

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

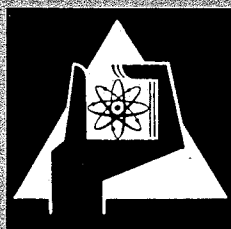
Oktober 1970

KFK 1290

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Untersuchungen zum Verschleiß und zum Reibverhalten zwischen
Brennstabbündel und Abstandshaltergittern in Natrium

K. Kleefeldt



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1970

KFK 1290

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Untersuchungen zum Verschleiß und zum
Reibverhalten zwischen Brennstabbündel
und Abstandshaltergittern in Natrium.

K. Kleefeldt

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Es wird über Versuche in Na berichtet, in denen das Reibverhalten zwischen BE-Bündel und Abstandshaltergittern bis zu Temperaturen von 680 °C untersucht wurde. Die im BE durch unterschiedliche Wärmedehnung hervorgerufene axiale Relativbewegung zwischen Brennstäben und Gittern wurde hier mechanisch mit einem Exzenterantrieb erzeugt. Die dabei entstehenden Reibkräfte betragen im Na zwischen 5 und 20 kp je Gitter, in Luft und Ar auch darüber. Für zwei Gitterkonstruktionen wurde eine kritische Reibkraft zu $R_{krit} \approx 55$ kp bzw. 60 bis 80 kp bestimmt, oberhalb derer das Gitter infolge Klemmwirkung bei wiederholten Hubbewegungen zu Bruch geht. Solche kritischen Werte können durch zu geringes Spiel erreicht werden.

Die Spielvergrößerung durch Verschleiß ist kleiner als 0,02 mm. Sie liegt damit weit unter den fertigungs- und betriebsbedingten Toleranzbreiten.

Ein Diffusionsverschweißen der Kontaktstellen im Na konnte nach einer siebentägigen Stillstandsperiode bei 600 °C nicht festgestellt werden.

Die Vor- und Nachteile der gewählten Gitterbefestigungen werden diskutiert.

Abstract

It is reported on experiments in Sodium in which the friction characteristics between fuel element bundle and spacer grids were investigated up to temperatures of 680 °C. The relative axial movement between the fuel pins and the spacers, which results from different heat expansion in the fuel element, was simulated mechanically through an eccentric drive in this example. The frictional forces produced during this process were 5 to 20 kp per spacer grid in sodium and even higher in air and argon. For two different spacer designs a critical frictional force $R_{crit} \approx 55$ kp and 60 to 80 kp, respectively, was determined. If the frictional force exceeds this critical value due to a lack of clearance, the bowing of the grid leads to a clamping effect and to plastic deformation. By repetition the movement of the bundle the spacer grid will rupture.

The increase in clearance by wear is less than 0,02 mm. This means that it is much below the tolerance level required in fabrication and operation.

Diffusion welding of joints in sodium was not detectable after seven days of shutdown period at 600 °C.

Finally the advantages and drawbacks of the selected types of spacer grid fastening are discussed.

Inhalt

1. Allgemeines
2. Versuchsbeschreibung
3. Versuchsergebnisse
4. Diskussion
5. Erfahrungen im Umgang mit BE-Attrappen in Na

Abbildungen

- Abb. 1: Prüfapparatur (schematisch)
- Abb. 2: Reibkraft zwischen Bündel und Gitter
als Funktion der Hubzahl
- Abb. 3: Summenhäufigkeit der Gitter-Maschenweite
im Neuzustand
- Abb. 4: Veränderung der Gitter-Maschenweite
im Versuch 2.*
- Abb. 5: Wabengitter
- Abb. 6: Rhombusgitter
- Abb. 7: Ansichten vom Bündel nach dem Versuch
- Abb. 8: Diverse Reibstellen an Stäben
- Abb. 9: Versuchsbündel unmittelbar nach dem Ausbau

1. Allgemeines

Die meisten Entwürfe von Brennelementen für schnelle natriumgekühlte Reaktoren sehen vor, die Abstandshaltergitter entweder direkt am Kasten oder an einem Skelett aus Blindstäben axial festzulegen. Infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnung zwischen Brennstab und Kasten kommt es daher bei Leistungsänderungen des Reaktors zu Relativbewegungen zwischen Bündel und Gittern. Solche Verschiebungen liegen in der Größenordnung von 1 mm am losen Bündelende.

Je nach Passung der Brennstäbe in den Gittermaschen, die sich im Laufe der Betriebszeit in noch unbekanntem Maße verändern wird, entstehen in den Kontaktflächen mehr oder weniger große Reibkräfte, die die Gitter auf Plattenbiegung sowie auch die Gitterbefestigung wechselnd beanspruchen. Die Reibkräfte sind auch bei einer Spielpassung vorhanden. Sie werden dann durch die Verbiegung der Brennstäbe und durch Fluchtungsfehler der Maschen verursacht.

Darüber hinaus wird sich ein gewisser Verschleiß in den Kontaktflächen einstellen, der zu einer Spielvergrößerung und damit zu erhöhter Schwingungsneigung der Stäbe führen kann. Ferner können Canschäden durch Riefenbildung auftreten.

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Bestimmung von Anhaltswerten für die Reibkräfte und den Verschleiß unter simulierten thermischen Reaktorbetriebsbedingungen. Außerdem sollte die Haltbarkeit der Abstandshalterbefestigung nachgewiesen werden.

2. Versuchsbeschreibung

2.1 Prüfvorrichtung

Die Prüfvorrichtung ist für den Einsatz in den kleinen Testbehälter der Natrium-Behälter-Anlage (NABEA) konstruiert. Abb. 1 zeigt die gesamte Apparatur schematisch.

Der Versuchseinsatz besteht aus dem feststehenden Sechskantrohr (2) mit den Abstandshaltergittern und dem in axialer Richtung bewegten Stabbündel (3). Die Bewegung erfolgt über Schubstange (6) und Pleuel von der Exzenterwelle (10) her, die den Hub s (hier meist 2 mm) bestimmt. Das Antriebsmoment liefert der Getriebemotor (11). Zur Ermittlung der Reibkraft zwischen Stabbündel und Gittern dient der Zug- und Druckkraftaufnehmer (9). Er ist starr in die Pleuelstange eingebaut und indiziert somit die Summe aus Reibkraft am Bündel, Federkraft des Faltenbalges (8), Eigengewichte und Reibung im oberen Schubstangenlager (7). Massenkräfte brauchen nicht berücksichtigt zu werden. Der Fehler, der durch die Pendelbewegung des Pleuels verursacht wird, ist kleiner als 1 ‰ und somit vernachlässigbar. Das gilt auch für die Reibkraft am Gleitlager (7). Das Eigengewicht und die Faltenbalgkraft sind bekannt und können bei der Auswertung eliminiert werden.

Das Meßsignal von den DMS im Kraftaufnehmer wird über einen Trägerfrequenz-Meßverstärker einem Linienschreiber zugeführt, der den Kraftverlauf kontinuierlich aufzeichnet.

Das Füllen des Behältereinsatzes mit Na und die Temperaturregelung sowie die Versorgung mit Schutzgas gehören zum Funktionsbereich der NABEA.

Weitere Daten:

Nennleistung des Getriebemotors	0,25 kW
Drehzahl der Antriebswelle (gemessen)	22-23 min ⁻¹
Größte Meßkraft am Kraftaufnehmer	± 1000 kp
Hub (durch Auswechseln der Welle variabel)	2 (10) mm
Maximale Betriebstemperatur am Versuchsobjekt	700 °C

2.2 Versuchsobjekt

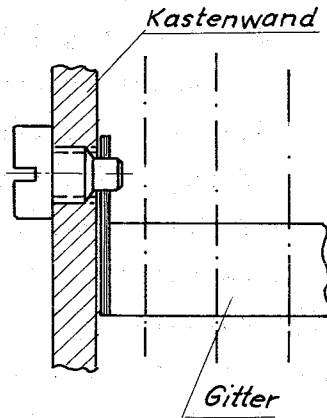
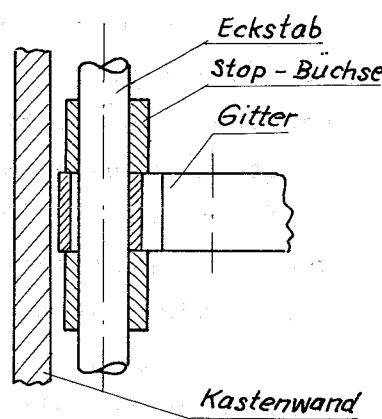
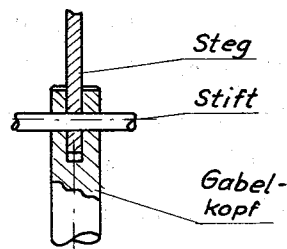
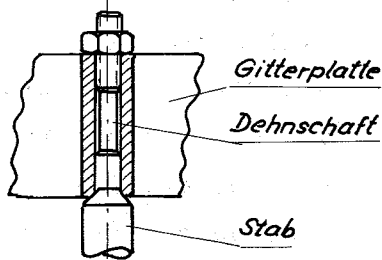
Die Versuche wurden an zwei Versuchseinsätzen durchgeführt, die sich in einigen Konstruktionsmerkmalen hauptsächlich hinsichtlich der Gitterausführung und -befestigung unterscheiden. Die Untersuchungen an dem von der GfK hergestellten Einsatz 1 sind mehr als Vorversuche anzusehen. Der durch SSW/IA bereitgestellte Versuchseinsatz 2 entsprach zum Zeitpunkt der Fertigung im Frühjahr 1969 dem damaligen SNR-Entwurf. In Tab. 1 sind die Merkmale der beiden Ausführungen gegenübergestellt.

2.3 Versuchsdurchführung

Vor der Montage des Bündels wurde an allen Gittern die Maschenweite (= kleinster einbeschriebener Durchmesser) gemessen und stichprobenweise auch der Stabaußendurchmesser. Das Ausmessen der Maschenweite erfolgte mit Prüfkugeln. Dazu standen Kugelsorten von 5,95 mm bis 6,15 mm in Durchmesserstufen von 0,01 mm zur Verfügung. Die Kugeltoleranz innerhalb einer Sorte betrug $\pm 0,001$ mm. Die Kugelsorten wurden nacheinander mit steigendem Durchmesser mit Hilfe einer einfachen Vorrichtung auf jedes Gitter gebracht. Als Maschenweite wurde das Durchmessermittel der gerade noch passierenden und der erstmals hängengebliebenen Kugel definiert, das folglich mit einer Unsicherheit von ca. $\pm 0,005$ mm behaftet ist. Der Fehler ist jedoch klein gegen die gesamte fertigungsbedingte Streuung, die ca. 0,07 mm beträgt, wie die Auftragung im log. Wahrscheinlichkeitsnetz zeigt (Abb. 3). Es kann daher nur mit einer mittleren Maschenweite und somit auch nur mit einem mittleren Spiel zwischen Stab und Gitter gerechnet werden.

Nach diesen Vorbereitungen folgte der eigentliche Reibversuch durch zyklische Axialverschiebungen des Stabbündels gegen die feststehenden Gitter. Es wurden Vorversuche in Luft und Ar sowie eine Serie von Hauptversuchen im Na im Temperaturbereich 20 °C (bei Na-Versuchen ab ca. 250 °C) bis 680 °C durchgeführt, wobei die Reibkraft kontinuierlich aufgezeichnet wurde. Die Zahl der Arbeitsspiele betrug je nach Meßeffect 500 bis $1,3 \cdot 10^5$. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über alle Versuchsläufe.

Tab. 1: Merkmale der Versuchseinsätze

	Testeinsatz 1 (GfK)	Testeinsatz 2 (SSW/IA)
Stabdurchmesser [mm]	6	6
Stablänge [mm]	1000	1000
Anzahl der bewegten Stäbe	169	166
Gitterteilung [mm]	7,9	7,9
Gitterhöhe [mm]	8	10
Gitterabstand [mm]	150	150
Anzahl der Gitter	2 - 4	7 (8)
Gitterkonstruktion	Wabengitter, punktgeschweißt (vgl. Abb. 5)	Rhombusgitter, gelötet (vgl. Abb 6)
Gitterbefestigung	am Kasten mit Hilfe von Zapfenschrauben 	an 3 Skelettstäben mit Hilfe von aufgeschweißten Stop-Buchsen 
Stabbefestigung	mit Gabelkopf an Stegen 	mit Dehnschaft in Gitterplatte 
Werkstoffpaarung Stab/Gitter	4988/4541	4988/Sandvik 12 R7 2HV

Tab. 2: Übersicht über die durchgeführten Versuche

Versuch Nr.	Medium	Temp. [^o C]	Hub [mm]	Zahl d. Gitter	mittleres Spiel zw. Stab u. Gitter [μ m]	Last- spiele	Reibkraft/Gitter		Bemerkungen
							max.	zu Beginn	
1.1	Luft	20	10	3	≈ 0	4	> 400		Gitter ca. 20 mm durchgebo- gen, dann an Befestigung od. am Rand gebrochen (Abb.5c) } dienten zur Überprüfung des Anlaufvorganges von Vers. 1.2
1.2	Luft	20	10	4		$3 \cdot 10^3$	35	15	
1.2a	Luft	20	10	4		$5 \cdot 10^2$	23	12	
1.3	Luft	20	10	4		$8 \cdot 10^2$	42	20	
1.4	Argon	36	10	4		510	48	32	
		200	10	4		620	54	50	
		450	10	4		$3,8 \cdot 10^3$	56	33	
1.5	Luft	20	2	4	≈ 40	620	24	9	
1.6	Na	245- 650	2	4	≈ 40	$4,5 \cdot 10^3$	20	16	kein bedeutender Temperatur- gang in d. Reibkraft, jedoch fallende Tendenz mit steig. T.
1.7	Na	300- 500	2	4	≈ 40	$7,8 \cdot 10^3$	19	15	Nach $2 \cdot 10^3$ Spielen für 7d unter- brochen zwecks Prüfung auf Diff.- Verschweißung
1.8	Na	620	2	4	≈ 40	$4,2 \cdot 10^3$	17	≈ 10	
2.1	Ar	20	2	8	≈ 110	800	17	3	Oberstes Gitter lag außerhalb des Na, festgefressen nach ca. 4500 Spielen. Alle Versuche d. Serie 2.* wur- den mit denselben Gittern ge- fahren.
2.2	Na	610	2	8	≈ 110	$8 \cdot 10^3$	12	8	
2.3	Na	600	2	7	≈ 110	$1,1 \cdot 10^5$	6	≈ 4	
2.4	Na	680	2	7	≈ 110	$1,3 \cdot 10^5$	13	10	

3. Versuchsergebnisse

Reibkraft:

Unter der Reibkraft wird im Folgenden die während eines Doppelhubes auftretende betragsmäßig größte Kraft verstanden, die zum Verschieben des Bündels in den Gittern erforderlich ist. Meist ist sie zum besseren Vergleich auf ein Gitter bezogen.

Die Reibkraft ändert sich mit der Laufdauer und von einem Versuch zum anderen in bisher nicht reproduzierbarer Weise. Meistens stellt sich folgender qualitativer Verlauf ein: In der Anlaufphase innerhalb ca. 100 bis 1000 Doppelhuben leichter kontinuierlicher Kraftanstieg bis zu einem Maximum, danach nahezu konstante Kraft für einige 10^3 Arbeitsspiele, später abfallende Tendenz. Dieser Reibkraftverlauf ist für die Na-Versuche nach Tab. 2 in Abb. 2 dargestellt.

Für die Versuche der Serie 1.* mit den Wabengittern liegt die Reibkraft pro Gitter zu Beginn zwischen 10 und 15 kp und steigt bis auf 15 bis 20 kp an. Bei den Versuchen der Serie 2.* mit den Rhombusgittern beträgt die Reibkraft ca. 5 bis 10 kp am Anfang und 6 bis 13 kp im Maximum. Dieser Reibkraftunterschied zwischen den beiden Versuchsserien ist durch das mittlere Spiel zwischen Stab und Gitter zu erklären. Es betrug bei den Versuchen 1.* 40 μm und bei den Versuchen 2.* ca. 110 μm . Bemerkenswert ist dabei, daß trotz des in jeder Masche vorhandenen Spieles die Reibkraft deutlich meßbare Werte annimmt. Ursachen dafür sind im wesentlichen unvermeidbare Fluchtungsfehler in den Gittermaschen sowie in geringem Maße Stabkrümmungen. Deshalb hat die Größe des Spieles, sofern es überhaupt vorhanden ist, auch nur einen geringen Einfluß auf die Reibkraft.

Ganz anders ist das, wenn das Spiel aufgrund der Streuung in einem Teil der Maschen negativ ist. Das war bei dem Versuch 1.1 der Fall. Der Grundgedanke dabei war, die Stäbe im Hinblick auf Schwingungen im Reaktor mit einem geringen Übermaß in die Gittermaschen einzusetzen. Die Maschen waren deshalb so kalibriert, daß sich pro Gitter und Stab bei der Einzelprüfung eine Reibkraft von ca. 0 bis 0,8 kp ergab. Im Versuch bei RT in Luft mit dem vollbesetzten Bündel führte das bereits nach vier Doppelhuben zum Bruch der Gitter bzw. der Gitterbefestigung. Die Ursache ist eine Klemmwirkung. Sie tritt schon

bei kleinen Durchbiegungen infolge der zunächst noch relativ geringen Reibkraft auf und verstärkt diese, was wiederum eine größere Gitterdurchbiegung zur Folge hat. Wenn der Hub beendet ist, so setzt derselbe Vorgang erst wieder beim nächsten Vorwärtshub ein, weil während des Rückhubes die Klemmwirkung aufgehoben ist und somit die Verformung nicht vollständig rückgängig gemacht wird. Ein auf diese Weise deformiertes Wabengitter zeigt Abb. 5c. Die Reibkraft pro Gitter stieg bei diesem Versuch auf über 400 kp an. (Der Meßbereich der Apparatur wurde dabei überschritten.) Der gleiche Klemmeffekt trat auch beim Versuch 2.2 am Gitter 8 auf, welches versehentlich oberhalb des Na-Spiegels im Ar liegend ungünstigeren Reibverhältnissen ausgesetzt war. (Abb. 7c)

Man kann hieraus schließen, daß es eine kritische Reibkraft R_{krit} gibt, oberhalb derer das Gitter bei wiederholten Hubbewegungen zerstört wird. R_{krit} hängt im wesentlichen von der Gitterkonstruktion und -befestigung sowie von Betriebsparametern wie Spiel, Temperatur und Hub ab. Aus der Versuchsserie 1.* folgt, daß R_{krit} im Bereich 60-80 kp für das Wabengitter liegt. Die obere Grenze ergibt sich aus dem Versuch 1.1 bei dem die rechnerische Reibkraft von ca. 80 kp zu dem Klemmeffekt geführt hat. Die untere Grenze ist jener Wert, bei dem mehrere hundert Doppelhübe ohne Bruch erreicht wurden (vgl. Tab.2, Versuch 1.4). Bei dem Rhombusgitter Nr. 8 mit der hier gewählten Skelettbefestigung trat der Klemmeffekt im Versuch 2.2 bei $R_{krit} \approx 55$ kp auf, wie sich indirekt aus den Aufzeichnungen schließen läßt.

Die Temperaturabhängigkeit der Reibkraft ist unbedeutend, wie sich aus dem Kraftverlauf in Versuch 1.6 zeigt (Abb. 2). Die Temperatur wurde während des Versuches von ca. 250 °C mit unterschiedlicher Geschwindigkeit erhöht, ohne eine nennenswerte Reibkraftänderung zu ergeben. Es deutete sich eine fallende Tendenz in der Reibkraft bei steigender Temperatur an.

Verschleiß:

In Abb. 4 ist die Summenhäufigkeit der Gittermaschenweite aufgetragen, wie sie an den Rhombusgittern nach den Versuchen 2.2; 2.3 und 2.4 gemessen wurde, d.h. also nach insgesamt ca. $9 \cdot 10^3$; $1,2 \cdot 10^5$ und

$2,5 \cdot 10^5$ Doppelhüben. Es sind darin alle Maschen der Gitter 1 bis 7 berücksichtigt worden. Eine eindeutige Verschiebung der Häufigkeitskurve nach rechts, wie es mit zunehmender Hubzahl zu erwarten wäre, läßt sich aus Abb. 4 nicht ablesen. Vielmehr liegen die Meßpunkte unregelmäßig in einem schmalen Streuband, so daß sich ein genaues Maß für die mittlere Vergrößerung der Maschen und damit für den Verschleiß nicht angeben läßt. Jedoch kann man aus der Bandbreite die obere Grenze für die während der Versuchsserie 2.* erfolgte mittlere Maschenvergrößerung zu $\Delta d_M \approx 0,01$ mm abschätzen. Sie ist damit erheblich kleiner als die für das Spiel maßgeblichen Toleranzfelder, die in Summe ca. 0,1 mm betragen. Den Zustand einiger typischer Kontaktflächen im Rhombusgitter zeigt Abb. 6b. An den Wabengittern wurden die Maschen nicht systematisch vermessen, jedoch war auch dort der Verschleiß gering. Abb. 5b zeigt typische Kontaktflächen im Wabengitter nach dem Versuch 1.2.

Auch an den Stäben war nur ein geringer Abrieb festzustellen. In den Na-Versuchen bildeten sich sichtbare, jedoch nicht fühlbare Reibstellen, deren Tiefe stichprobenweise mikroskopisch bestimmt wurde. Sie lag mit starken Streuungen im Bereich 0 bis ca. 50 μ m nach $2,5 \cdot 10^5$ Doppelhüben (Versuchsserie 2.*). Einige Reibstellen extremen Ausmaßes sind in den Abb. 8a u. b dargestellt. Erheblich stärkere Verschleißerscheinungen stellten sich in Versuch 1.4 im Ar ein. Dieser Versuch ist jedoch nicht repräsentativ, da das Ar unbekannte Mengen Luft enthielt, die zu einer starken Oxidation der Oberflächen geführt haben.

Diffusionsverschweißung:

Eine Verschweißung im Ruhezustand in Na konnte nach siebentägiger Standzeit bei konstanter Temperatur von 650 °C nicht festgestellt werden (Versuch 1.8). Im ersten Lauf stieg die Reibkraft von 10 auf 16 kp an. Dieser Kraftverlauf reproduzierte sich im 2. Versuchslauf nach der Stillstandperiode sehr gut (vgl. Abb. 2, Versuch 1.8/1 und 1.8/2). Eine Losbrechkraft war auch nicht andeutungsweise zu verzeichnen.

Beurteilung der Abstandshalter- und Stabbefestigung:

Die Befestigung der Wabengitter mit Zapfenschrauben am Kasten (vgl. Tab. 1) ist auf leichte Auswechselbarkeit im Versuch ausgerichtet. Sie hat sich als sehr haltbar erwiesen, obwohl hohe Lochleibungen in den Randblechen auftreten und die Gefahr des Verbiegens dieser Blechstreifen besteht. Eine Zerstörung der Befestigung tritt bei Kräften über 400 kp pro Gitter auf, wobei dann das Gitter bereits selbst stark deformiert wird. Günstiger wäre anstelle der Schraubverbindung eine Punktschweißung, die aber spezielle Vorrichtungen erfordert. Das biegsame Randblech eignet sich sehr gut zum Ausgleich von Abmaßen im Kastendurchmesser. Bei dieser Befestigungsart ist es zweckmäßig, zunächst alle Gitter zu montieren und dann die Stäbe einzeln einzuschieben, bevor sie in der Gitterplatte verankert werden. Diese Montagefolge ist mehrfach mit gutem Erfolg erprobt worden.

Auch die Skelettbefestigung, wie sie bei den Rhombusgittern vorgesehen war (vgl. Tab. 1) hat sich in diesem Versuch bewährt, wenngleich sie im Vergleich zu der direkten Kastenbefestigung folgende Nachteile aufweist:

- Verlust von 3 bzw. 6 Brennstäben je Bündel
- Drei- bzw. Sechspunktauflage des Gitters (geringere Steifigkeit)
- Summe der Reibkraft in allen Gittern muß von den 3 bzw. 6 Skelettstäben aufgenommen werden.

Die ungünstigen Auflagerbedingungen am Gitter haben vermutlich dazu beigetragen, daß die kritische Reibkraft für diese Anordnung, wie oben ausgeführt, niedriger liegt als für die Wabengitter, obwohl man wegen der sehr viel größeren Eigensteifigkeit des Rhombusgitters (größere Blechdicken) eine höhere kritische Reibkraft erwartet hätte als bei den Wabengittern (vgl. Abschnitt 4).

Die Skelettstäbe haben an ihrer Einspannung einen kleinsten Durchmesser von 3 mm. Unter Zugrundelegung einer zulässigen Spannung von $\sigma_{zul} = 17 \text{ kp/mm}^2 \approx \sigma_{0,2}$ für W.-Nr. 4988 bei 400 °C ergibt sich eine zul. Zugkraft von 121 kp je Stab bzw. 363 kp bei 3 Skelettstäben.

Nimmt man an, daß die Reibkraft von ca. 10 Gittern auf die Skelettstäbe übertragen wird (in den unteren Gittern tritt infolge Temperaturgleichheit keine Verschiebung auf), so darf diese 36 kp/Gitter nicht überschreiten. Solch große Reibkräfte wurden zwar im Versuch nicht erreicht, sind aber in einem BE nach längerer Standzeit (Schwellen) nicht auszuschließen.

An der Befestigung der Brennstabattrappen sind im Versuch bei beiden Ausführungen mit Gabelkopf und Dehnschaft (vgl. Tab. 1) keine Beanstandungen aufgetreten. Ein Verdrehen der Stäbe bei der Dehnschaftbefestigung konnte nicht festgestellt werden. Die durch Schweißpunkt blockierten Muttern M 3,5 haben sich nicht gelockert.

4. Diskussion

Die Versuche haben gezeigt, daß die Reibkräfte im Neuzustand in beherrschbaren Grenzen liegen, sofern eine Spielpassung zwischen Stab und Gitter gewährleistet ist. In einem BE sind zudem die Bewegungen langsamer als im Versuch und durch Vibrationen überlagert, so daß sich die Reibkraft noch weiter vermindern wird. Während der Standzeit des BE verändert sich das Spiel. Spielvergrößernd wirkt der Verschleiß in den Kontaktflächen, der weniger durch die hier untersuchten Bewegungen als vielmehr durch Schwingungen bestimmt wird. Spielverkleinernd wirken das Kriechen der Hülle aufgrund der Innendruckbeanspruchung und die Differenz im Strukturmaterialschwellen zwischen Gitter und Can. Das sind Effekte, deren quantitative Auswirkungen noch unsicher sind. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand über das Schwellen ist damit zu rechnen, daß sich das Spiel im Betrieb eher verkleinern wird als vergrößern, so daß das relativ große Spiel von 0,11 mm, wie es in den Versuchen 2.* vorhanden war, gerechtfertigt ist.

Die kritische Reibkraft, bei der die Klemmwirkung einsetzt, wurde oben mit 60-80 kp für das Wabengitter und mit 55 kp für das Rhombusgitter unter Beachtung der jeweiligen Befestigung angegeben. Diese Daten sollten nur als grobe Richtwerte angesehen werden, da sie sich nur auf jeweils einen Versuch stützen. Sie zeigen aber, daß sie bei zu kleinem Spiel oder bei ungünstigen Reibverhältnissen praktisch

erreicht werden können. Der etwas höhere Wert für die Wabengitter gegenüber den erheblich steiferen Rhombusgittern läßt sich außer durch die unterschiedliche Aufhängung dadurch begründen, daß beim Wabengitter die Kontaktstellen in der neutralen Biegebene liegen und somit bei kleinen Durchbiegungen die Gittermaschen nicht verengt werden, im Gegensatz zu den Rhombusgittern.

Der anfängliche Reibkraftanstieg während der ersten Hübe, der bei den Versuchen in Na nur schwach, bei denen in Luft und Ar stärker ausgeprägt war, ist auf Oberflächenveränderungen zurückzuführen. Solche Veränderungen können sein: Beseitigung von "schmierenden" Rückständen, Abrieb der oxidierten Oberflächenschicht sowie Aufrauungen. Effekte dieser Art sind im Versuch schwer zu erfassen. Sie erklären die mangelhafte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

5. Erfahrungen im Umgang mit BE-Attrappen in Na

Nach Beendigung des Versuches kühlte das Na im Versuchsbehälter auf ca. 400°C ab. Bei dieser Temperatur wurde der Behälter entleert und danach weiter abgekühlt. Der Ausbau des Versuchseinsatzes erfolgte bei $T \leq 50^{\circ}\text{C}$. Reste von Na, die beim Absenken des Na-Spiegels aus Spalten und von waagerechten Flächen nicht abgelaufen waren, begannen sofort zu reagieren. Abb. 9 zeigt das Versuchsbündel und einen Blick in den Sechskantkasten einige Minuten nach dem Ausbau aus dem Behälter.

Das Bündel ließ sich nach dem Lösen der Gitter vom Kasten leicht herausziehen. Ein Verkleben war nicht festzustellen. Auch die Schrauben M 10 am Flansch und M 4 für die Abstandshalter-Befestigung konnten ohne Schwierigkeiten vor der Reinigung gelöst werden.

Gereinigt wurden die Teile nach den ersten Versuchen mit einem Wasserstrahl, später mit Dampf. Bei der Reinigung mit Wasser führten Na-Reste, die in den Zwickeln der Gitter haften geblieben waren (Größenordnung 1 g/Gitter), zu kleinen Explosionen, die aber die Teile nicht beschädigten. Die Dampfreinigung ist vorzuziehen.

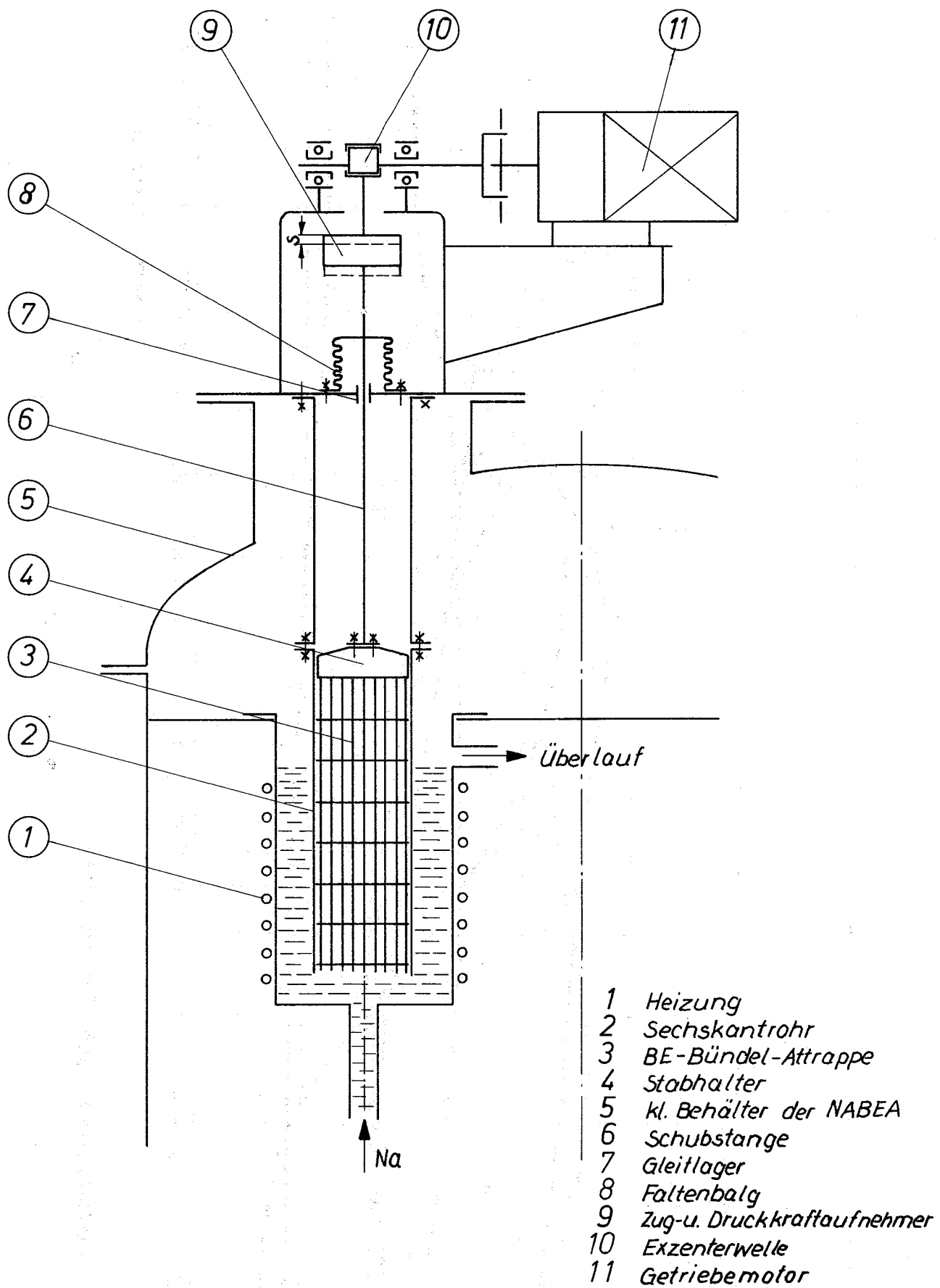


Abb.1: Prüfapparatur

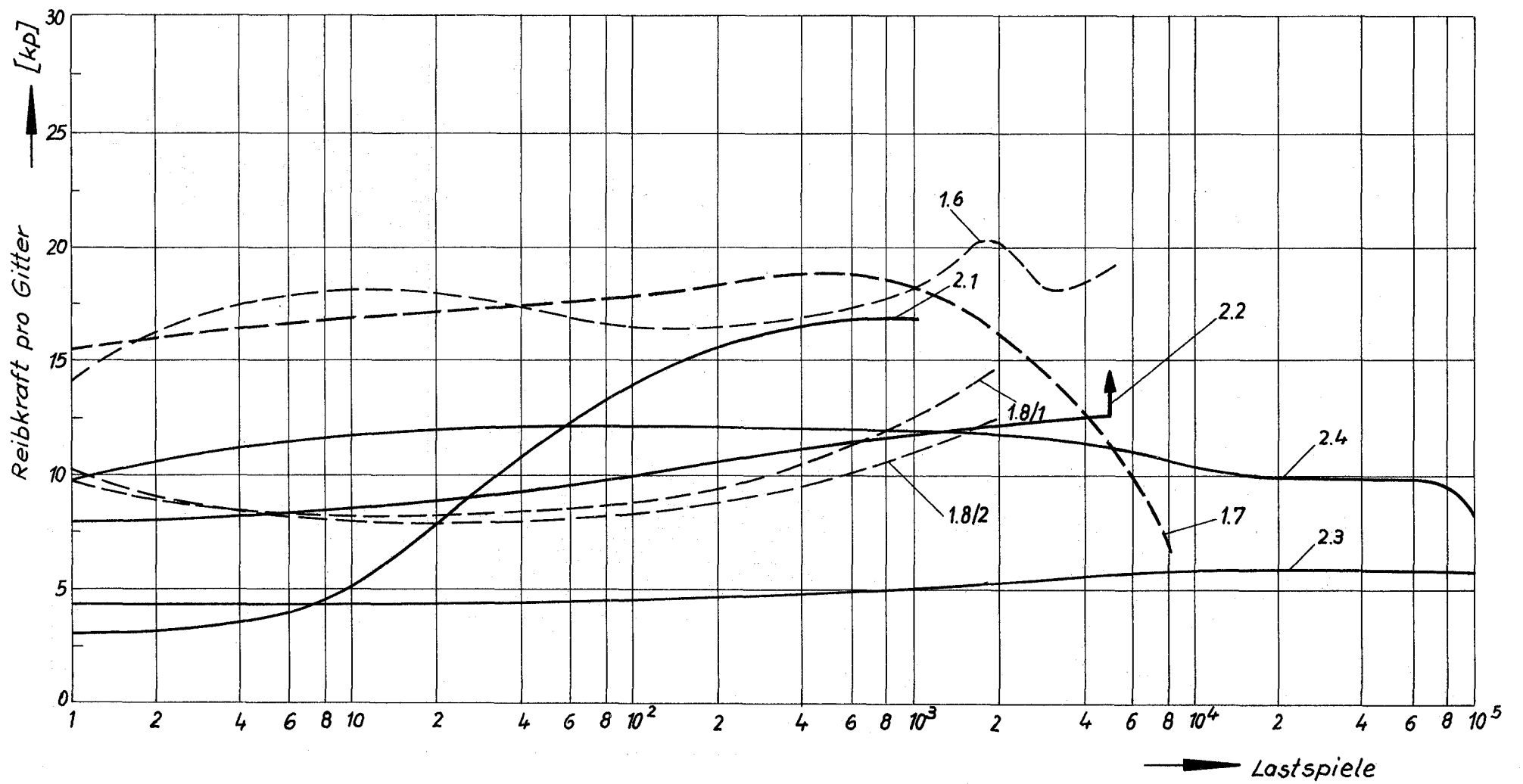


Abb. 2: Reibkraftamplitude für ein Gitter

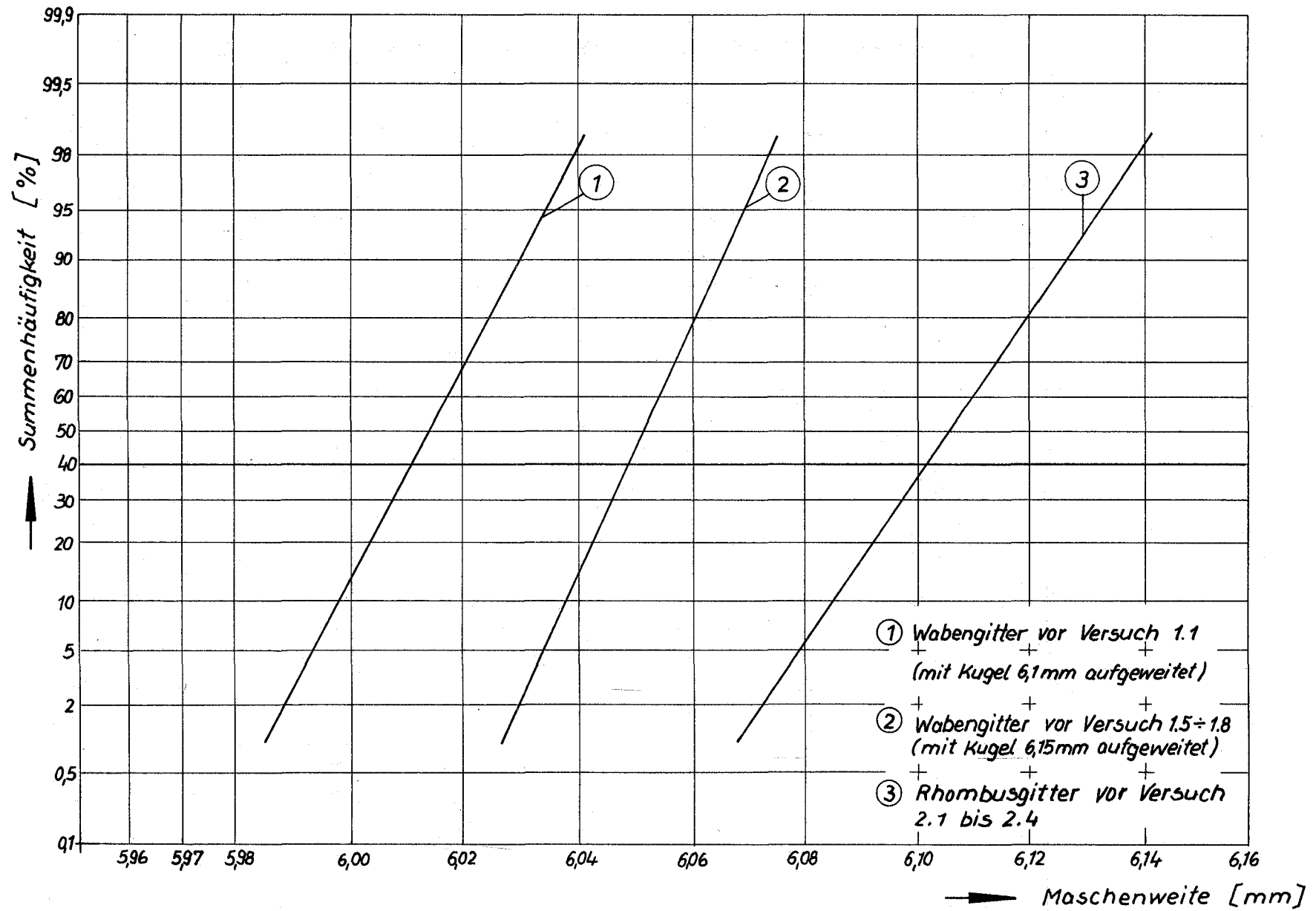


Abb. 3: Summenhäufigkeit der Gitter-Maschenweite im Neuzustand

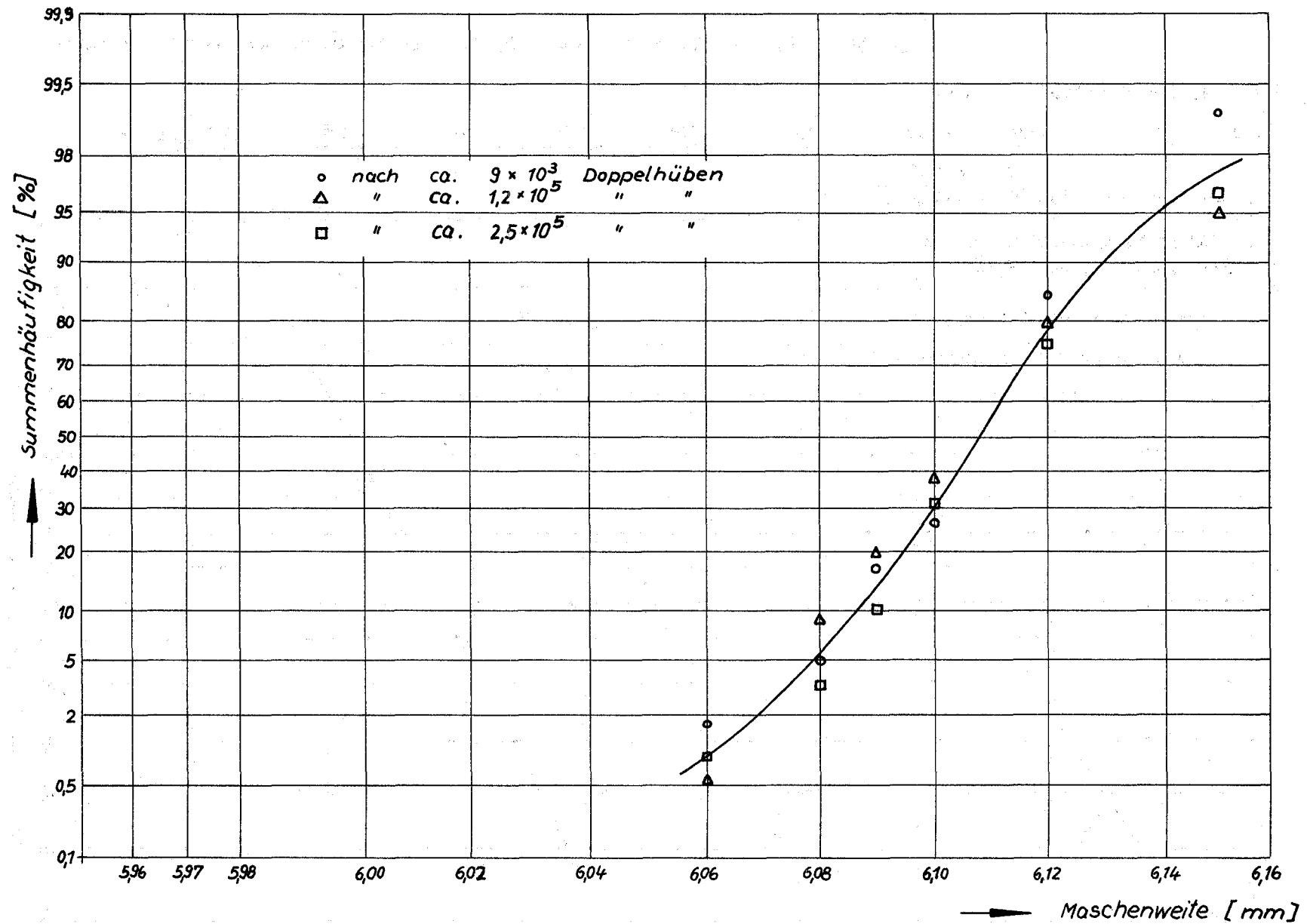
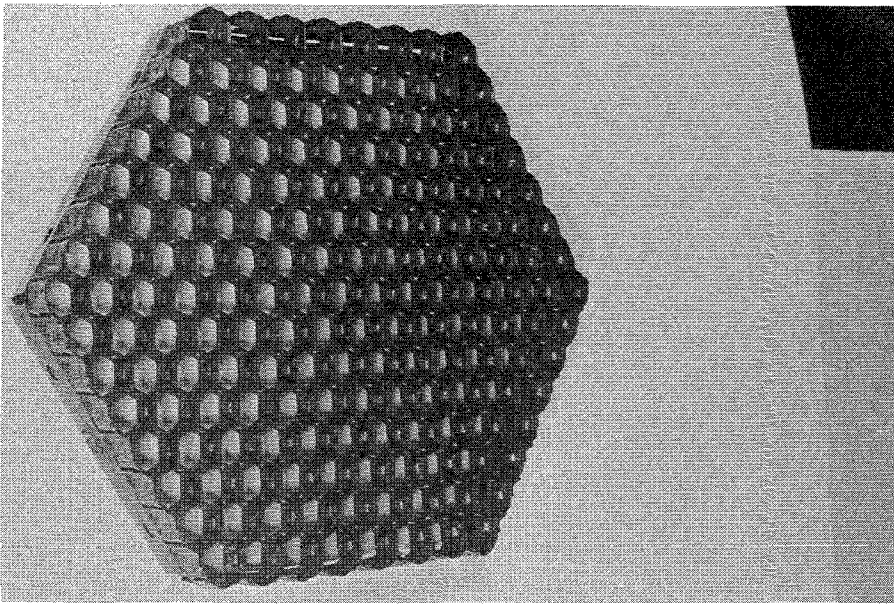
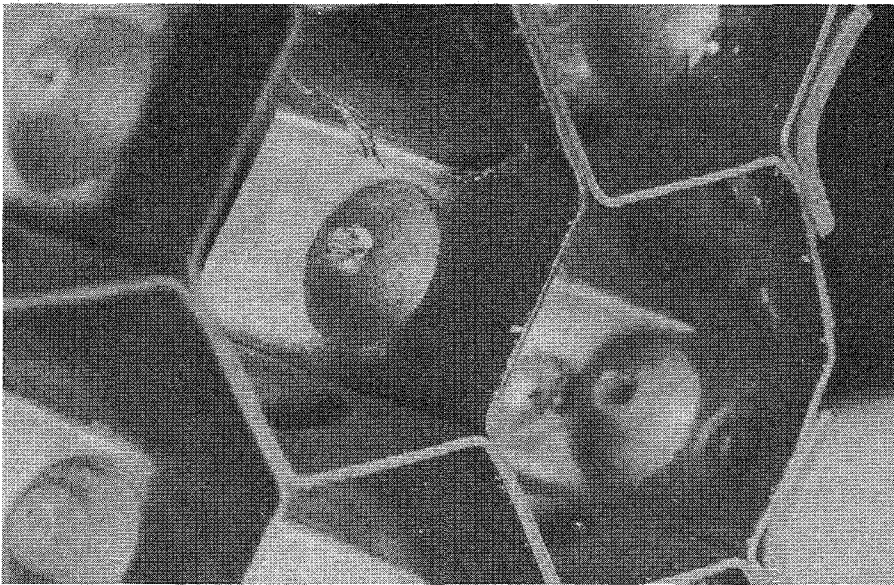


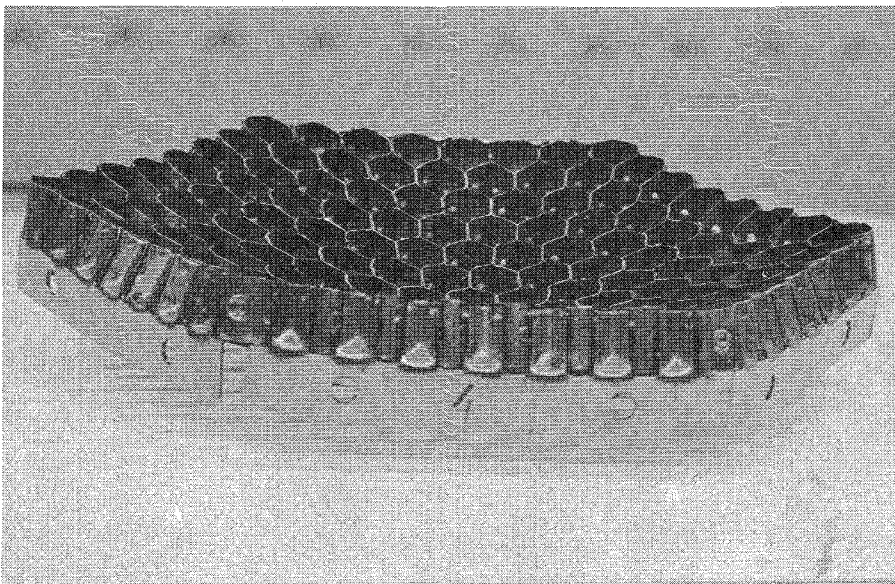
Abb. 4: Häufigkeit der Maschenweite in den Gittern nach den Versuchen 2.*



a)



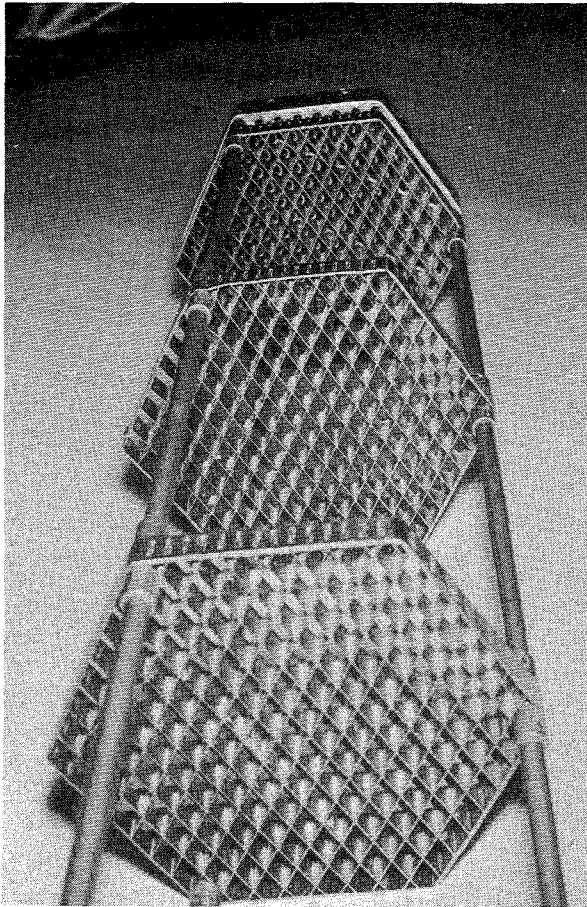
b)



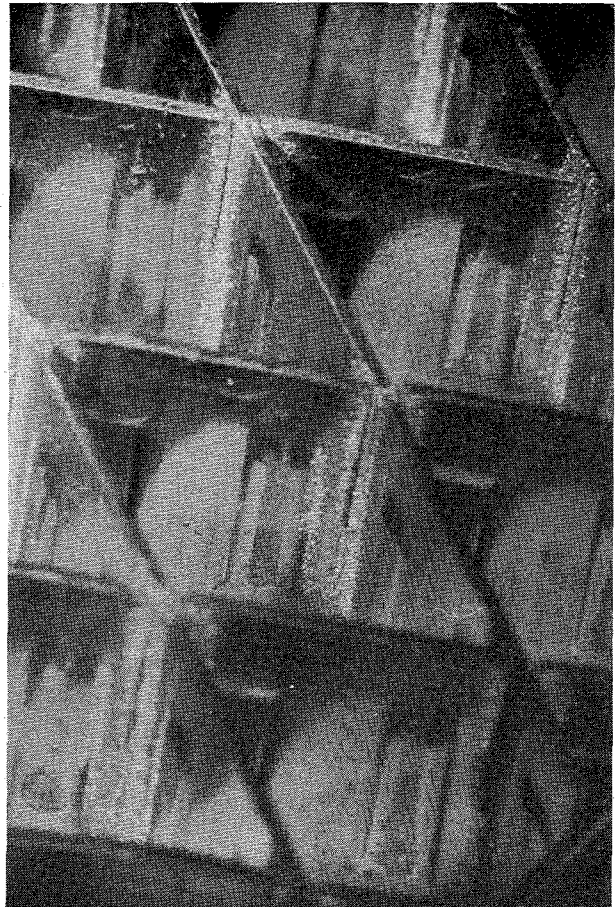
c)

Abb. 5: Wabengitter

a) Gesamtansicht, b) typische Reibstellen nach Versuch 1 . 2
c) Gitter verbogen nach Versuch 1 . 1



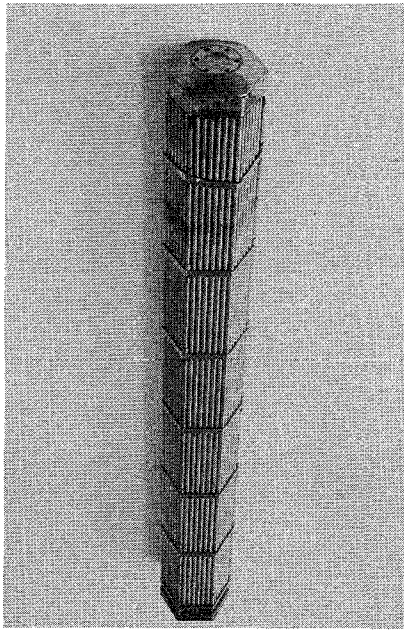
a)



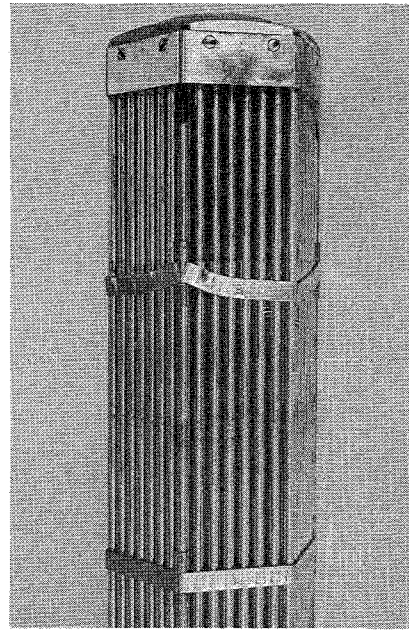
b)

Abb. 6: Rhombusgitter

- a) Rhombusgitter an Skelettstäben
befestigt
- b) Ausschnitt mit typischen Reibstellen
(ca. 10 fach)



a)



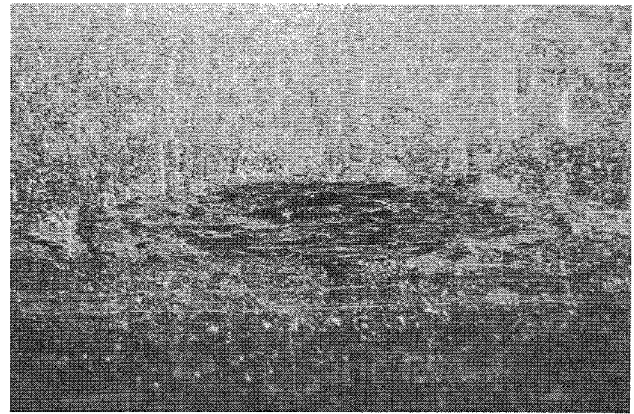
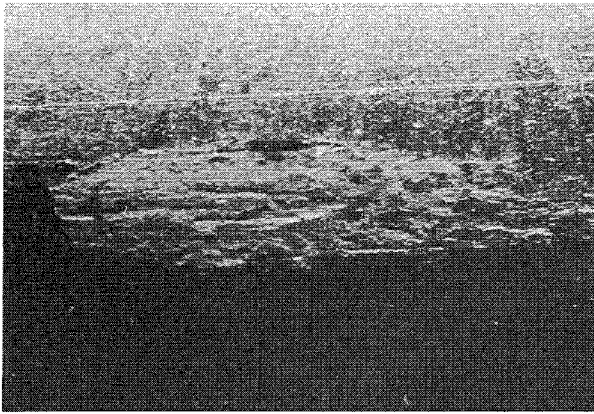
b)



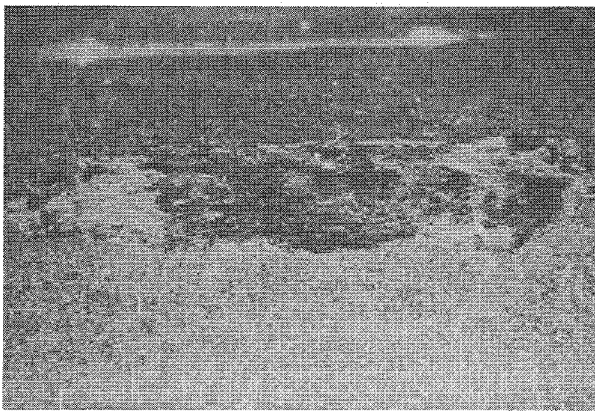
c)

Abb. 7: Stabbündel nach Versuch 2 . 2

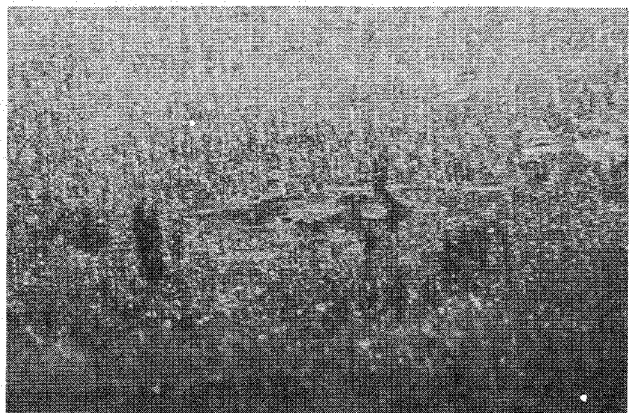
- a) Gesamtansicht
- b) Stabhalter
- c) defektes Gitter



a)



b)



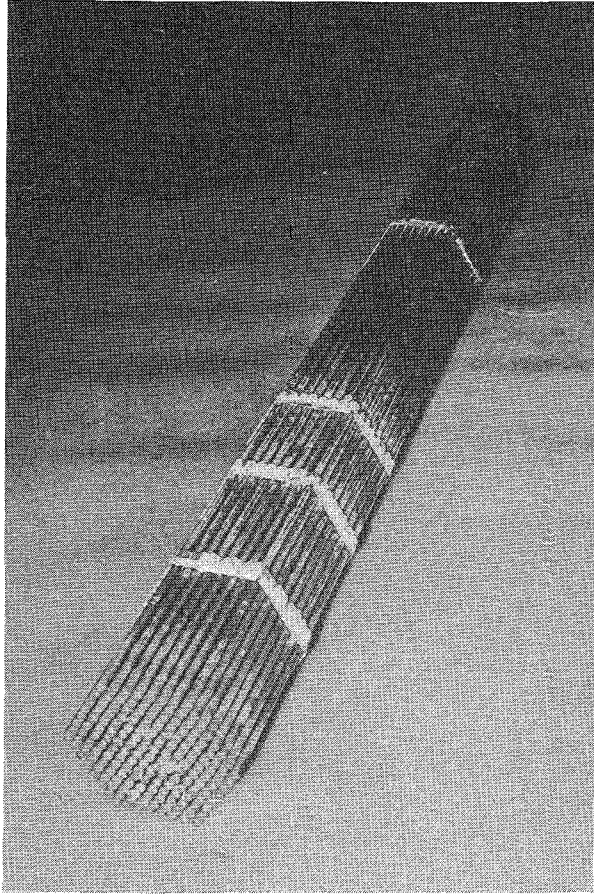
c)

Abb. 8: Diverse Reibstellen an Stäben (ca. 10 fach)

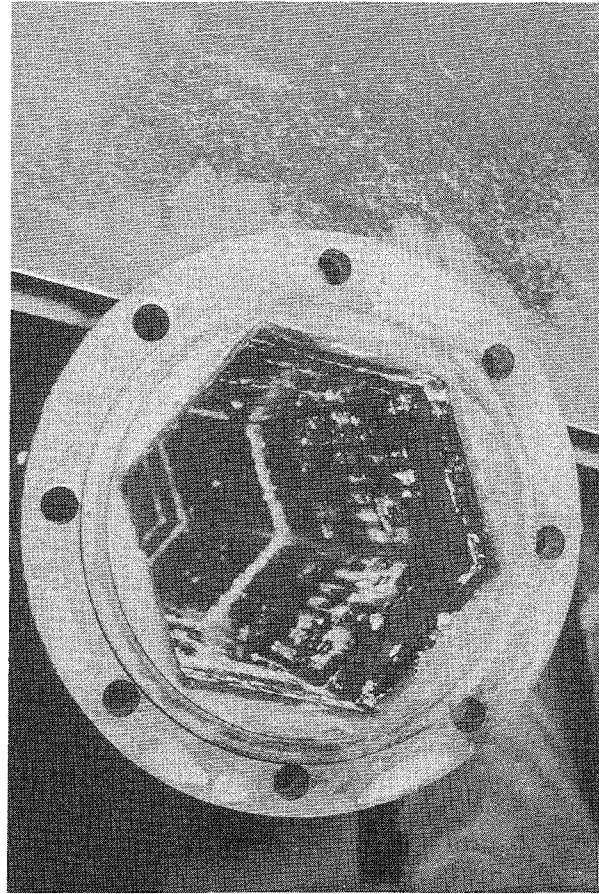
a) Extreme Reibstellen nach $1,2 \cdot 10^5$ Spielen (Vers. 2 . 3)

b) Extreme Reibstellen nach $2,5 \cdot 10^5$ Spielen (Vers. 2 . 4)

c) Charakteristische Reibstellen nach $2,5 \cdot 10^5$ Spielen



a)



b)

Abb. 9: Versuchsojekt unmittelbar nach Ausbau
aus Na - Behälter

- a) Stabbündel
- b) Sechskantkasten

