

DESY-Bibliothek
11. NOV. 1965 ✓

DESY 65/12
August 1965
Experimente

EICHMESSUNGEN
MIT
FARADAYKÄFIG, KALORIMETER, QUANTAMETER UND
SEKUNDÄREMISSIONSQUANTAMETER
AM
EXTERNEN ELEKTRONENSTRAHL
1 GEV BIS 5 GEV

von

A. Ladage

H. Pingel

DESY-Bibliothek
11. NOV. 1965 ✓

DESY 65/12
August 1965
Experimente

EICHMESSUNGEN
MIT
FARADAYKÄFIG, KALORIMETER, QUANTAMETER UND
SEKUNDÄREMISSIONSQUANTAMETER
AM
EXTERNEN ELEKTRONENSTRAHL
1 GEV BIS 5 GEV

von

A. Ladage

H. Pingel

DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON DESY, HAMBURG

August 1965

EICHMESSUNGEN
MIT
FARADAYKÄFIG, KALORIMETER, QUANTAMETER UND
SEKUNDÄREMISSIONSQUANTAMETER
AM
EXTERNEN ELEKTRONENSTRAHL
1 GEV BIS 5 GEV

A. Ladage

H. Pingel

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

Abstract

1. Einleitung

2. Aufbau der verwendeten Meßgeräte

- 2.1 Faradaykäfig
- 2.2 Sekundäremissionsmonitor
- 2.3 Kalorimeter (KM)
- 2.4 Quantameter (QM, SEQ)
- 2.5 Strommeßgeräte und Integratoren

3. Aufbau der Meßanordnung

4. Messungen

- 4.1 Faradaykäfig und Sekundäremissionsmonitor
- 4.2 Kalorimeter
- 4.3 Vergleich Faradaykäfig - Kalorimeter
- 4.4 Quantameter mit Gasfüllung (QM)
- 4.5 Sekundäremissionsquantameter (SEQ)
- 4.6 Vergleich der beiden Betriebsarten des Quantameters

Abstract

Calibration measurements have been done on the external electron beam at DESY in the energy region 1,5 GeV to 5 GeV with a faraday cup, a calorimeter, several gas-filled quantameters and a secondary emission quantameter, using a thin secondary emission monitor of $2 \cdot 10^{-2}$ radiation length as an intermediate standard.

The response of the monitors was investigated over a wide range of intensities, energies and for various beam positions across the aperture. Plateaus were measured and short and long term stability was checked.

Our data indicate that the faraday cup measures the charge of the electron beam with an error of 0.3 % up to 5 GeV. An intercalibration between faraday cup and calorimeter at 3 GeV showed agreement between the measured charge of the faraday cup and the charge derived from measuring the total energy of the electron beam in the calorimeter within ± 0.7 %.

Four gas-filled quantameters were compared and calibrated against the faraday cup. All quantameters are made of copper; one of them has copper surfaces, the others have gold plated surfaces of 4μ thickness. In all other respects they are identical. The gold plating permits the use of the quantameters as secondary emission quantameters under clean surface conditions after evacuation.

The calibration constant of the quantameter with copper surface has very nearly the theoretical value of $4,9 \cdot 10^{18}$ MeV \cdot Coul $^{-1}$ calculated from the work of Wilson¹⁾. The measured constant is $4,75 \cdot 10^{18}$ MeV \cdot Coul $^{-1}$.

Surprisingly, the other three quantameters with gold plated surfaces show 26 % more current than the quantameter with copper surface. The calibration constant is about $3,6 \cdot 10^{18}$ MeV \cdot Coul⁻¹ within $\pm 2,5$ % for the three different quantameters mentioned. No energy dependence of the calibration constant in the region from 1,5 to 5 GeV was found.

The unexpected dependence of the calibration constant of the gas-filled quantameters on the type of surface suggests that the deviations between measured and calculated calibration constants found at other laboratories¹⁰⁾, might be due to varying surface conditions.

Data for the calibration constant of the secondary emission quantameter are also given. The main advantage over the gas-filled quantameter is the absence of saturation effects at high intensities. Therefore, we are planning to use the secondary emission quantameter with all high intensity γ -ray beams.

1. Einleitung

Von März 1964 an standen bei DESY für Experimente externe γ -Strahlen mit einer Intensität von etwa $5 \cdot 10^8$ effektiven Quanten pro Puls zur Verfügung.

Als Strahlmonitore zur Intensitätsmessung wurden an diesen externen γ -Strahlen gasgefüllte Quantameter¹⁾ eingesetzt, deren Eichkonstante rechnerisch bestimmt wurde.

Es war geplant, einige der Quantameter auf Hochvakuum zu evakuieren und als Sekundäremissionsquantameter bei hohen Intensitäten zu verwenden. Um definierte Oberflächenbedingungen zu schaffen, wurden bei diesen Quantametern die Kupferoberflächen des Plattenpakets, das den Schauer absorbiert, vergoldet (Typ D3).

Vergleichsmessungen zwischen den Quantametern beider Typen zeigten, daß die Eichkonstante des Quantameters mit vergoldetem Plattenpaket 26 % kleiner war als die aus der Theorie in ¹⁾ für beide Typen bei gleicher Geometrie folgende Eichkonstante von $4,9 \cdot 10^{18} \text{ MeV} \cdot \text{Coul}^{-1}$. Dieses abweichende Ergebnis für die Quantameter des Typs 3 wurde durch Paarspektrometernmessungen mit einer Genauigkeit von ± 5 % bestätigt.

Eine quantitative Erklärung des gefundenen Oberflächeneinflusses der in der Wilson'schen¹⁾ Theorie nicht berücksichtigt wird, steht zur Zeit noch aus.

Zur genaueren Sicherstellung dieses Effektes wurde deshalb eine Absolut-Eichung der Quantameter am ersten externen Elektronenstrahl bei DESY durchgeführt, bei der ein Faradaykäfig und ein Kalorimeter als Bezugsnormale dienten. Der dafür erforderliche externe Elektronenstrahl stand mit ei-

ner Maximalintensität von etwa $5 \cdot 10^{10}$ Elektronen pro Puls ab Mai 1965 im Energiebereich von 1,5 GeV bis 5,0 GeV zur Verfügung.

Im Juni und Juli 1965 wurden bei dem durchgeführten Eichexperiment folgende Fragen geklärt:

1. Erprobung und Bestimmung der Absolutgenauigkeit eines Faradaykäfigs (3.1)
2. Erprobung und Eichung eines dünnen Sekundäremissionsmonitors als Zwischennormal für alle Messungen (3.1)
3. Erprobung eines Kalorimeters und Vergleich dieses unabhängigen Normals mit dem Faradaykäfing (3.2)
4. Eichung eines gasgefüllten Quantameters zur Verwendung als Normal an γ -Strahlen (3.4)
5. Erprobung und Eichung eines Sekundäremissionsquantameters zur Verwendung als Normal an γ - oder Elektronenstrahlen bei hoher Intensität (3.5)

Soweit die beschränkte Meßzeit es zuließ, wurden die Fragestellungen 1. - 5. in Abhängigkeit von Energie und Intensität des Elektronenstrahls untersucht.

2. Aufbau der verwendeten Meßgeräte

2.1 Faradaykäftig (F.K.)

2.1.1 Aufbau

Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch den für 7,5 GeV ausgelegten Faradaykäftig. Der Elektronenstrahl tritt in das Vakuumgehäuse durch eine Folie aus Federbronze von 10^{-2} Strahlungslängen Stärke und 15 cm Durchmesser ein. Ein Vakuum von $5 \cdot 10^{-7}$ Torr wird mit einer Ionengetterpumpe erzeugt. Hinter der Eintrittsfolie lenkt ein Permanentmagnet von 7000 Gauß.cm die erzeugten Sekundärelektronen auf die Gehäusewände. Elektronen mit Energien unterhalb 3 MeV treffen den Strahlabsorber nicht. Fehler in der Ladungsmessung durch Sekundärelektronen aus der Folie sollten kleiner 10^{-3} sein, da der Hauptanteil der Sekundärelektronen mit Energien unter 50 eV emittiert wird. Das zeigen z.B. Plateaumessungen am SEM in Abb. 12.

Der Bleiabsorber ist auf Aluminiumoxyd-Isolatoren von $10^{14} \Omega$ Isolationswiderstand aufgestellt. Er hat eine Länge von 200 Strahlungslängen. Davon entfallen 120 Strahlungslängen auf den Strahleintrittskanal, der einen lichten Durchmesser von 15 cm besitzt. Der Durchmesser des Absorbers beträgt 150 Strahlungslängen.

Zur Verringerung der Rückstreuung trifft der Elektronenstrahl vor Eintritt in das Blei auf eine 5 cm starke Schicht aus Kohlenstoff. Sekundärelektronen werden durch einen Permanentmagneten (Daten wie oben) am Verlassen des Absorbers gehindert. Da der Elektronenstrahl den größten Teil seiner Energie auf den ersten 10 Strahlungslängen abgibt, wurde das Blei dort durch Wolfram ersetzt, um ein Schmelzen des Bleis zu verhindern.

Der Bleiabsorber ist in einen Mantel aus Aluminium eingegossen. Die Erzeugung von Sekundärelektronen durch Photo- und Comptoneffekt wird dadurch verringert. Auch das Vakuumgehäuse besteht aus dem gleichen Grunde aus Aluminium.

Zur Messung des Ladungsverlustes kann an das Aluminiumgitter, das den Absorber umgibt, ein Potential bis zu 3 KV gelegt werden. Diese Methode besitzt gegenüber der äquivalenten Methode, den Bleiabsorber selbst auf ein entsprechendes Potential zu legen, den Vorteil, daß die Meßgeräte für den Käfigstrom auf Erdpotential bleiben. Im Betrieb kann daher der Ladungsverlust des Faradaykäfigs immer wieder auf einfache Weise überprüft werden.

2.1.2 Ermittlung der Dimensionen des Absorbers

Zur Bestimmung der Absorberdimensionen wurden Rechnungen von Brown und Tautfest²⁾ mit Monte-Carlo-Rechnungen von H. Nagel³⁾ verglichen, die für Energien zwischen 100 und 1000 MeV ausgeführt wurden. Inzwischen wurden bei DESY diese Rechnungen von U. Völkel⁴⁾ auf 6 GeV erweitert. In den Monte-Carlo-Rechnungen werden Elektronen bis herunter zu 1 MeV und Photonen bis zu 0,25 MeV verfolgt. Die Arbeit von Nagel enthält unter anderem Extrapolationsformeln für die Lage und Höhe des Schauermaximums, Daten über den Intensitätsabfall hinter dem Schauermaximum und Angaben über die Rückstreuung. Für die Forderung, daß z.B. nur noch 10^{-3} der Primärelektronen den Absorber verlassen sollen, stimmen die Ergebnisse für die Absorberlänge nach Brown und Tautfest mit denen nach Nagel gut überein.

Wegen der Elektronenabschneideenergie von 1 MeV in den Daten von Nagel, sollten die Rechnungen von Brown und Tautfest wegen der niederenergetischen Elektronen jedoch größere Dimensionen liefern. Das zeigt auch die Abnahme der Photonen-

intensität. Sie erfolgt nach Nagel schon erheblich langsamer als nach Brown und Tautfest und auch langsamer als es dem minimalen Absorptionskoeffizienten entspricht. Photonen mit Energien unterhalb von 0,25 MeV können daher in noch größerer Anzahl vorliegen und damit auch niederenergetische Elektronen.

Da diese jedoch nur eine sehr geringe Reichweite besitzen, sollten die oben angeführten Rechnungen trotzdem einen guten Anhaltspunkt für die Absorberdimensionen ergeben, wenn man statt der Reduktion der Elektronen die der Photonen zugrunde legt.

Angestrebt wurde für die Ladungsmessung des Elektronenstrahls eine Meßgenauigkeit von etwa $1 \cdot 10^{-3}$ bei 7,5 GeV. Aus dieser Forderung ergeben sich unter Verwendung der Extrapolationsformeln von Nagel die Länge und der Durchmesser des Absorbers.

Die Daten von Nagel enthalten auch Angaben über die Rückstreuung. Extrapoliert man diese auf 7,5 GeV, so findet man, daß den Absorber nach rückwärts etwa achtmal so viele Photonen mit Energien oberhalb 0,25 MeV verlassen wie primäre Elektronen eintreten. Oberhalb 10 MeV sind es noch etwa 5 %. Im Winkelbereich von 170° bis 180° gibt es noch ca. 20 % Photonen mit Energien von 0,25 bis 5 MeV.

Der Eintrittskanal im Absorber wurde daher so lang gewählt, daß die noch nach rückwärts aus der Eintrittsöffnung entweichenden Photonen ca. 15 % ausmachen. Sie treffen erst in der Nähe der Eintrittsfolie und des Permanentmagneten auf Streumaterie. Der Einfluß von Sekundärelektronen, die hier erzeugt werden, auf die Genauigkeit der Ladungsmessung sollte daher vernachlässigt werden können.

2.2 Sekundäremissionsmonitor (SEM)

Der Sekundäremissionsmonitor wird als Zwischennormal für die Kontroll- und Eichmessungen mit dem Faradaykäfig, dem Kalorimeter und den Quantametern verwendet. Da er vor den anderen Meßgeräten im Strahl steht, soll er zur Herabsetzung der Streuung möglichst dünn sein.

Abb. 2 zeigt einen Schnitt durch den Sekundäremissionsmonitor. Ein Strahlein- und -austrittsfenster aus Federbronze von je 10^{-2} Strahlungslängen Stärke und 20 cm Durchmesser schließt das Vakuumgehäuse ab. Eine Ionengetterpumpe erzeugt ein Vakuum von 10^{-7} Torr.

Die Dicke der 17 Aluminiumfolien, von denen abwechselnd die eine an der Versorgungsspannung und die folgende am Kollektor liegt, beträgt je $6 \cdot 10^{-3}$ mm bzw. ca. 10^{-4} Strahlungslängen.

Der Ionenstrom aus der Pumpe wurde durch Sichtblenden und Gitter auf 10^{-13} A reduziert. Daher konnten mit dem SEM Ströme von 10^{-11} A noch sicher gemessen werden. Im allgemeinen lag der Arbeitsbereich bei den Messungen zwischen 10^{-7} und 10^{-10} A.

2.3 Kalorimeter

Zusätzlich zum Faradaykäfig wurde als weiteres Absolutmeßgerät bei den Messungen noch ein Kalorimeter verwendet, das im Schnitt in Abb. 3 dargestellt ist. Ein Bleizylinder von 18 cm \emptyset und 20 cm Länge absorbiert ca. 99,7 % der Energie des Elektronenstrahls bei 6 GeV. Dieses Ergebnis liefern die Monte-Carlo-Rechnungen von U. Völkel⁴⁾.

Zur Wärmeisolation ist der Absorber von einem 10 cm starken Mantel aus Styropor allseitig umgeben. Der Wärmeverlust entspricht bei 30°C einem Temperaturabfall von $0,05^{\circ}\text{C}$ in 10 Minuten. Die Temperatur des Absorbers wird mit einem Platinwiderstandsthermometer gemessen.

Die Eichung des Kalorimeters erfolgt mit dem in das Blei eingegossenen Heizelement. Die elektrische Energie wurde aus einem stromstabilisierten Gleichstromgerät entnommen und mit Digitalvoltmetern und den DESY-Integratoren auf ca. 0,2 % genau gemessen. Die Leistung, bei der geeicht wurde, entsprach der verfügbaren Leistung des Elektronenstrahls von 100 bis 200 Watt. Für eine Temperaturerhöhung um 10°C war eine Heizzeit bzw. Bestrahlungszeit zwischen 10 und 20 Minuten erforderlich.

Der Wärmeverlust durch die Isolation kann bei dieser Methode wegen der gleichen Heiz- bzw. Strahlleistung vernachlässigt werden.

Über die eingebaute Kühlschlange kann das Kalorimeter nach Abschluß einer Messung in etwa 10 min heruntergekühlt werden.

2.4 Aufbau des DESY-Quantameters

Das DESY-Quantameter arbeitet als gasgefülltes Quantameter nach dem von R.R. Wilson¹⁾ angegebenen Prinzip.

Das die Schauerenergie absorbierende Plattenpaket des Quantameters ist bei Wilson aus zwei ineinandergeschachtelten Sätzen gleich dicker Kupferplatten aufgebaut, von denen der eine Satz - jede zweite Platte - auf einem Hilfspoten-

tial zum Betrieb einer Gasentladung im Quantameter liegt, während der andere Satz - jeweils die zwischen den spannungsführenden Platten angebrachten Platten - hochisoliert angebracht ist (Abb. 4). Dieser zweite Satz dient als Kollektor, mit ihm wird der zur Schauerenergie proportionale Gasentladungsstrom gemessen.

Wegen der erforderlichen sehr guten elektrischen Isolation (etwa $10^{12} \Omega$) ist das Kollektorpaket auch thermisch sehr gut isoliert und kann deshalb die in ihm absorbierte halbe Schauerenergie fast nur durch Strahlung an das spannungsführende Plattenpaket abgeben. Bei hoher Strahlintensität wird daher die Aufheizung der Kollektorplatten zu hoch und führt eventuell zu einer unzulässigen Änderung der mechanischen Toleranzen der Gasentladungsspalte.

Deshalb wird - nach einem Vorschlag von W. Kern - beim DESY-Quantameter (Typ D1 und D3) fast die gesamte Schauerenergie in einem auf dem Hilfspotential liegenden und wassergekühlten Plattenpaket aus zwölf 14,90 mm dicken Elektrolyt-Kupferplatten absorbiert, während als Kollektor 0,10 mm starke Kupferfolien dienen, die nur 1/150 der Schauerenergie absorbieren (Abb. 4). Die gewählte Gesamtdicke des benutzten Plattenpakets folgte aus der "linearen" Schauertheorie⁵⁾ und der DESY-Maximalenergie von 7,5 GeV.

Die Breite der benutzten Gasentladungsspalte verhält sich wegen der Simpson-Integration über die Schauerkurve wie 2:1 und beträgt $2 \times 1,50$ mm bzw. $2 \times 0,75$ mm. Die Breite des Korrekturspaltes am Ende des Plattenpaketes, der den theoretisch exponentiellen Abfall der Schauerkurve berücksichtigt, ist $2 \times 3,375$ mm und gleich der äquivalenten Breite des radialen Korrekturspaltes.

Als Gasfüllung für die gasgefüllten Quantameter wird bei DESY die von Wilson vorgeschlagene Mischung aus 95 % Ar und 5 % CO₂ verwendet, die aus Argon mit 7 ppm Verunreinigung und CO₂ mit 20 ppm Verunreinigung hergestellt wird. Wegen der auftretenden Sättigungserscheinungen der Gasentladung ist das gasgefüllte Quantameter nur im Bereich kleiner Strahlintensitäten brauchbar.

Unabhängig von der Intensität ist dagegen im bisher bekannten Bereich das von H. Fischer und C. Schaerf⁶⁾ angegebene Sekundäremissionsquantameter, daß aber mit einem anderen Normal (z.B. Faradaykäfig, gasgefülltes Quantameter, Kalorimeter) geeicht werden muß.

Das DESY-Quantameter (Typ D3) ist eine Kombination des gasgefüllten Quantameters und des Sekundäremissionsquantameters. Es kann im Bereich kleiner Strahlintensitäten als gasgefülltes Quantameter mit der hohen "Stromverstärkung" der Gasentladung verwendet werden. Im Bereich großer Strahlintensitäten dagegen wird es mit einer zugehörigen Ionengetterpumpe auf Hochvakuum ($p < 10^{-6}$ Torr) evakuiert und dann als Sekundäremissionsquantameter betrieben.

Es ist bekannt^{7;8)}, daß die Oberflächensekundäremission einer Metallfläche sehr stark von den Eigenschaften dieser Fläche (z.B. Oxydbelegung etc.) abhängt, und daß eine gute Langzeitstabilität nur durch eine Oberflächenvergütung bzw. durch die Verwendung eines entsprechenden Materials erreicht werden kann (Das Plattenpaket des in Stanford entwickelten Sekundäremissionsquantameters besteht deshalb aus Silber).

Beim DESY-Quantameter sind aus diesem Grund die Oberflächen des Plattenpakets und der Kollektorfolien elektrolytisch vergoldet. Die Schichtdicke beträgt etwa 4 μ .

Bei dem DESY-Quantameter ist der Isolationswiderstand zwischen Kollektor und Schutzringisolator $> 10^{12} \Omega$. Meßströme bis herab zu 10^{-10} A können deshalb noch sicher gemessen werden.

2.5 Strommeßgeräte und Integratoren

Zur Strommessung und Integration im Bereich von einigen 10^{-9} A an aufwärts wurde der bei DESY entwickelte Integrator verwendet.

Der DESY-Integrator besteht im eigentlichen Meßteil im wesentlichen aus zwei kommerziellen, chopperstabilisierten Rechenverstärkern (Philbrick USA 3), die in Reihe geschaltet sind. Von diesen Verstärkern ist der erste über hochohmige Widerstände gegengekoppelt und arbeitet als Impedanzwandler und Strommesser, der zweite Verstärker integriert den Strom auf einem Kondensator auf. Durch die Anwendung eines Vorladungsprinzips, bei dem der genaue Wert des Integrationskondensators unbekannt sein kann, und durch die Verwendung von sehr präzisen, hochohmigen Gegenkopplungswiderständen ($\pm 0,1 \%$) gelang es, in allen Strombereichen ($1 \cdot 10^{-8}$ A bis $1 \cdot 10^{-3}$ A) eine Langzeiteichkonstanz zu erreichen, deren Fehler kleiner als $\pm 0,5 \%$ ist.

Für Ströme unter 10^{-9} A wird an Stelle des ersten Rechenverstärkers ein Schwingkondensator-Elektrometer (IDL) zur Strommessung verwendet. Durch eine Fernbedienung können die Gegenkopplungswiderstände für die verschiedenen Strombereiche umgeschaltet werden. Es können Ströme von 10^{-4} A bis 10^{-12} gemessen werden. In den Strombereichen von 10^{-4} A bis 10^{-8} A wird eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,5 \%$ und von 10^{-9} A bis 10^{-12} A von $\pm 1 \%$ erreicht.

3. Aufbau der Meßanordnung

Abb. 5 zeigt den Aufbau des Experiments.

Der Elektronenstrahl wird mit einem nicht dargestellten Ejektionssystem aus dem Synchrotron ejiziert und trifft auf den ersten Kollimator. Die horizontale Dispersion des Strahlführungssystem hat ein Maximum am Ort des zweiten Kollimators, der die Energieunschärfe des verwendeten Strahls auf $\pm 0,5 \%$ begrenzt. Für die Elektronen mit der Soll-Energie wird die Dispersion durch den zweiten Ablenkmagneten wieder rückgängig gemacht. Die Quadrupole fokussieren den Strahl in beiden Ebenen am Ort des Faradaykäfigs FK bzw. des dagegen ausgetauschten Quantameters Qu.

Die Auslegung des Strahlführungsystems erlaubt Messungen im Energiebereich von 1,5 GeV bis 5,0 GeV.

Zur genauen Energiebestimmung wird der Elektronenstrahl mit dem ersten Ablenkmagneten so eingestellt, daß er den zweiten Kollimator und den vor diesem angebrachten Szintillator Sz1, der in der Sollage des Strahls eine Öffnung hat, optimal durchsetzt. Die Grobeinstellung des Stromes im Ablenkmagneten erfolgt aufgrund der Beobachtung des Szintillators Sz1 mit einer Fernsehkamera Fs über den Doppelspiegel D, die Feineinstellung durch Messung des Stromes, der am isoliert aufgestellten zweiten Kollimator gemessen werden kann. Nach Abschluß dieser Einstellung wird der Strom im ersten Ablenkmagneten bei konstantem Betrag umgepolt, der Strahl kann jetzt über die andere Hälfte des Doppelspiegels D auf einem Fadenkreuz beobachtet werden, das auf dem zweiten Szintillator Sz2 liegt.

Beide Strahlengänge sind symmetrisch aufgebaut. Wenn der Strahl den Ablenkmagneten genau senkrecht trifft, wird des-

halb bei dem gleichen Betrag des Ablenkstromes auch eine gleich große Ablenkung beobachtet.

Die Energiebestimmung des Elektronenstrahls konnte mit dieser Methode auf $\pm 0,5 \%$ bis $1,0 \%$ genau durchgeführt werden.

Zwischen Sekundäremissionsmonitor (SEM) und Faradaykäfing (FK) bzw. Quantameter (Qu) steht ein weiterer Ablenkmagnet zur Reinigung des Elektronenstrahls von γ -Quanten.

Zusätzlich zu dem SEM, der als Zwischennormal für alle Messungen verwendet wird, steht eine dünne, gasgefüllte Ionisationskammer im Strahl, die bei kleinen Intensitäten als zweites, unabhängiges Zwischennormal dient. Abb. 6 zeigt die Anordnung von SEM und Ionisationskammer.

Am Ende des Strahls ist in Abb. 5 der Faradaykäfing in Meßstellung dargestellt. Er steht zusammen mit dem Quantameter auf einem Wagen, mit dem beide Meßgeräte gegeneinander ausgetauscht werden können (Abb. 7). Das als zusätzliches Vergleichsnormal benutzte Kalorimeter kann vor das Quantameter auf den Wagen gestellt werden.

4. Messungen

4.1 Messungen mit dem Faradaykäfig und dem Sekundäremissionsmonitor

Der Sekundäremissionsmonitor (SEM) wird als Zwischennormal für die Kontroll- und Eichmessungen zusammen mit dem Faradaykäfig und dem Quantameter verwendet. Konstanz während der Meßzeit und Linearität im gesamten Intensitätsbereich sind die wichtigsten Anforderungen an diesen Monitor.

4.1.1 Konstanz des SEM

In Abb. 10 und 11 sind die Kurz- bzw. Langzeitstabilität des Ladungsverhältnisses Q_{FK}/Q_{SEM} aufgetragen. Man sieht, daß während der ersten Minuten der Bestrahlungszeit der Sekundäremissionsstrom um ca. 3 % zunimmt, um dann über mehrere Stunden auf $\pm 0,5$ % konstant zu bleiben. Dieses Verhalten läßt sich durch eine Veränderung der Oberflächen unter Bestrahlung erklären⁷⁾, da der Sekundäremissionsstrom hauptsächlich aus Elektronen mit Energien unterhalb 20 eV besteht. Das zeigt die Messung der Spannungsabhängigkeit des SEM (Abb. 12). Vermutlich wird angelagertes Restgas durch die Bestrahlung von der Oberfläche entfernt⁸⁾.

Die Langzeitkonstanz des SEM über 4 Wochen liegt bei ± 1 %. Während dieser Zeit und in den vorangegangenen 3 Monaten wurde das Vakuum mit einer Ionengetterpumpe ohne Belüftung auf $1 \cdot 10^{-7}$ Torr gehalten.

Abgesehen von der Änderung der Empfindlichkeit des SEM in den ersten 20 min nach Bestrahlungsbeginn ist die Konstanz des SEM für die vorgesehenen Messungen gezeigt.

4.1.2 Linearität des SEM

Über die Intensitätsabhängigkeit gibt Abb. 13 Aufschluß. Im Bereich von 10^6 bis 10^{10} Elektronen pro Synchrotronpuls ist das gemessene Ladungsverhältnis Q_{FK}/Q_{SEM} auf ± 1 % konstant. Dieses Ergebnis stimmt mit den Messungen anderer Autoren⁷⁻¹⁰⁾ überein.

4.1.3 Energieabhängigkeit des SEM

Über die Energieabhängigkeit von Sekundäremissionsmonitoren gibt es in der Literatur widersprüchliche Messungen⁷⁻¹¹⁾, die auch mit der theoretischen Energieabhängigkeit nach Vanhuyse und van de Vijver¹²⁾ nicht in Einklang stehen.

Die Beurteilung der Meßergebnisse wird durch den Umstand erschwert, daß in die Messungen eine eventuelle Energieabhängigkeit des Faradaykäfigs eingeht.

Im Bereich von 1 bis 5 GeV ist in Abb. 14 das Verhältnis Q_{FK}/Q_{SEM} aufgetragen. Innerhalb von ± 1 % ist es konstant und unabhängig von der Energie.

Dieses Ergebnis stimmt mit Messungen von Tautfest und Fechter⁹⁾ im Energiebereich von 100 - 250 MeV überein; es steht aber im Widerspruch mit den Messungen von de Pagter und Fotino¹⁰⁾. Im Energiebereich von 1 bis 5 GeV finden sie einen Abfall von Q_{FK}/Q_{SEM} von 4,5 %. Sie weisen auf die Diskrepanz zur Theorie¹²⁾ hin, die einen Abfall von 7,5 % fordert.

In den Meßergebnissen von de Pagter und Fotino für Q_{FK}/Q_{SEM} ist noch die Energieabhängigkeit des Faradaykäfigs von etwa 2 % enthalten. Eliminiert man diese, so reduziert sich die Energieabhängigkeit des SEM auf 2,5 %. Die Abweichung von der Theorie wird damit noch größer.

4.1.4 Ladungsverlust und Energieabhängigkeit des Faradaykäfigs

Den Ladungsverlust des Faradaykäfigs ermittelt man entweder dadurch, daß man den Bleiabsorber auf ein Hilfspotential legt, oder durch Anlegen von Spannungen an ein Gitter, das den Bleiabsorber umgibt. Es wurden beide Methoden angewandt; sie sind gleichwertig.

In Abb. 15 und 16 sind die Ergebnisse für 2,9 GeV bzw. 4,6 GeV wiedergegeben. Der relative Elektronenverlust des Faradaykäfigs beträgt $(1,9 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$ bzw. $(3,2 \pm 1,5) \cdot 10^{-3}$. In Abb. 17 sind alle gemessenen Daten des relativen Ladungsverlustes in Abhängigkeit von der Elektronenenergie aufgetragen. Eine Energieabhängigkeit von einigen 10^{-3} kann nicht ausgeschlossen werden. Als Mittelwert ergibt sich im Energiebereich von 1 bis 5 GeV ein relativer Ladungsverlust von $(2,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-3}$.

Der Vergleich mit dem Ladungsverlust von ungefähr $1,7 \cdot 10^{-2}$ für 5 GeV, der aus den Messungen von de Pagter und Fotino¹⁰⁾ folgt, wirft die Frage nach der Ursache für diesen etwa fünfmal höheren Elektronenverlust auf. Vermutlich wird er durch den wesentlich kürzeren Strahleintrittskanal (nur etwa 50 statt 120 Strahlungslängen) verursacht, da die anderen Abmessungen sich nicht so stark unterscheiden.

Darauf deuten auch die Ergebnisse hin, die von Brown und Tautfest²⁾ mit einem 300 MeV Faradaykäfig erhalten wurden. Der relative Elektronenverlust liegt bei diesem Käfig auch nur bei einigen 10^{-3} und der Strahleintrittskanal hat etwa die doppelte Länge des eigentlichen Absorbers. Mit demselben Faradaykäfig wurde Q_{FK}/Q_{SEM} in der Arbeit von Tautfest und Fechter⁹⁾ gemessen. Im Bereich von 100 bis 250 MeV ist auch hier keine Energieabhängigkeit vorhanden. Q_{FK}/Q_{SEM} ist in diesem Bereich etwa auf $\pm 1/2$ % konstant. Dieses

Ergebnis steht in Übereinstimmung mit der hier vorliegenden Messung von Q_{FK}/Q_{SEM} im Bereich von 1 bis 5 GeV (Abb. 14).

Einen Anhaltspunkt über die Größe des Ladungsverlustes des Faradaykäfigs liefert zusätzlich noch der gemessene Gitterstrom. Bei 4,8 GeV wurde ein positiver Gitterstrom von $1,5 \cdot 10^{-3}$ des Käfigstroms gemessen. Dieser entsteht offenbar durch Elektronenemission des Gitters, hervorgerufen durch Photonen aus dem Absorber. Da das Gitter ebenso aus Aluminium besteht wie die Absorberoberfläche und andererseits, nach den Ausführungen unter 2.1.2, die relative Anzahl der den Absorber verlassenden Photonen nur unterhalb 250 KeV Werte größer 10^{-3} erreichen sollte, werden im Aluminium im Mittel nur Elektronen mit einer Reichweite erzeugt, die klein gegen die Drahtstärke des Gitters von 1 mm ist. Absorber und Gitteroberfläche können daher bezüglich der Elektronenemission größenordnungsmäßig als gleichwertig angesehen werden. Man schließt daher aus dem relativen Gitterstrom von $1,5 \cdot 10^{-3}$ auf einen Ladungsverlust des Absorbers von einigen 10^{-3} . Der oben gemessene Ladungsverlust betrug vergleichsweise $(2,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-3}$. Der Faradaykäfig erfüllt somit die Anforderungen an die geplante Meßgenauigkeit für die Ladung des Elektronenstrahls.

4.1.5 Nutzbare Öffnung des Faradaykäfigs

Die geometrische Öffnung des Faradaykäfigs ist gleich dem lichten Durchmesser des Strahleintrittskanals von 15 cm im Bleiabsorber. In Abb. 18 ist das Ansprechvermögen des Faradaykäfigs als Funktion der horizontalen Verschiebung des Strahleintrittsortes aufgetragen. Die Messung erfolgte mit einem Elektronenstrahl von ungefähr 10 mm \emptyset (Abb. 8).

Innerhalb der Meßfehler von $\pm 1 \%$ ist das Ansprechvermögen des Faradaykäfigs über den Öffnungsradius konstant. Am Rande trifft der Strahl auf die Magnetstäbe hinter der Eintrittsfolie. Der Strom im Käfig sinkt daher etwas. Bei weiterer Vergrößerung des Strahlabstandes von der Mitte des Faradaykäfigs steigt der Meßstrom stark an. Der Strahl trifft auf Flanschteile des Vakuumtanks. Er erzeugt dort Sekundärelektronen, die ungehindert auf den Bleiabsorber gelangen.

Innerhalb des geometrischen Öffnungsbereiches darf der Elektronenstrahl daher ohne Beeinflussung der Meßgenauigkeit jede Form und Lage besitzen.

Es kann aber zu erheblichen Meßfehlern kommen, wenn Teile des Strahls auf den Öffnungsrand treffen. Dieser Fall trat einmal während der Messungen durch ungünstige Strahlführung auf (siehe Abb. 9). Das Ladungsverhältnis Q_{FK}/Q_{SEM} war um 5 % größer als normal.

Da die Ursache dafür zunächst unbekannt war, wurde der Ladungsverlust des Faradaykäfigs gemessen (siehe 4.1.4). Bis zu einer Spannung von 3,5 KV am Gitter war noch kein Plateau vorhanden. Der meßbare Ladungsverlust stieg linear mit der Gitterspannung an und betrug bei 3,5 KV und 1,5 GeV Strahlenenergie ca. 1,5 %. Für genaue Messungen ist es daher erforderlich, das Strahlprofil zu kontrollieren.

4.1.6 Fehlströme des Faradaykäfigs

Der Hauptanteil wird durch Ionen aus der verwendeten 200 l Ionengetterpumpe geliefert. Durch Sichtblenden und Gitter wurde er auf $2 \cdot 10^{-12}$ A bei einem Vakuum von $6 \cdot 10^{-7}$ Torr herabgesetzt. Da die Messungen im allgemeinen bei Käfig-

strömen von 10^{-9} bis 10^{-7} A durchgeführt werden, kann der Leckstrom vernachlässigt werden.

Der Isolationsstrom ist wesentlich kleiner und beträgt nur ca. 10^{-16} A. Er resultiert aus dem gemessenen Isolationswiderstand von $10^{14} \Omega$ und der am Absorber liegenden Spannung von 10^{-2} Volt für Vollausschlag des Strommeßgerätes.

Ein weiterer Leckstrom wird durch die Streustrahlung aus dem Faradaykäfig im Meßkabel erzeugt. Bei 3 GeV betrug der Kabelstrom $3 \cdot 10^{-5}$ des Strahlstromes.

4.2 Messungen mit dem Kalorimeter

4.2.1 Eichung des Kalorimeters

Das Kalorimeter wurde zur Eichung elektrisch geheizt und die Temperatur in Abständen von 30 Sekunden registriert. Abb. 19 zeigt eine typische Temperaturzeitkurve. Während der Heizzeit steigt die Temperatur linear an.

Der geometrische Abstand Heizelement - Thermometer bedingt in der Anzeige eine Verzögerung von ungefähr 2 Minuten. Der vollständige Wärmeausgleich nach Abschalten der Heizung wird erst nach ca. 20 Minuten erreicht. Der Temperaturabfall pro Zeiteinheit infolge der Isolationsverluste ist dann annähernd konstant. Die Differenz zwischen der Temperatur nach Wärmeausgleich und der Anfangstemperatur vor Beginn der Beheizung wird zur Bestimmung der spezifischen Energieaufnahme $\Delta E/\Delta T$ verwendet. Aus 15 Eichmessungen wurde sie bestimmt zu:

$$\Delta E/\Delta T = (11,67 \pm 0,10) \cdot 10^3 \frac{\text{Wattsec}}{^\circ\text{Celsius}}$$

4.2.2 Energiebestimmung des Elektronenstrahls mit dem Kalorimeter

Das Kalorimeter wurde direkt vor das Quantameter in den Elektronenstrahl gesetzt. Der Strahlaufbau war sonst unverändert. Die Leistung des Elektronenstrahls wurde etwa gleich der Leistung bei der Kalorimeterreichung zwischen 100 und 200 Watt gewählt. Die Bestrahlungszeit für eine Temperaturerhöhung von ca. 10°C lag bei 10 bis 20 Minuten. Aus Zeitmangel konnten nur 3 Messungen bei einer Strahlenergie von 2,9 GeV durchgeführt werden.

Abb. 20 zeigt eine der gemessenen Temperaturzeitkurven. Im Unterschied zur Eichkurve ist hier ein Maximum in der Temperaturkurve vorhanden. Dieses kommt dadurch zustande, daß der Strahl den größten Teil seiner Energie schon auf den ersten 10 Strahlungslängen abgibt und die Wärmequelle daher näher am Thermometer ist als bei der Eichmessung. Die Bestimmung der Temperaturdifferenz erfolgt in gleicher Weise wie bei der Eichmessung. Die Ergebnisse der Messungen werden im nächsten Abschnitt mit den Faradaykäfig-Messungen verglichen.

4.3 Vergleich Kalorimeter - Faradaykäfig

Während der Energiemessung mit dem Kalorimeter wurde gleichzeitig mit dem Sekundäremissionsmonitor die gesamte Ladung des Elektronenstrahls gemessen. Der SEM wurde vor und nach der Kalorimetermessung mit dem Faradaykäfig geeicht. Der Strahlimpuls und damit die Strahlenergie wurde, wie unter 3. beschrieben, gemessen.

In der Tabelle 1 sind Eichkonstanten und Strahldaten bei 2,9 GeV zusammengestellt.

In der Tabelle 2 wird die mit dem Kalorimeter gemessene Gesamtenergie und die daraus unter Verwendung der Strahlenergie ermittelte Gesamtzahl der Elektronen mit der Gesamtzahl der vom Faradaykäfig direkt gemessenen Elektronen verglichen.

Innerhalb der Meßfehler von $\pm 0,7\%$ stimmen beide Meßmethoden ausgezeichnet überein. Die Zuverlässigkeit der Ladungsmessung mit dem Faradaykäfig ist damit sichergestellt.

Tabelle I

Eichkonstanten von Kalorimeter, Sekundäremissionsmonitor und Faradaykäfig bei 2,9 GeV

Strahlimpuls bzw. Strahlenergie	$(2,90 \pm 0,015) \text{ GeV}$
Eichkonstante des Kalorimeters	$(11,67 \pm 0,10) \cdot 10^3 \frac{\text{Wattsec}}{^\circ\text{Celsius}}$ $= (7,282 \pm 0,054) \cdot 10^{13} \frac{\text{GeV}}{^\circ\text{Celsius}}$
Eichkonstante des Kalorimeters bei 2,9 GeV	$(2,511 \pm 0,025) \cdot 10^{13} \frac{\text{Elektronen}}{^\circ\text{Celsius}}$
Ladungsverhältnis Q_{FK}/Q_{SEM} bei 2,9 GeV	$1,954 \pm 0,008$
Gemessener relativer Ladungsverlust des Faradaykäfigs bei 2,9 GeV	$(1,9 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$
Korrigiertes Ladungsverhältnis Q_{FK}/Q_{SEM} bei 2,9 GeV	$1,956 \pm 0,009$
Eichkonstante des SEM bei 2,9 GeV	$(1,221 \pm 0,006) \cdot 10^{19} \frac{\text{Elektronen}}{\text{Asec}}$

Tabelle 2

Vergleich Kalorimeter - Faradaykäfig

Ver- such Nr.	Ladung des SEM 10^5 Asec	Erwärmung Kalorime- ter [°Celsius]	Mit Kalorimeter gemessene Elek- tronenzahl 10^{-14}	Mit Faraday- käfig gemessene Elektronenzahl 10^{-14}	Unterschied Faradaykäfig -Kalorimeter %
1	2,185	10,63	$2,669 \pm 0,027$	$2,668 \pm 0,012$	- 0,04
2	2,161	10,46	$2,627 \pm 0,026$	$2,639 \pm 0,012$	+ 0,46
3	1,984	9,53	$2,393 \pm 0,024$	$2,423 \pm 0,011$	+ 1,25
				Mittel :	$+ 0,56 \pm 0,70$

4.4 Messungen mit dem gasgefüllten Quantameter

4.4.1 Relativmessungen

4.4.1.1 Abhängigkeit der Meßwerte von der Lage des Strahls

Das Quantameter wurde mit einem Wagen quer zur Richtung des benutzten γ -Strahls bei sonst ungeänderter Strahlgeometrie verschoben (Strahl 24).

Daraus folgt die Abhängigkeit des Meßwertes von der Strahl-
lage auf dem Quantameter (Abb. 21): Der Meßwert ändert sich

erst dann merkbar, wenn der gut kollimierte γ -Strahl auf den inneren Rand der radialen Korrekturspalte trifft.

Der nutzbare Arbeitsbereich des Quantameters hat also einen Durchmesser von mindestens 18 cm.

4.4.1.2 Strom-Spannungskennlinien (Plateaumessungen)

Vor der Verwendung eines gasgefüllten Quantameters sollte man durch eine Plateaumessung prüfen, ob die zur Messung verwendete Gasentladung bei der gewählten Strahlintensität und Spilllänge bereits Rekombination wegen einer zu hohen momentanen Ionisierungsdichte zeigt.

Abb. 22 zeigt drei gemessene Plateaus, bei denen die Intensität des zur Messung verwendeten externen Elektronenstrahls von 3 GeV jeweils um einen Faktor zehn herabgesetzt wurde.

Die für Intensitäten von etwa $1 \cdot 10^6$ und $1 \cdot 10^7$ Elektronen pro Puls gemessenen Plateaus zeigen beide die gleiche Neigung von 1,5 - 2 % im geraden Teil des Plateaus. Für das Plateau bei $1 \cdot 10^6$ Elektronen pro Puls streuen die Einzelmeßwerte sehr viel mehr wegen einer falsch gewählten Zeitkonstanten am Integrator. Das für $1 \cdot 10^8$ Elektronen pro Puls gemessene Plateau steigt dagegen um mehr als 5 % an und liegt auch absolut tiefer - hier wird das Meßergebnis also schon deutlich durch Rekombination verfälscht.

Maßgebend für die Rekombination ist eigentlich nicht die Elektronenzahl pro Puls, sondern der Quotient aus dieser Zahl und der Spilllänge, der die Anzahl der gebildeten Ionenpaare pro Zeiteinheit angibt. Das gilt für Zeiten, die groß gegen die Laufzeit der Elektronen bzw. Ionen im Gasentladungsraum sind - für Zeiten $> 1 \mu\text{sec}$ ist diese Forderung erfüllt.

Aus den Ergebnissen der Abb. 22 folgt, daß das mit 95 % Argon und 5 % CO₂ gefüllte DESY-Quantameter verwendet werden kann, wenn maximal etwa $5 \cdot 10^5$ Elektronen oder effektive γ -Quanten pro Mikrosekunde auf das Quantameter treffen (dem entsprechen z.B. bei 200 μ sec Spilllänge etwa $1 \cdot 10^8$ Elektronen oder effektive Quanten). Abb. 23 zeigt den zulässigen Arbeitsbereich.

Die Bestimmung der Spilllänge war leider nur grob möglich - es handelt sich bei den angegebenen Zahlenwerten deshalb nur um Anhaltswerte.

Eine zusätzliche Unsicherheit liegt darin, daß es kein quantitatives Kriterium dafür gibt, ob ein Plateau brauchbar ist. Die Neigung der gemessenen Plateaus bleibt nämlich auch für Messungen mit weiter verkleinerter Intensität erhalten. Abb. 24 zeigt ein Beispiel für einen schwachen γ -Strahl.

Die Erklärung für diesen Effekt kann z.B. Gasmultiplikation an Kanten und Spitzen sein, die beim Bau nie völlig zu vermeiden sind.

Die Beurteilung eines gemessenen Plateaus ist also etwas willkürlich. Es wird angenommen, daß ein Plateau brauchbar ist, wenn sich Neigung und Absolutwert mit abnehmender Intensität nicht mehr ändern. Deshalb wurde die Bestimmung der Absolutwerte der Quantameterkonstanten bei kleiner Intensität von $1 \cdot 10^7$ Elektronen pro Puls durchgeführt.

Abb. 25 zeigt die zur jeweiligen Absolutmessung gehörenden Plateaus, deren Ordinaten aufeinander normiert wurden.

4.4.1.3 Vergleich der Quantameter untereinander

Ende Mai 1965 wurden von den fünf bei DESY vorhandenen Quantametern drei miteinander am γ -Strahl 22 verglichen (1 Stück vom Typ D1, Nr. 1 und 4 Stück vom Typ D3, Nr. 2-5).

Bezugsquantameter war in allen Fällen das gasgefüllte Quantameter Nr. 5, Zwischennormal eine dünne Ionisationskammer mit Luft als Arbeitsgas. Die Quantameter wurde bei ungeänderter Strahlgeometrie im Strahl gegeneinander ausgetauscht. Die Ergebnisse des Vergleichs zeigt die Tabelle 3:

Tabelle 3

Vergleich der gasgefüllten Quantameter untereinander
Eichnormal: Quantameter Nr. 5 mit 95 % Ar + 5 % CO₂

Quantameter Nr. n =	Energie [GeV]	Gemessenes Ladungsverh. Q_n/Q_5	Druck-Temper. Verhältnis p/T Torr. \cdot OK ⁻¹	Auf p/T = 2,700 norm. Ladungsverh. Q_n^x/Q_5^x	Fehler	Energieunabhängiger Mittelwert	Oberfläche
1	2,72	0,739	2,722	0,741	$\pm 0,004$	0,742	Kupfer Vergol- det ↓
	1,47	0,741	2,722	0,743	$\pm 0,004$		
2	2,75	1,002	2,714	1,007	$\pm 0,004$	1,007	
3	2,86	0,982	2,734	0,981	$\pm 0,002$	0,978	
	1,63	0,975	2,734	0,974	$\pm 0,012$		
4							
5 Eichnormal	./.	./.	2,732	1,000 (Definition)	./.	1,000	

In der dritten Spalte sind die direkt gemessenen Ladungsverhältnisse Q_n/Q_5 angegeben, die in der fünften Spalte auf die "Normalgasfüllung" $2,700 \text{ Torr} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ normiert wurden (entspricht z.B. bei 293°K einem Gasdruck von 790 Torr). Die Normierung erhält man aus:

$$Q_n^x \text{ (normiert)} = Q_n \text{ (gemessen)} \cdot \frac{P}{T} \cdot \frac{1}{2,700}$$

Die Ergebnisse der Spalte fünf sind die eigentlich zu bestimmenden nur von der Geometrie und den Eigenschaften des Meßpakets abhängigen Apparateverhältnisse. Sie sind unabhängig von der Gasfüllung. Das Quantameter Nr. 1 - das einzige vom Typ D1 mit nicht vergoldeten Oberflächen des Meßpaketes aus Kupfer - liefert einen Meßstrom, der energieunabhängig 25,8 % kleiner ist als der Strom, der mit den vergoldeten Quantametern Nr. 2, 3 und 5 des Typs D3 gemessen wird.

Die drei geprüften Quantameter des Typs D3 weichen gegen das Bezugsquantameter Nr. 5 um maximal 2,6 % ab - sie sind also praktisch energieunabhängig und untereinander gleich im Rahmen der über alles erreichbaren Bauleranzen (Spalte 7).

In der Theorie des gasgefüllten Quantameters in ¹⁾ sind Oberflächeneigenschaften nicht berücksichtigt worden, lediglich Volumeneffekte werden zur Berechnung der Quantameterkonstanten herangezogen.

Im Gegensatz dazu scheint hier ein ganz eindeutiger Oberflächeneffekt vorzuliegen, dessen theoretische Aufklärung noch aussteht. Es soll versucht werden, z.B. experimentell durch Modellversuche mit Ionisationskammern, bei denen die Oberflächen vergoldet bzw. versilbert werden, eine Erklärung für den gefundenen Effekt zu finden.

Ein Hinweis darauf, daß Oberflächeneffekte eventuell auch schon beim Quantameter mit Kupferoberflächen auftreten,

findet sich vielleicht darin, daß z.B. Eichmessungen mit Quantametern bei CEA¹⁰⁾ eine Abweichung bis zu - 11,3 % zwischen den gemessenen und den nach 1) berechneten Quantameterkonstanten ergeben.

4.4.2 Messung des Absolutwertes der Eichkonstanten des gasgefüllten Quantameters

Der Absolutwert der Quantameterkonstanten wurde bei 1,53; 2,90 und 4,85 GeV durch Vertauschung des Quantameters Nr. 5 mit dem als Eichnormal dienenden Faradaykäfig bestimmt. Zwischennormal war dabei der Sekundäremissionsmonitor.

Da der Faradaykäfig nur die Anzahl der Elektronen mißt, muß zur Berechnung der Quantameterkonstanten noch zusätzlich die Energie E des primären Elektronenstrahls bekannt sein. Sie wurde wie unter 3. beschrieben gemessen.

Wenn die Q_i die gemessenen Ladungen sind, erhält man die Quantameterkonstante K_e aus:

$$K_e = \frac{E}{e} \cdot \frac{Q_{FK}}{Q_{SEM}} \cdot \frac{Q_{SEM}}{Q_{QM}} \quad [\text{MeV} \cdot \text{Coul}^{-1}]$$

mit

E : Energie des externen Elektronenstrahls in MeV

e : Elementarladung in Coul.

Q_i : Gemessene Ladung in Coul.

Die Ergebnisse zeigt die Tabelle 4 und Abb. 26:

Tabelle 4

Meßwerte des gasgefüllten Eichquantameters Nr. 5:

Energie GeV	Gemess. Konst. K_e MeV·Coul ⁻¹	Fehler %	Mittel K_e MeV·Coul ⁻¹	p/T Torr·°K ⁻¹	Norm. Konst. K_e^x MeV·Coul ⁻¹
1,53	$3,48 \cdot 10^{18}$	2,2			
2,90	3,45	1,2	$(3,49 \pm 0,05) \cdot 10^{18}$	2,728	$(3,53 \pm 0,05) \cdot 10^{18}$
4,85	3,54	1,5			

Die Ergebnisse sind energieunabhängig im Rahmen der Fehlergrenzen.

Man erhält, wenn man - ebenso wie bei den Vergleichsmessungen der Quantameter untereinander - auf $p/T = 2,700$ Torr · °K⁻¹ normiert, für das Quantameter Nr. 5 an Stelle der gemessenen Konstanten K_e die normierte Konstante $K_e^x = (3,53 \pm 0,05) \cdot 10^{18}$ MeV · Coul⁻¹.

Die am Elektronenstrahl gemessenen Eichkonstanten können auch für Messungen am γ -Strahl benutzt werden. Der Korrekturspalt am Ende des Plattenpakets berücksichtigt den jeweils noch austretenden Energieanteil. Er arbeitet exakt, wenn der Abfall der Schauerkurve exponentiell erfolgt.

Umfangreiche Monte-Carlo-Rechnungen, die zur Zeit bei DESY durchgeführt werden⁴⁾, haben ergeben, daß der Abfall der Schauerkurve am Ende des Plattenpakets nicht streng exponentiell erfolgt. Der Korrekturspalt arbeitet daher mit einem kleinen Fehler.

In Abb. 27 ist die Schauerkurve für einfallende Elektronen und für monochromatische γ -Quanten von 6 GeV dargestellt. Aus den schraffierten Flächen zwischen den Schauerkurven und dem zugehörigen exponentiellen Abfall ergibt sich ein Fehler von etwa 1 % mit dem der Korrekturspalt den Energieverlust sowohl für primäre Elektronen als auch für monochromatische γ -Quanten von 6 GeV korrigiert.

Da das Bremsstrahlungsspektrum des Synchrotrons γ -Quanten aller Energien bis zur Maximalenergie enthält, stellt der gefundene Fehler von etwa 1 % für monoenergetische γ -Quanten von 6 GeV eine obere Grenze dar.

Die am Elektronenstrahl gemessenen Eichkonstanten K_e können also auch für Messungen an γ -Strahlen ohne Korrekturen bei der vorliegenden Meßgenauigkeit von $\pm 1,2$ % verwendet werden.

In der Tabelle 5 sind die zur Zeit gültigen Quantameterkonstanten K_e^x , K_e , bzw. K_γ angegeben, die man erhält, wenn man die für das Eichquantameter Nr. 5 gemessenen Werte mit dem normierten Quantameterverhältnis Q_n/Q_5 (4.4.1.1) multipliziert.

Tabelle 5

Quanta- meter Nr. n =	Strahl	Norm. Verhält. Q_n/Q_5	Normiert. Eichkonstante K_e^x $\text{MeV} \cdot \text{Coul}^{-1}$	Werte Stand 1.8.65	
				p/T $\text{Torr} \cdot \text{K}^{-1}$	Eichkonst. K_e, K_γ $\text{MeV} \cdot \text{Coul}^{-1}$
1	16 e-p	0,742	$(4,75 \pm 0,09) \cdot 10^{18}$	2,722	$(4,71 \pm 0,09) \cdot 10^{18}$
2	24	1,007	$(3,51 \pm 0,06)$	2,714	$(3,49 \pm 0,06)$
3	22	0,978	$(3,61 \pm 0,08)$	2,734	$(3,57 \pm 0,08)$
4					
5	Eich- normal	1,000	$(3,53 \pm 0,05)$	2,728	$(3,49 \pm 0,05)$

4.4.3 Meßfehler

Bei den Relativmessungen - 4.4.1 - sind lediglich die statistischen Fehler zu berücksichtigen, da stets im gleichen Integratorbereich mit dem SEM als Zwischennormal gearbeitet wurde. Im allgemeinen werden bei den Ergebnissen des Teils 4.4.1 lediglich die obere und untere Grenze des Meßwertes angegeben, da meist nur zwei Einzelmessungen durchgeführt wurden.

Für die Bestimmung der Absolutwerte der Eichkonstanten standen jeweils etwa fünf Einzelmeßwerte zur Verfügung; Abb. 28 zeigt deren Streuung. Eine systematische Zeitabhängigkeit ist nicht zu erkennen.

Den Einfluß der einzelnen Fehleranteile auf den Gesamtfehler zeigt Tabelle 6:

Tabelle 6

Fehler der gemessenen Eichkonstanten des gasgefüllten Quantameters

				Fehler	
Energie GeV	Gem. Konst. MeV·Coul ⁻¹	Stat. Meßfeh. %	Energie- eich. %	Anschl. FK - SEM %	Stat. Mittel %
1,53	3,48·10 ¹⁸	±0,55	± 2,0	± 0,8	± 2,2
2,90	3,45	±0,69	± 0,5	± 0,8	± 1,2
4,85	3,54	±0,70	± 1,0	± 0,8	± 1,5

4.5 Messungen mit dem Sekundäremissionsquantameter

4.5.1 Relativmessungen

4.5.1.1 Abhängigkeit der Meßwerte von der Lage des Strahls

Wegen eines Defektes am Verschiebewagen konnte die Verschiebung des Quantameters im Strahl nur dadurch simuliert werden, daß der Elektronenstrahl mit dem letzten Ablenkmagneten (Abb. 5, 0807 M) über das ortsfeste Quantameter verschoben wurde.

Das unbefriedigende Ergebnis dieser Messungen zeigt Abb. 29: Die relative Empfindlichkeitskurve ändert sich im zentralen Bereich um etwa 5 %.

Abb. 9 zeigt eine Polaroid-Aufnahme des zur Messung verwendeten Elektronenstrahls bei 4,24 GeV: Der Strahl hat neben dem erwünschten, stark überbelichteten Strahlkern auf jeder Seite noch einen zusätzlichen Anteil, der nicht mehr durch einen Kollimator ausgeblendet wird. Bei einer seitlichen Strahlverschiebung relativ zum Quantameter treffen diese Anteile des Strahls in verschiedener Weise auf die Wände des Strahlführungsrohres zwischen Magnet und Quantameter. Die unterschiedliche Streuung dieser Strahlanteile kann wegen der streifenden Inzidenz in den Korrekturspalten des SEQ die gemessenen Werte ohne weiteres um 5 % ändern.

Diese Deutung muß durch eine Messung mit einem gut kollimierten γ - bzw. Elektronenstrahl, bei der das Quantameter quer zum Strahl verschoben wird, überprüft werden. Sie gewinnt dadurch an Wahrscheinlichkeit, daß für andere Sekundäremissionsquantameter keine entsprechende Abweichung gefunden wurde⁶⁾.

4.5.1.2 Strom - Spannungs - Kennlinien

Die Strom - Spannungs - Kennlinien des Sekundäremissionsquantameters, die dem Plateau des gasgefüllten Quantameters entsprechen, zeigt Abb. 30 für einen Elektronenstrahl von 1,78, 2,90 und 4,24 GeV.

Die Meßwerte ändern sich für $|U| < 30$ V sehr stark mit der angelegten Spannung, haben bei $|U| = 30$ V ein Maximum und fallen für $|U| = 500$ V um 5 %. Die für $E = 1.78$ GeV gemessene Kurve ist für $|U| > 30$ vermutlich durch einen unbekanntem Fehler verfälscht - das zeigt schon die viel größere Streuung der Einzelmeßwerte. Aus den Messungen folgt, daß fast alle gemessenen Sekundärelektronen im niederenergetischen Bereich mit $E < 30$ eV emittiert wer-

den - das gleiche Ergebnis wird auch für dünne Sekundäremissionsmonitore (SEM) gefunden - siehe Abb. 12 und ⁷⁾.

Der Meßstrom ändert sich für das Sekundäremissionsquantameter im Bereich des Strommaximums bei $|U| \approx 30$ V fast gar nicht mit der Spannung im Gegensatz zum gasgefüllten Quantameter, bei dem es einen solchen Bereich nicht gibt. Das Sekundäremissionsquantameter ist also in diesem Bereich ein parameterunabhängiges Normal.

In Abb. 31 sind die Meßwerte für 2,90 GeV noch einmal aufgetragen und zusätzlich dazu die Meßwerte, die mit einem 2,82 GeV γ -Strahl erhalten wurden (Die Ordinaten wurden aufeinander normiert). Die gemessenen Kurven stimmen für $|U| < 200$ V vollkommen überein und weichen auch für $|U| \geq 200$ V nur um maximal 2,5 % voneinander ab.

4.5.2 Bestimmung des Absolutwertes der Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters

Der Absolutwert der Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters wurde mit dem externen Elektronenstrahl bei 1,78; 2,90 und 4,24 GeV durch Vergleich mit dem Faradaykäfing bestimmt (siehe Gleichung S. 26). Der Sekundäremissionsmonitor diente dabei als Zwischennormal.

Bei diesen Messungen lag der Schwerpunkt des Strahls auf der Achse des Plattenpakets im Quantameter ("Nullage" in Abb. 29). Auf die Unsicherheit der Meßergebnisse in Abhängigkeit von der Strahlage wurde bereits in 4.5.1.1 ausführlich hingewiesen; sie wird hier durch einen zusätzlichen Fehler von $\pm 2,5$ % berücksichtigt.

Aus Zeitgründen konnten die Messungen mit verschobenem Quantameter nicht mehr mit einem besser kollimierten Strahl wiederholt werden.

Die Tabelle 7 und Abb. 32 zeigen die Ergebnisse:

Tabelle 7

Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters Nr. 5

Energie GeV	Gem. Konst. K_{es} $\text{MeV} \cdot \text{Coul}^{-1}$	Fehler %
1,78	$1,360 \cdot 10^{21}$	$\pm 3,7$
2,90	1,339	$\pm 3,5$
4,24	1,317	$\pm 3,5$

Die gemessene Eichkonstante ist im untersuchten Energiebereich innerhalb der Meßfehler von $\pm 3,5$ % energieunabhängig.

Da der Korrekturspalt im Gegensatz zum Q.M. beim SEQ nur mit dem Gewicht eines einfachen Spaltes zum Meßstrom beiträgt, würde man mit steigender Primärenergie des Strahls ein Anwachsen der Eichkonstante im untersuchten Energiebereich erwarten, da das Quantameter als SEQ zu kurz ist und der Meßstrom daher zu klein sein sollte. Innerhalb der Meßfehler ist diese Energieabhängigkeit nicht auszuschließen.

Die am Elektronenstrahl gemessene Eichkonstante kann auch an Bremsstrahlen verwendet werden. In 4.4.2 und Abb. 25 wurde auf die unterschiedliche Energieabsorption des Quantameters ohne Korrekturspalt bei Elektronen- bzw. monochromatischer γ -Strahlung hingewiesen. Für 6 GeV ist der Energieverlust für primäre monochromatische γ -Strahlung um 34 % größer als für primäre Elektronen. Für Bremsstrahlung, die Quanten aller Energien bis zur Maximalenergie enthält, sollte sich dieser Betrag erniedrigen. Wegen

zur Zeit noch fehlender Monte-Carlo-Rechnungen kann die Integration über das Bremsstrahlungsspektrum noch nicht durchgeführt werden. Innerhalb der Meßfehler von $\pm 3,5\%$ kann jedoch die am Elektronenstrahl gemessene Eichkonstante auch an γ -Strahlen verwendet werden. Der auftretende Fehler ist sicher kleiner als 1% .

Die zusätzliche Eichung des SEQ mit einem Kalorimeter am γ -Strahl wäre wünschenswert. Sie ist aber zur Zeit nicht möglich, da die Intensität der γ -Strahlen bei DESY nur ein Hundertstel der Intensität des externen Elektronenstrahls beträgt und deshalb für genaue Messungen mit dem hier verwendeten Kalorimeter nicht ausreicht.

Wie in 4.5.1.2 und in Abb. 31 gezeigt wurde, stimmen die Strom - Spannungs - Kennlinien für einen Elektronenstrahl von 2,90 GeV und einen γ -Strahl von 2,82 GeV in ihrem relativen Verlauf praktisch überein. Das liefert einen Hinweis darauf, daß der Meßwert weitgehend unabhängig davon ist, ob der Schauer durch einen primären Elektronenstrahl oder γ -Strahl erzeugt wird.

Abb. 33 zeigt die Intensitätsabhängigkeit der Eichkonstante. Über 4 Dekaden ist die Eichkonstante unabhängig von der Intensität des Elektronenstrahls.

In der Linearität des Sekundäremissionsquantameters liegt vor allem der entscheidende Vorteil gegenüber dem gasgefüllten Quantameter.

4.5.3 Meßfehler

Die Schwankungen der Einzelmeßwerte sind für die Relativmessungen (4.5.1) und auch für die Absolutmessungen (4.5.2) wesentlich kleiner als die Schwankungen bei den entsprechenden Messungen mit dem gasgefüllten Quantameter: die mittleren

Schwankungsfehler liegen für das SEQ bei einigen Promille während sie beim Q.M. bei ca. 2 % liegen.

Hier zeigt sich offenbar noch einmal indirekt die Intensitätsunabhängigkeit des SEQ: die viel stärkeren Schwankungen der Messungen mit dem gasgefüllten Quantameter, die mit dem gleichen Zwischennormal ausgeführt wurden, lassen sich dadurch erklären, daß eben doch, trotz der verwendeten kleinen Intensitäten, bei zu hohen momentanen Strahlströmen Sättigungseffekte und Rekombination auftreten, die die stärkere Schwankung der Meßwerte verursachen.

Die Fehler der Absolutmessungen zeigt die Tabelle 8:

Tabelle 8

Fehler bei der Bestimmung der Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters

Energie GeV	Gem. Konst. K_{es} MeV·Coul ⁻¹	Meßfehler					
		Stat. Meßfehler	Energieeich.	Anschl. FK/SEM	Stat. Mittel	Unsicherheit der Strahlage Fehler	Fehler insgesamt
		%	%	%	%	%	%
1,78	$1,360 \cdot 10^{21}$	± 0,12	± 1,0	± 0,8	± 1,24	± 2,5	± 3,7
2,90	1,339	± 0,09	± 0,5	± 0,8	± 0,95	± 2,5	± 3,5
4,24	1,317	± 0,14	± 0,5	± 0,8	± 1,04	± 2,5	± 3,5

Eine Zeitabhängigkeit der Meßwerte ist in Abb. 34 nicht zu erkennen. Der statistische Fehler ist klein gegen den Fehler der Energieeichung und den des Verhältnisses Q_{FK}/Q_{SEM} . Alle Anteile sind aber zusammen nur halb so groß wie der Fehler von ± 2,5 %, mit dem die Unsicherheit der Strahlage berücksichtigt wird.

Durch eine Wiederholung der Messungen mit scharf kollimiertem Strahl kann der Fehler wahrscheinlich auf weniger als $\pm 1,3$ % herabgesetzt werden.

4.6 Vergleich der beiden Betriebsarten des Quantameters

Das gasgefüllte DESY-Quantameter ist bis zu einer Intensität von etwa $5 \cdot 10^5$ Elektronen oder äquivalenten Quanten pro μsec brauchbar (4.4.1.2). Bei einer Spilllänge von z.B. 200 μsec sind das etwa $1 \cdot 10^8$ Teilchen pro Maschinenpuls.

Da die effektive Spilllänge wegen der Schwankungen nur ungenau festgelegt ist, kann man diese Angabe nur als Anhalt für die richtige Größenordnung betrachten.

An den bei DESY verwendeten γ -Strahlen wird zur Zeit diese Grenzintensität etwa erreicht. Daher ist es gerade noch möglich, mit dem gasgefüllten Quantameter mit der Standardmischung von 95 % Ar und 5 % CO_2 zu arbeiten.

Bei CEA erweitert man den Arbeitsbereich der gasgefüllten Quantameter dadurch um einen Faktor sechs, daß man an Stelle der Standard-Gasmischung ein Gemisch aus 90 % He und 10 % N_2 verwendet.

Wesentlich sicherer und einfacher ist es aber, daß Quantameter nur noch als Sekundäremissionsquantameter zu betreiben. Das SEQ ist im gesamten bei DESY zugänglichen Intensitätsbereich unabhängig von der Intensität (4.5.2). Es werden also alle Meßfehler vermieden, die durch Änderungen der Spilllänge hervorgerufen werden.

Außerdem hängt die Eichkonstante nur noch von der Geometrie und den Oberflächen im Gerät, aber nicht mehr von der Zu-

sammensetzung und der Reinheit der jeweiligen Gasfüllung und deren Fülldruck ab. Auch Fehler in den Maßen bei der Anfertigung der Einzelteile und dem Aufbau des Plattenpakets gehen nicht in das Meßergebnis ein.

Die Vakuumkontrolle für das SEQ ist jederzeit am Netzgerät der Ionengetterpumpe außerhalb des Quantameterhauses möglich, Fehler im Betriebszustand (Lecks) werden sofort erkannt.

Alle diese Gründe sprechen dafür, in Zukunft an allen γ -Strahlen mit voller Intensität nur noch Sekundäremissionsquantameter einzusetzen.

An γ -Strahlen mit verringerter Intensität ist dagegen der Einsatz des gasgefüllten Quantameters eventuell günstiger, weil es den $3,9 \cdot 10^2$ -fachen Meßstrom wie das SEQ liefert. Damit kann auch bei kleiner Intensität des γ -Strahls noch die hohe Genauigkeit des DESY-Integrators von $\pm 0,5 \%$ ausgenutzt werden - das SEQ würde hier für diesen Integrator einen zu kleinen Strom liefern.

Zwei Einschränkungen gelten zur Zeit noch für den Einsatz des Sekundäremissionsquantameters, sie müssen durch zusätzliche Messungen beseitigt werden:

1. Untersuchungen über die Langzeitkonstanz des Sekundäremissionsquantameters fehlen zur Zeit noch.
2. Wegen des schlecht kollimierten Strahls lieferten die Messungen mit verschobenem Strahl auf dem SEQ (4.5.1.1) keine eindeutige Aussage. Diese Unsicherheit kann aber sicherlich beseitigt werden, wenn die Messungen mit einem besser kollimierten Strahl wiederholt werden.

Der Maschinenbetriebsgruppe (S1 und S2) bei DESY danken wir für die Hilfe bei der Durchführung der Messungen. Der sehr stabile Betrieb des äußeren Elektronenstrahls und des Synchrotrons ermöglichte überhaupt erst einen großen Teil der Messungen.

Der ejizierte Elektronenstrahl wurde für die Messungen von F 22 zur Verfügung gestellt, Herr W. Schmidt legte die Strahlführung fest.

Die Methode der Energiemessung, die eine der notwendigen Voraussetzungen für das Eichexperiment lieferte, wurde von S 2 ausgearbeitet.

Herr F. Peters half uns in dankenswerter und selbstloser Weise beim Aufbau der Meßanordnung und bei der Durchführung der Messungen.

Darüber hinaus haben alle Mitarbeiter von A2 die Messungen durch ihre Hilfe beim Bau der verwendeten Geräte vorbereitet - wir danken ihnen und auch allen anderen Gruppen von DESY, die uns unterstützt haben.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- 1) R.R. Wilson: Nuclear Instr. 1, 101 - 106 (1957)
Eine mehr ins Detail gehende Darstellung findet sich bei A.P. Komar et al.: Sov. Phys.-Techn. Phys. 5, 11, 1299 - 1309 (1961)
- 2) K.L. Brown und G.W. Tautfest: Rev. Sci. Instr. 27, 696 (1956)
- 3) H. Nagel: Phys. Inst. der Universität Bonn, Elektron-Photon-Kaskaden in Blei, Monte-Carlo-Rechnung für Primärelektronenenergien zwischen 100 und 1000 MeV
- 4) U. Völkel: Elektron-Photon-Kaskaden in Blei für Primärteilchen der Energie 6 GeV, DESY-Bericht 65/6 (1965) und private Mitteilung für Kupfer
- 5) z.B. B. Rossi: High Energy Particles, S. 264 (1956)
- 6) H. Fischer und C. Schaerf: Stanford HEPL 309 (1963)
- 7) D.B. Isabelle und P.H. Roy: Nucl. Instr. and Meth. 20, 17 - 20 (1963)
- 8) S.A. Blankenburg, J.K. Cobb und J.J. Muray: Stanford SLAC - PUB - 78 (1955)
- 9) G.W. Tautfest und H.R. Fechter: Rev. Sci. Instr. 26, 229 (1955)
- 10) J. de Pagter und M. Fotino: Cambridge, CEAL - 1022 und R. Fessel und J.R. Rees: Cambridge, CEAL - TM - 141
- 11) F.A. Bumiller und E.B. Dally: Proc. Internat. Conference of Instrumentation in High Energy Physics, Berkeley, Calif. S. 305 (1960)
- 12) V.J. Vanhuyse und R.E. van de Vijver, Nucl. Instr. Meth. 15, 63 (1962)

V e r z e i c h n i s d e r T a b e l l e n

Tabelle: Seite:

1	20	Eichkonstanten von Kalorimeter, Sekundär- emissionsmonitor und Faradaykäfig bei 2,9 GeV
2	21	Vergleich der Messungen Kalorimeter - Faradaykäfig
3	24	Vergleich der gasgefüllten Quantameter
4	27	Meßwerte des gasgefüllten Eichquantameters
5	29	Eichkonstanten der gasgefüllten Quanta- meter
6	30	Fehler der gemessenen Eichkonstanten des gasgefüllten Quantameters
7	32	Eichkonstanten des Sekundäremissionsquan- tameters
8	35	Fehler bei der Bestimmung der Eichkonstan- ten des Sekundäremissionsquantameters

V e r z e i c h n i s d e r A b b i l d u n g e n

- Abb. 1 Schnitt durch den Faradaykäfig (schematisch)
- 2 Schnitt durch den Sekundäremissionsmonitor (schematisch)
- 3 Schnitt durch das Kalorimeter (schematisch)
- 4 Meßpaket des Quantameters (schematisch)
- 5 Aufbau des zur Messung verwendeten Elektronenstrahls
- 6 Anordnung von Sekundäremissionsmonitor und Ionisationskammern
- 7 Anordnung von Quantameter und Faradaykäfig
- 8 Querschnitt des Elektronenstrahls bei 3,0 GeV
- 9 Querschnitt des Elektronenstrahls bei 4,2 GeV
- 10 Kurzzeitstabilität des Sekundäremissionsmonitors
- 11 Langzeitstabilität des Sekundäremissionsmonitors
- 12 Spannungsabhängigkeit des Sekundäremissionsmonitors
- 14 Energieabhängigkeit des Sekundäremissionsmonitors
- 15 Ladungsverlust des Faradaykäfigs bei 2,9 GeV
- 16 Ladungsverlust des Faradaykäfigs bei 4,6 GeV
- 17 Energieabhängigkeit des Faradaykäfigs
- 18 Nutzbare Öffnung des Faradaykäfigs
- 19 Temperatur-Zeit-Kurve des Kalorimeters bei der Eichung
- 20 Temperatur-Zeit-Kurve des Kalorimeters während einer Messung mit dem Elektronenstrahl bei 2,9 GeV
- 21 Verschiebung des gasgefüllten Quantameters im Strahl
- 22 Plateau des gasgefüllten Quantameters bei 3,0 GeV als Funktion der Intensität

- Abb. 23 Zusammenhang zwischen Spilllänge und Zahl der zulässigen Teilchen pro Puls für das gasgefüllte Quantameter
- 24 Plateau des gasgefüllten Quantameters bei 2,8 GeV, primärer γ -Strahl mit kleiner Intensität
- 25 Plateau des gasgefüllten Quantameters während der Bestimmung der Quantameterkonstanten
- 26 Gemessene Eichkonstante des gasgefüllten Quantameters als Funktion der Energie
- 27 Energieverteilung des Schauers im DESY-Quantameter bei 6 GeV
- 28 Zeitabhängigkeit der Einzelmeßwerte bei der Eichung des gasgefüllten Quantameters
- 29 Meßwerte in Abhängigkeit von der Strahlverschiebung auf dem Sekundäremissionsquantameter
- 30 Strom-Spannungs-Kennlinien des Sekundäremissionsquantameters für verschiedene Energien
- 31 Strom-Spannungs-Kennlinien des Sekundäremissionsquantameters für Elektronen- und γ -Schauer
- 32 Energieabhängigkeit der Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters
- 33 Intensitätsabhängigkeit der Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters
- 34 Zeitabhängigkeit der Meßwerte bei der Eichung des Sekundäremissionsquantameters

Abb. 1: Faraday-Käfig
schematisch

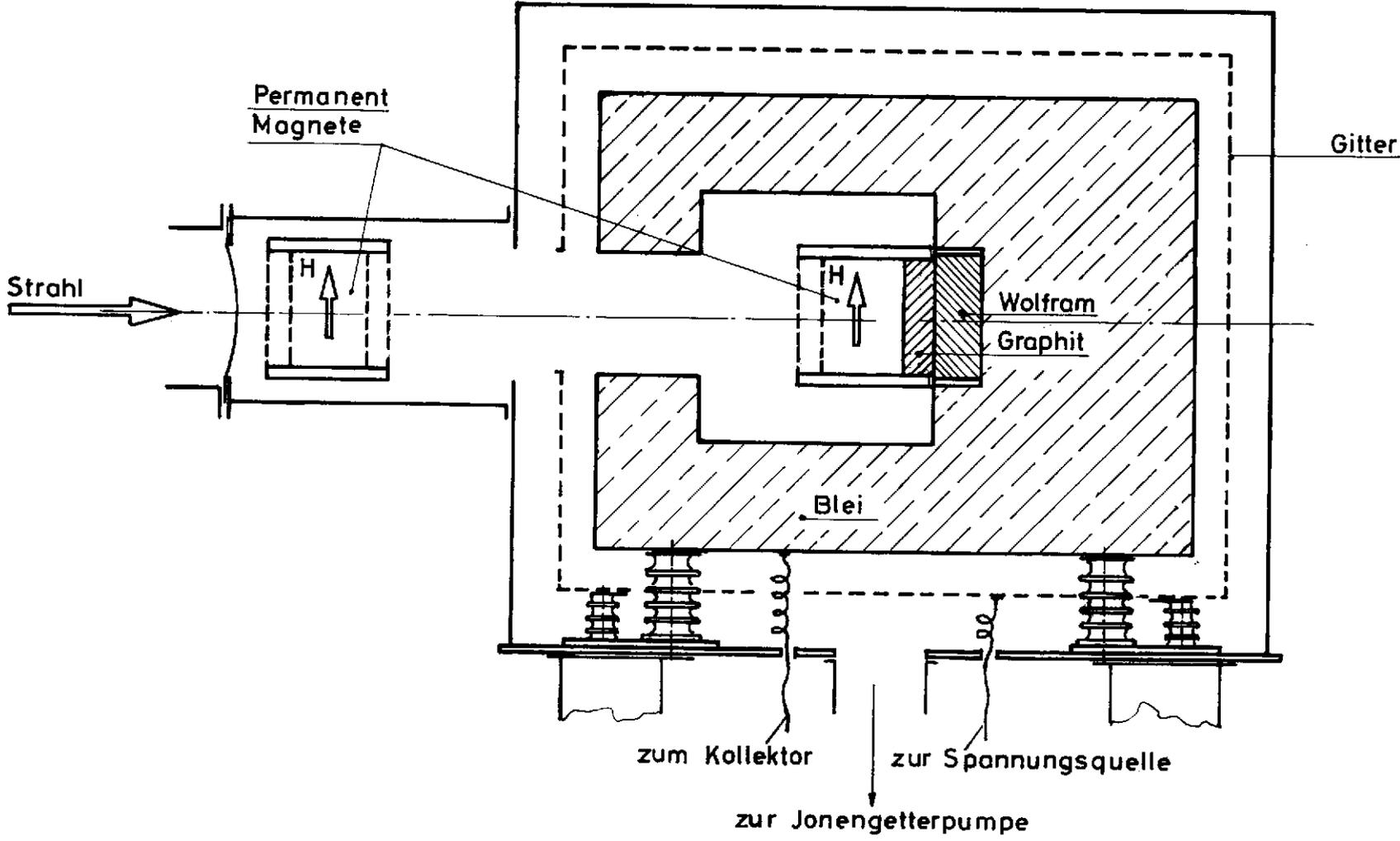


Abb. 2: Sekundäremissionsmonitor
schematisch

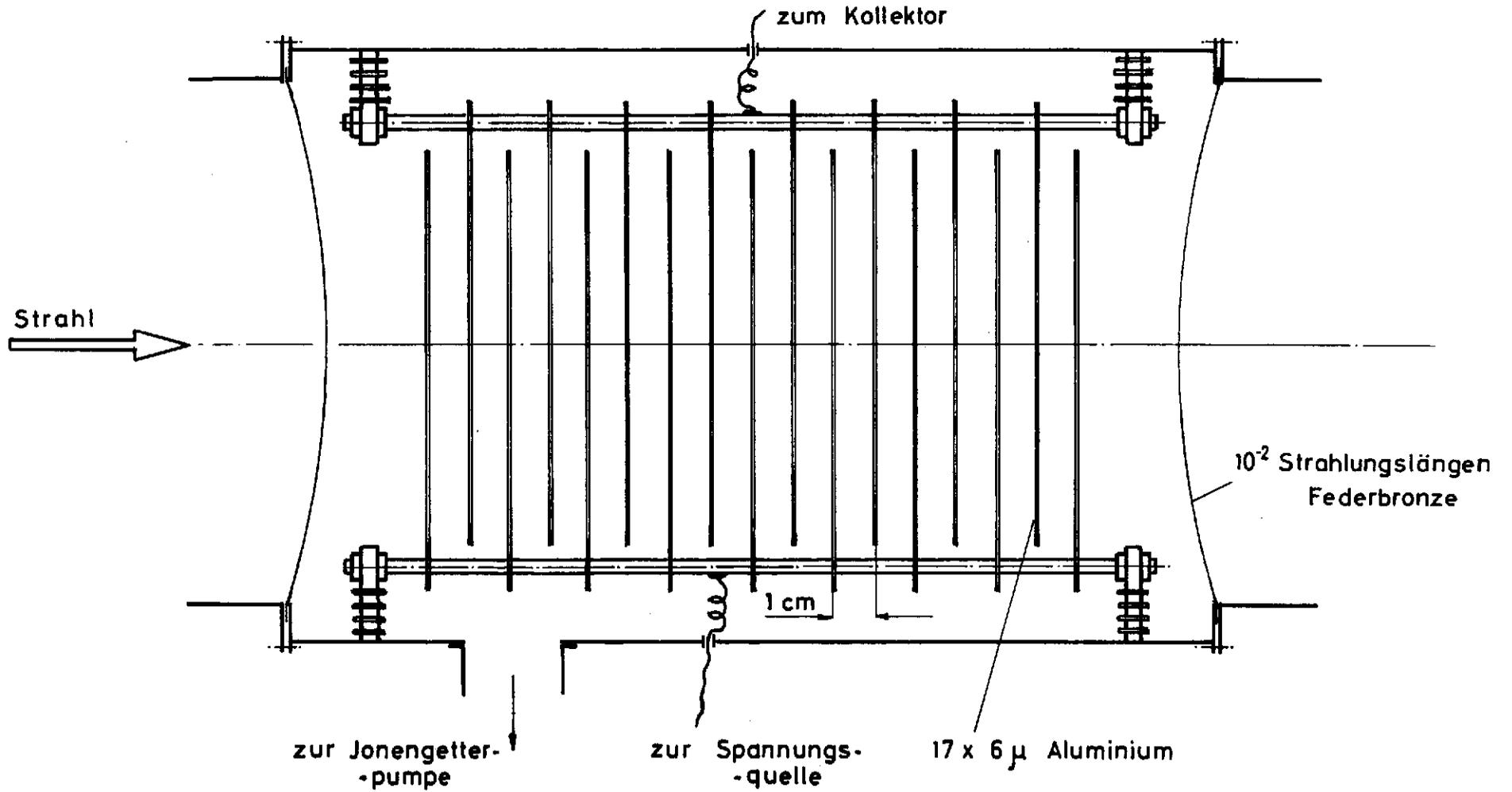


Abb. 3: Kalorimeter (schematisch)

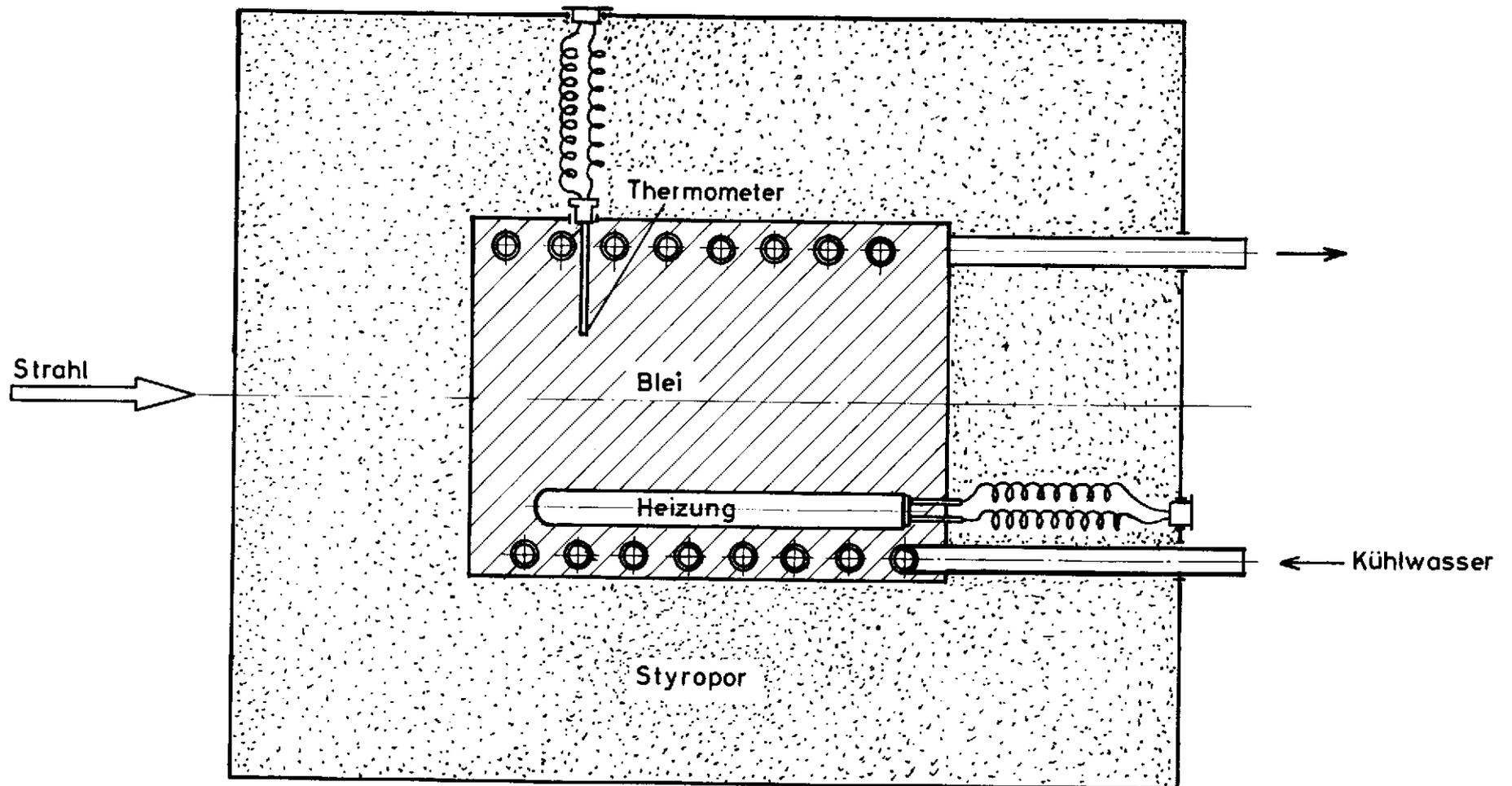
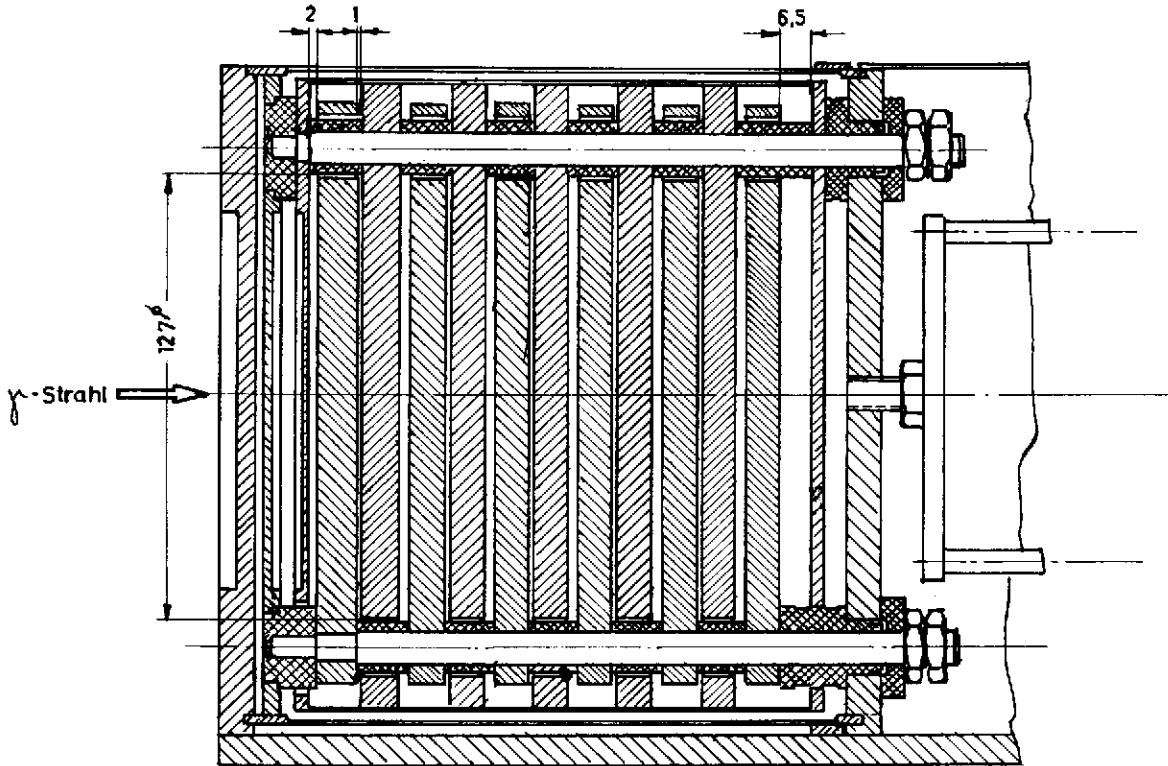


Abb. 4: Messpaket des Quantameters (schematisch).

A. Nach R.R. Wilson



B. DESY-Quantameter

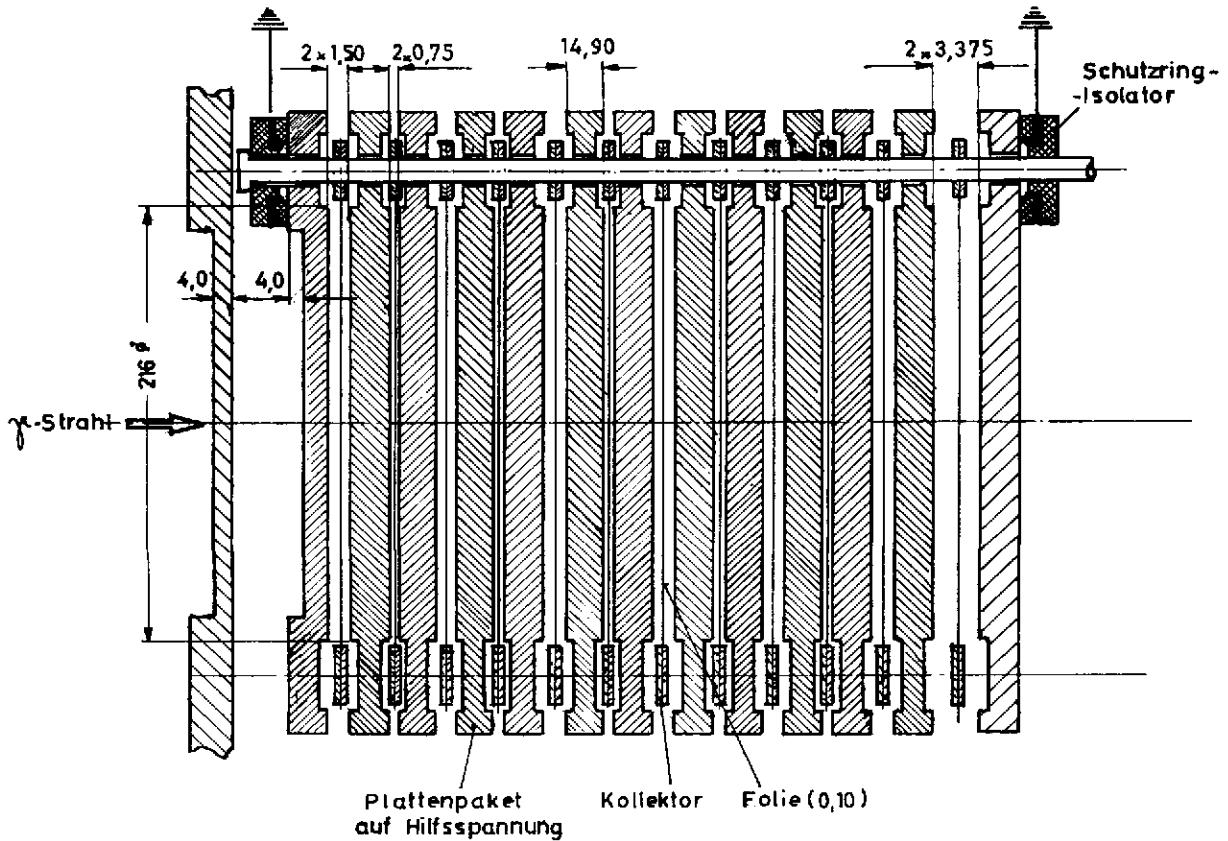


Abb. 5.
Strahllaufbau für die Eichmessungen

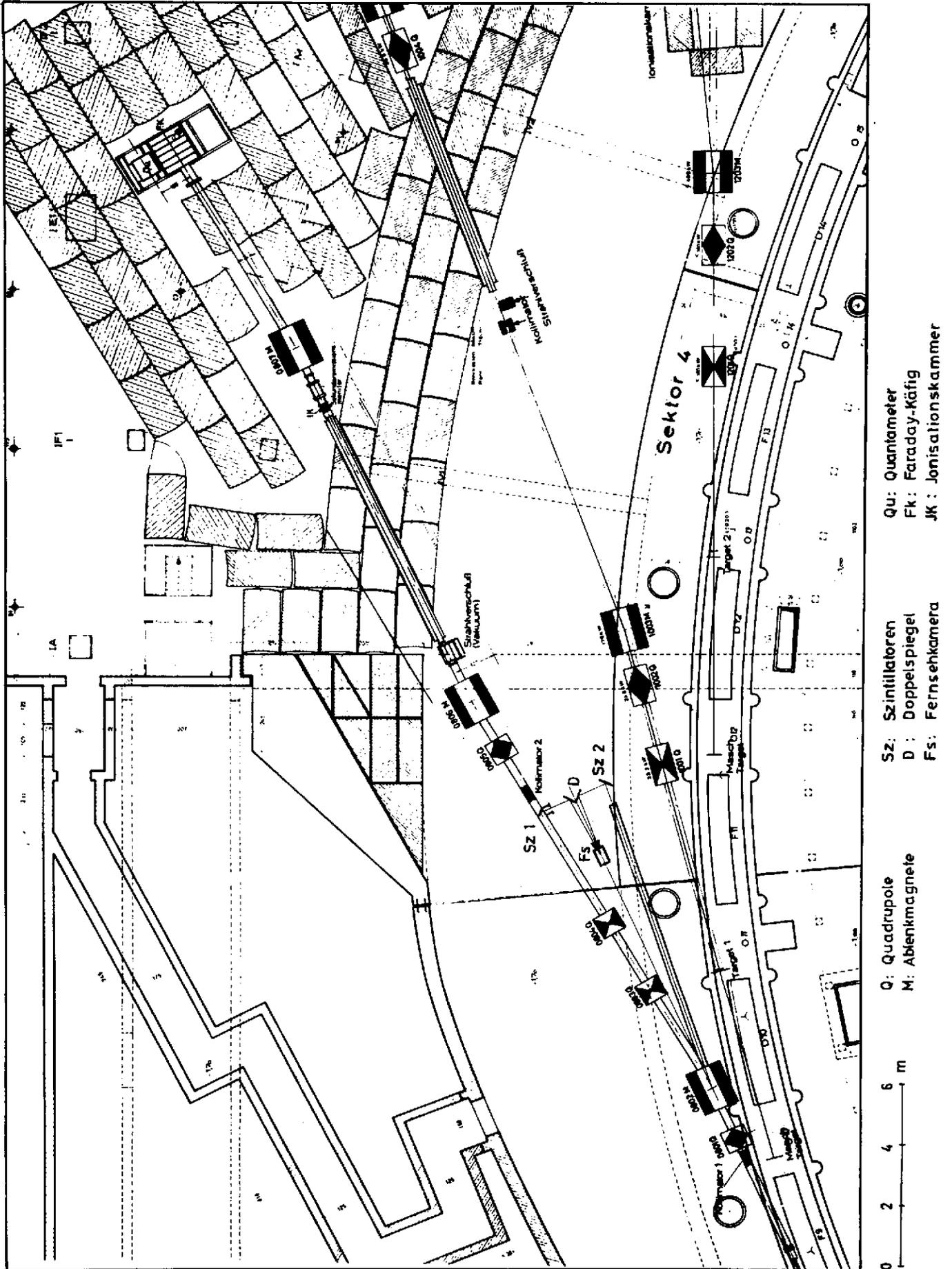


Abb. 6.

Anordnung von Sekundäremissionsmonitor und
Jonisationskammer vor dem dritten Ablenkmag-
neten.



Abb. 7.

Aufstellung von Quantameter und Faraday-Käfig
auf dem Verschiebewagen.
Faraday-Käfig im Strahl.

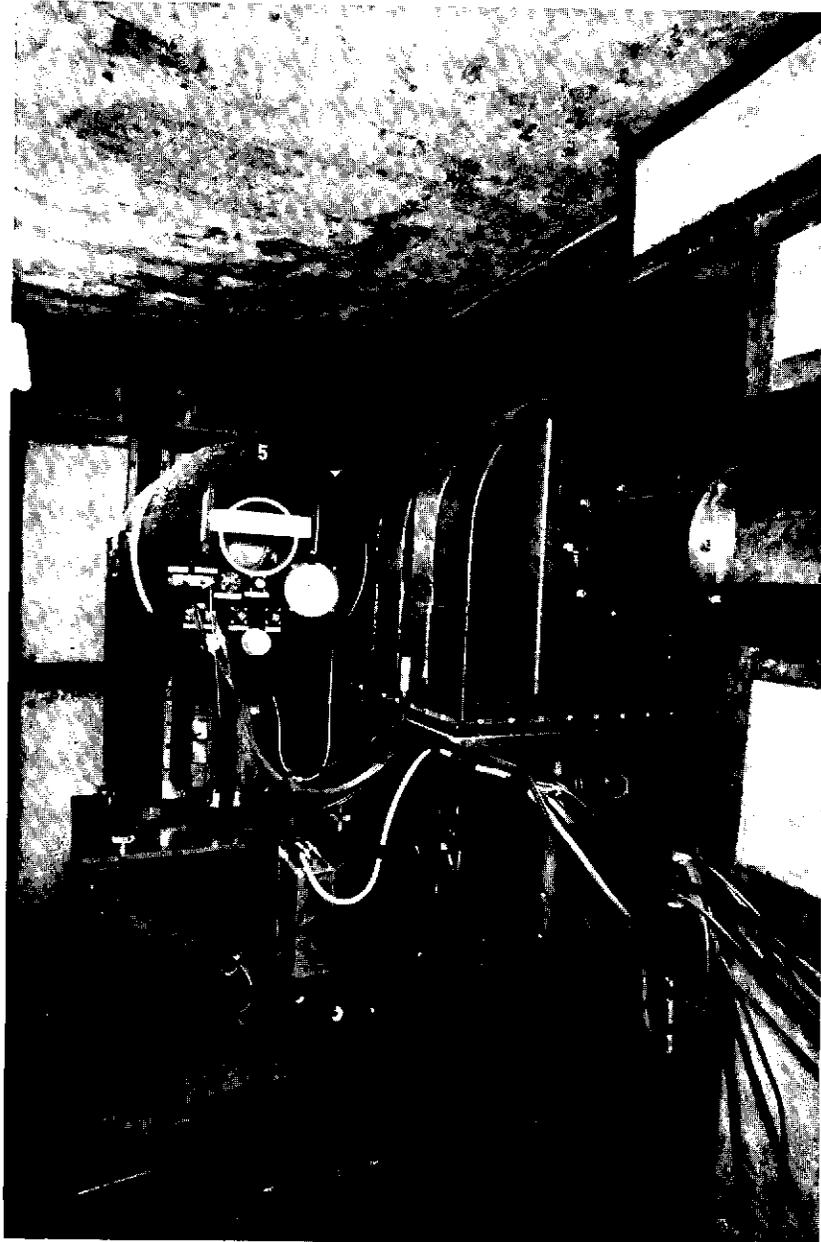


Abb. 8.

Elektronenstrahl bei 3,0 [GeV] vor dem Faraday-Käfig
In Strahlrichtung gesehen

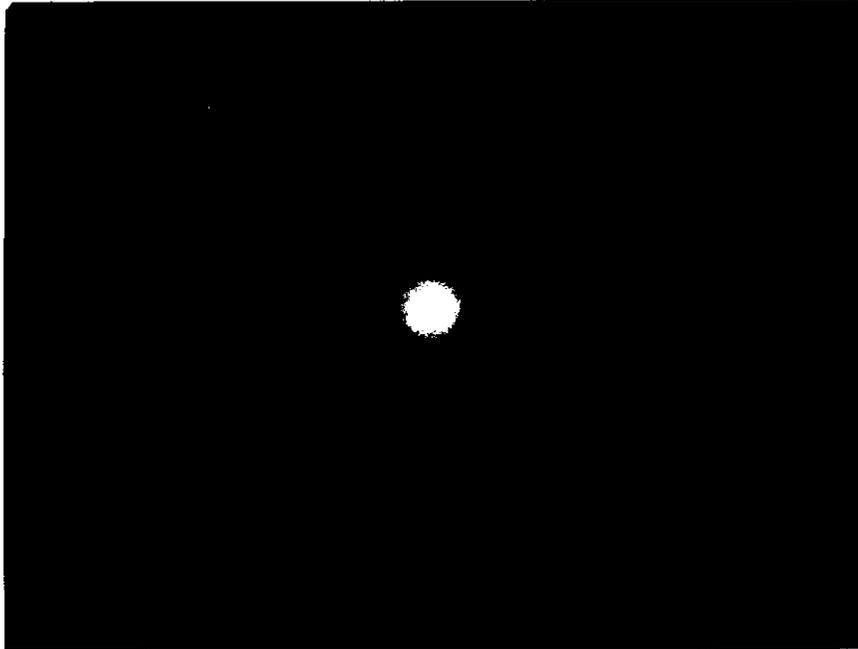


Abb. 9.

Elektronenstrahl bei 4,24 [GeV] vor dem Faraday-Käfig.
Links vom stark überbelichteten Strahlkern sieht man einen Anteil von
Elektronen mit zu kleiner Energie, rechts einen Rest von Streuteilchen.

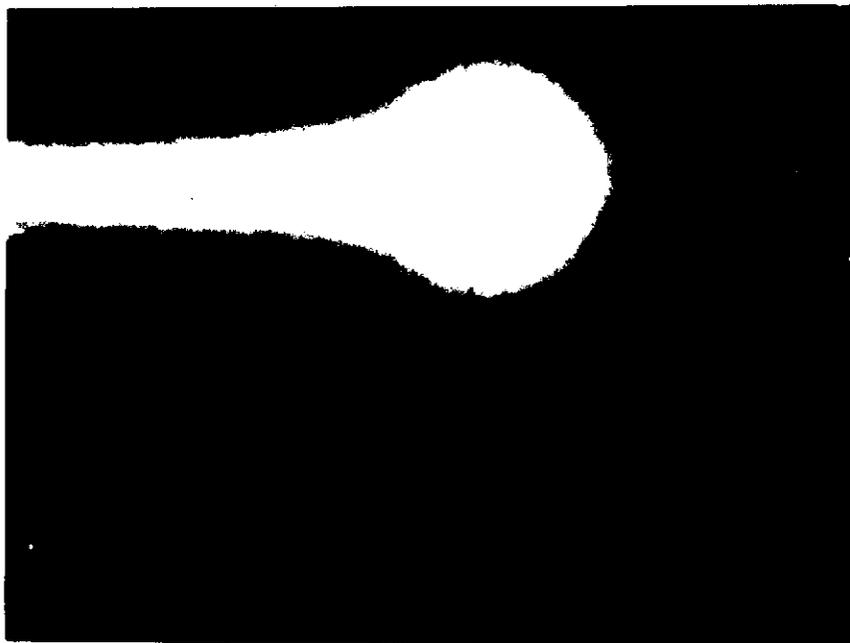


Abb. 10: Kurzzeit-Konstanz des SEM

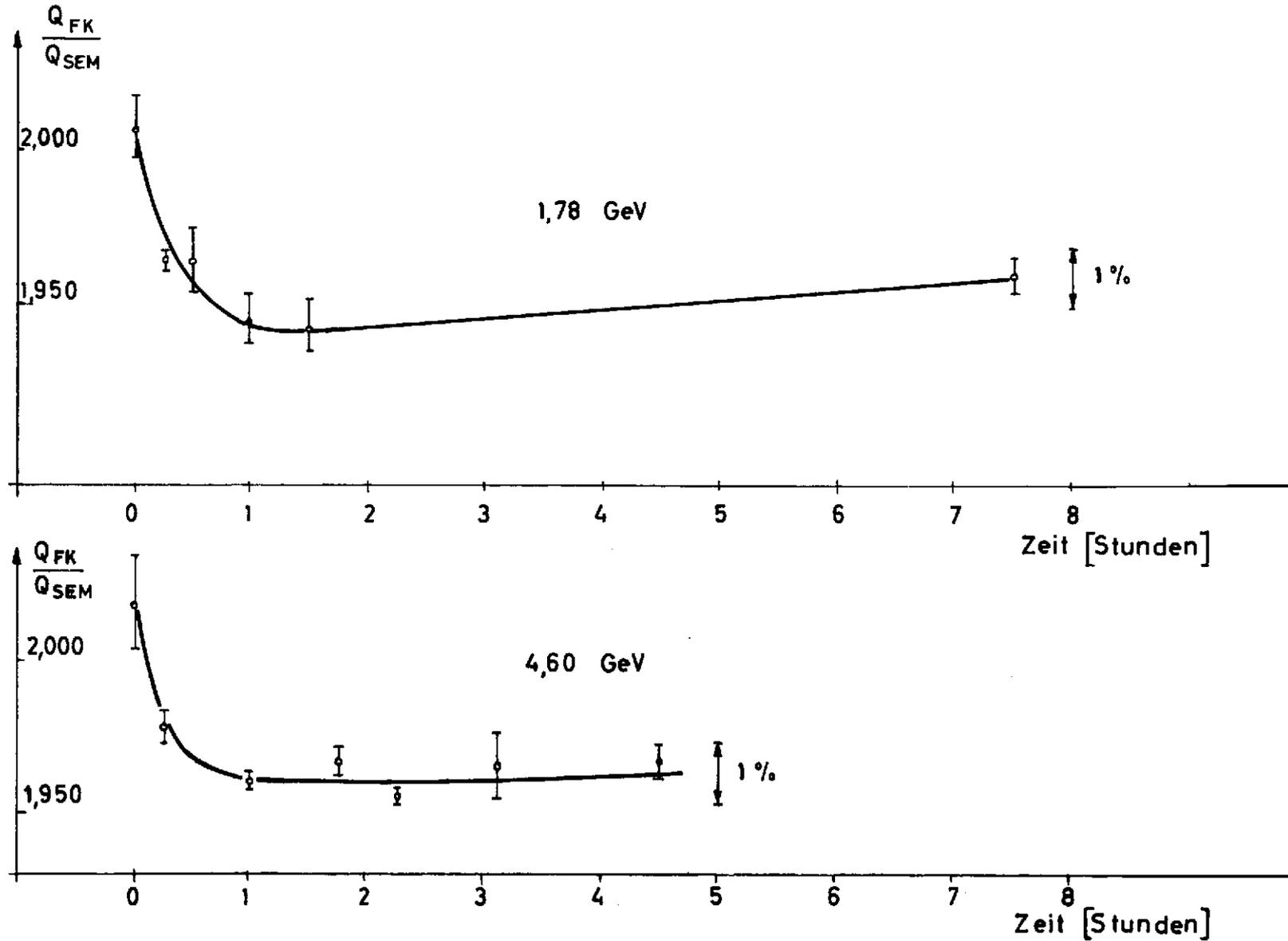


Abb. 11: Langzeit-Konstanz des SEM

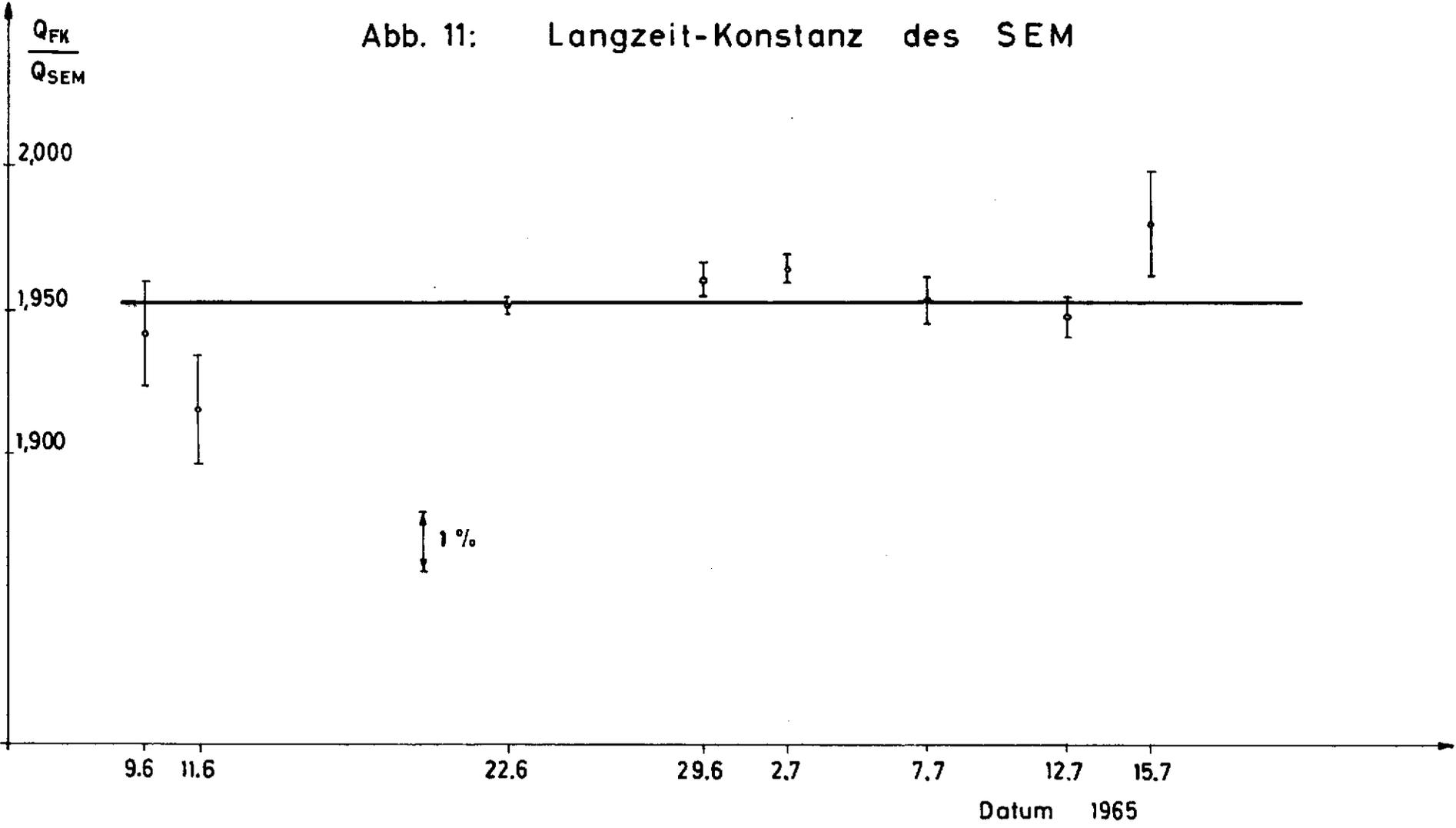


Abb. 12: Plateau des SEM bei 2,9 GeV

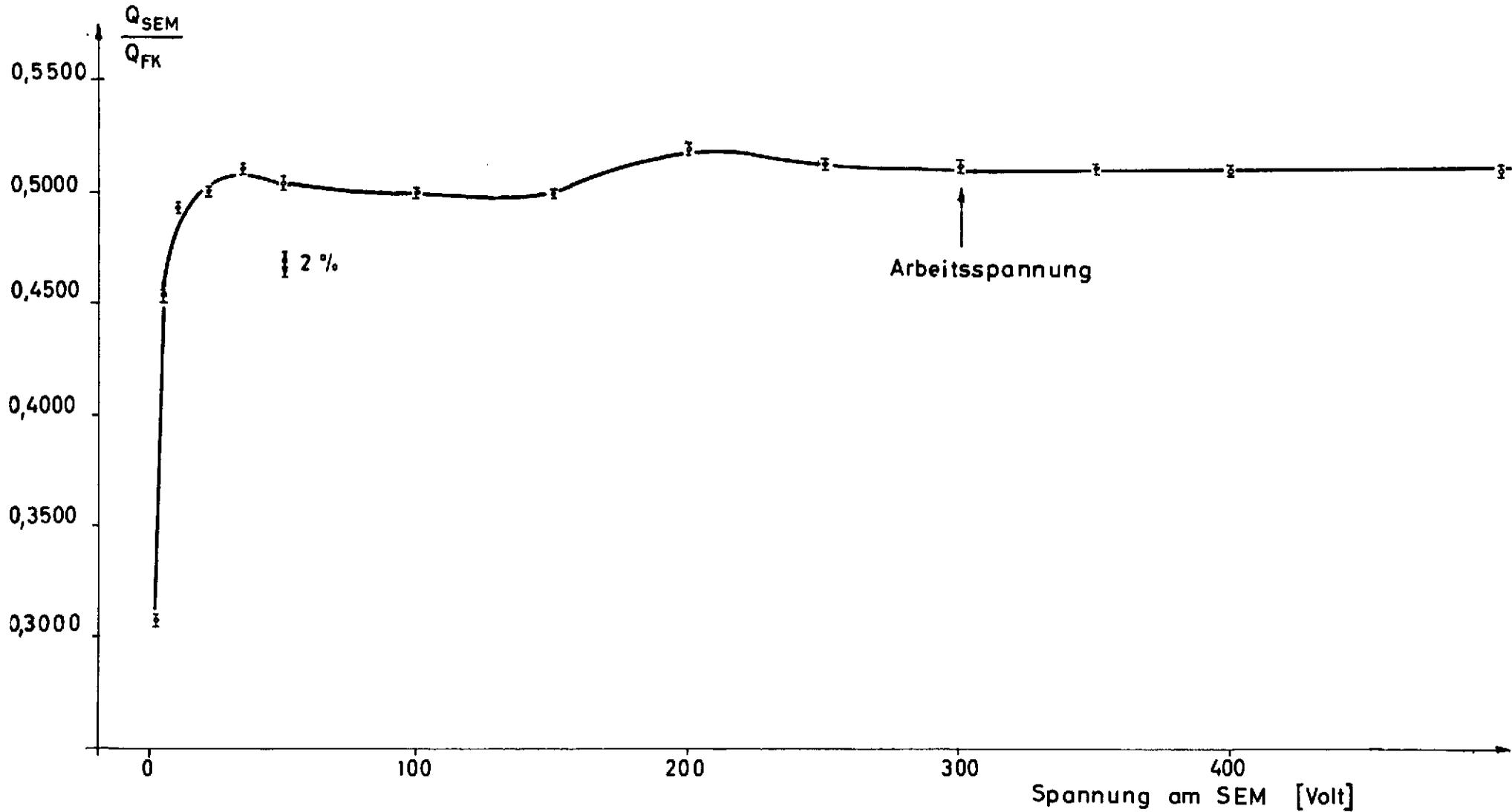


Abb. 13: Intensitätsabhängigkeit des SEM

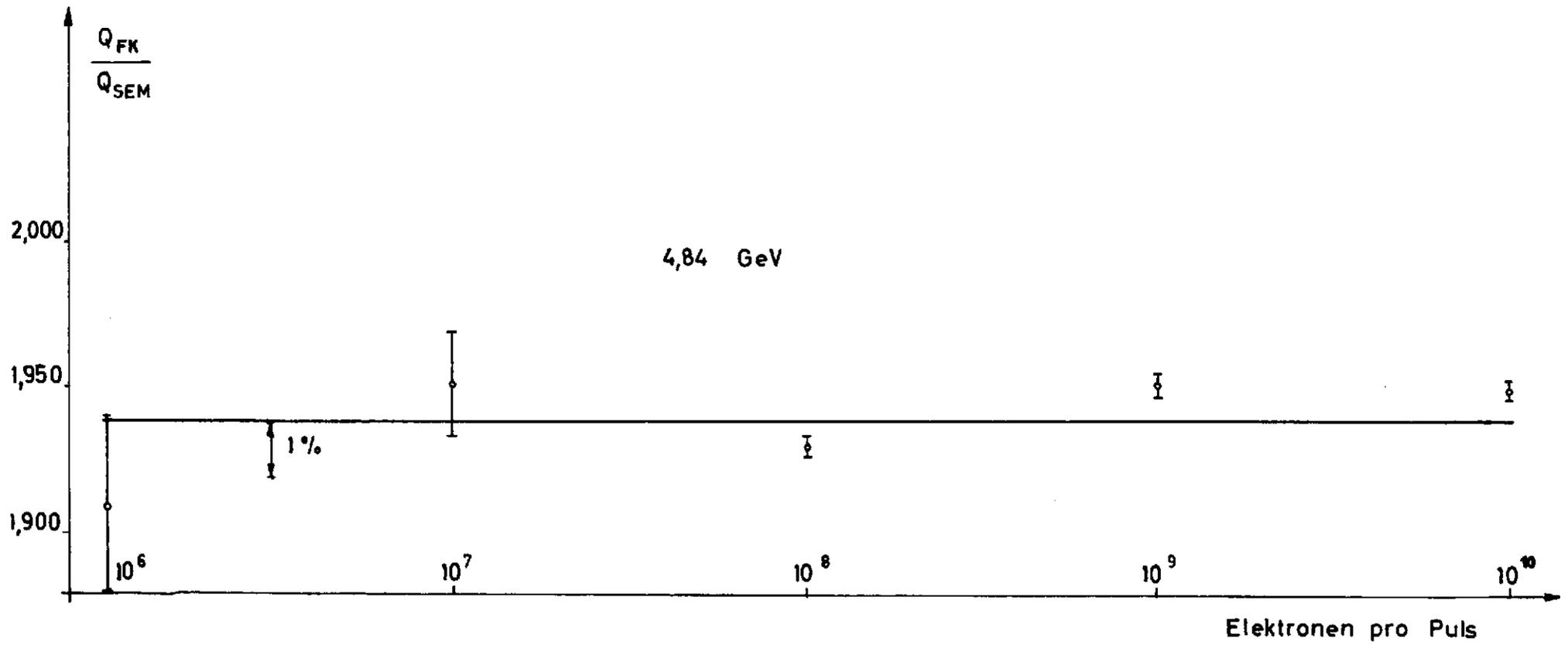


Abb. 14: Energieabhängigkeit des SEM

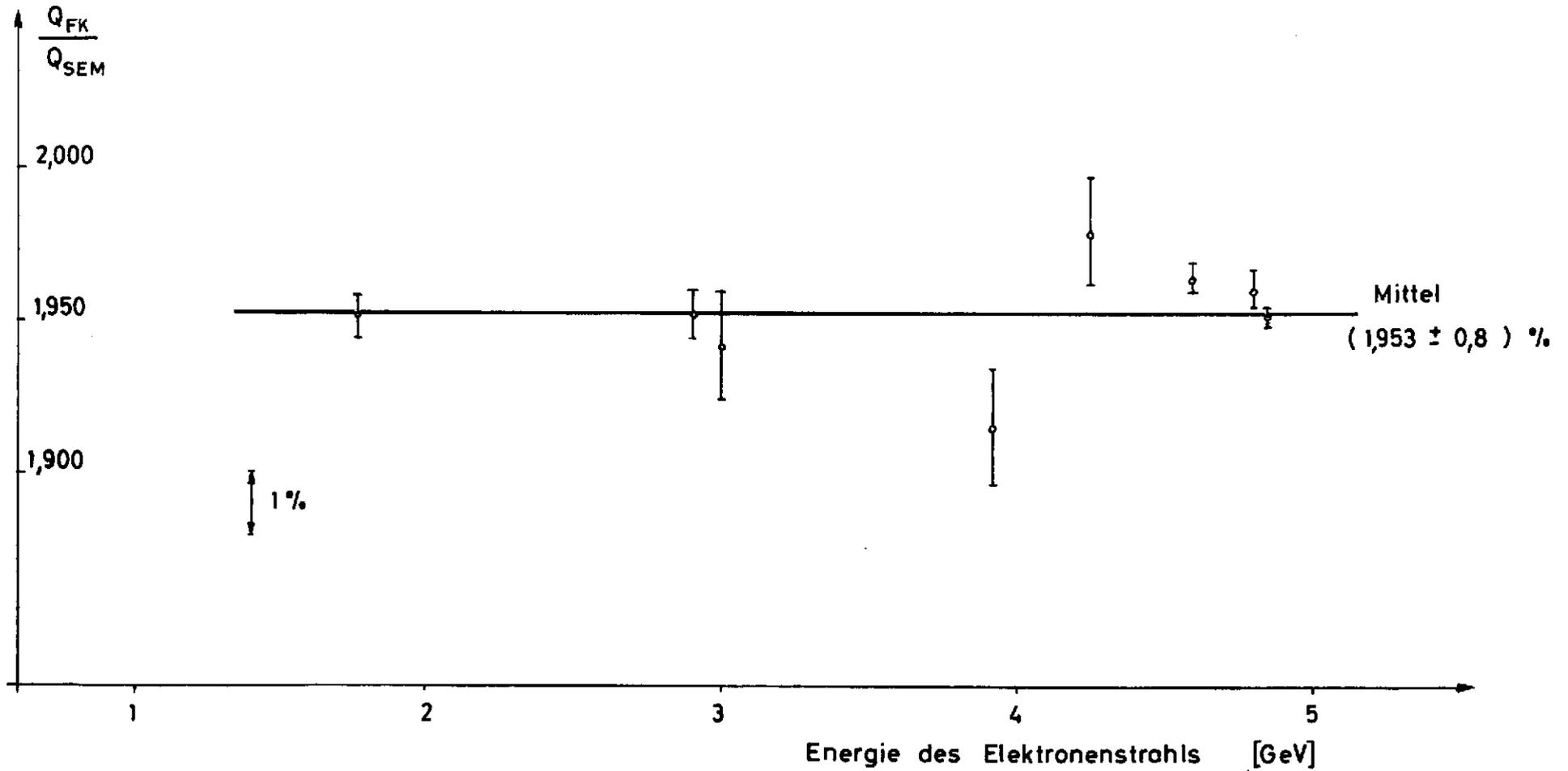


Abb. 15: Ladungsverlust des Faraday-Käfigs bei 2,9 GeV

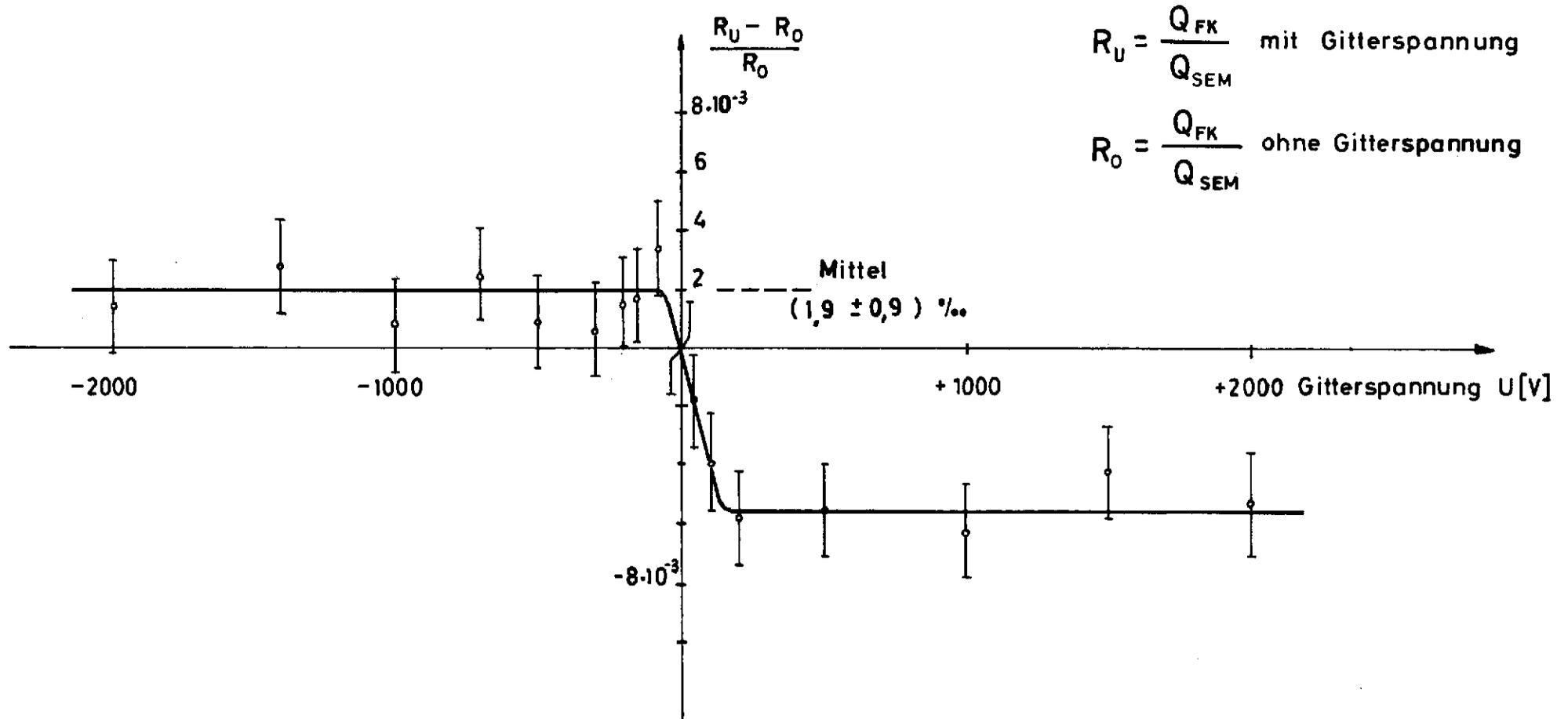


Abb. 16: Ladungsverlust des Faraday-Käfigs bei 4,6 GeV

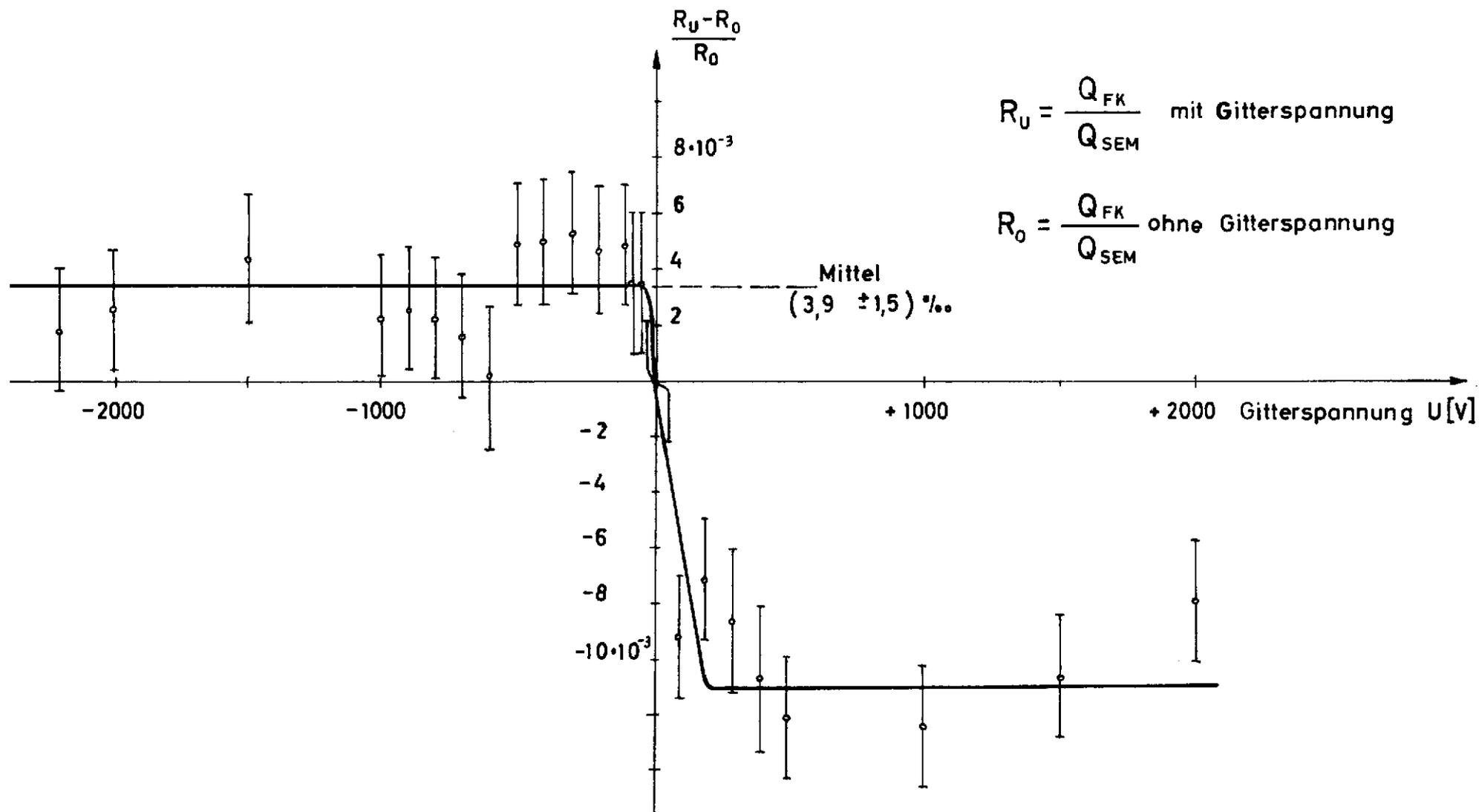


Abb. 17: Energieabhängigkeit des Faraday-Käfigs

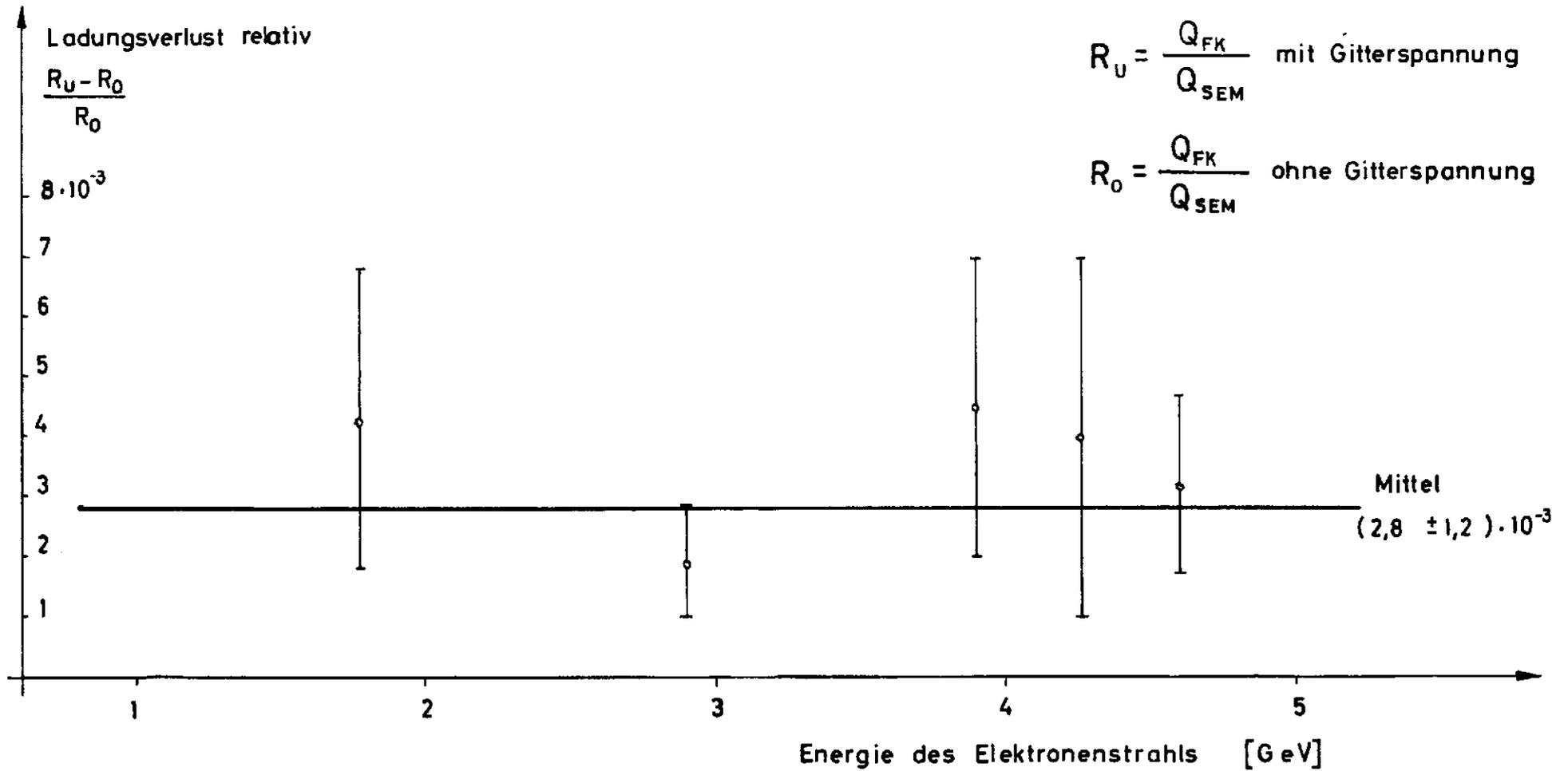


Abb. 18: Nutzbare Öffnung des Faraday-Käfigs

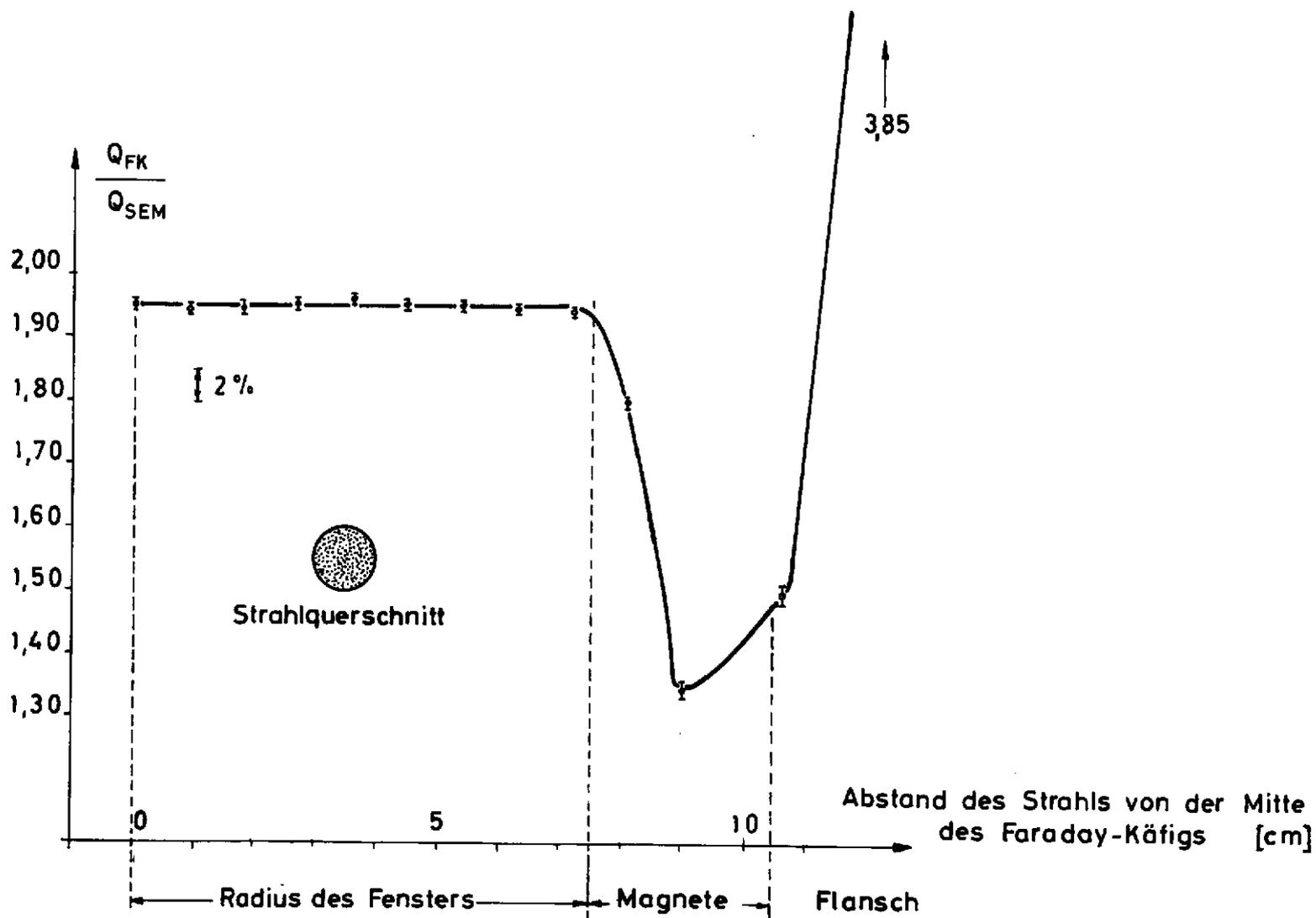


Abb. 19: Temperatur-Zeit-Kurve des Kalorimeters bei der Eichung

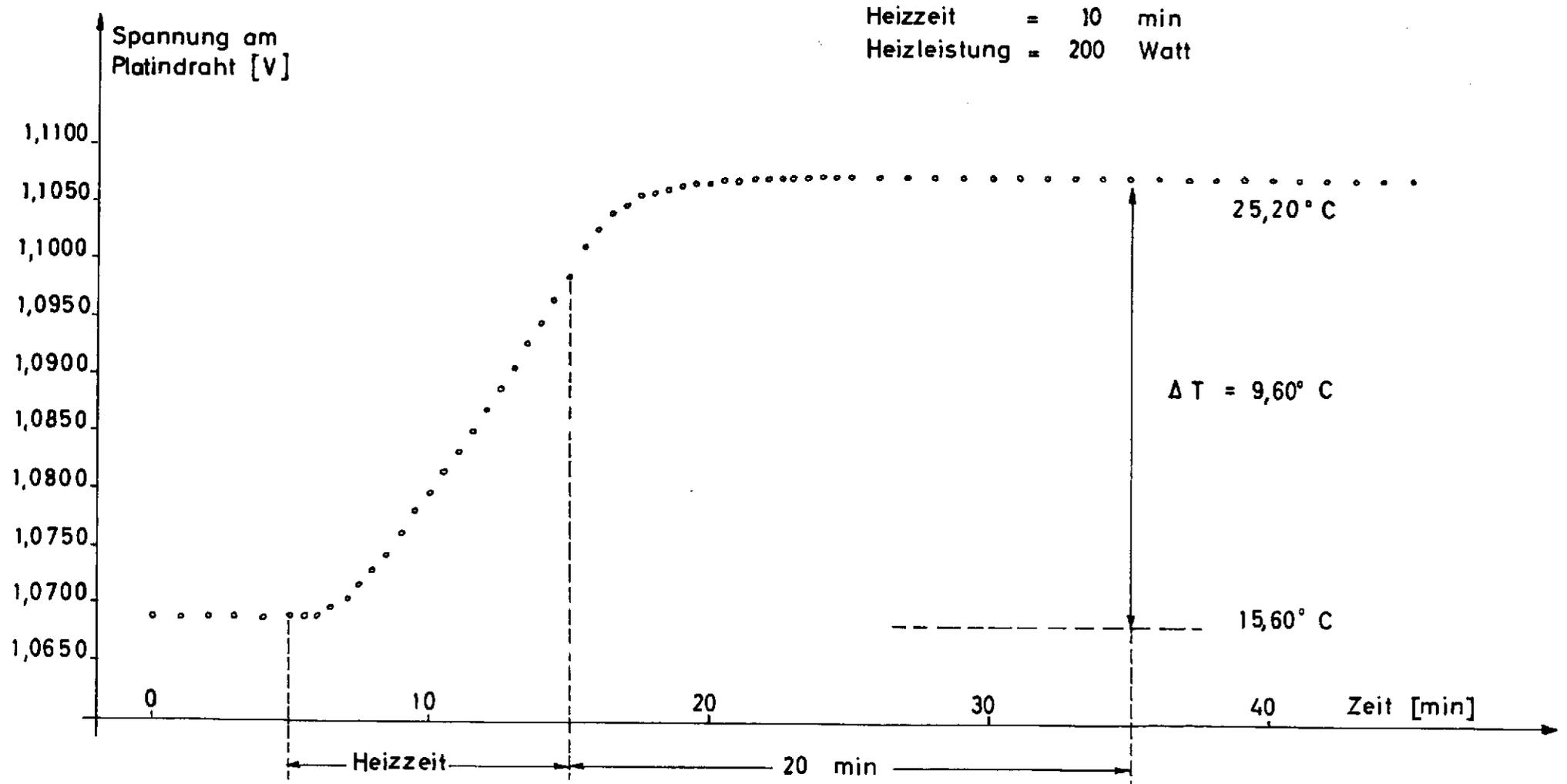


Abb. 20: Temperatur-Zeit-Kurve des Kalorimeters während einer Bestrahlung bei 2,9 GeV

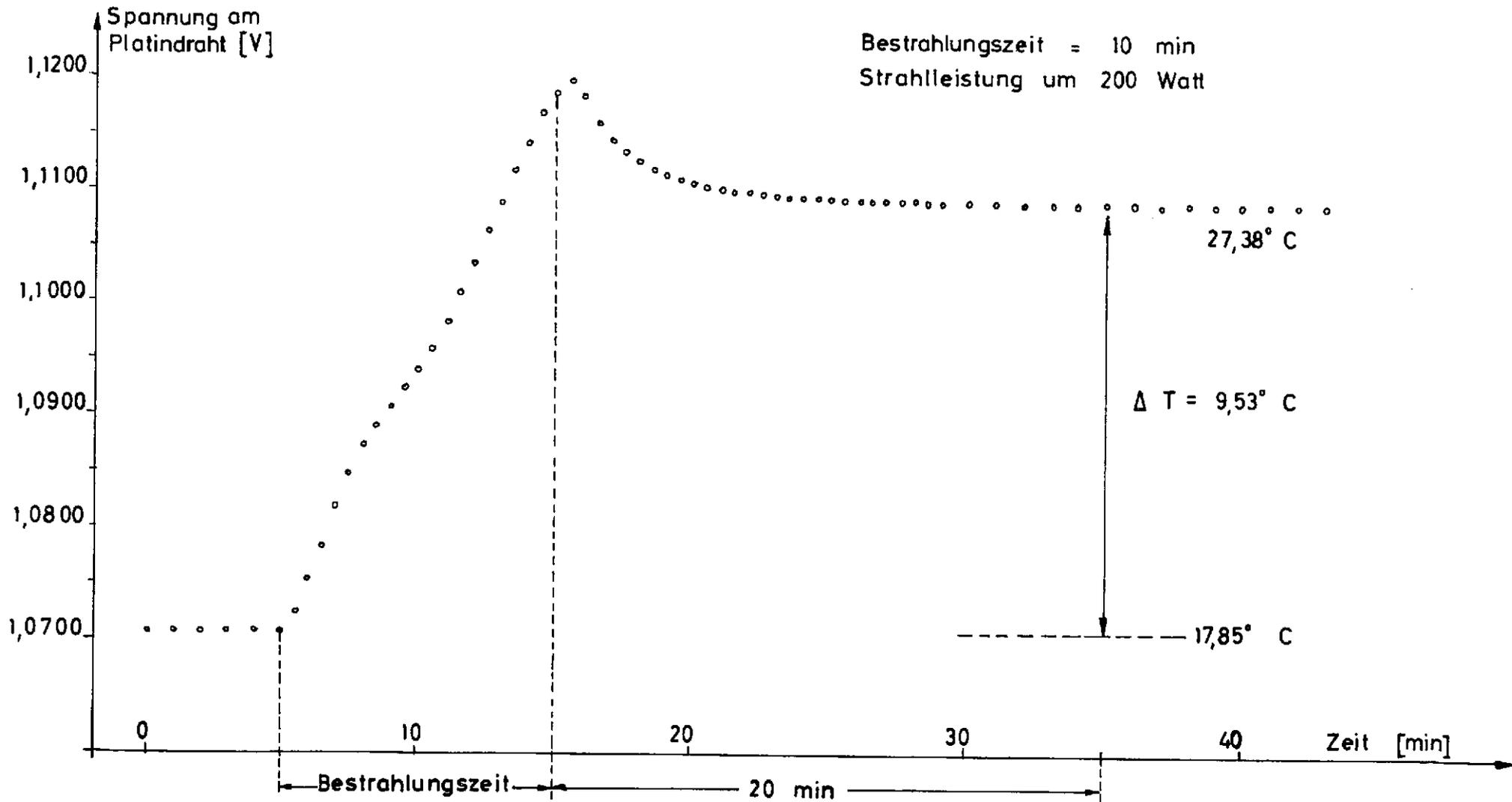


Abb. 21:
 Verschiebung des gasgefüllten Quantameters
 Nr. 5 im Strahl.

Energie: 2,75 [GeV].

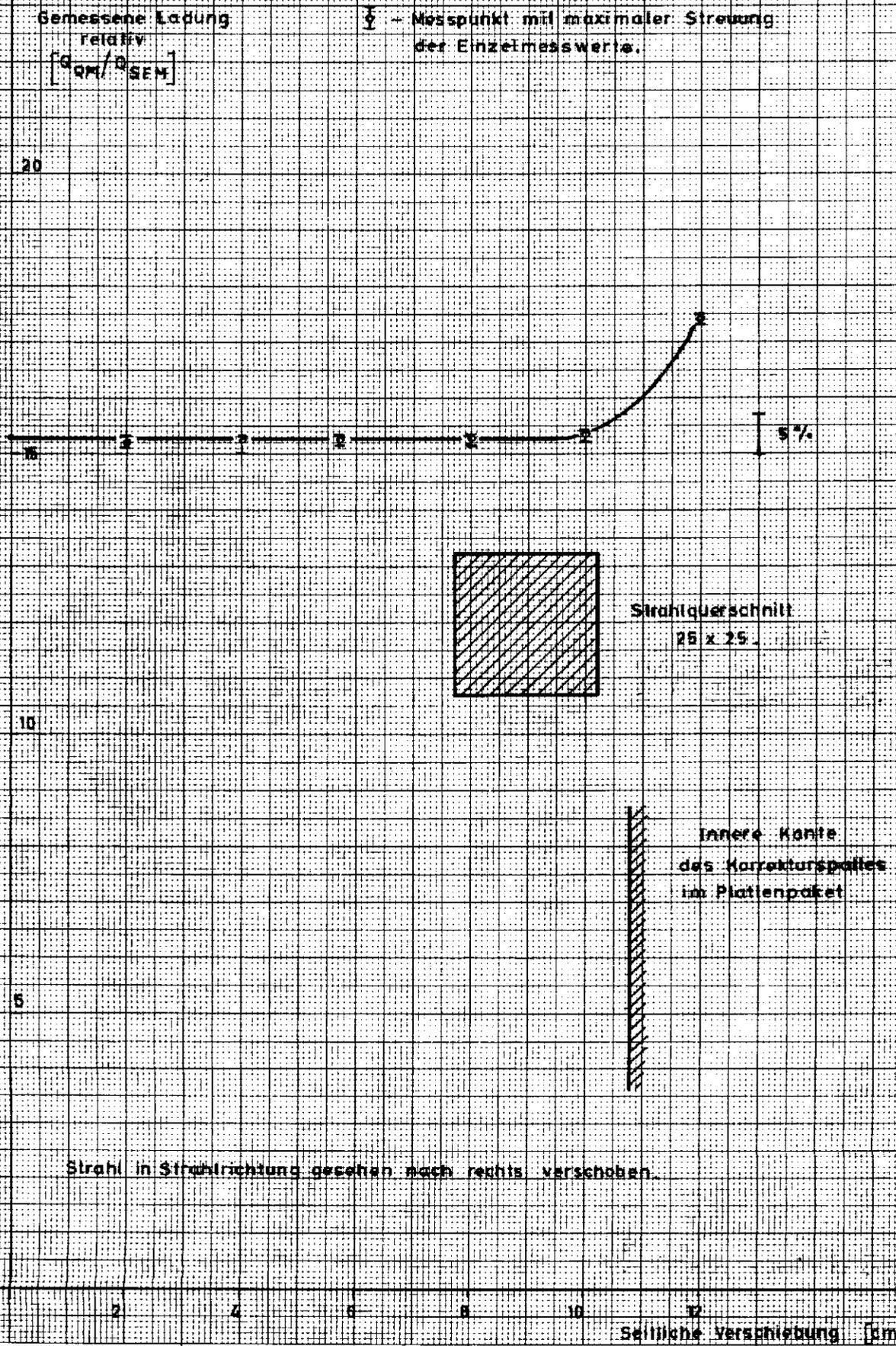


Abb. 22:

Plateau des gasgefüllten Quantameters Nr. 5
 bei 3,0 [GeV] als Funktion der Intensität.

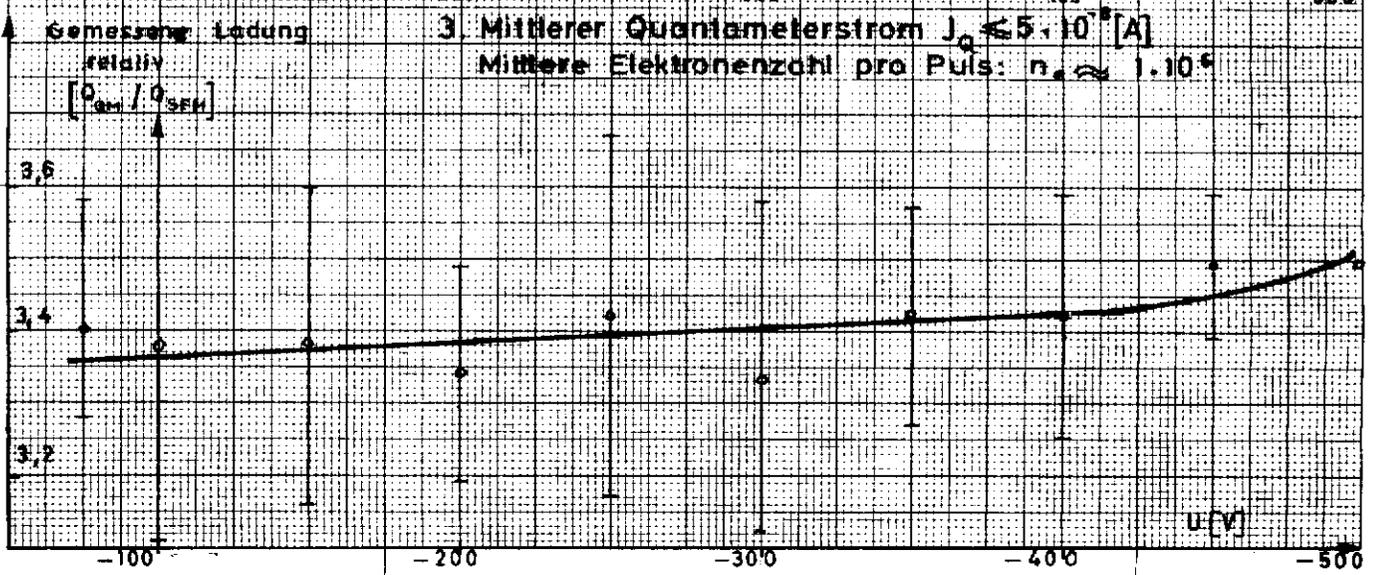
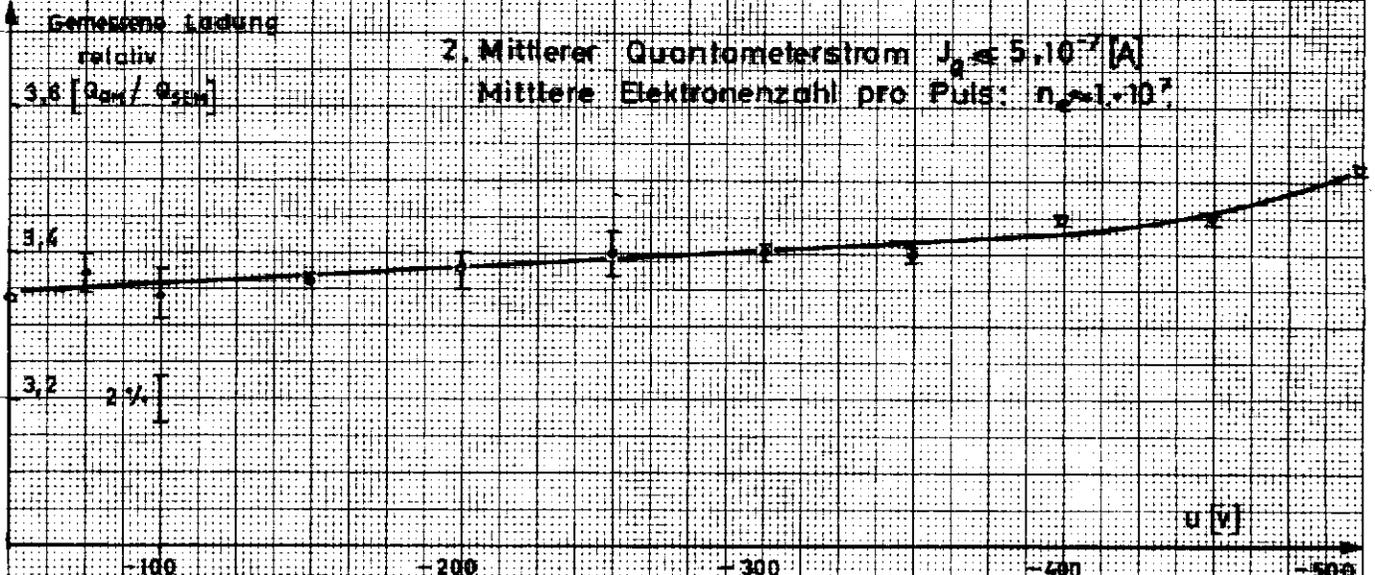
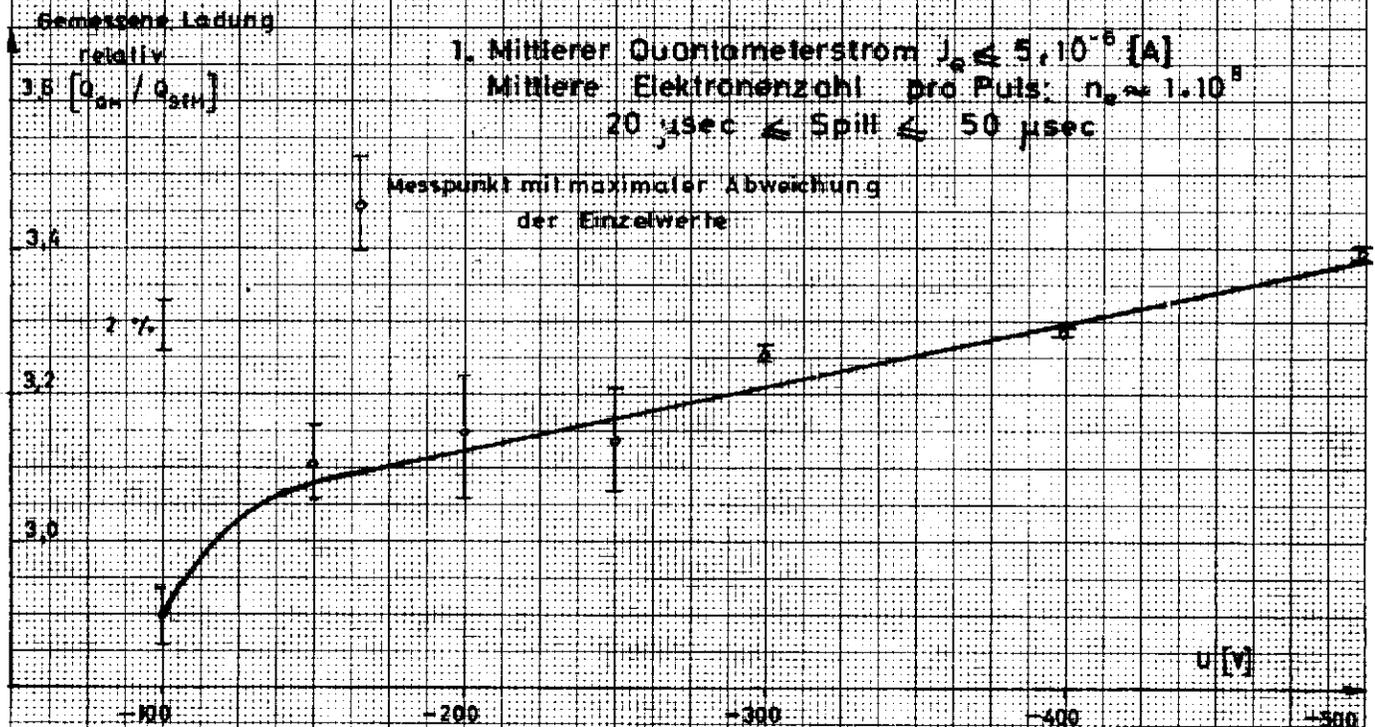


Abb. 23:

Zusammenhang zwischen Spillänge und Zahl der zulässigen Teilchen pro Puls für das gasgefüllte Quantameter.

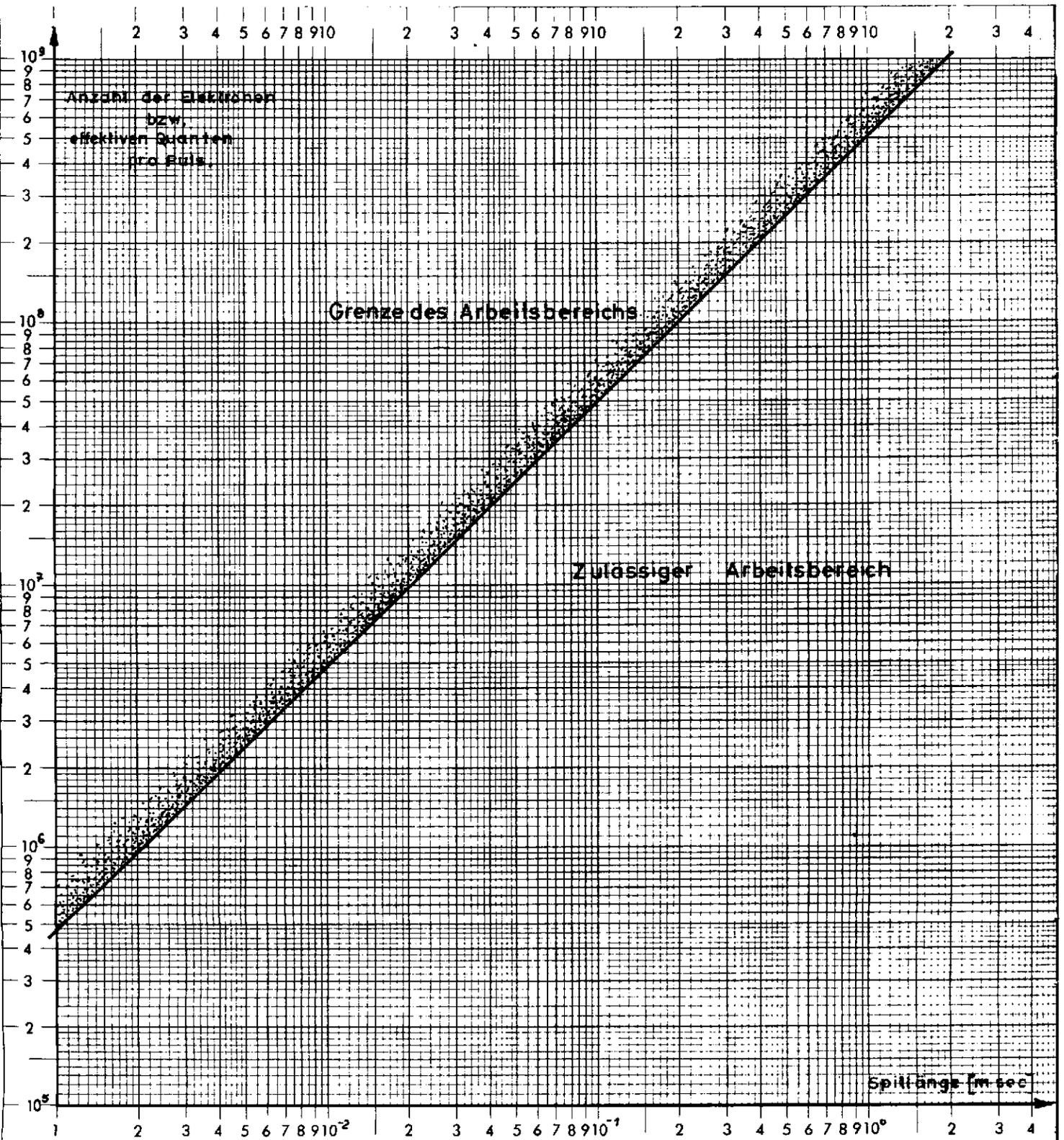


Abb. 24:

Plateau des gasgefüllten Quantameters Nr. 2
bei 2,8 [GeV], primärer γ -Strahl
mit kleiner Intensität

Anmerkung: Es handelt sich um Einzelwerte, die deshalb
stark streuen

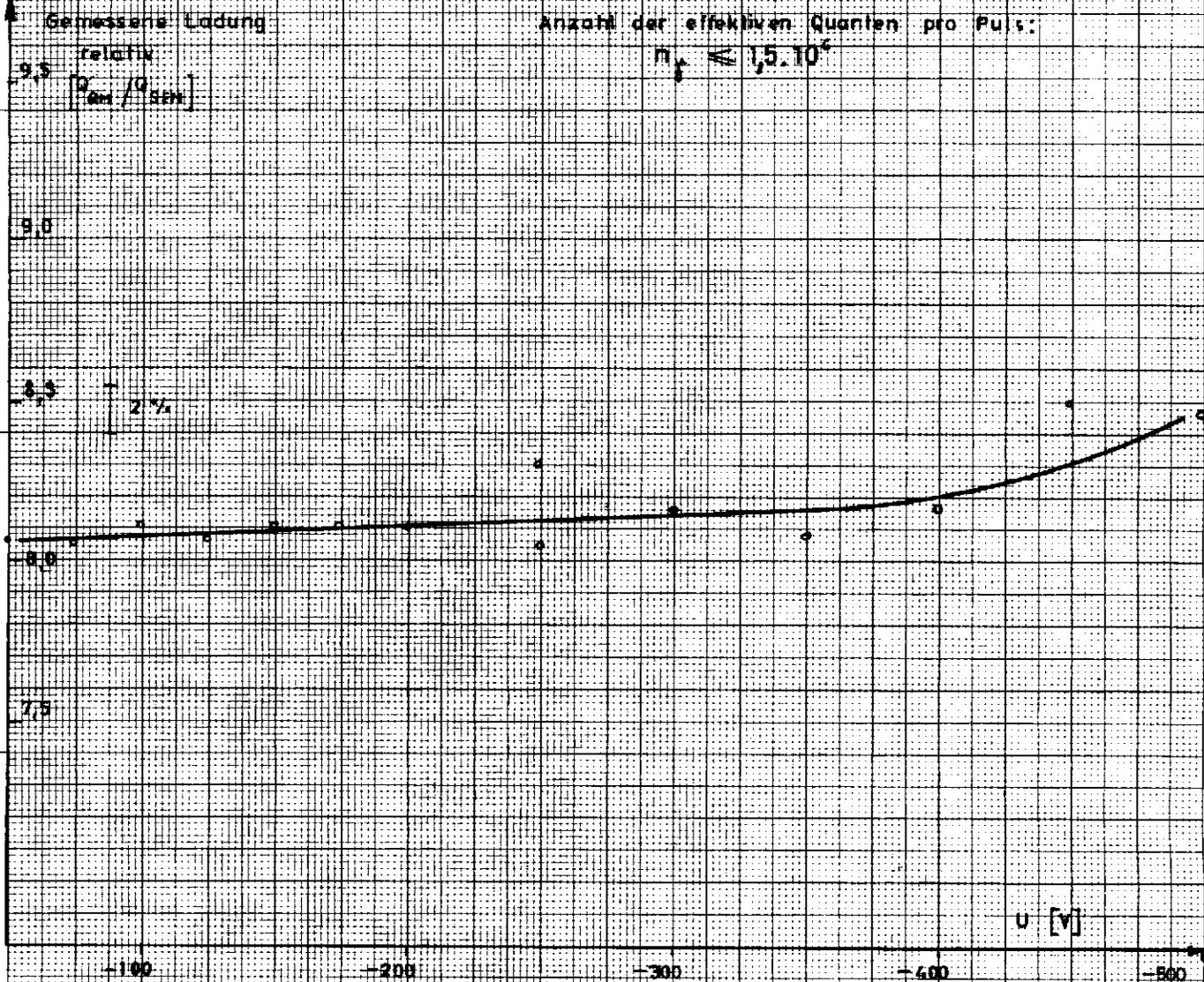


Abb. 25:

Plateau des gasgefüllten Quantameters Nr. 5 während der Bestimmung der Quantameterkonstanten

Mittlere Elektronenzahl pro Puls: $n_e \approx 1 \cdot 10^7$

$20 \mu\text{sec} \ll \text{Spalt} \ll 50 \mu\text{sec}$

Energie: [GeV]

Gemessene Ladung
relativ

$$\left[\frac{Q_{\text{gem}}}{Q_{\text{stat}}} \right]$$

o = 6,93

x = 2,95

▲ = 1,55

1,10

1,00

2%

0,90

U [V]

-100

-200

-300

-400

-500

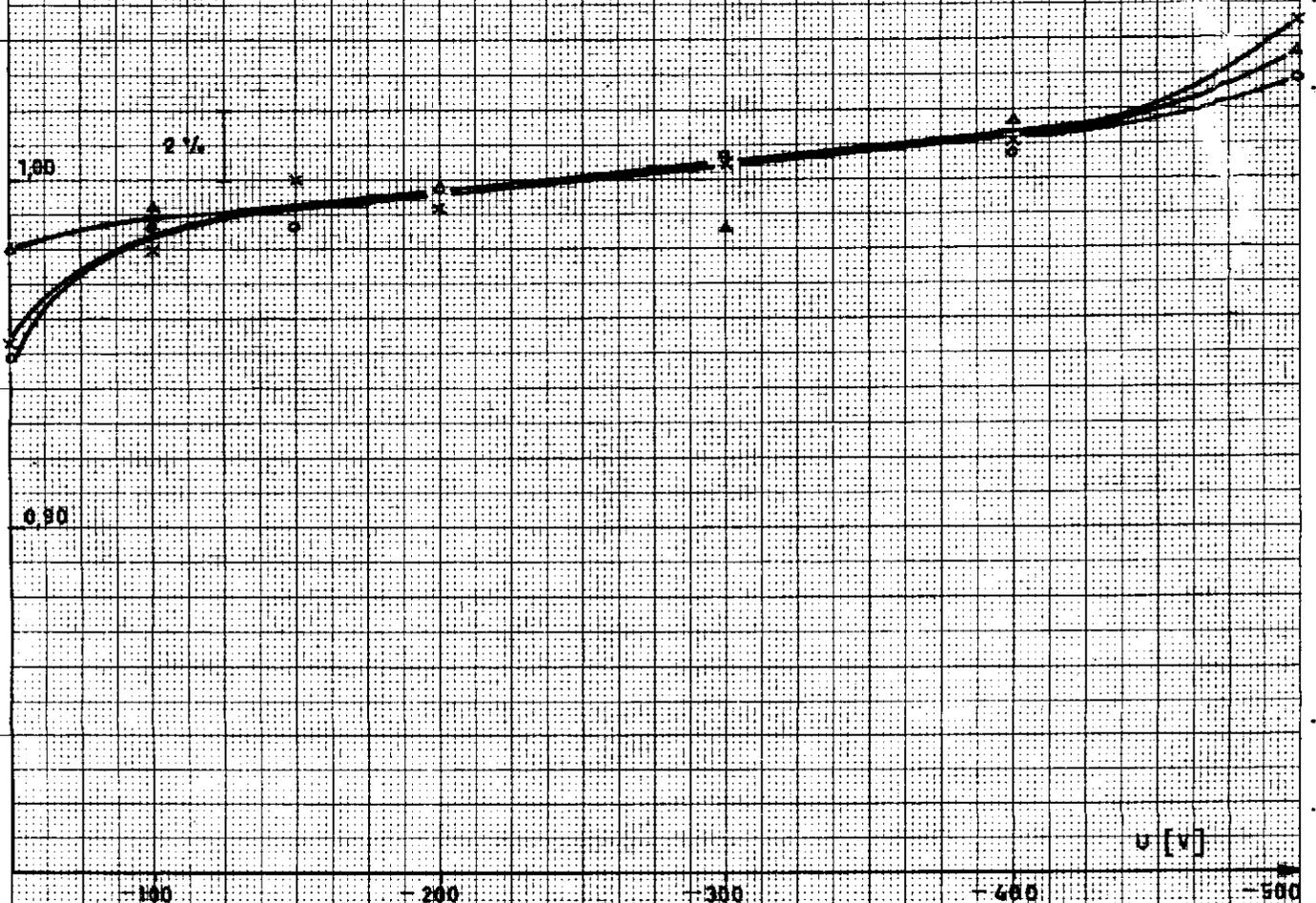


Abb. 26:

Gemessene Eichkonstante des gasgefüllten Quantameters Nr. 5 als Funktion der Energie.

Mittlere Elektronenzahl pro Puls: $n_e \approx 1 \cdot 10^7$

$20 \mu\text{sec} \leq \text{Spill} \leq 50 \mu\text{sec}$

Eichkonstante K_E
 $\cdot 10^{10} [\text{MeV} \cdot \text{Coul.}^{-1}]$

Energieunabhängiger Mittelwert:

$$K_E = 3,49 \cdot 10^{10} [\text{MeV} \cdot \text{Coul.}^{-1}] \pm 1,4\%$$

Meßpunkt mit mittlerem Fehlerbereich

4,0

3,5

3,0

$E [\text{MeV}]$

1

2

3

4

5

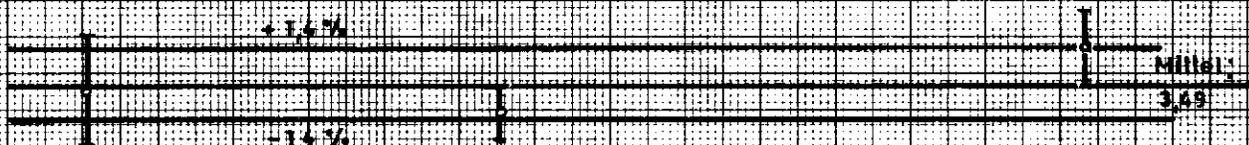


Abb. 27:

Energieverteilung des Schauers im DESY-Quantometer bei 6 [GeV].

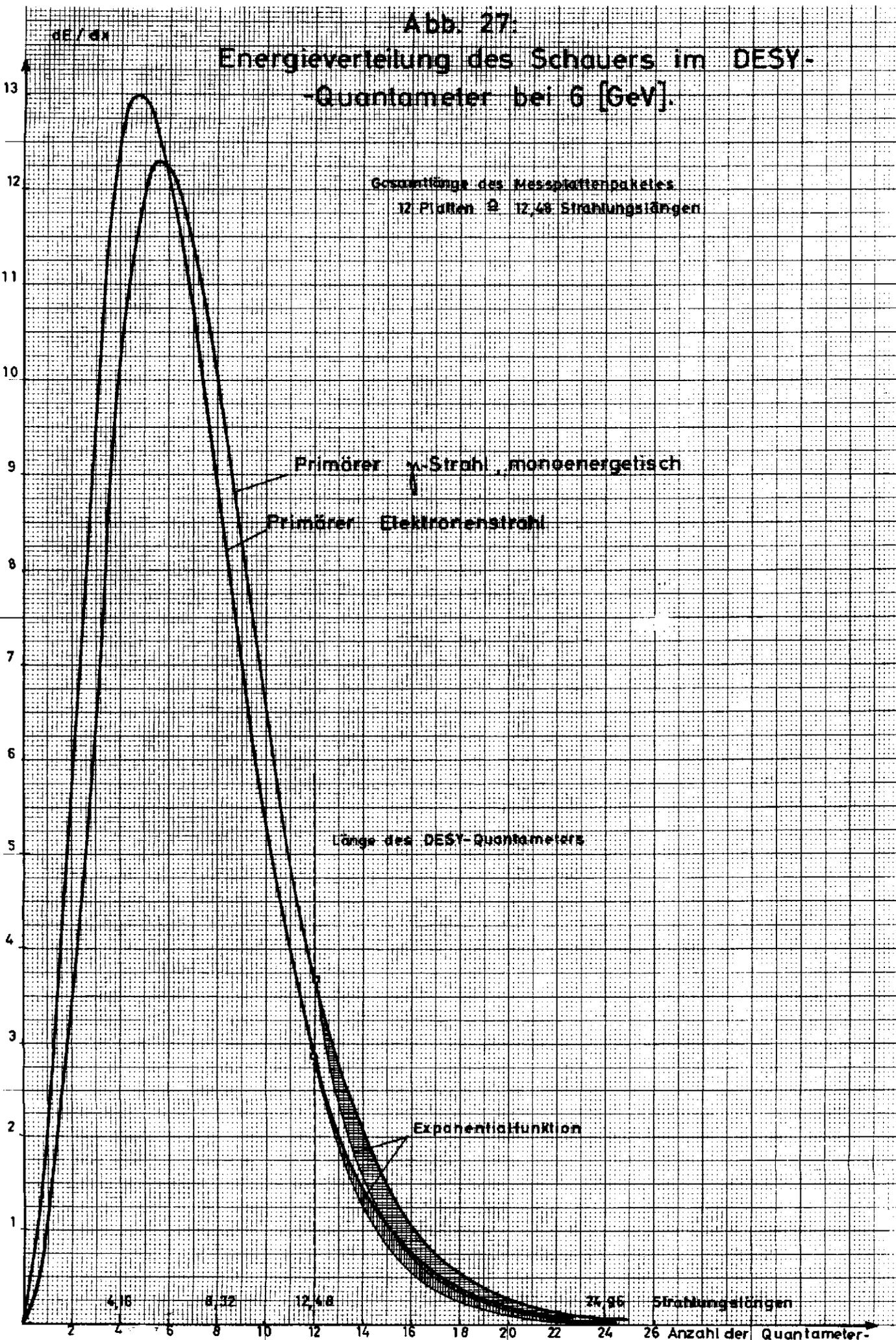
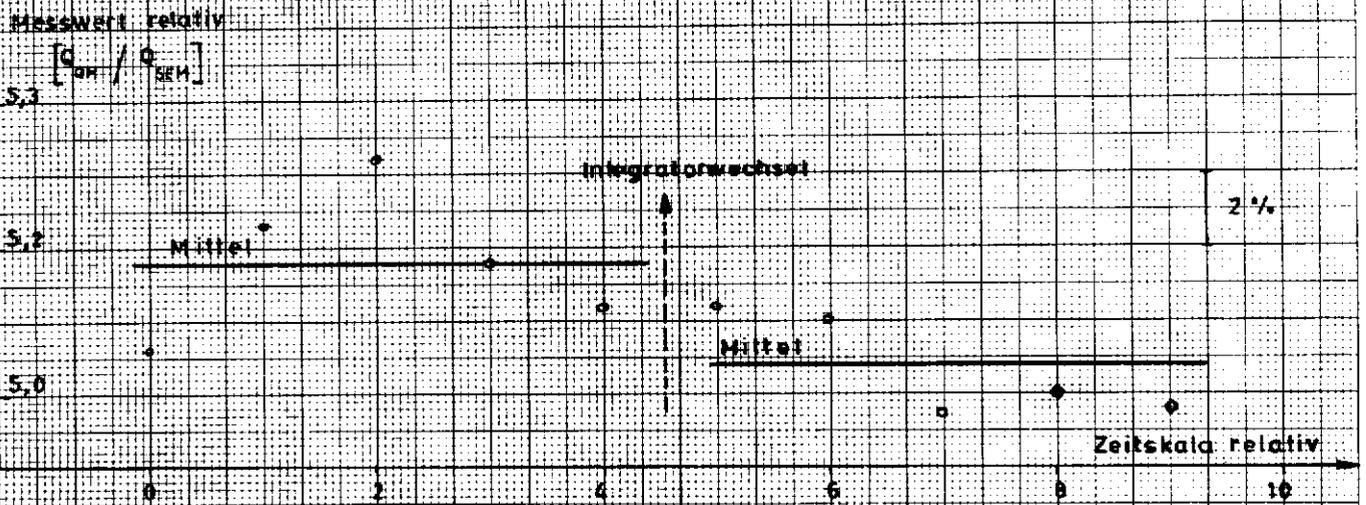


Abb. 28

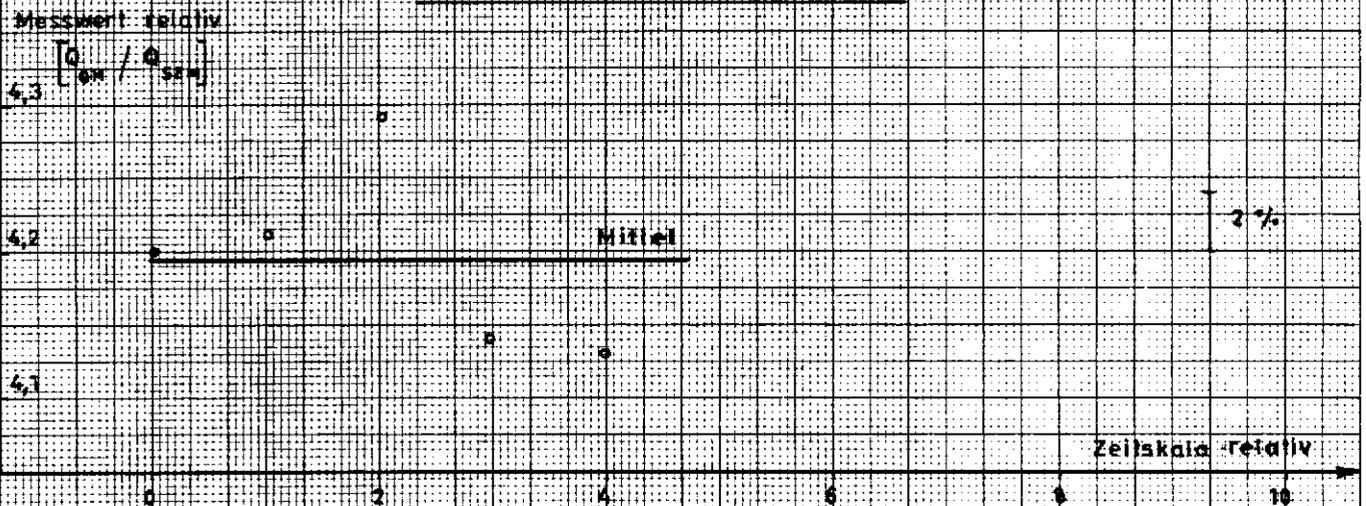
Zeitabhängigkeit der Einzelmesswerte bei der Eichung des gasgefüllten Quantameters.

1 Einheit der Zeitskala entspricht etwa 150 sec.

1. Messwerte bei 4,85 [GeV]



2. Messwerte bei 2,90 [GeV]



3. Messwerte bei 1,53 [GeV]

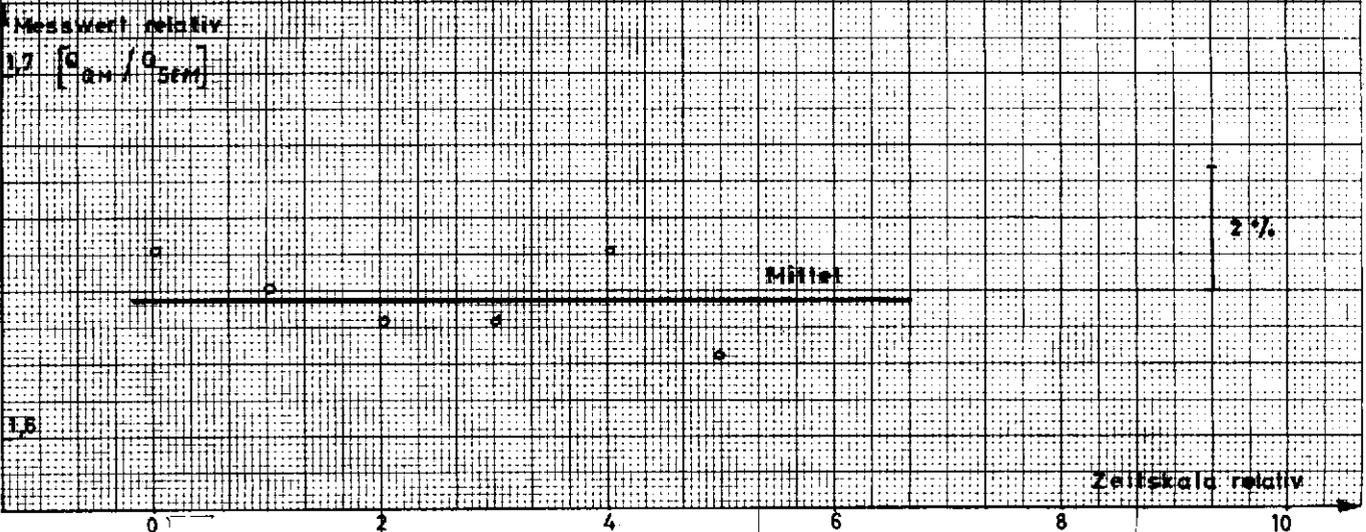
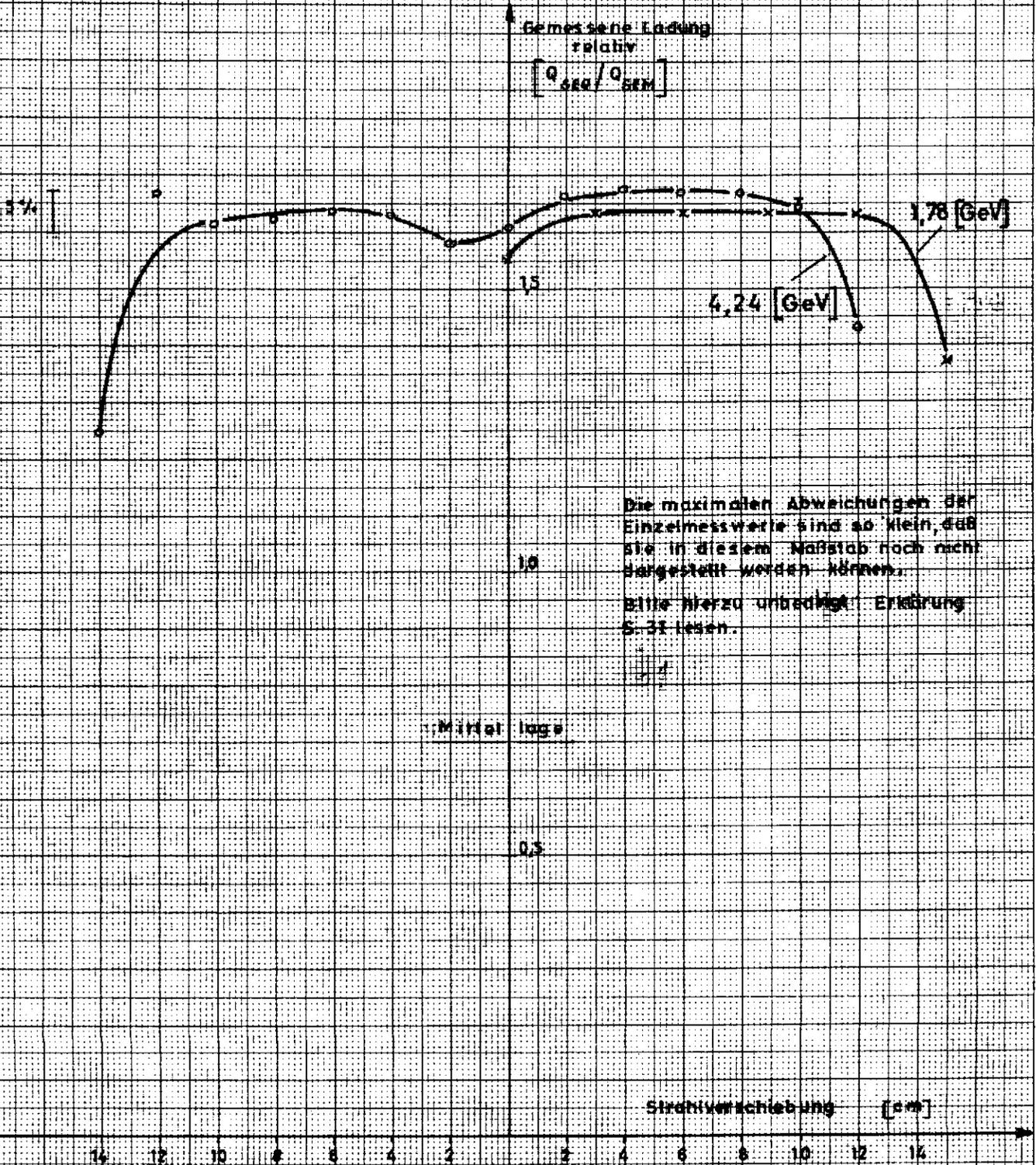


Abb. 29:

Messwerte in Abhängigkeit von der Strahlverschiebung auf dem Sekundäremissionsquantometer bei 4,24 und 1,78 [GeV].

Anzahl der Elektronen pro Puls: 4,24 [GeV] $n_e \approx 1 \cdot 10^{10}$
 1,78 [GeV] $n_e \approx 1 \cdot 10^9$



Die maximalen Abweichungen der Einzelmesswerte sind so klein, daß sie in diesem Maßstab noch nicht dargestellt werden können. Bitte hierzu unbedingt Erklärung S. 31 lesen.

Abb. 30.

Strom-Spannungs-Kennlinien des Sekundäremissionsquantameters.

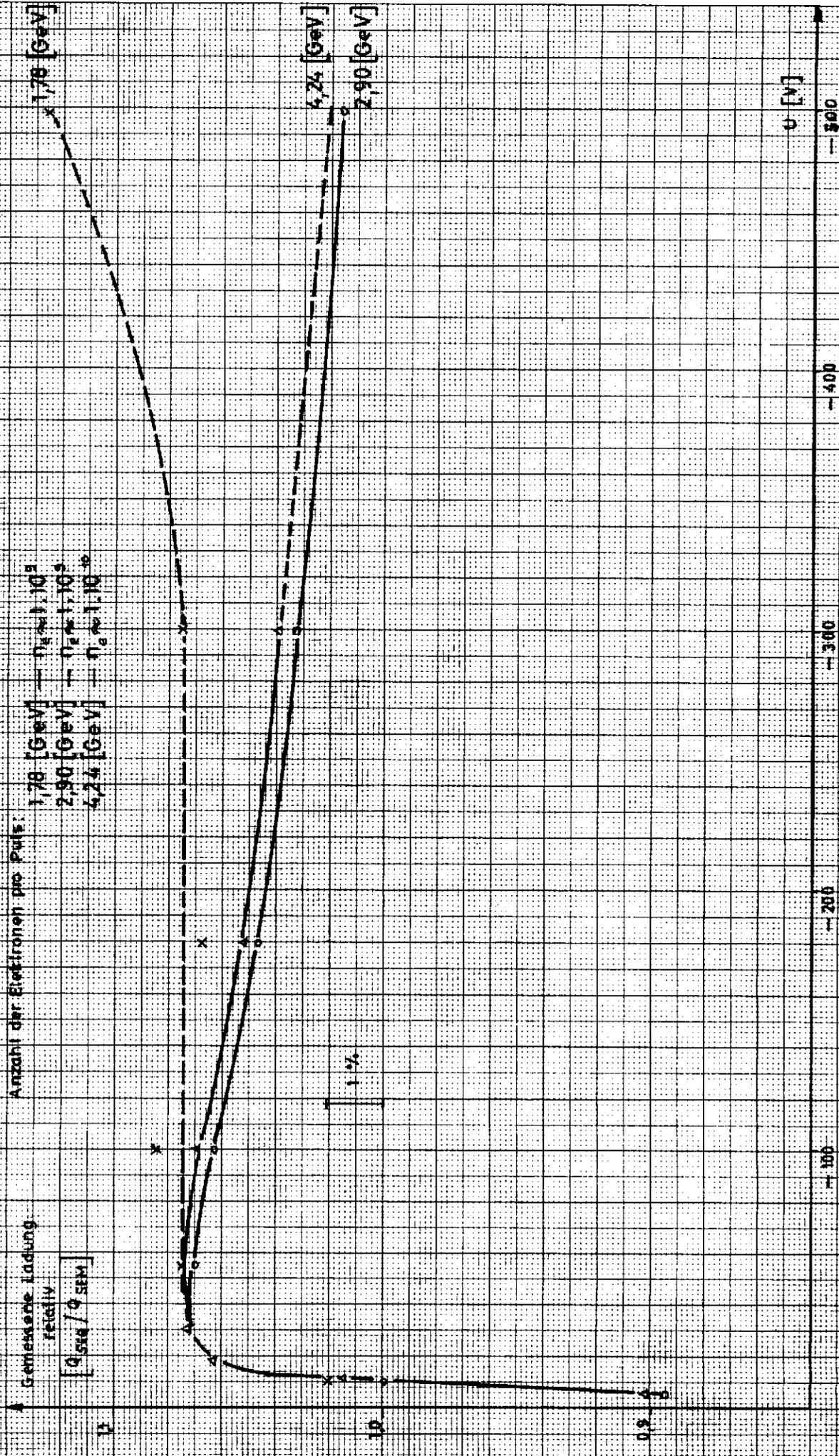


Abb. 31.

Strom-Spannungs-Kennlinien (Plateau) des Sekundärmissionsquantameters.

Gemessene Ladung

relativ

$[Q_{\text{gem}} / Q_{\text{Stm}}]$

Angelegte Spannung

negativ

positiv



Anzahl pro Puls:

Elektronenrate $n_e \approx 1 \cdot 10^{10}$

Primärer Strahl: $2,90$ [GeV]

Elektronenrate $n_e \approx 1 \cdot 10^{10}$

γ -Rate $n_\gamma \approx 4 \cdot 10^7$

Primärer Strahl: $2,82$ [GeV]

100

200

300

400

500

U [V]

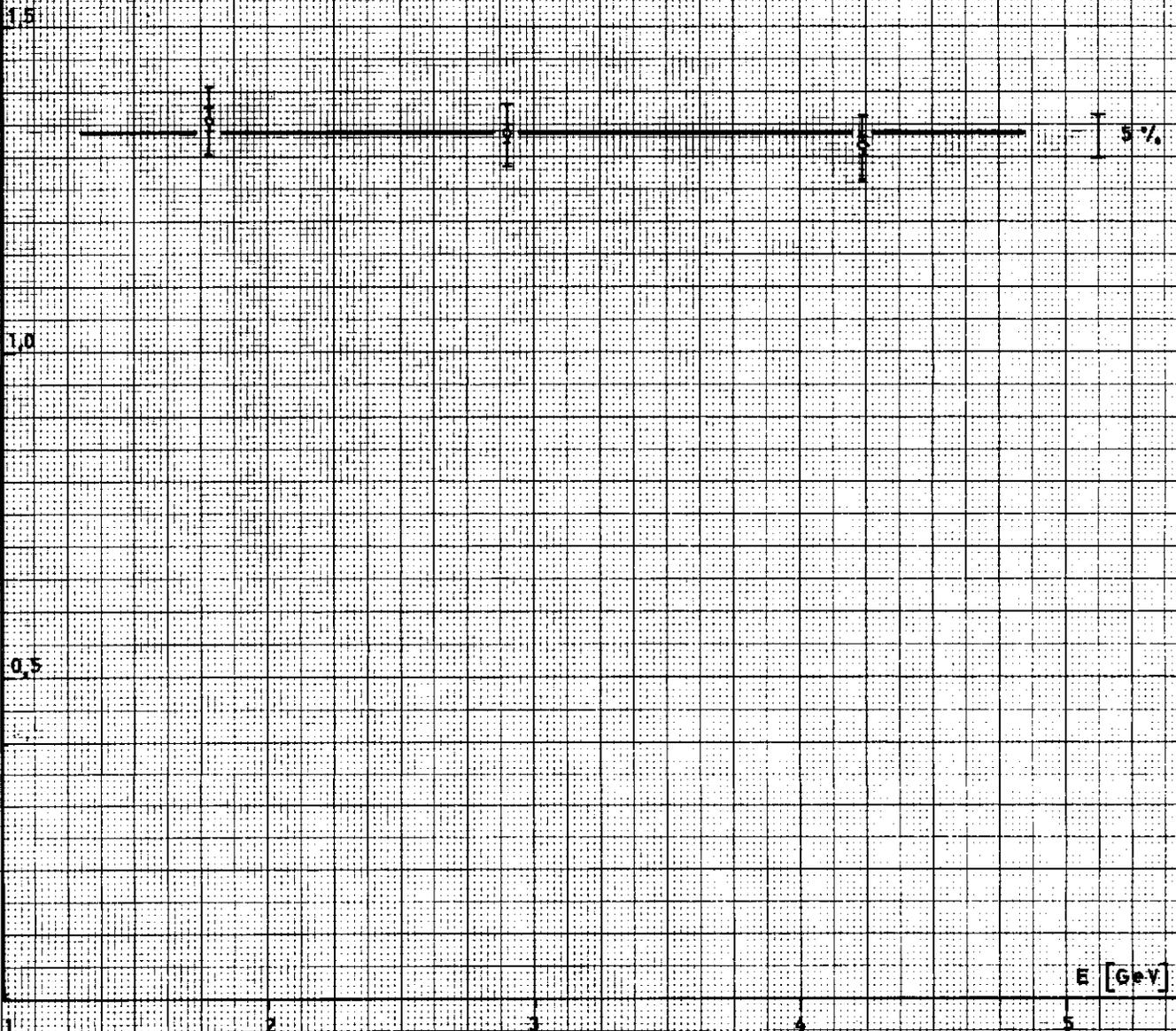
Abb. 32:

Energieabhängigkeit der Eichkonstanten des Sekundäremissionsquantameters.

Anzahl der Elektronen pro Pulse: 1,78 [GeV] $n_e \approx 1 \cdot 10^9$
2,90 [GeV] $n_e \approx 1 \cdot 10^{10}$
4,24 [GeV] $n_e \approx 1 \cdot 10^{10}$

Eichkonstante K_{es}
 $\cdot 10^{21} [\text{MeV} \cdot \text{Coul}^{-1}]$

⊥ Messpunkt mit mittlerem Messfehler (innerer Bereich) und zusätzliche Fehler zur Berücksichtigung der Unsicherheit der Strahlhöhe (äußerer Bereich).



Zunahme in %

usw.

usw.

usw.

usw.

usw.

usw.

usw.

usw.

usw.

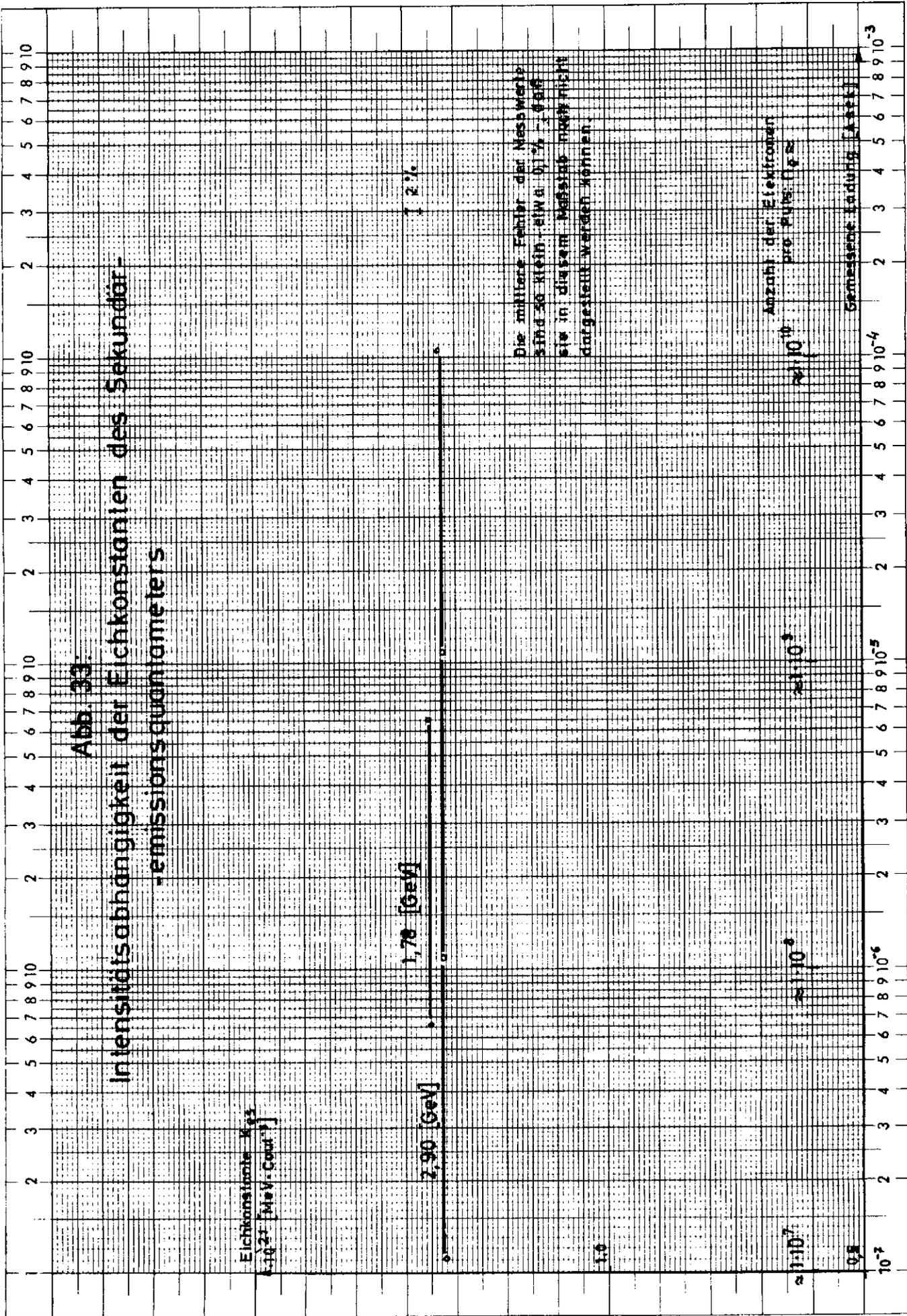


Abb. 33:
 Intensitätsabhängigkeit der Eichkonstanten des Sekundär-emissionsquantameters

Eichkonstante K_{ES}
 $(10^{-2} \text{ MeV} \cdot \text{Count}^{-1})$

1,70 [GeV]

2,90 [GeV]

1,2%

Die mittlere Fehler der Messwerte sind so klein - etwa 0,1% - daß sie in diesem Maßstab nicht dargestellt werden können

Anzahl der Elektronen
 pro Pulse (N_e)

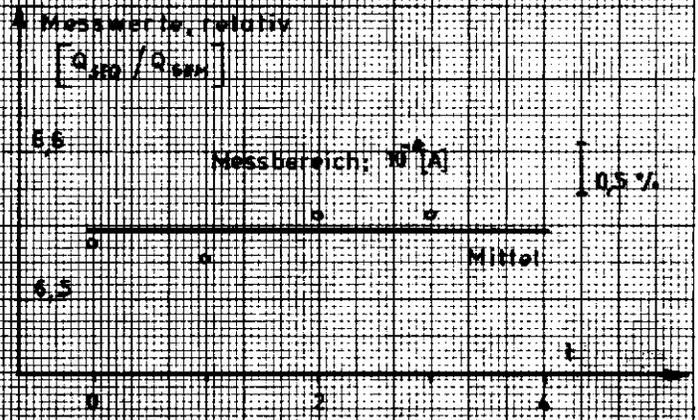
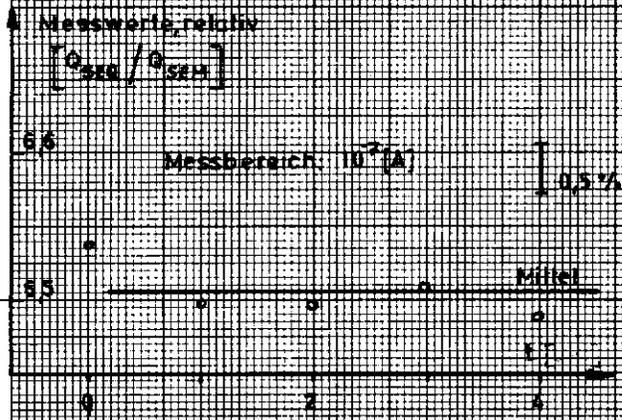
Gemessene Ladung [A·s]



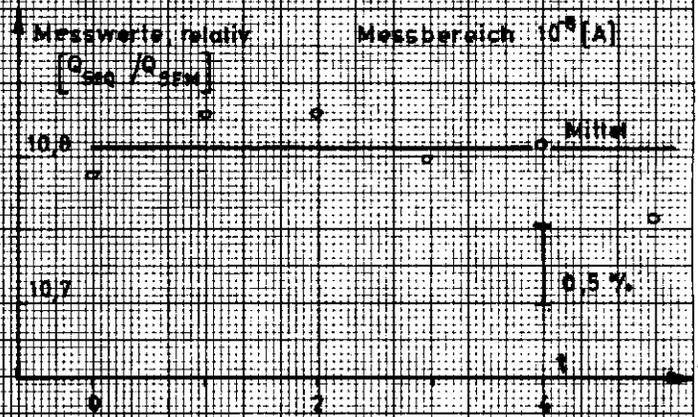
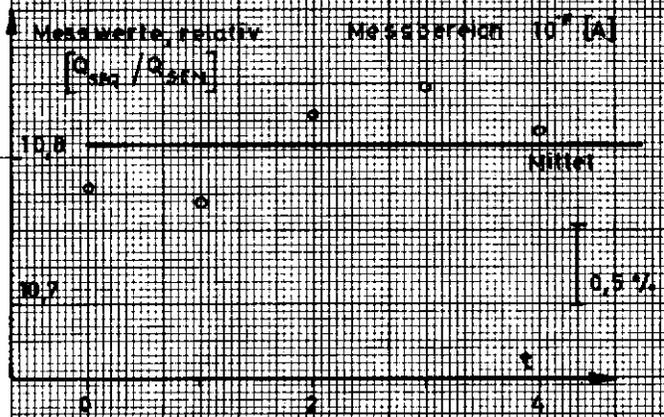
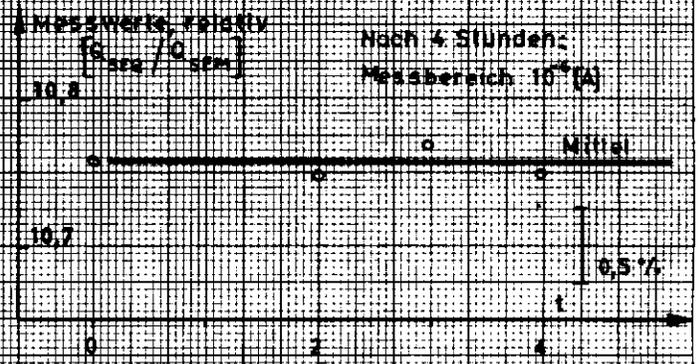
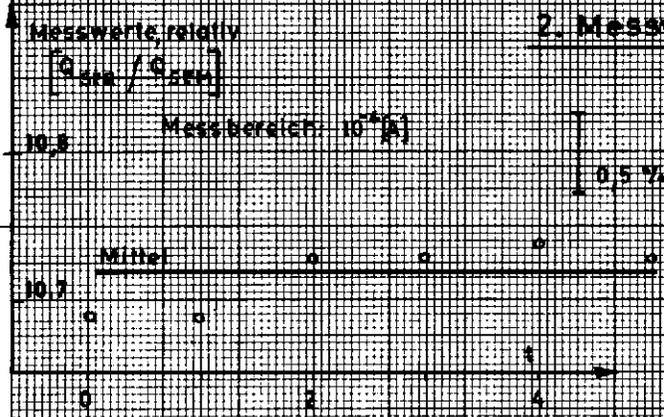
Abb. 34:

Zeitabhängigkeit der Messwerte bei der Eichung des Sekundäremissionsquantameters.

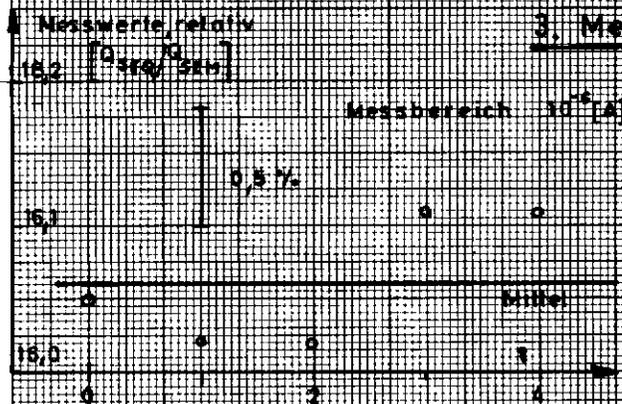
1. Messwerte bei 1,78 [GeV]:



2. Messwerte bei 2,90 [GeV]:



3. Messwerte bei 4,24 [GeV]:



1 Einheit der Zeitskala entspricht der mittleren Dauer einer Einzelmessung, d. h. etwa 150-200 sec.

2
3
4

5
6
7

8
9
10