



**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH**  
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG  
**Institut für Reaktorentwicklung**

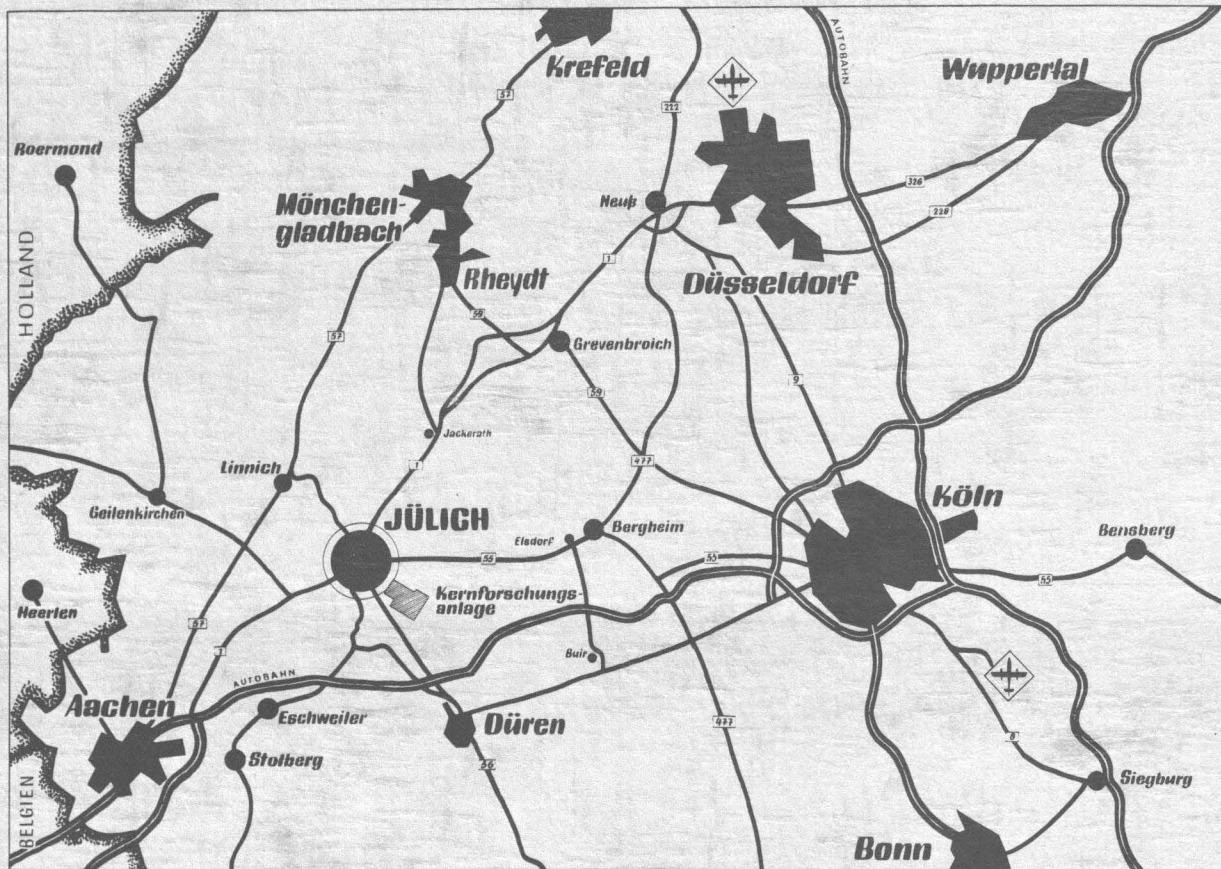
**Über Versuche**  
**zu einem neuen Abschaltstabskonzept**  
**für den Kugelhaufenreaktor**

von

K. H. Hammelmann, R. Hecker, M. Galka, H. Hellinger,  
W. Tschakert und G. Keintzel

**Jül - 622 - RG**  
**Oktober 1969**

Als Manuskript gedruckt



**Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 622**

Institut für Reaktorentwicklung Jül - 622 - RG

Dok.: Reactors, Pebble Bed (300 MWe) - Control Rod  
Thorium High-Temperature Reactor - Control Rod

DK: 621.039.54 - 49 : 621.039.562.24  
621.039.52.034.3 : 536.45 : 621.039.562.24

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,  
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Über Versuche  
zu einem neuen Abschaltstabkonzept  
für den Kugelhaufenreaktor**

von

K. H. Hammelmann, R. Hecker, M. Galka, H. Hellinger,  
W. Tschakert und G. Keintzel

## Inhaltsverzeichnis

### T E I L I      Versuchsabwicklung sowie Bestimmung von Daten zur Auslegung verschiedener Reaktor- komponenten

1. Einleitung
2. Zweck der Versuche
3. Funktionsprinzip des Drehstabes
4. Versuchsaufbau
5. Versuchsablauf
6. Versuchsauswertung
7. Versuchsergebnisse
8. Diskussion der Versuchsergebnisse
9. Versuchsfortführung
10. Wertetabellen I - IV
11. Skizzen und Fotos
12. Diagramme, Abbildungen 1 - 14

### T E I L II      Statistische Auswertung der Versuche zur Bestimmung der Brennelementbruchrate

1. Einleitung
2. Versuchsbedingungen
3. Versuchsauswertung
4. Entwicklung des Transformationsgesetzes
5. Extrapolation auf Reaktorbedingungen
6. Bruchratenberechnung
7. Bruchratenwerte
8. Abbildungen 1 - 6

### Nachtrag

1. Anhang I
2. Anhang II



# **TEIL I**

**Versuchsabwicklung sowie Bestimmung von Daten  
zur Auslegung verschiedener Reaktorkomponenten**

## 1. Einleitung

Für die Steuerung und Abschaltung des 300 MWe Thorium-Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktors wurde das Konzept der freieindringenden Absorberstäbe (Hubstäbe) entwickelt <sup>(1)</sup>. Es sind also keine Kanäle da, welche die Stäbe im Reaktorcore führen. Dadurch kommt es zu einem direkten Kontakt von Absorberstab und Brennelement. Bei jedem Abschalt- oder Regelvorgang werden somit die Brennelemente und Absorberstäbe einer mechanischen Belastung ausgesetzt. Versuche mit Hubstäben, die bei BBK-Reaktorbau GmbH <sup>(2)</sup> durchgeführt wurden, haben ergeben, daß die Belastungen für Brennelemente und Stäbe im zulässigen Bereich liegen. Wie bei jeder technischen Entwicklung ist man jedoch bestrebt, den Sicherheitsabstand zwischen Kugelbruchlast und tatsächlich auftretender Belastung so groß wie möglich zu halten. Dies scheint mit verschiedenen Methoden möglich. Eine davon ist, drehend einfahrende Stäbe zu verwenden. Aufgrund von theoretischen Erwägungen kam man zu dem Schluß, daß ein Stab mit einem schraubenförmigen Oberflächenprofil, welcher drehend in den Kugelhaufen gefahren wird (womit eine gewisse Förderwirkung und damit Auflockerung des Kugelbettes verbunden ist) geringere Belastungen für Brennelement und Stab hervorrufen würde als der Hubstab. Diese Erwartungen wurden durch Vorversuche am 1:10-Modell bestätigt. In dem folgenden Bericht wird nur über Versuche mit drehend einfahrenden Absorberstäben am Modell im Maßstab 1:1 berichtet, die bei der KFA-Jülich im Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt wurden.

## 2. Zweck der Versuche

Die Versuche am Modell 1:1 dienten vor allem zur Ermittlung der Kräfte auf Stab und Silo, der Bestimmung des notwendigen Drehmomentes und damit der Beschaffung von Auslegungsdaten für den Antrieb. Besonderes Augenmerk wurde der Messung der Kugel-einzelbelastungen gewidmet. Bei der Planung des Versuches mußte darauf geachtet werden, daß die Verhältnisse, die unter Reaktorbetriebsbedingungen vorliegen, soweit wie möglich approximiert wurden. Dies war in einigen Punkten nicht möglich, da der erforderliche Aufwand sonst zu groß gewesen wäre.

So soll der Reaktor mit 36 Stäben geregelt werden; bei den hier beschriebenen Versuchen beschränkten wir uns auf 2 Stäbe. Beim Reaktorbetrieb wird als Kühlgas Helium mit einem Druck von 40 atü und einer mittleren Temperatur von 600° C benutzt. Im Versuch mußte unter Raumatmosphäre (Luft: 20° C, 1 ata) gefahren werden. Da nun der Reibwert der Graphitkugeln im ungünstigsten Fall unter Reaktorbedingungen von  $\mu_1 = 0,15$  auf  $\mu_2 = 0,6$  steigt, mußte eine Möglichkeit gefunden werden, den Reibwert der Versuchselemente zu verändern. Aus diesem Grunde wurden Graphitkugeln mit einem Reibwert von  $\mu = 0,15$  und Steatitkugeln mit einem solchen von  $\mu = 0,3$  eingesetzt. Steatitkugeln haben außerdem ein spezifisches Gewicht, das um den Faktor 1,67 höher liegt als das von Graphitkugeln. Diese Wichteerhöhung simuliert die scheinbare Wichteerhöhung bei späterem Reaktorbetrieb, hervorgerufen durch den Gasdruckabfall im Core. Anhand der folgenden Tabelle soll eine Gegenüberstellung von Reaktorbedingungen und Versuchsbedingungen erfolgen.

|                                     | Reaktorbedingungen        | Versuchsbedingungen                               |
|-------------------------------------|---------------------------|---|
| Anzahl der Absorberstäbe            | 36                        | 1 und 2   |
| Durchmesser des Stabes              | 130 mm                    | 130 mm  |
| Durchmesser und Höhe des Cores (mm) | 5600 Ø<br>4550 h          | 1000 Ø, 4550 h Einstab<br>1500 Ø, 4550 h Zweistab |
| Durchmesser d.Kugeln                | 60 mm                     | 60 mm   |
| Material der Kugeln                 | Graphit                   | Graphit u.Steatit                                 |
| Reibwert der Kugeln                 | 0,15 - 0,6                | 0,15 und 0,3                                      |
| Kühlgas                             | Helium, 40 atü,<br>600° C | Luft, 1 ata, 20° C                                |
| Förderverhältnis beim Einfahren     | $\varphi = 1,5$           | $\varphi = 1,5$                                   |
| Förderverhältnis beim Ausfahren     | $\varphi = - 1,0$         | $\varphi = - 1,0$                                 |

Es wurden Versuche mit Graphitkugeln und Steatitkugeln unter gleichen Bedingungen gefahren. So war es möglich, zunächst den kombinierten Einfluß der Reibung und der Wichte kennenzulernen und auf Reaktorbedingungen zu extrapolieren. Um die gegenseitige Beeinflussung der Absorberstäbe zu testen, wurden Versuche mit einem Stab am 1,0 m Silo und Versuche mit 2 Stäben am 1,5 m Silo gefahren und miteinander verglichen. Versuche mit verschiedener Hubgeschwindigkeit sollten zeigen, ob die Einfahrgeschwindigkeit Kräfte und Momente beeinflusst. Bei den Vorversuchen am Versuchsstand (Maßstab 1:10)<sup>(3)</sup> wurden drei Stabformen für den Versuch im Maßstab 1:1 ausgewählt. Es waren dies der eingängig vollgewendelte, der eingängig halb-gewendelte und der zweigängig halb-gewendelte Drehstab (siehe Skizzen 1 und 2).

### 3. Funktionsprinzip des Drehstabes

Der Drehstab hat seinem Aussehen und seiner Wirkungsweise nach Ähnlichkeit mit einer Förderschnecke (siehe Skizzen 1 und 2). Wenn der Stab drehend in den Kugelhaufen gefahren wird, werden die kugelförmigen Brennelemente nach oben gefördert. Auf diese Weise wird der Kugelhaufen aufgelockert und das Eindringen des Stabes erleichtert. Beim Hubstab werden die Kugeln beiseite gedrückt, beim Drehstab gefördert. Durch diesen Fördereffekt wird der Drehstab in den Kugelhaufen gezogen. Der Hubstab muß zum Hubende (größte Eindringtiefe) mit etwa + 6 Mp in den Kugelhaufen gedrückt werden, während der Drehstab unter gleichen Bedingungen mit etwa - 1,0 Mp in den Kugelhaufen gezogen wird. Es erwies sich als zweckmäßig, alle gemessenen Größen bei den Drehstabversuchen auf das sogenannte Förderverhältnis zu beziehen, das wie folgt definiert ist:

$$\text{Förderverhältnis} = \varphi = \frac{\text{Drehzahl} \cdot \text{Steigung}}{\text{Hubgeschwindigkeit}}$$

Dieses Förderverhältnis  $\varphi$  hat entscheidenden Einfluß auf Kräfte und Momente am Stab. So hat sich am 1:10-Versuchsstand



gezeigt, daß bei einem Förderverhältnis  $\varphi < 1,2$  das Drehmoment sehr hoch ist und die Zugkraft am Stab in eine Druckkraft übergeht<sup>(3)</sup>. Bei einem Förderverhältnis  $\varphi > 2,0$  ist der Durchmischungseffekt ungünstig, d.h. es besteht die Gefahr, daß einmal abgebrannte Brennelemente, die im unteren Teil des Cores liegen, nach oben gefördert werden<sup>(4)</sup>. Für die Versuche am 1:1-Modell wurden aus diesem Grunde die Förderverhältnisse  $\varphi_1 = 1,5$  und  $\varphi_2 = 2,0$  benutzt.

#### 4. Versuchsaufbau (s. Zeichnungen Z 30/528, Z 30/529, Z 30/533)

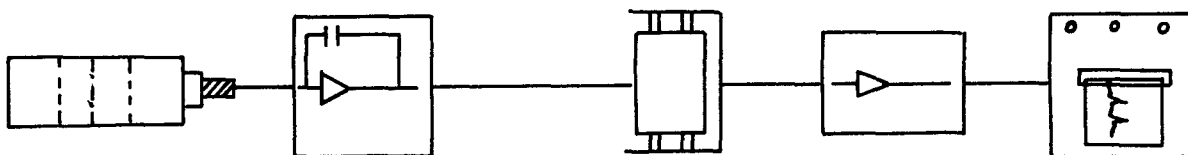
Der Drehstab wurde rotierend in den Kugelhaufen gefahren. Dabei mußten die Drehzahl und die Hubgeschwindigkeit stufenlos verändert werden. Für den Antrieb standen Hydraulikpumpen zur Verfügung. Zwei Hydraulikpumpen wurden für den Drehantrieb der zwei Drehstäbe benutzt, während die dritte Pumpe das Hubwerk bediente. Es konnten also die Drehzahlen der beiden Stäbe unabhängig voneinander verändert werden, nicht so die Hubgeschwindigkeit.

Der Silo, welcher zur Aufnahme der kugelförmigen Brennelemente dient, sowie das Hubwerk wurden in einem etwa 20 m hohen Mannesmann-Stahlrohrgerüst befestigt. Der Drehstabantrieb wurde mit dem Hubwerk verschraubt, im Stahlgerüst geführt und gegen Verdrehen gesichert. Aus Montagegründen wurde das Stahlgerüst in 7 Bühnen unterteilt. Der Abstand der einzelnen Bühnen betrug 2,00 m. Die 4,0 m und 10,0 m Bühne wurde zur Unterbringung von Meßgeräten ausgenutzt.

Bei Reaktorbetrieb werden kontinuierlich Brennelemente abgezogen. Auch bei dem Versuch wurden nach jedem Einfahrtvorgang etwa 2000 Kugeln abgezogen und mit einem Förderband wieder in den Silo gefördert. Am Siloboden befindet sich ein Schieber, der über ein Ablaufrohr Verbindung mit dem Förderband hat. Das Abziehen und Wiedereingeben in den Silo wird mit "Umwälzung des Kugelhaufens" bezeichnet.

Am gesamten Versuchsstand waren 10 Meßstellen (siehe Skizzen 4 und 5). Drei Meßdosen zur Messung der Wanddruckkräfte befanden sich am Silo. Die Gesamtzugkraft eines Stabes wurde von Meßdosen, die innerhalb der Drehstablagerung angeordnet waren, gemessen. Eine weitere Zugmeßdose oberhalb des Antriebes nahm die Zugkräfte zweier Stäbe auf. Das Drehmoment wurde zwischen Lagerung und Antrieb von einer Drehmomentmeßwelle erfaßt. Zur Messung der Kugeleinzelbelastung waren 4 Meßdosen am Stab angeordnet (siehe Skizze 2). Aus Platzgründen konnten hier nur Quarzmeßdosen untergebracht werden. Diese piezo-elektrischen Kraftaufnehmer, welche bei einem Meßbereich von 0 - 1,5 Mp eine Größe von 14 Ø x 8 mm haben, geben bei Druck und Druckentlastung eine Ladung ab. Bei drehendem Stab muß dieses Ladungssignal ohne große Verluste über einen Schleifring übertragen werden. Bei der Kleinheit des Ausgangssignals ist dies nicht ohne weiteres möglich. Es wurden deshalb Verstärker (Type: Modell 553 A, Fa. Kistler) in den Drehstab eingebaut. Diese Verstärker wandeln eine Ladung von 10 000 pC in eine Spannung von 2,5 Volt und einen Strom von 40 mA um. Dies entspricht einer Nennlast von 625 kp. Auch für die Messung der Zugkraft innerhalb der Drehstablagerung wurden Quarzmeßdosen eingesetzt. Zur Messung der übrigen Kräfte wurden Meßdosen auf Dehnungsmeßstreifenbasis verwendet. Zur Messung der Kugeleinzelbelastungen wurden als Registriergeräte Schnell-schreiber benutzt. Diese Schreiber sind in der Lage, Impulse von 1,2 msec Dauer zu registrieren. Bei einer maximalen Drehzahl des Stabes von 200 min<sup>-1</sup> genügt ein einfacher Schreiber nicht mehr. Alle anderen Meßstellen wurden mit Kompensationsschreibern als Registriergeräte bestückt. Die Meßkette für die Messung der Kugeleinzelbelastung setzt sich wie folgt zusammen:

Druckaufnehmer    Vorverstärker    Schleifring    Verstärker    Registriergerät



Nach Ablauf der ersten Versuchsreihe zeigte sich, daß der arithmetische Mittelwert der Meßstellen  $Mst_2$ ,  $Mst_3$  und  $Mst_4$  wesentlich niedriger war als der von  $Mst_1$ . Man konnte deshalb auf diese 3 Meßstellen verzichten und brauchte nur noch  $Mst_1$ , die sogenannte Spitzenkraft, zu erfassen.

## 5. Versuchsablauf

Eine Vorauswahl der freien Parameter wurde mit Hilfe des 1:10-Modells getroffen<sup>(3)</sup>. Auf diese Weise war es möglich, die Parameter für den 1:1-Versuchsstand auf wenige zu beschränken. Die noch freien Parameter für den 1:1-Versuchsstand sind

- 1) Drehstab eingängig und zweigängig
- 2) Hubgeschwindigkeit  $V$
- 3) Förderverhältnis  $\varphi_1 = 1,5$ ;  $\varphi_2 = 2,0$
- 4) Reibwert  $\mu$
- 5) Einstab- und Mehrstabantrieb

Diese freien Parameter waren Grundlage für das gesamte Versuchsprogramm. Das Gesamtprogramm wurde in drei Teile unterteilt.

Teil I sollte den Einfluß der Hubgeschwindigkeit und des Förderverhältnisses  $\varphi$  aufzeigen.

Konstante Größen beim Versuchsprogramm Teil I:

- 1) Kugelmateriale: Graphit
- 2) Drehstab zweigängig halbgewendelt
- 3) Silodurchmesser: 1,0 m (1 Stab)
- 4) Stabspitze I
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens

Versuchsprogramm Teil I

| Versuch Nr.    | V (cm/s) | n (min <sup>-1</sup> ) | $\varphi$ | Anzahl d. Versuche | Stabspitze Mst |
|----------------|----------|------------------------|-----------|--------------------|----------------|
| E <sub>1</sub> | 5,0      | 48                     | 2,0       | 5                  | 1,3 u. 4       |
| E <sub>2</sub> | 5,0      | 36                     | 1,5       | 5                  | 1,3 u. 4       |
| E <sub>3</sub> | 7,5      | 72                     | 2,0       | 5                  | 1              |
| E <sub>4</sub> | 7,5      | 54                     | 1,5       | 5                  | 1              |
| E <sub>5</sub> | 10,0     | 96                     | 2,0       | 5                  | 1 u. 4         |
| E <sub>6</sub> | 10,0     | 72                     | 1,5       | 60                 | 1,2,3 u. 4     |
| E <sub>7</sub> | 13,5     | 119                    | 1,85      | 5                  | 1              |
| E <sub>8</sub> | 13,5     | 96                     | 1,5       | 5                  | 1              |

Der Stab wurde nach jedem Einfahren mit  $\varphi = - 1$ ,  $n = 48 \text{ min}^{-1}$  aus dem Kugelhaufen herausgezogen.

Aus diesem Programm wurde für das folgende Programm Teil II die optimale Hubgeschwindigkeit  $V = 10 \text{ cm/sec}$  ausgewählt.

Teil II sollte der Auswahl der optimalen Drehstabspitze dienen (siehe Skizze 3 und Abbildungen 4 und 5). Schon bei den Hubstäben konnte man erkennen, daß die verschiedenen Stabspitzen unterschiedliche Spitzenkräfte aufwiesen.

Konstante Größen bei Versuchsprogramm Teil II:

- 1) Drehstab zweigängig halbgewandelt
- 2) Silodurchmesser: 1,5 m (2 Stäbe)
- 3) Hubgeschwindigkeit  $V = 10 \text{ cm/sec}$



Versuchsprogramm Teil II

| Versuch Nr.          | v (cm/s) | $n_{\text{Stab}}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) | $\varphi$ | Stabmeßdose | Spitzenform (s. Skizze 3) | Kugelmateriale | Anzahl d. Versuche |
|----------------------|----------|---|-----------|-------------|---------------------------|----------------|--------------------|
| E <sub>1</sub> m.U.  | 10       | 96                                      | 2,0       | 1 u. 2      | I                         | Steatit        | 10                 |
| E <sub>2</sub> m.U.  | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | I                         | "              | 70                 |
| E <sub>3</sub> o.U.  | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | I                         | "              | 10                 |
| E <sub>4</sub> o.U.  | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | I                         | "              | 10                 |
| E <sub>5</sub> m.U.  | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | II                        | "              | 10                 |
| E <sub>6</sub> m.U.  | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | II                        | "              | 170                |
| E <sub>7</sub> o.U.  | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | II                        | "              | 10                 |
| E <sub>8</sub> o.U.  | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | II                        | "              | 10                 |
| E <sub>9</sub> m.U.  | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | III                       | "              | 10                 |
| E <sub>10</sub> m.U. | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | III                       | "              | 70                 |
| E <sub>11</sub> o.U. | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | III                       | "              | 10                 |
| E <sub>12</sub> o.U. | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | III                       | "              | 10                 |
| E <sub>13</sub> m.U. | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | IV                        | "              | 10                 |
| E <sub>14</sub> m.U. | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | IV                        | "              | 10                 |
| E <sub>15</sub> o.U. | 10       | 96                                      | 2,0       | 1.u.3       | IV                        | "              | 10                 |
| E <sub>16</sub> o.U. | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | IV                        | "              | 10                 |
| E <sub>17</sub> m.U. | 10       | 72                                      | 1,5       | 1.u.3       | II                        | Graphit        | 100                |

Der Stab wurde nach jedem Einfahren mit  $\varphi - 1$ ;  $n = 48 \text{ min}^{-1}$  aus dem Kugelhaufen gezogen.

Nach Auswahl der optimalen Stabspitze (siehe Abb. 4 und 5) wurde das Versuchsprogramm Teil III gefahren.

Versuchsprogramm Teil III

1) Silodurchmesser: 1,0 m (1 Stab);  
 3) mit Umwälzung des Kugelhaufens

2) Stabspitze II;

| Versuch Nr.          | v (cm/s)                                | $n_{\text{Stab}}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) | $\varphi$ | Spitzenform | Stabform   | Kugelmateriale | Anzahl d. Versuche |
|----------------------|---|---|-----------|-------------|------------|----------------|--------------------|
| E <sub>18</sub> m.U. | 10                                      | 96                                      | 2,0       | II          | zweigängig | Steatit        | 10                 |
| E <sub>19</sub> m.U. | 10                                      | 72                                      | 1,5       | II          | "          | "              | 100                |
| E <sub>20</sub> m.U. | 20 cm/s bis 3,5 m Tiefe<br>10 cm/s Rest | 144                                     | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>21</sub> m.U. | 10 cm/s bis 2,0 m Tiefe<br>20 cm/s Rest | 72<br>144                               | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>22</sub> m.U. | 10                                      | 96                                      | 2,0       | II          | "          | Graphit        | 10                 |
| E <sub>23</sub> m.U. | 10                                      | 72                                      | 1,5       | II          | "          | "              | 100                |
| E <sub>24</sub> m.U. | 20 cm/s bis 3,5 m Tiefe<br>10 cm/s Rest | 144<br>72                               | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>25</sub> m.U. | 10 cm/s bis 2,0 m Tiefe<br>20 cm/s Rest | 72<br>144                               | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>26</sub> m.U. | 10                                      | 192                                     | 2,0       | II          | eingängig  | Steatit        | 10                 |
| E <sub>27</sub> m.U. | 10                                      | 144                                     | 1,5       | II          | "          | "              | 100                |
| E <sub>28</sub> m.U. | 16 cm/s bis 3,5 m Tiefe<br>10 cm/s Rest | 230<br>144                              | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>29</sub> m.U. | 10 cm/s bis 2,0 m Tiefe<br>16 cm/s Rest | 144<br>230                              | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>30</sub> m.U. | 10                                      | 192                                     | 2,0       | II          | "          | Graphit        | 10                 |
| E <sub>31</sub> m.U. | 10                                      | 144                                     | 1,5       | II          | "          | "              | 100                |
| E <sub>32</sub> m.U. | 16 cm/s bis 2,0 m Tiefe<br>10 cm/s Rest | 230<br>144                              | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |
| E <sub>33</sub> m.U. | 10 cm/s bis 2,0 m Tiefe<br>16 cm/s Rest | 144<br>230                              | 1,5       | II          | "          | "              | 10                 |

Auch bei dieser Versuchsreihe wurde der Stab mit  $\varphi = -1$ ;  $n_1 = 48 \text{ min}^{-1}$  bzw.  $n_2 = 96 \text{ min}^{-1}$  ausgefahren

### Bemerkungen zu den Versuchsprogrammen

Im Versuchsprogramm Teil II sind Versuche gefahren worden ohne Umwälzung des Kugelhaufens. Man wollte auf diese Weise feststellen, ob der Drehstab im nichtumgewälzten Zustand den Kugelhaufen verdichtet. Außerdem wurden im Versuchsprogramm Teil II dem Silo 206 markierte Kugeln zugegeben. Diese Kugeln wurden vorher genau gewogen. Nach 120 Einfahrtvorgängen sollte eine zweite Wägung den Gewichtsverlust und damit den Abrieb feststellen.

In allen Versuchsprogrammen ist eine Rubrik "Versuchsanzahl" aufgeführt. Bei beispielsweise Versuchsanzahl 10 wurde der Drehstab 10mal drehend etwa 4,20 m tief in den Kugelhaufen eingefahren. Am Hubende wurde die Drehrichtung des Stabes umgekehrt und der Stab wie eine Schraube mit  $\Psi = -1$  aus dem Haufen herausgedreht. Die Einfahrtiefe von 4,20 m wird von Kugelhaufenoberkante aus gerechnet.

### 6. Versuchsauswertung

Nach der Eliminierung der Meßstellen  $Mst_2$  und  $Mst_4$  waren noch 7 Meßpunkte auszuwerten. Von den 3 Meßstellen am Silo, der Drehmomentmeßwelle sowie den Zugdosen zur Messung der Gesamtkraft wurde von 5 bzw. 10 Einfahrtvorgängen einer Versuchsreihe z.B.  $E_{11}$  o.U., der arithmetische Spitzenwert und der arithmetische Mittelwert gebildet, d.h. im ersten Fall wurde der höchste Wert eines jeden Einfahrtvorganges abgelesen und zu einem mittleren Spitzenwert zusammengefaßt. Beim Mittelwert wurden die aus dem Rahmen fallenden Kraftspitzen abgeschnitten und auch hier aus den verbleibenden 10 Werten der Mittelwert gebildet. Bei der Meßstelle  $Mst_1$  konnte diese Auswertmethode nicht angewandt werden, da die Spitzenkraft sich nicht mit wachsender Einfahrtiefe aufbaut wie beispielsweise beim Drehmoment. Es ist jeweils ein Kraftimpuls da, wenn eine Kugel von der Spitze getroffen wird. Hier wurde von allen 100 Einfahrtvorgängen bei z.B.  $E_{17}$  m.U. der arithmetische Spitzenwert gebildet und von allen 100 Versuchen der höchste Wert, der absolute Spitzenwert AS, herausgesucht.

Außerdem wurde dieser Meßpunkt, der die Kugeleinzelnbelastung mißt und wohl als die wichtigste Meßstelle anzusehen ist, statistisch ausgewertet. Diese Auswertmethode wird im zweiten Teil dieser Arbeit samt Ergebnissen beschrieben. Wegen der statistischen Auswertung benötigten wir von dieser Meßstelle im Minimum 60 Versuche. Vor Beginn der Versuchsreihen wurden sämtliche Meßstellen mit definierten Gewichten geeicht; so war es möglich, beim Auswerten von Volt in kp umzurechnen. Im Anhang sind in den Diagrammen 9 bis 14 die Kurven  $x_i$  in Abhängigkeit von der Tiefe T aufgetragen.

### 7. Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse der einzelnen Reihen sind in tabellarischer Form aufgetragen. Aus diesen Tabellen I - VI sind die folgenden Diagramme 1 - 7 gezeichnet worden. Weiterhin sind im folgenden Teil aus den Tabellen I - VI Vergleichstabellen erstellt worden, die nur einen freien Parameter haben. In den Tabellen a und b wird der Versuchsstand Maßstab 1:10 mit dem Maßstab 1:1 verglichen. Es wird zuerst in einer theoretischen Ableitung der Maßstabfaktor M bestimmt.

Gesamtkraft  $P_{ges}$

$$M_P = \frac{P_{1:1}}{P_{1:10}} = \frac{F_{Stab\ 1:1}}{F_{Stab\ 1:10}} \cdot \frac{\text{Coredruckhöhe } 1:1}{\text{Coredruckhöhe } 1:10}$$
$$= \frac{13,0\text{ cm} \cdot 450\text{ cm} \cdot 0,25\text{ kp/cm}^2}{1,3\text{ cm} \cdot 45\text{ cm} \cdot 0,025\text{ kp/cm}^2} = 10^3$$

Beim Drehmoment kommt zur Kraft P noch der Hebelarm r;  $M_d = P \cdot r$ ; somit ist hier der Maßstabfaktor  $M_M = 10^4$



Tabelle a) Vergleich des 1:10-Modells mit dem 1:1-Modell  
unter folgenden gemeinsamen Versuchsbedingungen:

- 1) Kugelmaterial gleiche Wichte und Reibung
- 2) Drehstab eingängig halbgewendelt
- 3) Gleicher Silodurchmesser unter Berücksichtigung des Maßstabfaktors
- 4) Gleiche Hubgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Maßstabfaktors ( $V_1 = 10 \text{ cm/sec}$ )
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 6) Alle Werte sind gemittelte Mittelwerte

|                           | Modell 1:1      |                 | Modell 1:10          |                      |
|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$      | $\varphi = 2,0$      |
| Drehmoment (mkp)          | 51,1            | 46,6            | $85,2 \cdot 10^{-4}$ | $88 \cdot 10^{-4}$   |
| Gesamtkraft (kp)          | -647,1          | -705,1          | $-240 \cdot 10^{-3}$ | $-400 \cdot 10^{-3}$ |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 27,7            | 28,3            | $70 \cdot 10^{-3}$   | $73 \cdot 10^{-3}$   |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 34,9            | 27,6            | $93 \cdot 10^{-3}$   | $102 \cdot 10^{-3}$  |
| Konuskraft (kp)           | 38,0            | 37,2            | $100 \cdot 10^{-3}$  | $104 \cdot 10^{-3}$  |

Tabelle b) Vergleich des 1:10-Modells mit dem 1:1-Modell

- 1) Kugelmaterial gleiche Wichte und Reibung
- 2) Drehstab zweigängig
- 3) Hubgeschwindigkeit (10 cm/sec bzw. 1 cm/sec)
- 4) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 5) Silodurchmesser (1000 mm bzw. 112 mm)
- 6) Alle Werte sind gemittelte Mittelwerte

|                           | Modell 1:1      |                 | Modell 1:10          |                       |
|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$      | $\varphi = 2,0$       |
| Drehmoment (mkp)          | 47,2            | 52,6            | $95,3 \cdot 10^{-4}$ | $59,5 \cdot 10^{-4}$  |
| Gesamtkraft (kp)          | - 719,6         | - 536,1         | $-900 \cdot 10^{-3}$ | $- 400 \cdot 10^{-3}$ |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 32,5            | 23,0            | $62 \cdot 10^{-3}$   | $59 \cdot 10^{-3}$    |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 49,7            | 19,8            | $163 \cdot 10^{-3}$  | $77 \cdot 10^{-3}$    |
| Konuskraft (kp)           | 55,0            | 29,4            | $172 \cdot 10^{-3}$  | $101 \cdot 10^{-3}$   |

Die nun folgenden Vergleichstabellen sollen eine Extrapolation auf Reaktor-Verhältnisse ermöglichen. Tabellen c) und d) zeigen die Beeinflussung der Stäbe untereinander; also Einstab-antrieb und Gruppenantrieb.

Tabelle c) Vergleich der mittleren Spitzenwerte  
Einstab Graphit und Zweistab Graphit

- 1) Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec
- 2) Drehstab zweigängig halbgewendelt
- 3) Kugelmaterial Graphit
- 4) Stabspitze II
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens

|                           | E i n s t a b   | Z w e i s t a b |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 1,5$ |
| Drehmoment (mkp)          | 100,1           | 96,5            |
| Gesamtkraft (kp)          | - 1107,0        | - 935,0         |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 55,7            | 154,0           |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 63,4            | 121,0           |
| Spitzenkraft (kp)         | 243,0           | 289,0           |

Tabelle d) Vergleich der mittleren Spitzenwerte  
Einstab Steatitkugeln und Zweistab Steatitkugeln

1) Kugelmateriale Steatit, sonst wie unter Tabelle c)

|                           | Einstab         |                 | Zweistab        |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ |
| Drehmoment (mkp)          | 130,7           | 98,8            | 101,6           | 100,9           |
| Gesamtkraft (kp)          | - 963,5         | -1156,7         | -1030,0         | - 970,0         |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 113,7           | 69,3            | 146,3           | 147,7           |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 125,4           | 56,5            | 182,8           | 176,3           |
| Spitzenkraft (kp)         | 438,3           | 352             | 484,1           | 365,0           |

In den Tabellen e) bis g) wird das Kugelmateriale als Parameter benutzt.



Tabelle e) Vergleich der mittleren Spitzenwerte  
Einstab Steatitkugeln und Einstab Graphitkugeln

- 1) Drehstab zweigängig halbgewendelt
- 2) Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec
- 3) Silodurchmesser 1,0 m
- 4) Stabspitze II
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens

|                           | G r a p h i t   |                 | S t e a t i t   |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ |
| Drehmoment (mkp)          | 100,1           | 74,8            | 130,7           | 98,8            |
| Gesamtkraft (kp)          | - 1107          | - 889,0         | - 963,5         | - 1156,7        |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 55,2            | 41,0            | 113,7           | 69,3            |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 63,4            | 30,2            | 125,4           | 56,5            |
| Spitzenkraft (kp)         | 243,8           | 199             | 438,3           | 352,5           |

Tabelle f) Vergleich der mittleren Spitzenwerte  
Einstab Steatitkugeln und Einstab Graphitkugeln

1) Drehstab eingängig halbgewendelt, sonst wie Tabelle e)

|                           | G r a p h i t   |                 | S t e a t i t   |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ |
| Drehmoment (mkp)          | 66,0            | 58,3            | 89,1            | 78,5            |
| Gesamtkraft (kp)          | - 948,4         | - 955,6         | - 1340,2        | - 1164,8        |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 41,8            | 45,7            | 73,6            | 65,3            |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 48,1            | 34,4            | 105,5           | 72,1            |
| Spitzenkraft (kp)         | 218,6           | 184,0           | 326,3           | 293,9           |

Tabelle g) Vergleich der mittleren Spitzenwerte  
Zweistab Steatitkugeln und Zweistab Graphitkugeln

1) Silodurchmesser 1,5 m (zwei Stäbe), sonst wie unter Tabelle e)

|                           | G r a p h i t   | S t e a t i t   |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 1,5$ |
| Drehmoment (mkp)          | 96,5            | 101,5           |
| Gesamtkraft (kp)          | - 924,5         | - 1030,2        |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 154,5           | 146,3           |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 121,0           | 182,8           |
| Spitzenkraft (kp)         | 289,5           | 484,1           |

In den folgenden Tabellen h) bis l) soll untersucht werden,  
welchen Einfluß die Hubgeschwindigkeit auf Kräfte und Momente  
hat.

Tabelle h)

- 1) Kugelmateriale Steatit
- 2) Silodurchmesser 1,0 m
- 3) Stabspitze II
- 4) Förderverhältnis  $\varphi = 1,5$
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 6) Drehstab zweigängig

|                      |       | $V_{Hub_1} =$<br>10 cm/s | $V_{Hub_2} =$<br>10/20 cm/s | $V_{Hub_3} =$<br>20/10 cm/s |
|----------------------|-------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Drehmoment           | (mkp) | 130,7                    | 112,2                       | 126,6                       |
| Gesamtkraft          | (kp)  | - 963,5                  | -1287,1                     | -1391,0                     |
| Seitenkraft<br>mitte | (kp)  | 113,7                    | 72,5                        | 80,7                        |
| Seitenkraft<br>unten | (kp)  | 125,4                    | 120,7                       | 133,9                       |
| Spitzenkraft         | (kp)  | 438,3                    | 376,5                       | 371,2                       |

Tabelle i)

- 1) Kugelmaterial Graphit
- 2) Punkt 2 - 6 wie Tabelle h)

|                      |       | $V_{Hub_1} =$<br>10 cm/s | $V_{Hub_2} =$<br>10/20 cm/s | $V_{Hub_3} =$<br>20/10 cm/s |
|----------------------|-------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Drehmoment           | (mkp) | 100,1                    | 73,9                        | 78,9                        |
| Gesamtkraft          | (kp)  | -1107,1                  | -864,0                      | - 905,6                     |
| Seitenkraft<br>mitte | (kp)  | 55,2                     | 49,3                        | 30,7                        |
| Seitenkraft<br>unten | (kp)  | 63,4                     | 40,6                        | 51,1                        |
| Spitzenkraft         | (kp)  | 243,8                    | 184,4                       | 187,0                       |

Tabelle j)

- 1) Kugelmateriale Steatit
- 2) Silodurchmesser 1,0 m
- 3) Stabspitze II
- 4) Förderverhältnis  $\varphi = 1,5$
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 6) Drehstab eingängig

|                      |       | $V_{Hub_1} =$<br>10 cm/s | $V_{Hub_2} =$<br>10/16 cm/s | $V_{Hub_3} =$<br>16/10 cm/s |
|----------------------|-------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Drehmoment           | (mkp) | 89,1                     | 76,1                        | 84,1                        |
| Gesamtkraft          | (kp)  | -1340,2                  | -1194,1                     | -1336,0                     |
| Seitenkraft<br>mitte | (kp)  | 73,5                     | 69,9                        | 56,7                        |
| Seitenkraft<br>unten | (kp)  | 105,5                    | 109,3                       | 109,9                       |
| Spitzenkraft         | (kp)  | 326,3                    | 343,2                       | 354,2                       |

Tabelle k)

- 1) Kugelmateriale Graphit
- 2) Punkte 2 - 6 wie Tabelle j)

|                      |       | $V_{Hub_1} =$<br>10 cm/s | $V_{Hub_2} =$<br>10/16 cm/s | $V_{Hub_3} =$<br>16/10 cm/s |
|----------------------|-------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Drehmoment           | (mkp) | 66,0                     | 50,9                        | 60,5                        |
| Gesamtkraft          | (kp)  | -948,4                   | -822,5                      | -906,0                      |
| Seitenkraft<br>mitte | (kp)  | 41,8                     | 28,2                        | 37,3                        |
| Seitenkraft<br>unten | (kp)  | 48,1                     | 36,7                        | 41,0                        |
| Spitzenkraft         | (kp)  | 218,6                    | 180,0                       | 179,5                       |

Tabelle 1)

- 1) Silodurchmesser 1,0 m
- 2) Kugelmaterial Graphit
- 3) Förderverhältnis  $\varphi = 1,5$
- 4) Drehstab zweigängig, halbgewendelt
- 5) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 6) Alle Werte sind gemittelte Spitzenwerte

|                           | $V_1 = 5,0$<br>(cm/s) | $V_2 = 7,5$<br>(cm/s) | $V_3 = 10,0$<br>(cm/s) | $V_4 = 13,5$<br>(cm/s) |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Drehmoment (mkp)          | 93,5                  | 95,0                  | 95,0                   | 83,5                   |
| Gesamtkraft (kp)          | -1755,0               | -1635,0               | -1260,0                | -1470,0                |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 106,0                 | 121,0                 | 84,0                   | 64,2                   |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 72,0                  | 67,5                  | 78,5                   | 49,0                   |
| Spitzenkraft (kp)         | 246,0                 | 271,0                 | 182,0                  | 160,0                  |

In den beiden abschließenden Tabellen m und n wird der eingängig halbgewendelte Stab dem zweigängigen gegenübergestellt.



Tabelle m)

- 1) Kugelmateriale Steatit
- 2) Silodurchmesser 1,0 m (1 Stab)
- 3) Stabspitze II
- 4) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 5) Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec

|                      |       | Eingängig       |                 | Zweigängig      |                 |
|----------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                      |       | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ |
| Drehmoment           | (mkp) | 89,1            | 78,5            | 130,7           | 98,8            |
| Gesamtkraft          | (kp)  | -1340,2         | -1164,8         | - 963,5         | -1156,7         |
| Seitenkraft<br>mitte | (kp)  | 73,5            | 65,3            | 113,7           | 69,3            |
| Seitenkraft<br>unten | (kp)  | 105,5           | 72,1            | 125,4           | 56,5            |
| Spitzenkraft         | (kp)  | 326,3           | 293,9           | 438,3           | 352,5           |

Tabelle m)

- 1) Kugelmaterial Graphit
- 2) Silodurchmesser 1,0 m
- 3) Stabspitze II
- 4) Mit Umwälzung des Kugelhaufens
- 5) Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec

|                           | Eingängig       |                 | Zweigängig      |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                           | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ | $\varphi = 1,5$ | $\varphi = 2,0$ |
| Drehmoment (mkp)          | 66,0            | 58,3            | 100,1           | 74,9            |
| Gesamtkraft (kp)          | 948,4           | 955,6           | 1107,0          | 888,7           |
| Seitenkraft<br>mitte (kp) | 41,8            | 45,7            | 55,2            | 41,0            |
| Seitenkraft<br>unten (kp) | 48,1            | 34,4            | 63,4            | 30,2            |
| Spitzenkraft (kp)         | 218,6           | 184,0           | 243,8           | 199,0           |

Wie bereits beschrieben, wurden auch Versuche gefahren, welche die Größe des Abriebes einer Einzelkugel aufzeigten. Für diesen Versuch wurden 206 genau gewogene und markierte Graphitelemente vom Typ "SIGRI ALSW" dem Silo zugegeben. Der Drehstab wurde nun 120mal etwa 4,00 m tief in den Kugelhaufen ein- und ausgefahren. Nach jedem Ein- und Ausfahrvorgang wurden 10 % des Siloinhaltes umgewälzt. Der Versuch fand unter folgenden Versuchsbedingungen statt:

- 1) Drehstab zweigängig, halbgewendelt
- 2) Silodurchmesser 1,0 m
- 3) Hubgeschwindigkeit des Stabes  $V = 10 \text{ cm/sec}$
- 4) Anzahl der Einfahrvorgänge 120
- 5) Förderverhältnis  $\Phi = 1,5$
- 6) Anzahl der Kugeln im Behälter ca. 20 000 Stück vom Typ SIGRI
- 7) Anzahl der umgewälzten Kugeln nach jedem Fahrvorgang  
 $n = 2000 \text{ Stück}$

Nach dieser Versuchsserie wurden die 206 Kugeln dem Silo entnommen und einer zweiten Wägung unterzogen.

|                                      |                              |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Gewicht der Kugeln vor den Versuchen | $G_{KV} = 39837$             |
|                                      | $G_{KN} = \underline{39833}$ |
|                                      | $\Delta G = 4 \text{ g}$     |

$\Delta G$  ist die Gewichts Differenz aller 206 Kugeln. Der Abrieb pro Kugel beträgt

$$\frac{4 \text{ g}}{206} = 0,0194 \text{ g} = 19,4 \text{ mg}$$

Das entspricht (gleichförmigen Abrieb vorausgesetzt) einem Abrieb von weniger als 1/100mm. Der gesamte Staubanfall, auf Reaktorverhältnisse extrapoliert (54 Stäbe und eine Kugelfüllung von 675 000 Elementen), beträgt 2,19 kg/Jahr.

## 8. Diskussion der Versuchsergebnisse

Aus den Vergleichstabellen a) und b) ist zu erkennen, daß Drehmoment und Silokräfte beim 1:10-Modell - wenn man den Maßstabfaktor berücksichtigt - ohne Ausnahme größer sind. Schon bei den Hubstabversuchen wurde dasselbe bemerkt und aus diesem Grunde für die Stabeindringkraft neben dem Maßstabfaktor ein Umrechnungsfaktor  $C_1 = 0,425$  festgelegt<sup>(5)</sup>. Für das Drehmoment ergibt sich hier im Mittel ein Umrechnungsfaktor  $C_M = 0,59$ , für die Seitendosen am Silo  $C_S = 0,35$ .

Beispiel 1:  $P_{1:1} = P_{1:10} \cdot M^3 \cdot C_S = 70,0 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot 0,35 = 24,5 \text{ kp}$   
=====

(siehe Tabelle a)

Beispiel 2:  $M_{d1:1} = M_{d1:10} \cdot M^4 \cdot C_M = 85,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4 \cdot 0,59 = 50,3 \text{ mkp}$   
=====

(siehe Tabelle a)

In den Tabellen c) und d) wird der Einstabantrieb dem Gruppenantrieb gegenübergestellt. Die Vermutung, daß mehrere Stäbe sich ungünstig beeinflussen, scheint durch diese Tabellen widerlegt. Drehmoment und Gesamtkraft sind in fast allen Fällen beim Gruppenantrieb niedriger. Die Silokräfte sind beim Gruppenantrieb höher. Das kann auch daran liegen, daß beim Gruppenantrieb der Abstand des Stabes von der Silowand 40 betrug, beim Einstab 50 cm. Die Spitzenkraft liegt beim Gruppenantrieb etwas höher. Die Auflockerung durch den Drehstab macht sich hier noch nicht so stark bemerkbar, während die Auflockerung auf der ganzen Drehstablänge sich auf das Drehmoment und die Gesamtkraft voll auswirkt.

Über die Tabelle e) bis g) ist eine weitere Möglichkeit der Extrapolation auf Reaktorverhältnisse gegeben. Hier werden Kugeln verschiedener Wichte und Reibung gegenübergestellt. Graphitkugeln mit einem Reibwert  $\mu = 0,15$  und einer Wichte  $\gamma = 1,7 \text{ g/cm}^3$ , Steatitkugeln mit einem Reibwert  $\mu = 0,3$  und einer Wichte  $\gamma = 2,67 \text{ g/cm}^3$ . Der Reibwert der Steatitkugeln hatte nach Beendigung der gesamten Versuchsreihe nur noch die Größe von  $\mu = 0,2$ . Aus diesem Grunde wird mit einem mittleren Reibwert von  $\mu = 0,23$  gerechnet. Der Reibwert der Graphitkugeln bleibt konstant. Betrachtet man die Wertetabellen, so sieht man, daß alle Werte bis auf zwei Ausnahmen bei Steatitkugelfüllung höher sind. Allerdings geht die Erhöhung nicht linear mit der Wichte und dem Reib-

wert ein.

### Beispiel

Wichte und Reibwert liegen bei Steatit unter Berücksichtigung des erniedrigten Reibwertes um den Faktor

$$M = \frac{2,67 \cdot 0,23}{1,7 \cdot 0,15} = 2,4 \quad ===$$

höher.

In keinem Fall liegt beim Drehmoment oder bei der Gesamtkraft eine Erhöhung um den Faktor 2,4 vor. Im ungünstigsten Fall erhöht sich das Drehmoment in Tabelle e) um 30 %. Die Gesamtkraft liegt in Tabelle e)  $\varphi = 2,0$  auch um 30 % höher. Diese Erhöhung um 30 % bei Drehmoment und Gesamtkraft ist auch in Tabelle f) zu bemerken. Macht man nun einen Exponentialansatz und rechnet für diesen letzten Fall den Exponenten  $\alpha$  aus. Reibwert und Wichte werden zusammengefaßt

$$\mu^{\alpha_1} \cdot \gamma^{\alpha_2} = p^{\alpha_3}$$

$$2,4^{\alpha_3} = 1,3$$

$$\alpha_3 = \frac{\ln 1,3}{\ln 2,4} = \frac{0,262}{0,875} = 0,3$$

Dieselbe Berechnung wird nun für die Spitzenkraft durchgeführt. Der Quotient

$$\frac{M_{\text{Steatit}}}{M_{\text{Graphit}}}$$

hat im Mittel die Größe von 1,7. Um diesen Faktor erhöht sich im Mittel die Spitzenkraft bei Steatitkugelfüllung.

Exponentialansatz:

$$M^{\bar{\alpha}_3} = 1,7 = 2,4^{\bar{\alpha}_3}$$

$$\bar{\alpha}_3 = \frac{\ln 1,7}{\ln 2,4} = \frac{0,53}{0,875} = 0,61$$

Im THTR-Jahresbericht 1967, Abschnitt 16,32, wurde für die Hubstäbe ein Wert  $\bar{\alpha}_{3H} = 0,57$  experimentell ermittelt. Dieser Wert stellt eine recht gute Übereinstimmung mit den experimentellen Drehstabwerten dar.

In den Tabellen h) bis l) soll nun ermittelt werden, ob eine Erhöhung der Hubgeschwindigkeit auch eine Vergrößerung von Kräften und Momenten zur Folge hat. Diese Aussage ist deshalb von Wichtigkeit, weil der Drehstab gegebenenfalls auch zur Schnellabschaltung des Reaktors herangezogen wird. Die Hubgeschwindigkeit des Hydraulikzylinders betrug maximal 20 cm/s, so daß man auch hier wieder auf höhere Geschwindigkeiten extrapolieren mußte. In den Tabellen h) bis k) wurde die Geschwindigkeit  $V_{Hub_2}$  und  $V_{Hub_3}$  während eines Einfahrvorganges stufenlos verändert. Bei  $V_{Hub_2} = 10/20$  cm/s wurde bis 2,0 m Tiefe mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/s gefahren, die restlichen 2,0 m wurden mit der doppelten Hubgeschwindigkeit von 20 cm/s gefahren.  $V_{Hub_3} = 20/10$  cm/s die ersten 3,5 m mit  $V_1 = 20$  cm/s, der Rest mit  $V_2 = 10$  cm/s. Man erkennt, daß bei allen Tabellen bei einer Hubgeschwindigkeit von  $V_{Hub_2} = 10/20$  cm/s bzw. 10/16 das Drehmoment ein Minimum hat (s. Abb. 7) Auch die übrigen Kräfte am Silo, an der Spitze und am Stab sind bei dieser Hubgeschwindigkeit bis auf wenige Ausnahmen am niedrigsten. Dies zeigt ganz klar auf, daß eine hohe Hubgeschwindigkeit, insbesondere im unteren dichteren Teil des Cores, Vorteile hat. Auch Tabelle 1 sowie Abb. 1 und 2 lassen erkennen, daß eine hohe Hubgeschwindigkeit günstiger ist. Somit wird von dieser Seite einer Erhöhung der Hubgeschwindigkeit kein Einhalt geboten. Wenn man nun den zweigängigen Stab betrachtet, so wird bei einem Anwachsen der Hubgeschwindigkeit bei konstantem Förderverhältnis  $\varphi$  zwangsläufig auch die Drehzahl erhöht werden müssen. Nach der Formel ist

$$n = \frac{\text{Hubgeschwindigkeit}}{\text{Steigung}} \cdot \varphi$$

Hydromotoren, wie sie für diesen Versuch eingesetzt wurden, können eine maximale Drehzahl von  $n = 300 \text{ min}^{-1}$  bei einem Drehmoment von 240 mkp abgeben. Somit könnte für diesen Fall bei  $\varphi = 1,5$  eine maximale Hubgeschwindigkeit von

$$V_1 = \frac{n \cdot \text{Steigung}}{60} = \frac{300 \cdot 12,56}{1,5 \cdot 60} = 41,8 \text{ cm/s}$$

erreicht werden. Diese Hubgeschwindigkeit liegt beim eingängigen Stab um den Faktor 2 niedriger.  $V_1 = \frac{V_2}{2} = 20,9 \text{ cm/s}$ .

Bei Einsatz eines dreigängigen Stabes könnte die Hubgeschwindigkeit auf  $V_3 = 62,7 \text{ cm/s}$  erhöht werden. Der dreigängige Stab hat nach den 1:10-Modellversuchen jedoch ein mehr als doppelt so hohes Drehmoment wie der zweigängige Stab. Der dreigängige Stab würde also wegen des hohen Drehmomentes ausscheiden. Die abschließenden Tabellen m) und n) stellen den Vergleich der beiden in Betracht kommenden Stäbe dar. Wie schon beim 1:10-Versuchsstand sind auch hier in allen Fällen die Drehmomente beim zweigängigen Stab höher. Von dieser Seite wäre der eingängige Stab günstiger. Betrachte man die aufzubringende Leistung für jeden Stab!

Beispiel 1:

$$N_{\text{eingängig}} = \frac{Md_1 \cdot n_1}{964} = \frac{89,1 \cdot 144}{964} = 13,3 \text{ kW}$$
$$N_{\text{zweigängig}} = \frac{Md_2 \cdot n_2}{964} = \frac{130,7 \cdot 72}{964} = 9,75 \text{ kW}$$

Beispiel 2:

$$N_{\text{eingängig}} = \frac{Md_3 \cdot n_3}{964} = \frac{66,0 \cdot 144}{964} = 9,85 \text{ kW}$$
$$N_{\text{zweigängig}} = \frac{Md_4 \cdot n_4}{964} = \frac{100,1 \cdot 72}{964} = 7,5 \text{ kW}$$

Die Drehmomente  $Md_1$  bis  $Md_4$  wurden der Tabelle m) und n) entnommen; die Drehzahlen  $n_1$  bis  $n_4$  dem Versuchsprogramm.

Die aufzubringende Leistung ist im Beispiel 1 für den eingängigen Stab trotz des niedrigeren Drehmomentes um

$$\frac{(13,3 - 9,75) \cdot 100 \%}{9,75} = 36,5 \%$$

höher als beim zweigängigen Stab.

Im Beispiel 2 ist die Leistung um

$$\frac{(9,85 - 7,5) 100 \%}{7,5} = 31,5 \%$$

höher.

Somit hat der zweigängige halbgewendelte Stab hinsichtlich des Leistungsaufwandes Vorteile gegenüber dem eingängigen Stab. In der folgenden Tabelle zeigt sich der eingängige Stab als der optimale Stab. In der Wertetabelle ist der dreigängige Stab nicht aufgeführt, da erstens keine Versuche am 1:1-Modell gefahren wurden und zweitens eine nachfolgende Berechnung zeigt, daß der dreigängige Stab ein nicht aufzubringendes hohes Drehmoment verlangt. Am 1:10-Versuchsstand wurde für den eingängigen halbgewendelten Stab ein Drehmoment von 1760 cmp, für den dreigängig vollgewendelten Stab ein Drehmoment von 4148 cmp gemessen<sup>(3)</sup>.

Umgerechnet auf den 1:1-Versuchsstand müßte mit einem Drehmoment für den dreigängigen Stab von  $M_{\text{dreigängig}} = 66,0 \cdot \frac{4148}{1760} = 155,2$  mkp zu rechnen sein. Der Wert von 155,2 mkp würde bei einem Förderverhältnis  $\psi = 1,5$  und einer Graphitkugelfüllung erreicht.

Extrapoliert auf Reaktorverhältnisse mit einem Reibwert  $\mu = 0,6$ , steigt das Drehmoment auf

$$\begin{aligned} M_{\text{Reaktor}} &= M_{\text{Versuch}} \cdot p^{\alpha_3} = M_{\text{Reaktor}} = 155,2 \left( \frac{0,6}{0,15} \right)^{0,3} \\ &= 155,2 \cdot 1,516 = 236 \text{ mkp.} \end{aligned}$$

Bei einem Sicherheitszuschlag von 100 % müßte der Drehstabantrieb für ein Moment von 472 mkp ausgelegt werden. Dieser Wert ist entschieden zu hoch, deshalb scheidet der dreigängige Stab aus.



Bewertungstabelle

|   | Eingängig<br>vollgew. | Punkte | Eingängig<br>halbgew. | Punkte | Zweigängig<br>halbgew. | Punkte |
|---|-----------------------|--------|-----------------------|--------|------------------------|--------|
| Drehmoment<br>(mkp)                             | 44,5                  | 20     | 66,0                  | 15     | 100,1                  | 10     |
| Spitzenkraft<br>am Stab (kp)                    | unbe-<br>kannt        | 20     | 218,0                 | 20     | 243,0                  | 18     |
| Kräfte am<br>Silo (kp)                          | 49,6                  | 9      | 41,8                  | 10     | 55,2                   | 8      |
| Gesamt-<br>kraft (kp)                           | 1100                  | 8      | 948,4                 | 10     | 1107                   | 8      |
| Max.erreichb.<br>Hubgeschwin-<br>digkeit (cm/s) | 20,9                  | 5      | 20,9                  | 5      | 41,8                   | 10     |
| Aufzuwenden-<br>de Leistung<br>(kW)             | 6,7                   | 10     | 9,9                   | 7      | 7,58                   | 9      |
| Durchmi-<br>schung<br>1:10-Modell               | befrieg.              | 10     | gut                   | 20     | unbekannt              | 20     |
| Punkte<br>(Summe)                               |                       | 82     |                       | 87     |                        | 83     |

Bemerkung:

Die einzelnen Rubriken wurden nach Wichtigkeit unterteilt. Durchmischung, Drehmoment und Spitzenkraft: Faktor 2,0;  
der Rest:Faktor 1,0

Die Werte wurden der Tabelle n), dem Versuchsbericht Nr.1 und dem BBK-Bericht J1-71/69 entnommen.

Der eingängig halbgewendelte Stab hat insgesamt gesehen Vorteile gegenüber den anderen Stäben. Da eine Hubgeschwindigkeit von 20 cm/s zur Schnellabschaltung ausreicht, kann der eingängig halbgewendelte Stab als der optimale Stab angesehen werden.

Bei der Auswahl des Förderverhältnisses hat man zwischen  $\varphi = 1,5$  und  $\varphi = 2,0$  zu entscheiden. Die Kräfte und Momente sind zwar bei  $\varphi_2 = 2,0$  niedriger (siehe Abb. 3), berücksichtigt man jedoch die Ergebnisse von Durchmischungsversuchen<sup>(3)</sup>, so ist  $\varphi_1 = 1,5$  insgesamt günstiger.

Versuche ohne Umwälzung (siehe Wertetabelle II-VI) sollten zeigen, ob der Kugelhaufen beim Einfahren verdichtet wird. Dieser Verdichtungseffekt, wie er beim Hubstab auftritt, ist beim Drehstab nicht vorhanden. Eine geringfügige Erhöhung von Kräften und Drehmomenten ist bei nichtumgewälztem Kugelhaufen nur im unteren Teil des Cores zu bemerken. In diesem Bereich ist die Drehstabspitze wirksam und deshalb die Auflockerung nicht ausreichend. Eine gewendelte Stabspitze könnte hier Vorteile bringen.

### 9. Versuchsfortführung

Zur weiteren Annäherung an Reaktorverhältnisse werden noch Versuche gefahren mit Kugelelementen, welche die Wichte von Graphit und einen Reibwert von  $\mu = 0,6$  bis  $0,7$  haben.

Im Hinblick auf den 600 MW- bzw. 1200 MW-Reaktor werden Versuche mit einer maximalen Eindringtiefe von 6,0 m geplant. Um in etwa zu wissen, welche Kräfte oder Momente bei diesen Eindringtiefen zu erwarten sind, wird ein Ansatz gemacht, um von 4,0 m auf 6,0 m extrapolieren zu können.

Das Drehmoment ist abhängig von folgenden, bisher bekannten Größen:

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| $M = F(\gamma, \mu, p, l, d, r)$       | $d =$ Durchmesser des Stabes (cm) |
| $\gamma =$ Wichte ( $\text{g/cm}^3$ )  | $r =$ Radius des Stabes (cm)      |
| $\mu =$ Reibung                        |                                   |
| $p =$ Spez. Druck ( $\text{kp/cm}^2$ ) |                                   |
| $l =$ Länge des Stabes (cm)            |                                   |

Während des Einfahrvorganges ändern sich die Stablänge  $l$ , die in den Haufen eindringt, und der spezifische Druck, der mit wachsender Tiefe zunimmt. Die anderen Größen bleiben konstant. Während eines Einfahrvorganges gilt also  $M = F(l,p)$ . Diese beiden Werte nehmen mit wachsender Tiefe linear zu, so daß sich insgesamt eine quadratische Funktion ergibt:

$$M(T) = T^2 \cdot C.$$

Mit Hilfe der im Experiment gewonnenen Schreiberdiagramme wird diese Funktion überprüft. Die Konstante  $C$  wird aus dem Versuch E 31 m.U. errechnet

$$C = \frac{M}{T^2} = \frac{66,0}{16} = 4,12 \frac{\text{kp}}{\text{m}}$$

In Abb. 6 ist der Vergleich mit der theoretischen Kurve zu sehen. Die Punkte stellen die Werte des Experimentes E 31 m.U. Versuch Nr. 2 dar. Es ist zu erkennen, daß die Streuung nicht sehr groß ist. Die theoretische Kurve wird bis auf 6,0 m durchgezogen. Das Drehmoment hat hier die Größe von 148 mkp beim eingängigen Stab und Graphitfüllung.

In einem weiteren Diagramm (Abb. 7) sind die im Experiment gewonnenen Kurven der Versuche E 31 m.U. bis E 33 m.U. zu sehen. Ein Foto (Abb. 8) zeigt Ausschnitte aus diesen Versuchsreihen. Es handelt sich bei allen Versuchsreihen um quadratische Funktionen, allerdings ist der Verlauf von E 32 und E 33 flacher, was auf ein geringeres Moment hinweist.

Tabelle I der Kräfte und Drehmomente für einen drehend einfahrenden Stab:  
 125,6 mm Steigung, zweigängig, 2300 mm Gewindelänge  
 Nach jedem Versuch wurde der Kugelhaufen umgewälzt

| Hubgeschwindigkeit<br>(cm/sec) | Konus-<br>kraft<br>(kp) | Seiten-<br>kraft<br>(kp) | Seiten-<br>kraft<br>Mitte<br>(kp) | Dreh-<br>moment<br>(mkp) | Gesamt-<br>kraft<br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>1</sub><br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>2</sub><br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>3</sub><br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>4</sub><br>(kp) |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|--|--|
| 5 cm/sec; $\varphi = 1,5$      | M= 69,5<br>S= 80,0      | M= 59<br>S= 72           | M= 93<br>S= 106                   | M= 75,2<br>S= 93,5       | M= 1450<br>S= 1755       | S= 246<br>AS= 412                            | ---  | S =22,5<br>AS=41,2                           | S =36,8<br>AS=38,5                           |
| 5 cm/sec; $\varphi = 2,0$      | M= 22<br>S= 31,5        | M= 23,5<br>S= 52,0       | M= 46,5<br>S= 62,0                | M= 54,8<br>S= 71,0       | M= 1204<br>S= 169        | S= 137<br>AS= 184                            | ---  | S =21,4<br>AS=44,0                           | S =32,5<br>AS=41,2                           |
| 7,5 cm/sec; $\varphi = 1,5$    | M= 56<br>S= 64          | M= 52<br>S= 67,5         | M= 102<br>S= 121                  | M= 84,5<br>S= 95,0       | M= 1325<br>S= 1635       | S= 271<br>AS= 349                            | ---  | ---  | ---  |
| 7,5 cm/sec; $\varphi = 2,0$    | M= 33<br>S= 38          | M= 33<br>S= 38           | M= 86<br>S= 108                   | M= 62,3<br>S= 73,4       | M= 1080<br>S= 1390       | S= 184<br>AS= 267                            | ---  | ---  | ---  |
| 10 cm/sec; $\varphi = 1,5$     | M= 33,6<br>S= 42,3      | M= 45,5<br>S= 78,5       | M= 56<br>S= 84                    | M= 77,3<br>S= 95,0       | M= 1000<br>S= 1260       | S= 182<br>AS= 256                            | S =102<br>AS=138                             | S =36,27<br>AS=44,0                          | S =75,4<br>AS=99,8                           |
| 10 cm/sec; $\varphi = 2,0$     | M= 29,5<br>S= 35,4      | M= 31,0<br>S= 42,0       | M= 75,0<br>S= 103,0               | M= 66<br>S= 77,8         | M= 1040<br>S= 1470       | S= 191<br>AS= 220                            | ---  | ---  | S =31,6<br>AS=41,2                           |
| 13,5 cm/sec; $\varphi = 1,5$   | M= 36<br>S= 42,5        | M= 38,0<br>S= 49,0       | M= 55,0<br>S= 64,2                | M= 67,3<br>S= 83,5       | M= 1030<br>S= 1470       | S= 160<br>AS= 184                            | ---  | ---  | ---  |
| 13,5 cm/sec; $\varphi = 1,85$  | M= 25,6<br>S= 34,5      | M= 26,5<br>S= 38,5       | M= 70,0<br>S= 76,5                | M= 56,6<br>S= 69,4       | M= 860<br>S= 1245        | S= 166<br>AS= 193                            | ---  | ---  | ---  |

M = Mittelwert

S = Spitzenwert

AS = Absoluter Spitzenwert

Tabelle II der Kräfte und Drehmomente für einen drehend einfahrenden Stab:  
 125,6 mm Steigung, zweigängig, 2300 mm Gewindelänge,  
 ohne Umwälzen des Kugelhaufens

| Hubgeschwindigkeit<br>(cm/sec) | Konus-<br>kraft<br>(kp) | Seiten-<br>kraft<br>(kp) | Seiten-<br>kraft<br>Mitte<br>(kp) | Dreh-<br>moment<br>(mkp) | Gesamt-<br>kraft<br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>1</sub><br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>2</sub><br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>3</sub><br>(kp) | Einzel-<br>kraft<br>Mst <sub>4</sub><br>(kp) |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|--|--|
| 5 cm/sec; $\psi = 1,5$         | M= 110,0<br>S= 124,5    | M= 180,5<br>S= 219,0     | M= 108<br>S= 127                  | M= 66,7<br>S= 87,9       | M= 1327<br>S= 1755       | S = 339<br>AS= 478                           | --<br>--                                     | S = 22,5<br>AS= 41,2                         | S = 36,8<br>AS= 38,5                         |
| 5 cm/sec; $\psi = 2,0$         | M= 20<br>S= 28          | M= 45<br>S= 70,5         | M= 64,0<br>S= 80,5                | M= 52,5<br>S= 74,2       | M= 1306<br>S= 1878       | S = 141<br>AS= 184                           | --<br>--                                     | S = 21,4<br>AS= 44,0                         | S = 32,5<br>AS= 41,2                         |
| 7,5 cm/sec; $\psi = 1,5$       | M= 51<br>S= 68          | M= 102<br>S= 112         | M= 79<br>S= 118                   | M= 81<br>S= 104          | M= 1040<br>S= 2060       | S = 169<br>AS= 230                           | --<br>--                                     | --<br>--                                     | --<br>--                                     |
| 7,5 cm/sec; $\psi = 2,0$       | M= 15,5<br>S= 19,0      | M= 24,8<br>S= 34,0       | M= 95<br>S= 95                    | M= 64,8<br>S= 76,3       | M= 1020<br>S= 1370       | S = 198<br>AS= 267                           | --<br>--                                     | --<br>--                                     | --<br>--                                     |
| 10 cm/sec; $\psi = 1,5$        | M= 25<br>S= 33          | M= 53,3<br>S= 76,5       | M= 49,0<br>S= 58,0                | M= 75,8<br>S= 87,6       | M= 735<br>S= 1010        | S = 176<br>AS= 256                           | --<br>--                                     | --<br>--                                     | --<br>--                                     |
| 10 cm/sec; $\psi = 2,0$        | M= 14,0<br>S= 21,5      | M= 10,0<br>S= 15,9       | M= 71,0<br>S= 87,0                | M= 58,7<br>S= 74,5       | M= 1000<br>S= 1370       | S = 118<br>AS= 148                           | --<br>--                                     | --<br>--                                     | --<br>--                                     |
| 13,5 cm/sec; $\psi = 1,5$      | ---                     | ---                      | ---                               | ---                      | ---                      | ---  | --<br>--                                     | --<br>--                                     | --<br>--                                     |
| 13,5 cm/sec; $\psi = 1,85$     | ---                     | ---                      | ---                               | ---                      | ---                      | ---  | --<br>--                                     | --<br>--                                     | --<br>--                                     |

Tabelle III der Kräfte und Drehmomente für einen drehend einfahrenden Absorberstab mit 125,6 mm Steigung, zweigängig, 2300 mm Gewindelänge, bei einer Hubgeschwindigkeit von 10 cm/s mit Umwälzen des Kugelhaufens, Silodurchmesser 1,5 m

| Kugelmaterial | $\varphi = \frac{n \cdot \text{Steig.}}{\text{Hubgeschw.}}$ | Konuskraft<br>(kp) | Seitenkraft<br>unten<br>(kp) | Seitenkraft<br>Mitte<br>(kp) | Drehmoment<br>(mkp) | Gesamtkraft<br>zwei Stäbe<br>(kp) | Spitzenkraft<br>Mst <sub>1</sub><br>(kp) |
|---------------|---|--------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--|
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze I                                 | M 44,7             | 122,0                        | 116,8                        | 77,4                | 1578,4                            | S 404,3                                  |
|               |   | S 62,6             | 185,1                        | 172,3                        | 96,7                | 1971,6                            | AS 700,0                                 |
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze II                                | M 59,4             | 115,3                        | 98,1                         | 73,9                | 1546,7                            | S 484,1                                  |
|               |   | S 84,5             | 182,8                        | 146,3                        | 101,5               | 2060,3                            | AS 800,0                                 |
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze III                               | M 58,2             | 95,0                         | 81,8                         | 46,0                | 1140,1                            | S 466,0                                  |
|               |   | S 91,9             | 200,2                        | 215,6                        | 110,1               | 2006,6                            | AS 1050,0                                |
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze IV                                | M 68,5             | 90,6                         | 92,2                         | 81,1                | 2243,4                            | S 322,5                                  |
|               |   | S 100,3            | 141,7                        | 182,7                        | 109,3               | 3877,6                            | AS 450,0                                 |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze I                                 | M 28,2             | 78,7                         | 43,3                         | 72,5                | 1476,8                            | S 370,0                                  |
|               |   | S 43,2             | 107,5                        | 59,7                         | 94,4                | 1778,4                            | AS 500,0                                 |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze II                                | M 38,2             | 73,2                         | 55,9                         | 57,6                | 1123,5                            | S 365,0                                  |
|               |   | S 76,6             | 176,3                        | 147,7                        | 100,9               | 1948,4                            | AS 550,0                                 |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze III                               | M 55,4             | 88,5                         | 76,0                         | 72,2                | 1537,5                            | S 371,0                                  |
|               |   | S 82,3             | 133,4                        | 132,6                        | 107,6               | 2312,9                            | AS 600,0                                 |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze IV                                | M 35,3             | 82,7                         | 55,8                         | 51,7                | 1305,4                            | S 367,5                                  |
|               |   | S 75,0             | 191,2                        | 136,4                        | 105,1               | 2011,3                            | AS 450,0                                 |
| Graphit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze II                                | M 60,2             | 78,6                         | 82,4                         | 64,9                | 1290,9                            | S 289,5                                  |
|               |   | S 94,1             | 121,0                        | 154,5                        | 96,5                | 1848,9                            | AS 500,0                                 |

M = Mittelwert; S = Spitzenwert; AS = absoluter Spitzenwert.

Tabelle IV der Kräfte und Drehmomente für einen drehend einfahrenden Absorberstab mit 125,6 mm Steigung, zweigängig, 2300 mm Gewindelänge bei einer Hubgeschwindigkeit von 10 cm/s ohne Umwälzen des Kugelhaufens. Silodurchmesser 1,5 m.

| Kugelmaterial | $\varphi = \frac{n \cdot \text{Steig.}}{\text{Hubgeschw.}}$ | Konuskraft<br>(kp) | Seitenkraft<br>unten<br>(kp) | Seitenkraft<br>Mitte<br>(kp) | Drehmoment<br>(mkp) | Gesamtkraft<br>zwei Stäbe<br>(kp) | Spitzenkraft<br>Mst <sub>1</sub><br>(kp) |
|---------------|---|--------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--|
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze I                                 | M 177,8<br>S 219,9 | 87,4<br>124,4                | 250,5<br>324,1               | 114,8<br>132,1      | 1462,6<br>1804,4                  | S 925,0<br>AS 1300,0                     |
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze II                                | M 230,6<br>S 288,8 | 133,4<br>195,2               | 436,9<br>638,8               | 88,7<br>128,6       | 1413,2<br>1758,0                  | S 962,5<br>AS 1350,0                     |
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze III                               | M 309,6<br>S 637,1 | 96,0<br>163,9                | 166,2<br>381,3               | 60,1<br>131,4       | 1020,1<br>1730,9                  | S 805,0<br>AS 1350,0                     |
| Steatit       | $\varphi = 1,5$<br>Spitze IV                                | M 163,5<br>S 226,2 | 112,8<br>175,4               | 259,5<br>489,1               | 82,3<br>130,4       | 1938,0<br>2997,7                  | S 607,5<br>AS 1250,0                     |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze I                                 | M 30,7<br>S 48,1   | 65,5<br>104,3                | 58,8<br>104,3                | 91,7<br>112,2       | 1400,0<br>1764,0                  | S 515,0<br>AS 900,0                      |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze II                                | M 82,5<br>S 179,3  | 118,6<br>258,2               | 114,2<br>224,6               | 89,2<br>127,5       | 1107,1<br>2012,3                  | S 760,0<br>AS 1250,0                     |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze III                               | M 61,7<br>S 95,7   | 89,3<br>147,0                | 151,8<br>254,1               | 78,1<br>121,9       | 1355,7<br>1876,9                  | S 643,5<br>AS 1100,0                     |
| Steatit       | $\varphi = 2,0$<br>Spitze IV                                | M 75,1<br>S 151,4  | 76,6<br>164,5                | 130,3<br>260,9               | 56,1<br>125,8       | 1218,3<br>1934,9                  | S 417,5<br>AS 1175,0                     |

M = Mittelwert; S = Spitzenwert; AS = absoluter Spitzenwert.

Tabelle V der Kräfte und Drehmomente für einen drehend einfahrenden Absorberstab mit 125,6 mm Steigung, zweigängig, 2300 mm Gewindelänge, Stabspitze II Durchmesser des Silos 1 m

M = Mittelwert, S = Spitzenwert, AS = absoluter Spitzenwert

| Kugelmateri-<br>al                     | $\varphi$ -Wert | Hubge-<br>schw.<br>cm/s | <u>Mit Umwälzung des Kugelhaufens</u> |                            |                            |                     | Gesamtkraft<br>(kp) | Spitzenkraft<br>(kp) |    |       |
|--|-----------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----|-------|
|  |                 |                         | Konus-<br>kraft<br>(kp)               | Seitenkr.<br>unten<br>(kp) | Seitenkr.<br>mitte<br>(kp) | Drehmoment<br>(mkp) |                     |                      |    |       |
| Steatit                                | 1,5             | 10                      | M                                     | 84,5                       | 81,8                       | 65,9                | 86,4                | 743,8                | S  | 438,3 |
|  |                 |                         | S                                     | 124,4                      | 125,4                      | 113,7               | 130,7               | 963,5                | AS | 675,0 |
| Steatit                                | 2,0             | 10                      | M                                     | 39,8                       | 36,0                       | 39,9                | 63,2                | 837,9                | S  | 352,5 |
|  |                 |                         | S                                     | 63,0                       | 56,5                       | 69,3                | 98,8                | 1156,7               | AS | 425,0 |
| Steatit                                | 1,5             | 10/20                   | M                                     | 55,8                       | 61,3                       | 32,9                | 58,3                | 830,7                | S  | 376,5 |
|  |                 |                         | S                                     | 120,5                      | 120,7                      | 72,5                | 112,2               | 1287,1               | AS | 465,0 |
| Steatit                                | 1,5             | 20/10                   | M                                     | 77,1                       | 64,1                       | 42,1                | 73,4                | 787,3                | S  | 371,2 |
|  |                 |                         | S                                     | 144,9                      | 133,9                      | 80,7                | 126,6               | 1391,0               | AS | 640,0 |
| Graphit                                | 1,5             | 10                      | M                                     | 55,0                       | 49,7                       | 32,5                | 47,2                | 719,6                | S  | 243,8 |
|  |                 |                         | S                                     | 83,3                       | 63,4                       | 55,2                | 100,1               | 1107,0               | AS | 550,0 |
| Graphit                                | 2,0             | 10                      | M                                     | 29,4                       | 19,8                       | 23,0                | 52,6                | 536,1                | S  | 199,0 |
|  |                 |                         | S                                     | 41,3                       | 30,2                       | 41,0                | 74,9                | 888,7                | AS | 325,0 |
| Graphit                                | 1,5             | 10/20                   | M                                     | 19,0                       | 19,6                       | 23,3                | 43,2                | 493,7                | S  | 184,4 |
|  |                 |                         | S                                     | 36,3                       | 40,6                       | 49,3                | 73,9                | 864,0                | AS | 235,0 |
| Graphit                                | 1,5             | 20/10                   | M                                     | 26,9                       | 29,2                       | 18,5                | 46,1                | 570,0                | S  | 187,0 |
|  |                 |                         | S                                     | 39,5                       | 51,1                       | 30,7                | 78,9                | 905,6                | AS | 215,0 |
| <u>Ohne Umwälzung des Kugelhaufens</u> |                 |                         |                                       |                            |                            |                     |                     |                      |    |       |
| Steatit                                | 1,5             | 10                      | M                                     | 95,2                       | 110,2                      | 38,8                | 80,9                | 893,5                | S  | 635,7 |
|  |                 |                         | S                                     | 174,3                      | 185,8                      | 61,4                | 130,4               | 1207,5               | AS | 975,0 |
| Graphit                                | 1,5             | 10                      | M                                     | 75,0                       | 52,2                       | 25,7                | 54,7                | 463,7                | S  | 406,0 |
|  |                 |                         | S                                     | 113,7                      | 84,7                       | 40,7                | 100,3               | 748,6                | AS | 650,0 |



Tabelle VI der Kräfte und Drehmomente für einen drehend einfahrenden Absorberstab mit 62,8 mm Steigung, eingängig 2300 mm Gewindelänge, Stabspitze II Durchmesser des Silos 1 m.

M = Mittelwert, S = Spitzenwert, AS = absoluter Spitzenwert

| Kugelmateri-<br>al | $\varphi$ -Wert | Hubge-<br>schw.<br>cm/s | <u>Mit Umwälzung des Kugelhaufens</u> |                            |                            |                     | Gesamtkraft<br>(kp) | Spitzen-<br>kraft<br>(kp) |
|--------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
|                    |                 |                         | Konus-<br>kraft<br>(kp)               | Seitenkr.<br>unten<br>(kp) | Seitenkr.<br>mitte<br>(kp) | Drehmoment<br>(mkp) |                     |                           |
| Steatit            | 1,5             | 10                      | M 85,9                                | 39,2                       | 76,2                       | 64,4                | 993,7               | S 326,3                   |
|                    |                 |                         | S 124,2                               | 105,5                      | 73,5                       | 89,1                | 1340,2              | AS 576,0                  |
| Steatit            | 2,0             | 10                      | M 49,9                                | 48,2                       | 42,8                       | 62,2                | 935,2               | S 293,9                   |
|                    |                 |                         | S 68,9                                | 72,1                       | 65,3                       | 78,5                | 1164,8              | AS 480,0                  |
| Steatit            | 1,5             | 10/15                   | M 65,0                                | 64,1                       | 37,1                       | 39,6                | 751,5               | S 343,2                   |
|                    |                 |                         | S 93,0                                | 109,3                      | 69,9                       | 76,1                | 1194,1              | AS 432,0                  |
| Steatit            | 1,5             | 15/10                   | M 53,8                                | 68,6                       | 30,4                       | 40,3                | 860,1               | S 354,2                   |
|                    |                 |                         | S 82,6                                | 109,9                      | 56,7                       | 84,1                | 1336,0              | AS 648,0                  |
| Graphit            | 1,5             | 10                      | M 38,0                                | 34,9                       | 27,7                       | 51,1                | 647,1               | S 218,6                   |
|                    |                 |                         | S 48,6                                | 48,1                       | 41,8                       | 66,0                | 948,4               | AS 384,0                  |
| Graphit            | 2,0             | 10                      | M 37,2                                | 27,6                       | 28,3                       | 46,6                | 705,1               | S 184,0                   |
|                    |                 |                         | S 42,9                                | 34,4                       | 45,7                       | 58,3                | 955,6               | AS 240,0                  |
| Graphit            | 1,5             | 10/15                   | M 33,1                                | 27,9                       | 20,5                       | 41,5                | 609,6               | S 180,0                   |
|                    |                 |                         | S 40,2                                | 36,7                       | 28,2                       | 50,9                | 822,5               | AS 240,0                  |
| Graphit            | 1,5             | 15/10                   | M 33,0                                | 21,4                       | 17,0                       | 51,9                | 739,0               | S 179,5                   |
|                    |                 |                         | S 47,9                                | 41,0                       | 37,3                       | 60,5                | 906,0               | AS 240,0                  |

| <u>Ohne Umwälzung des Kugelhaufens</u> |     |    |         |       |      |      |        |          |
|--|-----|----|---------|-------|------|------|--------|----------|
| Steatit                                | 1,5 | 10 | M 62,2  | 104,6 | 43,3 | 44,6 | 776,6  | S 333,6  |
|  |     |    | S 108,6 | 172,7 | 64,7 | 94,9 | 1219,1 | AS 528,0 |
| Graphit                                | 1,5 | 10 | M 49,4  | 66,3  | 33,8 | 52,4 | 517,7  | S 256,8  |
|  |     |    | S 87,0  | 106,9 | 49,3 | 74,8 | 824,1  | AS 480,0 |

-04-

10. Literaturverzeichnis

- (1) R. Hecker "Development of high temperature  
W. Rausch thermal reactors in Germany"  
R. Schulten GIORNATE DELL'ENERGIA NUCLEARE 1966  
Milano, 15-17 Dicembre 1966
- (2) BBK, KFA, THTR-Jahresbericht 1967, Kap. 16  
EURATOM
- (3) Fratzer BBK Private Mitteilung BBK
- (4) Fratzer BBK Private Mitteilung BBK
- (5) BBK, KFA, THTR-Jahresbericht 1967, Abschnitt  
EURATOM 16.32

Verzeichnis der Abbildungen, Zeichnungen und Fotos

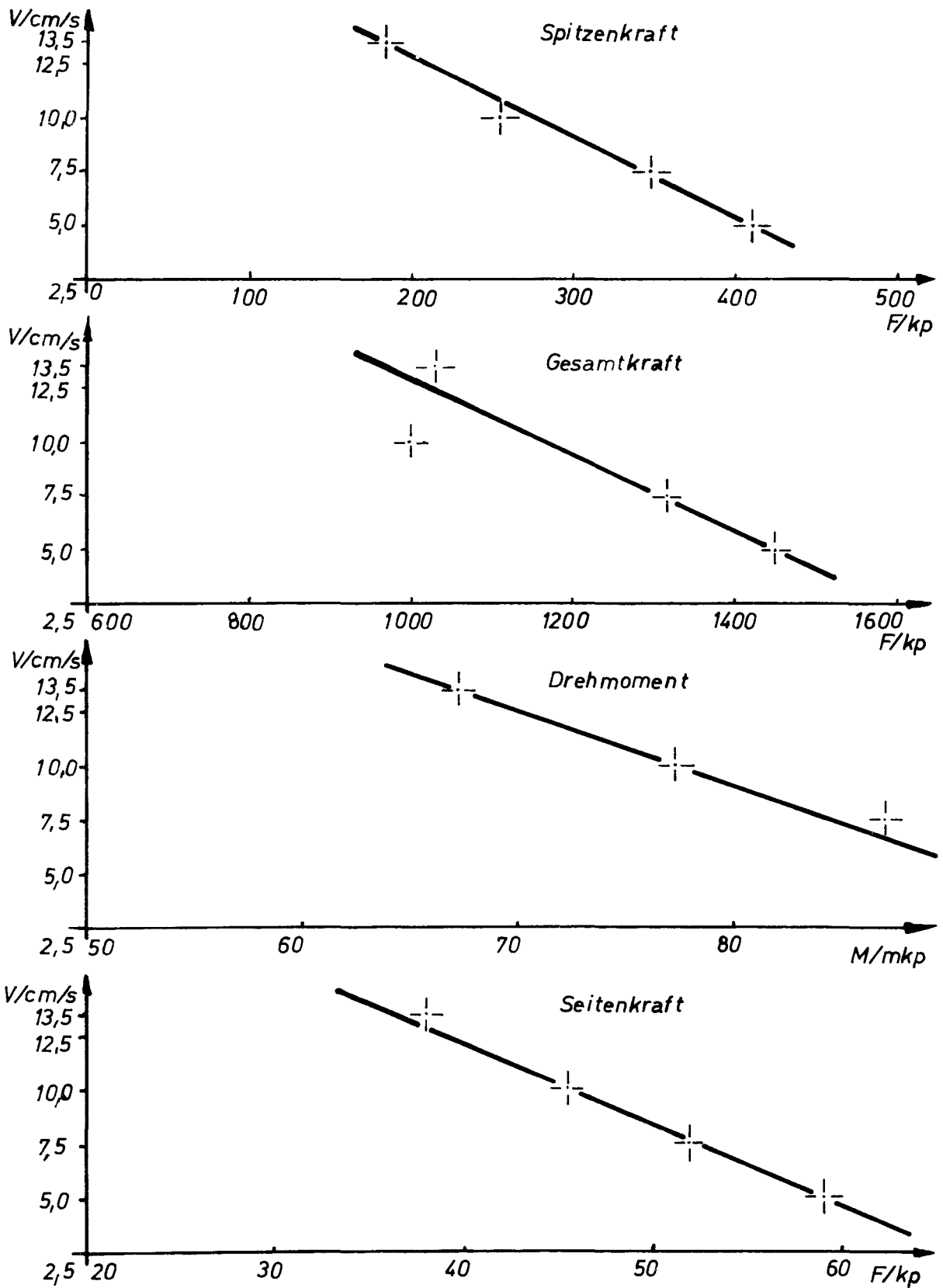
|             |  |
|-------------|--|
| Abb. 1      | Kräfte und Momente bei variabler Hubgeschwindigkeit $V$ (mit Umwälzung)  |
| Abb. 2      | Kräfte und Momente bei variabler Hubgeschwindigkeit $V$ (ohne Umwälzung) |
| Abb. 3      | Kräfte und Momente bei variablem Förderverhältnis                        |
| Abb. 4 u. 5 | Kräfte und Momente bei verschiedenen Stabspitzen                         |
| Abb. 6      | Extrapolation des Drehmomentes auf 6 m Schütthöhe                        |
| Abb. 7      | Vergleich der Momente mit der Hubgeschwindigkeit als Parameter           |
| Abb. 8      | Schreiberdiagramme der einzelnen Drehmomente $V_1$ bis $V_3$             |
| Abb. 9-14   | Arithmetische Mittelwerte der Spitzenkräfte                              |

Skizzen

|              |  |
|--------------|--|
| Skizze 1     | Drehstab eingängig                                 |
| Skizze 2     | Drehstab zweigängig mit Meßdose                    |
| Skizze 3     | Drehstabspitzen                                    |
| Zeichnung    | Z 30/529-Z 30/531 Gesamtansicht des Versuchstandes |
| Skizze 4 u.5 | Anordnung der Druckmeßdosen                        |

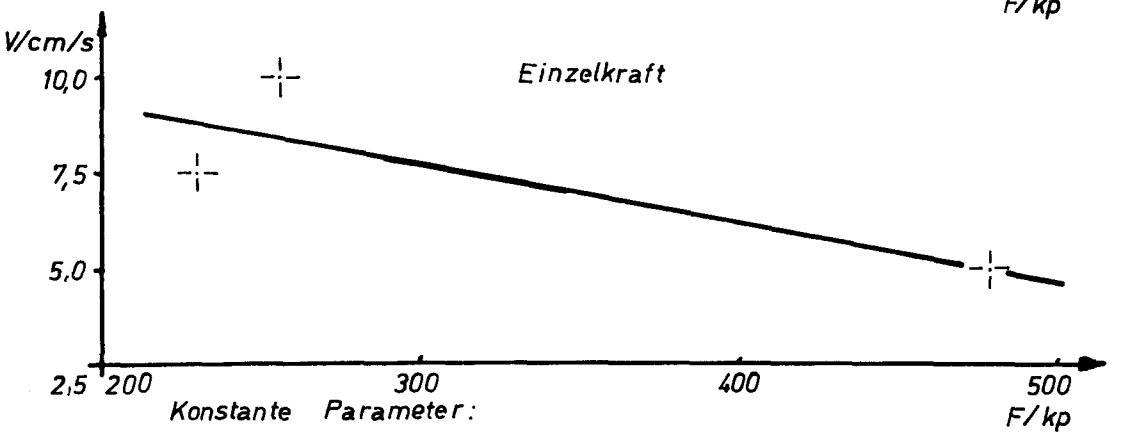
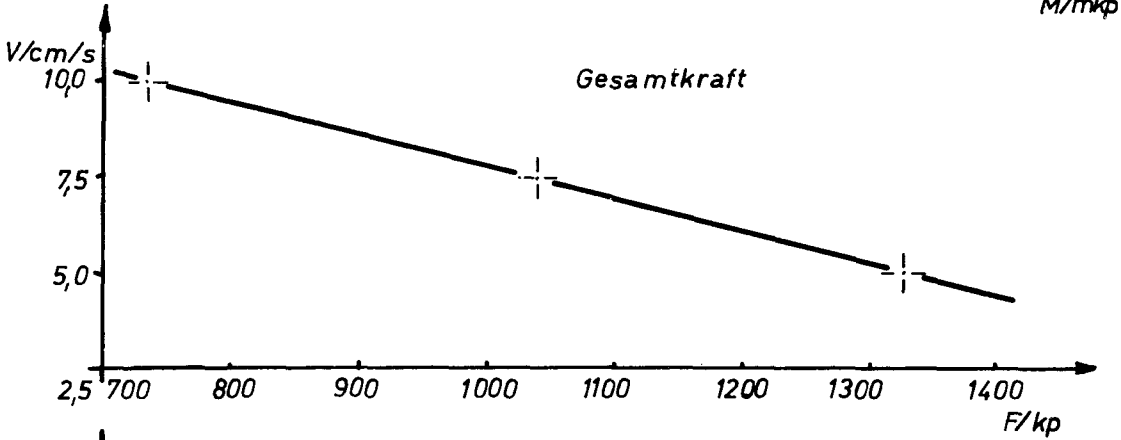
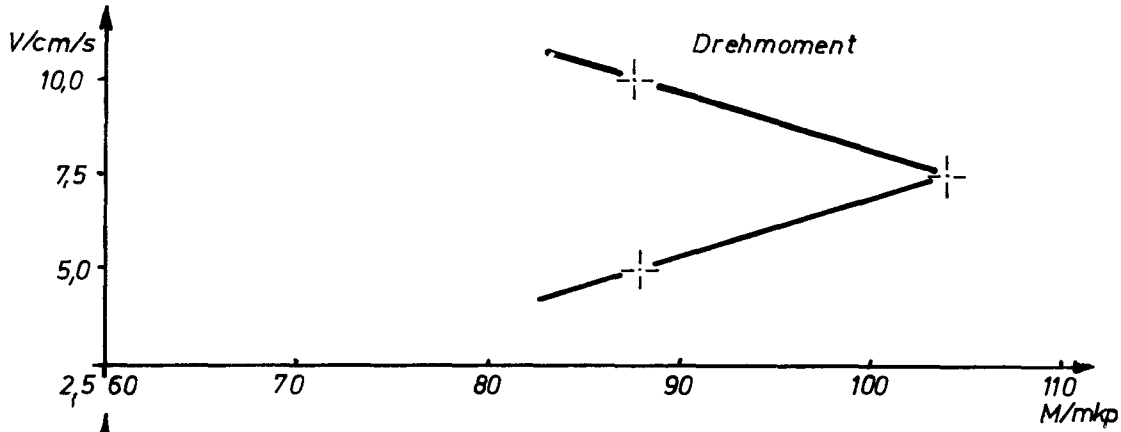
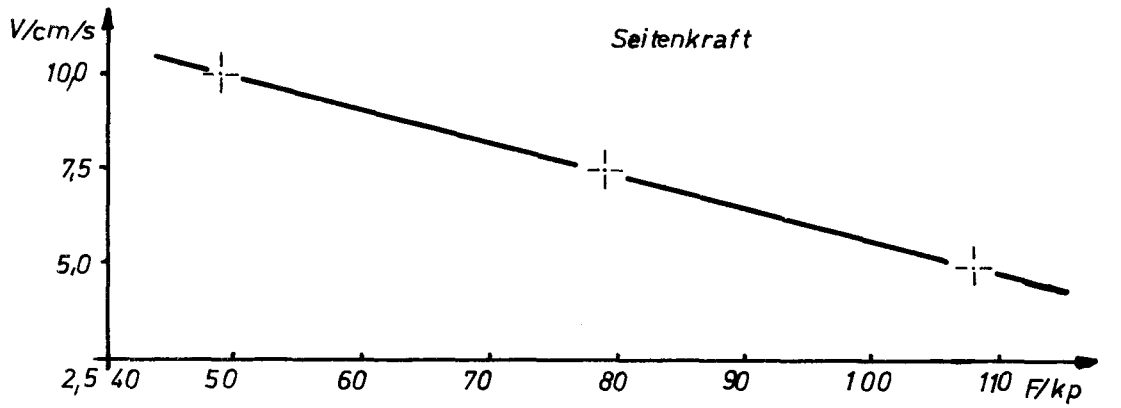
Fotos

|              |  |
|--------------|--|
| Foto 1 u.2   | Drehstab zweigängig                          |
| Foto 3       | Drehstabspitzen                              |
| Foto 4 u.5   | Eindringen des Drehstabes in den Kugelhaufen |
| Foto 6 u.7   | Gesamtansicht des Versuchstandes             |
| Foto 8 u.9   | Drehstabantrieb                              |
| Foto 10 u.11 | Druckmeßdose am Silo                         |
| Foto 12 u.13 | Anordnung der Schleifringe                   |



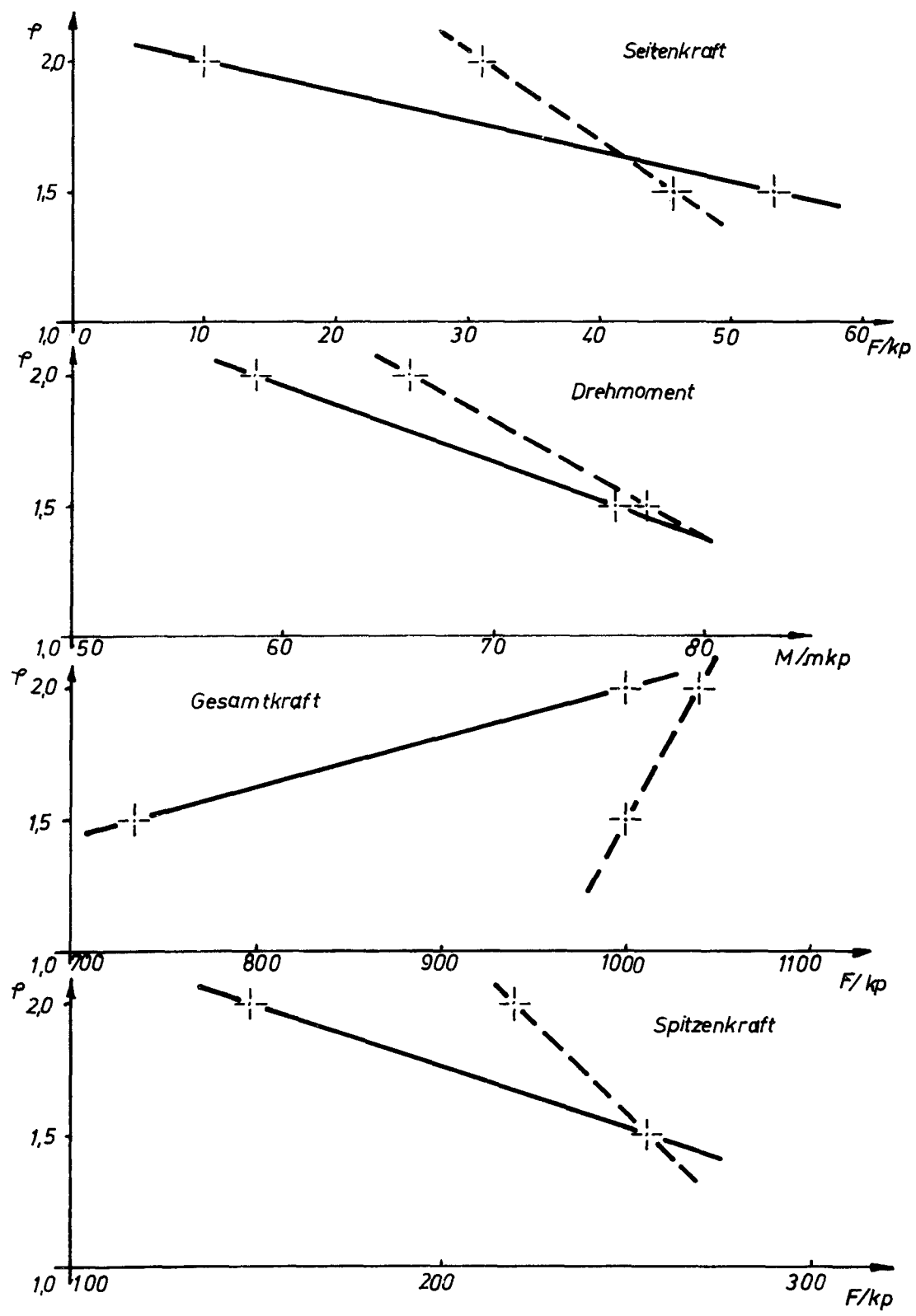
Konstante Parameter:  
 Förderverhältnis  $P = 1,5$   
 Kugelmateriale Graphit  
 mit Umwälzung des Kugelhaufens

Abb: 1



Konstante Parameter:  
 Förderverhältnis  $P=1,5$   
 Kugelmateriail Graphit  
 ohne Umwälzung des Kugelhaufens

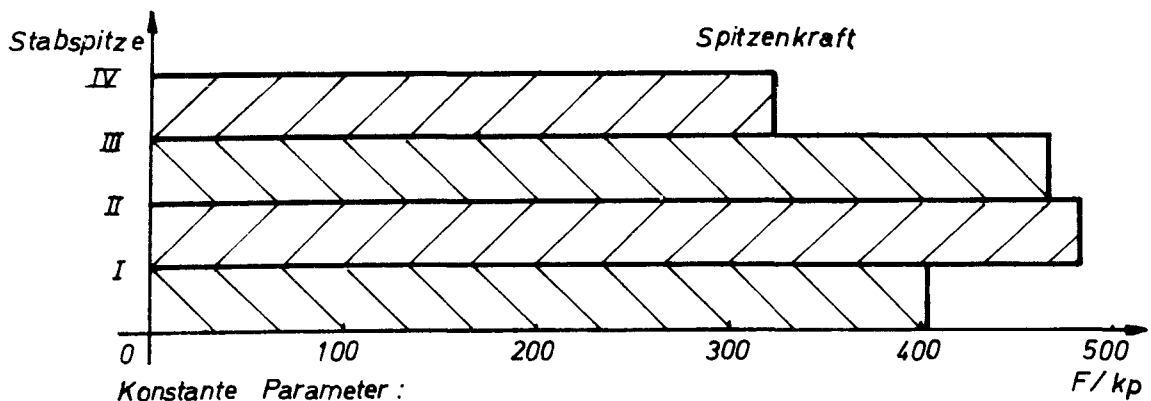
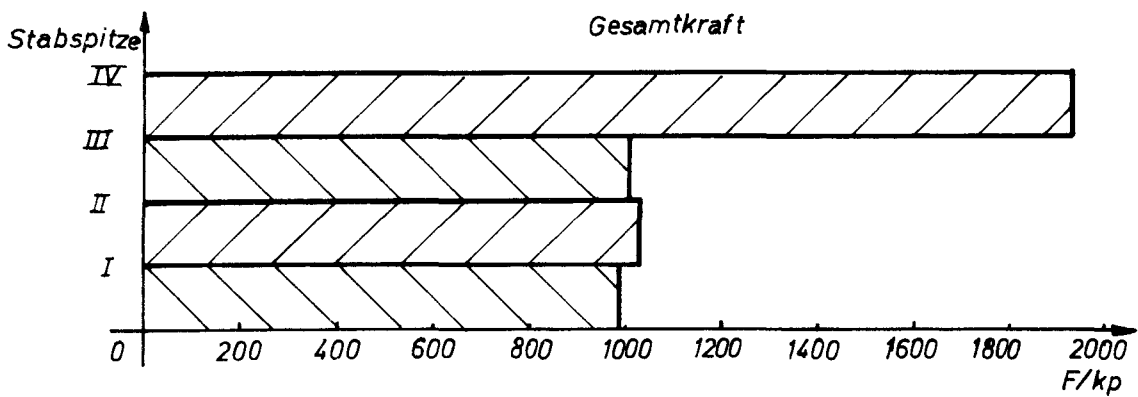
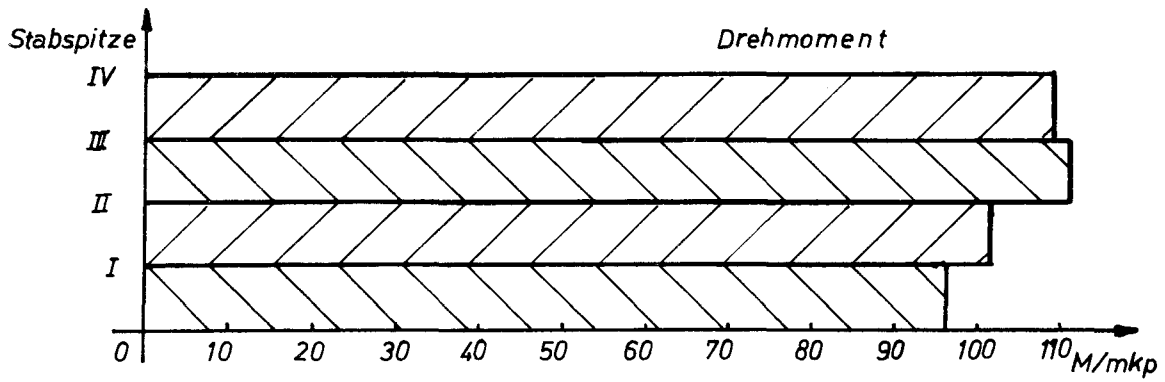
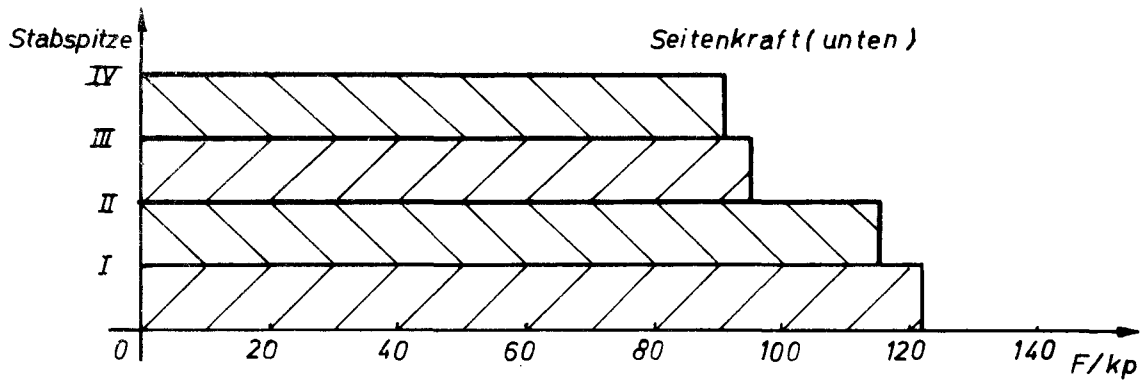
Abb: 2



— ohne Umwälzung  
 - - - mit Umwälzung

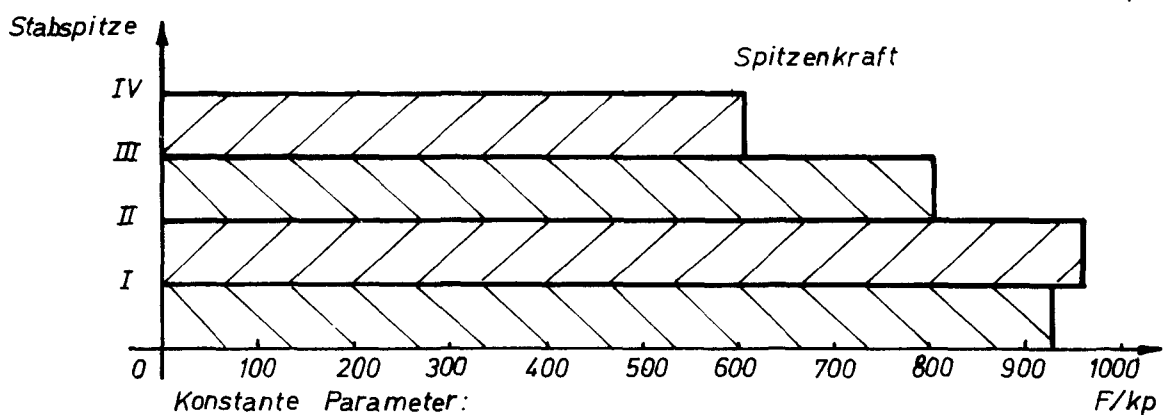
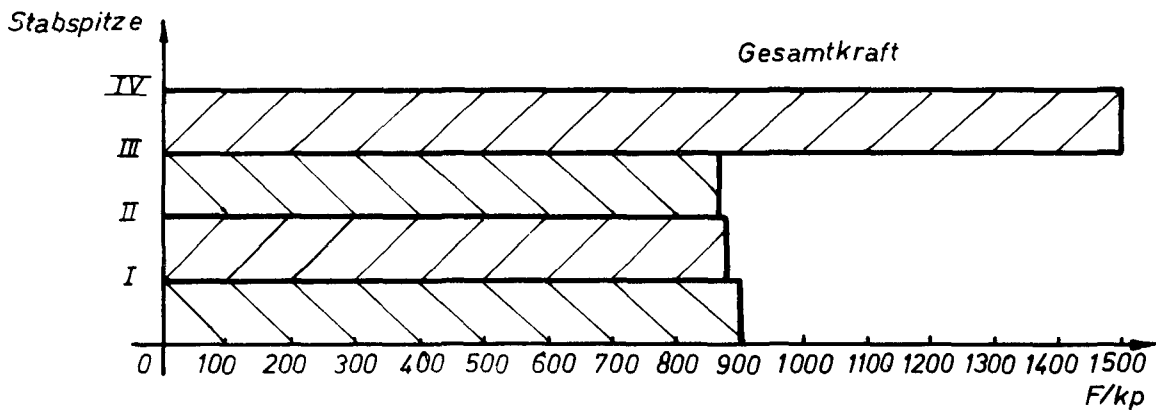
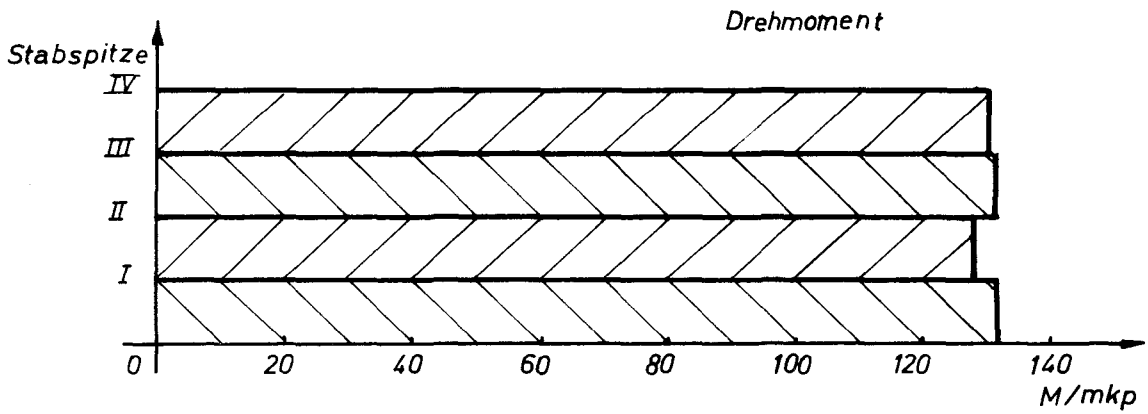
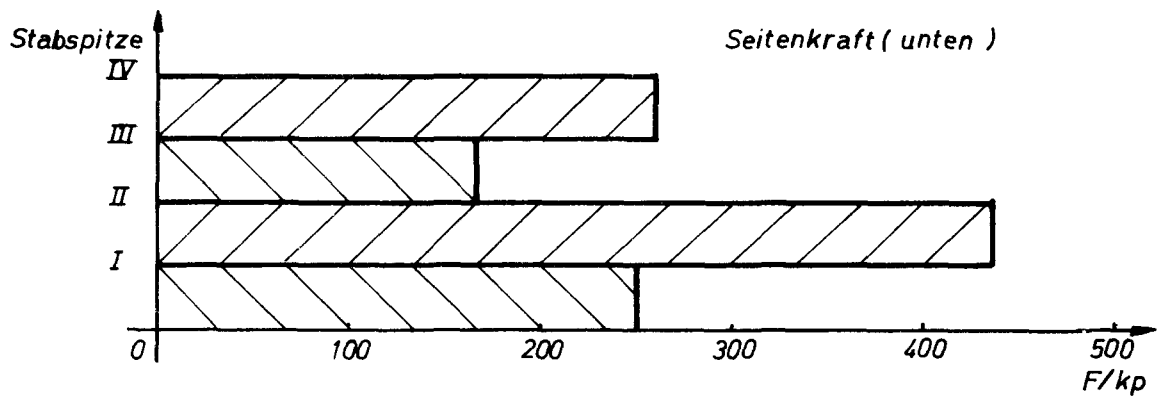
Konstante Parameter:  
 Hubgeschwindigkeit 10cm/s  
 Stabform zweigängig  
 Kugelmateriale Graphit

**Abb: 3**



Konstante Parameter :  
 Förderverhältnis  $P = 1,5$   
 Kugelmaterial Steatit  
 mit Umwälzung

**Abb: 4**



Konstante Parameter:  
 Förderverhältnis  $f=1,5$   
 Kugelmateral Steatit  
 ohne Umwälzung

Abb: 5



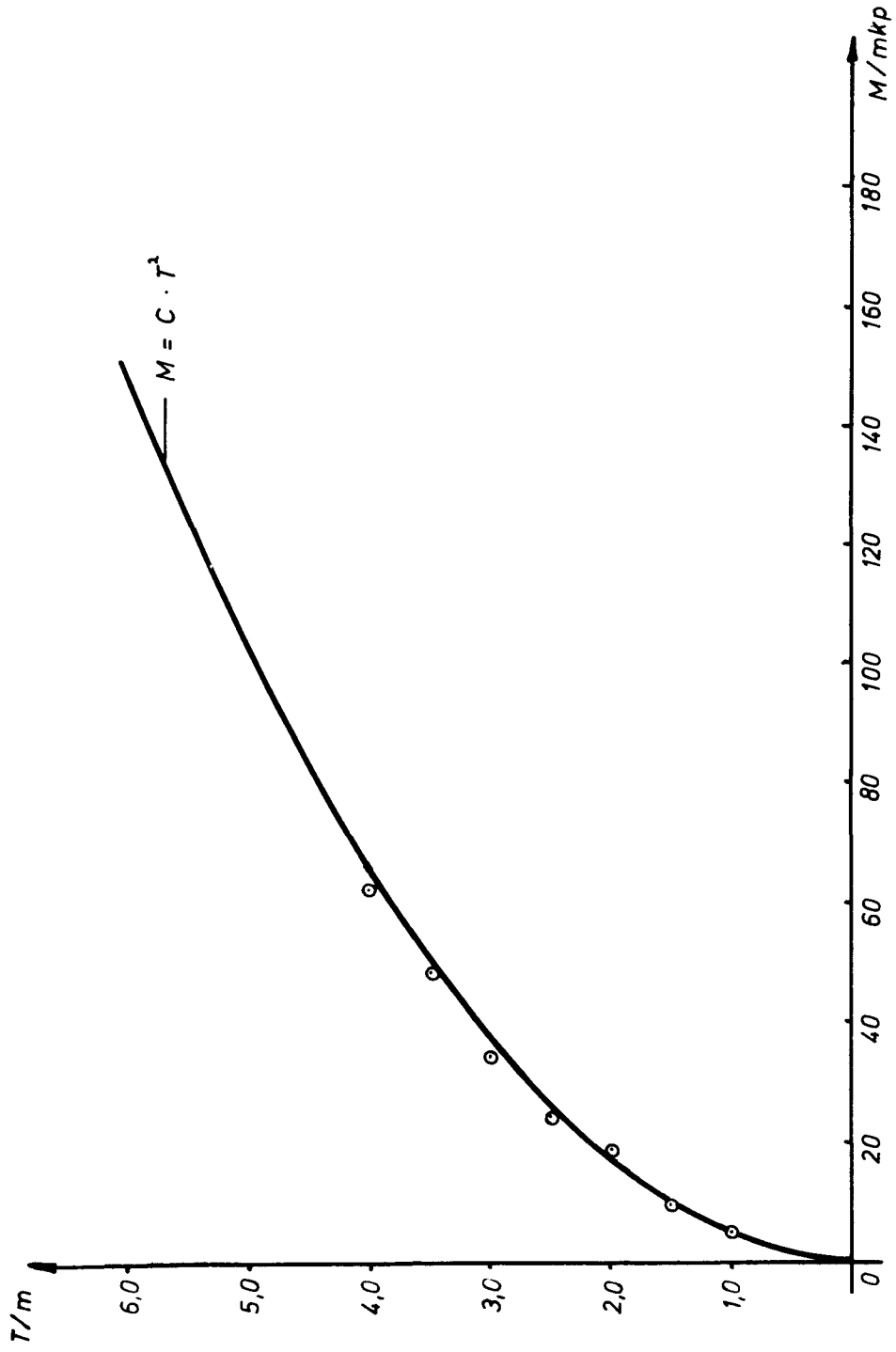


Abb: 6

- $V = 10/16 \text{ cm/s}$
- .-.-  $V = 16/10 \text{ cm/s}$
- $V = 10 \text{ cm/s}$

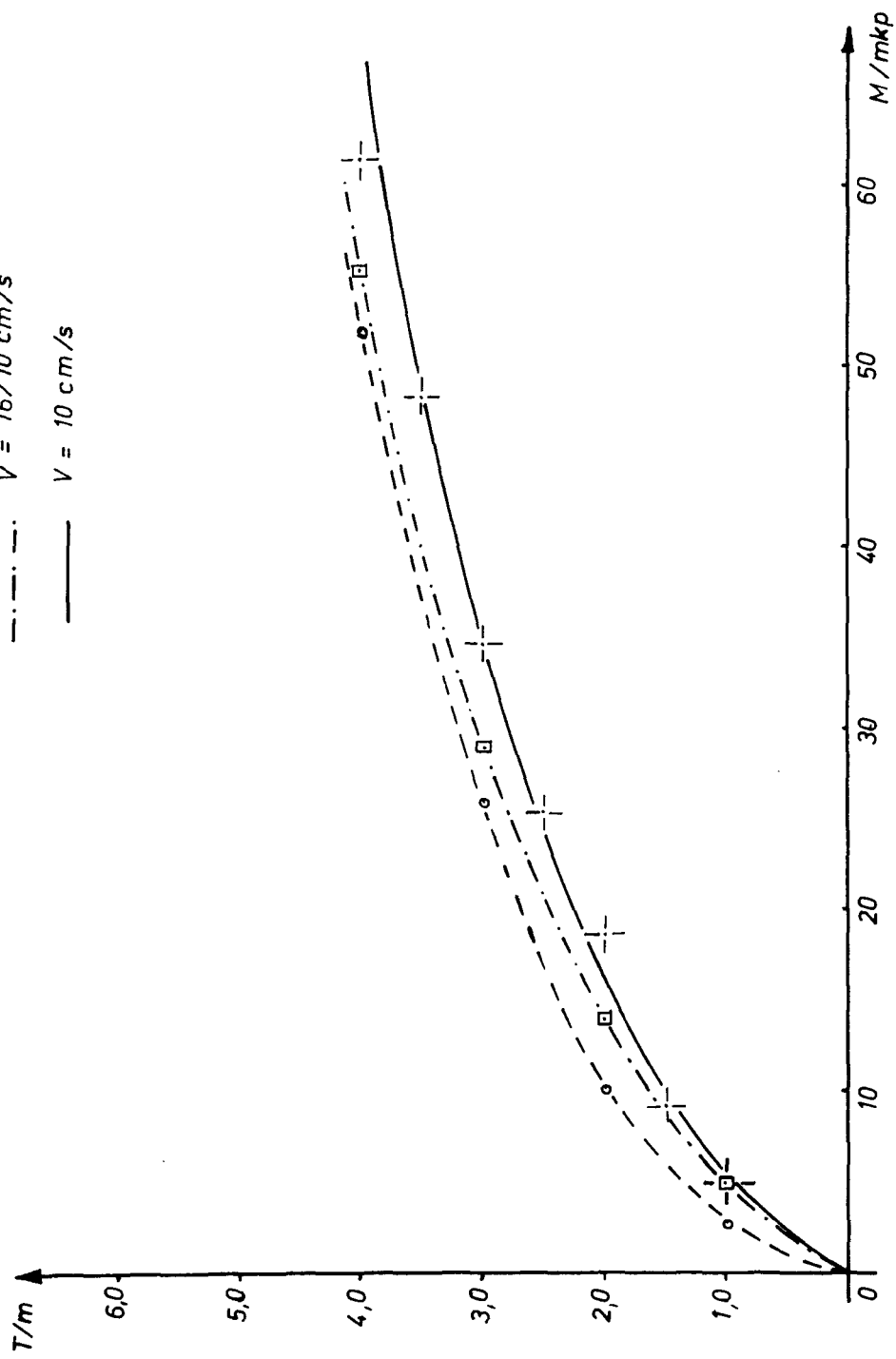
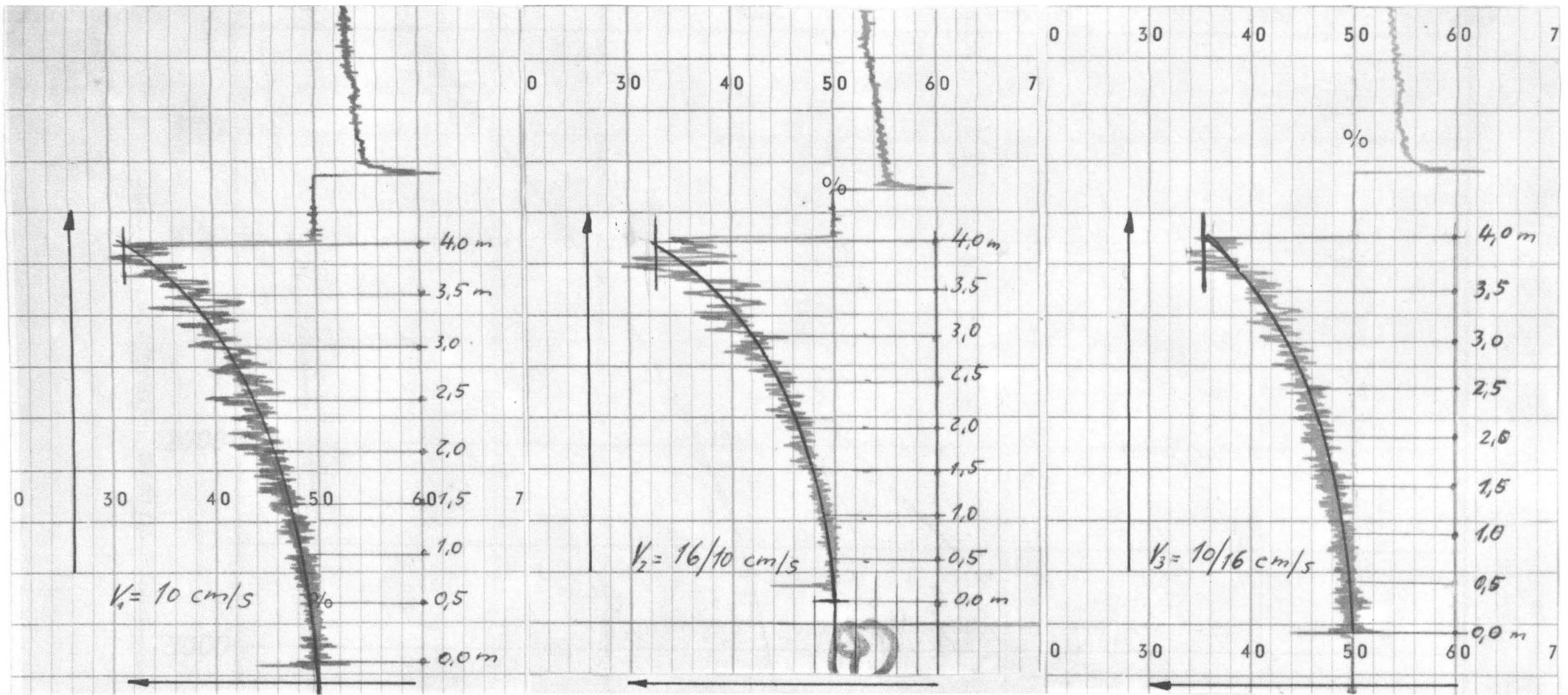


Abb: 7



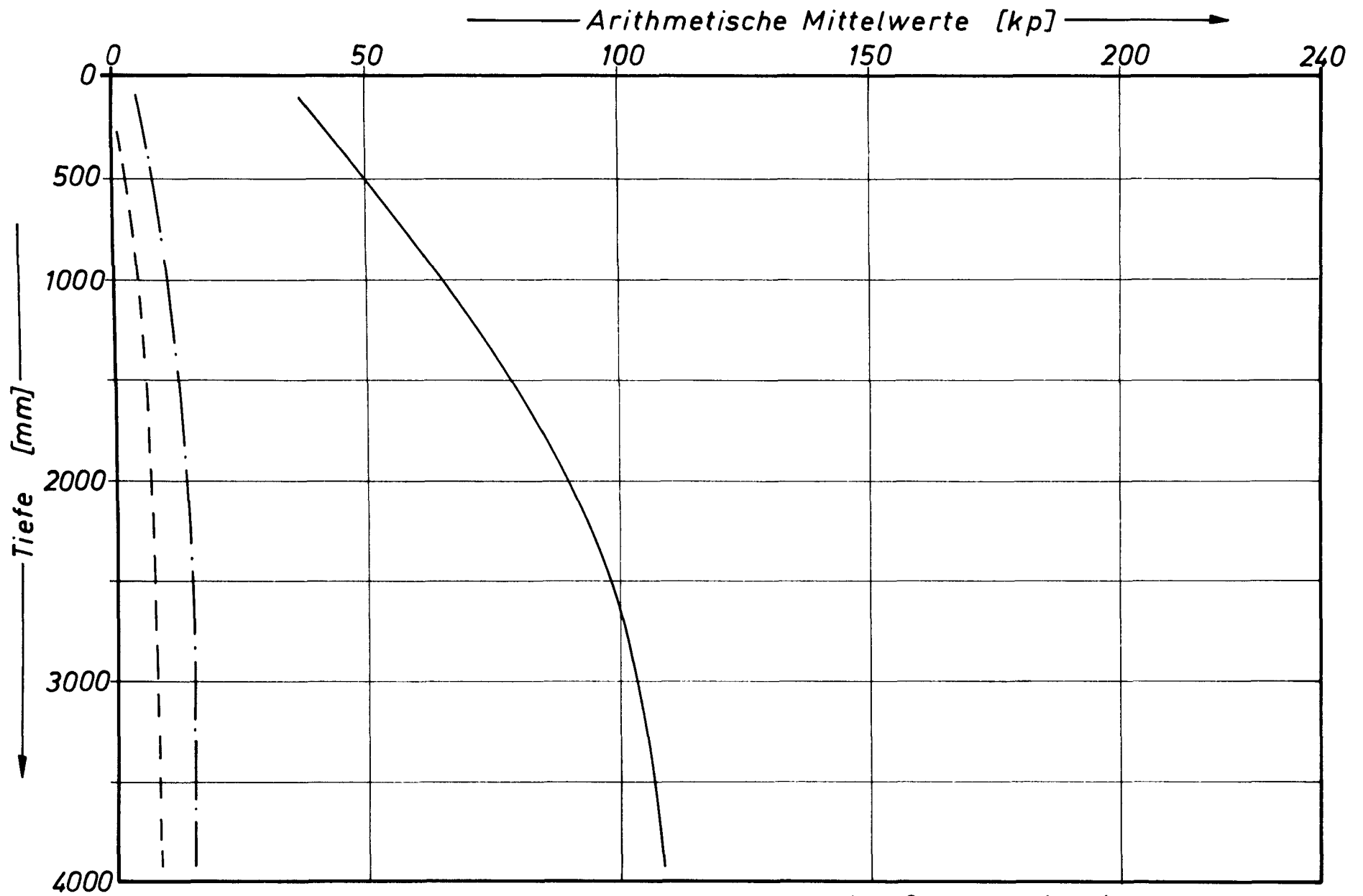
$V_1 = 10 \text{ cm/s}$

$V_2 = 16/10 \text{ cm/s}$

$V_3 = 10/16 \text{ cm/s}$

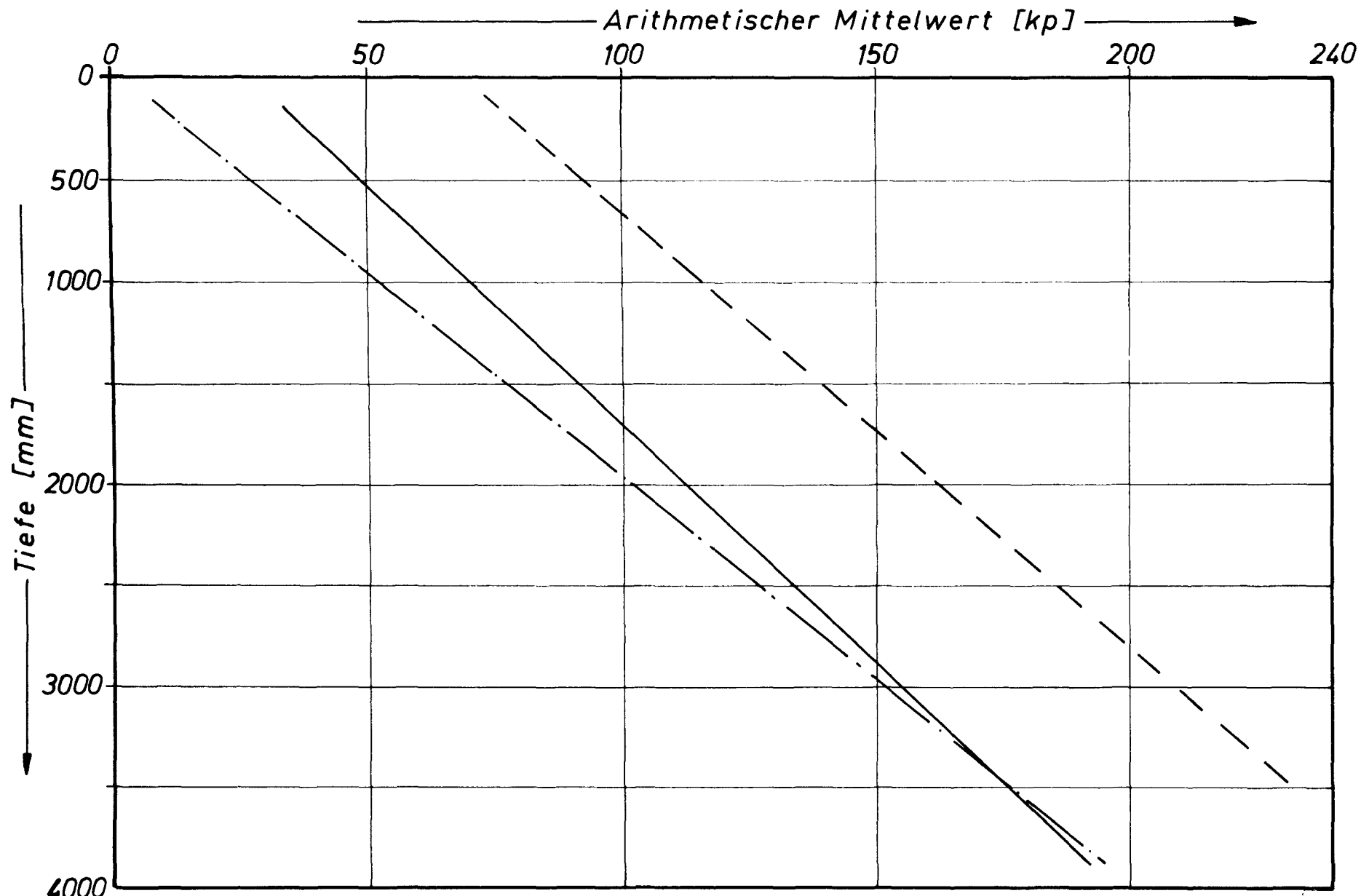
Diagramme der Drehmomente aufgenommen mit einem Kompensationsschreiber (Parameter : Hubgeschwindigkeit)

Abb. 8



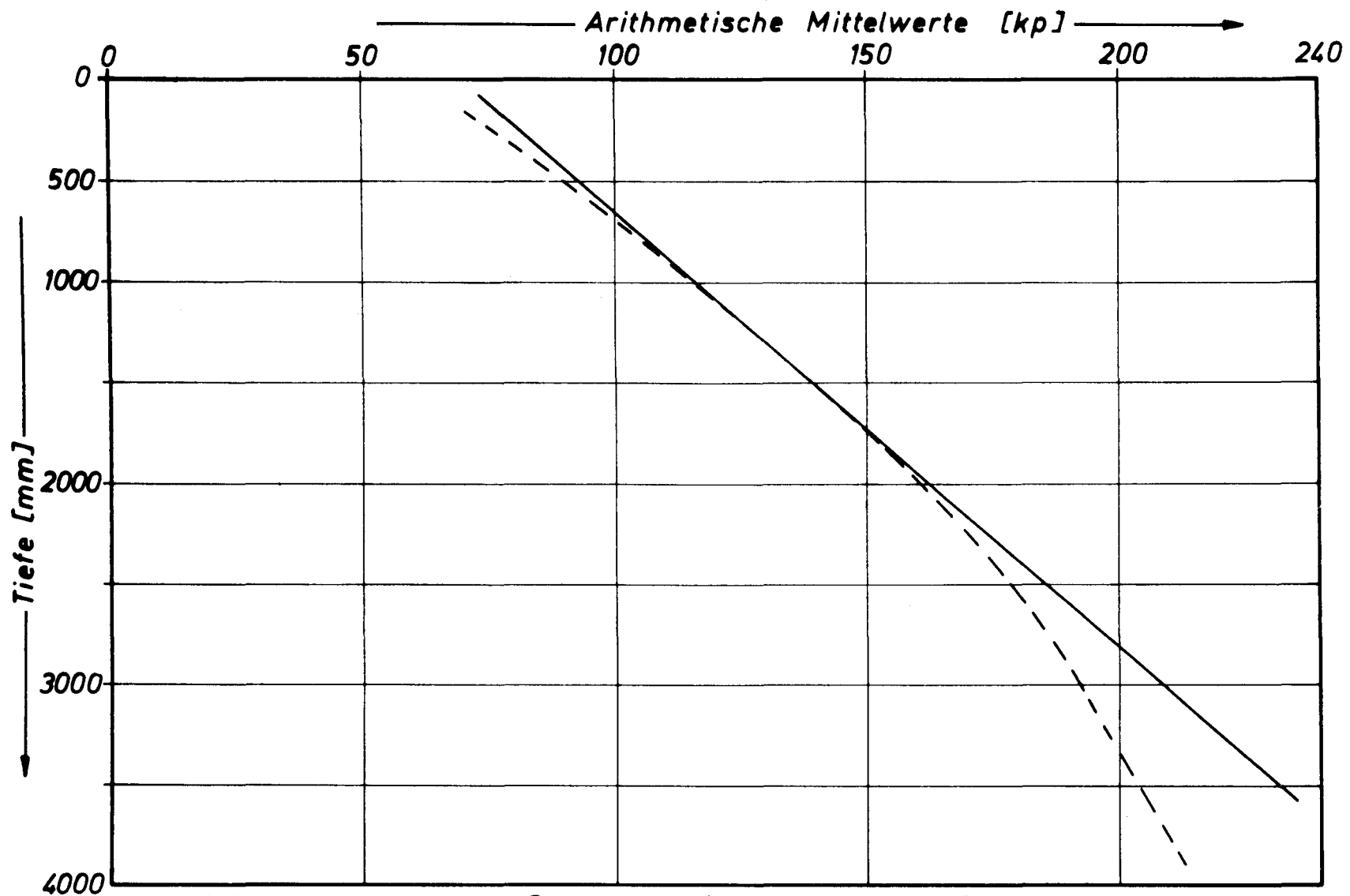
Vergleich: Einstabantrieb, — Mst1 - - - Mst2 - · - · Mst4  
 Versuchsbedingungen: Graphitkugeln, Drehstab zweigängig, Stabspitze I

Abb. 9



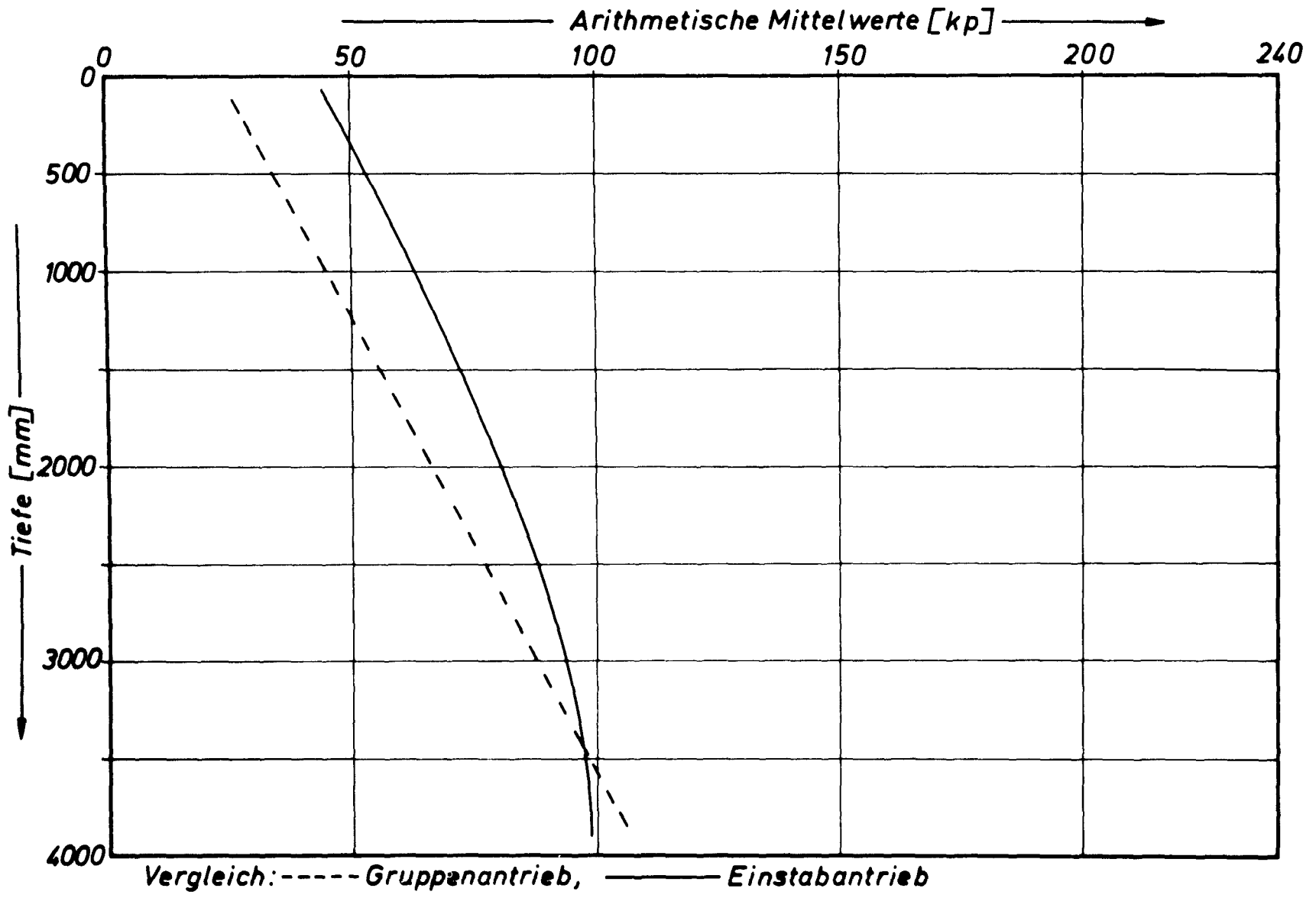
Vergleich: Gruppenantrieb ——— Stabspitze I - - - - Stabspitze II — · — · — Stabspitze III  
 Versuchsbedingungen: Steatitkugeln, Drehstab zweigängig

Abb.10



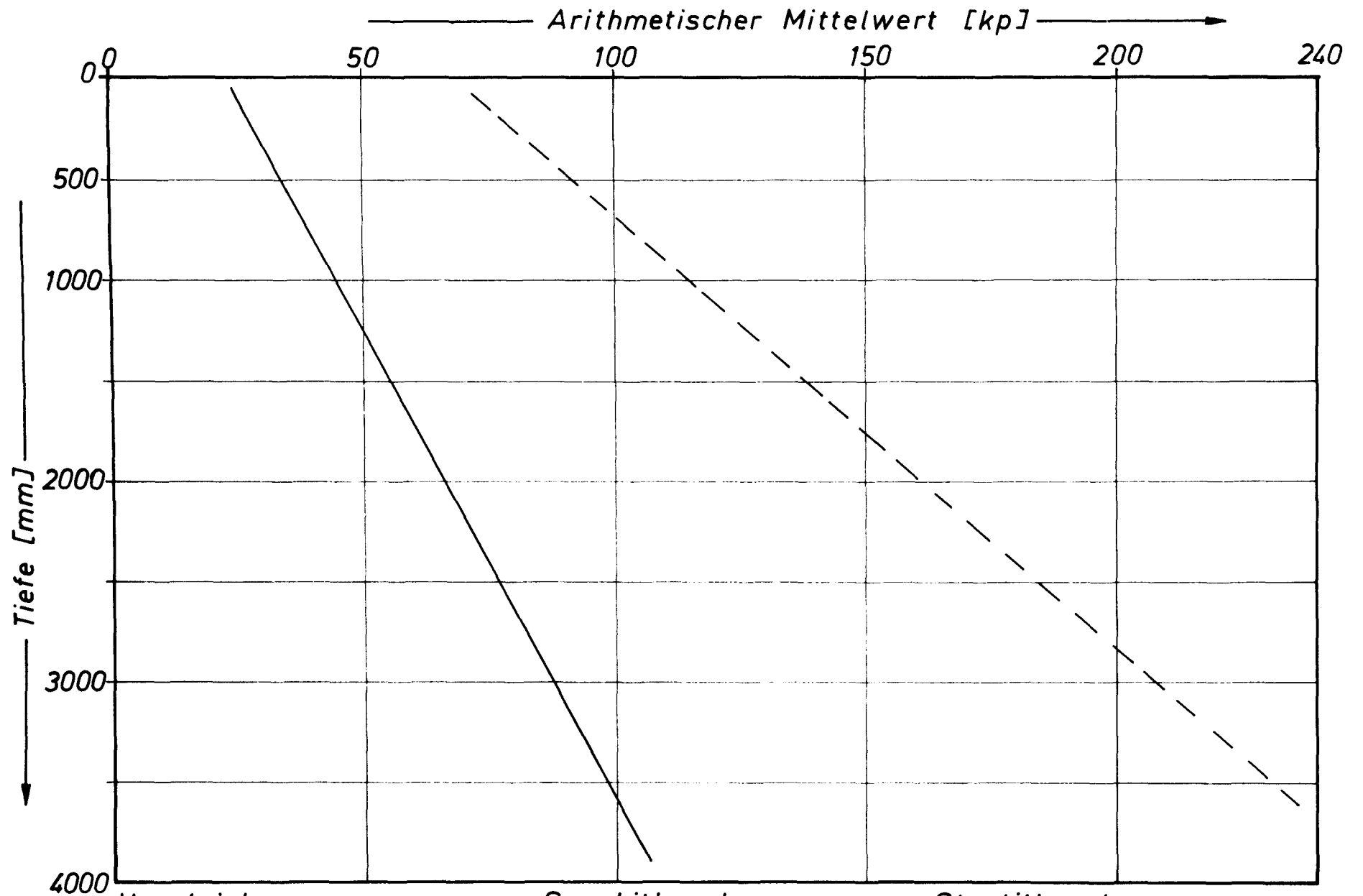
Vergleich: ————— Gruppenantrieb - - - - - Einstabantrieb  
 Versuchsbedingungen: Steatitkugeln, Drehstab zweigängig, Stabspitze II

Abb.11



Versuchsbedingungen: Graphitkugeln, Drehstab zweigängig, Stabspitze II

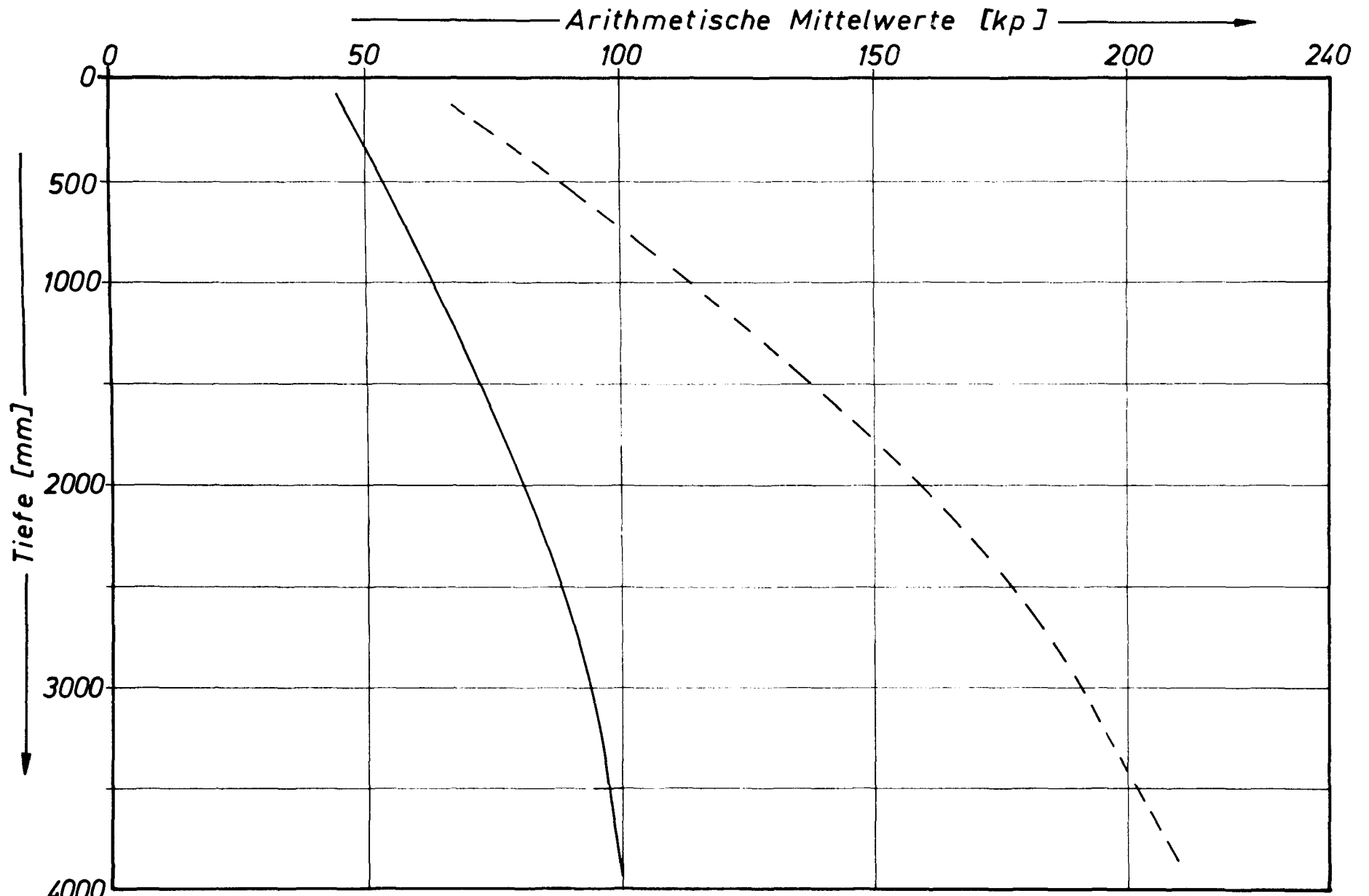
Abb.12



Vergleich: ————— Graphitkugeln - - - - - Steatitkugeln  
 Versuchsbedingungen: Gruppenantrieb, Drehstab zweigängig, Stabspitze II

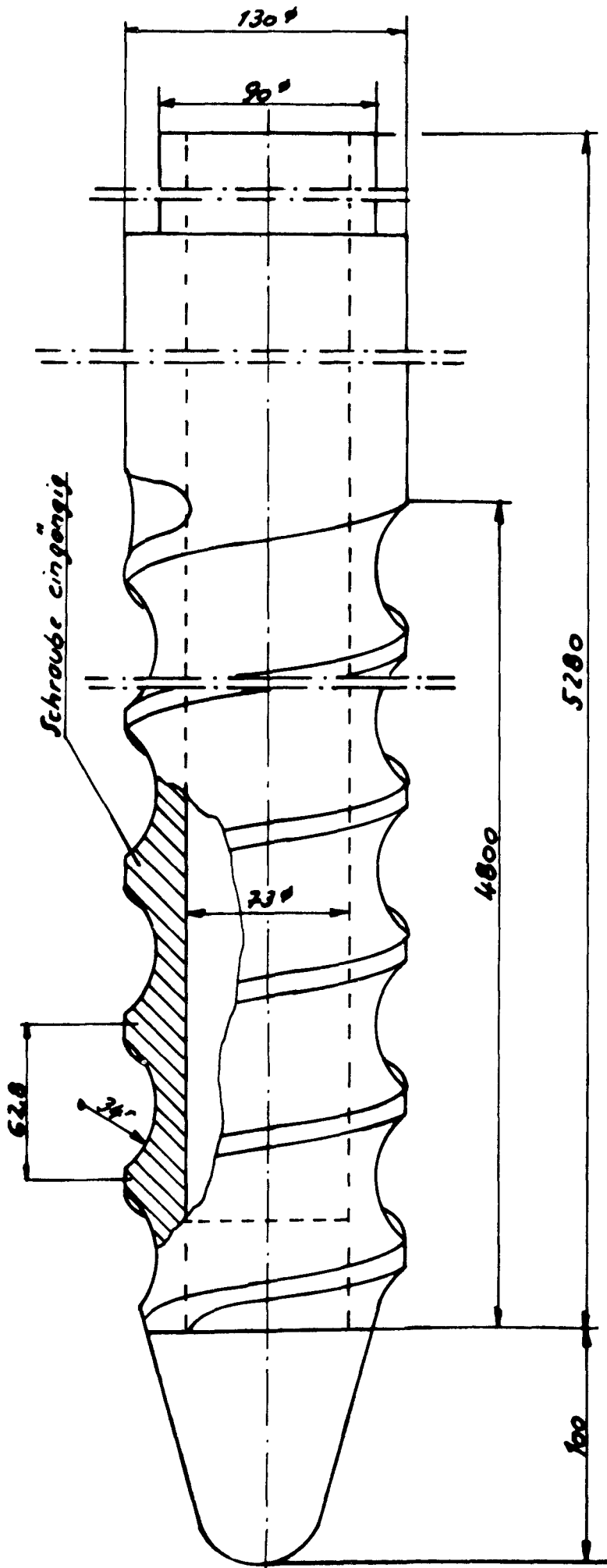
Abb.13





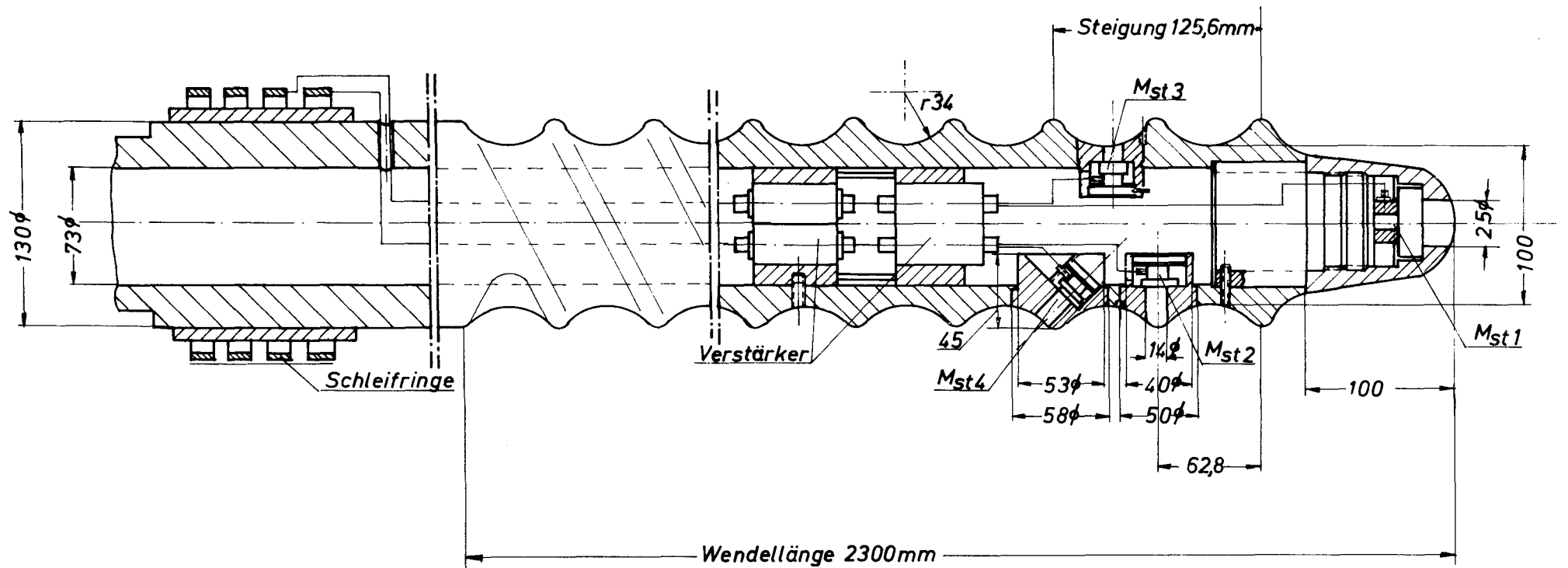
Vergleich: ————— Graphitkugeln - - - - - Steatitkugeln  
 Versuchsbedingungen: Einstabantrieb, Drehstab zweigängig, Stabspitze II

Abb.14



Skizze 1

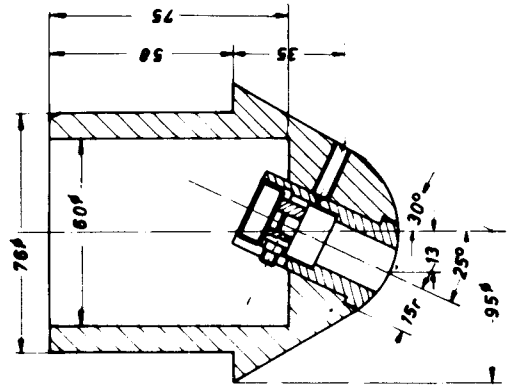
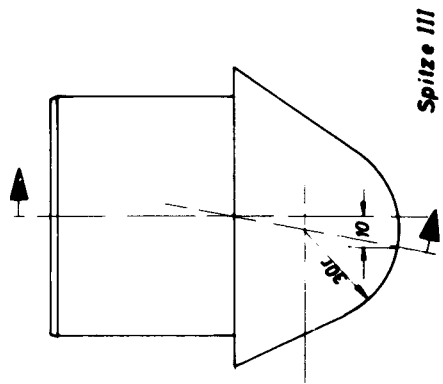
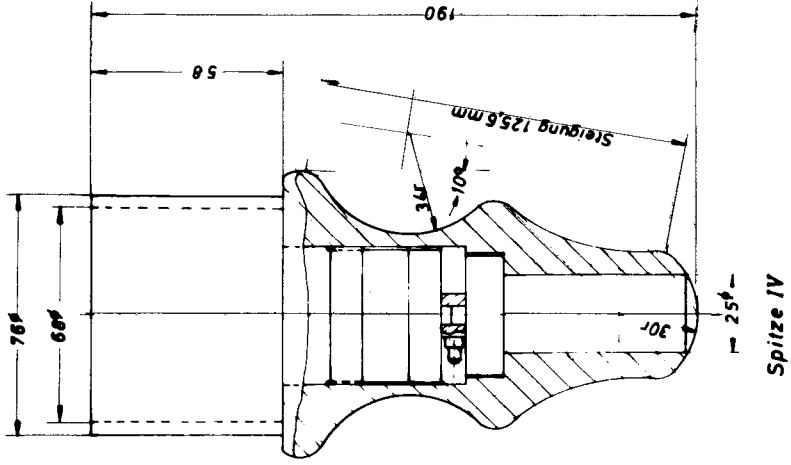
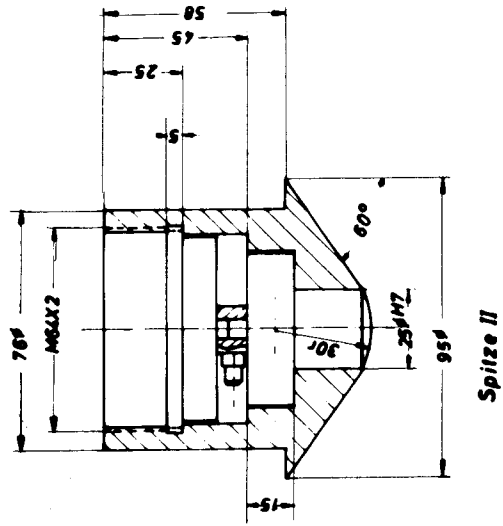
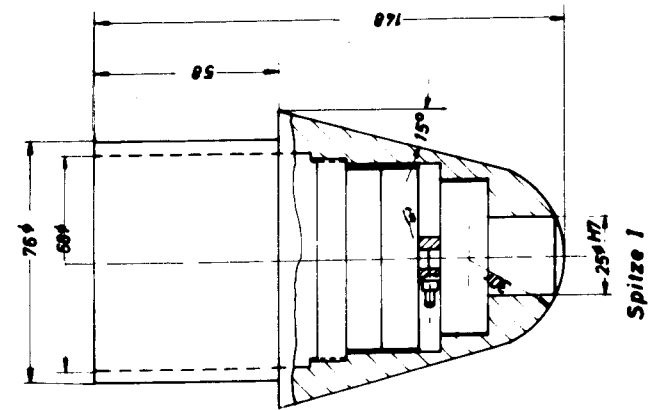
Versuchsstab Modell 1:1



26.3.69 *Goethe*

Drehstab-Zweigängig

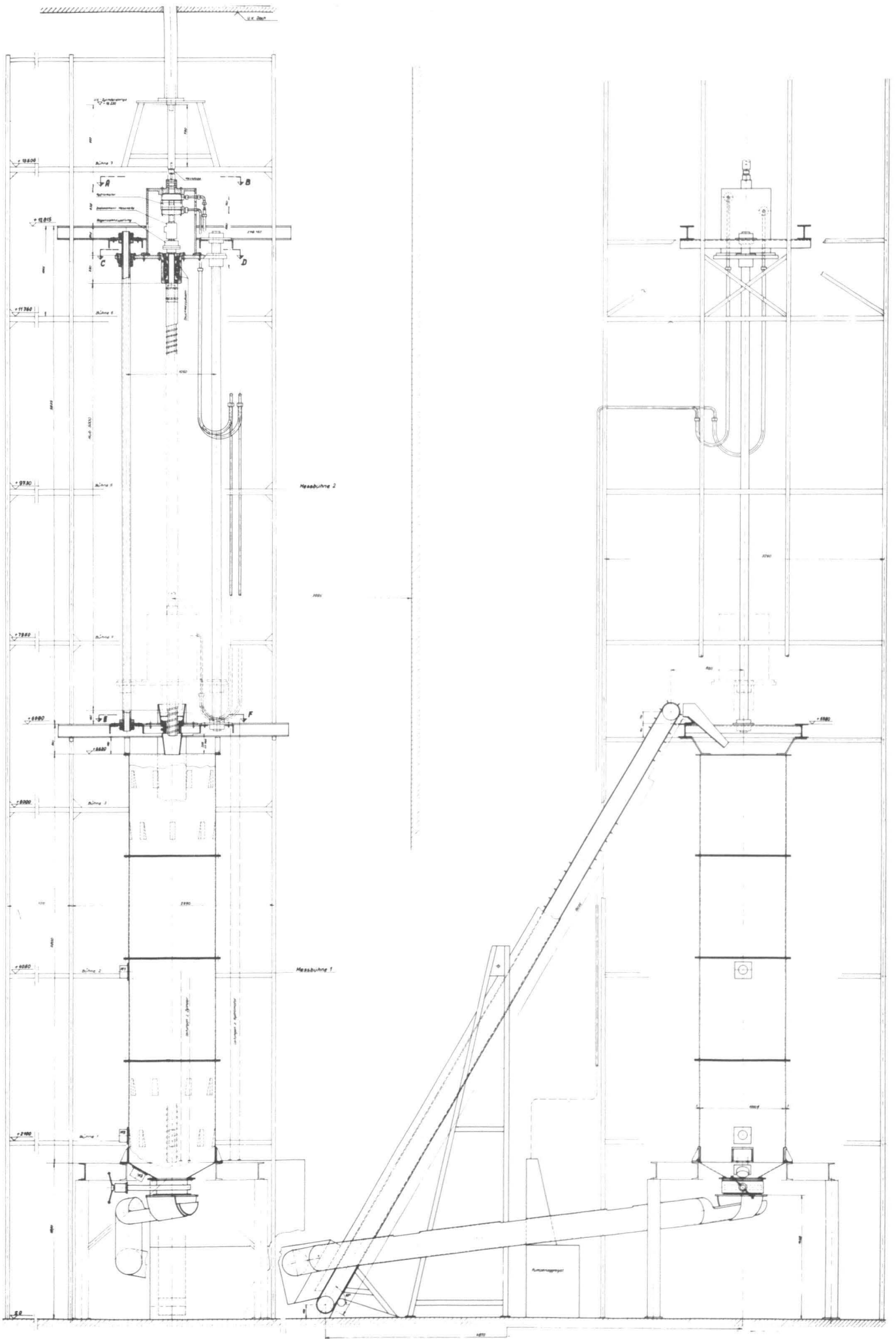
Skizze 2



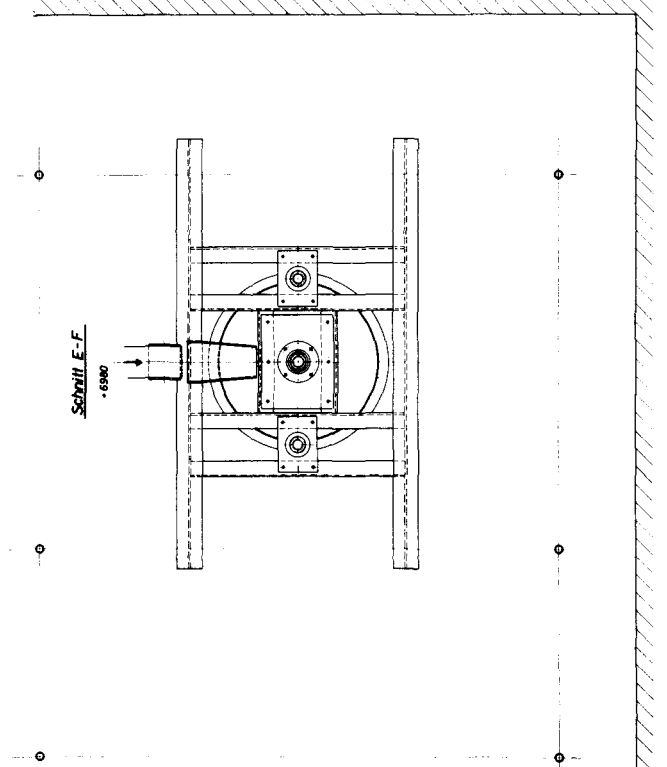
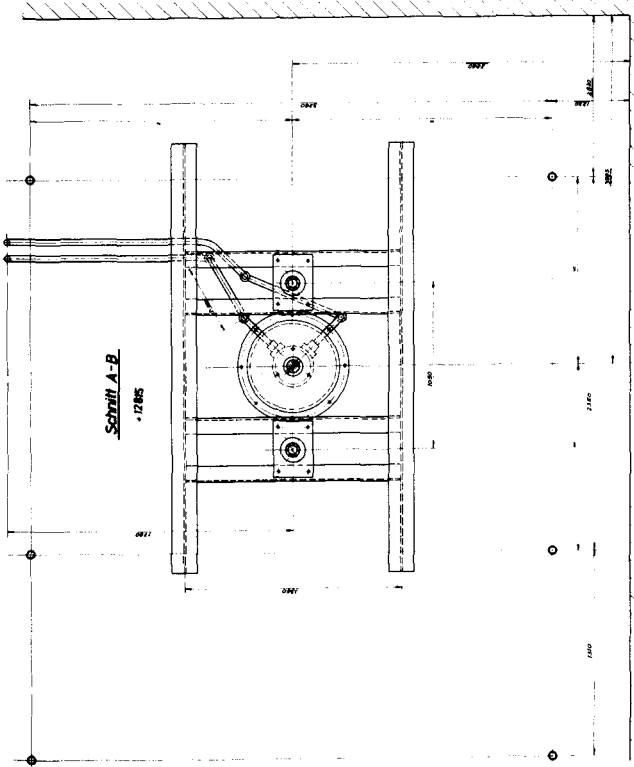
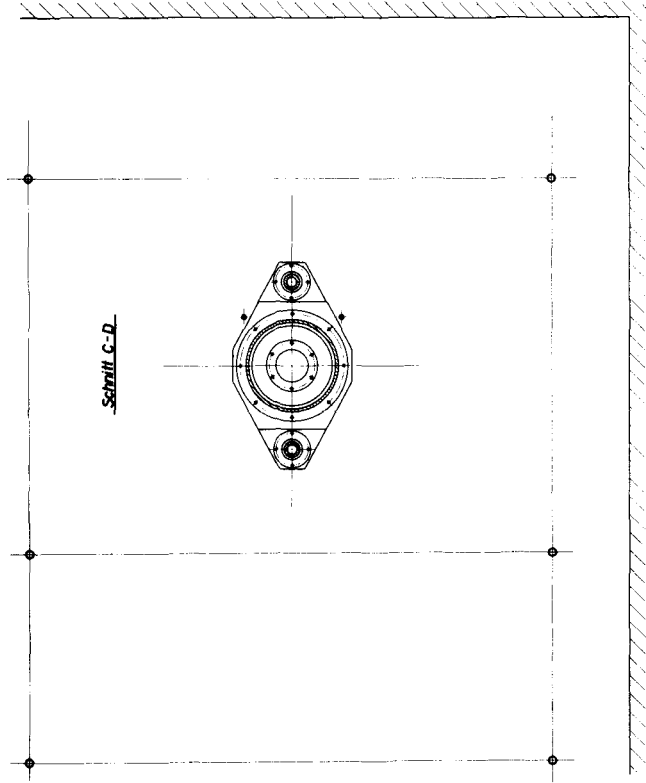
16.5.69

Skizze 3  
Masstab:  
1:1

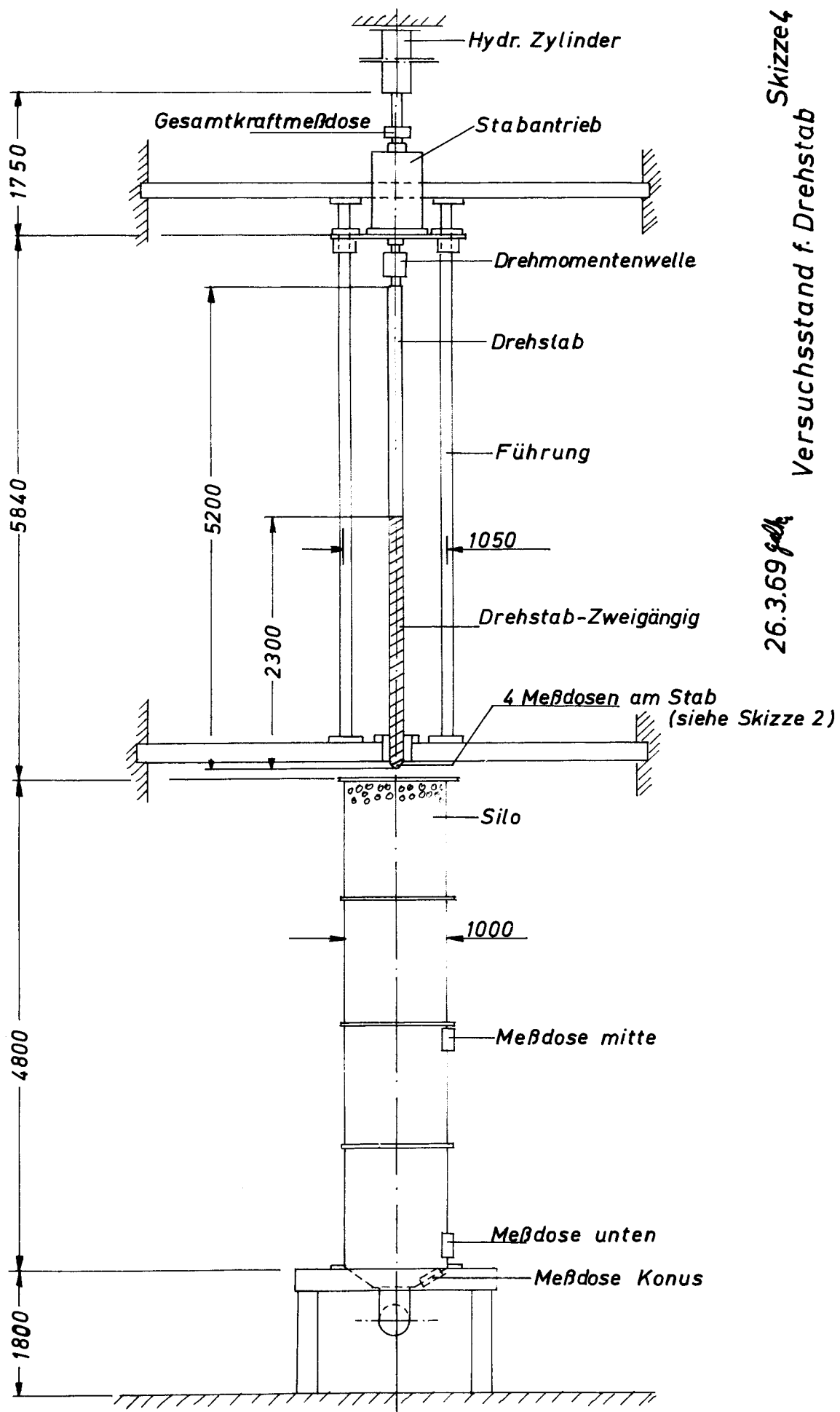
Spitzen für Drehstab



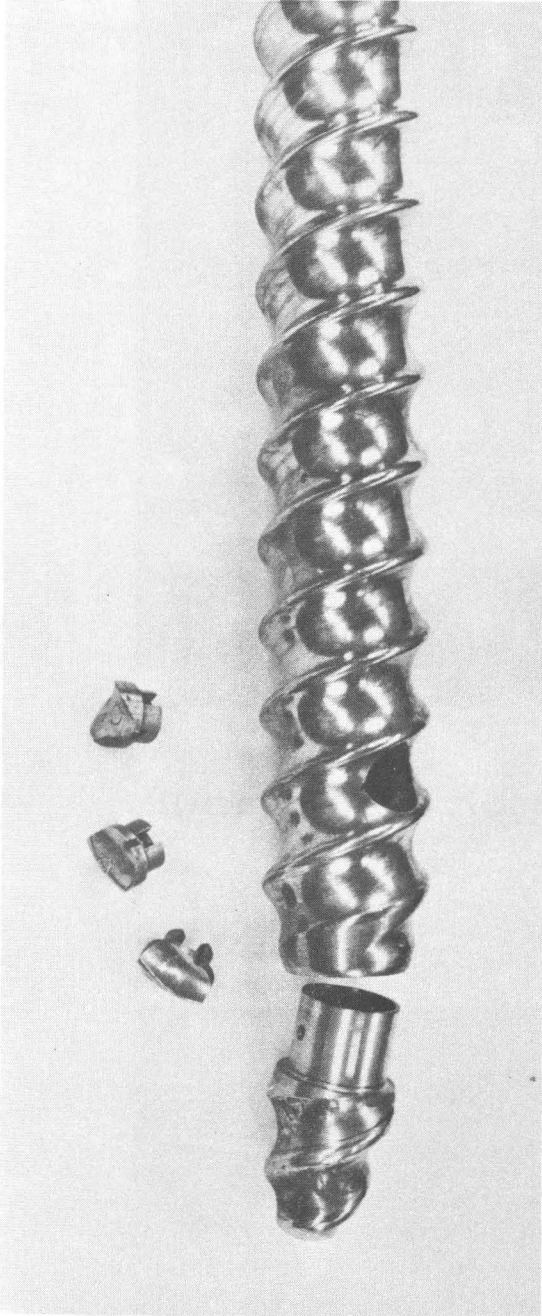
Schnitte nach Zeichn. Z.30/528



Gesamtdarstellung siehe Zeichnung Z.30/529

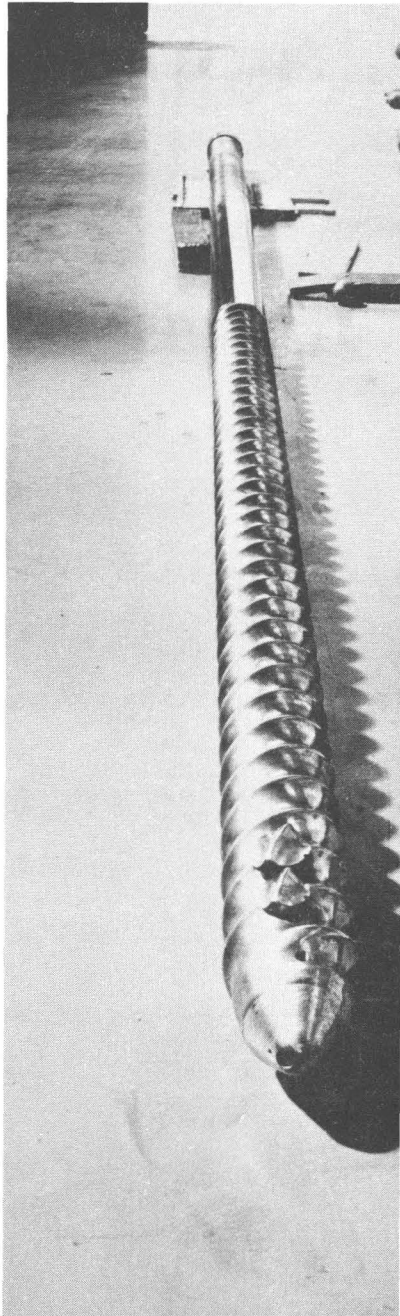


Skizze 4  
 Versuchsstand f. Drehstab  
 26.3.69 gdh



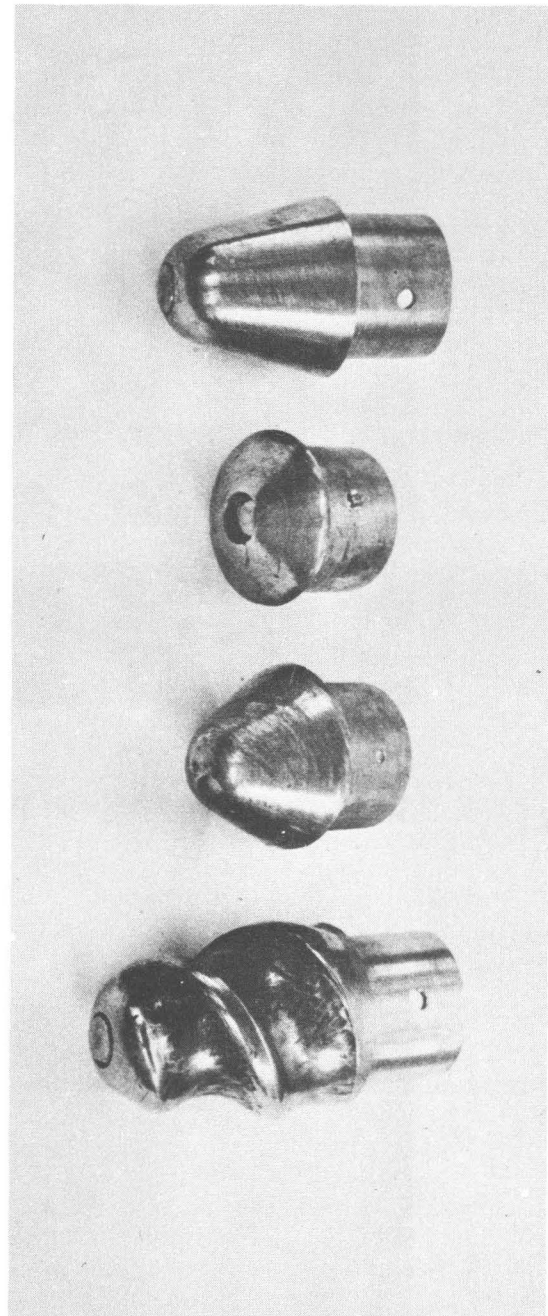
*Drehstab mit  
gewendelter Spitze  
und Stabmeßdosen*

*Foto 1*



*Drehstab zweigängig  
und halbgewendelt*

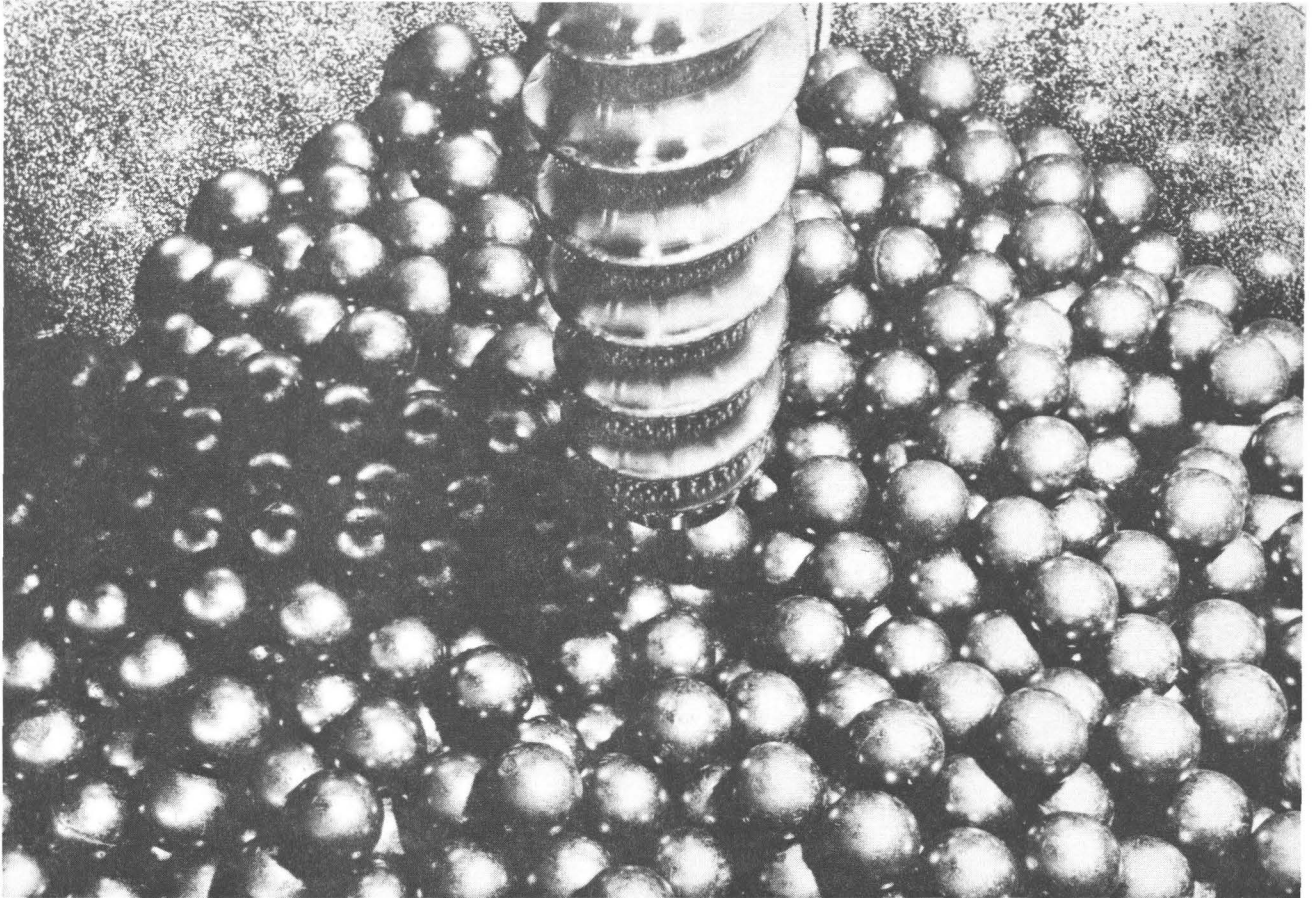
*Foto 2*



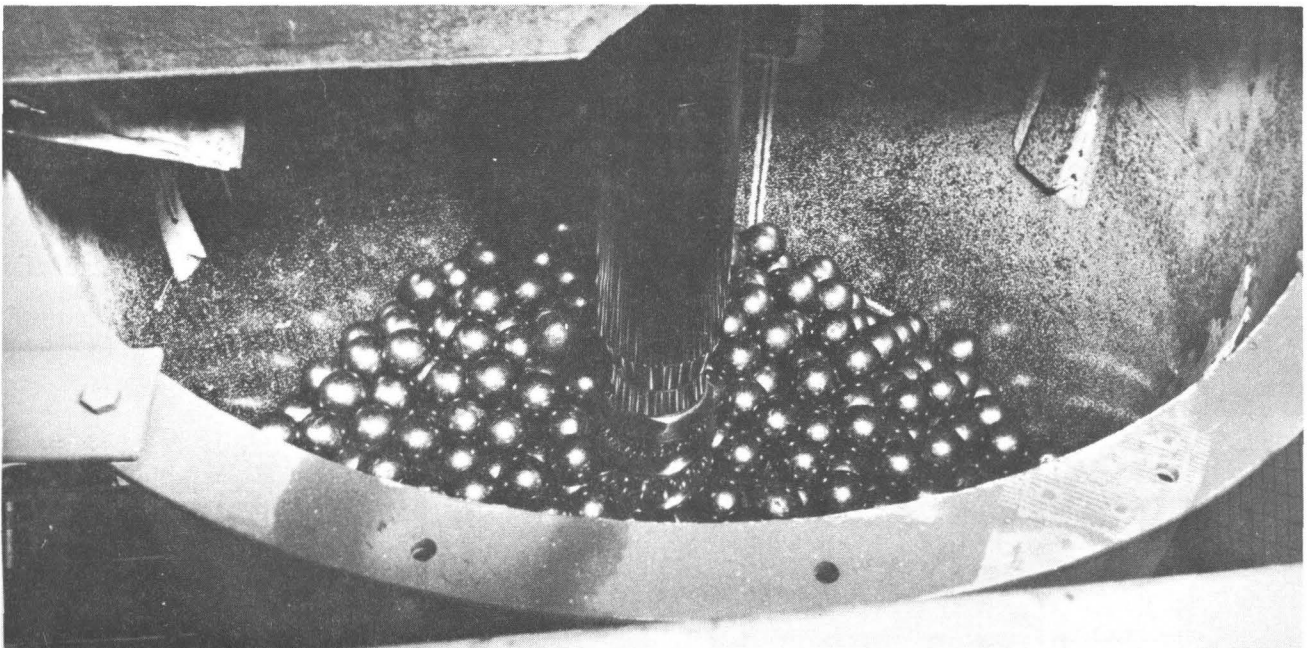
*Drehstabspitzen  
I-IV*

*Foto 3*

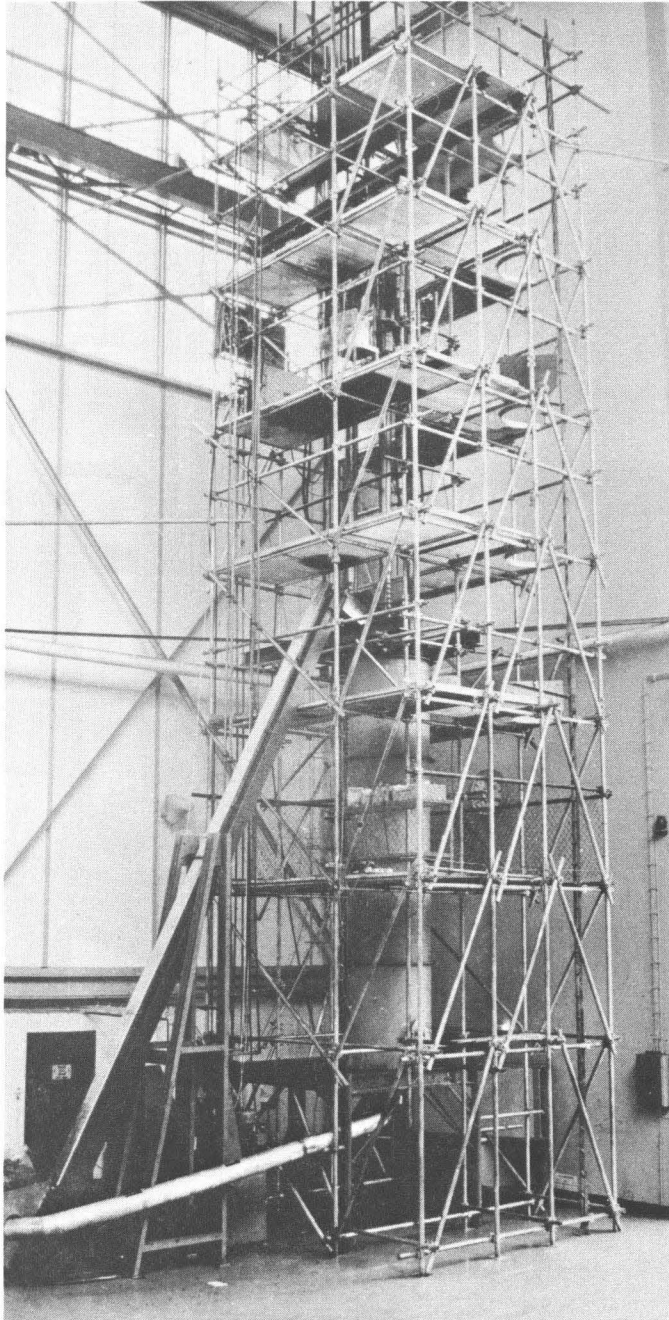




*Blick auf den Kugelhaufen bei nicht eingefahrenem Drehstab*  
*Foto 4*

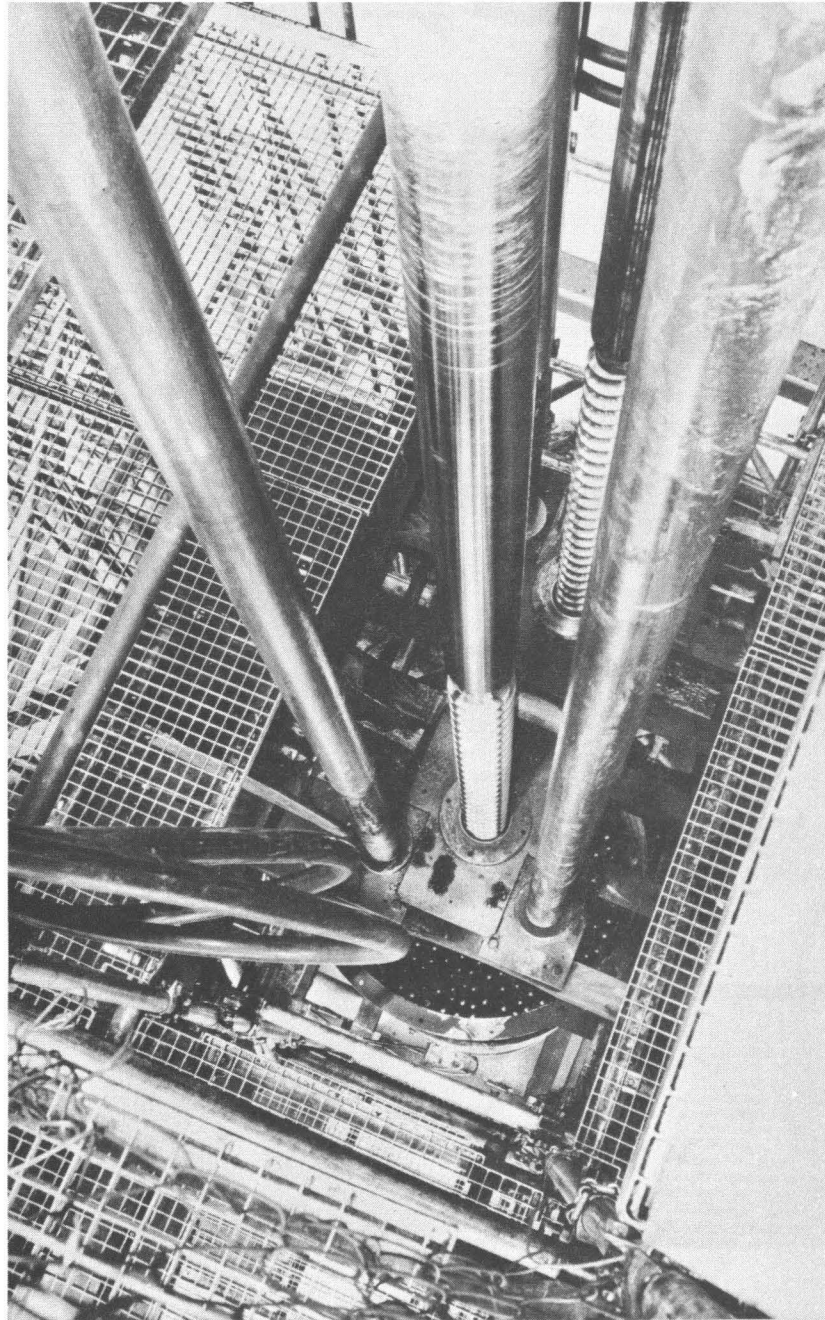


*Blick auf den Kugelhaufen bei halb eingefahrenem Drehstab*  
*Foto 5*



*Gesamtansicht des  
1:1 Versuchsstandes*

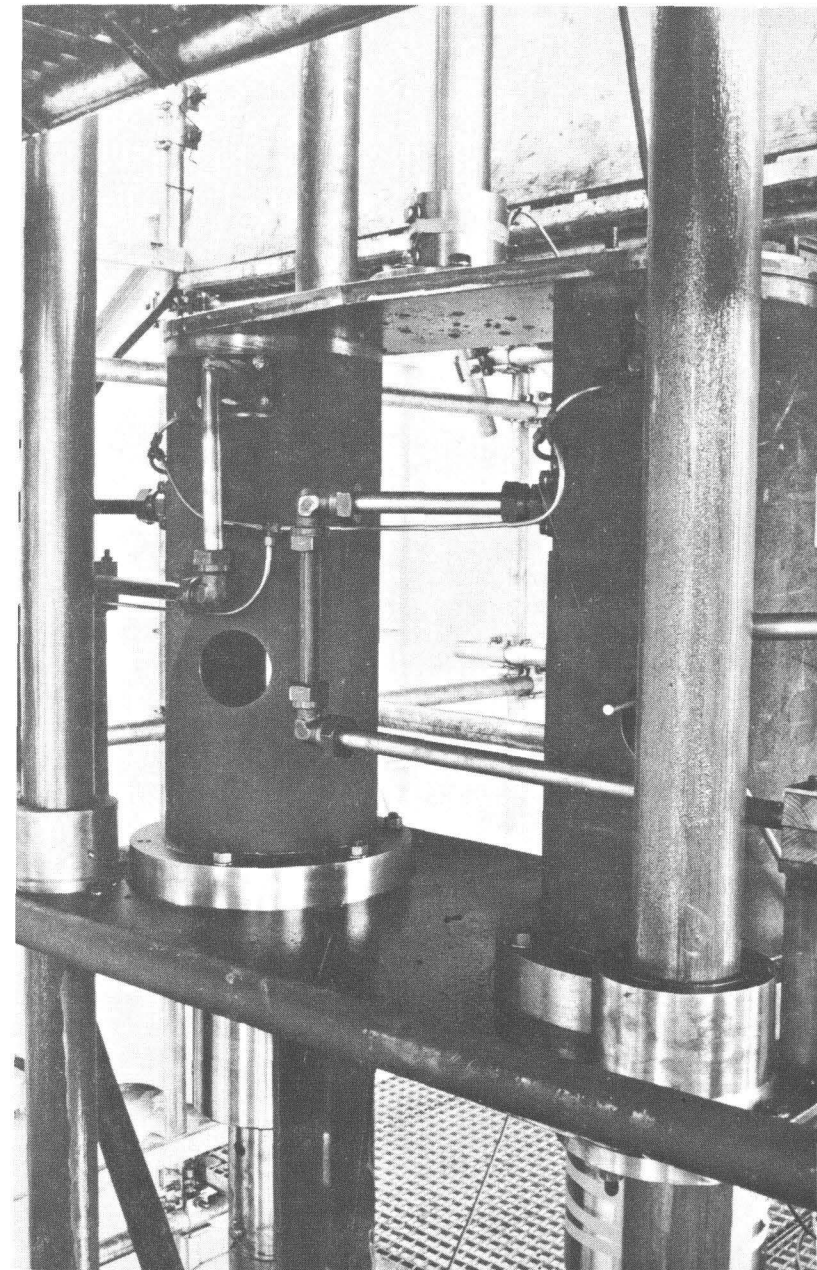
*Foto 6*



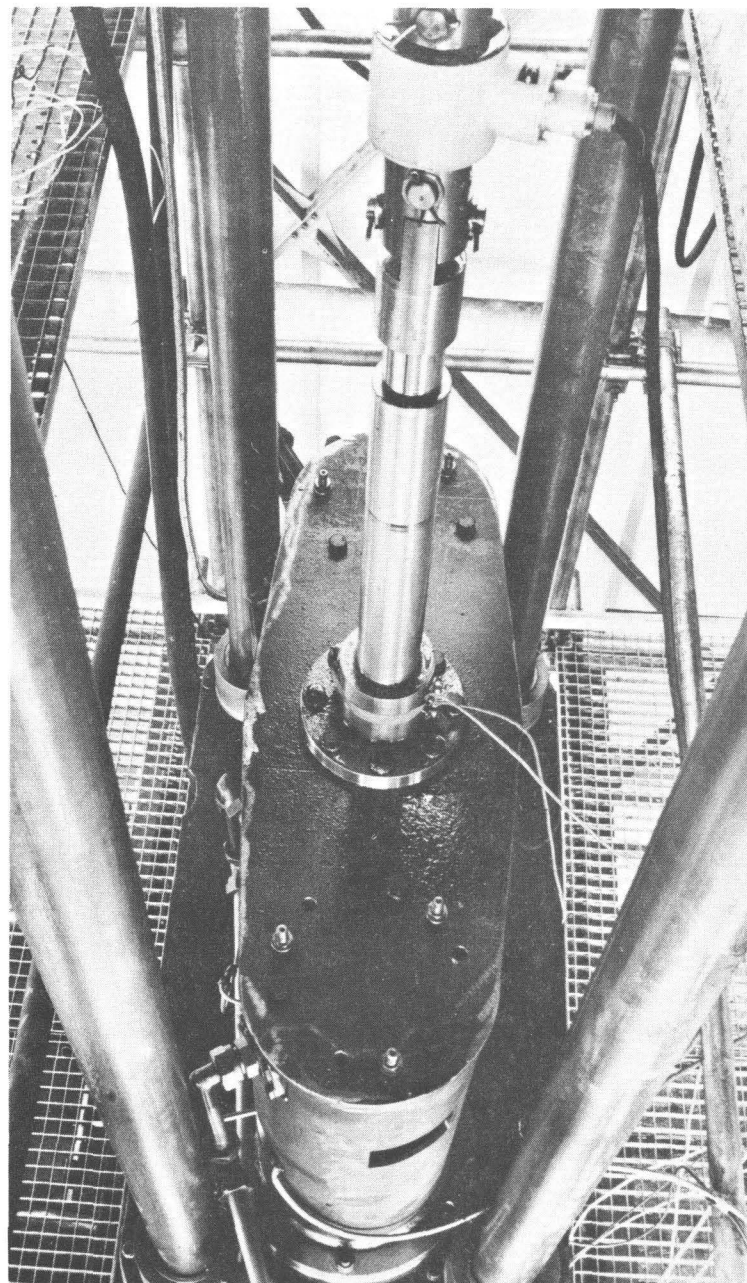
*Ansicht von Meßbühne 2  
in den 1,0 m Silo*

*Foto 7*

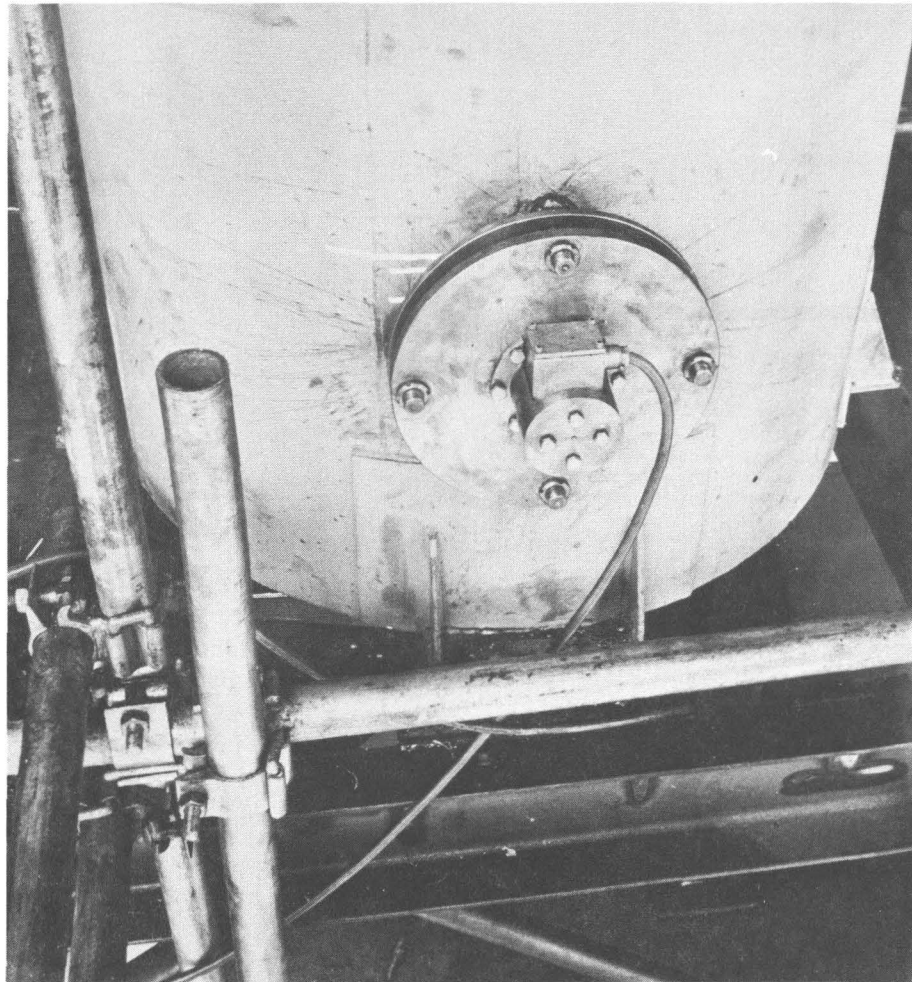
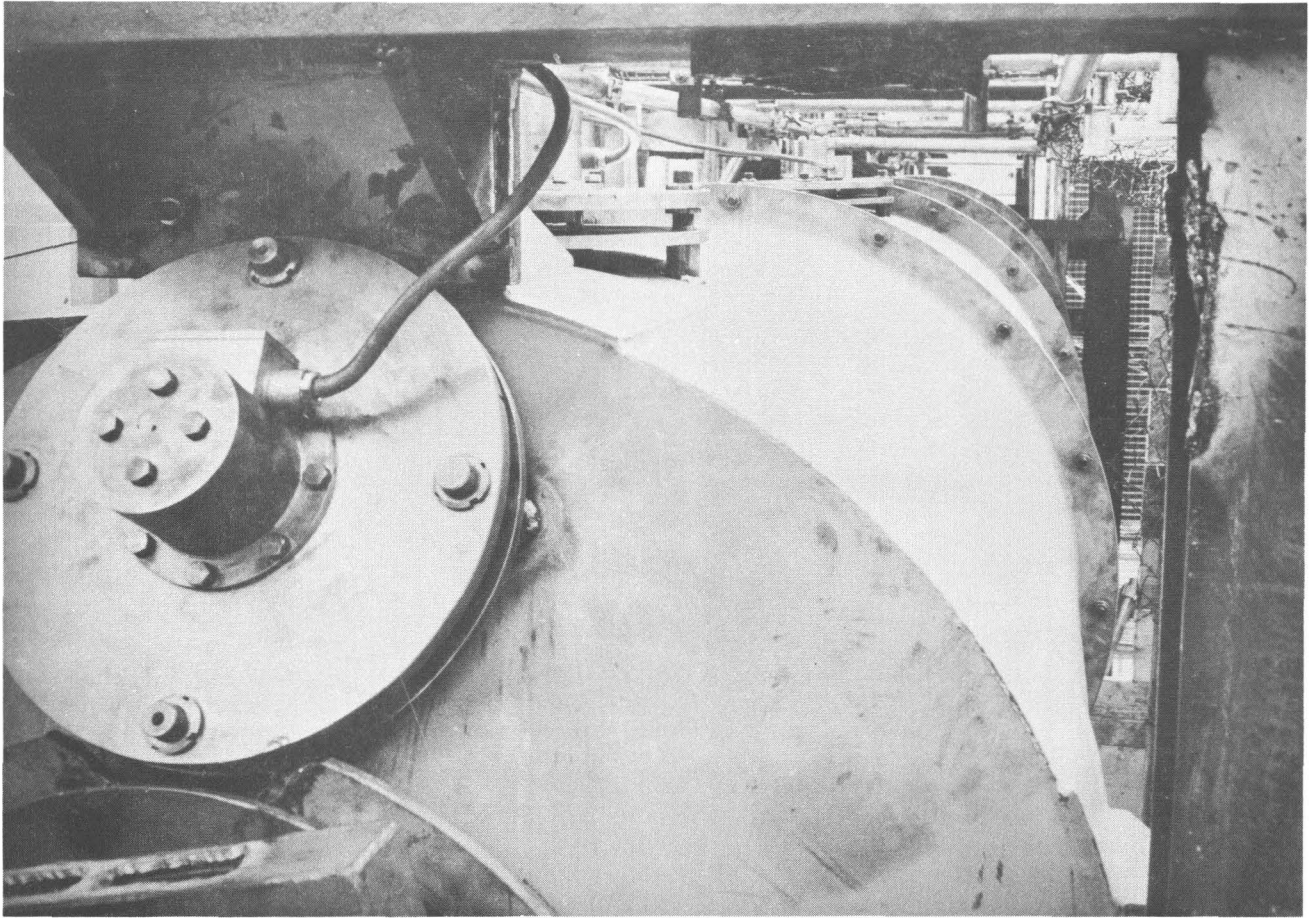




*Drehstabantrieb (Seitenansicht)*  
*Foto 8*

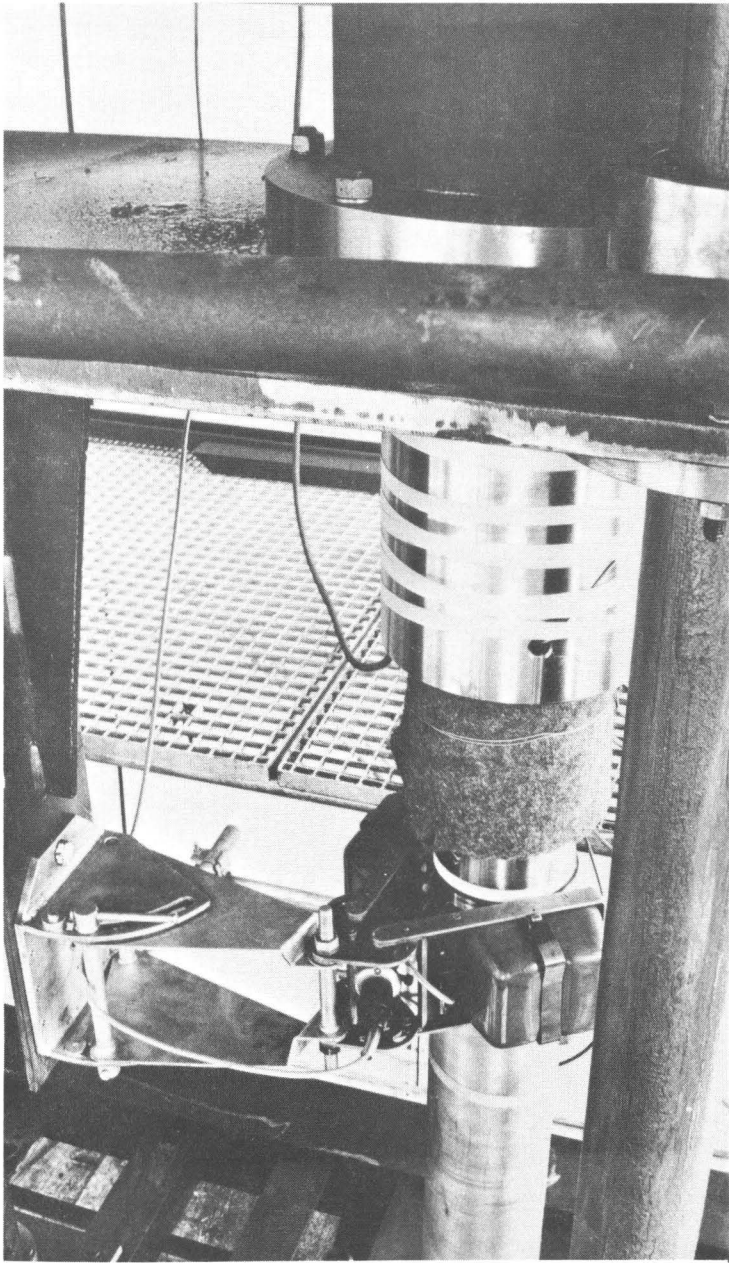


*Drehstabantrieb (Draufsicht)*  
*Foto 9*

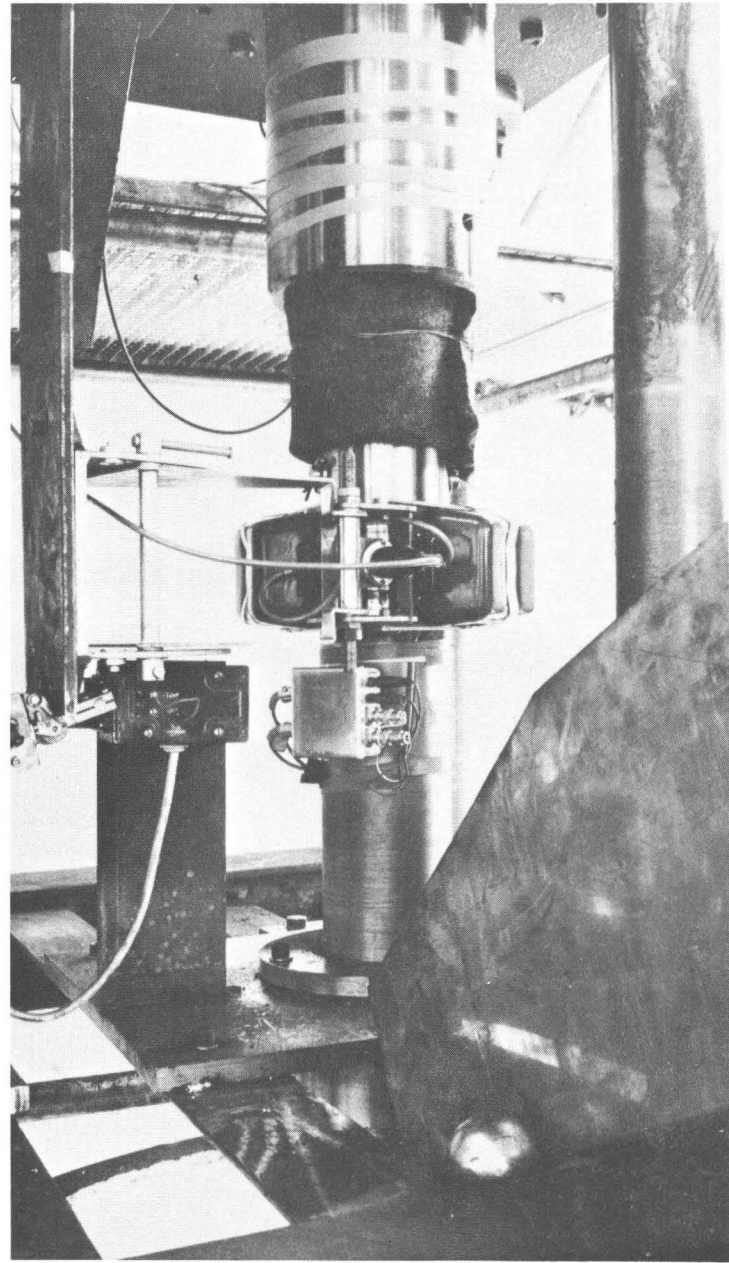


*Silo mit Druckmeßdosen  
Foto10 und11*





*Foto 12* Schleifringe mit Stromabnehmer



Stromabnehmer  
*Foto 13*

## **TEIL II**

### **Statistische Auswertung der Versuche zur Bestimmung der Brennelementbruchrate**

## 1. Einleitung

Im Teil II soll der Versuch gemacht werden, die Brennelement-Bruchrate beim Einfahren von Drehstäben zu berechnen. Die Berechnung der Bruchrate stützt sich auf die im Experiment gewonnenen Ergebnisse der Brennelementbelastungen sowie auf die ebenfalls experimentell ermittelte Bruchlastverteilungskurve. Die Belastungsverteilung kann ausschließlich durch Aufzeichnung der Anzahl und Stärke der Zusammenstöße zwischen Stab und Brennelementen ermittelt werden. Zu diesem Zweck waren die im Teil I beschriebenen Versuchsreihen erforderlich, bei denen Stäbe in eine Kugelschüttung eingedreht wurden. Die auftretenden Kräfte sind bezüglich Häufigkeit und Größe von der "Statistik" der jeweils vorliegenden Kugelpackung abhängig. Die Belastungsverteilungsdichte wird sich bei einer Vielzahl von Einfahrversuchen mit um so mehr statistischem Aussagewert herausbilden, d.h. um so genauer reproduzierbar werden, je mehr Versuche ihr zugrunde liegen.

Parallel zu dieser Belastungsverteilungskurve läßt sich eine Bruchlastverteilungskurve gleichfalls empirisch ermitteln, indem Kugeln unter bestimmten Bedingungen bis zum Bruch belastet werden, und indem die Häufigkeit als Funktion der Last aufgetragen wird. Auf die Meßbedingungen und deren Auswirkungen auf die Lage der Bruchlastkurve sei später eingegangen.

## 2. Versuchsbedingungen

Der Auswertung in dieser Arbeit liegen die Meßwerte dreier Versuchsreihen zugrunde, die in der Zellgeometrie im Maßstab 1:1 unter folgenden Bedingungen durchgeführt wurden:

Graphit- bzw. Steatitkugeln von 6 cm Durchmesser,  
Steatitkugeln mit den unterschiedlichen Reibungskoeffizienten  $\mu_I$  und  $\mu_{II}$ ,  
Einfahren der Drehstäbe:

Drehzahl 144 U/min

Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec

$\varphi = 1,5$

Herausfahren der Stäbe:

Drehzahl 96 U/min

Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec

$\varphi = - 1,0$

### 3. Versuchsauswertung

Die Meßwerte liegen in Form von diagrammatischen Schreibstreifen des Registriergerätes vor, auf welchen die den Kräften proportionalen Impulse aufgezeichnet sind. Der Kurvenverlauf zwischen zwei Nulldurchgängen wird als ein Ereignis und das dazwischenliegende absolute Maximum als zugehörige Kraft definiert.

Die einzelnen Einfahrversuche, bestehend aus einer Vielzahl solcher Kurvenausschläge, auch "peaks" genannt, werden in der Auswertung in Tiefenintervalle  $\Delta 500$  mm und in wachsende Kraftstrecken eingeteilt, die die jeweiligen peaks in eine bestimmte Größenklasse einstufen. Auf einer Tafel, auf welcher vertikal die Tiefenintervalle  $j$  und horizontal die Kraftklassen  $i$  indiziert sind, werden in den korrespondierenden Koordinatenquadranten die peaks verzeichnet.

Abb. 1 zeigt einen Schreibstreifen aus der Steatitversuchsreihe im Intervall 1 m bis 4 m. Deutlich ist der Kraftanstieg mit wachsender Tiefe zu erkennen, bis nach etwa 3 m Tiefe die Größe der maximalen peaks praktisch konstant bleibt.

#### 3.1 Belastungsverteilung

Die Belastungsverteilungskurve, die identisch mit der Belastungsdichte ist, wird experimentell ermittelt, indem man die relative Häufigkeit in den einzelnen Kraftklassen ermittelt. Die Belastungsverteilungen lassen sich differentiell, d.h. im Tiefenintervall  $j$  ermitteln nach



$$b_j(i) = \frac{n_j(i)}{N_j \cdot \Delta i} \quad 1 \leq i \leq K \quad (1)$$

$b_j(i)$  Belastungsdichte in der Kraftklasse  $i$  und dem Tiefenintervall  $j$

$n_j(i)$  Anzahl der Treffer in der Kraftklasse  $i$

$N_j = \sum_{i=1}^K n_i$  Gesamtzahl der Treffer im Tiefenintervall  $j$

$K$  maximal auftretende Kraftklasse

$\Delta i$  Kraftintervall

Die Belastungsverteilung gemäß Definition Gl.(1) ist normiert, und es gilt

$$\sum_{i=1}^K b_j(i) \cdot \Delta i = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_j} = 1 \quad (2)$$

Analog folgt die integrale Belastungsdichte durch Betrachtung der gesamten Einfahrtiefe von 4 m als ein einzelnes Tiefenintervall.

Zeichnet man nun die diskreten  $b(i)$ -Werte in Abhängigkeit der Kraftklassen  $i$  auf, so läßt sich trotz der starken Streuung der einzelnen Werte eine annähernd glockenförmige Kurve zeichnen. Die Streuung resultiert zum Teil aus der fehlerhaften oder ungenauen Klassifizierung der absoluten Kraftmaxima. Dies wird bei einer graphischen Mittelwertbildung zwischen jeweils zwei benachbarten Punkten deutlich, wodurch die subjektiven Fehler kompensiert und die große Streuung der einzelnen Punkte verschliffen wird. Die in den Abbildungen der Belastungsdichte aufgezeichneten Punkte sind die durch diese Mittelung erhaltenen Werte.

Der angenähert glockenförmige Kurvenverlauf der Belastungsdichte ist eine der in der Statistik häufigsten Verteilungskurven einer Stochastik. Dieser Kurvenverlauf soll auch der Angriffspunkt zur Lösung des Problems sein, die experimentellen Ergebnisse

mathematisch zu formulieren.

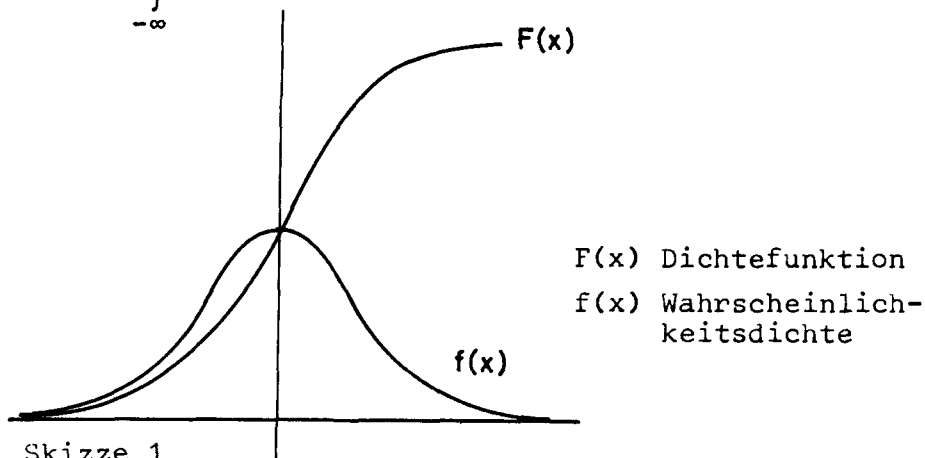
Eine Funktion  $F$ , die jeder Zahl  $X$  eine Wahrscheinlichkeit  $P$  des Ereignisses  $\{t \leq x\}$  zuordnet, heißt Verteilungsfunktion der Variablen  $t$ . Für stetige Variable gilt

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx, \quad (3)$$

wobei  $f(x)$  Verteilungskurve oder Wahrscheinlichkeitsdichte genannt wird.

Weiterhin gilt für die normierte Dichtefunktion

$$G(\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)dx = 1 \quad (4)$$



Die charakteristische Häufigkeitsverteilung mit dem symmetrischen glockenförmigen Verlauf wird dargestellt durch die Funktion

$$f(x) = a e^{-bx^2} \quad (5)$$

mit  $a$  und  $b$  als Konstanten.

Eine Sonderstellung unter diesen Funktionen nimmt die sogenannte Normalverteilung ein, die Gauß-Verteilung oder nach ihrem Entdecker De-Moivre-Stochastik genannt wird, und die durch additives Zusammenwirken

vieler zufälliger Einflüsse zustandekommt. Man spricht von der  $(\xi, \sigma)$ -Normalverteilung, wenn die Wahrscheinlichkeitsdichte der folgenden Form genügt:

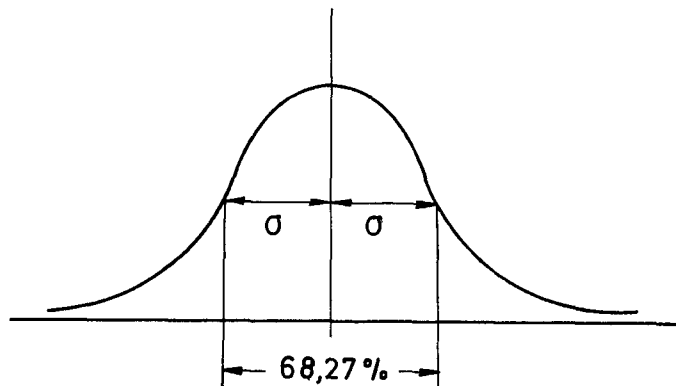
$$g(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{x-\xi}{\sigma}\right)^2 \quad (6)$$

wobei  $\xi$  der Mittelwert der Verteilung  
 $\sigma$  die Standardabweichung  
 $x$  eine nach der Stochastik benannte Abszisse

ist.

Die Größe der Standardabweichung  $\sigma$  ist durch den Abszissenwert des Wendepunktes der Normalverteilung gegeben; weiter läßt sich zeigen, daß rund 2/3 aller Ereignisse zwischen den Ordinaten der Wendepunkte liegen.

Diese Eigenschaft der Normalverteilung macht man sich bei der graphischen Ermittlung der Verteilungsgrößen zunutze. Die Summenhäufigkeit, identisch mit der Verteilungsfunktion  $F$ , zeigt bei normaler Darstellung einen S-förmigen Verlauf. Dieser Verlauf bzw. die Funktion  $G$  läßt sich in einem Wahrscheinlichkeitsnetz infolge der Verzerrung der Ordinatenkala auf einer Geraden abbilden <sup>(1)</sup>. Der Abszissenwert des Schnittpunktes mit der 50%-Horizontalen liefert den Mittelwert  $\xi$  der Verteilung, derjenige mit der  $(50 - \frac{68,27}{2})\%$ -Horizontalen die Standardabweichung  $\sigma$  (Abb.2).



Skizze 2

Im Gegensatz zur strengen Symmetrie der bisher betrachteten idealen Normalverteilung stellen empirische, z.B. die hier gewonnenen Verteilungen fast immer inhomogene Mischverteilungen dar, d.h. Überlagerungen mehrerer Verteilungen. Das Ziel besteht also stets in der bestmöglichen Anpassung einer idealen Kurve an eine vorgegebene, experimentell aufgenommene Verteilung.

### 3.2 Positiv\_schiefe\_Verteilung

Die vorliegende, experimentell aufgenommene Verteilung (Abb. 3) ist unsymmetrisch und weist einen exzessiv entwickelten, positiven Auslauf auf.  $b(x)$ , die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, ist nur im Bereich  $x \geq 0$  definiert, und die normierte Dichtefunktion erfüllt in Abänderung der Gleichung (4) die Bedingung

$$B(\infty) = \int_0^{\infty} b(x)dx = 1 \quad (7)$$

Soll nun in einem Bereich  $x > x_0$   $b(x)$  durch die ideale Normalverteilung  $g(x)$  angepaßt werden, so muß gelten

$$\int_{x_0}^{x(I)} g(x)dx = \int_{x_0}^{x(I)} b(x)dx \quad (8)$$

oder exakter, wegen der diskreten Werte bei Experimenten

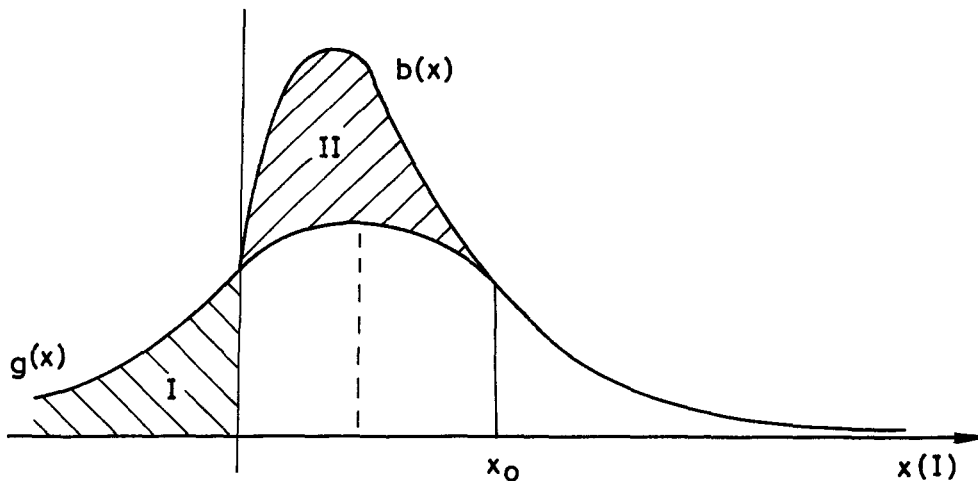
$$\int_{x_0}^{x(I)} g(x)dx = \sum_{x_0}^{x(I)} b(x)\Delta x \quad (9)$$

Die Summe und das Integral sind laut Definition auf dem Häufigkeitspapier als Punkte darstellbar. Da naturgemäß Abweichungen zwischen beschreibender und gemessener Funktion (Abb. 2) vorhanden sind, wird zwecks optimaler Anpassung eine Minimalisierung der Summe der Fehlerquadrate durchgeführt.

$$\text{Min} (\xi, \sigma) = \sum_I \left[ \int_{\frac{x_0 - \xi}{\sigma}}^{\frac{x(I) - \xi}{\sigma}} g(x)dx - \sum_{x_0}^{x(I)} b(x)\Delta x \right]^2 \quad (10)$$

Wegen der Normierung der Dichtefunktion  $B(x)$  Gleichung (7) als auch definitionsgemäß der Funktion  $G(x)$  Gleichung (4), ist die Flächengleichheit von I und II (Skizze 3) gegeben. Mathematisch formuliert muß gelten

$$\int_{-\infty}^{\frac{x_0 - \xi}{\sigma}} g(x) dx = \int_0^{x_0} b(x) \Delta x = \text{const.} \quad (11)$$



Skizze 3

Durch additive Erweiterung der Gleichung (10) mit der Konstanten Gleichung (11) folgt

$$\text{Min}(\xi, \sigma) = \sum_I \int_{-\infty}^{\frac{x(I) - \xi}{\sigma}} g(x) dx - \sum_0^{x(I)} b(x) \Delta x \quad (12)$$

Wird der Ausgleich über  $\xi, \sigma$  mittels Ansatz (12) durchgeführt, so sind transzendente Gleichungen zu lösen, die auch bei Rechereinsatz sehr aufwendig sind. Benutzt man dagegen die lineare, inverse Funktion der Normalverteilung und die Näherung von Hastings für die experimentellen Summenprozente <sup>(2)</sup>, so reduziert sich der Rechenaufwand auf ein lineares Gleichungssystem. Dieser Ausgleich liefert die gesuchten  $\xi$ - und  $\sigma$ -Kennwerte der Verteilung, die im Gegensatz zum oben beschriebenen graphischen Ermittlungsverfahren nicht der Subjektivität des Auges unterliegen.

Abb. 2 zeigt die Folge der experimentellen Summenhäufigkeitspunkte und ihre rechnerische Idealisierung. Im Rechenprogramm <sup>(3)</sup> sind die ersten fünf Werte des niederen Kraftbereiches unterdrückt, da sich diese, links von  $x_0$  liegend, verfälschend auf die zu ermittelnden Kennwerte auswirken würden.

### 3.3 Multiplikationssatz und Bruchwahrscheinlichkeit

Bei Vorliegen zweier unabhängiger stochastischer Variablen erhält man nach dem Multiplikationssatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Häufigkeit des Auftretens beider Ereignisse durch

$$P(E_1 \cap E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2) \quad (13)$$

Diesem Wahrscheinlichkeitsprodukt entspricht ganz allgemein diejenige Fläche, die zwei unabhängige Variable bzw. ihre Verteilungsgebiete gemeinsam haben; im speziellen Fall entspricht die Überlappung der beiden Verteilungskurven der Bruchwahrscheinlichkeit. Nach Gleichung (13) und Gleichung (6) ergibt sich die Bruchwahrscheinlichkeit <sup>(2)</sup> zu

$$P = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{K-\xi_1}{\sigma_1}\right)^2\right] dK \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^K \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\xi_2}{\sigma_2}\right)^2\right] dt \quad (14)$$

und nach Umformung

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{erf}_c \left[ \frac{\xi_2 - \xi_1}{\sqrt{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}} \right] \quad (15)$$

$$\text{mit } \operatorname{erf}_c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt \quad (16)$$

$\xi_2, \sigma_2$  Kennwerte der Bruchlastverteilung

$\xi_1, \sigma_1$  Kennwerte, ermittelt nach dem oben beschriebenen Ausgleichsverfahren zur Anpassung.

### 3.4 Arithmetische Kennwerte

Weitere Kennwerte, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind die arithmetischen, die nun definiert werden.

Der arithmetische Mittelwert

$$\xi_{arith} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (17)$$

$x_i$  einzelner Meßwert

$n$  Anzahl der Messungen

$\xi_{arith}$  erfüllt die Forderung, daß die Summe der Fehlerquadrate  $\sum (x_i - \xi_{arith})^2$  ein Minimum wird. Die arithmetischen Kennwerte sind im Sonderfall der idealen Normalverteilung mit den Gaußschen Werten identisch.

Als Standardabweichung definiert man die mittlere quadratische Abweichung

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_i - \xi_{arith})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

## 4. Entwicklung des Transformationsgesetzes

### 4.1 Exponentialansatz und Gleichungssystem

Ein weiterer Schritt auf dem Weg zur Ermittlung der Bruchrate von Brennelementen im Reaktor ist die Feststellung der Einflüsse von Parametern, durch die sich Reaktor- und Versuchsbedingungen unterscheiden. Es sind dies die Einflüsse der Reibung und des spezifischen Gewichtes, die in Form eines Exponentialansatzes erfaßt werden sollen: (Die Quotientenbildung der Parameter im Ansatz gestattet später - nach Separierung der Exponenten -, den Modellversuch mit Graphitkugeln auf Reaktorbedingungen zu transformieren <sup>(5)</sup>).

$$\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\epsilon_\gamma} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^{\epsilon_\mu} = \bar{\alpha}_{12} \quad (19)$$

Für die Eliminierung der Exponenten stehen drei ausgewertete Versuchsreihen mit unterschiedlichen  $\mu$  und  $\gamma$  zur Verfügung:

1. Steatit I :  $\mu_I, \gamma_S$
2. Steatit II :  $\mu_{II}, \gamma_S$
3. Graphit :  $\mu_C, \gamma_C$

Da eine Abhängigkeit der Einflußexponenten von der Einfahrtiefe wegen der statistisch bedingten Ungenauigkeit und wegen der Komplizierung der Bruchratenberechnung unerwünscht ist, muß  $\bar{\alpha}_{12}$  eine Kenngröße für das Kräfteverhältnis zweier Versuchsreihen sein, die eine geringe Tiefenstreuung aufweist:

In den einzelnen Tiefenintervallen werden die oben definierten Kennwerte  $\xi_g, \sigma_g, \xi_{arith}$  und  $\sigma_{arith}$  ermittelt und zwischen zwei Versuchsreihen die Quotienten jeweils zweier korrespondierender Werte gebildet <sup>(4)</sup>.

$$\begin{aligned} \alpha_{12}(\xi_g) &= \frac{\xi_{g1}}{\xi_{g2}} & \alpha_{12}(\xi_{ar}) &= \frac{\xi_{ar1}}{\xi_{ar2}} \\ \alpha_{12}(\sigma_g) &= \frac{\sigma_{g1}}{\sigma_{g2}} & \alpha_{12}(\sigma_{ar}) &= \frac{\sigma_{ar1}}{\sigma_{ar2}} \end{aligned} \quad (20)$$

Da sich pro Tiefenintervall kein erkennbarer Unterschied zwischen den Gaußschen und den arithmetischen  $\alpha$ -Werten ergibt, erscheint eine Mittelung über die vier Werte gerechtfertigt:

$$\bar{\alpha}_{12} = \frac{1}{4} \alpha_{12} (\xi_g, \sigma_g, \xi_{arith}, \sigma_{arith}) \quad (21)$$

Diese  $\bar{\alpha}$ -Kennzahlen sind in Abb. 3 in Abhängigkeit der Tiefe aufgetragen, und zwar für beide Steatitsorten, jeweils bezogen auf Graphit und außerdem deren Quotient; die ersten beiden Intervalle wurden wegen der unvollkommenen Statistik ausgeklammert. Eine weitere Mittelwertbildung über die gesamte Tiefe liefert das gesuchte  $\bar{\alpha}_{12}$ .



Mit Hilfe des Ansatzes Gleichung (19) ergibt sich damit das lineare Gleichungssystem:

$$\left(\frac{\gamma_I}{\gamma_c}\right)^{\epsilon_\gamma} \cdot \left(\frac{\mu_I}{\mu_c}\right)^{\epsilon_\mu} = \bar{\alpha}_{Ic} \quad (22)$$

$$\left(\frac{\gamma_I}{\gamma_c}\right)^{\epsilon_\gamma} \cdot \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_c}\right)^{\epsilon_\mu} = \bar{\alpha}_{IIc} \quad (23)$$

Durch Division dieser beiden Gleichungen erhält man die Bestimmungsgleichung

$$\epsilon_\mu \ln \left(\frac{\mu_I}{\mu_{II}}\right) = \ln \left(\frac{\bar{\alpha}_{Ic}}{\bar{\alpha}_{IIc}}\right) = \ln \bar{\alpha}_{I,II} \quad (24)$$

Hieraus läßt sich sofort  $\epsilon_\mu$  ermitteln und durch Einsetzen von  $\epsilon_\mu$  in Gleichung (22) oder Gleichung (24) folgt  $\epsilon_\gamma$ .

#### 4.2 Lösung des Gleichungssystems und Diskussion der Lösung

Der geringfügig von  $\mu_I$  verschiedene Reibungskoeffizient  $\mu_{II}$  der Steatitkugeln ist auf eine Graphitverschmierung infolge häufiger Versuche zurückzuführen; beide Reibbeiwerte sind nur näherungsweise bekannt. Bei der großen Empfindlichkeit der Exponenten und bei den ausschließlich definitiven Lösungen des Gleichungssystems könnte das Einsetzen ganz bestimmter Werte für  $\mu_I$  und  $\mu_{II}$  leicht zu Fehlschlüssen führen.

Um das grundsätzliche Verhalten der Exponenten bei kleinen Abweichungen der zugrundegelegten Reibwerte beurteilen zu können, sind in Abb. 4 die nach Gleichung (22) und Gleichung (23) ermittelten Einflüsse  $\epsilon_\mu$  und  $\epsilon_\gamma$  in Abhängigkeit des Quotienten der Reibbeiwerte aufgetragen. Als Parameter dient  $\mu_{II}$ , ansteigend von 0,18 auf 0,20.

Die Exponenten zeigen einen nahezu komplementären Charakter, d.h. je größer  $\epsilon_{\gamma}$  über 1, desto kleiner ist  $\epsilon_{\mu}$  unter 1 und umgekehrt. Es ist festzustellen, daß gerade in dem in Betracht kommenden Bereich um 1,2 bis 1,3  $\epsilon_{\gamma}$  bzw.  $\epsilon_{\mu}$  in eine stark progressive bzw. degressive Abhängigkeit eintritt, so daß selbst kleinste Ungenauigkeiten bei der Reibwertmessung unzulässig große Verfälschungen der Exponenten und damit des Transformationsgesetzes hervorrufen.

Aus diesem Grunde wurden von den beiden Steatitversuchsreihen jeweils 4 Kugeln einer Reibwertprüfung unterzogen. Die Meßeinrichtung selber erlaubt nur die Erfassung der Gleitreibung und diese auch nur unter Inkaufnahme mehrerer Unsicherheitsfaktoren. Dieser Umstand muß bei der Bewertung der Meßergebnisse in Betracht gezogen werden. Die Werte streuten bei den sauberen Steatitkugeln zwischen 0,235 und 0,245, diejenigen der verschmierten Kugeln lagen bei etwa 0,19. Mit Hilfe dieser Werte läßt sich eine Bandbreite des Quotienten  $\mu_I/\mu_{II}$  bestimmen, innerhalb derer die Einflußexponenten zu suchen sind. Der Bereich ergibt sich zu  $1,24 \leq \mu_I/\mu_{II} \leq 1,3$ ; bei einem zugrundegelegten Mittelwert von  $(\mu_I/\mu_{II}) = 1,27$  ermittelt man sowohl für  $\epsilon_{\mu}$  als auch für  $\epsilon_{\gamma}$  Werte, die sehr genau bei 1 liegen.

Bei einer genaueren Betrachtung erscheint dieses Ergebnis als recht einleuchtend. Es besagt, daß die Spitzenkraft proportional dem Gewicht der Kugeln ist, d.h. daß die Kugel dem eindringenden Stab in einer beliebigen Tiefe um so mehr Widerstand entgegensetzt, je stärker bei gleicher Packungsdichte das Gewicht der umliegenden Kugeln auf der betrachteten Kugel lastet. Die Proportionalität der Spitzenkraft zum Reibungskoeffizienten ist mit dem Coulombschen Reibungsgesetz erklärbar; die auftretenden Kräfte beim Beiseiteschieben einer Kugel durch den Stab ist geprägt durch die Haft-, Gleit- und Wälzreibung der umliegenden Kugeln gegeneinander.

Sinnvoll erscheint das Ergebnis auch hinsichtlich der Übereinstimmung mit den Werten bei Hubstäben. Es wäre nicht einzusehen, wenn sich die Gewichts- und Reibwerteinflüsse bei den beiden Stabkonzepten unterschieden.

Mit der Festlegung des linearen Einflusses des Gewichtes und des Reibwertes erhält das Transformationsgesetz die Form:

$$\bar{\alpha}_{12} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right) \quad (25)$$

So wurde es auch zur Hochrechnung unserer Versuchsergebnisse auf Reaktorbedingungen verwendet.

## 5. Extrapolation auf Reaktorbedingungen

### 5.1 Belastungsverteilung und Anpassung für Graphit, Extrapolation

Mit Hilfe der Gleichung (25) wird die Extrapolation auf Reaktorbedingungen durchgeführt. Zugrunde gelegt wird eine Belastungsdichte von Graphitvollkugeln, die aus 200 Einfahrversuchen mit dem Drehstab ermittelt wurden.

Es werden zwei Einfahrstufen auf ihre Bruchwahrscheinlichkeit untersucht.

1. Schnellabschalt (Scram) 0,5 bis 2 m
2. Langzeitabschaltung 0,5 bis 4 m

Bei allen betrachteten Fällen wird wegen der unvollkommenen Statistik das jeweils erste Tiefenintervall nicht berücksichtigt.

Für die zwei Einfahrstufen werden die Gaußschen Kennwerte  $\xi$  und  $\sigma$  ermittelt, die zur Unterscheidung der auf Reaktorbedingungen extrapolierten Werte  $\xi_1$  und  $\sigma_1$  mit M-Modell indiziert werden.

Mit Gleichung (25) gilt

$$\xi_1 = \left(\frac{\gamma_R}{\gamma_M}\right) \cdot \left(\frac{\mu_R}{\mu_M}\right) \cdot \xi_M \quad (26)$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{\gamma_R}{\gamma_M}\right) \cdot \left(\frac{\mu_R}{\mu_M}\right) \cdot \sigma_M \quad (27)$$

Da die Dichtefunktion auch nach der Transformation normiert bleibt, d.h. Gültigkeit der Gleichung (4), erhält die extrapolierte Verteilung einen langgestreckten Verlauf, so daß man ihr die Verwandtschaft mit der Gaußverteilung kaum noch ansieht. Abb. 5 zeigt, einander gegenübergestellt, die Verteilungskurven und ihre Anpassungen unter Modellbedingungen bzw. unter Reaktorverhältnissen. In Abb. 6 ist die Verteilungs- und Anpassungskurve ausschließlich unter Modellverhältnissen für die Tiefe bis 4 m dargestellt.

## 5.2 Änderung von $\mu$ und $\gamma$

Während die Erhöhung des Reibungskoeffizienten von Graphit um den Faktor 4 unter der Atmosphäre des trockenen Heliums eine primäre Eigenschaftsänderung darstellt, ist die Änderung des Gewichtes der Kugeln lediglich auf den Druckabfall des Kühlmediums zurückzuführen. Mit Hilfe des definierten, scheinbaren spezifischen Gewichtes  $\gamma_s$  kann die Auswirkung der Verluste bei einer Strömung von oben nach unten erfaßt werden.

$$\gamma_s = \gamma_k + \frac{\Delta p}{H_{\text{eff}} \cdot f} \quad (28)^{(5)}$$

$\gamma_k$  = spezifisches Gewicht des Graphits unter Normalbedingungen

$\Delta p$  = Druckverlust

$H_{\text{eff}}$  = Tiefe des Kugelhaufens

$f$  = 0,61 Füllfaktor

Für den Schnellabschaltfall werden in der Bruchratenberechnung

- a) der reduzierte Druckabfall  $\Delta p = 0,11 \text{ ata}$
- b) der volle Druckabfall  $\Delta p = 0,45 \text{ ata}^{(5)}$

berücksichtigt. Für die Berechnungen des Einfahrens auf 4 m wird  $\Delta p = 0$  zugrunde gelegt.

## 6. Bruchratenberechnung

### 6.1 Anzahl der Ereignisse

Die in Gleichung (15) angegebene Bruchwahrscheinlichkeit pro Treffer muß zur Angabe der Bruchrate beim Einfahren einer bestimmten Zahl von Stäben mit der Anzahl der Ereignisse multipliziert werden. Sie ergibt sich zu

$$N_E = \frac{n \cdot \Delta T}{\lambda} \quad (29)$$

n Zahl der eingefahrenen Stäbe

$\Delta T$  Einfahrtiefe

$\lambda$  mittlere freie Weglänge

$\lambda$  bedeutet den im Mittel vom Stab zurückgelegten Weg, ohne daß ein Treffereignis auftritt. Es bezieht sich auf den gesamten Querschnitt des Stabes und wird aus der freien Weglänge des Meßstößels durch Multiplikation mit dem reziproken Flächenverhältnis ermittelt. Es gilt

$$\lambda = \lambda_{\text{Stöß}} \left( \frac{D_{\text{Stöß}}}{D} \right)^2 = 0,03 \cdot \lambda_{\text{Stöß}} \quad (30)$$

und nach Gleichung (29)

$$\lambda_{\text{Stöß}} = \frac{\Delta T \cdot k}{N} \quad (31)$$

wobei k die Anzahl der Einfahrvorgänge pro Versuchsreihe bedeutet. Für n = 54 Drehstäbe ergibt sich eine nach Einfahrtiefe unterschiedliche Zahl von Ereignissen:

$$\begin{aligned} \text{Tiefenintervall } 0,5 \text{ bis } 2 \text{ m} : N_E &\approx 1,44 \cdot 10^4 \\ &0,5 \text{ bis } 4 \text{ m} : N_E &\approx 3,84 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

## 6.2 Bruchlastverteilung

### Belastungsart und Bruchlastwert

Der Versuch zur Ermittlung der Bruchlastverteilung ist so aufgebaut, daß eine zentrale Belastung der Kugeln gewährleistet ist. In der Versuchsanordnung wird unterschieden zwischen Zweipunktbelastung, einer Belastung zwischen zwei planparallelen Platten, und der sogenannten Vierpunktbelastung. Die letztere entspricht der Packungsart des Kugelhaufens, und zwar liegt die zu untersuchende Kugel in der Lücke dreier anderer Kugeln. Die flächenhafte Berührung von Graphitkugeln unter Belastung wird durch abgeflachte Widerlagerkugeln simuliert. Durch einen Stößel, der der Absorberstabspitze entspricht, wird die Last aufgebracht.

Durch Variation des Stößelradius kann mit zunehmender Krümmung eindeutig eine Verringerung der Bruchlast festgestellt werden. Eine weitere Abhängigkeit zeigt sich bei beiden Belastungsarten von dem Material der Prüfwerkzeuge, d.h. von deren Elastizitätsmodul: die Bruchlast sinkt mit wachsendem E-Modul des Stößels.

Die mittlere Bruchfestigkeit bei Zweipunktbelastung mittels planparalleler Stahlplatten, die identisch ist mit der Bruchlast bei einer Graphitzweipunktbelastung, liegt - von der Herstellerfirma der Kugeln garantiert - bei 2100 kp. Diese Bruchlast würde bei der konkav ausgebildeten Stabspitze in Betracht kommen (Eierbecherversion). Bei Verwendung des konisch zugespitzten Stabes muß der oben beschriebene, schwächere Einfluß des Radius in Rechnung gestellt werden. Aus Gründen der fehlenden Statistik bei verschiedenen Versuchsbedingungen muß im Sinne einer pessimistischen Betrachtungsweise bei einem Stößelradius von 30,0 mm nur mit einem mittleren Bruchlastmittelwert  $\xi_2 = 1800 \text{ kp} \pm 5 \% \text{ gerechnet werden} \quad (6)^*$ .

\* Nach Angabe der Firma BBK

7. Bruchratenwerte

Die Bruchraten beim Einfahren von 54 Drehstäben für Schnell- und Langzeitabschaltung sind für den Bruchlastmittelwert  $\xi_2 = 2100$  kp und für den pessimistischen Wert  $\xi_2 = 1800$  kp aufgeführt.

Die Bruchrate wird errechnet nach

$$R = N_E \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erf} c \frac{\xi_2 - \xi_1}{\sqrt{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}} \quad (32)$$

7.1 Scram (Einfahrtiefe 2 m)

$$\begin{aligned} \xi_M &= 28,17 \text{ kp}^* \\ \sigma_M &= 45,55 \text{ kp}^* \end{aligned} \quad \frac{\mu_R}{\mu_M} = 4$$

Reduzierter Druckabfall  $\Delta p = 0,11$  ata:  $\gamma = 2$   
 Voller Druckabfall  $\Delta p = 0,45$  ata:  $\gamma = 3,12$

Mit Gleichung (32) und Gleichung (33) folgt  $\xi$  und  $\sigma_1$

| $\xi_2/\sigma_2$<br>(kp) | p<br>(ata) | $\xi_1$<br>(kp) | $\sigma_1$<br>(kp) | Bruchrate             |
|--------------------------|------------|-----------------|--------------------|-----------------------|
| 1800/90                  | 0,11       | 136,32          | 220,44             | $1,37 \cdot 10^{-8}$  |
|                          | 0,45       | 212,93          | 344,33             | $6,04 \cdot 10^{-2}$  |
| 2100/105                 | 0,11       | 136,32          | 220,44             | $6,12 \cdot 10^{-12}$ |
|                          | 0,45       | 212,93          | 344,33             | $1,2 \cdot 10^{-3}$   |

\* Siehe Abb. 5

### 7.2 Einfahrtiefe 4 m

$$\begin{aligned}\xi_M &= 35,72 \text{ kp} \\ \sigma_M &= 67,87 \text{ kp}\end{aligned}$$

| $\xi_2/\sigma_2$<br>(kp) | $\Delta p$ | $\xi_1$<br>(kp) | $\sigma_1$<br>(kp) | Bruchrate            |
|--------------------------|------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| 1800/90                  | 0          | 142,87          | 271,48             | $1,32 \cdot 10^{-4}$ |
| 2100/105                 | 0          | 142,87          | 271,48             | $3,55 \cdot 10^{-7}$ |

### 7.3 Schlußbetrachtung

Den Tabellen ist zu entnehmen, daß die höchste Bruchrate bei einem zugrundegelegten Bruchlastmittelwert von  $\xi_2 = 1800$  kp bei Schnellabschaltung und vollem Druckabfall auftritt. Mit 6 Brüchen bei 100 Einfahrversuchen, d.h. bei Annahme von wöchentlich einem Scram mit 3 Brüchen pro Jahr, liegt die höchste Bruchrate mit großer Sicherheit innerhalb der oben genannten Toleranz von 50 Brennelementbrüchen pro Jahr.

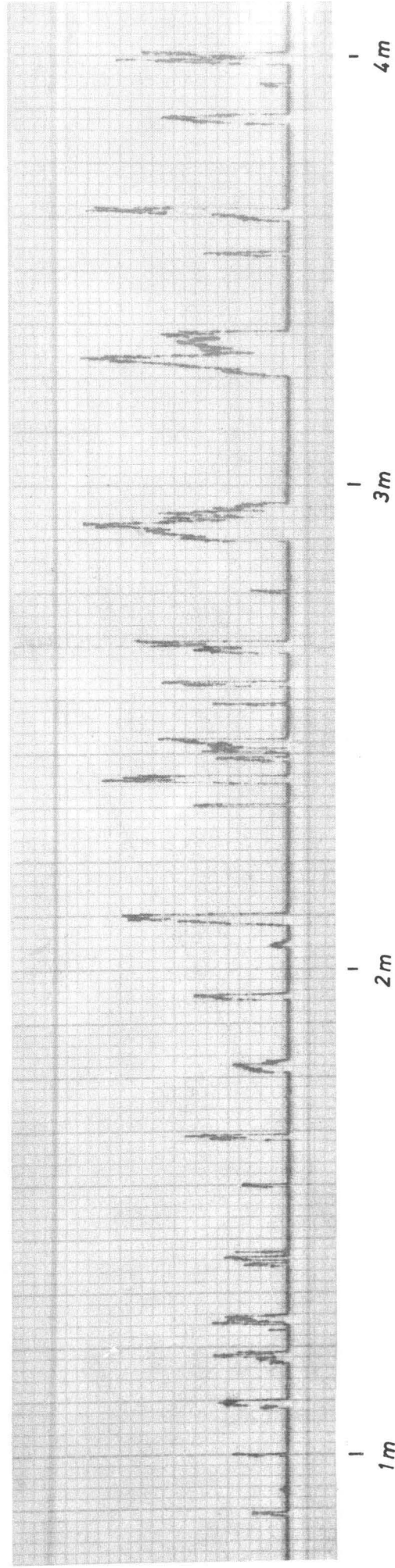
Bei Wahl der konkav ausgearbeiteten Stabspitze, die in der Lage ist, eine Kugel einzufangen und mitzuführen, würde sich die maximal auftretende Bruchrate wegen des dann erhöhten Bruchlastmittelwertes von 2100 kp auf  $6 \cdot 10^{-2}$  Brüche im selben Zeitraum verringern (siehe Kapitel 7.2).

Es zeigt sich damit, daß sich eine Reibwertreduktion <sup>(7)</sup> durch  $\text{NH}_3$ -Einspeisung in den Reaktor - wie sie bei den glatten Stäben für ähnliche Rechnungen zugrunde gelegt wurde - bei Verwendung der Drehstabkonzeption erübrigt.



Literaturverzeichnis

- |     |           |  |
|-----|-----------|--|
| (1) | Sachs     | Statistische Auswertmethoden,<br>Springer-Verlag Heidelberg-New York<br>1969 |
|     | Fabian V. | Statistische Methoden<br>VEB Dt. Verlag der Wissenschaften                   |
| (2) | Schmidt   | Private Mitteilung BBK   |
| (3) | Schmidt   | Private Mitteilung BBK   |
| (4) | Schmidt   | Private Mitteilung BBK   |
| (5) | KFA, BBK  | THTR-Jahresbericht 1967,<br>Kap. 16.32 und 16.42                             |
| (6) | Seher     | Private Mitteilung BBK   |
| (7) | Dr. Lange | Private Mitteilung BBK   |
| (8) | Schmidt   | Private Mitteilung BBK   |



Schreibstreifen aus der Steatit - Versuchsreihe

ABB. 1

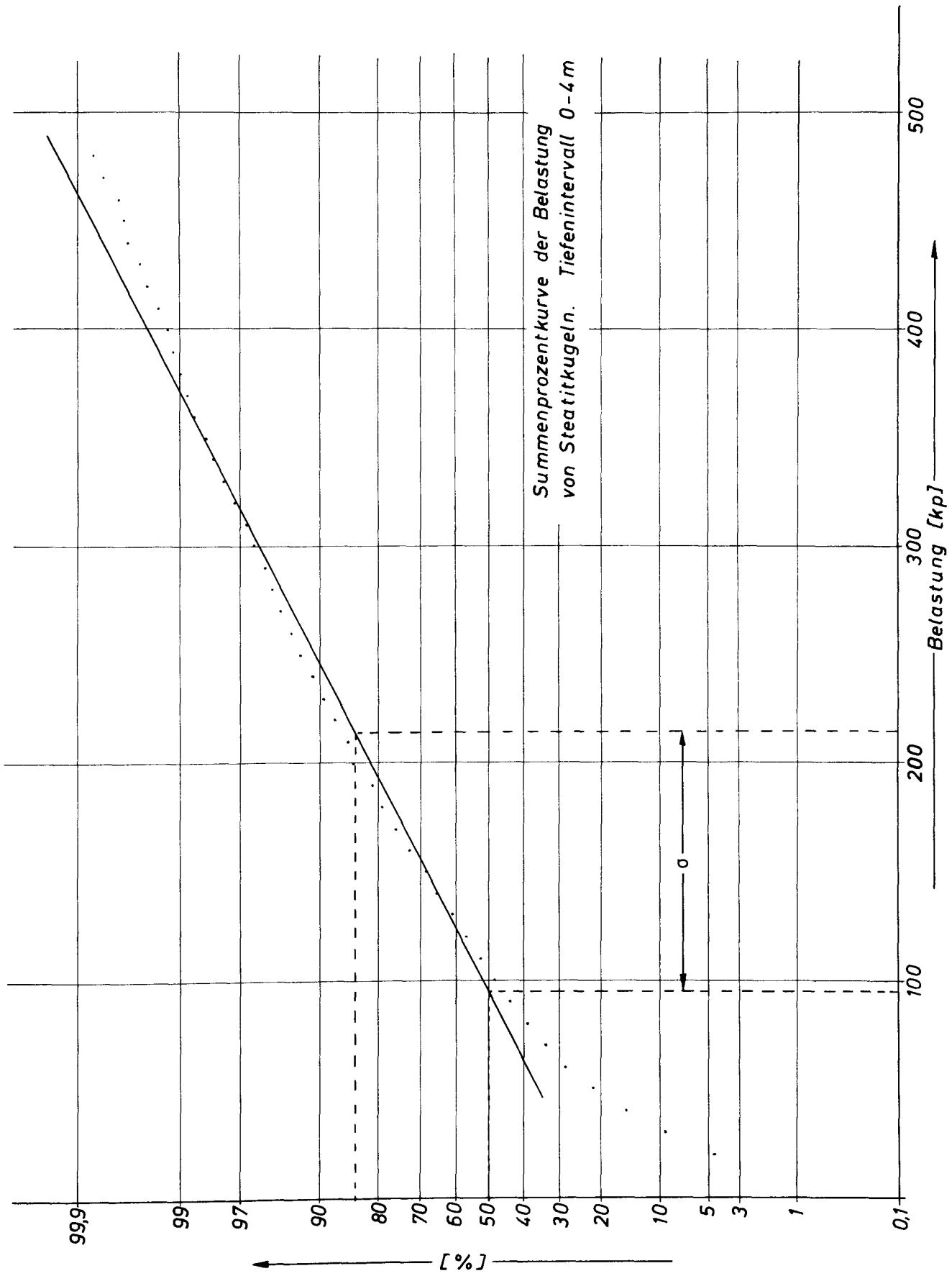
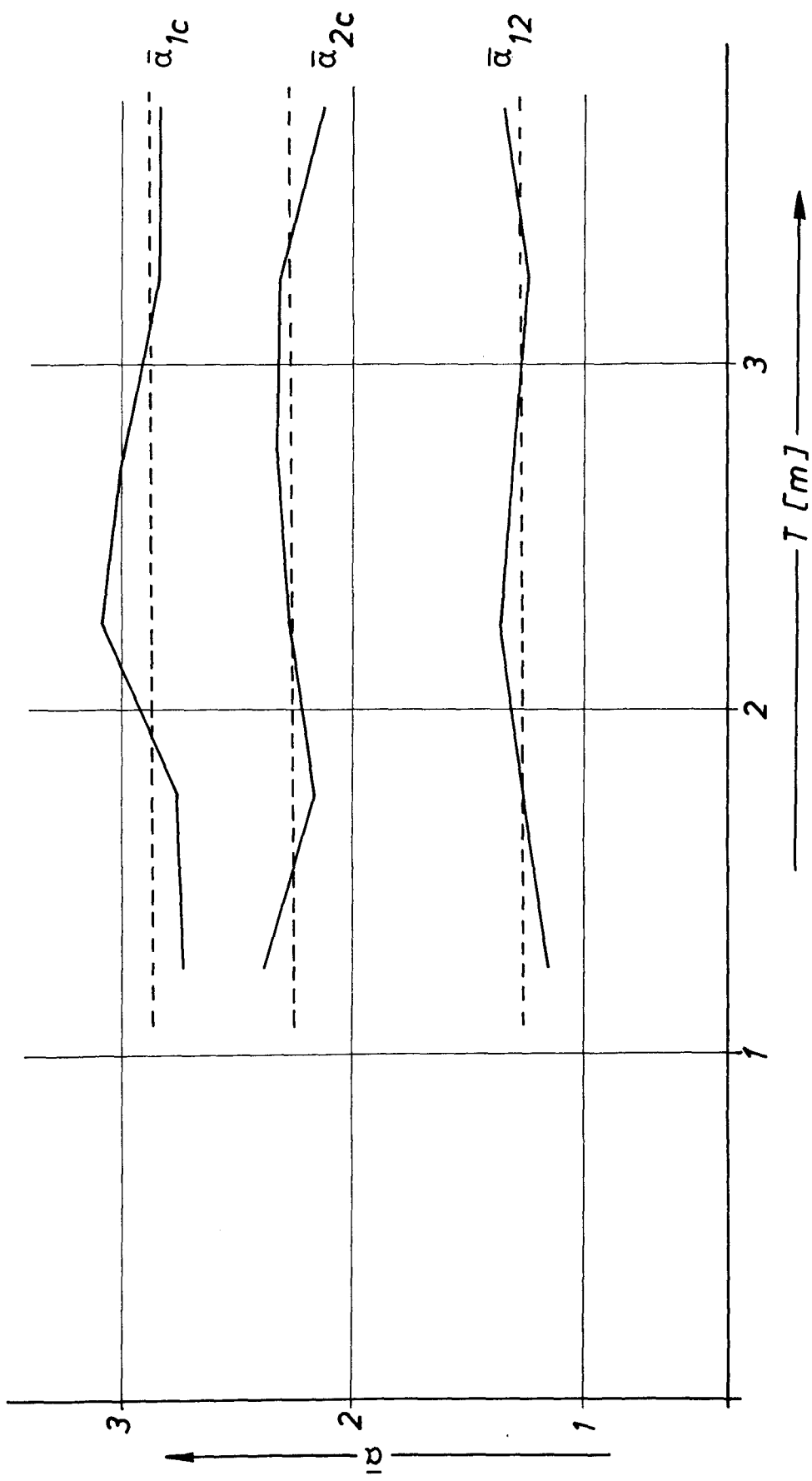
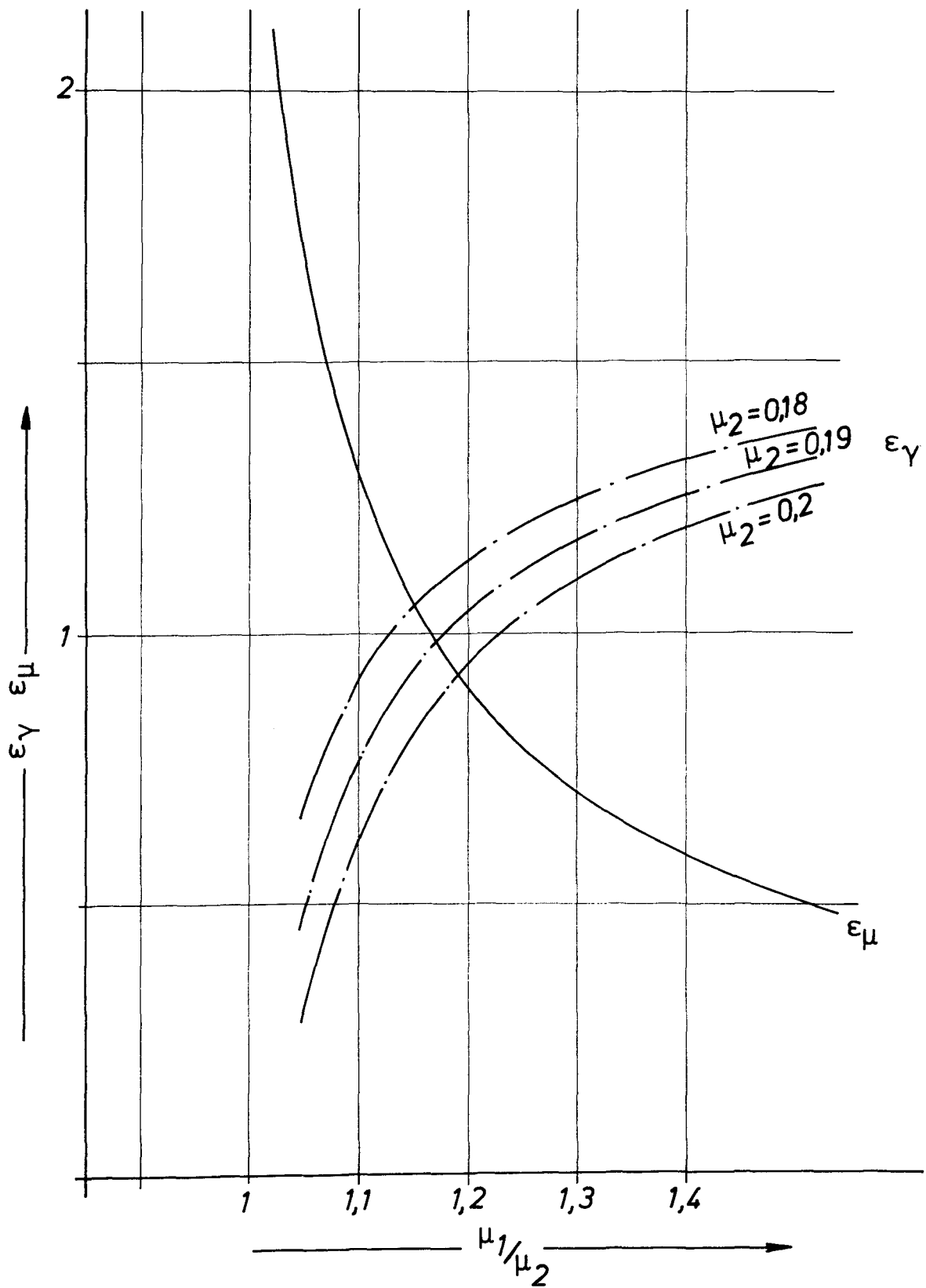


Abb. 2



Kennzahl  $\bar{\alpha}$  in Abhängigkeit der Einfahrtiefe

Abb. 3



Exponenten in Abhängigkeit des Reibungsverhältnisses  
Parameter  $\mu_2$

Abb. 4

Belastungsdichte von Graphitkugeln unter Modell- und  
Reaktorverhältnissen (extrapoliert)  
Tiefenintervall 0,5 - 2,0 m

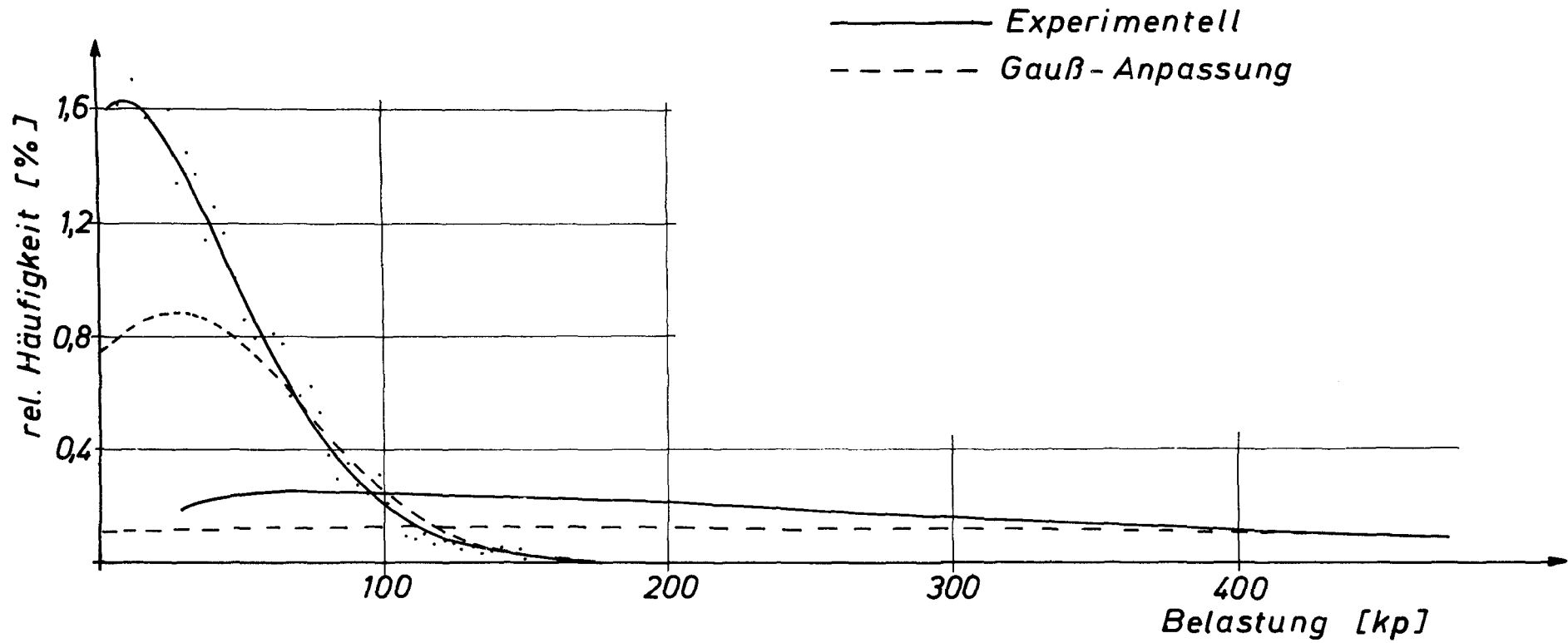


Abb. 5

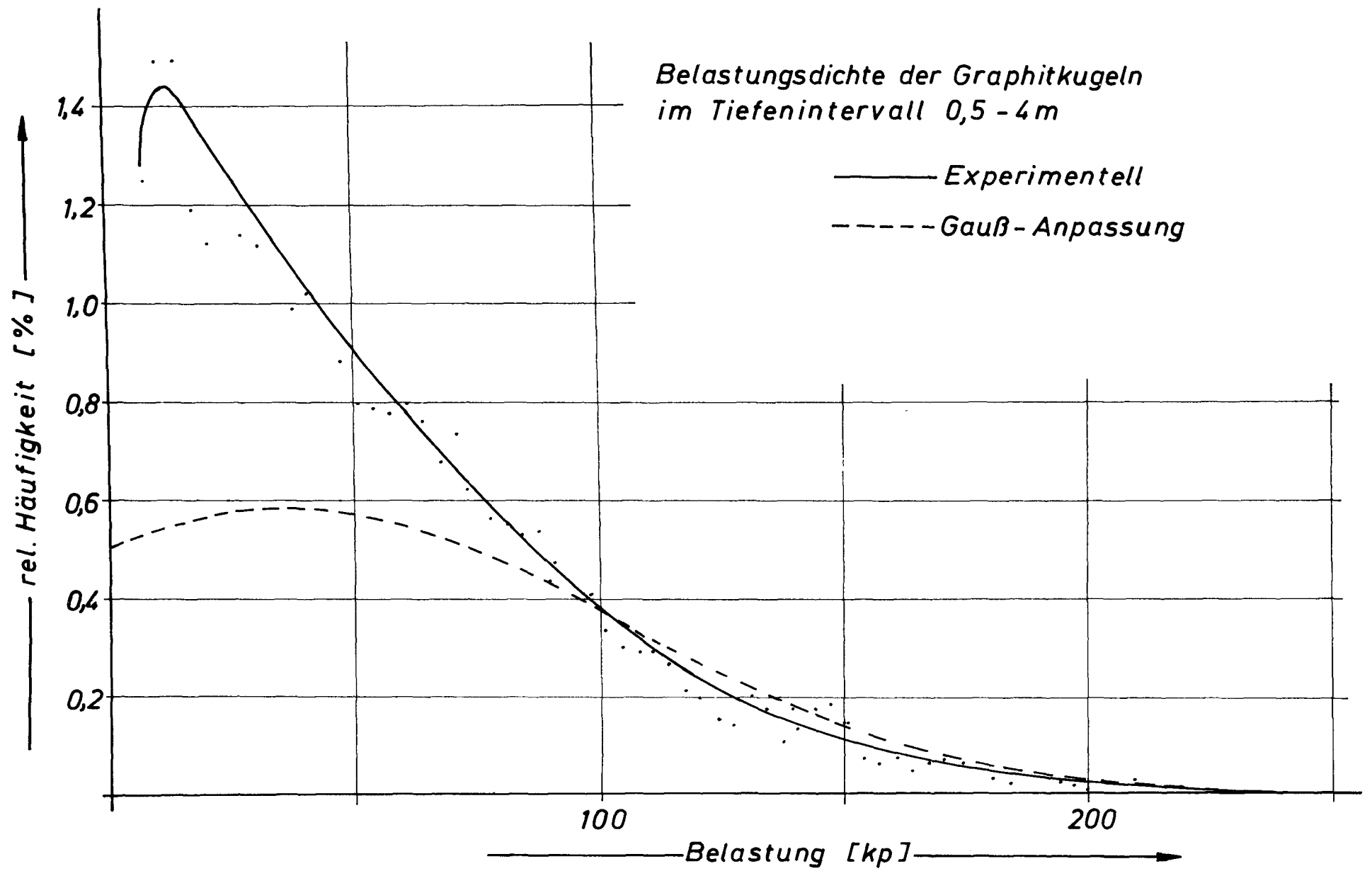


Abb. 6

## Anhang I

Einfluß des  $\gamma$  - und  $\mu$  - Wertes auf die Kräfte und Momente am Drehstab



## 1. Einleitung

In den vorausgegangenen Versuchsreihen mit drehend einfahrenden Absorberstäben war es nur möglich, den kombinierten Einfluß der Wichte  $\gamma$  und der Reibung  $\mu$  auf das Drehmoment und die Spitzenkraft zu erfassen. Bei einer Umrechnung von Versuch- auf Reaktorverhältnisse ist jedoch wichtig, den  $\gamma$  und  $\mu$  -Einfluß zu separieren. Die bisherigen Versuche wurden mit zwei Kugelsorten gefahren, nämlich

|         |  |
|---------|--|
| Steatit | $\mu = 0,33; \gamma = 2,67 \text{ g/cm}^3$ |
| Graphit | $\mu = 0,15; \gamma = 1,65 \text{ g/cm}^3$ |

Durch stichprobenartige Reibwertsmessungen konnte man feststellen, daß die Steatitkugeln mit fortschreitender Versuchsanzahl von den Drehstäben abgerieben und somit geglättet wurden. Dieser Abrieb wirkte sich in einer Reibwertserniedrigung aus. Diese unangenehme Tatsache hatte allerdings den Vorteil, daß nun drei Kugelsorten zur Verfügung standen:

|                |  |
|----------------|--|
| 1. Graphit mit | $\mu_c = 0,15 \quad \gamma_c = 1,65 \text{ g/cm}^3$              |
| 2. Steatit mit | $\mu_{II} = 0,297 \quad \gamma_{II} = 2,67 \text{ g/cm}^3$ (neu) |
| 3. Steatit mit | $\mu_I = 0,190 \quad \gamma_I = 2,67 \text{ g/cm}^3$ (alt)       |

Es sei noch bemerkt, daß die Reibwertsverminderung für die Graphitkugeln nicht zutrifft.

Der Reibwert  $\mu$  wurde an je 8 Steatitkugeln gemessen. Es wurden 4 Kugeln vor der Versuchsreihe und 4 Kugeln nach der Versuchsreihe willkürlich ausgesucht. Die 8 Einzelwerte wurden zu dem arithmetischen Mittelwert  $\mu_{II}$  bzw.  $\mu_I$  zusammengefaßt.

## 2. Bestimmung der Exponenten $\epsilon_{\mu}$ und $\epsilon_{\gamma}$

Es ist nun möglich, aus den zwei Steatitsorten gleicher Wichte aber unterschiedlichen Reibungswertes den  $\mu$  -Einfluß zu berechnen und mit Hilfe der Graphitsorte den  $\gamma$  -Wert zu bestimmen.

Der Einfluß der Wichte  $\gamma$  und der Reibung  $\mu$  wird über einen Exponentialansatz durch die Exponenten  $\epsilon_{\gamma}$  und  $\epsilon_{\mu}$  ausgedrückt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der 3 Versuchsreihen. Mit Hilfe dieser Werte werden die Exponenten bestimmt.

### Versuchsbedingungen

1. Hubgeschwindigkeit  $V = 10\text{cm/sec}$
2. Förderverhältnis  $\varphi = 1,5$
3. Zellendurchmesser  $d = 1,0\text{ m}$
4. Drehstab eingängig, halbgewandelt
5. Nach jedem Versuch wurde umgewälzt
6. Alle Werte sind gemittelte Spitzenwerte

|                            | Graphit | Steatit<br>Sorte I | Steatit<br>Sorte II |
|----------------------------|---------|--------------------|---------------------|
| Drehmoment (mkp)           | 59,2    | 81,0               | 112,3               |
| Stabspitzenkraft (kp)      | 158,2   | 372,0              | 447,7               |
| Gesamtkraft (kp)           | 879,3   | 1602,0             | 843,9               |
| Seitendose (kp)<br>(unten) | 45,0    | 83,2               | 82,3                |

In diesem Bericht sollen nur die Exponenten  $\epsilon_{\gamma}$  und  $\epsilon_{\mu}$  für das Drehmoment bestimmt werden, da diese letztgenannte Größe für die Kugelbelastung schon berechnet wurde<sup>(1)</sup>. Die Berechnung der Exponenten für die Gesamt- und Seitenkraft ist nicht zweckmäßig, da diese Kräfte nicht nur eine Funktion der Reibung und Wichte sind.

Bei konstantem  $\gamma$ -Wert des Kugelmaterials gilt:

$$\frac{Md_{II}}{Md_I} = \left( \frac{\mu_{II}}{\mu_I} \right)^{\epsilon_{\mu}}$$
$$\epsilon_{\mu} = \frac{\ln Md_{II}/Md_I}{\ln \mu_{II}/\mu_I} = \frac{\ln 1,385}{\ln 1,565} = \underline{\underline{0,726}}$$

Der Exponent  $\epsilon_{\gamma}$  wird aus der Graphitsorte und der Steatitsorte II berechnet.

Es gilt:

$$\frac{Md_{II}}{Md_c} = \left( \frac{\mu_{II}}{\mu_c} \right)^{\epsilon_{\mu}} \cdot \left( \frac{\gamma_{II}}{\gamma_c} \right)^{\epsilon_{\gamma}}$$
$$\epsilon_{\gamma} = (\ln Md_{II}/Md_c - \epsilon_{\mu} \ln \mu_{II}/\mu_I) / \ln \gamma_{II}/\gamma_c$$
$$\epsilon_{\gamma} = (\ln 112,3/59,2 - 0,726 \cdot \ln 0,297/0,15) / \ln 2,67/1,65$$
$$\epsilon_{\gamma} = \underline{\underline{0,312}}$$

Die Ergebnisse zeigen, daß sowohl die Reibung als auch die Wichte das Drehmoment unterlinear beeinflussen.

### 3. Kontrolle der Exponenten $\epsilon_\gamma$ und $\epsilon_\mu$

Die zuletzt errechneten Exponenten sollen mit Hilfe der Werte aus älteren Meßreihen überprüft werden. Diese Werte stammen aus Versuchen am 1 : 1 Modell<sup>(2)</sup> und 1 : 10 Modell<sup>(3)</sup>. Nicht berücksichtigt werden die Versuche mit dem Gruppenantrieb, da hier die Versuchsbedingungen andere sind als beim Einstabantrieb.

#### Kontrollrechnungen

$$\begin{aligned}\frac{Md_{st}}{Md_c} &= \left(\frac{\mu_{st}}{\mu_c}\right)^{\epsilon_\mu} \cdot \left(\frac{\gamma_{st}}{\gamma_c}\right)^{\epsilon_\gamma} \\ Md_{st} &= Md_c \cdot \left(\frac{\mu_{st}}{\mu_c}\right)^{\epsilon_\mu} \cdot \left(\frac{\gamma_{st}}{\gamma_c}\right)^{\epsilon_\gamma} \\ Md_{st} &= 74,8 \cdot \left(\frac{0,19}{0,15}\right)^{0,726} \cdot \left(\frac{2,67}{1,65}\right)^{0,312} = \underline{\underline{102,5 \text{ mkp}}}\end{aligned}$$

Das im Experiment gewonnene Drehmoment beträgt 98,8 mkp. Es ist nun interessant, die prozentuale Abweichung des theoretischen Wertes vom experimentellen Wert zu berechnen. Diese Berechnung ist nur für den Versuch am Modell 1 : 1 über einen gemeinsamen Exponenten möglich. Die Ausgangsgleichung wird in einer anderen Form geschrieben. Der  $\gamma$  und  $\mu$ -Einfluß wird durch einen gemeinsamen Exponenten ausgedrückt. Für die 1 : 10 Versuche ist das nicht erforderlich, da der  $\gamma$ -Wert konstant ist.

$$\frac{Md_{st}}{Md_c} = \left(\frac{\mu_{st}}{\mu_c}\right)^{\epsilon_\mu} \cdot \left(\frac{\gamma_{st}}{\gamma_c}\right)^{\epsilon_\gamma} = \left(\frac{\mu_{st} \gamma_{st}}{\mu_c \gamma_c}\right)^{P(\mu, \gamma)}$$

$$P_{th}(\mu, \gamma) = \ln 102,5 / 74,8 / \ln \frac{0,19 \cdot 2,67}{0,15 \cdot 1,65} = \underline{0,453}$$

$$P_{ex}(\mu, \gamma) = \ln 98,8 / 74,8 / \ln \frac{0,19 \cdot 2,67}{0,15 \cdot 1,65} = \underline{0,401}$$

$$\underline{\underline{\text{Prozentuale Abweichung: } \frac{(0,453 - 0,401) \cdot 100 \%}{0,453} = \underline{\underline{11,4 \%}}}}$$

Nach diesem Schema werden weitere 7 Werte berechnet und in Tabelle 1 (siehe Anhang) aufgeführt. Die Werte der Tabelle 1 wurden unter folgenden gemeinsamen Versuchsbedingungen ermittelt:

1. Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec bzw. 1 cm/sec
2. Zellendurchmesser 1,0 m bzw. 0,11 m
3. Nach jedem Versuch wurde umgewälzt
4. Alle Werte sind mittlere Spitzenwerte
5. Kugelmateriale: 

|           |              |                                |          |
|-----------|--------------|--------------------------------|----------|
| Graphit   | $\mu = 0,15$ | $\gamma = 1,65 \text{ g/cm}^3$ | } 1 : 1  |
| Steatit   | $\mu = 0,19$ | $\gamma = 2,67 \text{ g/cm}^3$ |          |
| gl. Ton   | $\mu = 0,20$ | $\gamma = 1,67 \text{ g/cm}^3$ | } 1 : 10 |
| ungl. Ton | $\mu = 0,60$ | $\gamma = 1,65 \text{ g/cm}^3$ |          |

#### 4. Extrapolation auf Reaktorverhältnisse

Betrachtet man die Ergebnisse in Tabelle 1, so stellt man fest, daß trotz der Empfindlichkeit einer Exponentialfunktion die Fehler in fast allen Fällen sich im Bereich der Meßungengenauigkeiten bewegen. Eine Meßungengenauigkeit von  $\pm 10\%$  kann bei der Messung des Reibwertes sowie bei der Messung des Drehmomentes auftreten. Erstaunlich ist auch die gute Übereinstimmung mit den Versuchen am 1 : 10 Modell. Mit den nun bestimmten Exponenten soll eine Extrapolation auf Reaktorverhältnisse durchgeführt werden. Es werden dabei drei Fälle betrachtet:

1. Schnellabschaltung bis 2,0 m Tiefe und vollem Druckabfall  
 $\Delta P = 0,45 \text{ ata } (\gamma = 3,12 \text{ g/cm}^3) \text{ (4)}$
2. Schnellabschaltung bis 2,0 m Tiefe und reduziertem Druckabfall  
 $\Delta P = 0,11 \text{ ata } (2,0 \text{ g/cm}^3)$
3. Langzeitabschaltung bis 4,0 m Tiefe bei abgeschaltetem Gebläse  
 $\Delta P = 0$

Für den Fall 1 und 2 muß das Drehmoment von 4,0 auf 2,0 m Tiefe nach der Funktion  $M = C \cdot T^2$  (5) umgerechnet werden.

$$C = \frac{Md_4}{T^2} = \frac{59,2}{16} = 3,7 \frac{\text{kp}}{\text{m}}$$

$$Md_2 = 3,7 \frac{\text{kp}}{\text{m}} \cdot 4,0 \text{ m}^2 = \underline{\underline{14,8 \text{ mkp}}}$$

| Einfahrtiefe | Druckabfall $\Delta P$ | Scheinbare Wichte $\gamma$ | Reibwert $\mu$ (Versuch) | Reibwert $\mu$ (Reaktor) | Drehmoment Versuch $MdV$ | Drehmoment Reaktor $MdR$ |
|--------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| m            | kp/cm <sup>2</sup>     | g/cm <sup>3</sup>          | -                        | -                        | mkp                      | mkp                      |
| 2,0          | 0,11                   | 2,0                        | 0,15                     | 0,6                      | 14,8                     | 43,1                     |
| 2,0          | 0,45                   | 3,12                       | 0,15                     | 0,6                      | 14,8                     | 49,8                     |
| 4,0          | -                      | 1,65                       | 0,15                     | 0,6                      | 59,2                     | 162,0                    |

Bei voller Einfahrtiefe von 4,0 m muß der Drehstabantrieb das maximale Moment aufbringen. Selbstverständlich muß zu diesem theoretisch berechneten Drehmoment ein entsprechender Sicherheitszuschlag gemacht werden.

Neben den Versuchen zur Ermittlung des  $\gamma$  und  $\mu$  -Einflusses wurden Versuche mit einer Stabspitze (Eierbecherspitze) gefahren, welche in der Lage ist, eine Graphitkugel einzufangen. Wie bei den Hubstabversuchen, so konnte man auch bei den drehenden Stäben bemerken, daß schon nach kurzer Zeit eine Graphitkugel von der Stabspitze eingefangen wurde. Diese einmal eingefangene Kugel wird während des gesamten Einfahrvorganges (4 m Hub) von der Stabspitze festgehalten. Somit kann auch bei den Drehstäben mit einer Graphitstabspitze gerechnet werden. Bei einer Brennelementbelastung durch eine kugelige Spitze (Material Graphit) mit  $r = 30 \text{ mm}$  erhöht sich die Bruchlast auf  $\xi_2 = 2100 \text{ kp}$ ;  $\sigma_2 = \pm 5\%$  (5).

MODELL MASSTAB 1 : 1

Tabelle 1

| Versuchsbedingungen                              | Drehmoment für Graphit | Drehmoment für Steatit (Exp.) | Drehmoment für Steatit (theoret.) | Abweichung $\Delta Md$ | Exponent $P_{(\gamma, \mu)}$ (theoretisch) | Exponent $P_{(\gamma, \mu)}$ (Experiment) | Fehler |
|--|------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|--|---|--------|
|  | mkp                    | mkp                           | mkp                               | mkp                    | -  | -   | %      |
| $\varphi = 1,5$ ; Stab zweigängig, halbgewendelt | 100,1                  | 130,1                         | 138,3                             | 8,2                    | 0,453                                      | 0,361                                     | 20,2   |
| $\varphi = 2,0$ ; Stab zweigängig, halbgewendelt | 74,8                   | 98,8                          | 102,5                             | 3,7                    | 0,453                                      | 0,401                                     | 11,4   |
| $\varphi = 1,5$ ; Stab eingängig, halbgewendelt  | 66,0                   | 89,1                          | 90,6                              | 1,5                    | 0,453                                      | 0,425                                     | 6,17   |
| $\varphi = 2,0$ ; Stab eingängig, halbgewendelt  | 58,3                   | 78,5                          | 80,1                              | 1,6                    | 0,453                                      | 0,419                                     | 7,45   |

MODELL MASSTAB 1 : 10

| Versuchsbedingungen                             | Drehmoment f. gl. Ton | Drehmoment f. ungl. Ton (Exp.) | Drehmoment für ungl. Ton (theoret.) | Abweichung $\Delta Md$ | Exponent $\epsilon_{\mu}$ (theoretisch) | Exponent $\epsilon_{\mu}$ (Experiment) | Fehler |
|---|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------|---|--|--------|
|   | cmp                   | cmp                            | cmp                                 | cmp                    | -                                       | -                                      | %      |
| $\varphi = 1,5$ ; Stab eingängig, halbgewendelt | 1760                  | 3984                           | 3950                                | 34                     | 0,726                                   | 0,746                                  | - 2,75 |
| $\varphi = 1,2$ ; Stab eingängig, halbgewendelt | 2117                  | 4242                           | 4740                                | 498                    | 0,726                                   | 0,636                                  | 12,4   |
| $\varphi = 1,5$ ; Stab eingängig, vollgewendelt | 1582                  | 3300                           | 3540                                | 240                    | 0,726                                   | 0,652                                  | 10,2   |
| $\varphi = 1,2$ ; Stab eingängig, vollgewendelt | 1839                  | 4513                           | 4120                                | 393                    | 0,726                                   | 0,814                                  | - 12,1 |

Literatur

- |     |                                |   |
|-----|--------------------------------|---|
| (1) | Keintzel, G.                   | Ermittlung der theoretischen Bruchrate von Brennelementen<br>RWTH Aachen, August 1969 |
| (2) | Hammelmann, K.H.               | Bericht über drehend einfahrende Absorberstäbe<br>KFA Jülich 21.5.1969                |
| (3) | Fratzer                        | 1 : 10 Absorberstabversuche<br>BBK Mannheim Februar 1969                              |
| (4) | KFA, BBK, EURATOM              | THTR Jahresbericht 1967<br>Kap. 16.42   |
| (5) | Dr. Bedenig/Schmidt<br>V 69/72 | Tabellierung der Brennelementbruchwahrscheinlichkeit<br>23.4.1969                     |



## Anhang II

Drehstabversuche in einem 1,5 m Silo

Alle bisherigen Drehstabversuche mit einem Stab (Einstabantrieb) wurden in einer 1,0 m  $\varnothing$  Einheitszelle gefahren, während bei den Hubstabversuchen ein 1,5 m  $\varnothing$  bzw. 2,0 m  $\varnothing$  Silo zur Anwendung kam. Um aber beide Varianten miteinander vergleichen zu können, mußten die Versuchsbedingungen die gleichen sein. Deshalb wurden neue Versuche im 1,5 m Silo mit dem bereits ausgewählten günstigsten Drehstab <sup>(1)</sup> unter optimalen Versuchsbedingungen <sup>(1)</sup> gefahren.

In der folgenden Tabelle I wird der Hubstab mit dem Drehstab verglichen.

Versuchsbedingungen :

1. Stabdurchmesser 130 mm
2. Zellendurchmesser 1,5 m
3. Hubgeschwindigkeit 10 cm/sec
4. Kugelmaterial Graphit
5. Umwälzrate ca. 5 % d.F.

Tabelle I

|   |    | Hubstab | Drehstab |
|---|----|---------|----------|
| Kugelbelastung<br>$\xi_{arith}$ 0 - 4,0 m | kp | 84,25   | 35,53    |
| Gesamtkraft                               | kp | 2750    | -769,7   |
| Seitenkraft (unten)                       | kp | 218     | 11,6     |

Die Tabelle I zeigt, daß alle Werte, welche bei den Drehstabversuchen gemessen wurden, doch erheblich unter denen der Hubstabversuche liegen (siehe auch Diagramm 1).

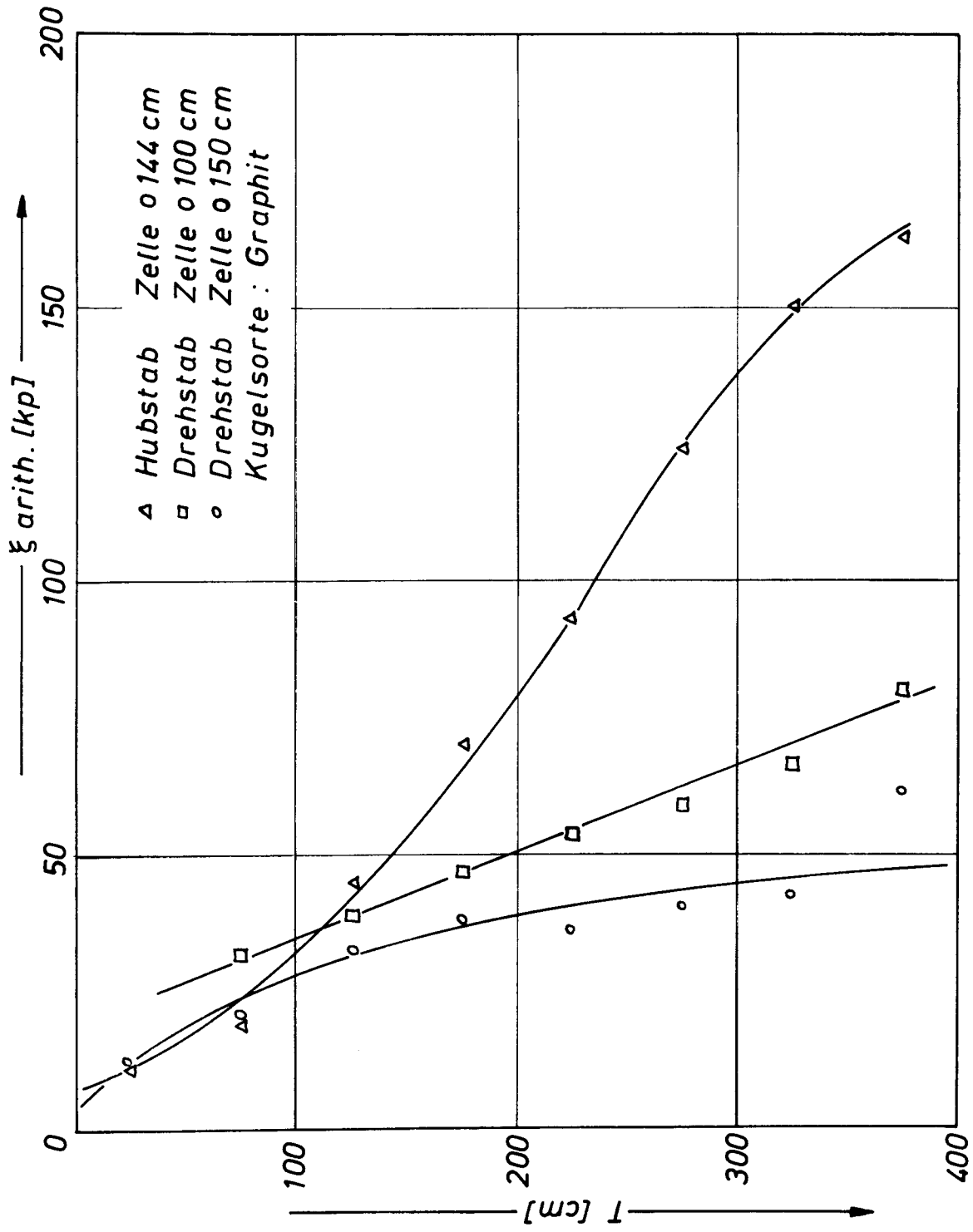
<sup>(1)</sup> Siehe Versuchsberichte IRE

Es ist nun interessant zu erfahren, wie die Silogeometrie die Drehstabelbelastungen beeinflusst. Aus diesem Grunde sollen in Tabelle II die Versuche im 1,5 m Silo den Versuchen im 1,0 m Silo gegenübergestellt werden. Versuchsbedingungen wie unter Tabelle I.

Tabelle II

|  |     | 1,0 m Zelle | 1,5 m Silo |
|--|-----|-------------|------------|
| Kugelbelastung<br>$\Sigma_{arith} 0 - 4,0 \text{ m}$ | kp  | 51,8        | 35,53      |
| Drehmoment   | mkp | 59,2        | 51,7       |
| Seitenkraft (mitte)                                  | kp  | 41,8        | 8,8        |
| Seitenkraft (unten)                                  | kp  | 45,0        | 11,6       |
| Gesamtkraft  | kp  | 879,3       | 769,7      |

Die Belastungen sind, wie nicht anders zu erwarten war, am 1,5 m Silo in allen Fällen niedriger. Während die Seitenkräfte erheblich niedriger liegen, ist der Unterschied beim Drehmoment und der Gesamtkraft nicht so groß. Bei den Seitenkräften ist es verständlich, daß die Geometrie stärker eingeht, da erstens die Kräfte im größeren Silo geringer sind und zweitens der Abstand der Meßdosen vom Drehstab größer ist. Daß bei den übrigen Kräften der Silodurchmesser nicht so stark eingeht, unterstreicht wieder den Vorteil des Drehstabes, die Brennelemente nicht auf Kosten des Lückenvolumens (Füllfaktor) zu verdrängen, sondern sie zu fördern und somit den Kugelhaufen noch aufzulockern. Wenn man die Meßwerte betrachtet, so erkennt man, daß in gleichem Maße, wie der Silodurchmesser steigt, die Kugeleinzelbelastung fällt. In diesem speziellen Falle steigt der Durchmesser um 50 %, während auch die Einzelkraft um etwa 50 % fällt. Drehmoment und Gesamtkraft sind beim 1,5 m Silo nur um 15 % geringer, d.h. der Durchmesser des Silos hat keinen bedeutenden Einfluß auf diese beiden Größen.



Vergleich  $\xi$  arith. Hubstab / Drehstab

Abb. 1