



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Zentralabteilung Allgemeine Technologie

**Untersuchungen
an frei fallenden Brennelementkannen**

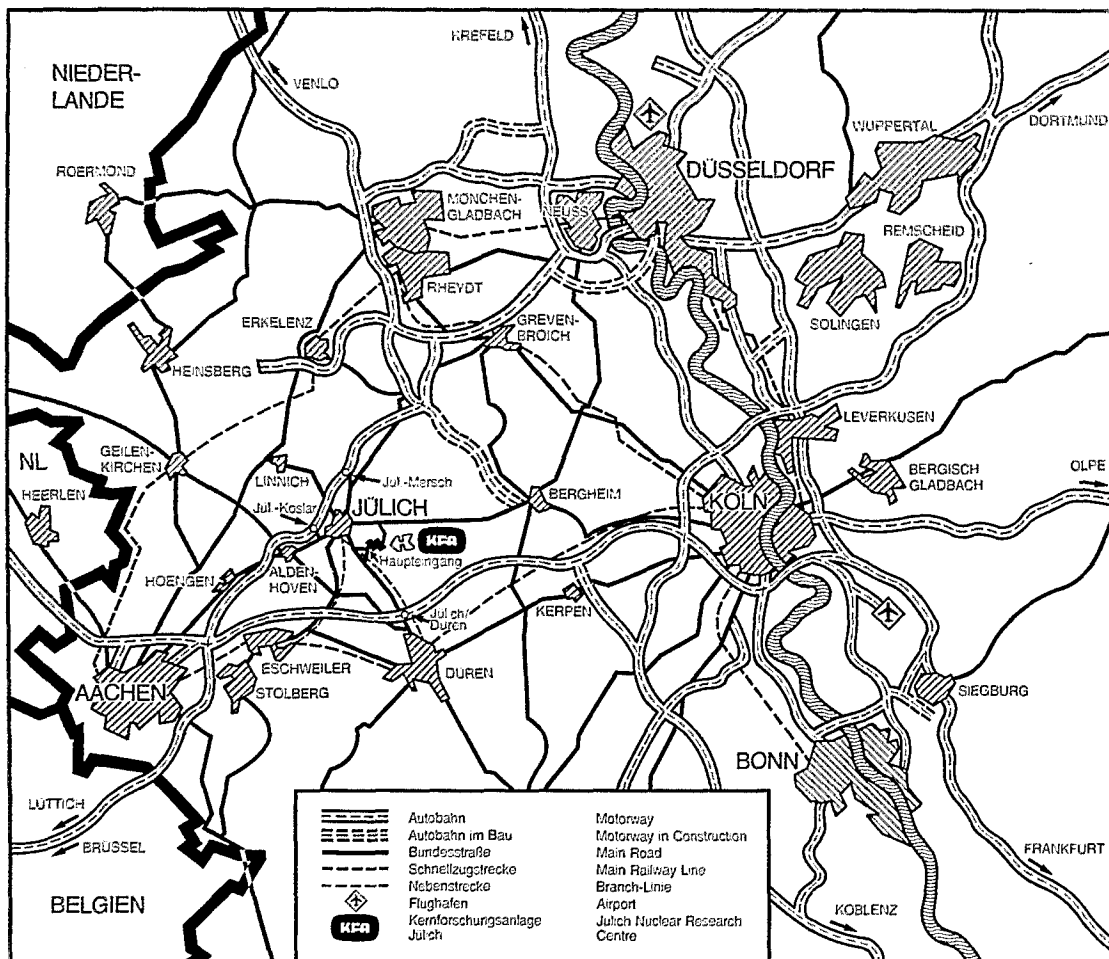
von

H. Haas, R. Engelstädter,
K. Delis, W. Wolf

Jül - Spez - 142

März 1982

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 142
Zentralabteilung Allgemeine Technologie Jül - Spez - 142

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
Telefon: 02461/610 · Telex: 833 556 kfa d

Untersuchungen an frei fallenden Brennelementkannen

von

H. Haas*, R. Engelstädter**,
K. Delis*, W. Wolf*

* Zentralabteilung Allgemeine Technologie

** Anlagenplanung und Bautechnik

Abstract:

Impact tests with storage tanks for irradiated HTR-fuel balls have been carried out. The determination of the damages of the storage tanks falling from a height of 7 m and the graphite balls, which have been used in place of the fuel elements, has been the aim of these tests. The main results are:

1. The leakage of the three impact tested tanks (2 of type ASSE, 1 of type AVR-TL) has not increased due to the impact.
2. The deformation of the tanks caused by the impact exceed the tank specification for dimensions and shape.
3. The graphite ball damages depend on the type of tank and on the angle of impact. The damages of graphite balls in the tank of type AVR-TL have been neglectable small.

Zusammenfassung:

Es sind drei Fallversuche an Lagerkannen für bestrahlte HTR-Kugelbrennelemente durchgeführt worden, um die Auswirkungen eines freien Falles aus 7m Höhe auf die Kanne und die darin befindlichen Graphitkugeln zu ermitteln. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

1. Bei allen drei Lagerkannen (2 ASSE- und 1 AVR-TL-Kanne) sind die gemessenen Helium-Leckraten durch den Fall nicht verändert.
2. Die beim Aufschlag auftretenden Deformationen überschreiten die für die Lagerkannen spezifizierten Form- und Lagetoleranzen wesentlich.
3. Die Schädigungen an den Graphitkugeln sind für die beiden Kannentypen unterschiedlich und hängen außerdem vom Aufprallwinkel der Kanne ab. In der AVR-TL-Kanne sind die Schäden vernachlässigbar klein gewesen.

Inhaltsübersicht	Seite
1. Versuchsspezifikation	2
2. Beschreibung der Kannen	3
2.1 ASSE-Kanne	3
2.2 AVR-TL-Kanne	4
3. Versuchsaufbau	5
4. Ergebnisse	10
4.1 Fall einer ASSE-Kanne auf eine Bodenkante	11
4.2 Fall einer ASSE-Kanne auf die Mantellinie	14
4.3 Fall einer AVR-TL-Kanne aus rostfreiem Stahl auf eine Bodenkante	16
4.4 Untersuchungen am Kugelbruch	18

Schrifttum

1. Versuchsspezifikation

In der Abteilung Dekontamination der KFA ist Ende 1981 eine Trockenlagerzelle für 72 000 abgebrannte AVR-Brennelemente fertiggestellt worden. Die Lagerung wird dabei in Edelstahlkannen mit jeweils 1 000 Brennelementen erfolgen, die in ein Lagergestell mit 36 Lagerpositionen eingestellt werden. Die Beschickung des Lagers erfolgt über eine in der Zellendecke installierte Schleuse.

Beim Einschleusen ist der Störfall denkbar, daß die Lagerkannen aus maximal 7 m Höhe auf den unnachgiebigen Zellenboden stürzen.

Aufgabe der durchzuführenden Fallversuche ist die Ermittlung der Auswirkungen, die ein derartiger Absturz auf Kanne und Brennelement hat, gewesen.

Insgesamt sind dazu drei Fallversuche aus 7 m Höhe mit zwei ASSE-Kannen und einer AVR-TL-Kanne (Bild 1,2), die jeweils mit 1 000 Graphitkugeln gefüllt waren, nach folgenden Spezifikationen durchgeführt worden:

- Fallhöhe 7 m
- Steuerung des Falles dergestalt, daß die Kannen an vorbestimmten Stellen ihrer Oberfläche auf die Aufprallfläche aufschlagen. Bild 3 zeigt die Aufprallwinkel der drei Versuche.
- Bestimmung der Leckrate vor und nach dem Fall
- Ermittlung der Geometrie vor und nach Fall
- Festhalten der Beschleunigungswerte beim Aufprall
- Ermittlung der an der Kanne geleisteten Verformungsarbeit
- Auswertung des Kugelbruchs

2. Beschreibung der Kannen

2.1 ASSE - Kanne

Die ASSE-Kanne sollte ursprünglich für die Einlagerung abgebrannter AVR-Brennelemente im Salzbergwerk ASSE eingesetzt werden.

Die Kanne (Bild 1) besteht aus einem zylindrischen Rohr, dem Bodenblech und dem nach innen gewölbten Deckel. Das Rohr ist mit Bodenblech und Deckel verschweißt. In der Innenwölbung des Deckels befindet sich zentrisch ein pilzförmiges Kopfstück zum Greifen der Kanne mittels eines mechanischen Kannengreifers. Im Kopfstück ist die Befüllöffnung angeordnet. Der Verschluss erfolgt unlösbar durch einen Stopfen, der mit zwei Kunststoffrundschnurringen abgedichtet ist, und durch eine Spreizfeder, die in eine Nut einrastet. Für den oberen Rundschnurring wurde als Werkstoff Viton und für den unteren Buna N gewählt.

Technische Daten:

- Inhalt: max. 1 000 AVR-Brennelemente

- Abmessungen:

Außendurchmesser	559 mm
Höhe	1 000 mm
Wandstärke	6,3 mm

- Gewicht:

leer	ca.	110 kp
befüllt	ca.	310 kp

(Im Versuch hat das Gewicht der gefüllten Kanne 330 kp betragen)

- Zulässige Temperaturen der Dichtungen:

Viton	
Spitztemperatur	315°C
Dauertemperatur	200°C

Buna N

Spitztemperatur 120°C

Dauertemperatur 90°C

- Strahlenbeständigkeit der Dichtungen: ca. 10^8 rad
- Werkstoff: R St 37-2

2.2 AVR-TL-Kanne

Die AVR-TL-Kanne (Bild 2) dient als Brennelement-Lagerbehälter im AVR-Trockenlager der KFA sowie als dichte Umschließung im AVR-Transportbehälter, der als Versandstückmuster des Typs B (U) zugelassen ist. Form und Inhalt der AVR-TL-Kanne entsprechen der ASSE-Kanne. Die AVR-TL-Kanne unterscheidet sich jedoch in einigen technischen Details von der ASSE-Kanne, was durch den Einsatz als Lagerbehälter für abgebrannte AVR-Brennelemente im Trockenlager begründet ist. So besteht die AVR-TL-Kanne aus rost- und säurebeständigem Stahl und besitzt einen reversiblen Verschluß um evtl. notwendige Dichtungswechsel ausführen zu können. Boden und Deckel haben aus Gründen der Kritikalitätssicherheit des Trockenlagers eine Wandstärke von 13 mm. Deckel und Kannenhals sind mit einer Schweißlippe versehen, damit die Kannen bei Bedarf zugeschweißt werden können.

Technische Daten:

- Inhalt: max. 1 000 AVR-Brennelemente
- Abmessungen:

Außendurchmesser	559 mm
Höhe	1 000 mm
Wandstärke	
Rohrwand	6,3 mm
Boden und Deckel	13 mm

- Gewicht:

leer	ca.	150 kp
befüllt	ca.	350 kp

(Im Versuch hat das Gewicht der gefüllten Kannen 370 kp betragen)

- Ausziehenkraft des Stopfens: mind. 106 kp
- Zulässige Temperaturen der Dichtungen:

Dauertemperatur	130°C
zulässige Spitztemperatur	150°C
- Strahlenbeständigkeit der Dichtungen: ca. 10^9 rad.
- Dichtungswerkstoff: Äthylen-Propylen (Kurzbezeichnung: EP 851).
- Werkstoff: 1.4541.

3. Versuchsaufbau

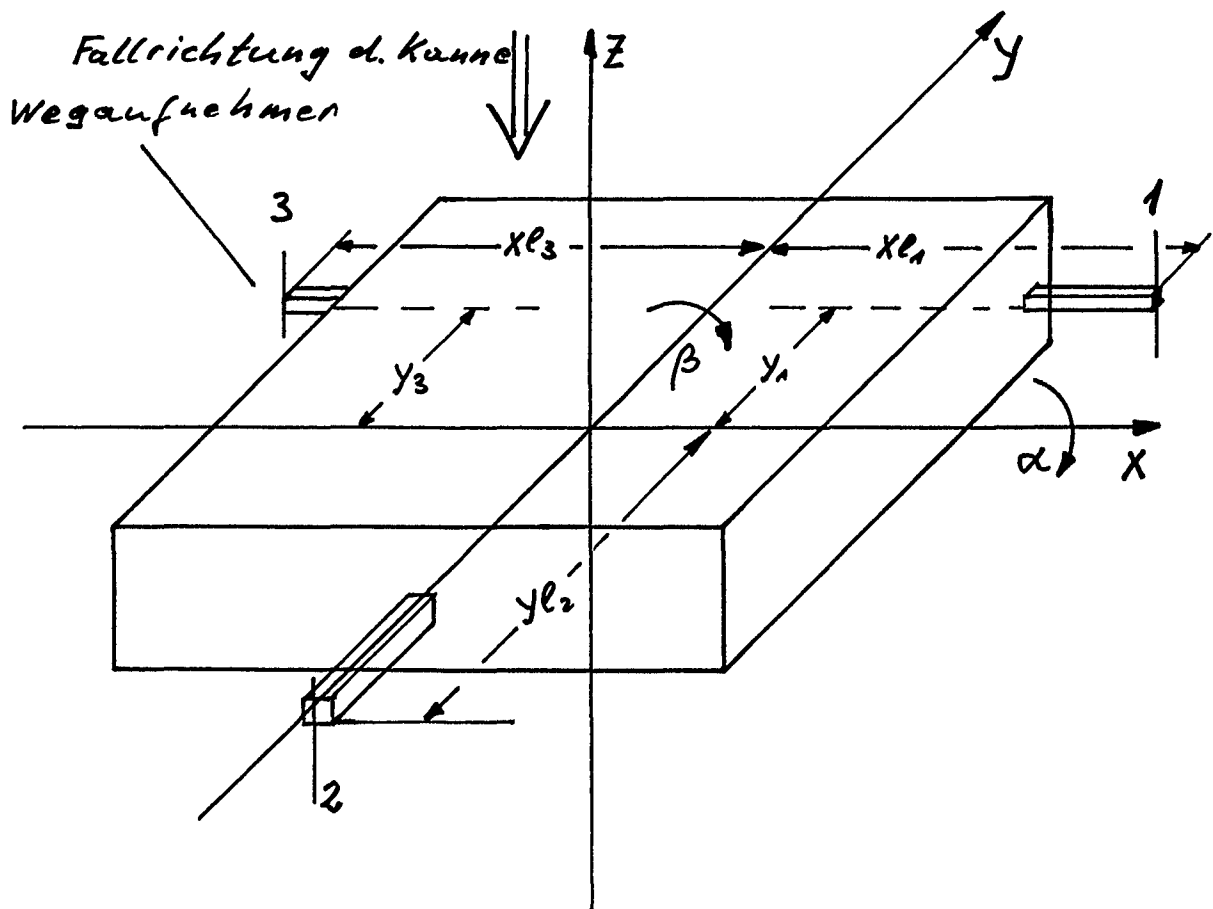
Die Versuche sind in der Halle der ZAT durchgeführt worden. Eine Mauer aus Betonsteinen schirmte die Aufprallstelle ab. Die mit Graphitkugeln gefüllte Brennelementkanne soll, wie im Punkt 1 verlangt, in einer vorgegebenen Lage aufprallen. Um das zu erreichen, wird die Kanne zum einen bereits in der gewünschten Aufpralllage in den Kran eingehängt (Bild 4). Zum anderen ist das Seil, an dem die Kanne hängt, so geführt, daß die Massenträgheitskräfte des Seiles und die Reibung in der Seilführung für eine Stabilisierung der Kannenlage während des Fallens sorgen. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau und die Seilführung in der Anklippsposition. Sobald der Klemmhebel (Bild 6) gelöst ist, setzt sich die Kanne in Bewegung. Die stabilisierten Reib- und Massenkräfte des Seiles betragen ca. 200 N. Zum Hochziehen der Kanne werden der Kranhaken auf die Hälfte der Fallhöhe abgelassen und das straffe Seil in dieser Position festgeklemmt. Beim Aufwärtsfahren des Kranhakens erreicht die Kanne dann die gewünschte Fallhöhe. Im Bild 7 ist der Versuchsaufbau nach dem Fall einer Kanne abgebildet.

Die Gestaltung der Aufprallfläche trägt zwei Punkten Rechnung:

- Beim Aufprall der Kanne darf an der Prallflächenkonstruktion keine nennenswerte Verformungsarbeit (weder plastisch noch elastisch) geleistet werden.
- Die Impulsverhältnisse beim Stoß müssen meßbar sein.

Dem ersten Punkt ist nur dadurch zu genügen, daß die Prallflächenkonstruktion ausreichend steif und oberflächenhart ausgeführt wird. Eine derartige Konstruktion schließt jedoch automatisch irgendwie gearbete Verformungsmessungen, aus denen auf den Stoßvorgang geschlossen werden kann, aus. Es bleibt dann nur noch, die Prallflächenkonstruktion federnd zu lagern und mit Wegaufnehmern die Bewegung der gesamten Konstruktion zu erfassen. Aus diesen Messungen sind dann die Impulsverhältnisse und die maximalen Beschleunigungen wie folgt eindeutig zu ermitteln:

Bild 8



Aus den geometrischen Beziehungen

$$\begin{aligned}Z_1 &= Z_s + \alpha \cdot y_1 - \beta \cdot x_{l1} \\Z_2 &= Z_s + \alpha y_{l2} - \beta x_2 \\Z_3 &= Z_s + \alpha y_3 - \beta x_{l3}\end{aligned}\tag{1}$$

$$y_1 = 675 \text{ mm} ; y_3 = 675 \text{ mm}$$

$$x_{l1} = 1355 \text{ mm} ; x_{l3} = -1355 \text{ mm}$$

$$x_2 = 0 ; y_{l2} = -1115 \text{ mm}$$

errechnen sich die Größen Z_s , α , β zu

$$\alpha = \frac{\frac{Z_2 - Z_3}{x_2 - x_{l3}} - \frac{Z_1 - Z_3}{x_{l1} - x_{l3}}}{\frac{y_{l2} - y_3}{x_2 - x_{l3}} - \frac{y_1 - y_3}{x_{l1} - x_{l3}}}\tag{2}$$

$$\beta = \alpha \cdot \frac{y_1 - y_3}{x_{l1} - x_{l3}} - \frac{Z_1 - Z_3}{x_{l1} - x_{l3}}\tag{3}$$

$$Z_s = Z_3 - \alpha y_3 + \beta x_{l3}\tag{4}$$

Das Differenzieren der Gleichungen ergibt die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Durch das Messen der Größen Z_1 , Z_2 , Z_3 sind also die Werte Z_s , α , β eindeutig bestimmt.

Die Energie, die während des Stoßvorgangs auf die Platte übertragen wird, beträgt

$$E_{Pl} = m \cdot \frac{\dot{z}_s^2}{2} + \Theta_x \cdot \frac{\dot{\alpha}^2}{2} + \Theta_y \cdot \frac{\dot{\beta}^2}{2} \quad (5)$$

(m = Plattenmasse = 6130 kg, Plattenabmessungen 2030 mm x 1550 mm x 250 mm)

Die Bewegungsenergie der Kanne, kurz vor dem Aufprall ist durch

$$E_{Fall} = m_o \cdot (h - h') \cdot g \quad (6)$$

(m_o = Masse der gefüllten Kanne)

definiert. Dabei sind in h' alle Verluste durch die Seilkraft und Reibung zusammengefaßt (h' ≈ 0,5 m).

Die Differenz

$$\Delta E = E_{Fall} - E_{Pl} \quad (7)$$

steckt als Vorformung oder Bewegung in der von der Aufschlagstelle zurückfedernden Kanne.

Die Geschwindigkeit der Kanne nach dem Aufprall errechnet sich aus dem Impulssatz

$$m \cdot \dot{z}_s' + m_o \cdot \dot{z}_o' = m \cdot \dot{z}_s + m_o \cdot \dot{z}_o \quad (8)$$

$$\begin{aligned} (\dot{z}_s', \dot{z}_o') &= \text{Geschwindigkeit vor dem Aufprall,} \\ \dot{z}_s, \dot{z}_o &= \text{Geschwindigkeit nach dem Aufprall)} \end{aligned}$$

und $\dot{z}_s' = 0 \quad (9)$

$$\dot{z}_o' = -\sqrt{2g(h-h')} \quad (10)$$

zu

$$\dot{z}_o = \dot{z}_o' - \frac{m}{m_o} \cdot \dot{z}_s \quad (11)$$

Damit ist die an der Kanne geleistete Verformungsarbeit gegeben durch

$$E_v = E_{Fall} - E_{pl} - m_o \cdot \frac{\dot{z}_o^2}{2} \quad (12)$$

Die Koordinaten der Aufschlagstelle errechnen sich aus

$$\Theta_x \cdot \ddot{\alpha} = K \cdot y_A \quad (13)$$

$$\Theta_y \cdot \ddot{\beta} = -K \cdot x_A \quad (14)$$

$$K = -m \cdot \ddot{z}_s \quad (15)$$

zu

$$X_A = - \frac{\Theta_y \cdot \ddot{\beta}^{\circ\circ}}{m \cdot \ddot{z}_s^{\circ\circ}} \quad (16)$$

$$Y_A = \frac{\Theta_x \cdot \ddot{\beta}^{\circ\circ}}{m \cdot \ddot{z}_s^{\circ\circ}} \quad (17)$$

Die Aufschlagkraft ist durch K gegeben.

Da die Platte auf einer als Feder wirkenden Schaumstoffmatte liegt, sind die Messungen nur für die erste kurze Wegstrecke, auf der keine nennenswerte Veränderung der Kraftverhältnisse auftritt, gültig.

Wegen der Verlusthöhe h' ist die Fallhöhe der Kanne auf $h = 7,5$ m festgelegt worden.

Die schnellen Vorgänge beim Stoß erfordern entsprechende Meßgeräte und eine schnelle Datenregistrierung. Die Wegmesstellen sind mit DMS, die an 50 kHz Trägerfrequenzmeßbrücken angeschlossen sind, bestückt. Die Ausgangssignale der Meßbrücken werden auf ein Tonband (Ampex) mit großer Geschwindigkeit aufgespielt. Zur Weiterverarbeitung werden die Daten dann mit langsamer Abspielgeschwindigkeit in einen Prozeßrechner gegeben und sind dann für die rechnerische Behandlung zugänglich.

4. Ergebnisse

Es sind drei Fallversuche durchgeführt worden: Zwei Versuche sind aus Kostengründen an ASSE-Kannen (Blechkannen), die sich in Material und Wandstärke von den AVR-TL-Kannen (Edelstahlkannen) unterscheiden, gemacht worden. Der dritte Versuch erfolgte mit einer AVR-TL-Kanne, wobei aus den beiden vorange-

gangenen Versuchen der Auftreffwinkel, der die stärksten lokalen Deformationen hervorruft, abgeleitet worden ist. An allen drei Kannen sind vor und nach dem Fall die Helium-Leckraten gemessen worden. Bei keiner Kanne ist eine Vergrößerung der Leckrate durch die Deformationen festgestellt worden.

4.1 Fall einer ASSE-Kanne auf eine Bodenkante

Die Deformationen an der Kanne (Fabrikationsnummer 425329/75) sind in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Der größte Durchmesser der gefallenen Kanne beträgt 559,2 mm und die größte Länge, gemessen an der Stelle der größten Deformation, ist 1001,1 mm.

Da der Schwerpunkt außerhalb der Aufschlagstelle gelegen hat, hat die Kanne einen Überschlag gemacht. Daraus resultiert die Deformation am Kannendeckel, die jedoch keinerlei Kugelbruch verursacht hat (Bild 9).

Die Deformationen lassen sich wie folgt charakterisieren:

- starke lokale Deformationen mit Einbeulungen
- geringe Veränderungen der Hauptabmessungen

Die Signale der Wegmessung an den Stellen 1, 2 und 3 (Bild 8) sind in Bild 11 und 12 aufgezeichnet. Wie aus Bild 11 zu ersehen ist, überlagern sich der Wegmessung Störsignale, die von den Eigenfrequenzen der Platte und der Meßarme herrühren, so daß eine direkte mathematische Behandlung der gemessenen Kurven entsprechend den Gleichungen unter Punkt 3 nicht möglich ist. Die Schwierigkeiten bestehen darin, daß ein Teil der Störsignale den gleichen Frequenzbereich überdeckt wie das Signal des Stoßes. Deshalb muß jede Glättung der Kurven in zwei Schritten erfolgen: Zum einen werden die Frequenzen, die außerhalb des Bereiches des Stoßsignals liegen, automatisch herausgefiltert. Zum anderen wird der Kurventeil, der auf den

Stoßvorgang folgt, linearisiert. Um Instabilitäten bei der mathematischen Behandlung zu umgehen, wird für den ersten Schritt nur ein Kurvenausschnitt (Bild 12), der bereits alle gerätetechnischen Umrechnungsfaktoren berücksichtigt, herangezogen.

Dann sind nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Polynome, die eine Glättung der Meßkurven (Bild 13) bewirken, errechnet worden. Aus diesen Polynomen werden nun auf einfache Weise die auf den Plattenschwerpunkt bezogenen Werte α , β und z_s (Bild 14) sowie durch Differentiation deren Geschwindigkeiten (Bild 15) und Beschleunigungen (Bild 16) abgeleitet. Wie aus den Bildern zu ersehen ist, weisen die Kurven der Polynomannäherung an den Anfängen und Enden Krümmungen auf, die bei der Differentiation große Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte ergeben. Da diese Krümmungen nur aus der mathematischen Methode und nicht aus den Vorgängen beim Fall herrühren, sind sie bei der Auswertung zu ignorieren. Aus den gemessenen Werten (Bild 12) läßt sich die Zeitspanne des Aufprallvorgangs (0.002 bis 0.005 sec.), nur in deren Verlauf die errechneten Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung einen Bezug zur Realität haben, ersehen.

Die so aus den Kurven ermittelten Werte sind mit einem Korrekturfaktor für die Amplitudenüberhöhung der Ausschnittswerte (Bild 12, 20 und 28), der graphisch an den Bildern 11, 19 und 27 abgeleitet ist, zu multiplizieren. Wegen der linearen Abhängigkeiten gilt das in gleicher Weise für die Wege, Winkel, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen.

Für den ersten Fallversuch hat der Korrekturfaktor den Wert $f = 0,7$.

Der Korrekturfaktor könnte genauer bestimmt werden, wenn zuerst ohne Glättung die schwerpunktbezogenen Werte α , β , z_s errechnet würden. Dem steht aber entgegen, daß bei der Umrechnung der nicht geglätteten Kurven die Störsignale wegen der möglichen Kombination von Extremwerten wesentlich verstärkt würden. Das führt dann zu Schwierigkeiten bei der rechnerischen Behandlung der Kurven.

Die Daten der Platten sind:

$$m = 6130 \text{ kg}$$

$$\Theta_x = 1260 \text{ kg m}^2$$

$$\Theta_y = 2140 \text{ kg m}^2$$

Die Fallenergie der Kanne (Gl. 6) beträgt

$$E_{Fall} = 22700 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Mit den Maximalgeschwindigkeiten aus Bild 14 errechnet sich die kinetische Energie der Platte nach dem Aufprall (Gl. 5) zu

$$E_{Pl} = 1050 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Die Geschwindigkeit der Kanne nach dem Aufprall beträgt (Gl. 11, Bild 15)

$$\overset{0}{z}_0 = -2,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der errechnete Wert bedeutet, daß der Kannenschwerpunkt sich nach dem ersten Aufprall immer noch schneller nach unten bewegt als die Platte. Das ist durch den Überschlag der Kanne, der auch an den Deformationen erkennbar ist, begründet.

Die an der Bodenkante der Kanne geleistete Verformungsarbeit ist damit

$$E_V = 20500 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Die Koordinaten der Aufschlagstelle betragen

$$X_A = - \frac{\Theta_y}{m} \cdot \frac{-350 \text{ } 1/s^2}{-300 \text{ m/s}^2} = -0,1 \text{ m}$$

$$Y_A = \frac{\Theta_x}{m} \cdot \frac{150 \text{ } 1/s^2}{-300 \text{ m/s}^2} = -0,41 \text{ m}$$

Die Kontaktkraft beim Aufprall beträgt nach Gl. 15

$$K = -1,3 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Die Kannenverzögerung ist

$$b = -3900 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

4.2 Fall einer ASSE-Kanne auf die Mantellinie

Die Deformationen der Kanne (Fabrikationsnummer 425329/74) sind in den Bildern 17 und 18 gezeigt. Der größte Durchmesser der gefallenen Kanne beträgt 559,4 mm und die größte Länge, gemessen an der deformierten Mantellinie, ist 1001,5 mm. An der abgeflachten Stelle beträgt der Durchmesser 554,8 mm. Da der Fall nicht so genau zu steuern ist, daß die Kanne millimetergenau parallel zur Aufprallfläche aufschlägt, hat die Kanne eine geringfügige Torkelbewegung, die die erkennbare ungleichmäßige Deformationsverteilung bewirkt, ausgeführt.

Der im Bild 18 sichtbare Spalt im Kannenboden ist durch das Ablösen eines Bleches, das zur Meßkorrektur der Kannenhöhe angepunktet ist, verursacht. Der Kannenboden selbst weist

keinerlei Risse auf.

Die Auswertung der Messung erfolgt in der gleichen Weise und mit den gleichen Einschränkungen wie unter Punkt 4.1.

Die Bilder 19 und 20 enthalten die Meßwerte, Bild 21 die daraus gewonnene Polynomannäherung. Bild 22 zeigt die auf den Schwerpunkt bezogenen Werte α , β , z_s , Bild 23 deren Ableitungen (Geschwindigkeiten) und in Bild 24 sind die Beschleunigungswerte aufgetragen.

Der Korrekturkoeffizient ist $f = 0,65$.

Die Fallenergie beträgt ebenfalls

$$E_{Fall} = 22700 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Die kinetische Energie der Platte ist

$$E_{pl} = 1600 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Die Winkelgeschwindigkeit α ist nur als Schätzwert (Mittelwert) aus dem Diagramm zu entnehmen

Die Kannengeschwindigkeit beträgt nach dem Fall

$$\overset{0}{z}_0 = 2,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Das Zurückfedern dieser Kanne ist auch auf dem Film, der mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen worden ist, festgehalten. Die errechnete Geschwindigkeit für das Zurückfedern entspricht einer Sprunghöhe von 0,35 mm. Aus der Beziehung $t = v/b$ ergibt sich die Zeit bis zum Wiederaufprall der Kanne

zu 0,53 s. Als Vergleich dazu liefert der Film des Fallversuches, der mit 2000 Bildern/s aufgenommen und mit 18 Bildern/s abgespielt worden ist, eine Zeitspanne zwischen dem ersten und zweiten Aufprall in Höhe von 0,49 s. Das bedeutet, daß der Fehler der berechneten Geschwindigkeit Z_0 unbedeutend ist.

Für die an der Kanne geleistete Verformungsarbeit ergibt sich

$$E_v = 20\,000 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Auf Grund der geringen Winkelausschläge der Platte fallen Auftreff- und Schwerpunkt zusammen.

Die Kontaktkraft ergibt sich aus Bild 24 zu

$$K = -3,2 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Das entspricht einer Kannenverzögerung von

$$b = -9,6 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

4.3 Fall einer AVR-TL-Kanne aus rostfreiem Stahl auf eine Bodenkante

In den Bildern 25 und 26 sind die Deformationen dieser Kanne (Fabrikationsnummer 32207-73) festgehalten.

Die größte Länge der gefallenen Kanne beträgt 1001 mm und der größte Durchmesser an der Ausbeulung ist 569,7 mm.

Im Gegensatz zur ASSE-Kanne zeigt die AVR-TL-Kanne keine Einbeulungen. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Kannentypen besteht in der großen Durchmesseränderung bei der AVR-TL-Kanne, so daß sich allein schon aus dem Aussehen der Deformation feststellen läßt, daß die Übertragung von Ergebnissen zwischen den beiden Kannentypen nur in grobem Rahmen zulässig ist.

Die Meßergebnisse sind in der gleichen Weise wie unter Punkt 4.1 verarbeitet und in den Bildern 27 bis 32 dargestellt.

Die daraus errechneten Werte betragen

$$f = 0,47$$

$$E_{Full} = 25400 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$E_{pl} = 2100 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\dot{z}_0 = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm dieses Fallversuches ist zu ersehen, daß die Kanne überhaupt nicht zurückgefedert ist. Deshalb ist die errechnete Geschwindigkeit $\dot{z}_0$ mit Sicherheit auf die Ungenauigkeiten beim Abschätzen des Faktors f und auf die Fehler der Polynomannäherung zurückzuführen. Es ist dann

$$E_v = 23300 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Die Kontaktkraft beträgt

$$K = -2,7 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Die Kannenverzögerung ist

$$b = -7000 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

4.4 Untersuchungen am Kugelbruch

Für die durchgeführten Versuche standen 1 000 gepreßte Graphitkugeln, bestehend aus A-3 Standardmatrixgraphit, zur Verfügung. Die Kugeln wurden in der in Bild 3 angegebenen Reihenfolge der Falltests eingesetzt. Das Gewicht der einzelnen Kugel betrug ca. 220 g.

Nach den Falltests wurden die Kannen aufgetrennt und die Kugeln schichtweise entnommen, um das Ausmaß der Kugelschädigungen lokalisieren zu können. Dabei wurde festgestellt, daß nur Kugeln in unmittelbarer Umgebung der Auftreffstelle der Kannen zerstört bzw. beschädigt wurden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, daß je nach Auftrefflage und Kannentypstarke Unterschiede bei der Kugelschädigung auftraten.

Die Auswertung der einzelnen Versuche erbrachte folgendes Ergebnis (siehe Tabelle 1):

Versuch_I

Beim Fall der Asse-Kanne auf die Bodenkante wurden fünf Kugeln beschädigt, wovon drei nur kleinere Abplatzungen zeigten. Die beiden anderen Kugeln wiesen dagegen große Ausbrüche auf (Bild 33). Desweiteren wurden insgesamt fünf Kugeln zerbrochen, wobei vier Bruchstücke mit einem Gewicht > 50 g sowie weitere dreizehn Stücke mit einem Gewicht zwischen 10 g und 50 g entstanden (Bild 33). Der Rest des Kugelbruches bestand aus einer Vielzahl kleiner Stücke, Graphitkörner sowie Graphitstaub (Bild 34). Dabei ist auffallend, daß der Anteil dieses Kugelbruches am insgesamt entstandenen Kugelbruch mit über 40 % vergleichsweise hoch war.

Versuch_II

Bei diesem Versuch war der Umfang der Kugelschädigung bzw.-zerstörung etwa doppelt so groß wie bei Versuch I. Es wurden zwölf Kugeln beschädigt, wovon drei größere Abplatzungen aufwiesen (Bild 35). Außerdem wurden zwölf Kugeln zerbrochen,

wobei sechszehn Bruchstücke mit einem Gewicht von mehr als 50 g (Bild 36) sowie einundzwanzig Stücke mit einem Gewicht zwischen 10 g und 50 g entstanden (Bild 37). Der übrige Kugelbruch, der etwa 20 % vom gesamten Kugelbruch ausmachte, bestand aus kleineren Bruchstücken (Bild 38). Der Staubanteil war diesmal relativ gering.

Versuch III

Im dritten Versuch, Fall einer AVR-TL-Kanne aus 7 m Höhe auf die Bodenkante, war die Kugelschädigung weitaus geringer als bei den vorangegangenen Versuchen. Insgesamt wurden nur vier Kugeln beschädigt, wovon nur zwei sehr kleine Abplatzungen aufwiesen (Bild 39).

Zerbrochene Kugeln wurden nicht gefunden.

Bei der Auslegung von Transport- und Lagereinrichtungen für abgebrannte AVR-Brennelemente wurden bisher zum Teil sehr pessimistische Annahmen hinsichtlich des Verhaltens der Lagerkannen und Brennelemente nach einem Absturz gemacht. In den durchgeführten Versuchen mit Graphitkugeln sollte geprüft werden, inwieweit diese Annahmen mit den tatsächlichen Auswirkungen auf Kanne und Brennelemente übereinstimmen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die mechanischen Eigenschaften der Graphitkugeln mit denen der abgebrannten AVR-Brennelemente vergleichbar sind. Als Maß für die mechanische Festigkeit der Brennelemente wurden die Bruch- und Fallfestigkeit definiert. Die Bruchfestigkeit wird durch die Kraft angegeben, die zum Zerdrücken eines Brennelementes zwischen parallelen Stahlplatten erforderlich ist. Unter der Fallfestigkeit wird die Zahl der Fälle auf eine harte Unterlage verstanden, die ein Brennelement bis zum Bruch übersteht.

Bei den Falltests wurden die Brennelemente einer Kombination der beiden Belastungsarten ausgesetzt, wobei die Druckbelastung jedoch das Übergewicht hatte. Für die weitere Betrachtung wird daher nur die Bruchfestigkeit herangezogen.

Für die Bruchfestigkeit von unbestrahlten, gepreßten Brennelementen hat man einen Wert von $\bar{K}_{\text{Bruch}} = 21,8 \text{ kN}$ bis $\bar{K}_{\text{Bruch}} = 24,9 \text{ kN}$ ermittelt (1). Unter Bestrahlung steigt dieser Wert nur unwesentlich, so daß man von einer nahezu gleichbleibenden Bruchfestigkeit dieser Brennelemente ausgehen kann (Bild 40). Die Bruchfestigkeit der in den Falltests eingesetzten Graphitkugeln, die ebenfalls wie die gepreßten AVR-Brennelemente aus A-3 Standardmatrixgraphit bestanden, entspricht etwa der unbestrahlter Brennelemente (2). Man kann daher davon ausgehen, daß bei einem Absturz einer mit abgebrannten AVR-Brennelementen gefüllten Kanne im Trockenlager nicht mehr Brennelemente beschädigt werden als Graphitkugeln bei den Falltests.

Mit beschädigten Brennstoffpartikeln ist dabei nicht zurechnen, vor allem dann nicht, wenn, wie beim Falltest mit der AVR-TL-Kanne, nur Abplatzungen aus der brennstofffreien Zone der Brennelemente auftreten.

Die erhöhte Freisetzung radioaktiver Stoffe nach einem 7 m hohen Sturz auf die Bodenkante einer mit abgebrannten AVR-Brennelementen gefüllten AVR-TL-Kanne kann daher mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, wenn ihre Dichtigkeit, wie auch bei allen in den Falltests eingesetzten Kannen, nach dem Sturz erhalten bleibt.

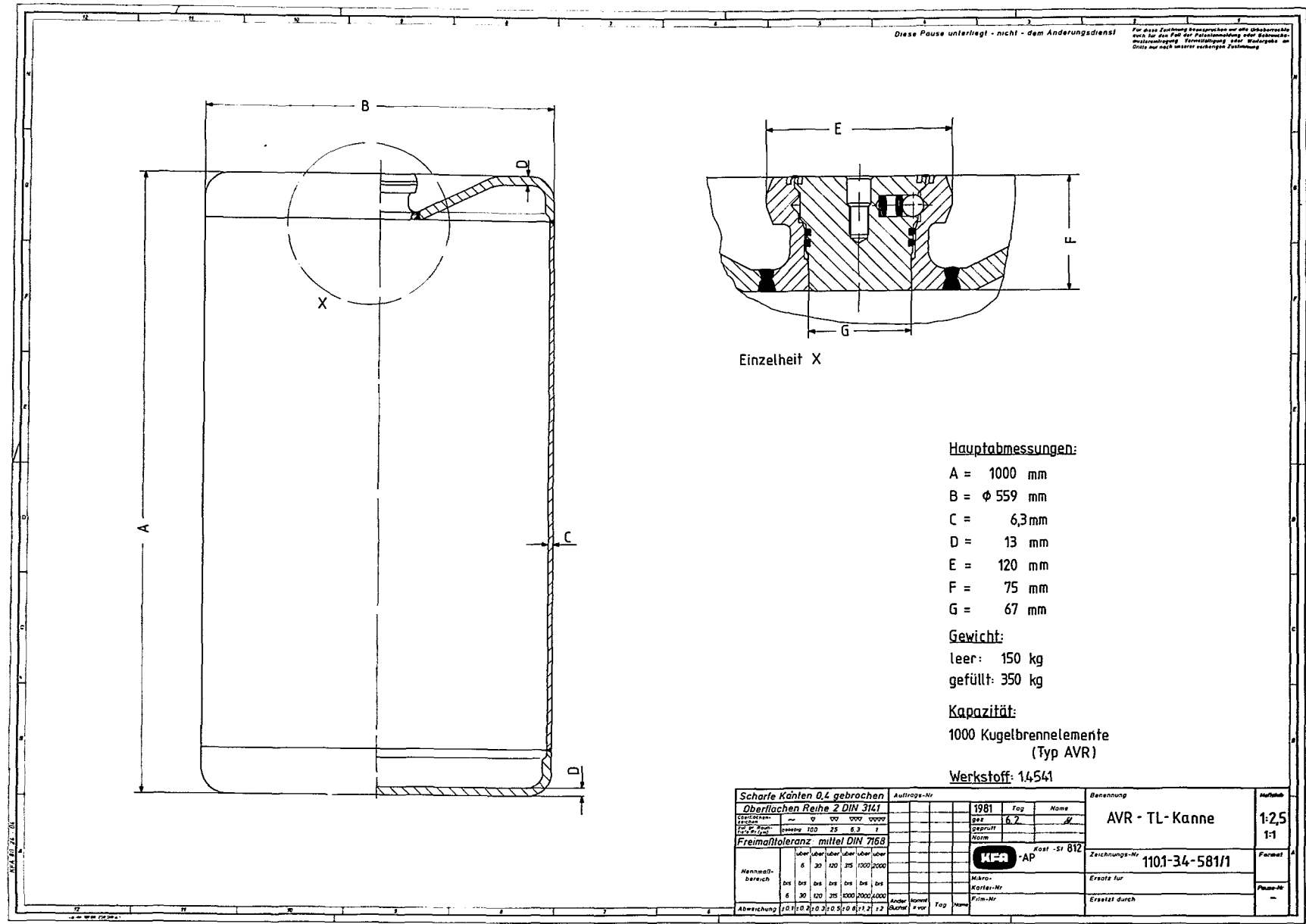
Versuch Nr.	Kannentyp	Auftreffstelle der Kannen	Beschädigte Kugeln	Zerbrochene Kugeln	Kugel- bruch (g)	Anzahl der Bruch- stücke		Gewicht Bruch- stücke < 10 g und Staub (g)
						> 50 g	< 50 g > 10 g	
I	ASSE-Kanne	Bodenkante	5	5	1025	4	13	430
II	ASSE-Kanne	Mantellinie	12	12	2645	16	21	500
III	AVR-TL-Kanne	Bodenkante	4	-	6	-	-	6

Tab. 1: Kugeldefekte bei Falltests mit ASSE- und AVR-TL-Kannen

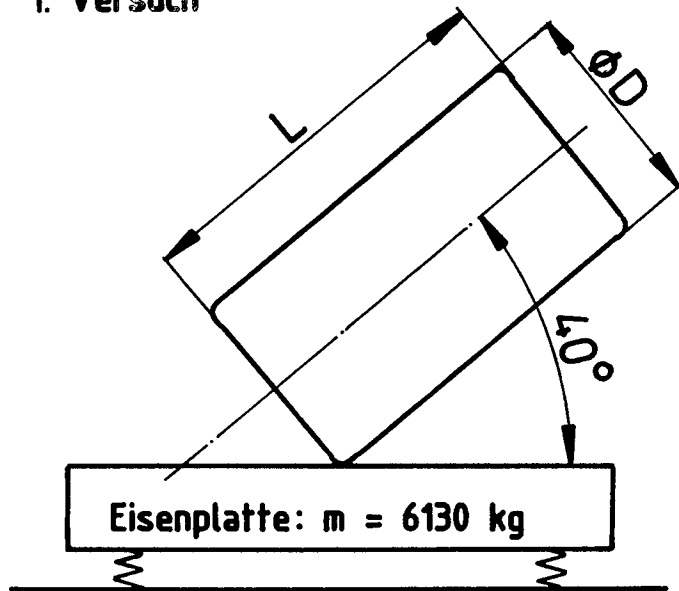
Literatur

- | | |
|--------------------|--|
| (1) M. Wimmers | "Das Verhalten kugelförmiger HTR-Brennelemente bei der Massenerprobung im AVR-Reaktor",
Jülich, Januar 1977 |
| (2) W. Rind | Persönliche Mitteilung |
| (3) W. Scharenberg | Versuchsnotiz vom 17.8.81 |

Bild 2
AVR - TL - Kanne



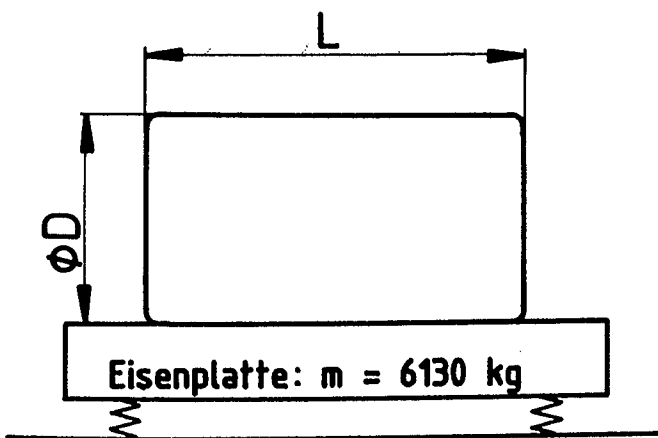
I. Versuch



ASSE Kanne

Fallhöhe: 7 m
Inhalt: 1000 Graphitkugeln
L: 1000 mm
D: 559 mm
Werkstoff: St37
Gewicht: 330 kg

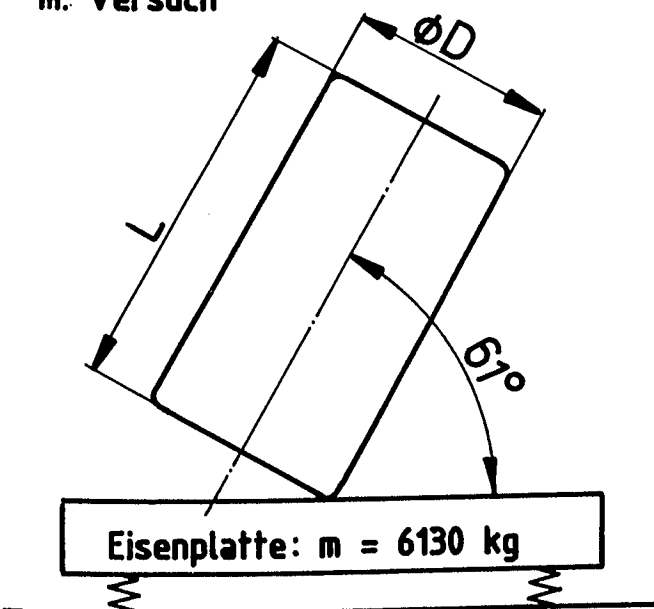
II. Versuch



ASSE Kanne

Fallhöhe: 7 m
Inhalt: 1000 Graphitkugeln
L: 1000 mm
D: 559 mm
Werkstoff: St37
Gewicht: 330 kg

III. Versuch



AVR-TL-Kanne

Fallhöhe: 7 m
Inhalt: 1000 Graphitkugeln
L: 1000 mm
D: 559 mm
Werkstoff: 1.4541
Gewicht: 370 kg

Bild 3

Aufprallwinkel der
drei Fallversuche

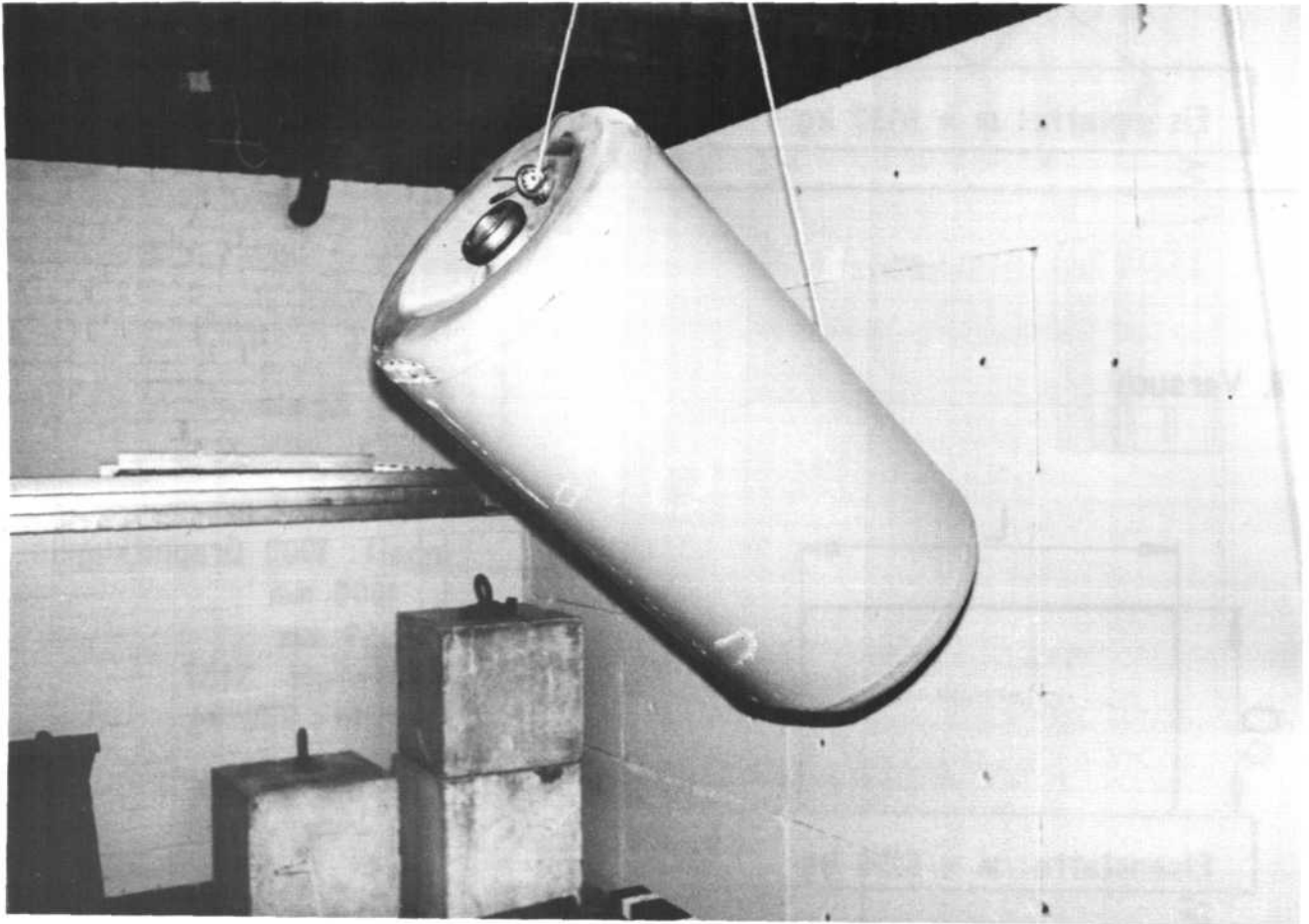


Bild 4
Befestigung der Kanne am Seil beim ersten
Fallversuch

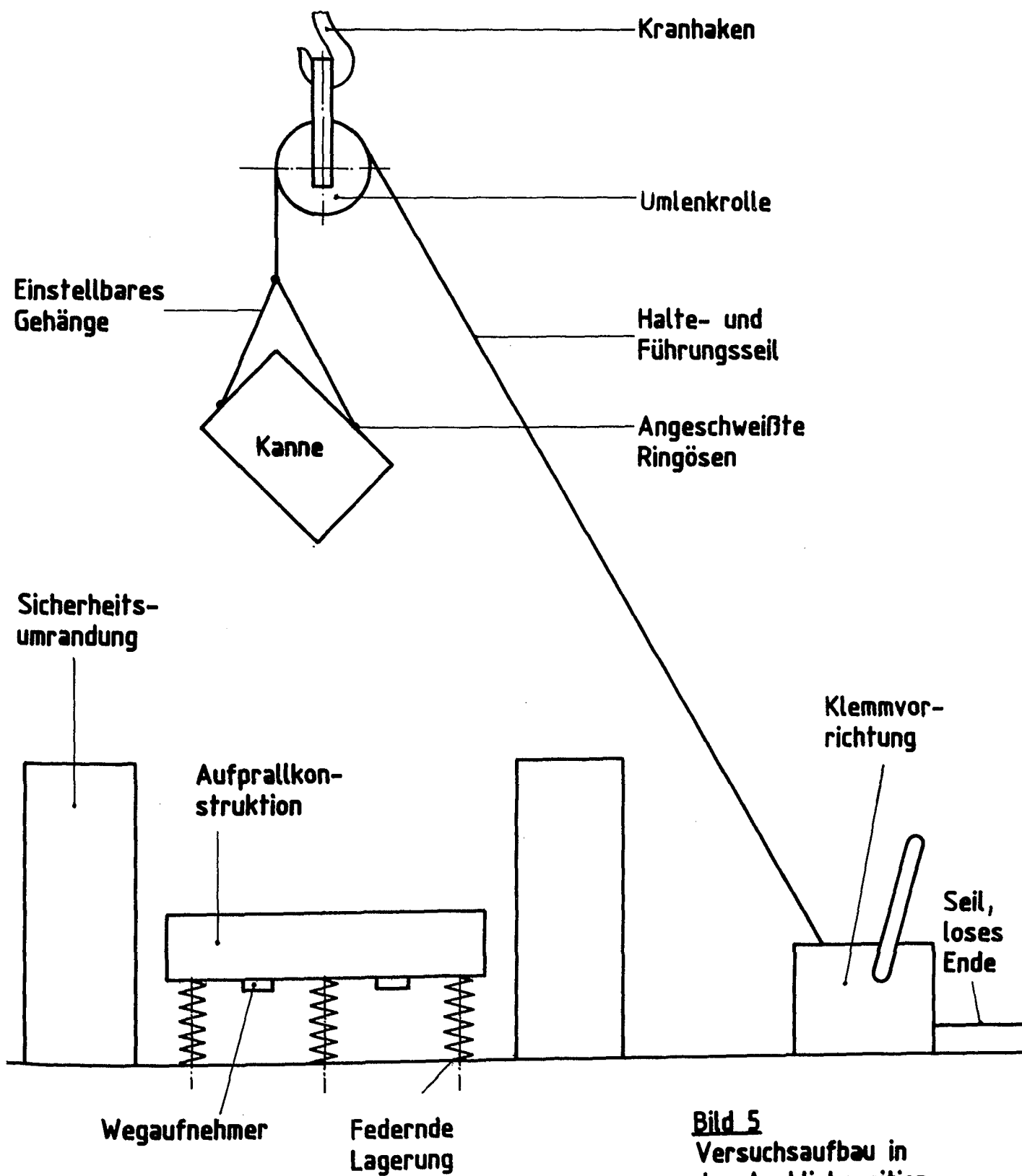


Bild 5
Versuchsaufbau in
der Ausklinkposition

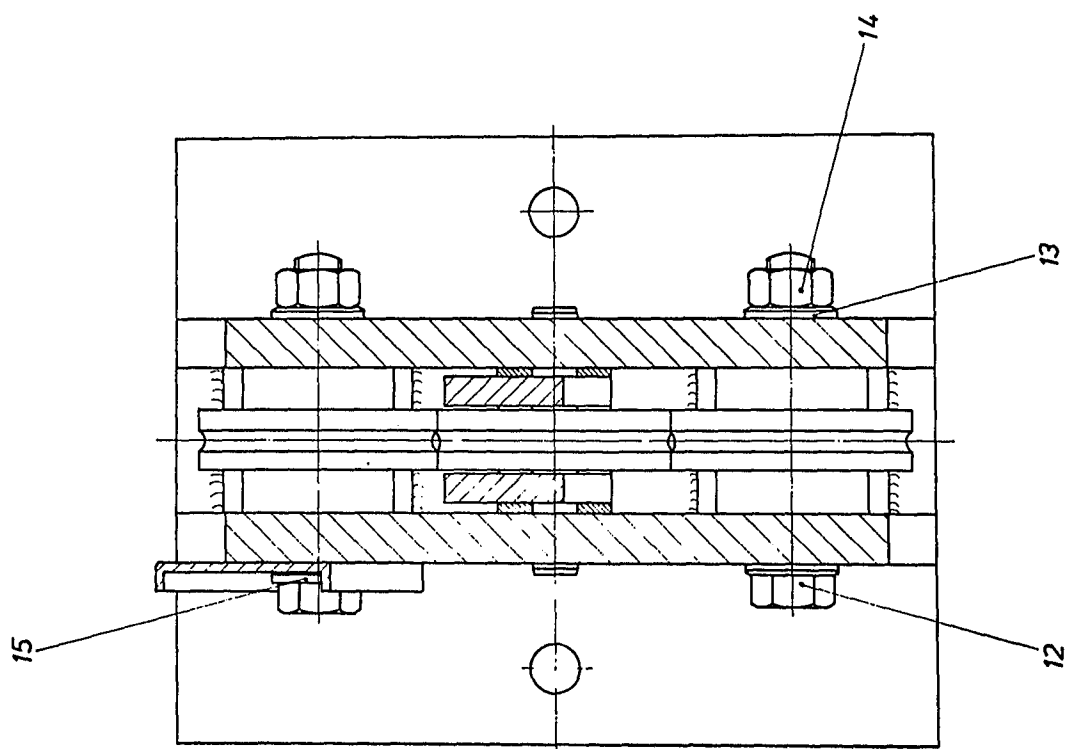
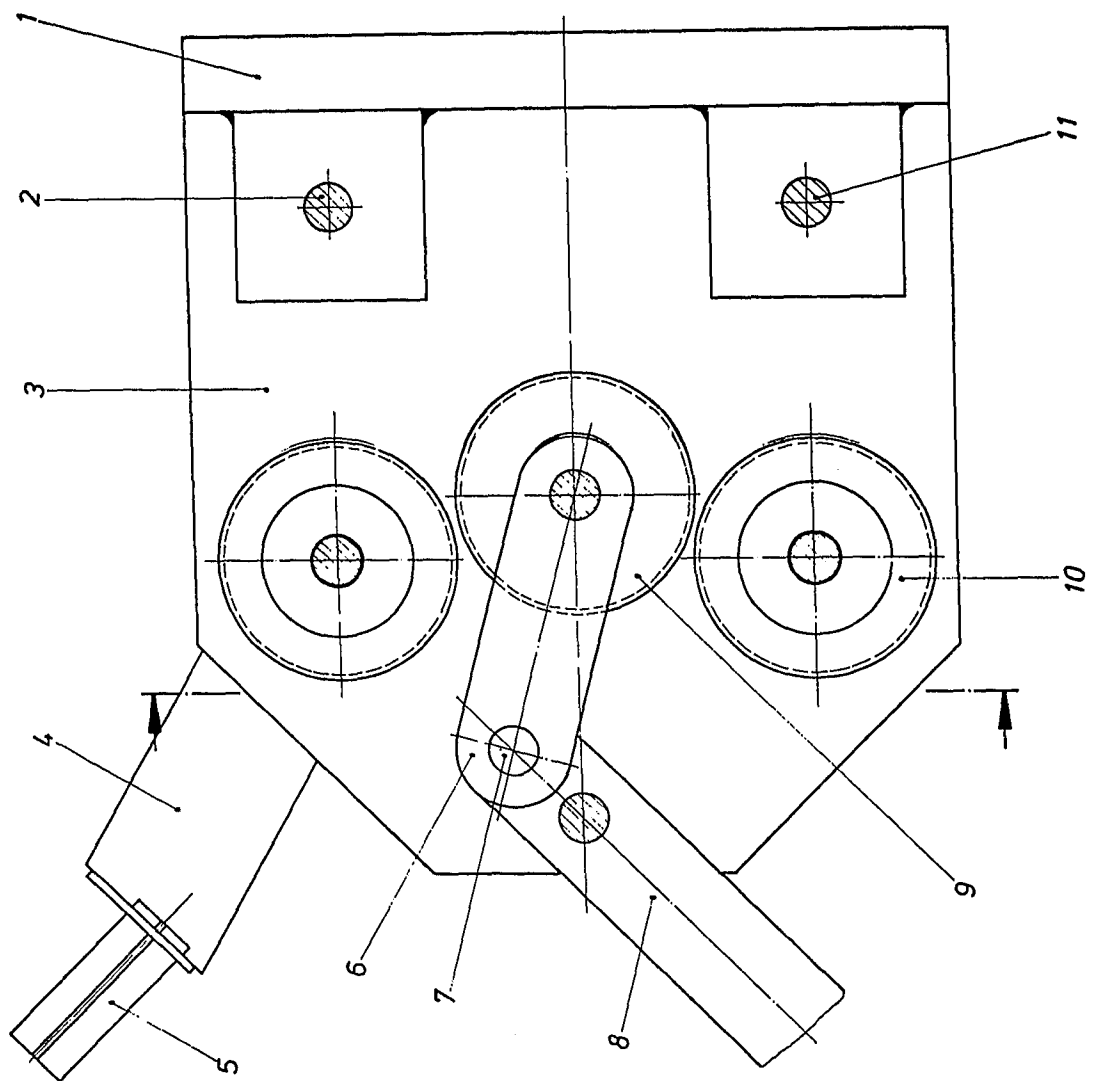


Bild 6
Klemmvorrichtung

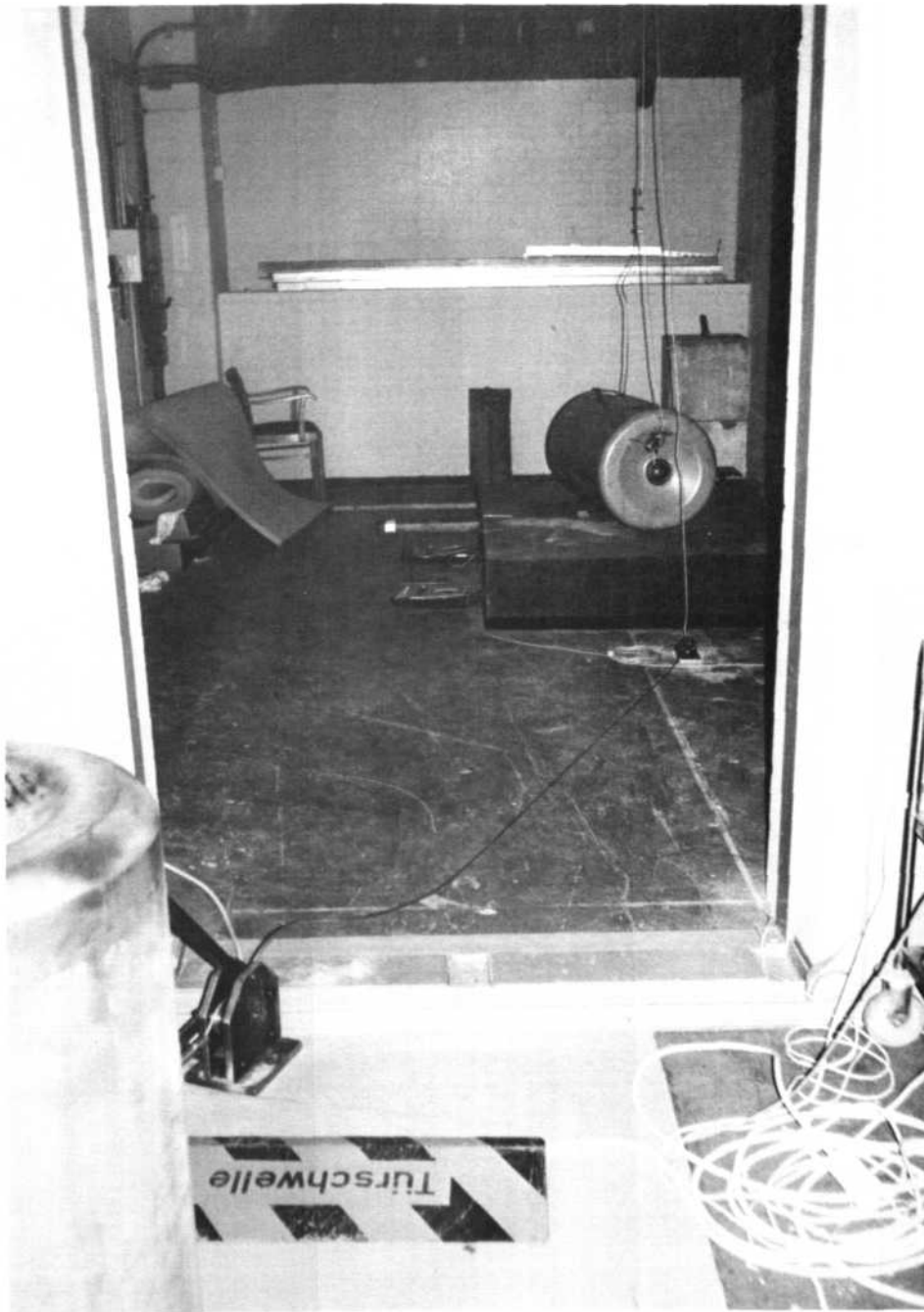


Bild 7
Versuchsaufbau nach dem ersten
Fallversuch

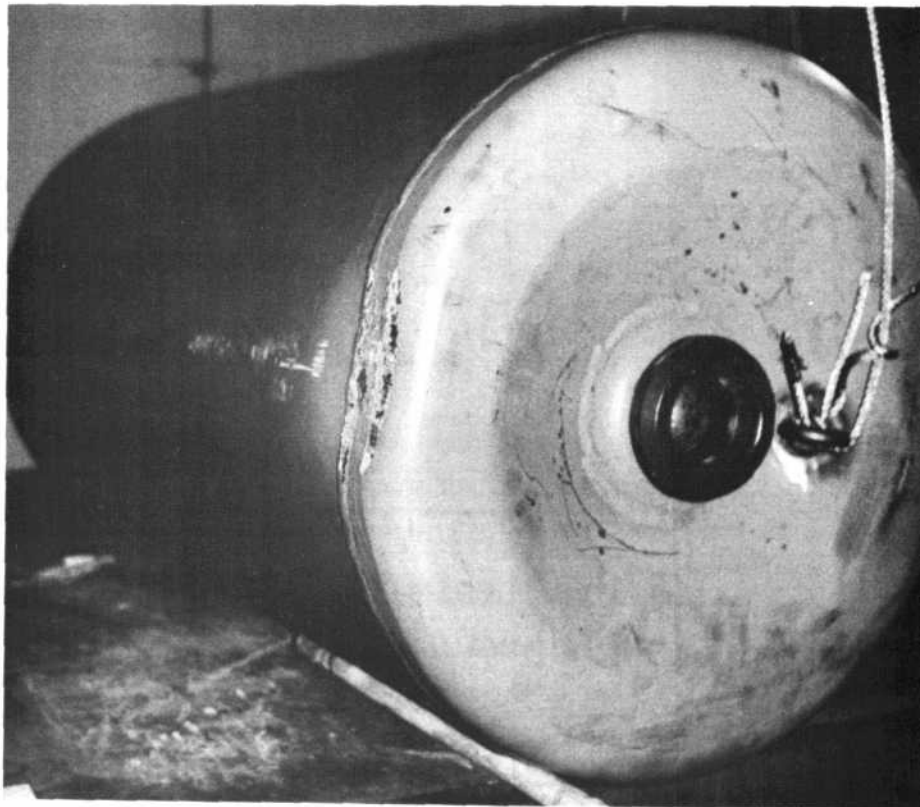
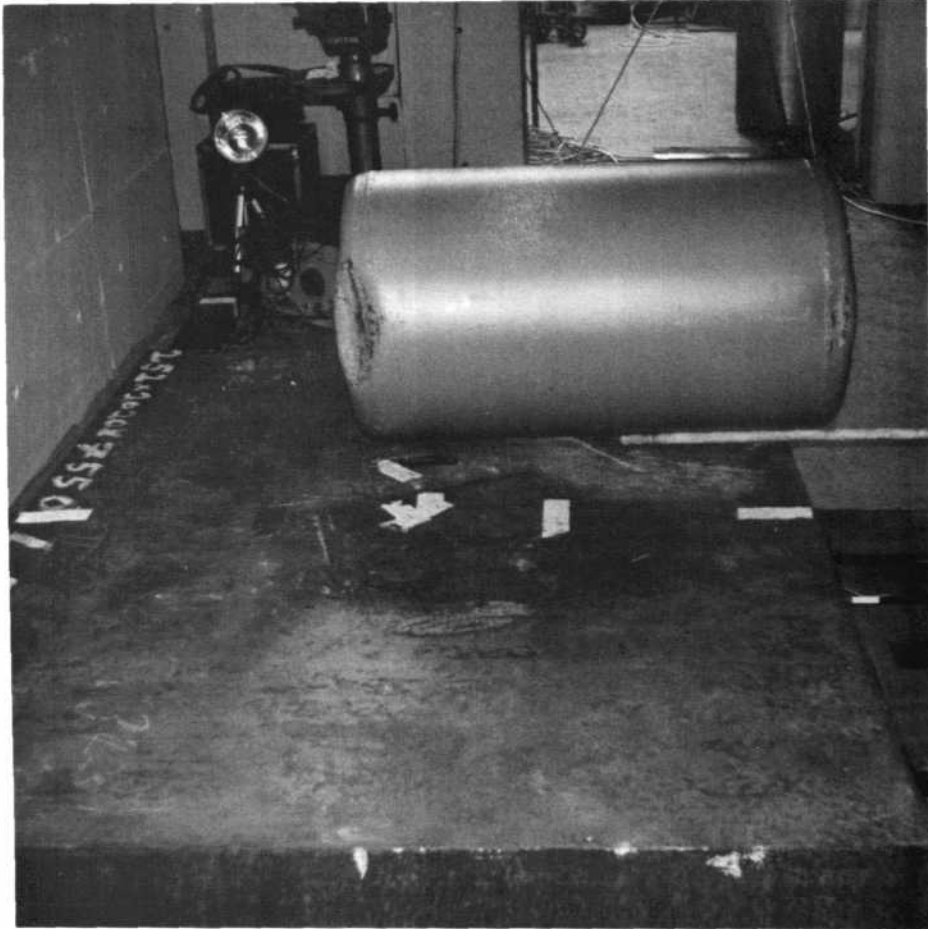


Bild 9
Deformationen der Kanne 1

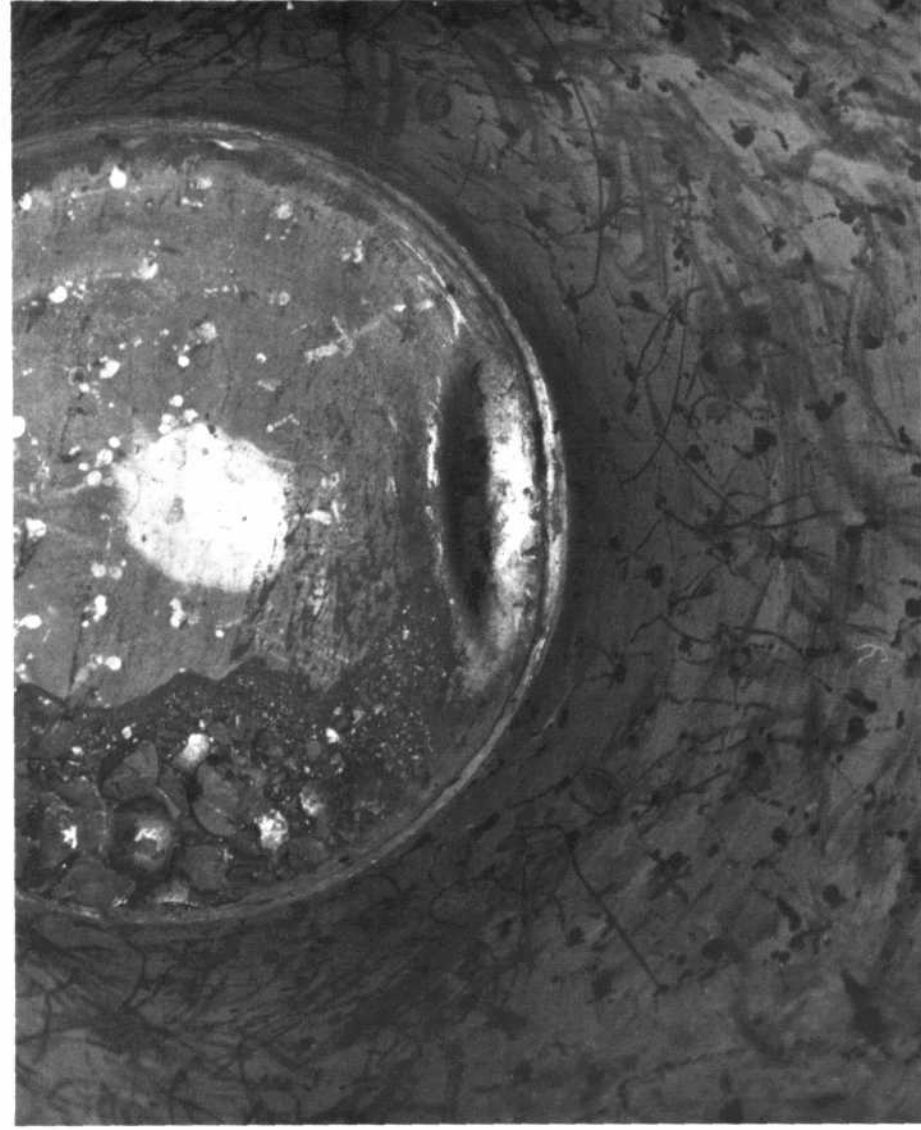
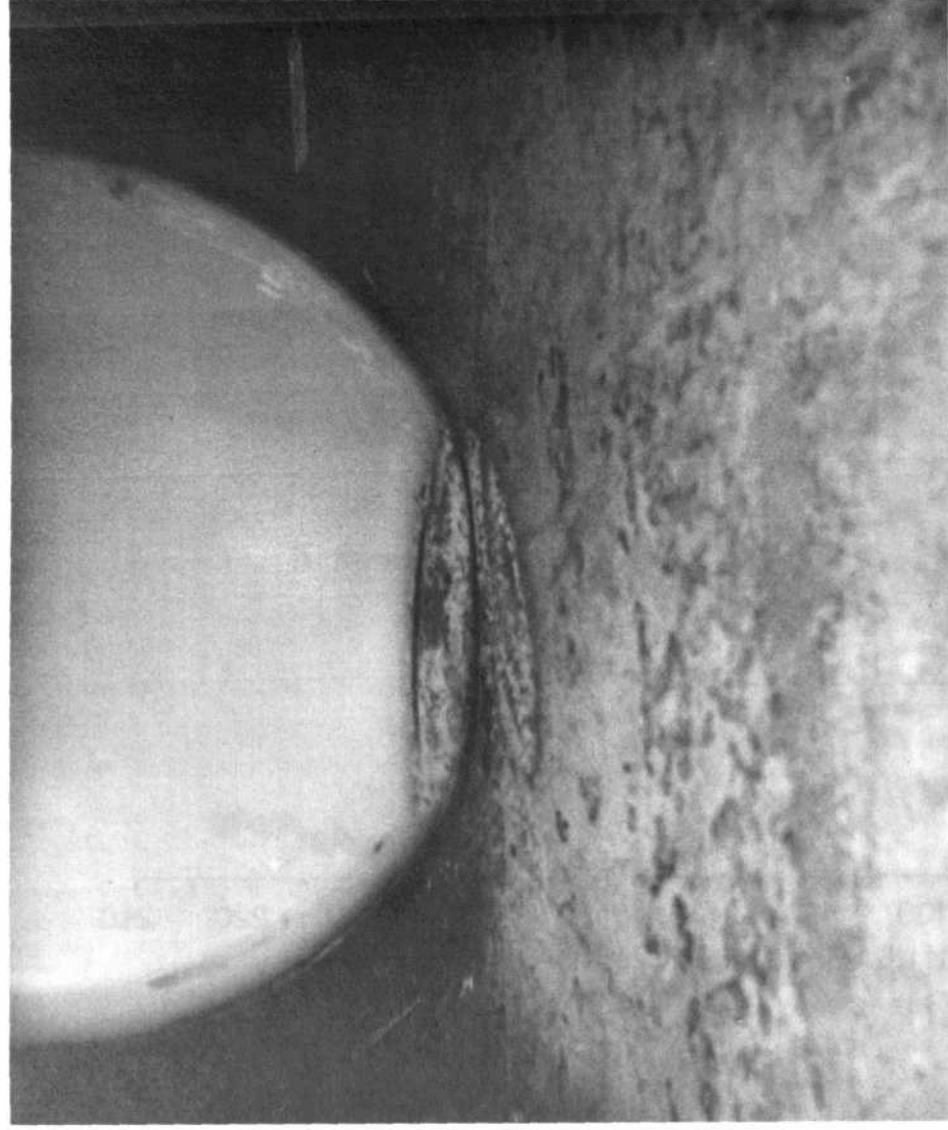


Bild 10
Einbeulung am Kannenboden

Bild 11
Meßwerte

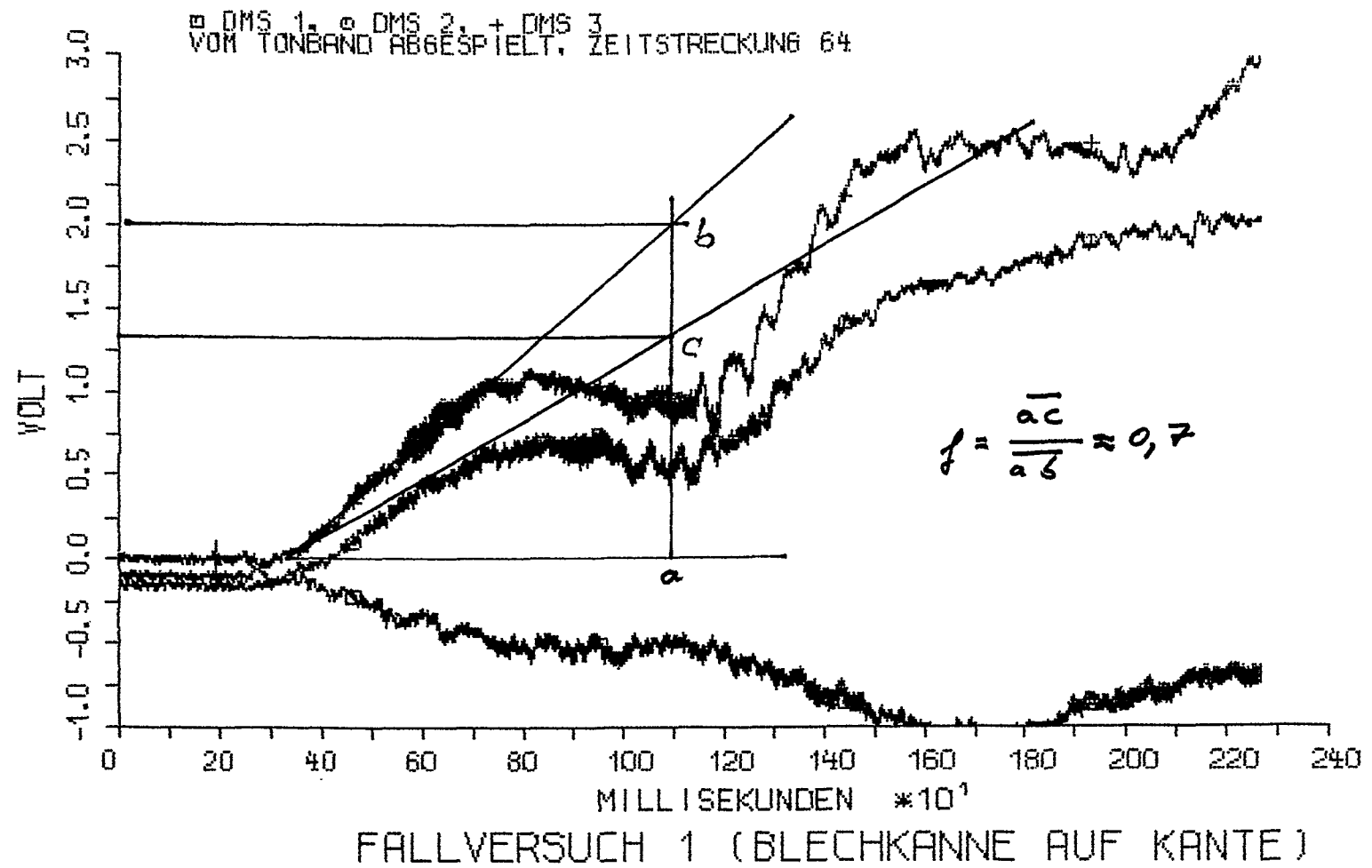
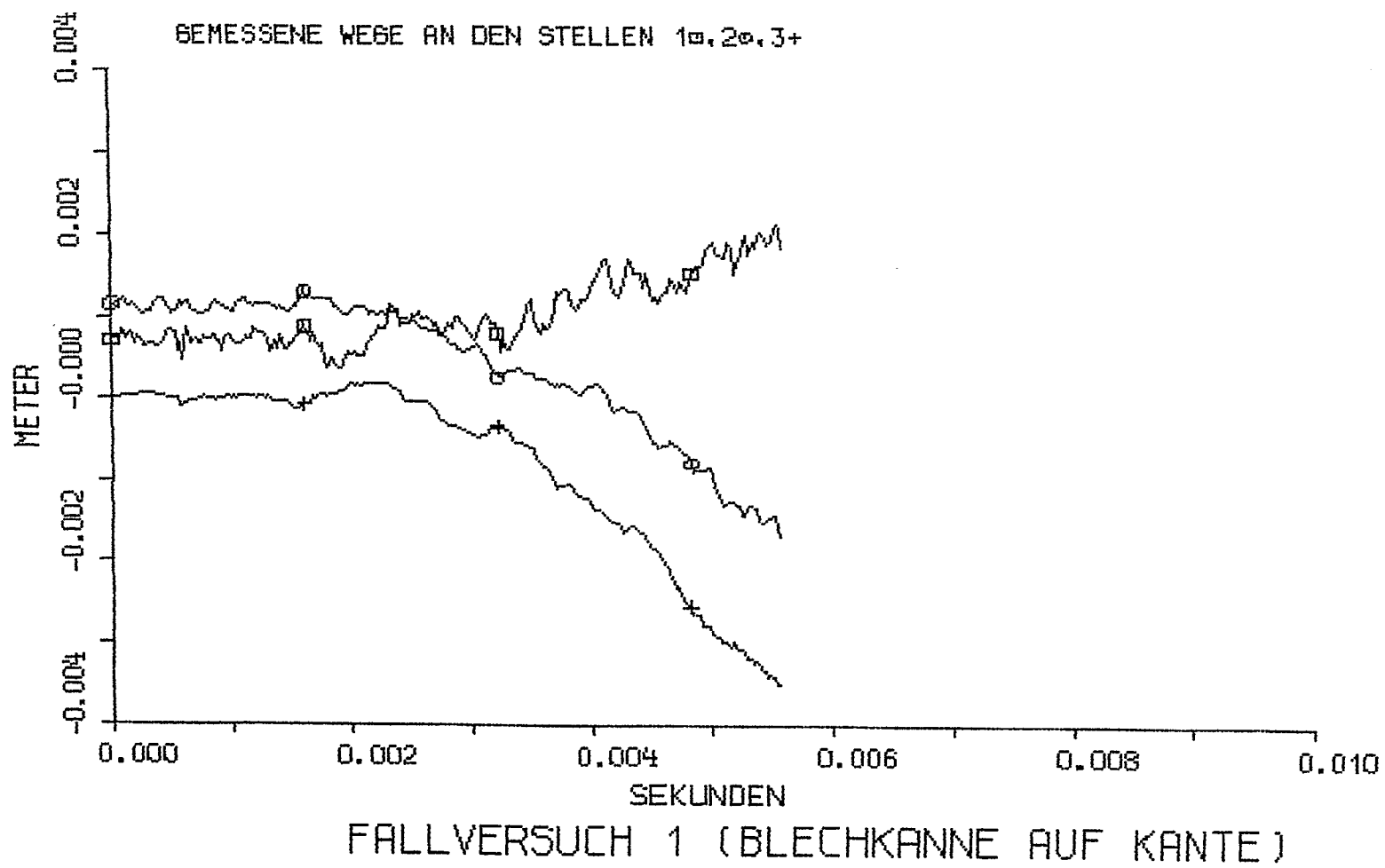
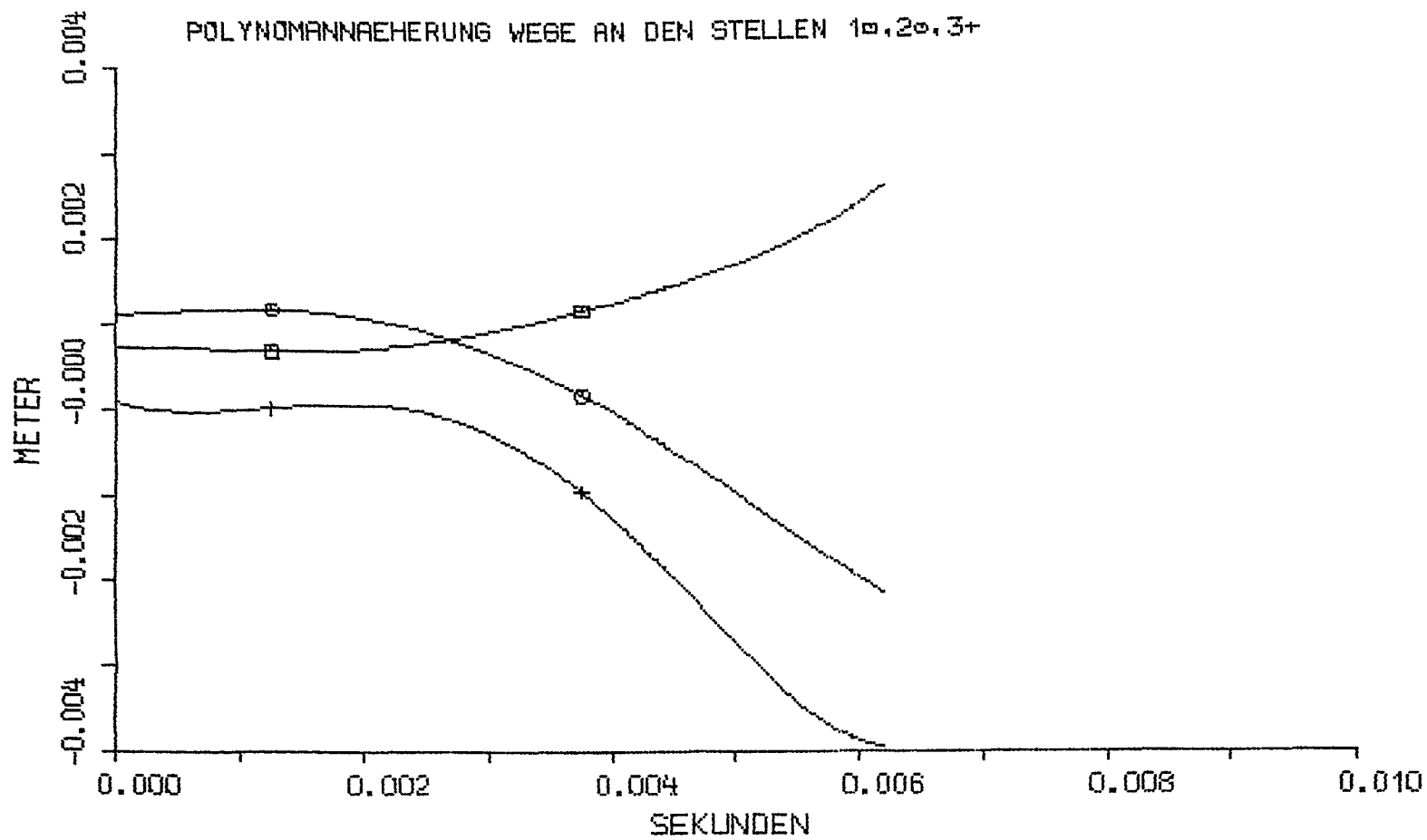


Bild 12
Umgerechnete Ausschnittswerte aus Bild 11





FALLVERSUCH 1 (BLECHKANNE AUF KANTE)

Bild 13
Polynomannäherung der Meßwerte nach
Bild 12

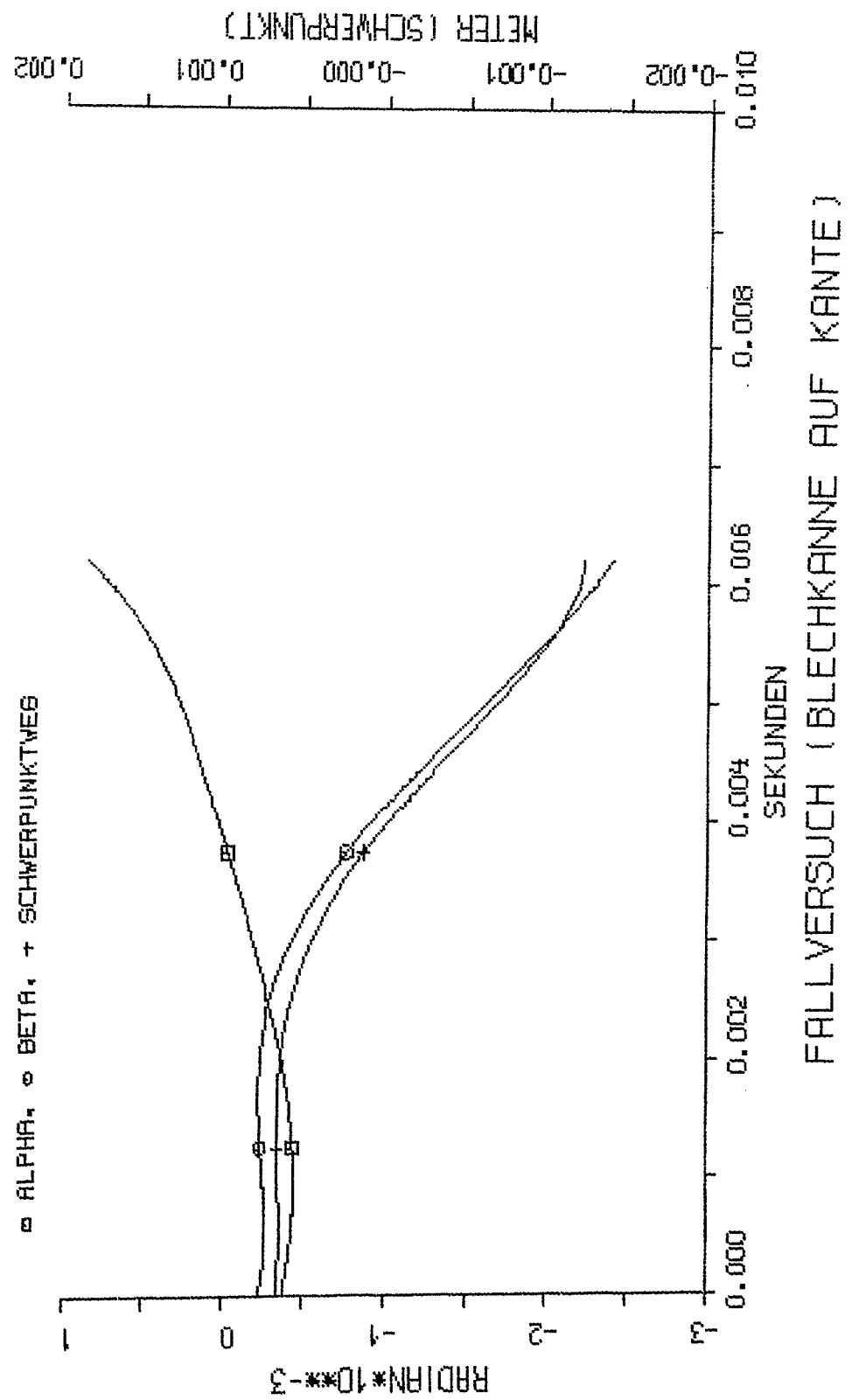


Bild 14

Schwerpunktwerte, errechnet aus der Polynomannäherung

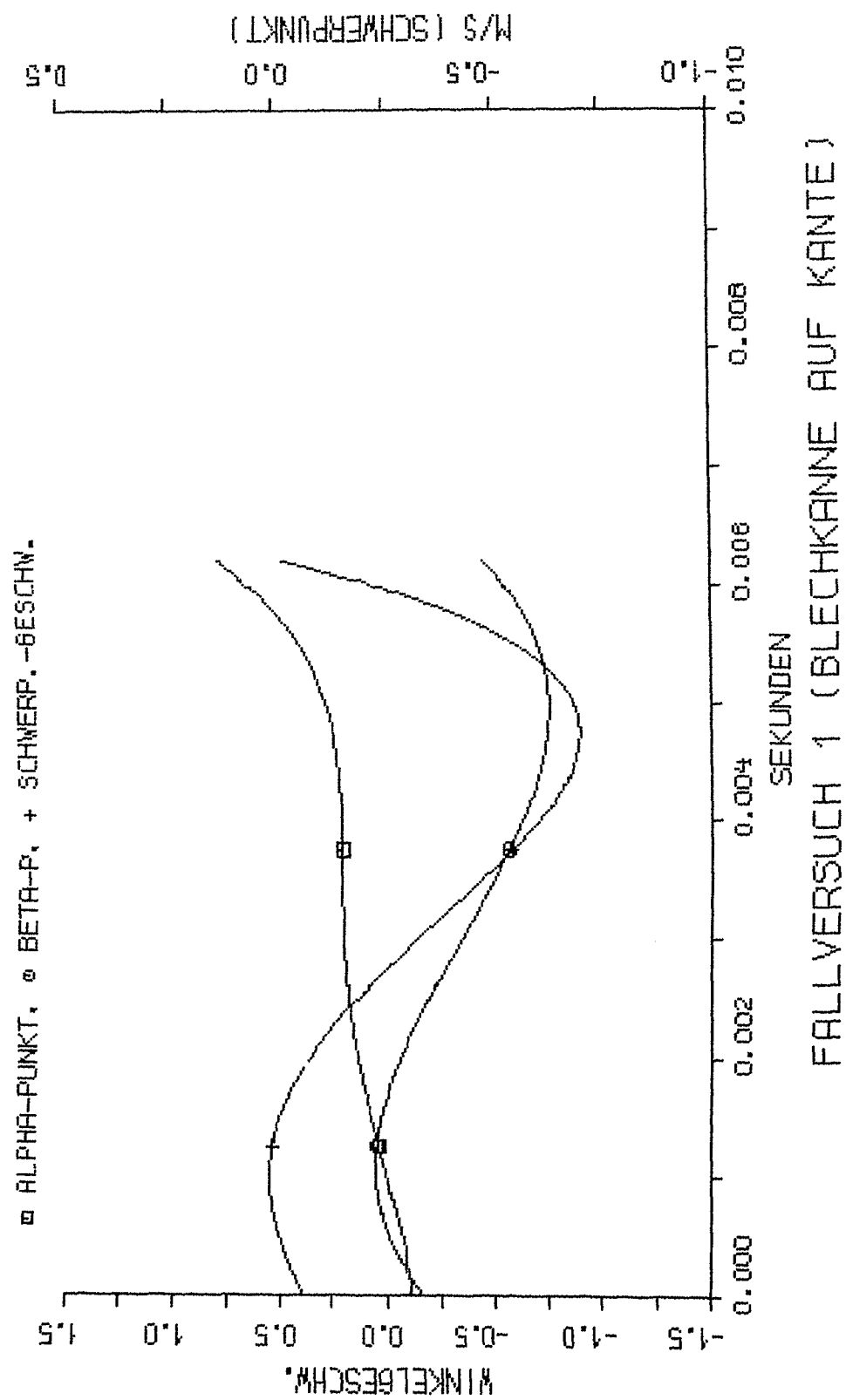


Bild 15

Geschwindigkeitswerte, errechnet aus den Schwerpunktswerten

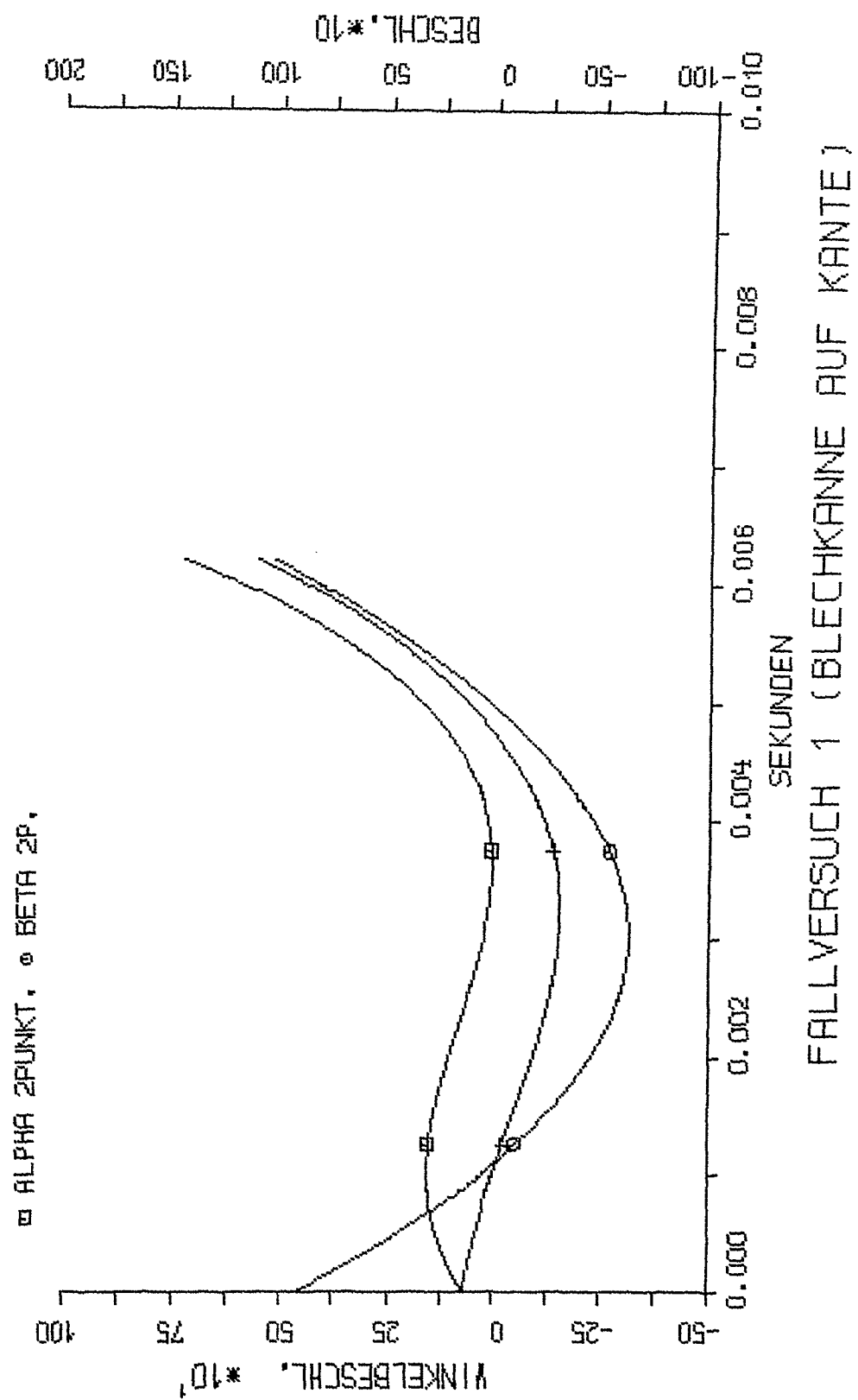


Bild 16

Beschleunigungswerte, errechnet aus
den Schwerpunktwerten



Bild 17
Deformationen der Kanne 2

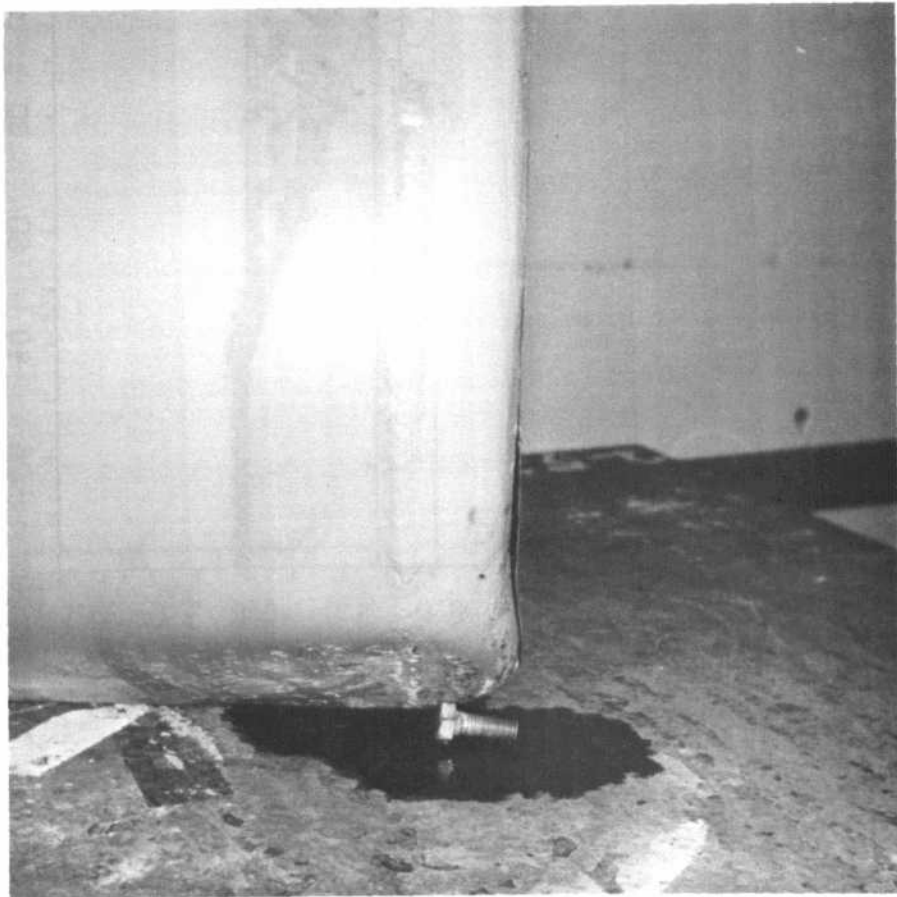
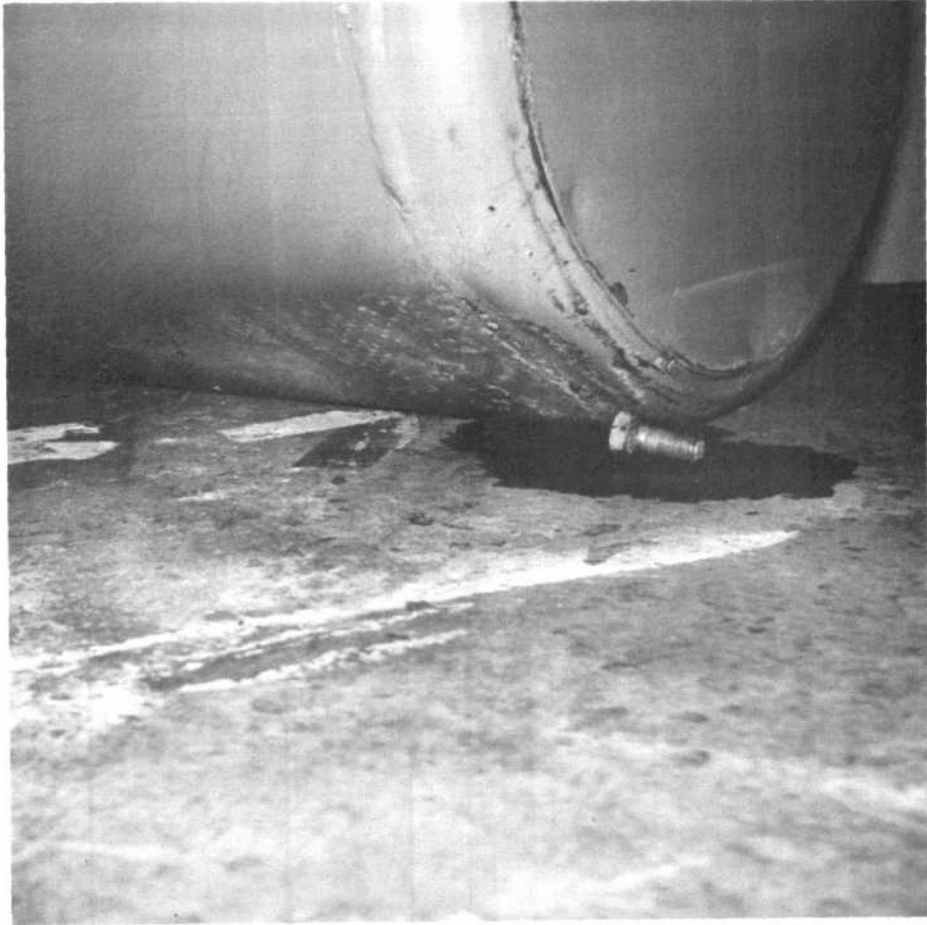
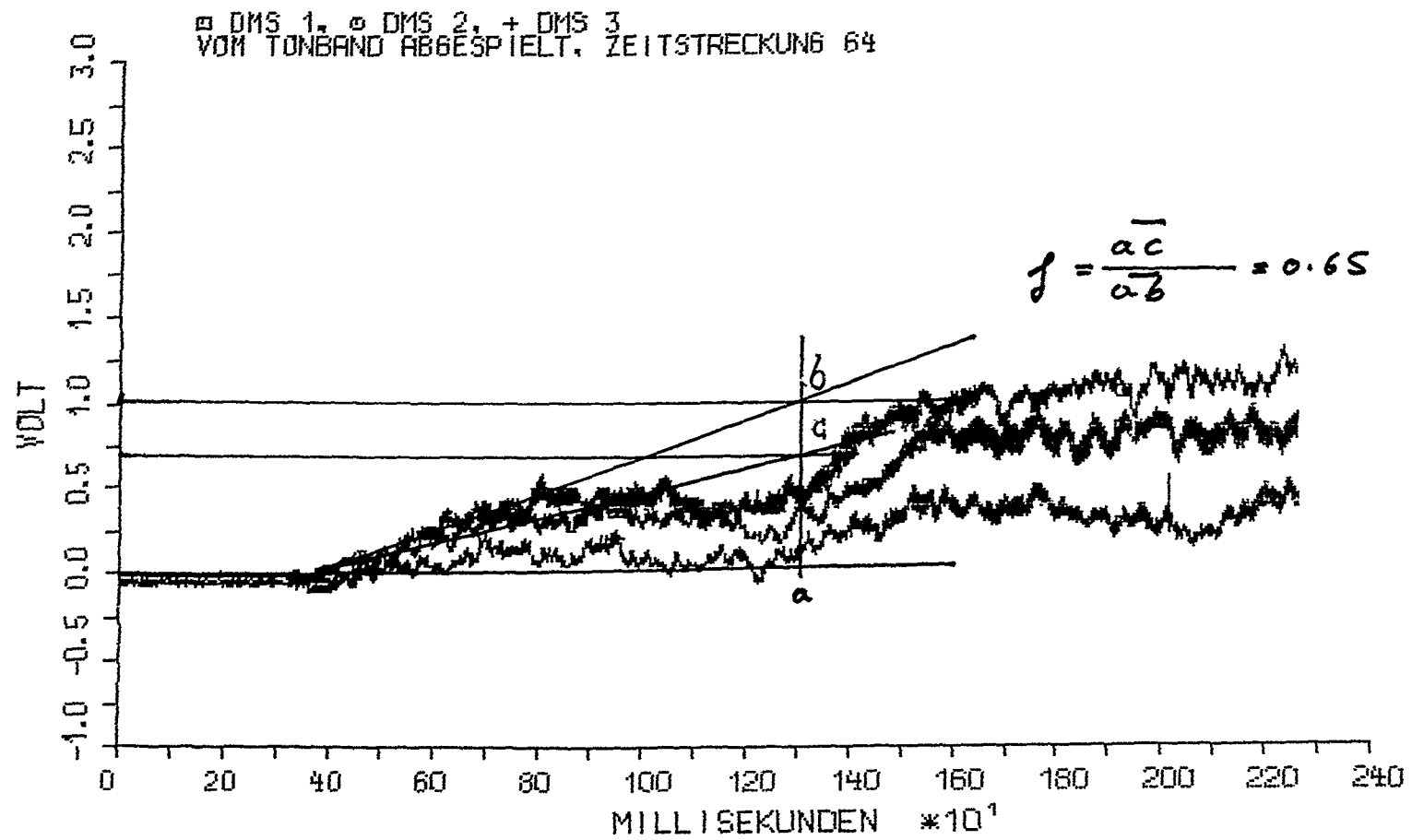


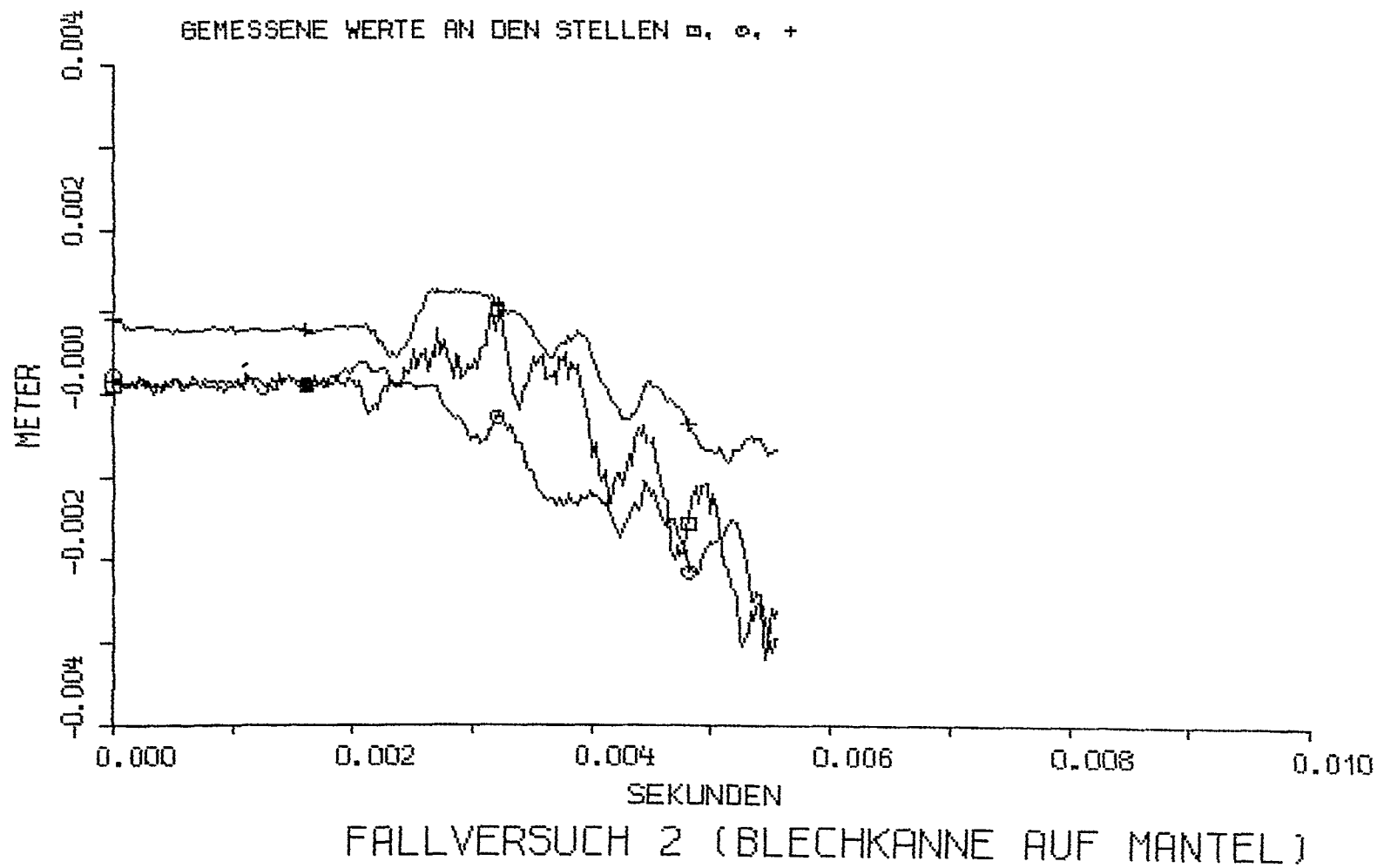
Bild 18
Ablösung des aufgepunkteten Bleches

Bild 19
Meßwerte



FALLVERSUCH 2 (BLECHKANNE AUF MANT.)

Bild 20
Umgerechnete Ausschnittswerte aus Bild 19



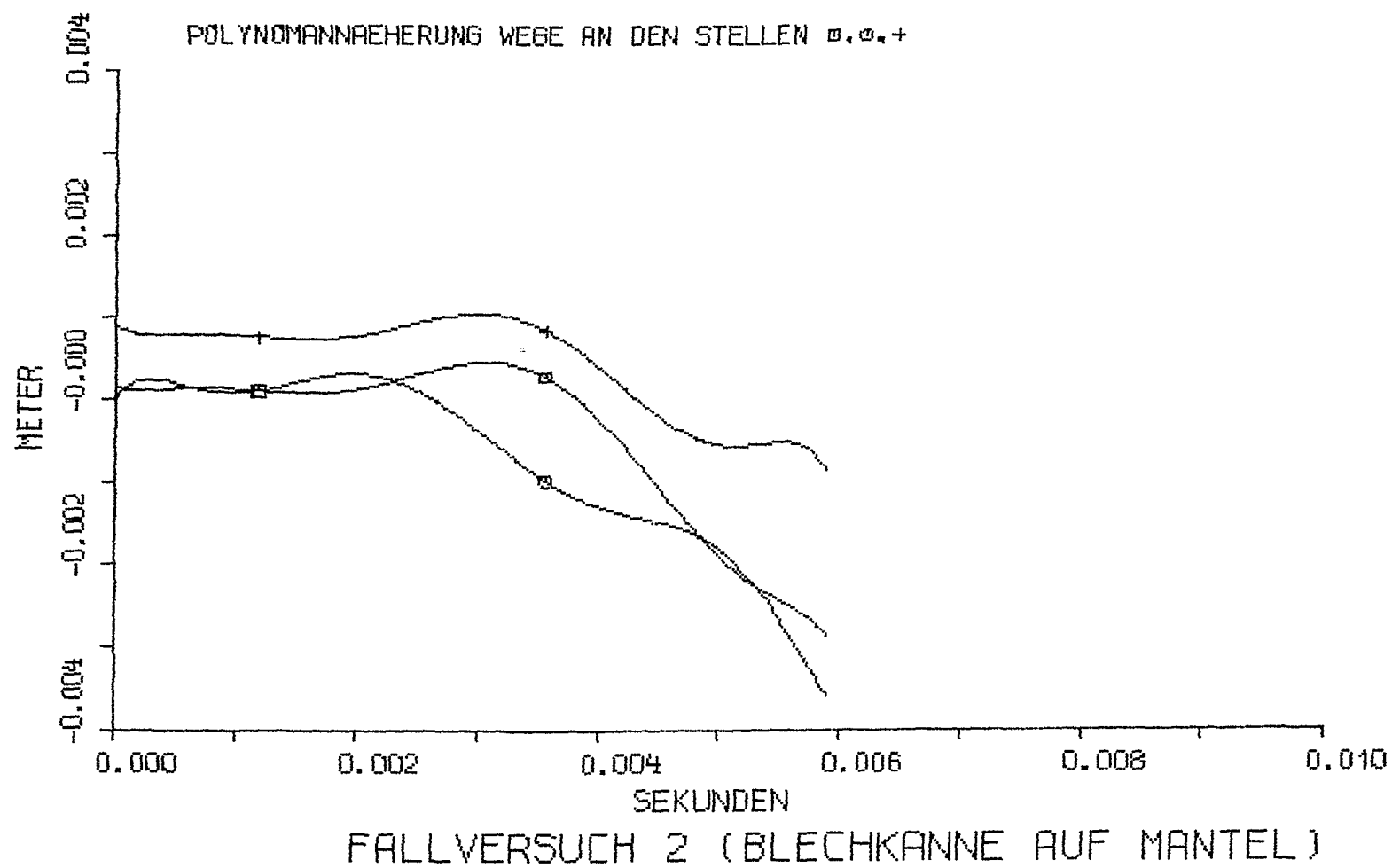


Bild 21
Polynomannäherung der Meßwerte nach
Bild 20

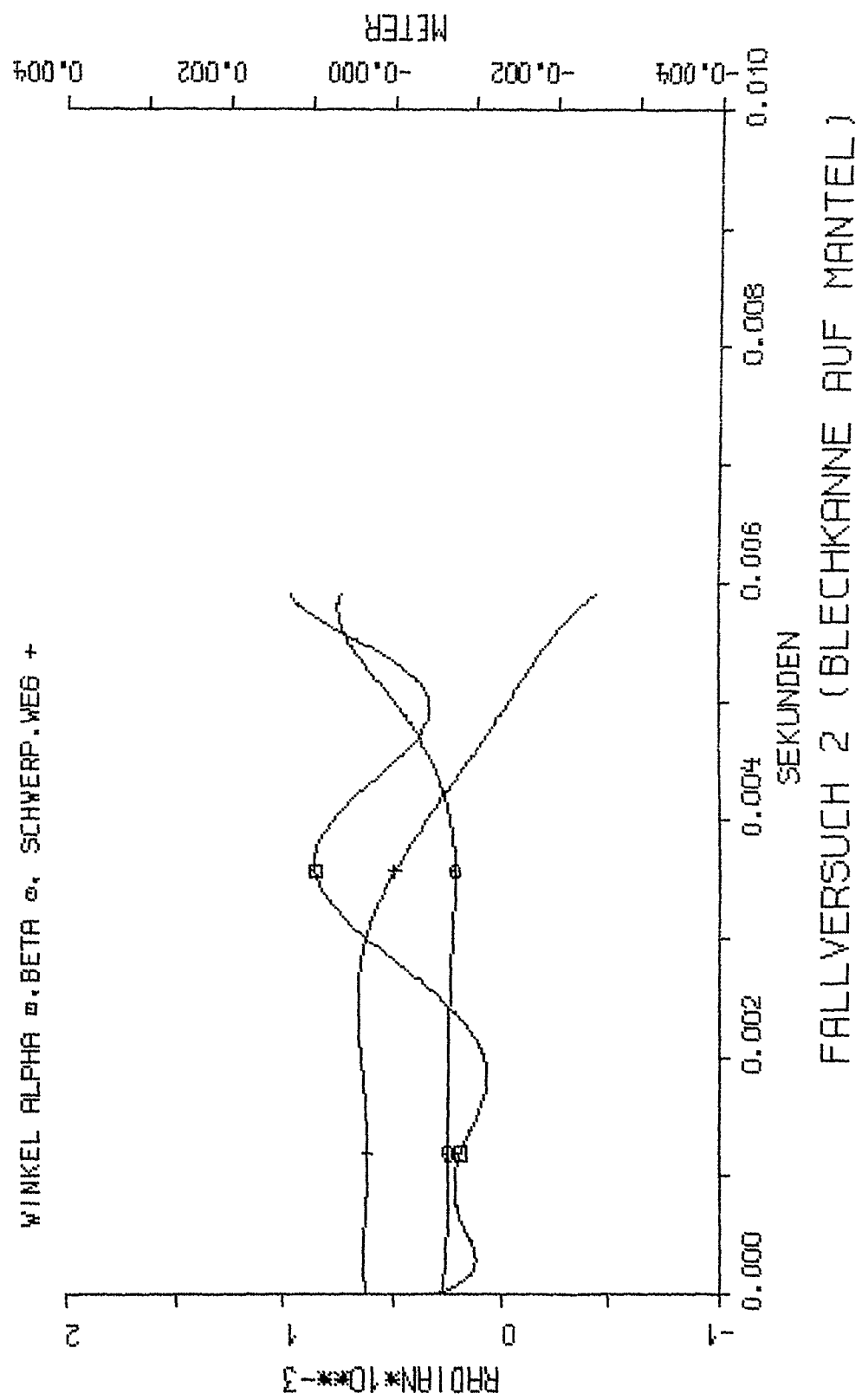


Bild 22

Schwerpunktswerte, errechnet aus der Polynomannäherung

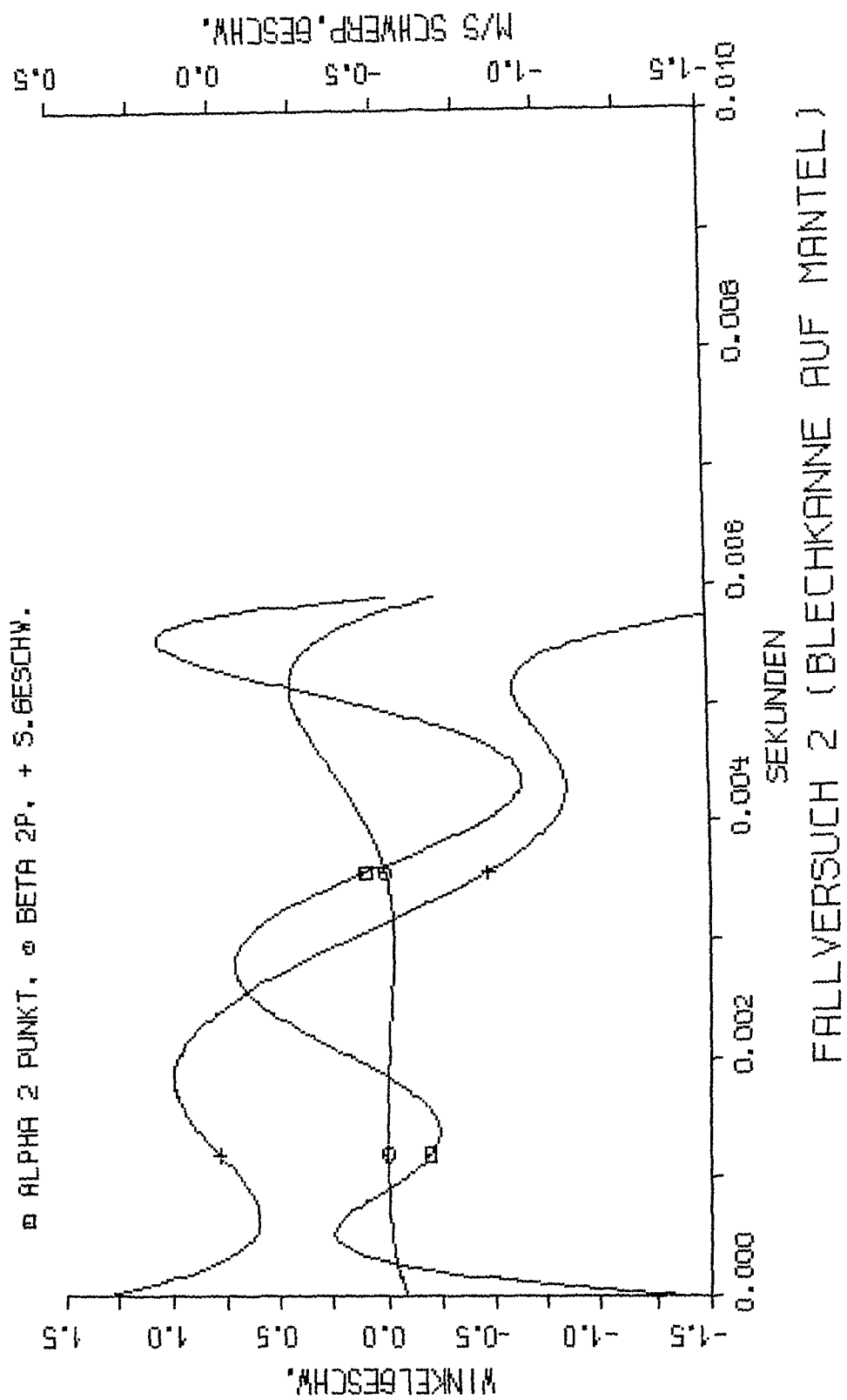


Bild 23

Geschwindigkeitswerte, errechnet aus den Schwerpunktswerten

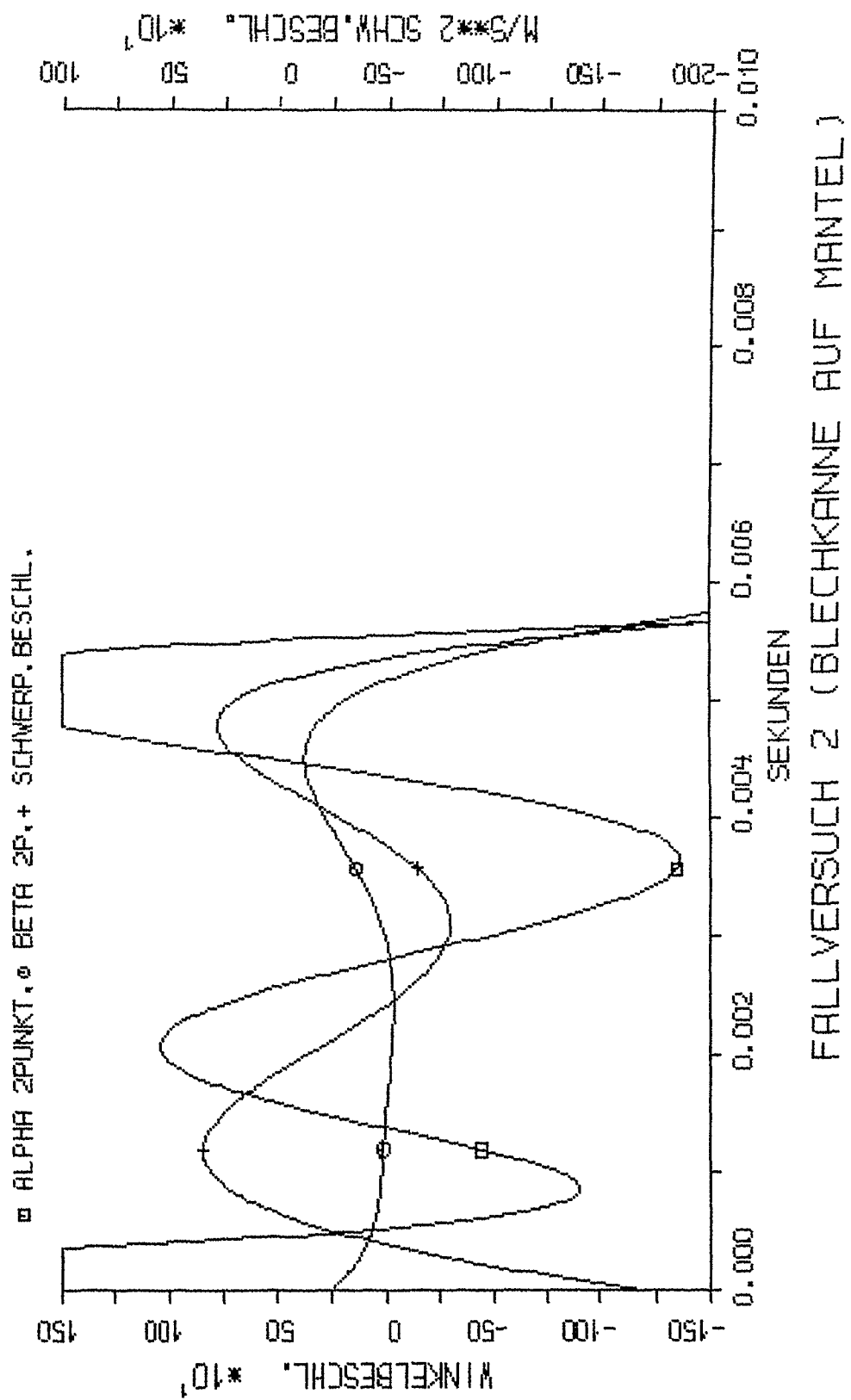


Bild 24

Beschleunigungswerte, errechnet aus den Schwerpunktwerten



Bild 25
Deformationen der Kanne 3

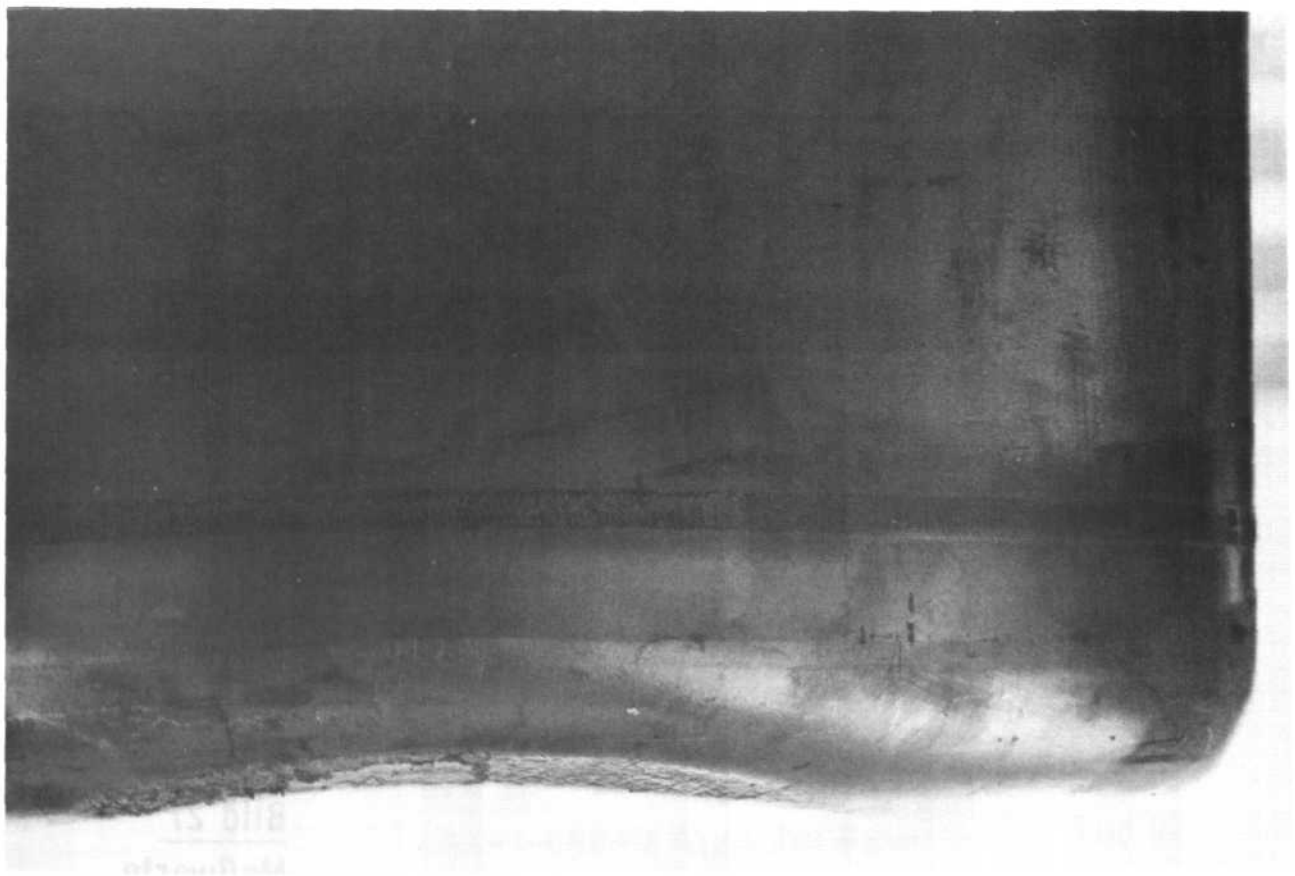
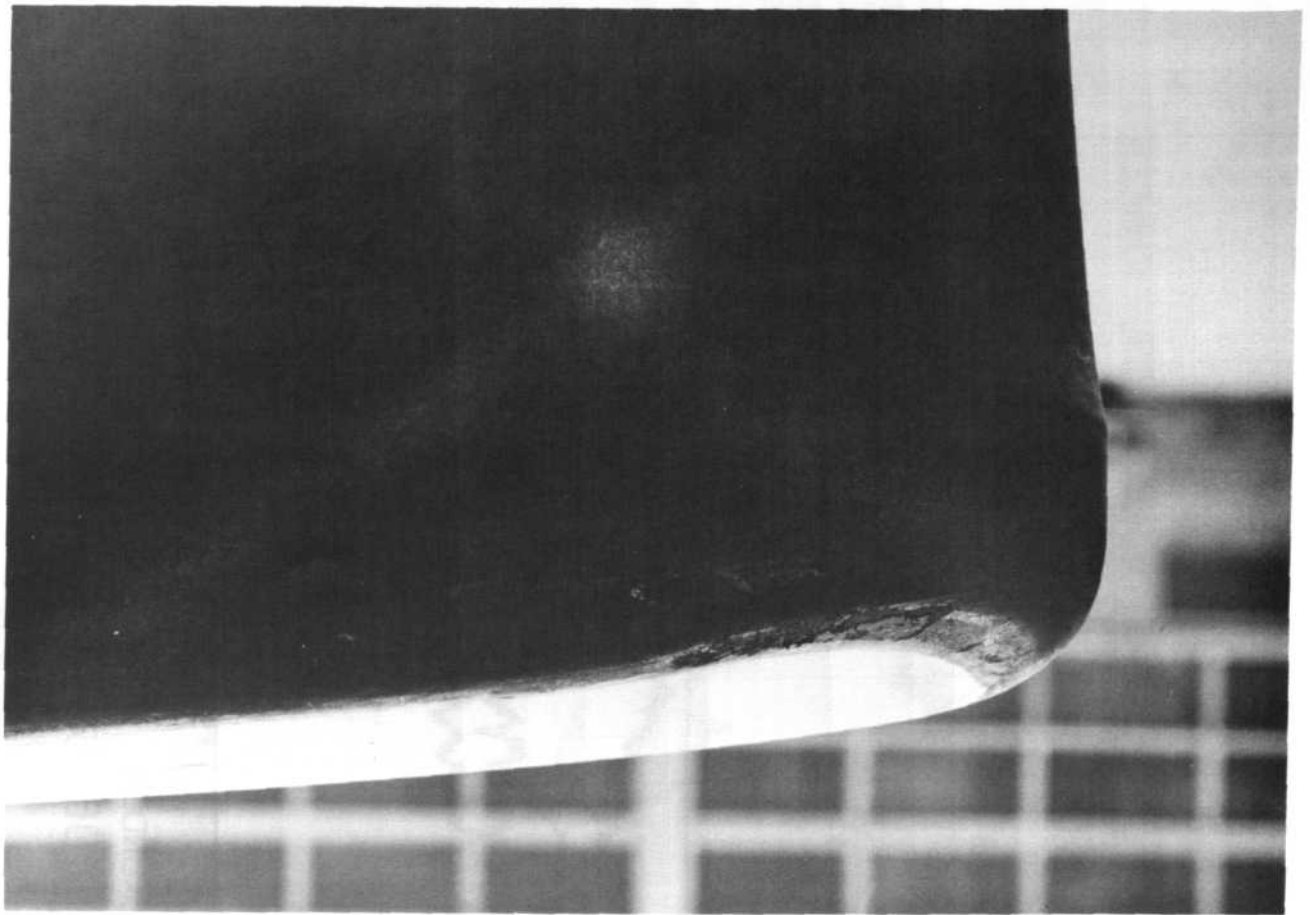


Bild 26

Deformierte Bodenkante in zwei ansichten
Ansichten

Meßwerte
Bild 27

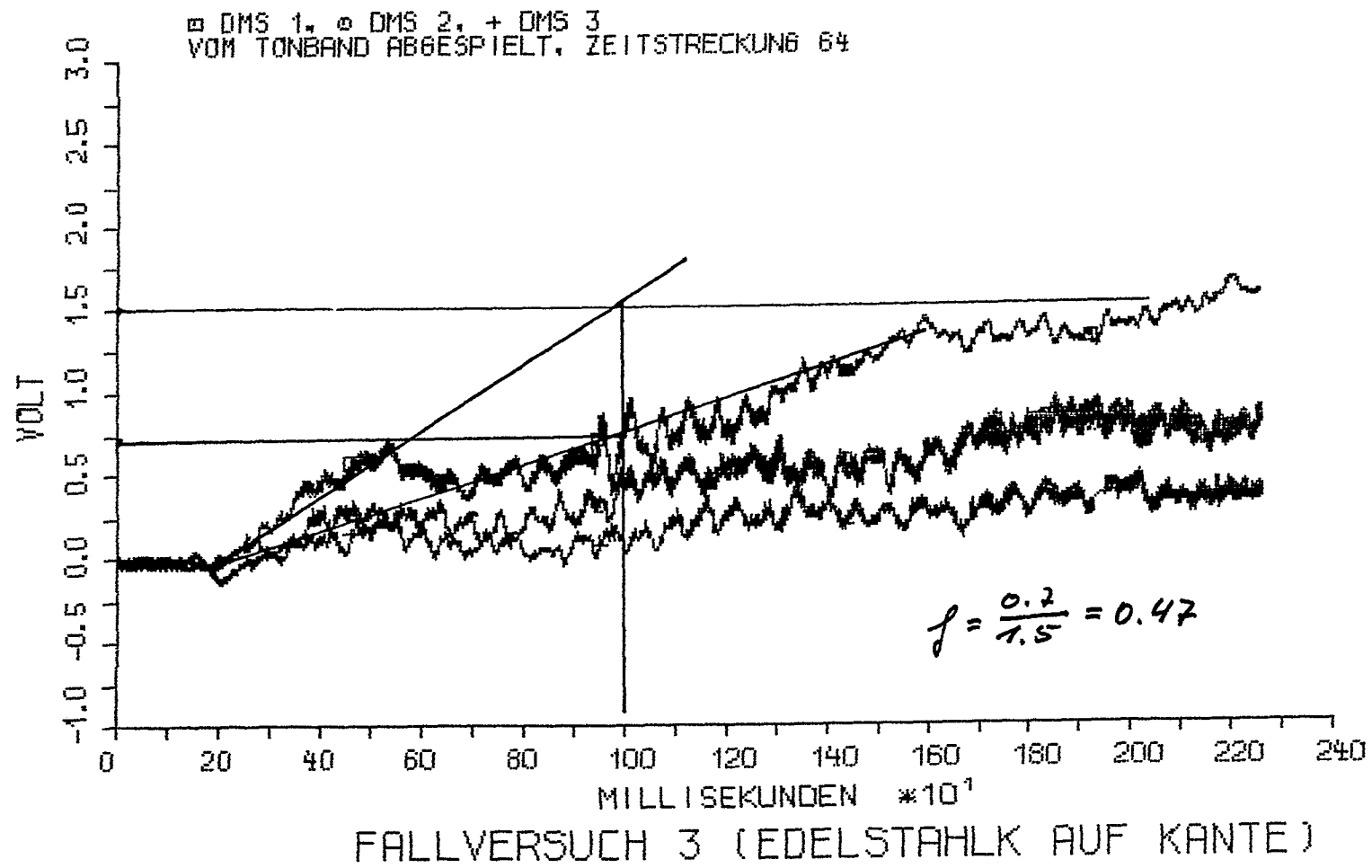
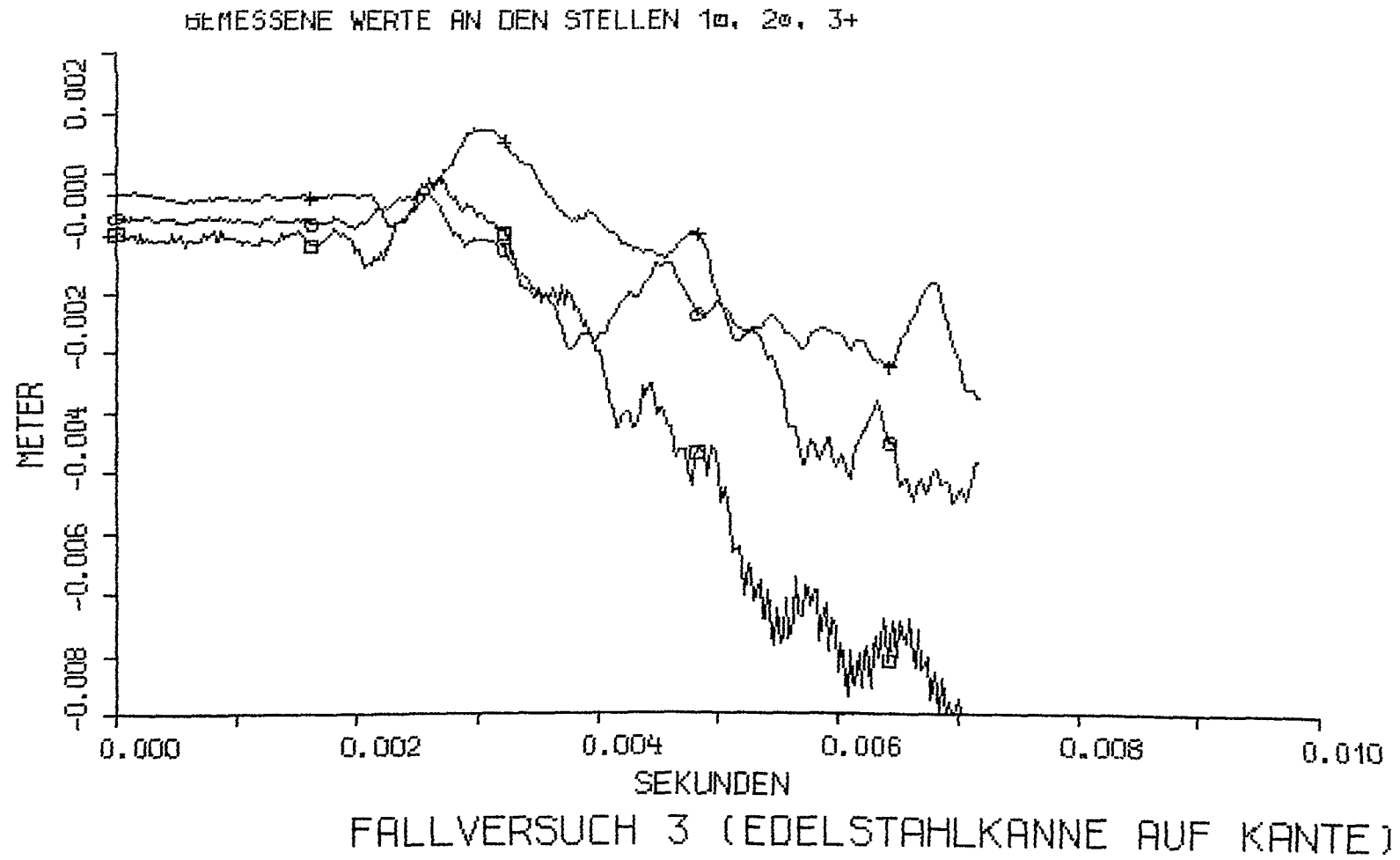


Bild 28
Umgerechnete Ausschnittswerte aus Bild 27



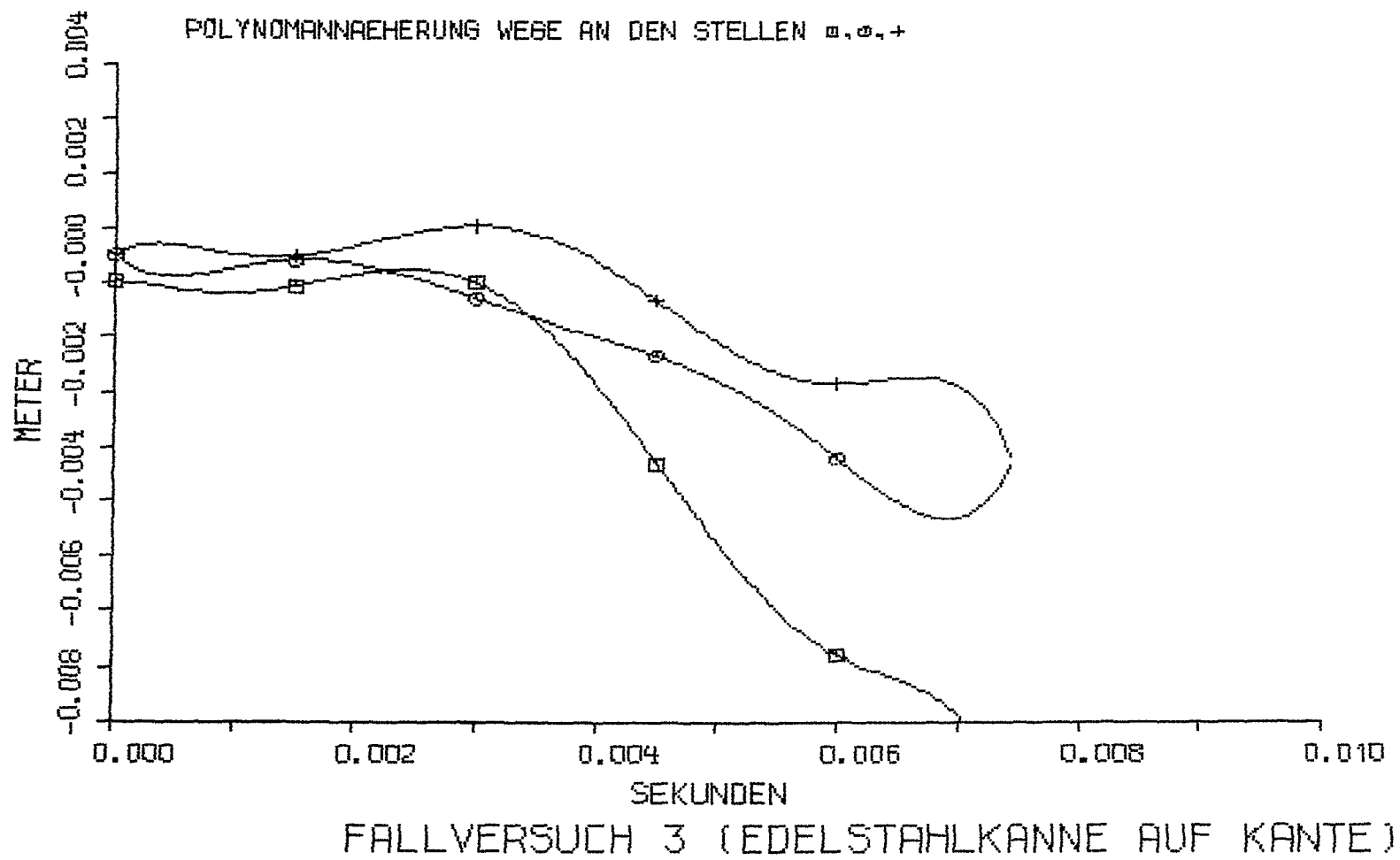


Bild 29
Polynomannäherung der Meßwerte nach
Bild 28

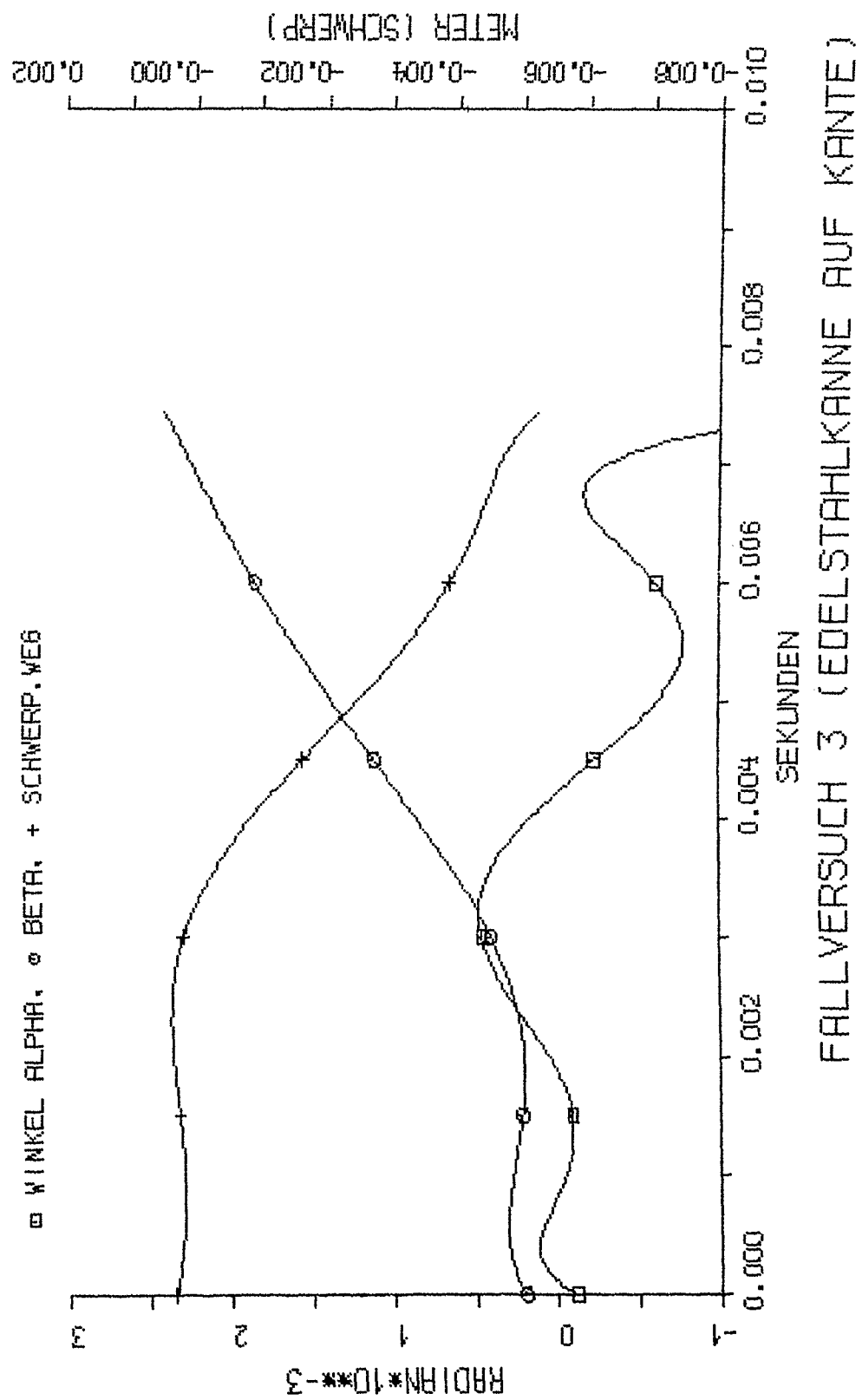


Bild 30

Schwerpunktswerte, errechnet aus der Polynomannäherung

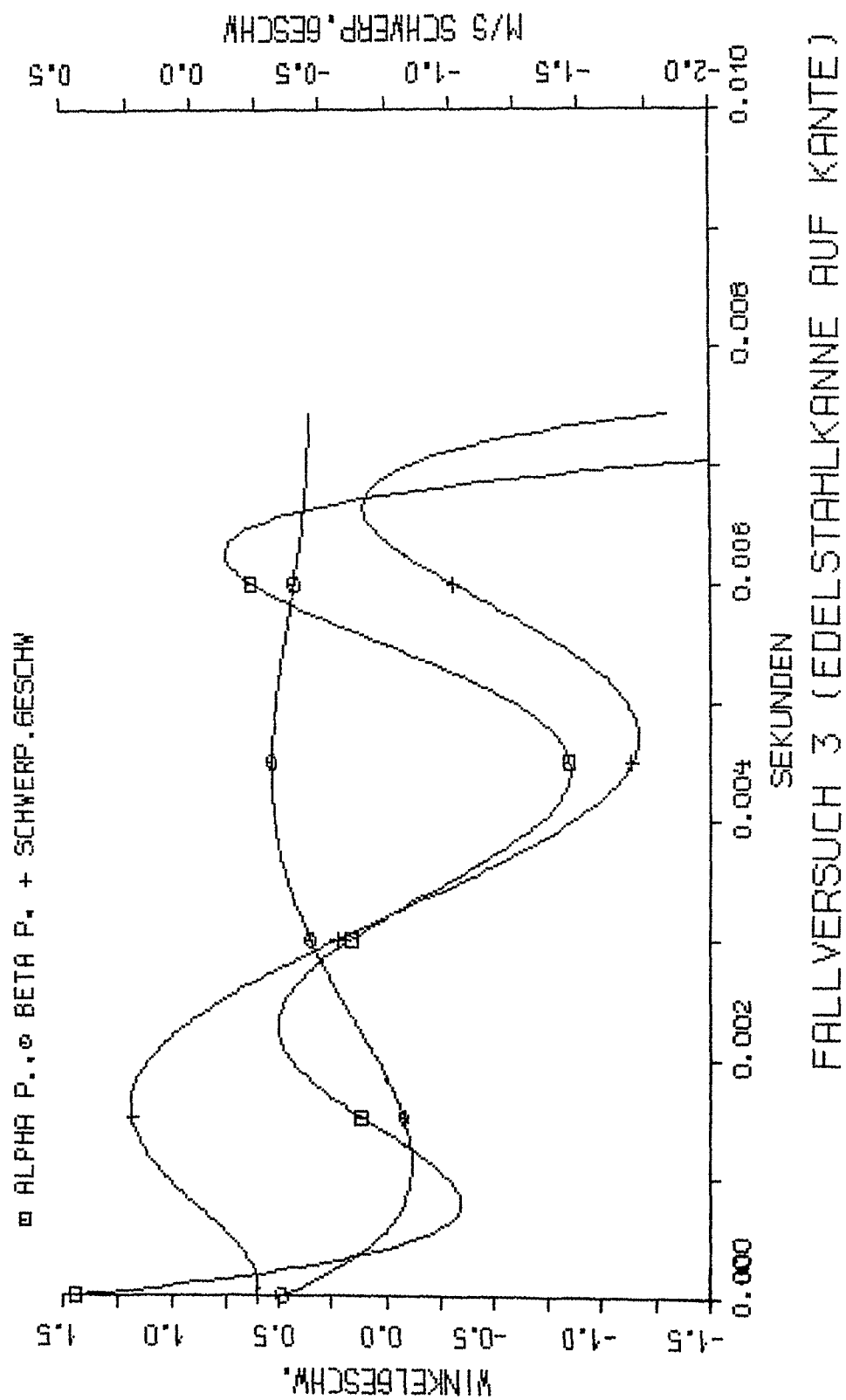


Bild 31

Geschwindigkeitswerte, errechnet aus den Schwerpunktswerten

Bild 32
Beschleunigungswerte, errechnet aus den
Schwerpunktwerten

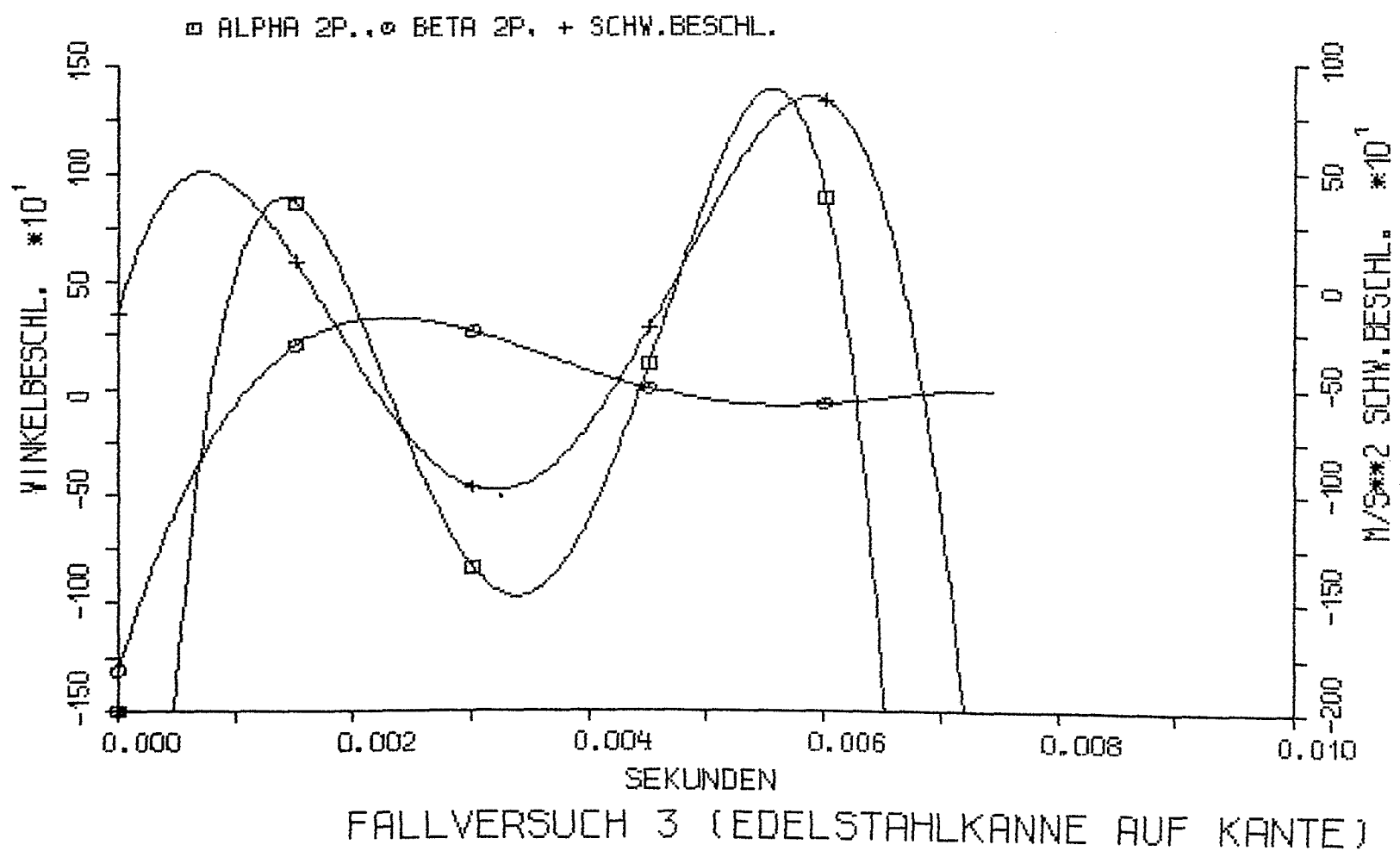




Bild 33

Beschädigte Graphitkugeln und Kugelbruch nach dem Fall einer ASSE - Kanne aus 7 m Höhe auf die Bodenkante



Bild 34

Kugelbruchstücke (<10 g) und Graphitstaub nach dem Fall einer ASSE-Kanne aus 7 m Höhe auf die Bodenkante

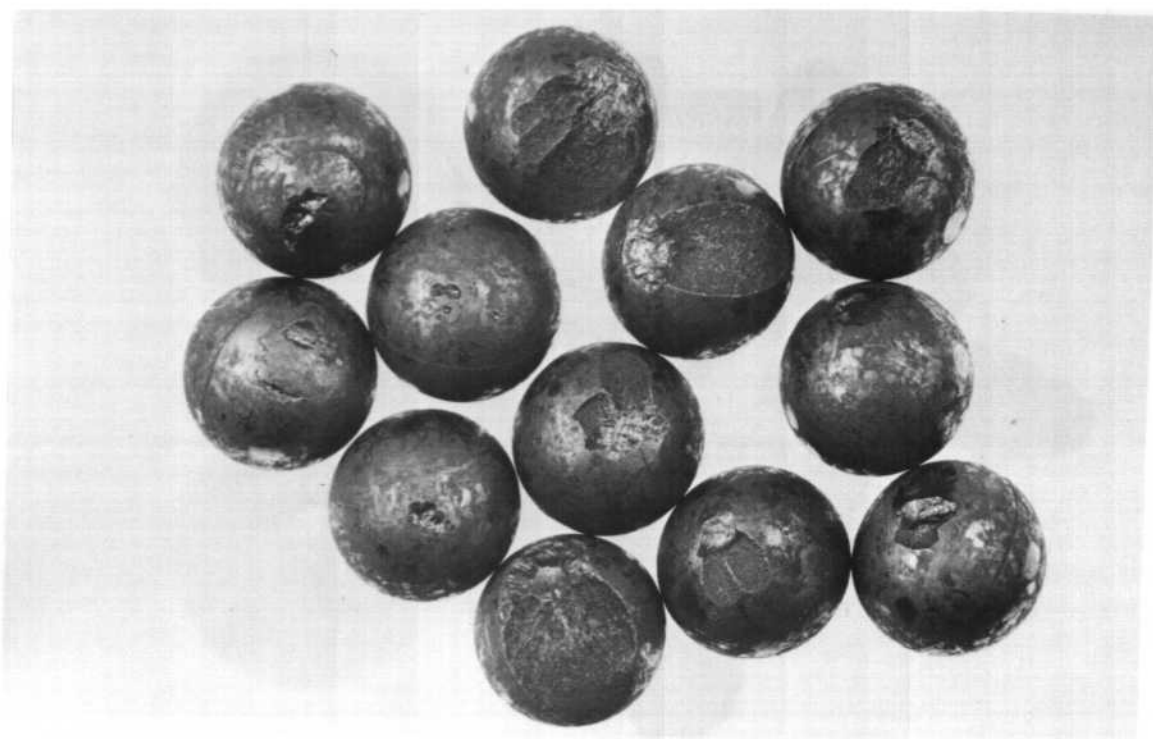


Bild 35

Beschädigte Graphitkugeln nach dem Fall einer ASSE -
Kanne aus 7 m Höhe auf die Mantellinie



Bild 36

Kugelbruch (Stücke > 50 g) nach dem Fall einer ASSE-
Kanne aus 7 m Höhe auf die Mantellinie



Bild 37

Kugelbruchstücke (10 g bis 50 g) nach dem Fall einer ASSE - Kanne aus 7 m Höhe auf die Mantellinie

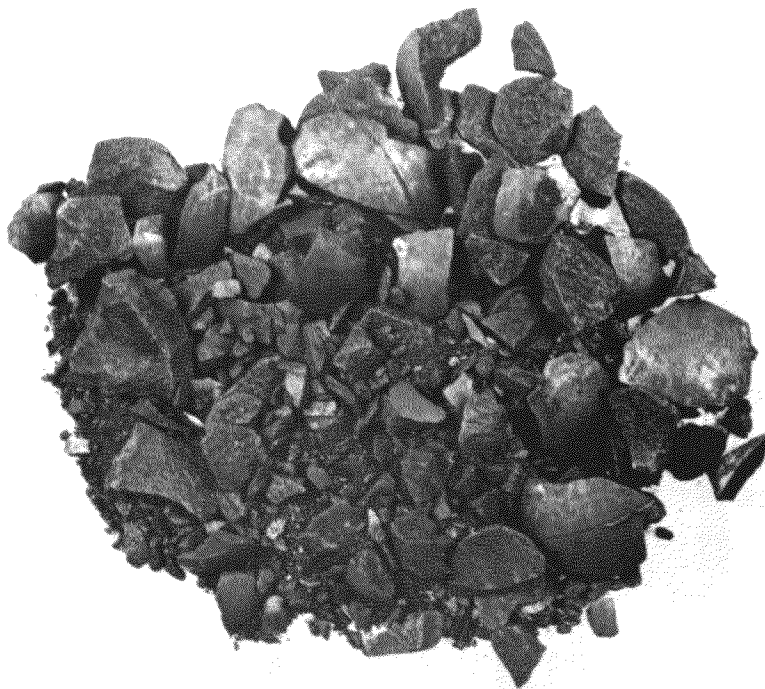


Bild 38

Kugelbruchstücke (< 10 g) nach dem Fall einer ASSE - Kanne aus 7 m Höhe auf die Mantellinie

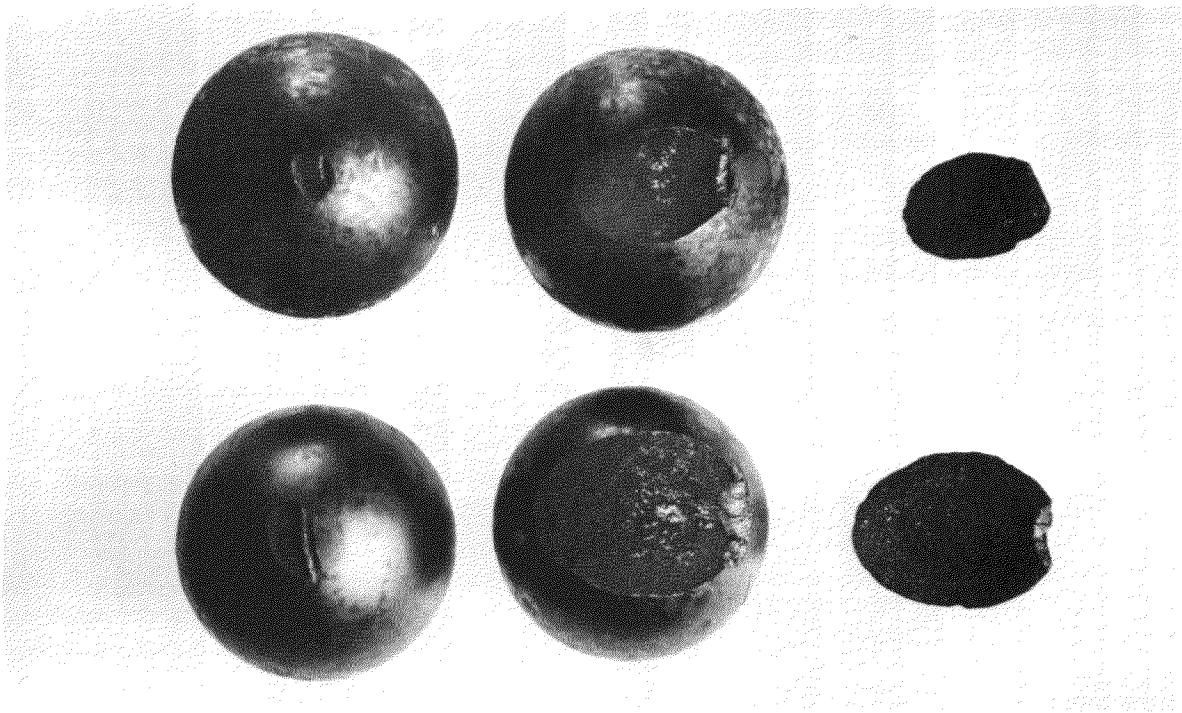


Bild 39

Beschädigte Graphitkugeln nach dem Fall einer AVR -
TL - Kanne aus 7 m Höhe auf die Bodenkante

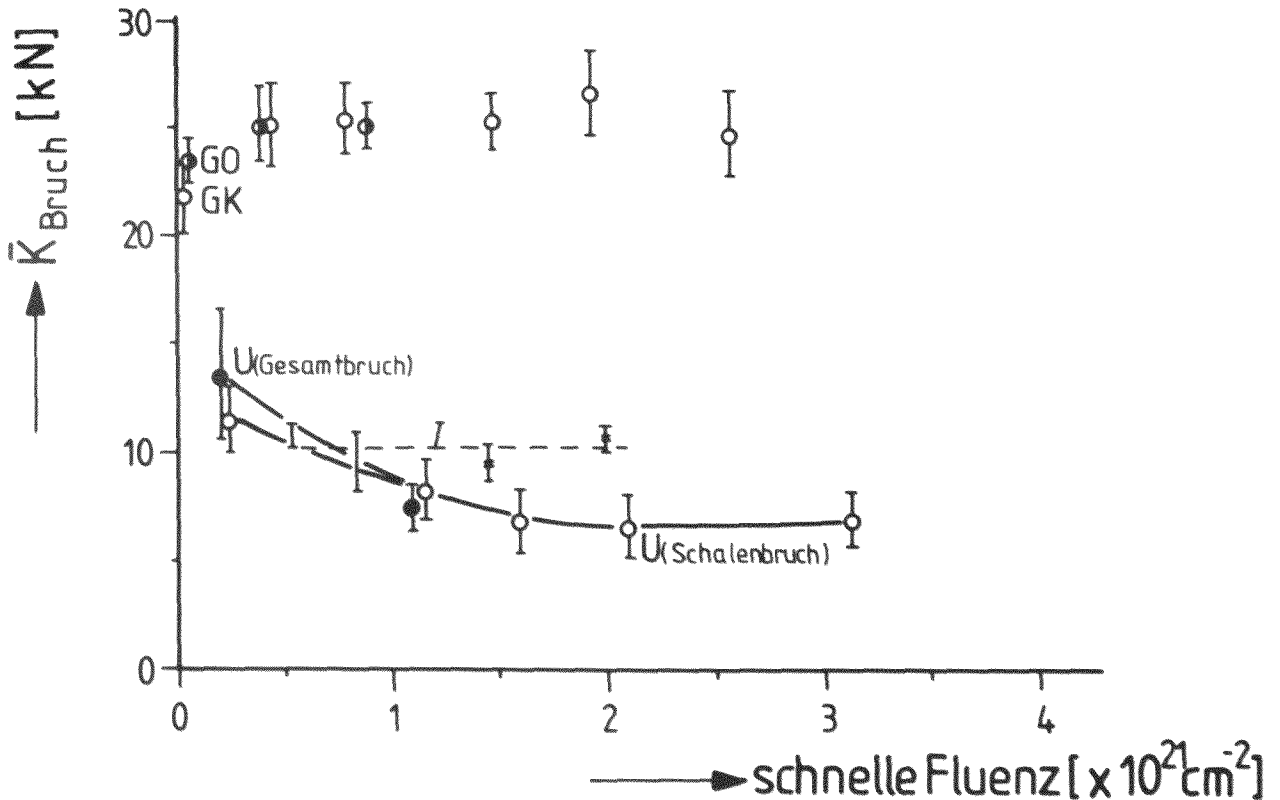


Bild 40

Bruchfestigkeit bestrahlter AVR - Brennelemente vom Typ
GO, GK, T und U in Abhängigkeit der schnellen Fluenz ($\bar{E} > 0,1 \text{ MeV}$)

