqrt{(R + r)^2 - \left[A_{oA} \frac{\cos(\delta + \gamma)}{\cos \delta} + \frac{3}{2} + r \sin(\delta + \gamma) \right]^2} - r \cos \delta - s_{AT} \right\}^2 \quad (8)$$

Bei konkreten Anwendungen wird meist das Platzangebot eine zusätzliche Bedingung bringen, so daß die Kantenabmessungen unter Berücksichtigung der zulässigen Beanspruchungen feststehen.

Die Einsinktiefen der Brennelementkugel an der Trennfuge ist

$$h_A = (R + \tau_A)(1 - \cos \alpha_A) \quad (9)$$

Der Radius R liegt durch die gewählte Größe der Brennelementkugel fest. Der Neigungswinkel γ des Corebodens wurde durch Ermittlung des günstigsten Trichterwinkels gefunden [4].

Der Spalt zwischen zwei Graphitblöcken ist im Montagezustand annähernd gleich Null und erweitert sich erst im Laufe des Betriebes mit zunehmender Lebenszeit des Reaktors, wobei die Spaltanteile s_w durch Wigner-Schrumpfung und s_K durch Korrosion entstehen.

$$s = s_w + s_K \quad (10)$$

Die Anteile des Gesamtspaltes am Ende der Lebensdauer des Reaktors können durch Berechnungen bei der Auslegung eines Reaktors genügend genau bestimmt werden [3], [5].

Für die Untersuchungen an den Kühlgasbohrungen gilt im Prinzip dasselbe, es ist nur die Spaltgröße s mit dem Durchmesser der Kühlgasbohrungen d_z zu vertauschen und die längliche Ansenkung zu beachten.

Die Gestaltfestigkeit der Kanten bzw. der zulässige Kantenabstand A des Mittelpunktes des Kraftangriffes der Brennelementkugel von der Kante wird als bekannt angenommen.

Der Oberflächenabrieb s_{AF} war Ziel der durchgeführten Versuche und ist daher zunächst noch nicht bekannt. Seine Größe kann mit dem im weiteren beschriebenen Versuchsstand bestimmt werden.

ABSCHÄTZUNG DER ANZAHL DER LASTWECHSEL

Die Zahl der Lastwechsel pro Oberflächenelement des Reflektors kann für die Belastung durch Eigengewicht und Kühlgasdruckabfall abgeschätzt werden, um bei den folgenden Versuchen einen Richtwert für die während der Lebensdauer des Reaktors auftretenden Belastungen zu haben.

Die Lastwechselzahl auf einem Flächenelement des Reflektors beträgt

$$N_{FE} = \frac{\sqrt{3} \cdot \lambda \cdot V_c \cdot T_L}{2\pi \cdot T_A \cdot R \cdot R_c^2} \left[F_r + \frac{(F_w + F_r)(f_r - f_w)}{(f_r - f_w)} \right] \cdot \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot (1 - \nu) \cdot R \cdot \rho}{E}} \quad (11)$$

bei Annahme einer über dem Corequerschnitt konstanten Fließgeschwindigkeit.

Es ist dabei

λ	=	Lastfaktor
V_c	=	Kugelfüllung eines Reaktorcores
T_L	=	Lenendauer des Reaktors
T_A	=	Austauschzeit einer Kugelfüllung
R	=	Radius einer Brennelementkugel
R_c	=	Radius des Reaktorcores
F_T	=	Mittl. Reflektoroberflächenanteil 1 Kugel bei Tetraederpackung
F_W	=	Mittl. Reflektoroberflächenanteil 1 Kugel bei Würfelpackung
f_R	=	Füllungsfaktor der Kugelpackung im Reaktorcore
f_W	=	Füllungsfaktor bei Würfelpackung
f_T	=	Füllungsfaktor bei Tetraederpackung
ν, E	=	Poisson'sche Querszahl und E-Modul von Graphit
P	=	Auf die Reflektoroberfläche wirkende Kraft einer Brennelementkugel

Unter Berücksichtigung eines experimentell bestimmten Geschwindigkeitsprofils mit dem Faktor

$$f_v = \frac{\text{rechnerisch ermittelte Geschwindigkeit}}{\text{experimentell ermittelte Geschwindigkeit}}$$

beträgt die näher an der Wirklichkeit liegende Lastwechselzahl

$$N_{FER} = \frac{N_{FE}}{f_v} \quad (12)$$

Bei der Anwendung der Formel (12) ist folgendes zu beachten:

- 1) Der E-Modul des Reflektors verändert sich mit steigender Bestrahlungsdosis zu den höheren Werten, während der E-Modul der Brennelementkugeln infolge ihrer geringeren Durchlaufzeit nicht in gleichem Maße wächst. Durch die dadurch auftretende Verkleinerung der Berührungsfläche wird die Zahl der Druckschwellbeanspruchungen pro Flächenelement der Reflektoroberfläche abnehmen. Zum Verständnis sei hier darauf verwiesen, daß dabei selbstverständlich andererseits die Druckkraft auf das Flächenelement zunimmt. *Als E-Modul ist daher ein Mittelwert einzusetzen.*
- 2) Die Einzelkräfte zwischen einer Brennelementkugel und dem Reflektor sind nicht konstant, sondern wirken nach einer statistischen Verteilung als Kraftspektrum auf den Reflektor (s. Abb. 3).
- 3) Wie in [4] ermittelt wurde, ist die Geschwindigkeit unmittelbar auf dem Reflektor geringer, wodurch die Anzahl der Lastwechsel auf die Reaktoroberfläche verringert wird, deshalb ist f_v eingeführt worden.
- 4) Die Auflockerungswirkung in der Nähe des Kugelabzugsrohres, die wegen der geringeren Kräfte zu kleineren Berührungsflächen und damit zu kleineren Lastwechselzahlen führt, wird vernachlässigt.
- 5) Es muß anhand anderer Versuchsergebnisse noch überprüft werden, inwieweit die nach den Hertz'schen Formeln berechneten Berührungsdurchmesser bzw. Berührungsbreiten mit den gemessenen übereinstimmen.

Die Gleichung (12) wird am Beispiel des THTR-300 MWe-Prototyps und dessen Zahlenwerten in Abb. 4 dargestellt.

VERSUCHSANLAGE ZUR ERPROBUNG VON BAUTEILEN UNTER ANGENÄHERTEN BETRIEBSBEDINGUNGEN

In der Versuchsanlage, die speziell für diese Versuche konstruiert wurde, können die Betriebsbedingungen simuliert werden, die für die Beanspruchung des Graphits der Reflektoroberfläche durch die Brennelementkugeln maßgebend sind. Siehe Abb. 5.

Die wichtigste der Bedingungen ist die Erzeugung des Reibungsfaktors bei Betriebstemperatur und Heliumatmosphäre bestimmter Zusammensetzung.

Ferner muß die Anpreßkraft der Brennelementkugeln [6], eine vergleichbare Reflektoroberfläche und die Art der Rutschbewegung simuliert werden (s. Abb. 6).

Die Versuchsanlage besteht im wesentlichen aus einer Drehscheibe (Pos. 8) auf der sich ein nach bestimmten Gesichtspunkten ausgebildetes Versuchsstück - der sog. Testring - befindet (Pos. 20).

Auf den sich drehenden Testring werden mit 18 Stempeln (Pos. 2) Graphitkugeln mit einstellbarer Kraft angedrückt. Die Stempel mit den Graphitkugeln sind tangential in gleichen Abständen, radial in verschiedenen Abständen, vom Mittelpunkt der Drehscheibe angeordnet, und bestreichen den Testring gleichmäßig auf einer Breite von 23 mm. Der Abstand zwischen den einzelnen Kugelbahnen beträgt 1,35 mm.

Da die berührende Fläche von der Kraft abhängig ist, mit der die Kugel auf die Graphitoberfläche gedrückt wird, ergeben sich für eine bestimmte Stelle auf der Oberfläche unterschiedliche Anpreßdrücke und Lastwechselzahlen, was bei der Auswertung der Versuchsergebnisse zu beachten ist. Damit die Kugeln nicht mit derselben Stelle auf dem Graphit schleifen, befindet sich an einer Stelle des Testrings eine Vertiefung, bei der sich die Kugel eine kurze Strecke aus ihrer Halterung löst und unbelastet rollt. Beim Verlassen der Vertiefung auf der Anstiegsfläche wird sie wieder in das eierbecherartige Ende des Stempels gedrückt und gleitet mit bestimmter Anpreßkraft während der nächsten Umdrehung über den Testring.

Der aus 6 verschiedenen Segmenten zusammengesetzte Testring ist über einem Graphitzwischenring auf der Probenträgerplatte befestigt. Die Verbindung und Kraftübertragung wird durch Paßfedern aus Graphit bzw. Nimonic 105 hergestellt.

Zur Erzeugung der Betriebsbedingungen und zur Beobachtung des Versuchsablaufes sind 5 Hilfssysteme erforderlich.

Mit dem Heizsystem und der Gasreinigungsanlage werden die Verhältnisse hergestellt, die auch im Reaktor herrschen werden und einen bestimmten Reibungsfaktor zwischen den aufeinandergleitenden Graphitflächen erzeugen.

Mit dem Druckkraftsystem wird der erforderliche Kugeldruck auf den Testring aufgebracht. Das Antriebssystem setzt die Probenträgerplatte in Drehung und mit dem Beobachtungssystem kann während des Versuches der Abriebsvorgang auf der Testfläche beobachtet und fotografiert werden.

Zur Aufheizung der Graphitprobe dient ein molybdänbeheizter Versuchsofen (Pos. 21). Seine Regelung erfolgt vollautomatisch über Thermoelemente und Thermoelementregler als Ein-Aus-Schalter. Die Isolierung (Pos. 22) des Versuchsofens besteht aus schwach hygroskopischen Kalziumsilikatplatten.

Zwei voneinander getrennte Heizelemente (Pos. 23) sind mit wassergekühlten Klemmen (Pos. 24) an das Stromnetz angeschlossen. Der Ofendeckel ist heliumdicht auf dem Ofenunterteil mit Segmentklammerschrauben (Pos. 25) befestigt.

Die heliumdichte Drehdurchführung am unteren Ende des Versuchsofens ist mit einem wassergekühlten Flansch (Pos. 15) abgeschlossen.

Der Vakuumstutzen (Pos. 26) und der Heliumabsaugstutzen (Pos. 27) sind an der Drehdurchführung angebracht.

Die Lagerung des Ofens erfolgt mittels Kugelzapfen (Pos. 28) die horizontal verschiebbar im Traggerüst (Pos. 29) angeordnet sind.

Die Heliumatmosphäre wird durch eine vorhandene Gasreinigungsanlage auf einer bestimmten Zusammensetzung gehalten, was insbesondere beim Anfahren bei der Ausgasung des Graphits wichtig ist.

Die Gasreinigungsanlage kann bei 1 atü Betriebsdruck 0,4 - 2 Nm³ Helium pro Stunde umwälzen und das mitgeführte Wasser sowie den Sauerstoff aus dem Versuchsbehälter vom Helium trennen.

Mit Analysegeräten wird der Wasser- und Sauerstoffanteil am Eintritt und beim Verlassen des Versuchsofens gemessen. Die Kräfte mit der die 18 Graphitkugeln auf den Testring wirken, werden mit 18 doppelt wirkenden Hydrozylindern (Pos. 1) über Druckstempel (Pos. 2) erzeugt.

Die Druckstempel bestehen aus Nimonic 105 und müssen bei der vorgesehenen Betriebstemperatur

mit Wasser gekühlt werden. Zu diesem Zweck sind sie innen hohl gebohrt. An ihrem unteren Ende befinden sich die eierbecherartigen Kugelhalterungen (Pos. 3). Ausgelegt sind die Stempel für eine Kraft von maximal 400 kp bei einer Ofentemperatur von 800°C.

Die Lagerung der Druckstempel erfolgt mit Bronzebüchsen (Pos. 4), die auch die horizontalen Reaktionskräfte von der Reibung aufnehmen. Die Bronzebüchsen sind ebenfalls gekühlt (Pos. 5).

Die Testoberfläche hat Einsenkungen, denen der Stempel unter Beibehaltung einer konstanten Kraftwirkung folgen können muß. An der Durchführungsstelle sind daher heliumdichte Rollmembranen (Pos. 6) angeordnet, die die Hubbewegungen des Stempels zulassen.

Die mit den Stempeln aufgebrauchte Kraft auf die Graphitkugeln wird mit Kraftmeßdosen (Pos. 7) gemessen, die zwischen den Hydrozylindern und den Druckstempeln eingebaut sind. Zur genauen Messung des gesamten geforderten Kraftbereiches wurden Druckmeßdosen mit zwei Meßbereichen von 4 - 40 kp und von 40 - 400 kp vorgesehen.

Mit dem Antriebssystem wird die Probenträgerplatte (Pos. 8) mit der vorgegebenen Drehzahl angetrieben.

Das Drehmoment ist dabei so groß, daß es außer der unwesentlichen Eigenreibung die Reibung zwischen Graphitkugel und Testring überwinden kann. Die Probenträgerplatte (Pos. 8) wird über die Antriebswelle (Pos. 10) vom Hydromotor (Pos. 9) angetrieben.

Die Antriebswelle ist aus 50 Cr Mo 4 und von innen mit Öl gekühlt. Das Kühlmittel wird außerhalb der Welle rückgekühlt.

Die Welle ist an zwei Stellen gelagert, wobei das untere Lager zur Aufnahme der axialen Kräfte als Axial-Pendelrollenlager (Pos. 11) ausgeführt ist. Zur radialen Führung der Welle dient das Rillenkugellager (Pos. 12).

Zur genauen horizontalen Einstellung der Probenträgerplatte sind die beiden Lager mit je drei verstellbaren Kugelzapfen (Pos. 13) am Traggerüst befestigt.

Zur Abdichtung der in den Ofen führenden Antriebswelle ist eine heliumdichte Drehdurchführung (Pos. 14) mit Wasserkühlung (Pos. 15) vorgesehen worden.

Die Kabel zu den am Testring angeordneten Thermoelementen sind in einen Verschlussdeckel (Pos. 16) eingeschweißt und führen in der hohlgebohrten Antriebswelle nach unten, wo die Meßströme über einen mitrotierenden Meßstromübertrager (Pos. 17) mit geringem Ohm'schen Widerstand zum Meßgerät geleitet werden.

Zur Messung des Drehmomentes (Pos. 18) ist eine Vorrichtung zwischen Antriebsmotor (Pos. 9) und Antriebswelle (Pos. 10) eingebaut. Die Meßvorrichtung ist zwischen zwei Bogenzahnkupplungen (Pos. 19) angeordnet, damit Fertigungs- und Montagegenauigkeiten ausgeglichen werden und die Meßgenauigkeit der Drehmoment-messung nicht beeinflußt wird. Die Messung des Drehmoments kann dauernd überwacht werden und wird von einem Schreiber aufgezeichnet.

Mit dem Beobachtungssystem wird der Testring während des Versuches überwacht, es besteht im wesentlichen aus einem Ofenperiskop (Pos. 30) und einer Lampe (Pos. 31).

Periskop und Beleuchtungseinrichtung sind in getrennten Kühlrohren angeordnet. Damit die zulässige Betriebstemperatur der Geräte nicht überschritten wird, werden sie mit Wasser gekühlt.

Die Abdichtung des in den Ofen eingeführten Beobachtungssystems geschieht über heliumdichte Rollmembranen (Pos. 32). Es ist vertikal verstellbar und kann während des Betriebes bis zur Deckelisolierung herausgezogen werden. Mit einem Isolierstopfen (Pos. 33) wird das eingefahrene Beobachtungssystem vor direkter Wärmestrahlung geschützt. Ferner erfolgt die Zugabe des Heliums über das Beobachtungsgerät.

Der Zustand des Testringes kann von außen mit einer Kamera über das Ofenperiskop fotografiert werden. Der Abstand zwischen Objekt und Objektiv ist so gewählt, daß die interessierende Stelle auf dem Testring im Maßstab 1 : 1 aufgenommen werden kann.

Eine Zusammenstellung der untersuchten Oberflächenelemente zeigt Abb. 7. Sie sind in Abb. 8 dargestellt.

Im Versuchsofen wurde der Testring aus dem jeweils zu untersuchenden Graphitmaterial auf der Probenträgerplatte befestigt.

Als andrückende Kugeln kamen Steatitkugeln zur Anwendung, deren Oberfläche vorher mit A 3-Graphit, dem Material der kugelförmigen Brennelemente des Kugelhaufenreaktors, überzogen wurde.

ANWENDUNG DER ERGEBNISSE

Zu Beginn wurden die allgemeinen geometrischen Beziehungen für die Auslegung der Reaktor-

oberfläche mit Berücksichtigung des Abriebs abgeleitet.

Die Abmessungen der Bauteile, die den Versuchen unter angenäherten Betriebsbedingungen unterworfen wurden, mußten zunächst ohne Berücksichtigung des Abriebs ermittelt werden.

Da der Abrieb nun aufgrund der Versuchsergebnisse bekannt ist, können die allgemeinen Formeln dazu benutzt werden die Reaktoroberflächen unter Berücksichtigung des Abriebs auszulegen.

Am Beispiel des THTR-300 MWe-Prototyps erhält man für die Kühlgasbohrungen und Trennfugen des Bodenreflektors beim Kraftspektrum nach Abb. 3 und einer mittleren Kraft von $P_d = 22$ kp aus Abb. 4 Lastwechselzahlen von $N_{FER} \approx 1000 \div 2000$. Das ergibt mit dem reaktorähnlichen Kraftspektrum der Einzelkräfte einen Abrieb von ca. $s_A \approx 1$ mm.

Am Seitenreflektor bei dem die Lastwechselzahlen bei ca. $N_{FER} \approx 100$ liegen, ist der degressiv zunehmende Abrieb nach Abb. 9 dann höchstens etwa $1/5 + 1/6$ des obengenannten Wertes.

Die maßstäbliche Abb. 10 zeigt sehr anschaulich die Auswirkungen gleichgroßen Abriebs z.B. an Ecken bei den für die Versuche ohne Kenntnis der Größe des Abriebs bestimmten geometrischen Abmessungen.

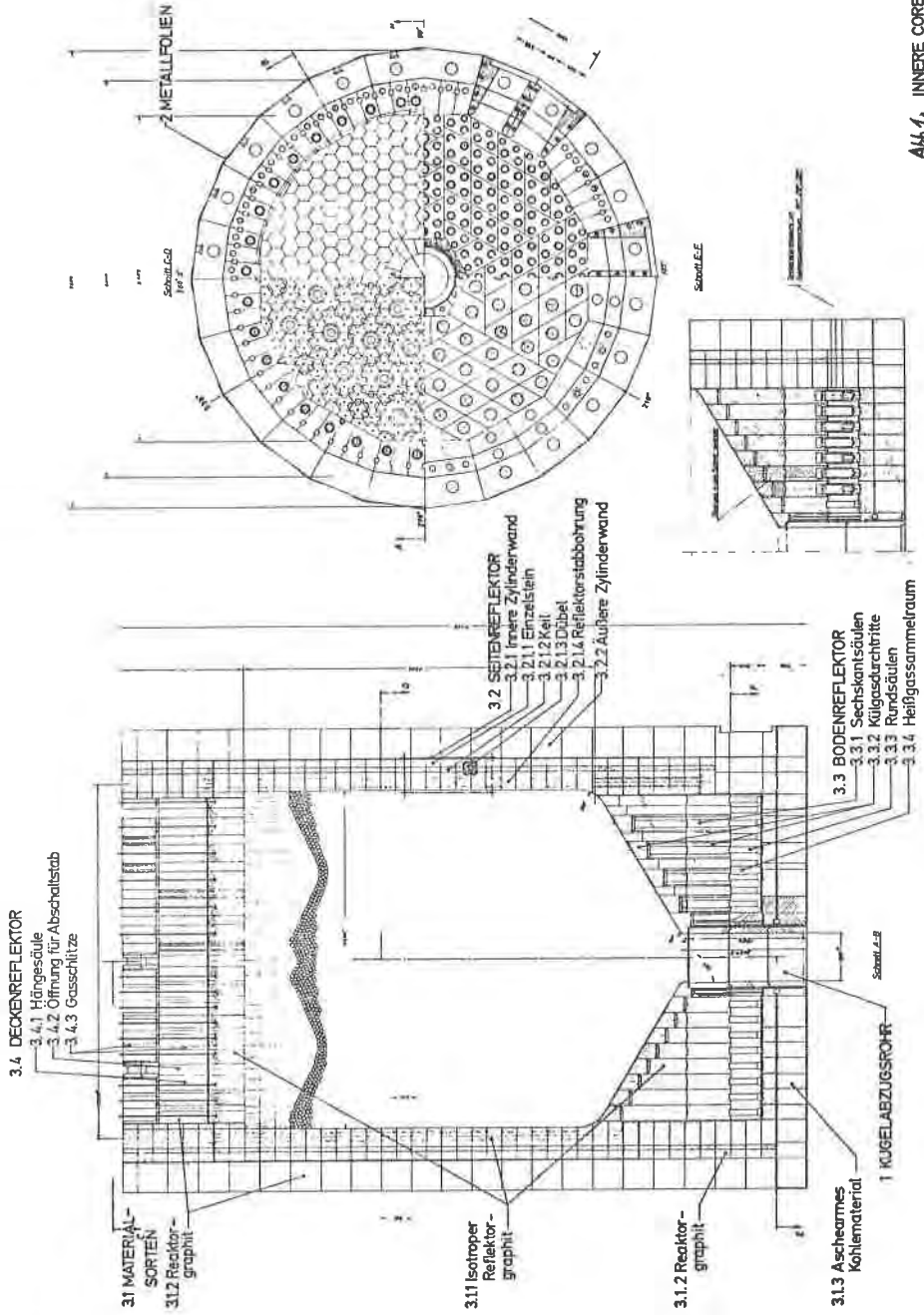
Der infolge des Abriebs jetzt knapp gewordene Kantenabstand reicht nicht mehr aus, um die größte Kraft $P_d = 90$ kp des aufgebrachtten Kraftspektrums aufzunehmen und ist deshalb abgebrochen. Höhere statische Belastungen, die beim Einfahren der Corestäbe entstehen, können ebenfalls nicht mehr aufgenommen werden.

Das vereinzelte Abbrechen von Teilchen an Kanten und Ecken, das ohnehin nur in der näheren Umgebung des Kugelabzugsrohres stattfinden würde, läßt zwar keine nachteiligen Auswirkungen auf die Funktion des Reflektors erwarten, doch ist es, wie in Abb 10 eingezeichnet, leicht möglich, durch Erhöhen des Anfasewinkels von $\delta = 25^\circ$ auf 30° den Kantenabstand des Kraftangriffsmittelpunktes von ca. 1 auf 3 mm zu erhöhen, wodurch die Ecke mit Sicherheit nicht mehr abbrechen wird und auch die statische Belastung beim Einfahren der Corestäbe ertragen werden kann. Diese Erkenntnis wurde für den Reflektor des THTR bereits verwertet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß aufgrund der Versuchsergebnisse der Abrieb ermittelt werden konnte und bei der Auslegung der Reflektoroberfläche mitberücksichtigt worden ist. Dadurch konnten die Kanten und Ecken des Bodenreflektors eines Kugelhaufenreaktors in Abhängigkeit von der gesamten Betriebszeit optimiert werden.

LITERATUR

- 1 C.B. von der Decken, J. Schöning "Mechanische Probleme des Cores eines Kugelhaufenreaktors" Proceedings 1st SMIRT, 20.-24. Sept. 1971, Berlin (EUR 4820 d-f-e)
- 2 C. Elter "Konstruktion der Reaktoreinbauten des THTR-300 MWe-Prototyp-Kernkraftwerkes" Proceedings 1st SMIRT, 20.-24. Sept. 1971, Berlin (EUR 4820 d-f-e)
- 3 R. Fritz "Temperatur- und strahlungsinduzierte Spannungen in den Graphiteinbauten des THTR-300 MWe-Prototyp-Kernkraftwerkes" Proceedings 1st SMIRT, 20.-24. Sept. 1971, Berlin (EUR 4820 d-f-e)
- 4 D. Bedenig "Experimentelle Untersuchungen zum Fließverhalten eines Kugelhaufens im Hinblick auf den Brennelementkreislauf im Core eines Kugelhaufenreaktors" Sonderdruck Jülich, Oktober 1966
- 5 B. Beins, R. Fritz, K. Brandes "Analyse der durch äußere Belastungen hervorgerufenen Spannungen in den Reaktoreinbauten des THTR-300 MWe-Prototyp-Kernkraftwerkes" Proceedings 1st SMIRT, 20.-24. Sept. 1971, Berlin (EUR 4820 d-f-e)
- 6 G. Merten "Corewand- und Corebodenbelastungen in einem Kühlhaufenreaktor bei Einfahren der Absorberstäbe" Proceedings 1st SMIRT, 20.-24. Sept. 1971, Berlin (EUR 4820 d-f-e)



**Abb. 1, INNERE COREINBAUTEN
DES THTR-300MW d**

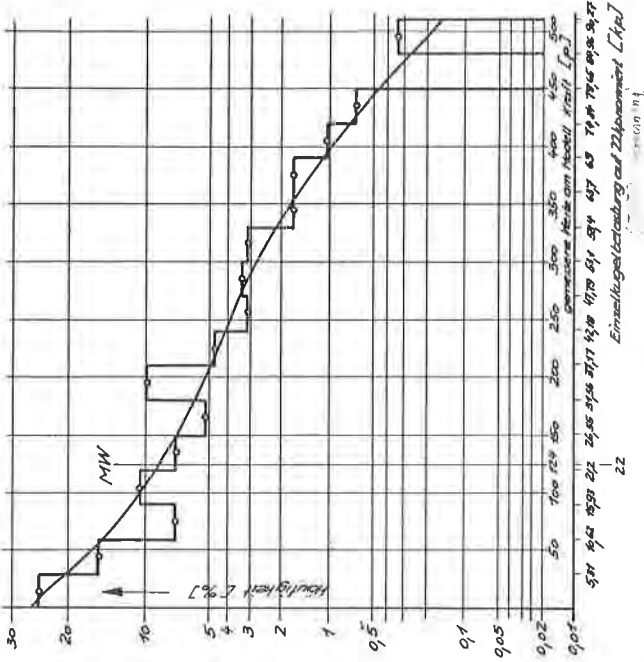
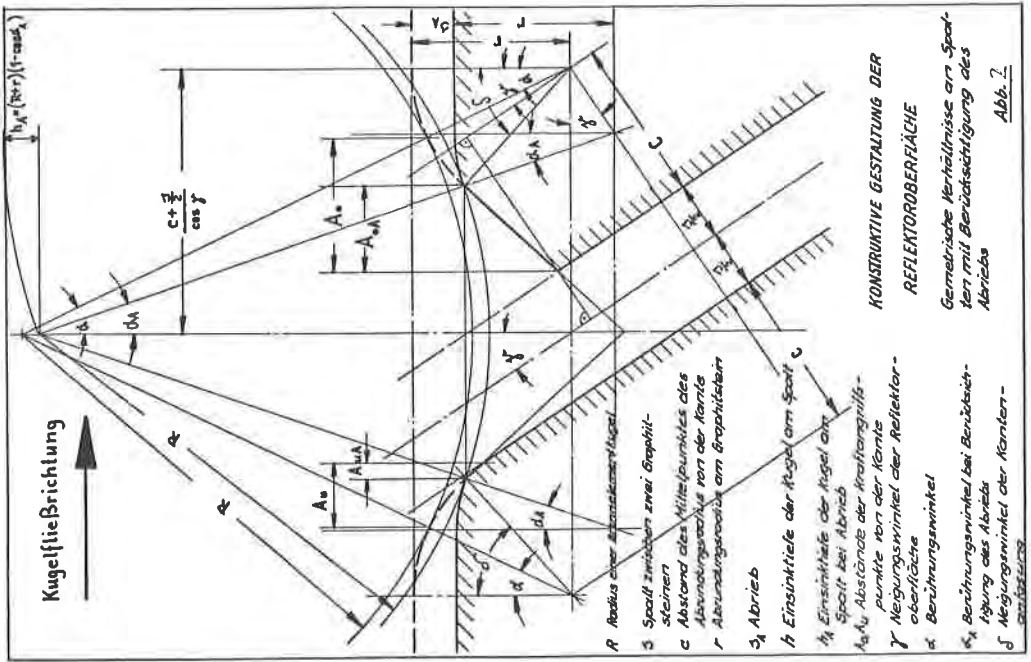
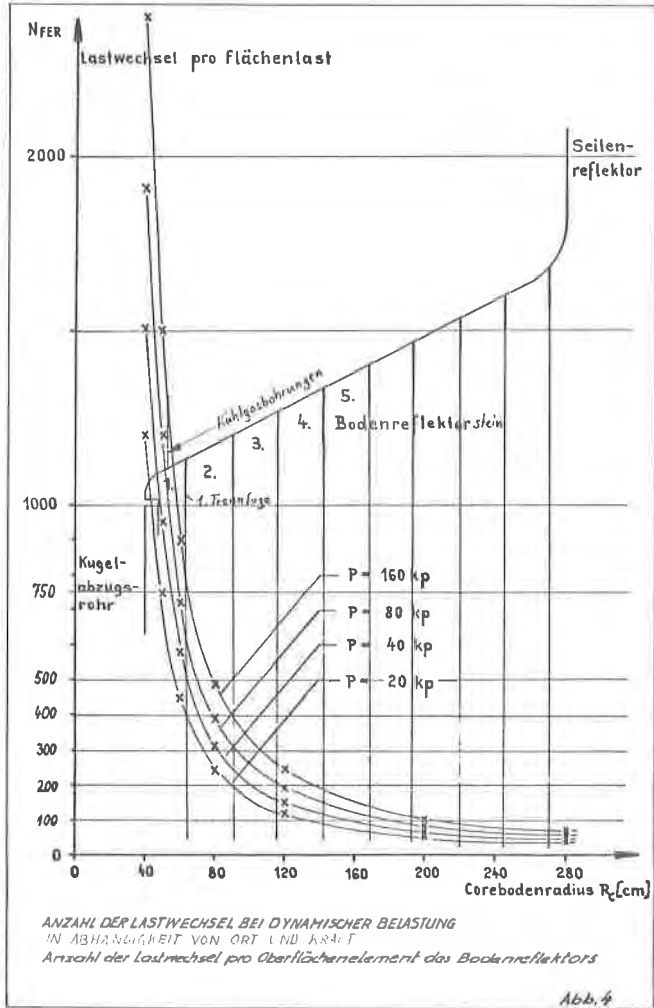


Abb. 3: Häufigkeit der punktuellen Bodenreflektor-Belastung im 1:6 - THTR-300 MWE - Core-Modell





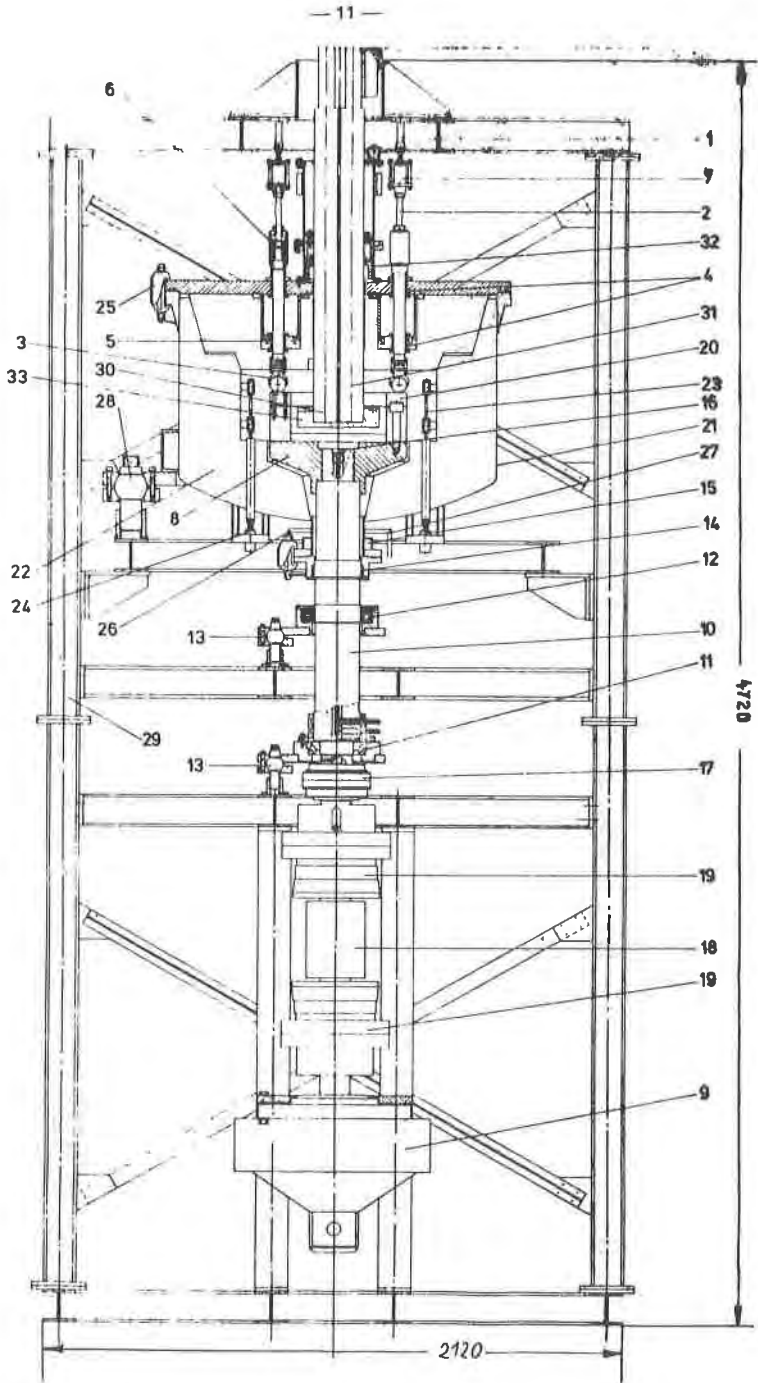
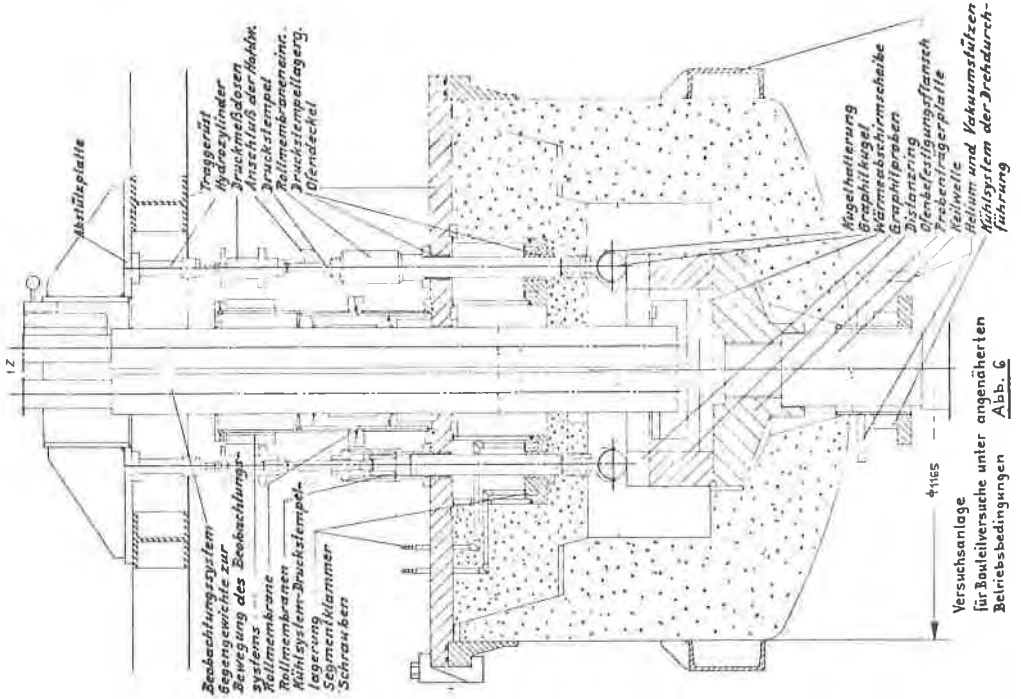


Abb. 5 GESAMTAUFBAU DES VERSUCHSTANDES
für Bauteilversuche unter angenäherten Betriebsbedingungen

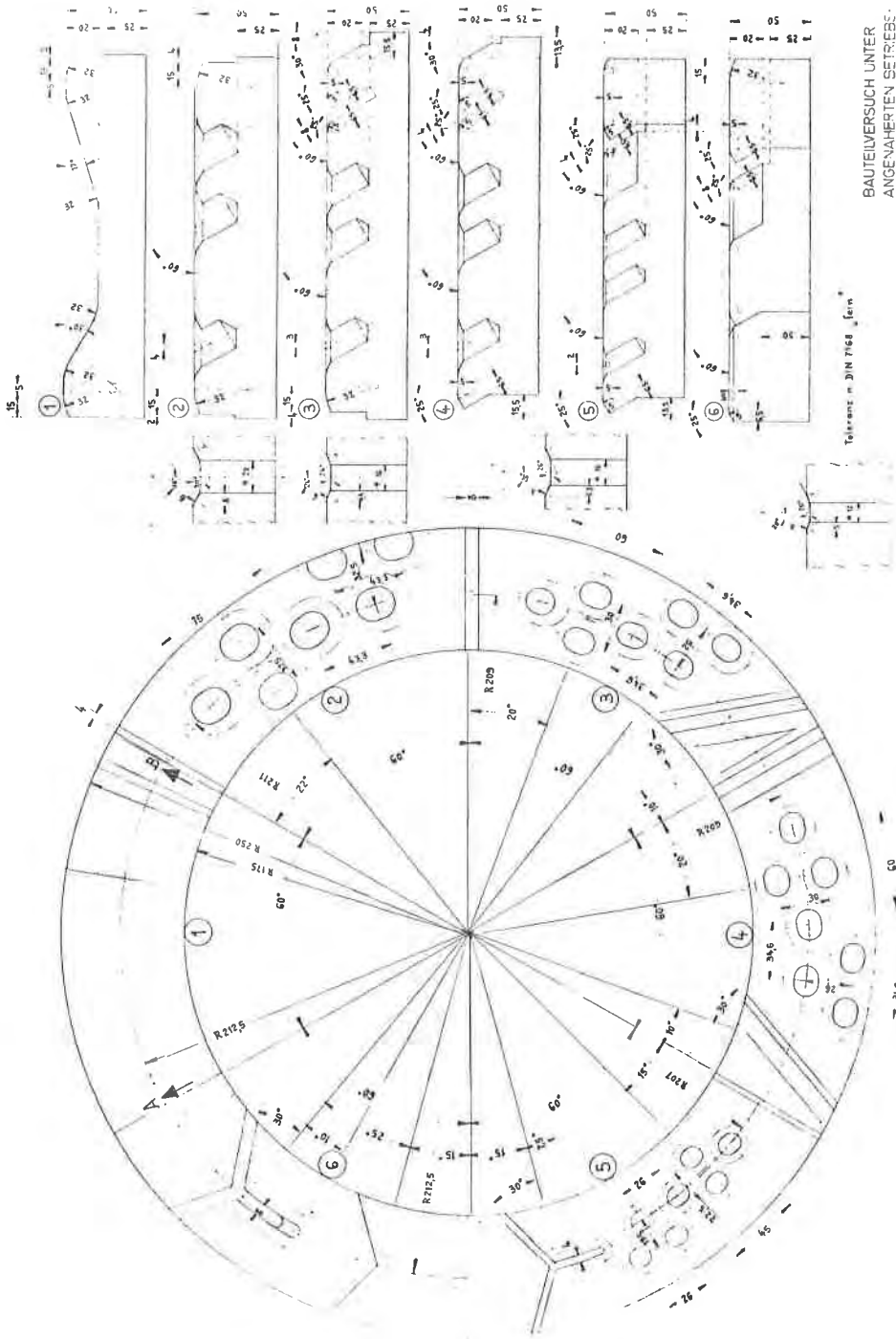


Versuchsanlage für Bouleversuche unter angenehnten Betriebsbedingungen Abb. 6

Oberflächenelement des Reflektors	Spaltweite δ [mm] bzw. Kühlgasbohrung	Abrundungsradius r [mm]	Abstand des Mittelpunktes des Abrundungsradius von der Seitenfläche C [mm]	Neigungs- Winkel ober- flächen- fassung β bzw. Neigungs- Winkel ober- flächen- fassung β
SEITEN-REFLEKTOR				
Oberfläche	0	32	15	—
Kante senkrecht zur Gleitrichtung	4	32	15	—
Säulenfläche	8	32	15	—
Oberfläche	—	32	—	17°
Kante mit rechtebenen Winkeln zur Gleitrichtung	0	5	6,5	25°
90°	4	5	6,5	25°
60°	8	5	6,5	25°
zur Gleitrichtung	0	5	6,5	25°
0°	8	5	6,5	25°
gegen Gleitrichtung	0	5	6,5	25°
120°-Ecke mit Spitze	4	5	6,5	25°
gegen Gleitrichtung	8	5	6,5	25°
Kühlgasbohrungen:				
zwischen 2 nebeneinander liegenden Kühlbohrungen	12	3	5	20°
zwischen 2 hintereinander liegenden Kühlbohrungen	16	3	6,3	26°
zwischen 2 hintereinander liegenden Kühlbohrungen	16	6	6,4	26°
zwischen 2 hintereinander liegenden Kühlbohrungen	12	3	5	20°
zwischen 2 hintereinander liegenden Kühlbohrungen	16	3	6,3	26°
gegen Gleitrichtung	16	6	6,4	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	12	3	5	20°
parallel zur Seite des Drehtellers	16	6	6,3	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	16	6	6,4	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	20	6	8	30°
parallel zur Seite des Drehtellers	12	3	5	20°
parallel zur Seite des Drehtellers	16	6	6,3	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	16	6	6,4	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	20	6	8	30°
parallel zur Seite des Drehtellers	12	3	5	20°
parallel zur Seite des Drehtellers	16	6	6,3	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	16	6	6,4	26°
parallel zur Seite des Drehtellers	20	6	8	30°

Abb. 7

Zusammenstellung der auf dem Versuchsring Abb. 6 angeordneten Oberflächenelemente des Reflektors für die Bouleversuche unter angenehnten Betriebsbedingungen



BAUTEILVERSUCH UNTER
INGENAHERTEN BETRIEBS-
BEDINGUNGEN
- Versuchsring -

Abb. 8

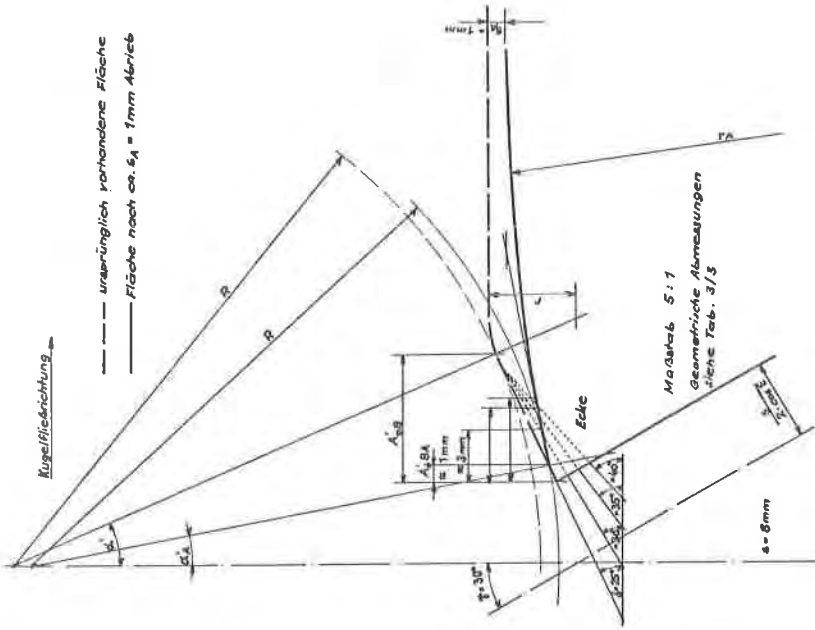


Abb. 10
AUSLEGUNG DER REFLEKTORBERFLÄCHE
unter Berücksichtigung des zu erwartenden
Abriebs an einer Ecke mit $\epsilon = 30$ und $\alpha = 60^\circ$
 $\epsilon =$ Eckenwinkel, $\alpha =$ Keulenwinkel

