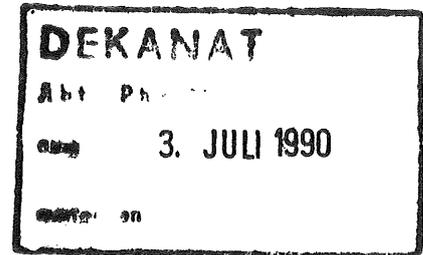


Studien zur Produktion schwerer Quarks bei HERA
und Messungen von Widerstandsbeschichtungen in
Kalorimetermodulen des H1-Detektors



3. Juli 1990

Diplomarbeit
vorgelegt von

Britta Kalle

Lehrstuhl für
Experimentelle Physik V
Abteilung Physik
Universität Dortmund

	1
Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	6
1. Einleitung	7
1.1 Der Speicherring HERA	8
1.2 Der H1-Detektor	10
1.3 Die Ziele der Arbeit	14
2. Beschreibung der Elektron-Proton-Wechselwirkungen	16
2.1 Das Standardmodell	16
2.2 Die tief inelastische Streuung	17
2.3 Die Boson-Gluon-Fusion	18
3. Die Generatoren für die Monte Carlo Simulation von Wechselwirkungen bei HERA	21
3.1 LEPTO 5.2	22
3.2 HFLGEN 1.3	23
3.3 JETSET 6.3	24
4. Untersuchungen zur Produktion schwerer Quarks	28
4.1 Impulsspektren Schwerer-Quark-Reaktionen im H1-Detektor	28
4.2 Charakteristische Größen der Ereignisse	37
5. Die elektromagnetischen Kalorimeter FB2E und BBE des H1-Detektors	41
5.1 Aufbau und Funktionsweise der Kalorimeter	41
5.1.1 Beschreibung von FB2E	42
5.1.2 Beschreibung von BBE	45
5.2 Herstellung und Eigenschaften der hochohmigen Widerstandsbeschichtung der HV-Platten	47

6. Messung von Oberflächenwiderständen	50
6.1 Messung von Widerständen	51
6.2 Berücksichtigung von Kontaktwiderständen	52
6.3 Die Entwicklung von Meßköpfen	54
6.3.1 Die Berechnung des Geometriefaktors	55
6.3.2 Die Konstruktion des ersten Meßkopfes	57
6.3.3 Tests mit dem ersten Meßkopf	59
6.3.4 Messungen an 30 HV-Platten	62
6.3.5 Konstruktion und Eigenschaften des zweiten Meßkopfes	63
7. Die Serienmessungen und ihre Auswertungen	69
7.1 FB2E	69
7.2 BBE	74
7.3 Messung von Alterungserscheinungen der Widerstandsbeschichtung	79
Zusammenfassung	83
Anhang	84
Literaturverzeichnis	95
Danksagung	99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Seite
1.1 : Anlage des Beschleunigersystems von HERA	9
1.2 : Perspektivische Darstellung des H1-Detektors	11
2.1 : Die Elemente des Standardmodells	16
2.2 : Wahrscheinlichkeit für elektromagnetische Reaktionen und Prozesse der schwachen Wechselwirkung als Funktion der verfügbaren Energie	17
2.3 : Schematische Darstellung der tief inelastischen Streuung bei HERA	18
2.4 : CC-Wechselwirkung mit Flavour-Mixing zur Erzeugung eines schweren Quarks	19
2.5 : Diagramme der Boson-Gluon-Fusion für den geladenen und den neutralen Strom	19
3.1 : Schematische Darstellung der String-Fragmentation	21
4.1 : Lage der einzelnen Kalorimetermodule des H1-Detektors	29
4.2 : Mittlerer Gesamtimpuls \bar{p}_{TOT} der Teilchen des Endzustandes der $b\bar{b}$ -Produktion für die 8 Kalorimeter-Module des H1-Detektors	31
4.3 : Auf den Raumwinkel $\Delta\Omega$ jedes Kalorimetermoduls des H1-Detektors normierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für Teilchen des Endzustandes der $b\bar{b}$ -Produktion	32
4.4 : Unnormierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für jedes Kalorimetermodul des H1-Detektors aller Teilchen im Endzustand der $b\bar{b}$ -Produktion	33
4.5 : Mittlerer Gesamtimpuls \bar{p}_{TOT} der Teilchen des Endzustandes der $c\bar{c}$ -Produktion für die 8 Kalorimeter-Module des H1-Detektors	34
4.6 : Auf den Raumwinkel $\Delta\Omega$ jedes Kalorimetermoduls des H1-Detektors normierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für Teilchen des Endzustandes der $c\bar{c}$ -Produktion	35
4.7 : Unnormierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für jedes Kalorimetermodul des H1-Detektors aller Teilchen im Endzustand der $c\bar{c}$ -Produktion	36
4.8 : Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der BGF für $b\bar{b}$ -, $c\bar{c}$ -, $t\bar{t}$ - und $\bar{t}b$ -Produktion	37
a) von Q^2	
b) von \sqrt{s}	

4.9 :	Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der BGF für $b\bar{b}$ -, $c\bar{c}$ -, $t\bar{t}$ - und $\bar{t}b$ -Produktion	38
	a) von W	
	b) von ΣE_T	
4.10 :	Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der NC BGF für $b\bar{b}$ - und $c\bar{c}$ -Produktion von der Circularität C nach einem Schnitt von $E_T > 40$ GeV	39
4.11 :	Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der NC BGF für $b\bar{b}$ - und $c\bar{c}$ -Produktion vom minimalen Winkel α_{min} den Elektronen aus den $Q\bar{Q}$ -Zerfällen zu benachbarten Teilchen des Endzustandes annehmen	40
5.1 :	Schematischer Aufbau	41
	a) der Hochspannungsplatten	
	b) der Ausleseplatten	
5.2 :	Plattenfolge im Kalorimeter FB2E inklusive der Stützkonstruktion	42
5.3 :	Perspektivische Darstellung des Kalorimeters FB2E	43
5.4 :	Pad-Einteilung auf der Ausleseplatte im Kalorimeter FB2E	44
5.5 :	Perspektivische Darstellung eines BBE-Stacks	45
5.6 :	Zeichnung einer BBE-Platte	46
5.7 :	Abhängigkeit des Oberflächenwiderstandes der HV-Platten-Beschichtung von der Härtungsdauer und vom Rußanteil in Gewichtsprozent	47
6.1 :	Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmeßgerät Schaltung für kleine Widerstände	51
6.2 :	Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmeßgerät Schaltung für große Widerstände	52
6.3 :	Zweipolschaltung	53
6.4 :	Vierpolschaltung	53
6.5 :	Anordnung der vier Elektroden eines Meßkopfes zur Bestimmung eines Oberflächenwiderstandes aus Strom- und Spannungsmessung	54
6.6 :	Der Geometriefaktor G als Funktion des äußeren Radius r_{au} für mehrere ausgesuchte Werte des inneren Radius r_{i}	56
6.7 :	Der Geometriefaktor G als Funktion des inneren Radius r_{i} für mehrere ausgesuchte Werte des äußeren Radius r_{au}	56
6.8 :	Längsschnitt des ersten Meßkopfes für Oberflächenwiderstände	58
6.9 :	1. benutzte Schaltung zur Messung von Oberflächenwiderständen	58
6.10 :	Relative Abweichungen zwischen den Meßwerten der Oberflächenwiderstände, die mit dem Meßkopf bestimmt wurden, und den Kontrollmessungen an definierten, quadratischen HRC-Flächen	60
6.11 :	Schematische Darstellung der Verteilung der sechs Meßpositionen auf einer HV-Platte	62

6.12:	Verteilungen aller Oberflächenwiderstandswerte	62
	a) von HV-Platten, die in einem Umluftofen gehärtet wurden	
	b) von HV-Platten, die in einem Konvektionsofen gehärtet wurden	
6.13:	Schematischer Längsschnitt des zweiten Meßkopfes für Oberflächenwiderstände	64
6.14:	2. verwendete Schaltung zur Serienmessung von Oberflächenwiderständen	67
7.1:	Schematische Darstellung der Verteilung der drei Meßpositionen auf der Ober- und der Unterseite einer FB2E-HV-Platte	69
7.2:	Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der FB2E-HV-Plattenseiten	70
	a) für Meßposition 1	
	b) für Meßposition 2	
	c) für Meßposition 3	
	d) für alle Meßpositionen zusammen	
7.3:	Verteilung der mittleren Oberflächenwiderstände der FB2E-HV-Plattenseiten	71
7.4:	Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der FB2E-HV-Plattenseiten	72
	a) für die definierte Oberseite	
	b) für die Seite mit dem höheren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte	
	c) für die definierte Unterseite	
	d) für die Seite mit dem niedrigeren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte	
7.5:	Verteilung der Massen	73
	a) der FB2E-HV-Platten	
	b) der FB2E-Ausleseplatten (Pad-Boards)	
7.6:	Schematische Darstellung der Verteilung der drei Meßpositionen auf der Ober- und der Unterseite einer BBE-HV-Platte	74
7.7:	Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der BBE-HV-Plattenseiten	75
	a) für Meßposition 1	
	b) für Meßposition 2	
	c) für Meßposition 3	
	d) für alle Meßpositionen zusammen	
7.8:	Verteilung der mittleren Oberflächenwiderstände der BBE-HV-Plattenseiten	76
7.9:	Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der BBE-HV-Plattenseiten	77
	a) für die definierte Oberseite	
	b) für die Seite mit dem höheren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte	
	c) für die definierte Unterseite	

	d) für die Seite mit dem niedrigeren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte	
7.10:	Verteilung der Massen	78
	a) der BBE-HV-Platten	
	b) der BBE-Ausleseplatten (Pad-Boards)	
7.11:	Zeitlicher Verlauf des mittleren Oberflächenwiderstandes R_F einer FB2E-HV-Platte, die in der Mitte des Umluftofens gehärtet wurde	80
	a) Verlauf für die am 21.03.1989 bedruckte Seite 1193	
	b) Verlauf für die am 22.03.1989 bedruckte Seite 1082	
7.12:	Zeitlicher Verlauf des mittleren Oberflächenwiderstandes R_F einer FB2E-HV-Platte, die in der Mitte des Konvektionsofens gehärtet wurde	81
	a) Verlauf für die am 21.03.1989 bedruckte Seite 976	
	b) Verlauf für die am 22.03.1989 bedruckte Seite 954	
	Anhang: Impulsverteilungen im H1-Detektor	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Seite
2.1 : Charm-Wirkungsquerschnitte bei HERA	20
2.2 : Bottom-Wirkungsquerschnitte bei HERA	20
3.1 : Parameter des Standardmodells	22
3.2 : Protokoll eines simulierten $b\bar{b}$ -Ereignisses	25

1. Einleitung

Das Forschungsgebiet der Hochenergiephysik ist die Ergründung der Struktur der Materie. Die Frage nach den elementaren Bausteinen und den Kräften, die sie zusammenhalten, sowie den Wechselwirkungen, die sie untereinander ausführen, wird mit Hilfe immer weiter entwickelter Apparaturen untersucht.

Den heutigen Vorstellungen liegt das Standardmodell (s. Kapitel 2.1) zugrunde. Demzufolge unterscheidet man zwischen Fermionen, den Elementarteilchen der Materie, und Bosonen, durch die die Wechselwirkungen ausgetauscht werden. Es gibt zwei Sorten von Fermionen, die man als Quarks und Leptonen bezeichnet. Sie lassen sich in drei Generationen gruppieren mit jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen. Die Eigenart der Quarks besteht darin, daß sie nicht isoliert auftreten, sondern nur zusammenhängend, wobei die Kräfte zwischen ihnen durch sogenannte Gluonen vermittelt werden. Zum Aufbau der uns umgebenden Materie tragen insbesondere die u - und die d -Quarks als Bestandteile von Proton und Neutron sowie das Elektron, der bekannteste Vertreter der Leptonen, bei.

Es sind jedoch noch viele Fragen offen. Warum gibt es gerade zwei mal sechs Bausteine? Sind sie wirklich elementar, oder weisen auch Quarks und Leptonen wiederum eine Substruktur auf? Gibt es Phänomene oder neue Teilchen, die das Standardmodell erweitern oder sogar widerlegen? Kann man den Aufbau der bekannten Teilchen genauer beschreiben und besser erklären? Ebenso steht auch noch der Nachweis des sechsten und schwersten Quarks aus.

Zur Klärung all dieser Fragen werden in der Hochenergiephysik komplexe Anlagen entwickelt, in denen Teilchen auf sehr hohe Energien beschleunigt und anschließend zur Kollision gebracht werden. Die dabei entstehenden Produkte werden in Detektoren, die die Wechselwirkungspunkte umgeben, erfaßt und können somit näher bestimmt werden.

Die Grundlage für diese Experimente bildet die Beziehung von de Broglie:

$$\lambda = h/p .$$

Sie ordnet jedem Teilchen mit dem Impuls p eine Wellenlänge λ zu. Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum mit

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} .$$

Das bedeutet, daß man Teilchen mit Impulsen

$$p \geq h/\lambda$$

benötigt, um in einem Objekt Strukturen in der Größenordnung von λ auflösen zu können. So müßten beispielsweise Elektronen Energien $> 1.2 \text{ GeV}$ besitzen, um damit das Innere eines Nukleons, d. h. einen Bereich $< 10^{-13} \text{ cm}$, zu erschließen. Hohe Energien sind auch notwendig zur Erzeugung neuer Teilchen gemäß der Einsteinschen Energie-Masse-Äquivalenz

$$E = m \cdot c^2 .$$

(Die Lichtgeschwindigkeit c wird im folgenden gleich 1 gesetzt.)

1.1 Der Speicherring HERA

Die oben gestellten Fragen können nur erforscht werden, wenn Teilchen genügend hoher Energie zur Verfügung stehen. Zu diesem Zweck wird auf dem DESY-Forschungsgelände bei Hamburg ein Ringbeschleuniger mit dem Namen HERA (für Hadron-Elektron-Ring-Anlage) gebaut, in dem 30 GeV Elektronen mit 820 GeV Protonen kollidieren. Die ersten Experimente sind für Anfang 1991 geplant.

Mit HERA wird es möglich sein, Abstände bis zu einigen 10^{-18} cm aufzulösen, d. h. man kann Elektronen und Quarks auf eine Substruktur in dieser Größenordnung untersuchen. Neue Teilchen können bis zu einer Energie von ca. 314 GeV produziert werden [WOL86]. Entscheidend ist hierfür die Energie E_{CM} im Schwerpunktsystem:

$$E_{CM}^2 = s = (\mathbf{p}_p + \mathbf{p}_e)^2 ,$$

wobei \mathbf{p}_p und \mathbf{p}_e die Viererimpulse von Proton und Elektron sind. Für den Viererimpuls

$$\mathbf{p} = (E, \mathbf{p})$$

eines Teilchens mit der Energie E und dem Impuls \mathbf{p} (vektorielle Größen sind durch Fettdruck gekennzeichnet) gilt die Beziehung

$$p^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

(m ist die Ruhemasse des Teilchens).

Damit erhält man die Schwerpunktsenergie

$$E_{CM} \approx (4E_p E_e)^{1/2} \approx 314 \text{ GeV} ,$$

denn die Ruhemassen können gegen die Energien E_p und E_e von Proton und Elektron vernachlässigt werden.

Aus der Formel für die Schwerpunktsenergie ist auch ersichtlich, warum es wesentlich vorteilhafter ist, beide Teilchen zu beschleunigen, statt nur einen Teilchenstrahl der Energie E_e auf ein ruhendes Target der Masse m_p zu schießen. Im letzteren Fall ergibt sich nämlich nur

$$E_{CM} \approx (2E_e m_p)^{1/2} ,$$

so daß bei einem ruhenden Proton ein Elektronenstrahl von rund 52 TeV nötig wäre, um auf eine Schwerpunktsenergie von 314 GeV zu kommen.

Neben der Energie ist auch die sogenannte Luminosität L von entscheidender Bedeutung. Sie ist für zwei sich treffende Teilchenstrahlen 1 und 2, die aus vielen einzelnen Teilchenpaketen bestehen, definiert als

$$L = \frac{N_1 \cdot N_2}{F} \cdot v \cdot n_B .$$

Dabei sind N_1 und N_2 die Anzahl der Teilchen in jeweils einem der n_B Teilchenpakete in jedem Strahl, und v ist ihre Umlauffrequenz. Der Faktor F beinhaltet die durchschnittliche Querschnittsfläche der Teilchenpakete.

Das Produkt aus der Luminosität L und dem Wirkungsquerschnitt σ einer bestimmten Reaktion ergibt die zugehörige Ereignisrate, mit der diese Reaktion auftreten kann. Daher ist für den Nachweis von Prozessen mit kleinen Wirkungsquerschnitten eine hohe Luminosität erforderlich. Für HERA wird eine Luminosität von $1-2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. von $100-200 \text{ pb}^{-1}$ pro Jahr erwartet ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Bei HERA werden die Elektronen und Protonen zunächst in einem Linearbeschleuniger isoliert und nach Durchlaufen von zwei weiteren Vorbeschleunigern (DESY und PETRA) in den HERA-Speicherring in entgegengesetzten Richtungen eingeschossen. Der Aufbau der ganzen Anlage ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

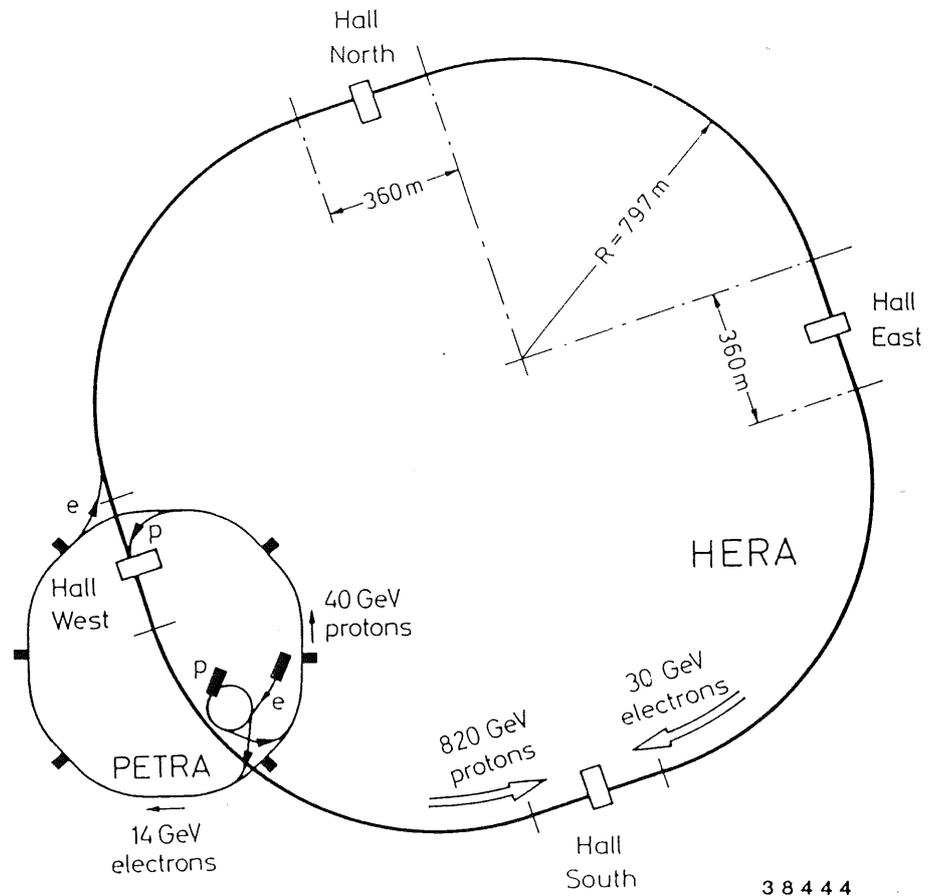


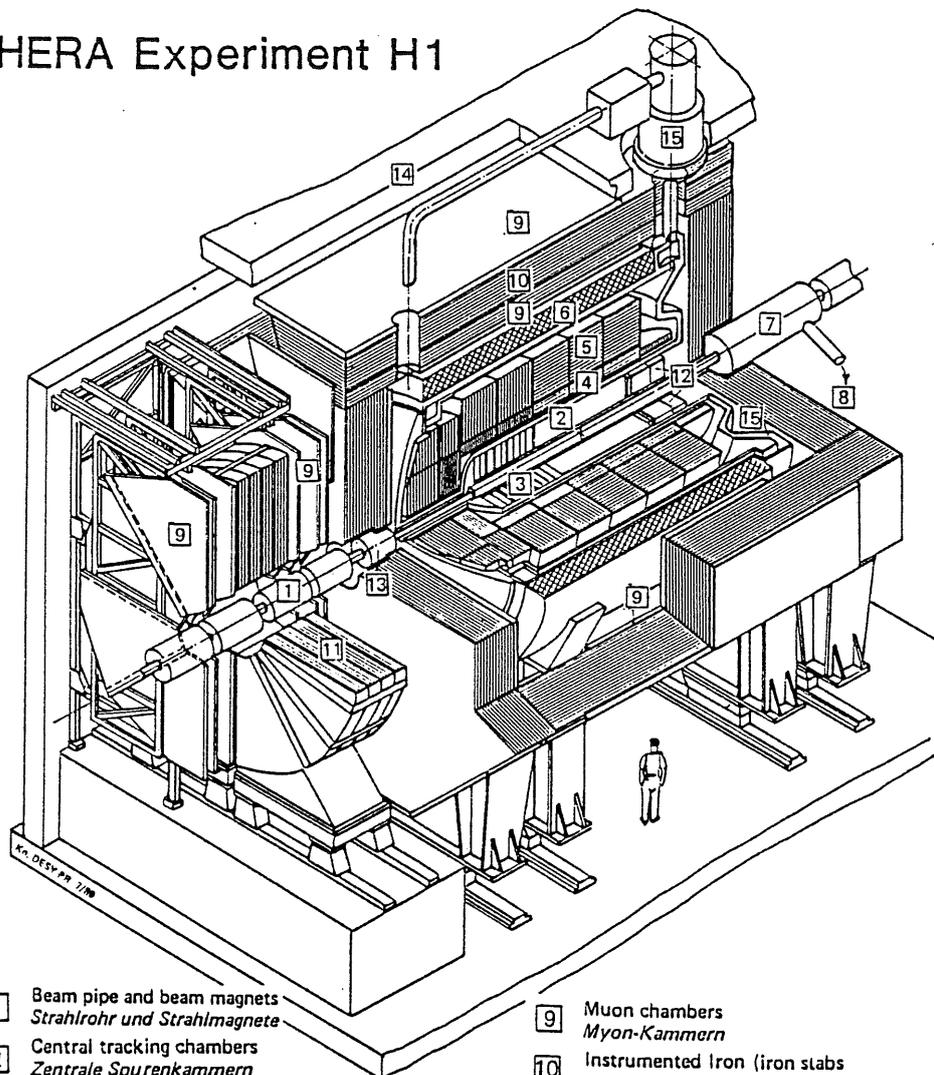
Abbildung 1.1: Anlage des Beschleunigersystems von HERA

Die Elektronen und Protonen werden in getrennten Röhren durch jeweils ein magnetisches Führungsfeld senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung auf einer geschlossenen Kreisbahn gehalten. Ein hochfrequentes elektrisches Feld führt ihnen bei jedem Umlauf Energie zu, wobei zwischen der Umlauffrequenz der Teilchen und der Beschleunigerfrequenz eine entsprechende Phasenbeziehung besteht. Bei den Elektronen muß zudem der beträchtliche Synchrotronstrahlungsverlust ständig kompensiert werden. Die Stärke des magnetischen Führungsfeldes wächst mit dem Anstieg der Teilchenenergie, um den Radius der Teilchenbahn konstant zu halten. Eine zweite Aufgabe des Magnetfeldes ist die Fokussierung der Teilchenstrahlbündel. Elektronen und Protonen bewegen sich in Form von Paketen (Bunches) mit jeweils 10^{10} Teilchen in den evakuierten Strahlrohren (Druck $\approx 10^{-15}$ bar) mit einem Umfang von 6.3 km und einem Durchmesser von 10 cm. An insgesamt vier Wechselwirkungspunkten können die Elektronen und Protonen aufeinandertreffen. Dabei sind die Bunches der Protonen 110 mm lang und die der Elektronen 8 mm. Der Durchmesser beträgt jeweils ca. 0.2 mm. Maximal können in HERA 2·210 Bunches gespeichert werden. Sie durchdringen sich alle 96 ns, was einer Bunch-Crossing-Rate von ungefähr 10 MHz entspricht. [WOL86]

1.2 Der H1-Detektor

Die Reaktionen, die bei den Elektron-Proton-Kollisionen stattfinden, führen zu einer Vielzahl von geladenen und ungeladenen Teilchen, die teilweise in Form von Bündeln, den sogenannten Jets, zumeist in die ursprüngliche Richtung des Protons fliegen wegen seines großen Impulses. Sie werden mit zwei großen Detektoren, ZEUS (Halle Süd) und H1 (Halle Nord), registriert. Abbildung 1.2 zeigt eine perspektivische Darstellung des H1-Detektors [TP89].

HERA Experiment H1



- | | | | |
|---|---|----|---|
| 1 | Beam pipe and beam magnets
<i>Strahlrohr und Strahlmagnete</i> | 9 | Muon chambers
<i>Myon-Kammern</i> |
| 2 | Central tracking chambers
<i>Zentrale Spurenkammern</i> | 10 | Instrumented Iron (iron slabs
+ streamer tube detectors)
<i>Instrumentiertes Eisen (Eisenplatten +
Streamerröhren-Detektoren)</i> |
| 3 | Forward tracking chambers and Transition radiators
<i>Vorwärtssporkammern und Übergangsstrahlungsmodul</i> | 11 | Muon toroid magnet
<i>Myon-Toroid-Magnet</i> |
| 4 | Electromagnetic Calorimeter (lead)
<i>Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)</i> | 12 | Warm electromagnetic calorimeter
<i>warmes elektromagnetisches Kalorimeter</i> |
| 5 | Hadronic Calorimeter (stainless steel)
<i>Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)</i> | 13 | Plug calorimeter (Cu, Si)
<i>Vorwärts-Kalorimeter</i> |
| 6 | Superconducting coil (1.2 T)
<i>Supraleitende Spule (1,2 T)</i> | 14 | Concrete shielding
<i>Betonabschirmung</i> |
| 7 | Compensating magnet
<i>Kompensationsmagnet</i> | 15 | Liquid Argon cryostat
<i>Flüssig Argon Kryostat</i> |
| 8 | Helium cryogenics
<i>Helium Kälteanlage</i> | | |
| | Liquid Argon
<i>Flüssig Argon</i> | | |

Abbildung 1.2: Perspektivische Darstellung des H1-Detektors

Der ausgedehntere Vorwärtsbereich des Detektors liegt in der Richtung der einlaufenden Protonen, in der die Impulse der Reaktionsprodukte am größten sind. Die einzelnen Detektorkomponenten sollen im folgenden kurz beschrieben werden. Die Numerierung bezieht sich auf die Abbildung 1.2.

1. Das Strahlrohr ist an beiden Enden des Detektors von Quadrupolmagneten umgeben, die die Teilchen auf den Wechselwirkungspunkt (durch ein Kreuz gekennzeichnet) fokussieren.
2. Die zentralen Spurenkammern bestehen aus dünnen geladenen Drähten, die in einem Gasgemisch aufgespannt sind. Es wird beim Durchgang von geladenen Teilchen ionisiert und löst einen Stromimpuls an einem oder mehreren der etwa 40000 Signaldrähte aus. Die Signale werden anschließend verstärkt und ausgelesen. Dieses Prinzip gilt sowohl für die zentrale Driftkammer, bei der noch zusätzlich die Zeit zwischen Teilchendurchgang und ausgelöstem Stromimpuls gemessen wird, als auch für die beiden Vieldraht-Proportionalkammern.
3. Die Vorwärtsspurkammern, ebenfalls Drift- und Proportionalkammern, dienen wie auch die zentralen Spurenkammern der Rekonstruktion der Teilchenbahnen und damit auch der Lokalisierung des Wechselwirkungspunktes. Die Doppelspurauflösung liegt im Bereich von 2.5 mm, die Ortsauflösung beträgt etwa 100 bis 350 μm . Ladungsvorzeichen und Impuls der Spuren werden mit Hilfe eines 1.2 Tesla Magnetfeldes bestimmt, das von einer großen supra-leitenden Spule erzeugt wird (s. Punkt 6.). Die Impulsauflösung σ_p ist besonders gut für niederenergetische Teilchen:

$$\sigma_p/p = 0.3\% \cdot p \text{ [GeV]} .$$

Die Übergangsstrahlungsdetektoren werden dazu verwendet, Teilchen unterschiedlicher Masse, aber gleichen Impulses aufgrund ihres γ -Faktors zu unterscheiden ($\gamma = E/mc^2$, m ist hier die Ruhemasse des Teilchens). Übergangsstrahlung tritt immer dann auf, wenn ein geladenes Teilchen ein Material mit veränderlicher Dielektrizitätskonstante, also z. B. sich abwechselnde Schichten zweier Substanzen, durchquert.

4. Das elektromagnetische Kalorimeter besteht aus Bleiplatten zur Absorption der Teilchenenergien und dazwischenliegenden Schichten aus flüssigem Argon, das von den durchgehenden Teilchen ionisiert wird und somit als Nachweismedium dient. Die Platten sind abwechselnd positiv geladen und geerdet, so daß sie die freigesetzten Ladungen sammeln können. Der dadurch induzierte Impuls auf einem begrenzten Feld der Platten ist proportional zur Energie des einfallenden Teilchens. Der Name des elektromagnetischen Kalorimeters deutet an, daß besonders Elektronen und Photonen hier praktisch ihre gesamte Energie verlieren, da es ca. 30 Strahlungslängen lang ist. (Der Abstand, in dem die Energie E eines Elektrons mit Anfangsenergie E_0 beim Durchqueren einer Materialschicht x um den Faktor e abnimmt, wird Strahlungslänge X_0 genannt: $E = E_0 \cdot e^{-x/X_0}$.)

Die Energieauflösung σ_{emc} für ein Teilchen der Energie E beträgt

$$\sigma_{emc}/E = 13\% /E^{1/2} [\text{GeV}] .$$

Auch neutrale und geladene Hadronen geben hier einen Teil ihrer Energie ab.

5. Das hadronische Kalorimeter ist ähnlich wie das elektromagnetische aufgebaut. Wieder ist flüssiges Argon das Nachweismedium, aber anstelle von Blei wird Edelstahl als Absorbermaterial verwendet. Entsprechend der Strahlungslänge wird für Hadronen eine Absorptions- oder auch Wechselwirkungslänge λ_{abs} definiert. Sie gibt die mittlere freie Weglänge eines Hadrons an, bevor es beim Durchqueren von Material zu einer Wechselwirkung kommt. Bei einer Ausdehnung von ca. 6 Absorptionslängen nimmt das Kalorimeter den Großteil der Hadronenenergie auf. Die Energieauflösung σ_{had} ist schlechter als im elektromagnetischen Kalorimeter:

$$\sigma_{had}/E = 50\% /E^{1/2} [\text{GeV}] .$$

Dafür sind vor allem Leckverluste, π^0 -Fluktuationen und Sampling-Fluktuationen verantwortlich.

Das elektromagnetische und das hadronische Kalorimeter sind in 45000 Kanäle aufgeteilt.

6. Die supraleitende Spule erzeugt ein homogenes zylindersymmetrisches Magnetfeld von 1.2 Tesla. Durch das Feld werden geladene Teilchen auf eine schraubenförmige Bahn gelenkt, aus deren Krümmungsradius man den transversalen Impuls der Teilchen bestimmen kann.
7. Der Kompensationsmagnet gleicht das Feld der supraleitenden Spule so aus, daß der Strahl stabilisiert wird.
8. Die Helium-Kälteanlage sorgt für die für die Supraleitung notwendige Temperatur.
9. Die Myonkammern,
10. das instrumentierte Eisen (Eisenplatten mit Streamerröhren-Detektoren)
11. und der Myon-Toroid-Magnet dienen dem Nachweis von Myonen und haben die Funktion eines Tailcatchers, d. h. sie erfassen den restlichen Teil der hadronischen Schauer, die nicht vom Kalorimeter absorbiert werden. Daneben dient das Eisenjoch dem magnetischen Rückfluß.
12. Das warme elektromagnetische Kalorimeter besteht aus Blei- und Szintillatorplatten und befindet sich im Gegensatz zum Flüssig-Argon-Kalorimeter auf Raumtemperatur. Es hat den Zweck, das gestreute Elektron nachzuweisen.

13. Das Vorwärts-Kalorimeter (Plug) ist aus Kupfer-Silizium-Schichten aufgebaut und schließt den Detektor nach vorne bis auf 0.7° ab. Da man eine sehr starke Bündelung der Teilchen in Protonrichtung erwartet, sollen die Strahlrohrverluste so gering wie möglich gehalten werden.
14. Die Betonabschirmung umschließt den ganzen Detektor und schützt die Außenwelt gegen Strahlung.
15. Der Flüssig-Argon-Kryostat, in dem sich das Kalorimeter befindet, gewährleistet die nötige Temperatur von -70°C .

Näheres s. [TP86], [TP87], [TP89], [HERA88].

1.3 Die Ziele der Arbeit

HERA wird der erste Elektron-Proton Beschleuniger sein. Bei einer Schwerpunktsenergie von 314 GeV sind maximale Impulsüberträge von $Q^2_{\text{max}} \approx 10^5 \text{ GeV}^2$ möglich. Ebenso kann die Skalenvariable x ($0 \leq x \leq 1$) bis zu Werten zwischen 10^{-4} und 10^{-3} gut gemessen werden [SCH6/89]. Insgesamt wird der heute zugängliche kinematische Bereich um zwei Größenordnungen erweitert. Das eröffnet neben neuen Forschungsmöglichkeiten auf dem Gebiet der tief inelastischen Streuung auch den Zugang zu interessanten physikalischen Phänomenen bei niedrigen Q^2 -Werten. Insbesondere werden für die Produktion schwerer Quarks in Verbindung mit der hohen Luminosität bei HERA von $100\text{--}200 \text{ pb}^{-1}$ pro Jahr große Ereignisraten erwartet. Man kann während der Laufzeit eines Jahres mit 10^8 Charm-Quarks und 10^6 Bottom-Quarks rechnen [SCH2/89]. Somit nimmt HERA auch die Funktion einer sogenannten "Bottom-Fabrik" ein.

In dieser Arbeit sollen die Prozesse, die bei HERA zur Produktion schwerer Quarks führen, auf dem Computer simuliert und untersucht werden. Hierzu war es nötig, die erforderlichen Programmpakete auf dem Hochschulrechner der Universität Dortmund zu installieren sowie für die generierten Ereignisse verschiedene Analyseprogramme zu entwickeln. Dabei sollten die charakteristischen Größen für Charm- und Bottom-Quarks miteinander verglichen werden, da durch geeignete Anforderungen die Ereignisse, in denen B-Quarks erzeugt werden, gegen den großen Untergrund der Charm-Produktion separiert werden können.

Ebenso wichtig wie eine hohe Rate ist der Nachweis und das richtige Erkennen eines Ereignisses in geeigneten Detektoren. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Impulsverteilung der Reaktionsprodukte in den einzelnen Detektorbereichen. Die Verteilungen wurden in dieser Arbeit am Beispiel des H1-Detektors behandelt, an dessen Bau der Lehrstuhl für experimentelle Physik V der Universität Dortmund beteiligt ist.

Aus der Herstellung der beiden Detektormodule FB2E und BBE des elektromagnetischen Kalorimeters von H1 ergab sich eine weitere Aufgabe dieser Arbeit. Die Absorberplatten, an die (positive) Hochspannung angelegt wird, sind mit einer

hochohmigen Schicht bedruckt, die verschiedene Anforderungen erfüllen muß. Zur Gewährleistung eines mittleren Oberflächenwiderstandes von $3 \text{ M}\Omega$ auf jeder Plattenseite mußte ein Meßkopf und ein Verfahren entwickelt werden, um die Serienmessungen aller produzierten Platten durchführen zu können.

2. Beschreibung der Elektron-Proton-Wechselwirkungen

2.1 Das Standardmodell

Aus heutiger Sicht erscheinen vier Wechselwirkungen als fundamental:

1. die Gravitation, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll,
2. die starke Wechselwirkung, die sehr kurzreichweitig ist und für den Aufbau und Zusammenhalt der Nukleonen verantwortlich ist,
3. die elektromagnetische Wechselwirkung, der alle elektrisch geladenen Teilchen unterliegen,
4. die schwache Wechselwirkung, die z. B. den β -Zerfall verursacht.

Eine Übersicht ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Im oberen Teil befinden sich die Elementarteilchen, die man als Fermionen bezeichnet mit Spin $\frac{1}{2}$, während im unteren Teil die Eichbosonen, die Austauscheteilchen der Wechselwirkungen, mit ganzzahligem Spin aufgeführt sind. Beim Übergang von der klassischen Feldtheorie zur modernen Quantenmechanik traten an die Stelle der Felder die Feldquanten, die im Rahmen der beschreibenden gruppentheoretischen Modelle die Eichbosonen der Eichgruppen darstellen.

STANDARD-MODELL

		Quark		Lepton		
Generationen	1	u	d	e	ν_e	Spin 1/2
	2	c	s	μ	ν_μ	
	3	t	b	τ	ν_τ	
Quanten- zahlen	La- dung	2/3	-1/3	-1	0	
	Far- be	farblos		farblos		
Farbkraft						
El. magn.						
schwach						

Dazu: Antiteilchen (gleiche Massen, umgekehrte Quantenzahlen)

Higgs - Skalar (farblos, elektr. neutral)

Farb- kraft	8	Gluon	Spin 1
Elektro- magn.	1	Photon	
schwach	3	W-, Z-Boson	

Abbildung 2.1: Die Elemente des Standardmodells

Die allgemeine Frage ist, ob sich die vier Wechselwirkungen noch weiter zusammenfassen lassen. So gelang mittlerweile schon die Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung zur sogenannten elektroschwachen Wechselwirkung nach der Theorie von Glashow, Weinberg und Salam. Sie fand ihre Bestätigung in der Entdeckung der W^- - und Z -Bosonen am Proton-Antiproton-Speicherring im CERN. Im Energiebereich, der durch den Elektron-Proton-Speicherring HERA erschlossen wird, erreichen die schwachen Wechselwirkungen die gleiche Stärke wie die elektromagnetischen Kräfte (s. Abbildung 2.2) [SCHM87].

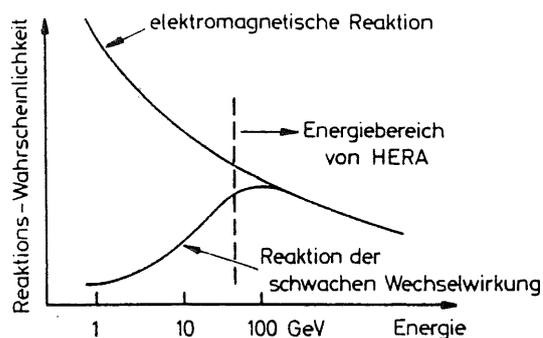


Abbildung 2.2: Wahrscheinlichkeit für elektromagnetische Reaktionen und Prozesse der schwachen Wechselwirkung als Funktion der verfügbaren Energie

2.2 Die tief inelastische Streuung

In der HERA-Anlage werden Elektronen und Protonen bei so hohen Energien frontal aufeinandergeschossen, daß keine elastische Streuung am Proton als ganzes mehr stattfindet, sondern die Struktur des Protons erkennbar wird: die inelastische Streuung am Proton bedeutet eine elastische Streuung an seinen Konstituenten, den sogenannten Quarks. Bei HERA sind die Proton-Energien so hoch, daß die Bindungsenergien der Quarks im Proton vernachlässigt werden können. Die Protonen können daher als Strahl "freier" Quarks angesehen werden, weswegen HERA auch als "Electron-Quark-Collider" bezeichnet wird. Die Elektronen reagieren mit einem der Quarks durch Austausch eines Feldquants: Photon, Z^0 -Boson oder W^- -Boson. Das getroffene Quark wird herausgeschossen und bildet einen Jet von Hadronen. Die beiden "Zuschauer" (Spectator)-Quarks fliegen weiter im Strahlrohr und bilden einen Hadronenjet, der meistens nicht beobachtbar ist. Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Darstellung der tief inelastischen Streuung bei HERA [SCHM87].

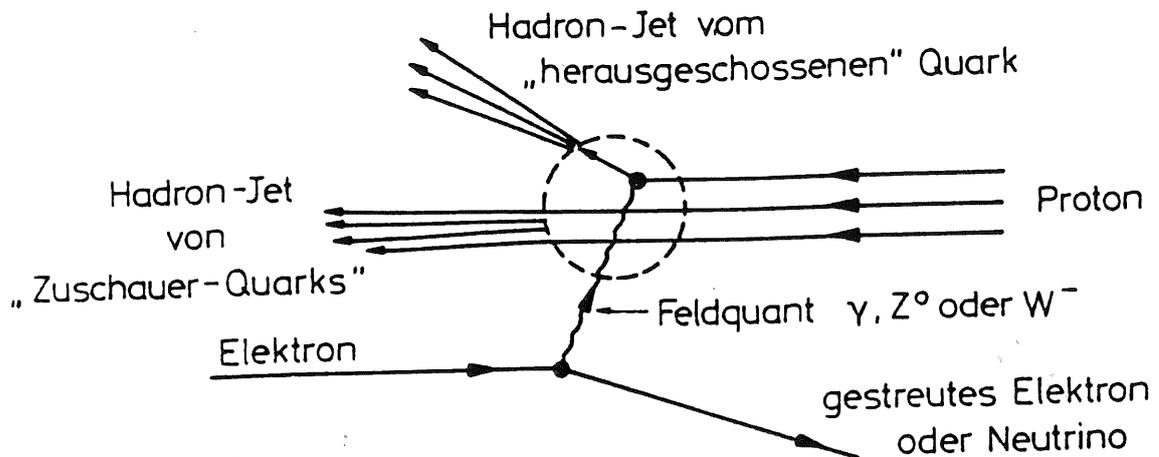


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der tief inelastischen Streuung bei HERA

Während der Austausch eines Photons oder Z^0 -Bosons als "neutraler Strom" (abgekürzt mit NC für neutral current) bezeichnet wird, trägt der Austausch eines W -Bosons den Namen "geladener Strom" (abgekürzt mit CC für charged current), da das geladene Elektron in ein neutrales Neutrino übergeht.

2.3 Die Boson-Gluon-Fusion

Neben der einfachen tief inelastischen Streuung im Quark-Parton-Modell (QPM), dem führenden Prozeß 1. Ordnung, werden bei HERA-Energien auch Prozesse höherer Ordnung möglich, wie die Erzeugung neuer Teilchen. Dabei gilt das Interesse besonders den schweren Quarks. Prinzipiell ist es zwar möglich, schwere Quarks durch einen Prozeß 1. Ordnung zu erzeugen, wie beim Mixing im geladenen Strom (s. Abbildung 2.4). Allerdings erweisen sich die Wirkungsquerschnitte als zu gering (s. Tabelle 2.1 und 2.2).

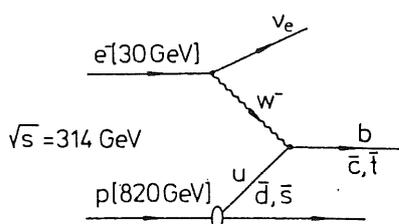
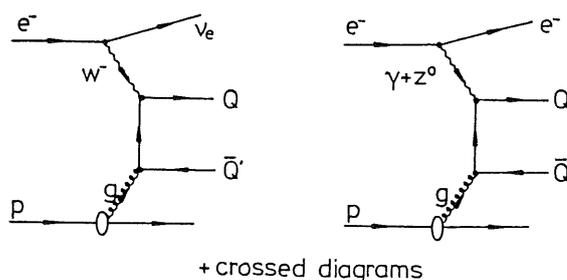


Abbildung 2.4: CC-Wechselwirkung mit Flavour-Mixing zur Erzeugung eines schweren Quarks (mit Flavour wird die Quark-Sorte bezeichnet)

Die Erzeugung schwerer Quarks wird durch einen Prozeß der nächst höheren Ordnung dominiert: der sogenannten Boson-Gluon-Fusion.

Im Proton sind neben den Quarks auch Gluonen, die Vermittler der starken Wechselwirkung, vorhanden, die jedoch nicht an ein elektroschwaches Austauschboson koppeln. Spalten die Gluonen aber in ein Quark-Antiquark-Paar auf, so ist eine Kopplung des Austauschbosons an eines der beiden Quarks möglich. Dabei kann der Strom des elektroschwachen Bosons geladen (CC BGF) oder neutral (NC BGF) sein. Die Diagramme der Prozesse sind in Abbildung 2.5 dargestellt.



+ crossed diagrams

Abbildung 2.5: Diagramme der Boson-Gluon-Fusion, links für den geladenen Strom, rechts für den neutralen Strom

Mit der Angabe der Vierervektoren (in Klammern) läßt sich die BGF schreiben als

$$e^-(l_e) + p(P) \rightarrow l'(l') + Q_f(pf) + \bar{Q}_f(p_{f'}) + X.$$

Das Gluon g trägt einen Impulsbruchteil x_g vom Protonimpuls: $p = x_g P$. Als invariantes Massenquadrat des $Q\bar{Q}'$ -Untersystems wird die Variable \hat{s} definiert:

$$\hat{s} = (p_f + p_{f'})^2.$$

Daneben sind weitere kinematische Variablen definiert:

$$Q^2 \equiv -q^2 = -(l_{\text{in}} - l)^2$$

$$W^2 \equiv (P + q)^2$$

$$x \equiv Q^2 / (2P \cdot q)$$

$$y \equiv (P \cdot q) / (P \cdot l_{\text{in}})$$

$$z \equiv (P \cdot p_r) / (P \cdot q)$$

Dabei ist Q^2 der Impulsübertrag, W^2 die invariante Masse zum Quadrat des hadronischen Systems und x die Skalenvariable.

Vergleicht man die Wirkungsquerschnitte der einzelnen Prozesse untereinander sowie für die Erzeugung der beiden schweren Quarks Charm und Bottom (s. Tabellen 2.1 und 2.2), so stellt man fest, daß der dominierende Prozeß für die Erzeugung schwerer Quarks die BGF mit Austausch eines Photons ist. Ebenso zeigt sich, daß der größte Untergrund für die Bottom-Erzeugung die Charm-Erzeugung ist. Andere Untergrundreaktionen liegen höchstens in der gleichen Größenordnung wie die Charm-Erzeugung [INSC88].

$\sigma(ep \rightarrow cX)$ [pb] at HERA ($m_c = 1.5$ GeV)								
e^-p	CC			NC $c\bar{c}$				inclusive $c + \bar{c}$
	$\bar{c}d$	$\bar{c}s$	$\bar{c}b$	NC	γ	Z	γ -Z	
BGF	0.46	8.2	0.012	5.1×10^6	5.1×10^5	0.60	4.7	1.0×10^6
e^-p	$\bar{d} \rightarrow \bar{c}$	$\bar{s} \rightarrow \bar{c}$						
QPM	0.26	3.3						3.6
e^+p	$d \rightarrow c$	$s \rightarrow c$						
QPM	0.75	3.3						4.1

Tabelle 2.1: Charm-Wirkungsschnitte bei HERA

$\sigma(ep \rightarrow bX)$ [pb] at HERA ($m_b = 5$ GeV)								
e^-p	CC			NC $b\bar{b}$				inclusive $b + \bar{b}$
	$\bar{u}b$	$\bar{c}b$	$\bar{t}b$	total	γ	Z	γ -Z	
BGF	$\leq 0.96 \times 10^{-3}$	0.012	0.13	4.2×10^3	4.2×10^3	0.35	0.59	8.4×10^3
e^-p	$u \rightarrow b$							
QPM	$\leq 0.56 \times 10^{-2}$							$\leq 0.56 \times 10^{-2}$
e^+p	$\bar{u} \rightarrow \bar{b}$							
QPM	$\leq 0.12 \times 10^{-2}$							$\leq 0.12 \times 10^{-2}$

Tabelle 2.2: Bottom-Wirkungsschnitte bei HERA

3. Die Generatoren für die Monte Carlo Simulation von Wechselwirkungen bei HERA

Monte Carlo Methoden sind mathematische Verfahren, die mit Hilfe von Zufallszahlen die numerische Berechnung komplizierter Integrale erlauben, vor allem bei einer großen Anzahl von Dimensionen. Ebenso ist es damit möglich, statistische Prozesse auf einem Computer zu simulieren. Die meisten Anwendungen basieren auf Pseudozufallszahlen, einer reproduzierbaren Folge von Zahlen, die mit einem Algorithmus berechnet werden und einer Gleichverteilung im Intervall $(0,1)$ unterliegen. Entscheidend für die Wirklichkeitsnähe der Simulation ist also ein Zufallszahlengenerator, der auch bei hoher Statistik keine Korrelationen erkennen läßt.

Für die Computersimulation der in Kapitel 2 beschriebenen Wechselwirkungen werden verschiedene Programmpakete benötigt. Die Erzeugung eines kompletten Ereignisses besteht dabei aus drei Schritten:

1. Berechnung des Matrixelementes auf Partonebene
2. Partonschauer
3. Fragmentation und Hadronisierung

Zur Erzeugung schwerer Quarks aus BGF-Ereignissen wurde der von G. Ingelman und G. Schuler geschriebene, bisher noch unveröffentlichte Monte-Carlo-Generator HFLGEN 1.3 in Verbindung mit dem Programmpaket LEPTO 5.2 von G. Ingelman benutzt. Der Partonschauer und die Lund-String-Fragmentation mit anschließender Hadronisierung erfolgt durch das Monte-Carlo-Programm JETSET 6.3 von T. Sjöstrand und M. Bengtsson [SJÖ86],[SJBE87].

Abbildung 3.1 zeigt schematisch das Modell der String-Fragmentation. Mit wachsendem Abstand wird die Energie des Feldes immer größer (Quark-Confinement), bis sie ausreicht, um ein Quark-Antiquark-Paar zu bilden.

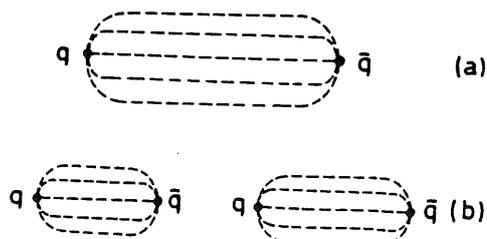


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der String-Fragmentation

Bei allen Generatoren wurde für Λ_{QCD} ein Wert von 200 MeV eingesetzt und als Strukturfunktion des Protons der von [EHLQ84] parametrisierte Satz 1 verwendet. In den nächsten Unterkapiteln werden die Generatoren kurz vorgestellt. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

<i>Quantities</i>	<i>Values</i>
CKM matrix elements	$V_{ud}^2 = 0.95$ $V_{us}^2 = 0.05$ $V_{ub}^2 = 10^{-4}$ $V_{cd}^2 = 0.05$ $V_{cs}^2 = 0.948$ $V_{cb}^2 = 0.002$ $V_{td}^2 < 4 \cdot 10^{-4}$ $V_{ts}^2 = 0.002$ $V_{tb}^2 = 0.998$
Quark masses	$m_u = 0.5 \text{ GeV}$ $m_c = 1.5 \text{ GeV}$ $m_b = 5.0 \text{ GeV}$
Weak boson masses and angle	$m_W = m_Z \cos \theta_W = \frac{38.98 \text{ GeV}}{\sin \theta_W}$ $\sin^2 \theta_W = 0.226$
Mass scales	$M_s^2 = M_g^2 = \bar{s}$
QCD scale	$\Lambda_{QCD} = 0.2 \text{ GeV}$
No. of flavours in $\alpha_s(Q^2)$	$n_f = 3$

Tabelle 3.1: Parameter des Standardmodells [BAR89]

3.1 LEPTO 5.2

Dieses Programmpaket simuliert Ereignisse der tief inelastischen Lepton-Nukleon Streuung. NC- und CC-Wechselwirkungen werden im Quark-Parton-Modell berechnet mit den elektroschwachen Kopplungen des Standardmodells und Q^2 -abhängigen Strukturfunktionen. Dabei kann gewählt werden zwischen QCD-Prozessen erster Ordnung und der Einbeziehung von Partonschauern. Bei den möglichen QCD-Prozessen handelt es sich um die einfache tief inelastische Streuung eines Quarks aus dem Nukleon, eine Streuung des Quarks mit anschließender Gluonabstrahlung und um die Boson-Gluon-Fusion in ein Quark-Antiquark Paar.

Folgende Wechselwirkungen können simuliert werden:

1. elektromagnetischer Strom: Austausch eines Photons
2. schwacher geladener Strom: Austausch eines W -Bosons
3. schwacher neutraler Strom: Austausch eines Z^0 -Bosons
4. neutraler Strom: Austausch eines Photons, Z^0 -Bosons
und der Photon- Z^0 -Interferenz

Bei der Boson-Gluon-Fusion werden nur Matrixelemente unter Vernachlässigung der Quarkmasse benutzt und sind daher für schwere Quarks nicht exakt. Der kinematische Bereich des Programms ist definiert für:

$$0.001 \leq x \leq 1$$

$$4 \text{ GeV}^2 \leq Q^2 \leq 10^8 \text{ GeV}^2 .$$

Diese Einschränkung liegt daran, daß der Propagator für die einfache tief inelastische Streuung proportional zu

$$\frac{1}{Q^4}$$

ist und damit für $Q^2 \rightarrow 0$ divergiert.

3.2 HFLGEN 1.3

Die Boson-Gluon Fusion in NC- und CC-Wechselwirkungen stellt die größte Quelle zur Produktion schwerer Quarks dar. Sie wird mit dem Generator für schwere Quarkflavours (Heavy Flavour Generator) simuliert, basierend auf den exakten Matrixelementen aus [SCHU88] unter expliter Berücksichtigung der Quarkmassen. So kommt es für $Q^2 \rightarrow 0$ nicht mehr zur Divergenz des Propagatorterms

$$\frac{1}{(m^2 + Q^2)^2} ,$$

mit m als Masse des schweren Quarks, und der erlaubte kinematische Bereich unterliegt keiner Einschränkung. Das heißt:

$$Q^2 \geq 0 \text{ und } x \geq 0.0 .$$

Die Massenskala für die starke Kopplungskonstante α_s und die Strukturfunktionen ist $\hat{s} = (p_r + p_{r'})^2$ [SCHU88].

HFLGEN 1.3 bildet ein Zusatzpaket zu LEPTO 5.2 und muß beim Ablauf der Simulation vor diesem Programm geladen werden, um einige Routinen und Parameter darin durch die modifizierten HFLGEN-Versionen zu ersetzen.

Folgende Quarks können generiert werden:

mit dem neutralen Strom der BGF:

- Charm-Anticharm, abgekürzt mit $c\bar{c}$
- Bottom-Antibottom, abgekürzt mit $b\bar{b}$
- Top-Antitop, abgekürzt mit $t\bar{t}$

mit dem geladenen Strom der BGF:

- Anticharm-Strange, abgekürzt mit $\bar{c}s$
- Anticharm-Bottom, abgekürzt mit $\bar{c}b$
- Antitop-Strange, abgekürzt mit $\bar{t}s$
- Antitop-Bottom, abgekürzt mit $\bar{t}b$

3.3 JETSET 6.3

Sobald die Partonkonfiguration eines erzeugten Quark-Antiquark ($Q\bar{Q}$) Systems feststeht, kann mit Hilfe von JETSET 6.3 die Partonschauerentwicklung erfolgen, die auf eine weitere Abstrahlung von Gluonen hinausläuft. Anschließend wird auf alle Partonen ein Lund-String-Fragmentationsalgorithmus angewendet, und danach findet die Hadronisierung statt. Hierbei werden farbneutrale Hadronen gebildet, die dann wiederum unter Berücksichtigung aller hadronischen, semi-leptonischen und leptonischen Zerfälle weiterreagieren, bis zum Schluß nur noch stabile Teilchen, d. h. mit einer Lebensdauer $> 10^{-8}$ s, übrigbleiben. Der Endzustand setzt sich hauptsächlich aus geladenen Pionen und Photonen, aber auch aus Leptonen und K -Mesonen zusammen. Als Beispiel ist in Tabelle 3.2 ein komplettes Ereignisprotokoll einer $b\bar{b}$ -Produktion aufgelistet, das eine Routine des JETSET 6.3 Programms liefert. Der Impuls des Teilchens I ist in $P(I,1)$ bis $P(I,3)$ abgelegt. Unter $P(I,4)$ steht die Energie und unter $P(I,5)$ die Masse. Die Zahl $K(I,2)$ ist ein Code für die Art des Teilchens, ein negativer Wert bedeutet ein Antiteilchen. Die Aufschlüsselung in Form eines Kürzels, inklusive Ladungsvorzeichen, befindet sich daneben in der Spalte $PART/JET$. $K(I,1)$ gibt Aufschluß über den Verlauf des Ereignisses. Sein Wert setzt sich wie folgt zusammen:

$$K(I,1) = 10000 \cdot KS + KH$$

Dabei gibt KH die Zeilennummer des Ursprungteilchens an, aus dessen Reaktion das aktuelle Teilchen stammt. KS ist ein Statuscode. $KS = 2$ bedeutet, daß das Teilchen noch zerfällt, $KS = 0$ steht für ein stabiles Teilchen im Endzustand [SJÖ86].

Die ersten Zeilen in Tabelle 3.2 beinhalten die folgenden Informationen:

- 1 einlaufendes Lepton (Elektron)
- 2 einlaufendes Nukleon (Proton)
- 3 ausgetauschtes Boson (Photon oder Z^0 oder Photon/ Z^0 -Interferenz)
- 4 gestreutes Lepton (Elektron)
- 5 ausgetauschtes Boson, Überprüfung von Zeile 3
- 6 gestreutes Lepton, Überprüfung von Zeile 4
- 7 vom Proton ausgehendes Gluon
- 8 übriggebliebener Protonrest als qqq -Colour-Oktett
- 9 erzeugtes schweres Quark (b) vor dem Partonschauer
- 10 Diquark-Protonrest
- 11 erzeugtes schweres Antiquark (\bar{b}) vor dem Partonschauer
- 12 Quark-Protonrest

Ab Zeile 13 folgt das Ergebnis des Partonschauers (abgestrahlte Gluonen) und dann die Hadronisierung mit den anschließenden Zerfällen.

In Zeile 73 taucht ein weiteres Elektron auf. Es stammt aus dem Zerfall eines B^- -Mesons (Zeile 45) in Leptonen (Zeilen 72 und 73) und ein D^0 -Meson (Zeile 74):

$$\bar{u}b \rightarrow \bar{u}c + e^- + \bar{\nu}$$

Dieses Ereignis ist damit ein Beispiel für die sogenannte Lepton-Signatur, eines der wichtigsten Merkmale für die Identifikation schwerer Quarks.

Tabelle 3.2: Protokoll eines simulierten $b\bar{b}$ -Ereignisses

EVENT LISTING (EXTENDED)								
I	K(I,1)	K(I,2)	PART/JET	P(I,1)	P(I,2)	P(I,3)	P(I,4)	P(I,5)
1	40000	7	E - B	0.00000	0.00000	29.99884	30.00107	0.00051
2	40000	41	P + B	0.00000	0.00000	-819.99316	819.99316	0.93830
3	50000	5	GA/Z V	-0.00019	-0.00058	9.70027	9.70043	-0.00074
4	0	7	E -	0.00019	0.00058	20.29955	20.29971	0.00051
5	50000	5	GA/Z V	-0.00019	-0.00058	9.70031	9.70047	-0.00074
6	40000	7	E - B	0.00019	0.00058	20.29971	20.29971	0.00051
7	40000	500	G JETB	0.00000	0.00000	-17.49617	17.49617	0.00000
8	40000	41	P + B	0.00000	0.00000	-802.49951	802.50049	1.15930
9	40000	505	B JETB	-1.50435	-11.81996	-1.43261	13.00109	5.00000
10	40000	512	DU 0JETB	0.01917	0.08811	-287.48120	287.48193	0.65000
11	40000	-505	BA JETB	1.45064	11.57340	-6.36502	14.19728	5.00000
12	40000	501	U JETB	0.03434	0.15786	-515.01636	515.01660	0.32500
13	30010	512	DU 0JETF	0.01917	0.08811	-287.48120	287.48193	0.65000
14	30009	500	G JETF	-0.14193	-0.33444	0.53407	0.64594	0.00000
15	30009	500	G JETF	3.36311	-2.43892	0.57699	4.19429	0.00000
16	20009	505	B JETF	-4.46522	-6.97243	-3.57062	10.31032	5.00000
17	30012	501	U JETF	0.03434	0.15786	-515.01636	515.01660	0.32500
18	20011	-505	BA JETF	1.19033	9.49923	-5.33806	12.04772	5.00000
19	20016	123	BU *- D	-4.26487	-6.87818	-2.96397	10.13662	5.33540
20	20016	27	RHO + D	1.65134	-1.69429	-0.08329	2.48989	0.77140

21	13	42	N 0	0.16045	0.35013	-199.39792	199.40051	0.93960
22	13	17	PI +	-0.17168	-0.02720	-5.24650	5.25123	0.13960
23	20016	-27	RHO B- D	0.20615	0.07984	-0.37731	0.88673	0.77140
24	20016	25	ETA' D	0.60687	-0.19950	-0.00723	1.15115	0.95760
25	20013	33	RHO0 D	-0.19275	-0.27407	-16.80659	16.82764	0.77170
26	20013	24	ETA D	0.37063	0.22390	-12.45915	12.47875	0.54880
27	13	-17	PI B-	0.20023	-0.52828	-6.90368	6.92816	0.13960
28	16	17	PI +	0.31862	-0.41258	-0.92403	1.07008	0.13960
29	20016	19	K 0 D	-0.01949	-0.23296	0.02527	0.55046	0.49770
30	16	-18	K B-	0.23659	-0.40986	-1.17594	1.36034	0.49370
31	16	18	K +	0.07546	0.13332	-1.90699	1.97581	0.49370
32	20013	34	OMEG D	-0.03186	0.31009	-5.06793	5.13746	0.78260
33	20016	25	ETA' D	-0.21531	-0.65335	-2.90008	3.13060	0.95760
34	13	-42	N B	-0.44087	0.05795	-25.06081	25.08235	0.93960
35	20016	57	LAM 0 D	0.28560	0.49736	-8.68436	8.77449	1.11560
36	20017	28	K* + D	-0.25067	-0.23730	-446.46045	446.46143	0.89210
37	20017	-29	K* B D	0.53252	0.47056	-48.72060	48.73402	0.89650
38	17	-17	PI B-	-0.25253	-0.06310	-11.01887	11.02283	0.13960
39	17	18	K +	-0.07467	-0.25808	-2.29516	2.36298	0.49370
40	20017	-19	K B D	0.43773	0.26154	-2.73221	2.82359	0.49770
41	17	-17	PI B-	-0.50531	0.89154	-2.77382	2.96036	0.13960
42	20018	-123	BU *B+ D	1.32544	8.22699	-4.96832	11.07207	5.33540
43	20017	33	RHO0 D	0.01217	0.36495	-1.38525	1.62721	0.77170
44	19	1	GAMM	-0.07486	-0.04419	-0.03233	0.09274	0.00000
45	20019	101	BU - D	-4.19001	-6.83398	-2.93167	10.04390	5.29380
46	20	17	PI +	1.56982	-1.61830	-0.21742	2.26937	0.13960
47	20020	23	PI0 D	0.08152	-0.07599	-0.13411	0.22053	0.13500
48	23	-17	PI B-	0.10142	0.20387	0.15867	0.31067	0.13960
49	20023	23	PI0 D	0.10474	-0.12403	-0.53598	0.57607	0.13500
50	24	1	GAMM	-0.02019	-0.10595	-0.10133	0.14799	0.00000
51	20024	33	RHO0 D	0.62705	-0.09355	-0.09410	1.00316	0.77170
52	25	17	PI +	-0.24767	0.14707	-10.66118	10.66599	0.13960
53	25	-17	PI B-	0.05492	-0.42114	-6.14540	6.16164	0.13960
54	26	1	GAMM	0.41101	0.23581	-12.38024	12.38931	0.00000
55	26	1	GAMM	-0.04038	-0.01190	-0.07889	0.08942	0.00000
56	20029	37	K0S D	-0.01949	-0.23296	0.02527	0.55046	0.49770
57	32	17	PI +	0.24045	0.42826	-2.84368	2.88915	0.13960
58	32	-17	PI B-	-0.27231	-0.11817	-2.22425	2.24831	0.13960
59	33	1	GAMM	-0.08132	-0.07479	-0.05484	0.12334	0.00000
60	20033	33	RHO0 D	-0.13399	-0.57856	-2.84524	3.00726	0.77170
61	35	41	P +	0.16088	0.34923	-7.19925	7.27031	0.93830
62	35	-17	PI B-	0.12472	0.14812	-1.48510	1.50417	0.13960
63	36	18	K +	-0.32475	0.01845	-364.79321	364.79370	0.49370
64	20036	23	PI0 D	0.07408	-0.25575	-81.66696	81.66751	0.13500
65	20037	-19	K B D	0.50772	0.57054	-45.34312	45.35228	0.49770
66	20037	23	PI0 D	0.02480	-0.09999	-3.37747	3.38173	0.13500
67	20040	37	K0S D	0.43773	0.26154	-2.73221	2.82359	0.49770
68	42	1	GAMM	0.04929	0.04892	-0.04046	0.08037	0.00000
69	20042	-101	BU B+ D	1.27615	8.17807	-4.92792	10.99175	5.29380
70	43	17	PI +	-0.22807	0.35520	-1.23191	1.30969	0.13960
71	43	-17	PI B-	0.24024	0.00974	-0.15334	0.31752	0.13960
72	45	-8	NUE B	-0.89418	-1.84391	0.70009	2.16558	0.00000
73	45	7	E -	-1.73596	-1.58263	-2.59922	3.50346	0.00051
74	20045	30	D* 0 D	-1.55985	-3.40743	-1.03250	4.37480	2.00720
75	47	1	GAMM	0.00890	0.03626	0.05064	0.06292	0.00000
76	47	1	GAMM	0.07261	-0.11225	0.08347	0.15761	0.00000
77	49	1	GAMM	0.13579	-0.08114	-0.40125	0.43130	0.00000
78	49	1	GAMM	-0.03105	-0.04289	-0.13474	0.14477	0.00000
79	51	17	PI +	0.14876	0.04719	-0.29056	0.35815	0.13960
80	51	-17	PI B-	0.47829	-0.14074	0.38465	0.64502	0.13960
81	20056	23	PI0 D	0.07093	-0.19647	0.19246	0.31449	0.13500
82	20056	23	PI0 D	-0.09041	-0.03649	-0.16718	0.23597	0.13500
83	60	17	PI +	0.04333	-0.25721	-0.26459	0.39690	0.13960
84	60	-17	PI B-	-0.17733	-0.32134	-2.58065	2.61036	0.13960
85	64	1	GAMM	0.08356	-0.26362	-80.59959	80.60007	0.00000
86	64	1	GAMM	-0.00949	0.00787	-1.06728	1.06735	0.00000
87	20065	37	K0S D	0.50772	0.57054	-45.34312	45.35228	0.49770
88	66	1	GAMM	-0.01490	-0.12009	-2.09223	2.09572	0.00000
89	66	1	GAMM	0.03969	0.02010	-1.28523	1.28600	0.00000
90	67	17	PI +	0.14283	0.31390	-1.68060	1.72129	0.13960
91	67	-17	PI B-	0.29490	-0.05236	-1.05161	1.10230	0.13960

4. Untersuchungen zur Produktion schwerer Quarks

Aus den Wirkungsquerschnitten (s. Kapitel 2) folgt, daß der dominante Prozeß der Produktion schwerer Quarks die Boson-Gluon-Fusion mit neutralen Strömen ist. Der totale Wirkungsquerschnitt für die $c\bar{c}$ -Erzeugung beträgt bei HERA $5.1 \cdot 10^5 \text{ pb}$ und für die $b\bar{b}$ -Erzeugung $4.2 \cdot 10^3 \text{ pb}$ [INSC88]. Daher wurden für die Untersuchungen auch nur diese Prozesse mit den in Kapitel 3 beschriebenen Programmpaketen simuliert. Entsprechend der Situation bei HERA wurde immer ein 30 GeV-Elektron an einem 820 GeV-Proton gestreut. Insgesamt wurden jeweils ca. 150000 Ereignisse generiert und die Ereignisprotokolle (s. Tabelle 3.2) mit weiteren Parametern auf Magnetbändern abgespeichert. Diese Informationen wurden dann von den Analyseprogrammen wieder eingelesen und unter den verschiedenen Gesichtspunkten weiterverarbeitet.

Alle Untersuchungen wurden auch auf einen Vergleich zwischen Bottom- und Charm-Quarks ausgerichtet, denn unter dem Aspekt der Separation stellen die $c\bar{c}$ -Ereignisse den größten Untergrund für die $b\bar{b}$ -Ereignisse dar (s. Kapitel 2).

4.1 Impulsspektren Schwerer-Quark-Reaktionen im H1-Detektor

Für die folgenden Abbildungen wurde der H1-Detektor entsprechend der acht einzelnen elektromagnetischen Kalorimetermodule (s. Abbildung 4.1) in acht Polarwinkelbereiche eingeteilt. Alle gezeigten Größen beziehen sich jeweils auf einen der Winkelbereiche

Es fand folgende Einteilung statt:

4.00° - 26.60°	BEMC (BWE)
26.60° - 33.25°	BBE
33.43° - 57.18°	CB1E
57.58° - 103.22°	CB2E
103.77° - 138.11°	CB3E
138.37° - 153.33°	FB1E
153.62° - 160.86°	FB2E
160.86° - 176.06°	IF1E

Dabei gehen die Schenkel der Winkel durch die unteren Ecken der Module.

HERA III CALORIMETER, STACK DIMENSIONS AND ABSOLUTE LOCATIONS REV. 2.2

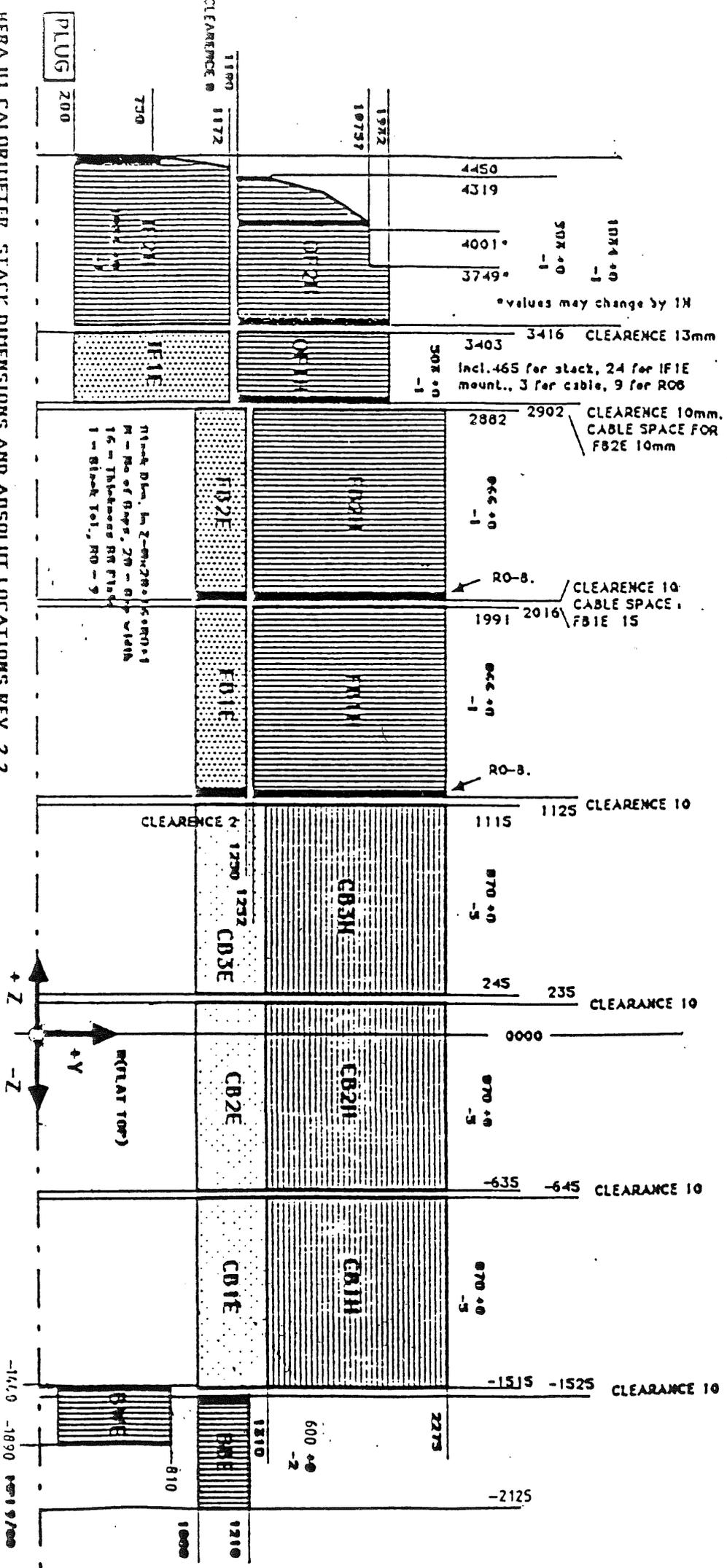


Abbildung 4.1: Lage der einzelnen Kalorimetermodule des HI-Detektors

Für jedes Modul wurden drei Größen betrachtet:

1. der mittlere Gesamtimpuls \bar{p}_{TOT}
2. der auf den jeweiligen Raumwinkel $\Delta\Omega$ des Moduls normierte Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$
3. der unnormierte Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$.

Die Abbildungen 4.2, 4.3 und 4.4 zeigen die Ergebnisse für die $b\bar{b}$ -Produktion, die Abbildungen 4.5, 4.6 und 4.7 zeigen die Ergebnisse für die $c\bar{c}$ -Produktion. Die Teilchen des Endzustandes der $Q\bar{Q}$ -Produktion werden unterschieden in Hadronen, Elektronen und Photonen. In den Abbildungen sind zuerst die Größen für alle Teilchen einer Teilchensorte im Endzustand dargestellt, danach für die Teilchen, die aus den $Q\bar{Q}$ -Zerfällen und schließlich noch für die Hadronen, die aus den Spectator-Zerfällen stammen. Die unnormierten Wirkungsquerschnitte sind nur für jeweils alle Teilchen gezeigt.

Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen. Sowohl Impulse als auch Wirkungsquerschnitte haben ihre maximalen Werte in Protonrichtung (IF1E) wegen des großen Protonimpulses. Das Maximum im BEMC für alle Elektronen rührt vom gestreuten Elektron her. Der Verlauf der unnormierten Wirkungsquerschnitte wird hauptsächlich durch die verschieden großen Raumwinkelbereiche der Module bestimmt.

Zusätzlich sind im Anhang noch die Impulsverteilungen für jedes einzelne Modul aufgeführt.

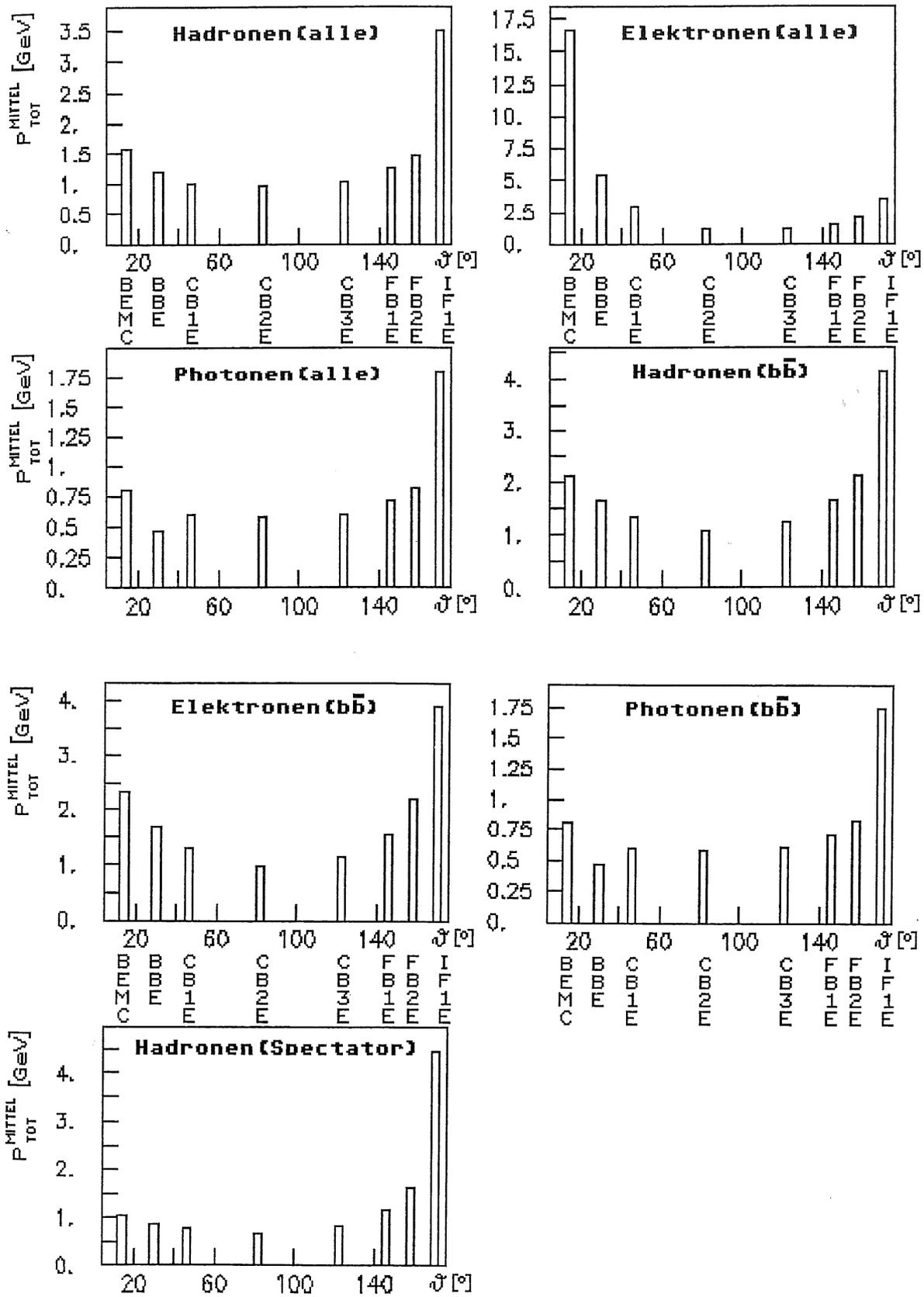


Abbildung 4.2: Mittlerer Gesamtimpuls \bar{p}_{TOT} der Teilchen des Endzustandes der $b\bar{b}$ -Produktion für die 8 Kalorimeter-Module des H1-Detektors

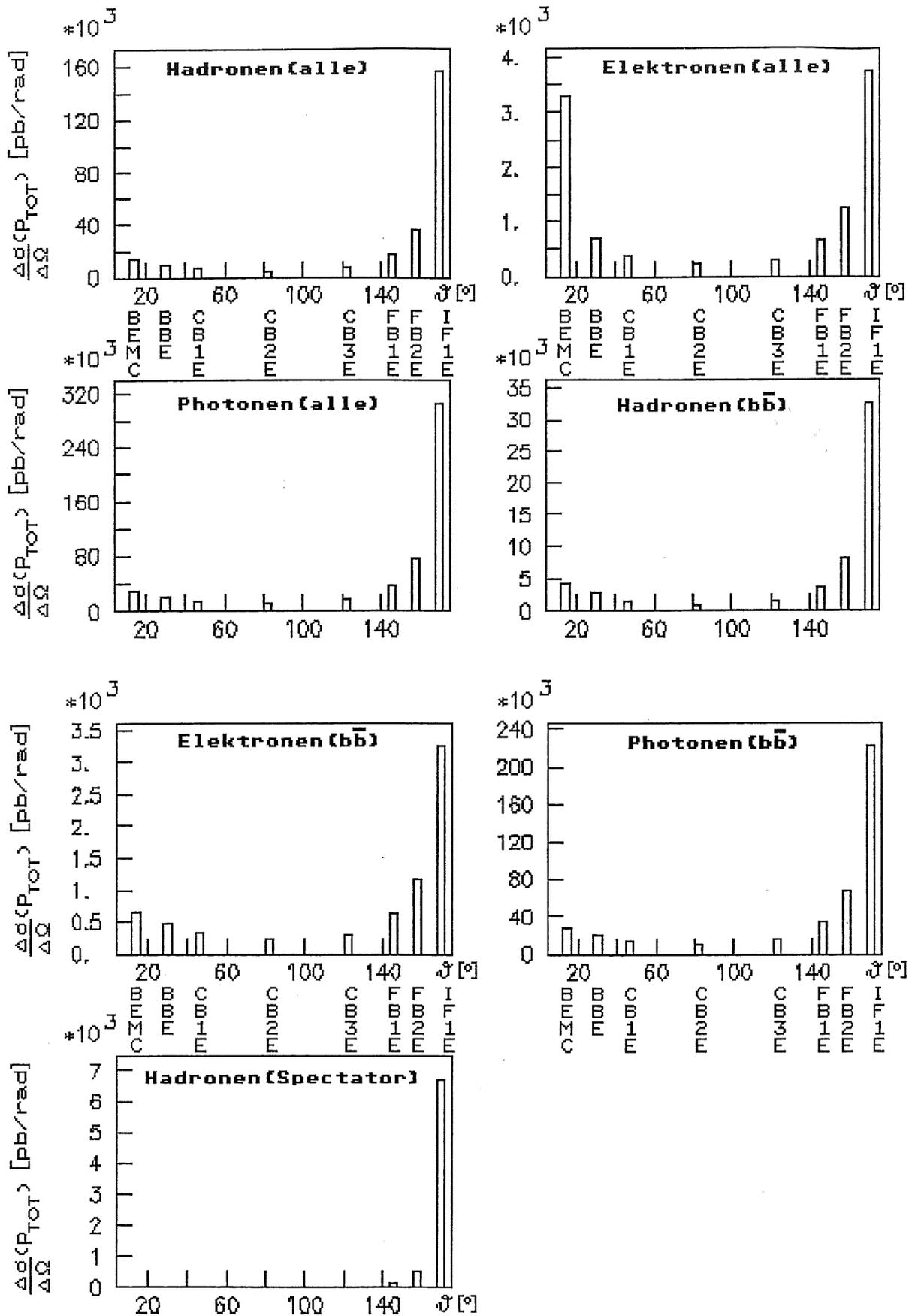
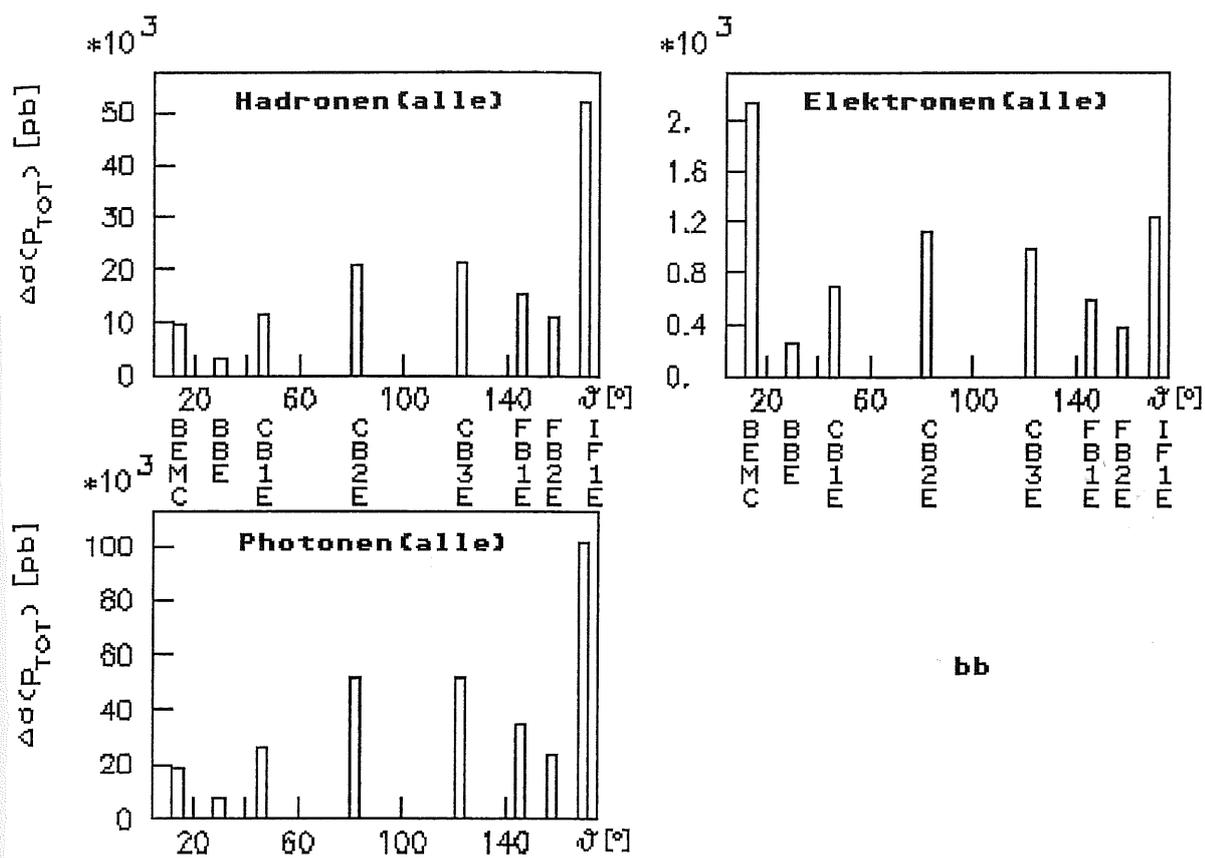


Abbildung 4.3: Auf den Raumwinkel $\Delta\Omega$ jedes Kalorimetermoduls des H1-Detektors normierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für Teilchen des Endzustandes der $b\bar{b}$ -Produktion



bb

Abbildung 4.4: Unnormierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für jedes Kalorimetermodul des H1-Detektors aller Teilchen im Enzustand der $b\bar{b}$ -Produktion

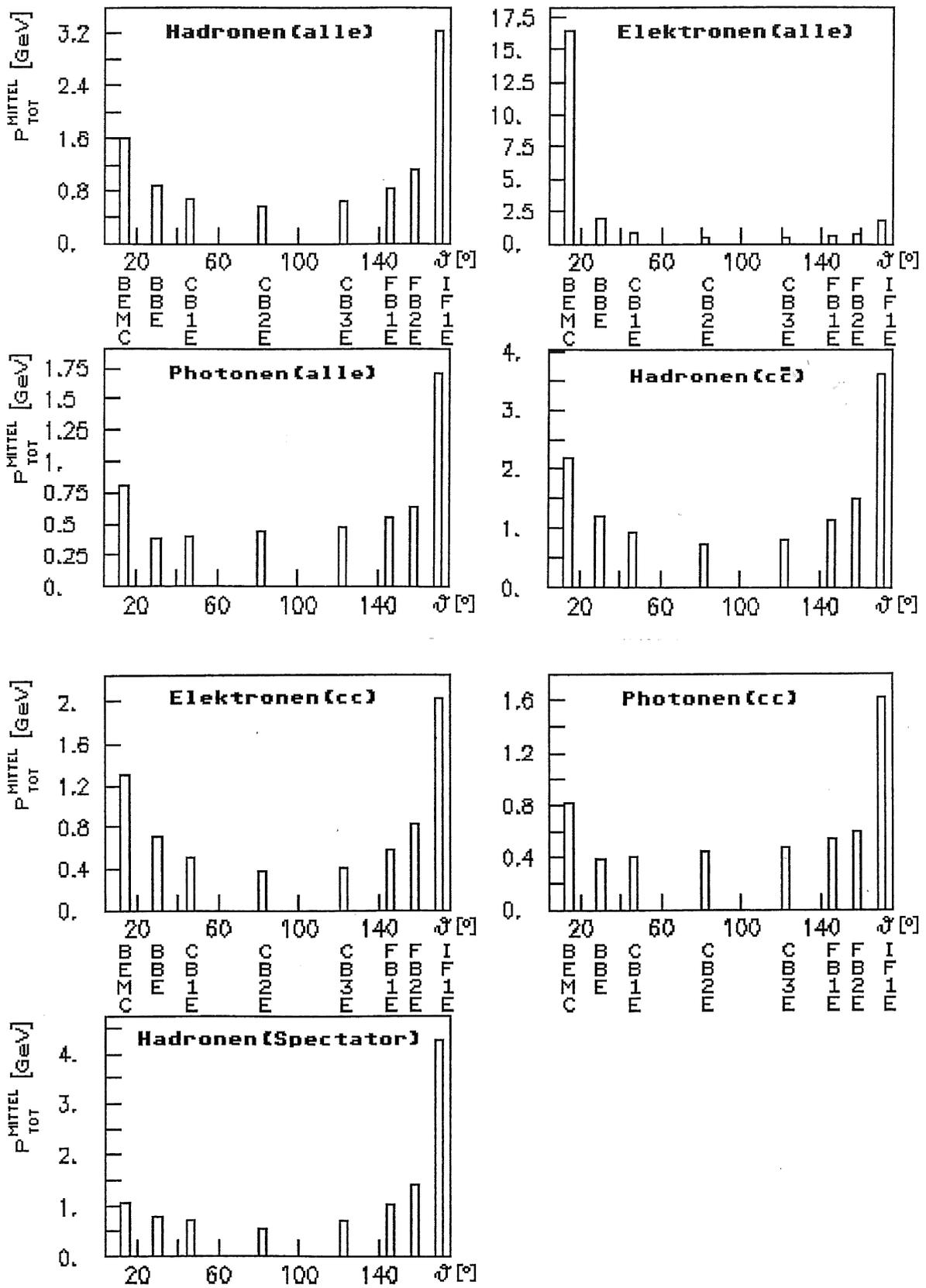


Abbildung 4.5: Mittlerer Gesamtimpuls \bar{p}_{TOT} der Teilchen des Endzustandes der $c\bar{c}$ -Produktion für die 8 Kalorimeter-Module des H1-Detektors

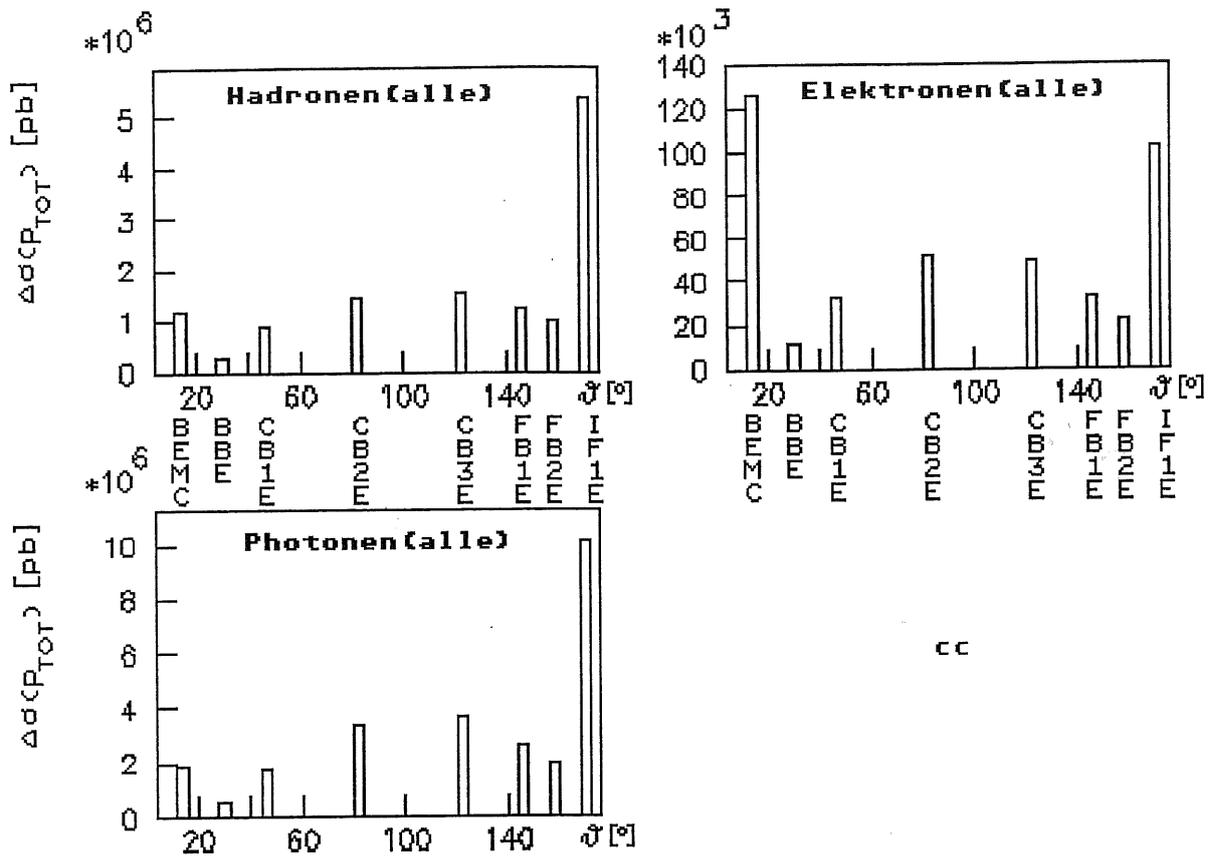
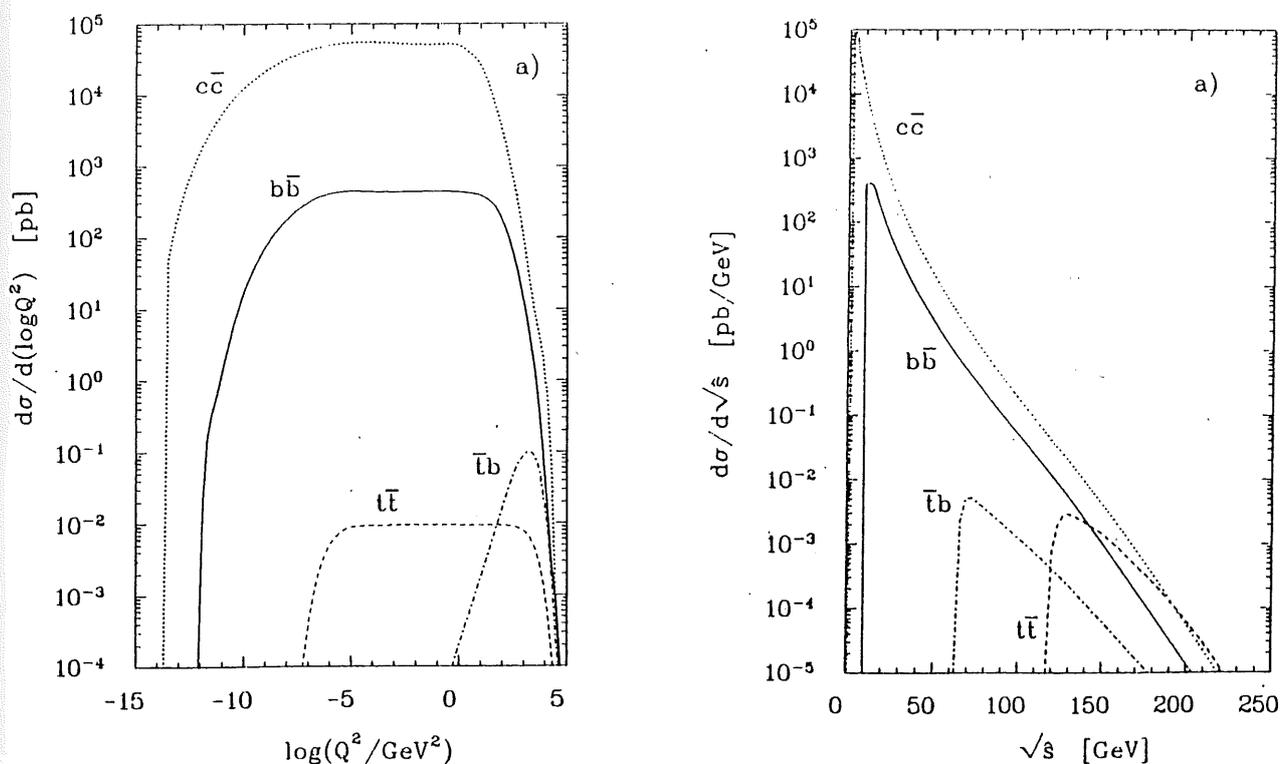


Abbildung 4.7: Unnormierter Wirkungsquerschnitt $\Delta\sigma$ für jedes Kalorimetermodul des H1-Detektors aller Teilchen im Endzustand der $c\bar{c}$ -Produktion

4.2 Charakteristische Größen der Ereignisse

Die Größen, die die Produktion schwerer Quarks charakterisieren und für eine Separation der Bottom- gegen die Charmquarks geeignet sind, wurden bereits in verschiedenen Arbeiten von G. Schuler, G. Ingelman [INSC88], [SCH2/89], R. A. Eichler, Z. Kunszt [EIKU88], F. Barreiro, M. A. García, J. F. de Trocóniz [BGT89] sowie der Diplomarbeit von H. Fürstenau [FÜR89] ausführlich behandelt. Als Beispiele seien hier nur die Verteilungen der Variablen (s. Kapitel 2) Q^2 , ξ , W , die Summe der transversalen Energie ΣE_T sowie die sogenannte Circularität C gezeigt. Die Circularität ist ein Maß für die Kreisförmigkeit eines Ereignisses. Sie betrachtet die Verteilung der Teilchen des Endzustandes in der Ebene, die senkrecht zur Strahlachse liegt. Die Werte können zwischen 0 und 1 liegen, $C = 1$ bedeutet totale Kreisförmigkeit, d. h. die Teilchen sind in der Ebene völlig isotrop verteilt. Ein kleiner Wert von C steht dagegen für Ereignisse mit stark gebündelten Jets, die in entgegengesetzte Richtungen fliegen.

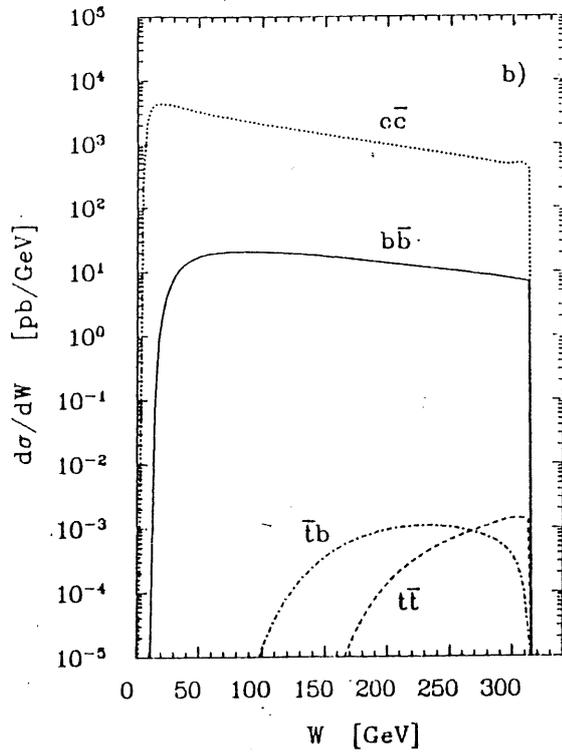


a)

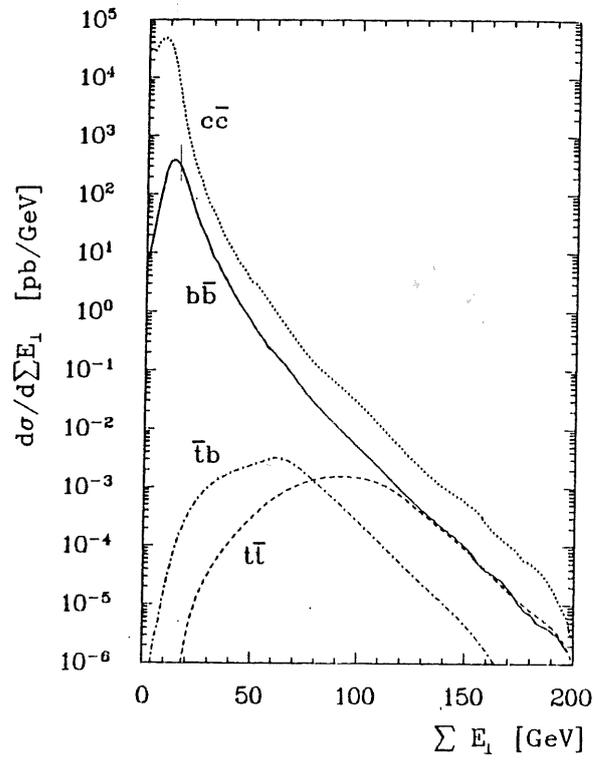
b)

Abbildung 4.8: Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der BGF für $b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $t\bar{t}$ und $\bar{t}b$ -Produktion

a) von Q^2 b) von \sqrt{s}



a)



b)

Abbildung 4.9: Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der BGF für $b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $t\bar{t}$ und $t\bar{b}$ -Produktion
 a) von W
 b) von ΣE_T

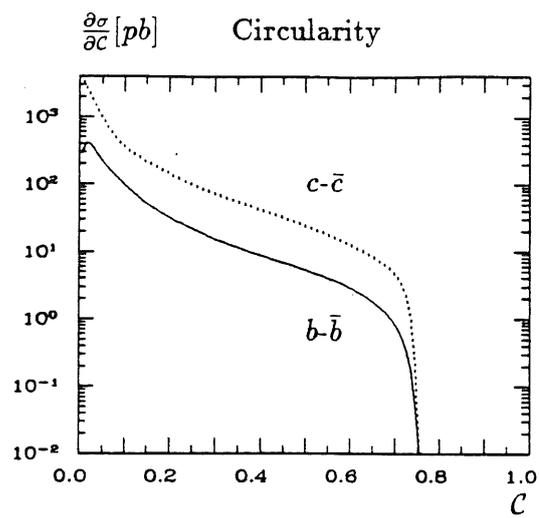


Abbildung 4.10: Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der NC BGF für $b\bar{b}$ - und $c\bar{c}$ -Produktion von der Circularität C nach einem Schnitt von $E_T > 40$ GeV

Zum Schluß ist noch das Ergebnis der Simulation von jeweils ca. 150000 $b\bar{b}$ - bzw. $c\bar{c}$ -Ereignissen dargestellt für die Verteilung der minimalen Winkel α_{min} , die die Elektronen aus den $Q\bar{Q}$ -Zerfällen zu den benachbarten Teilchen des Endzustandes einnehmen. Wie man sieht, können die Elektronen aus den Quark-Zerfällen sehr gut gegen die anderen Teilchen separiert werden und stellen damit die als Leptonensignatur bezeichnete Möglichkeit dar, schwere Quarks zu identifizieren.

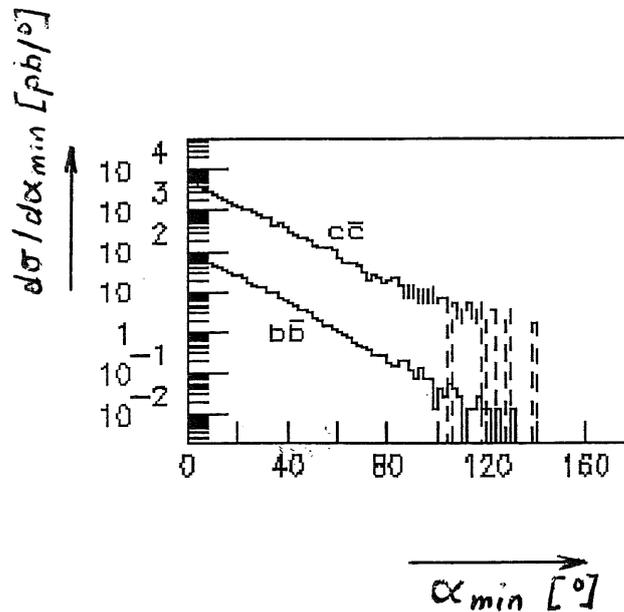


Abbildung 4.11:

Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der NC BGF für $b\bar{b}$ - und $c\bar{c}$ -Produktion vom minimalen Winkel α_{min} , den Elektronen aus den $Q\bar{Q}$ -Zerfällen zu benachbarten Teilchen des Endzustandes annehmen

5. Die elektromagnetischen Kalorimeter FB2E und BBE des H1-Detektors

In den Jahren 1989 und 1990 wurden am Lehrstuhl EV der Universität Dortmund die elektromagnetischen Kalorimeterringe FB2E (Forward Barrel 2nd Electromagnetic) und BBE (Backward Barrel Electromagnetic) des H1-Detektors hergestellt.

Bei den Modulen handelt es sich um sogenannte Samplingkalorimeter, bei denen sich Absorberschichten (Blei) mit Nachweisschichten (Flüssig-Argon) abwechseln. Die Absorberplatten liegen abwechselnd auf Hochspannung und auf Masse, so daß zwischen den Platten ein großes elektrisches Feld herrscht. Dadurch können Ionen, die im flüssigen Argon beim Durchgang eines Teilchens entstehen, zu den Platten wandern und dort einen Puls induzieren, der proportional zur Energie des einfallenden Teilchens ist. Die Pulse werden an den geerdeten Platten, die in einzelne Segmente (Pads) eingeteilt sind, ausgelesen.

5.1 Aufbau und Funktionsweise der Kalorimeter

Abbildung 4.1 zeigt die Lage von BBE und FB2E. In Abbildung 5.1 ist der schematische Aufbau einer Hochspannungsplatte und einer Ausleseplatte dargestellt.

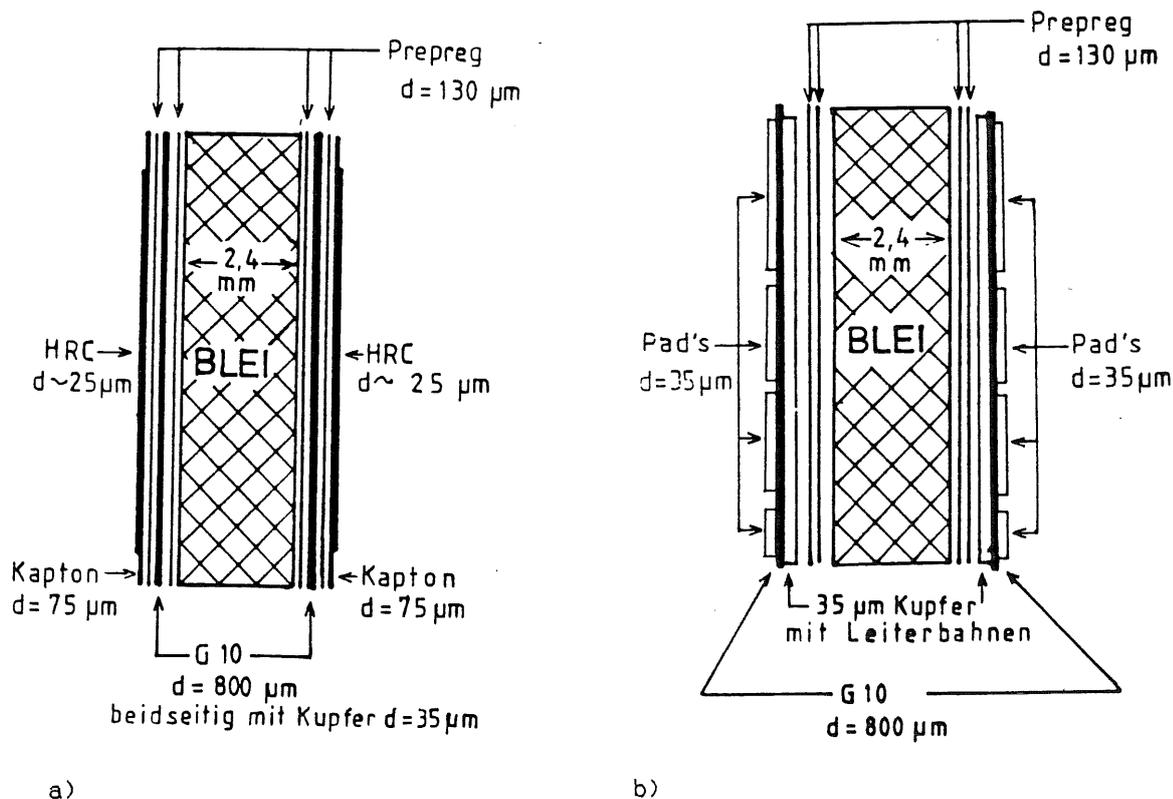


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau
 a) der Hochspannungsplatten
 b) der Ausleseplatten

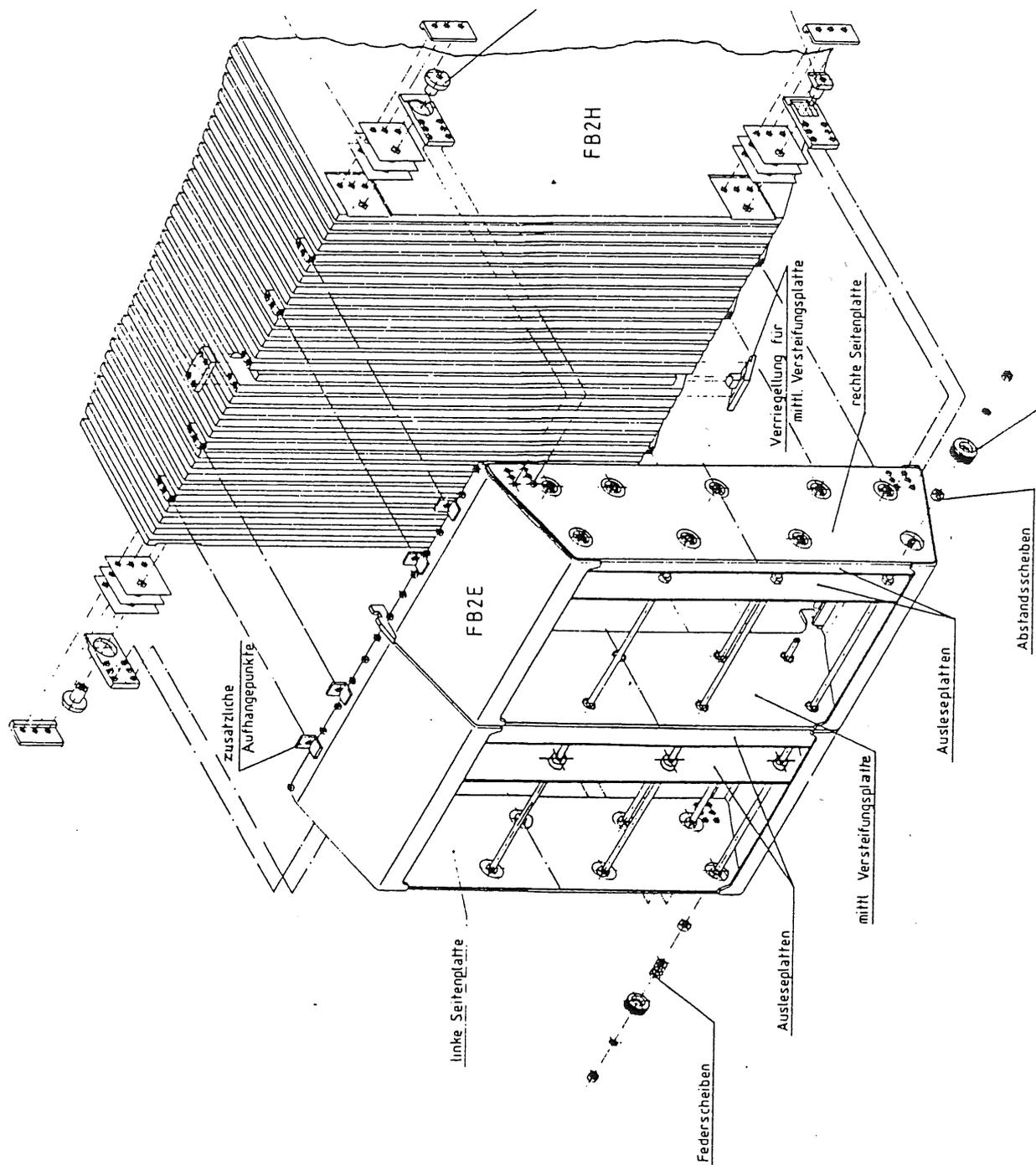


Abbildung 5.3: Perspektivische Darstellung des Kalorimeters FB2E

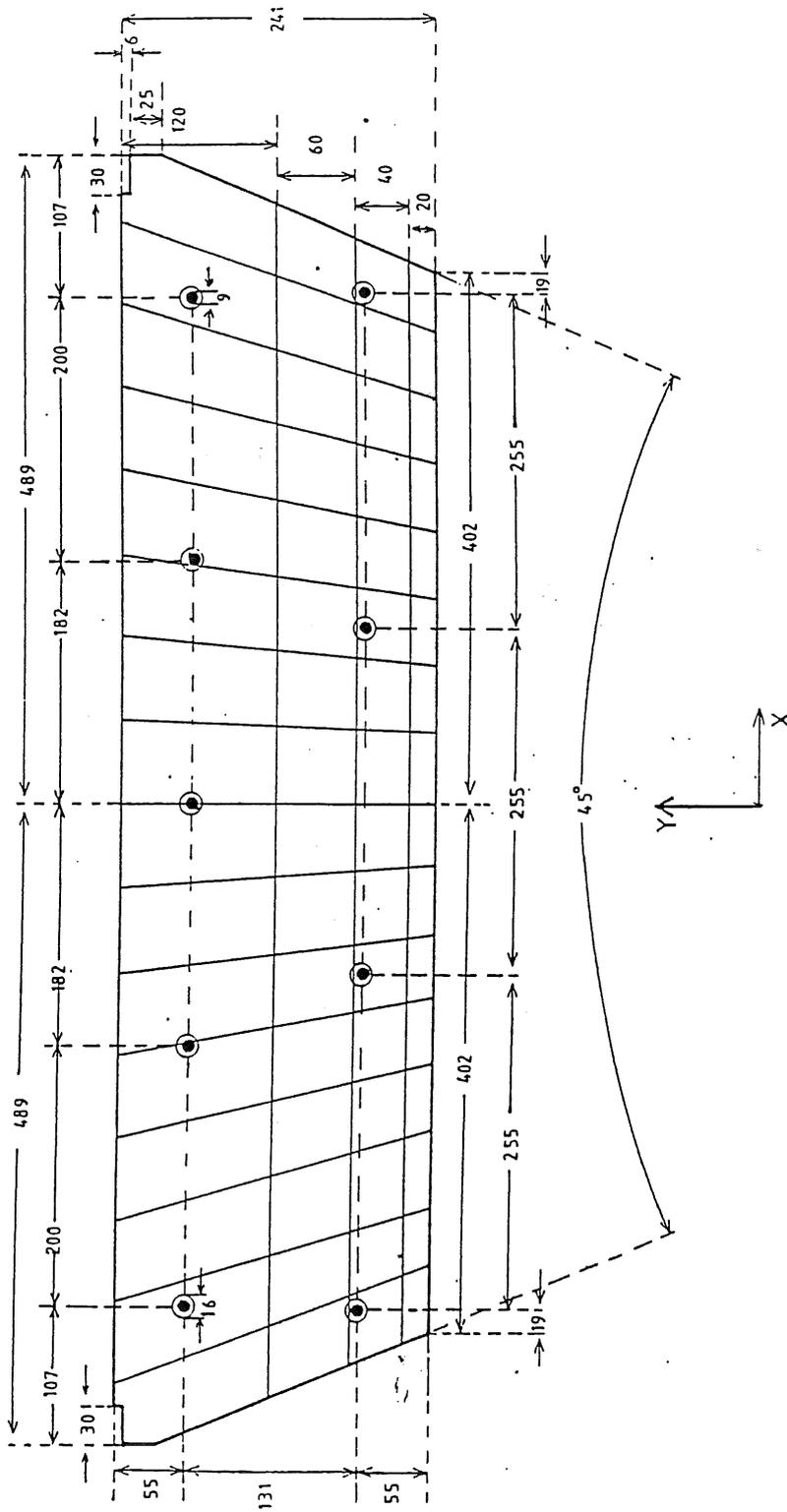


Abbildung 5.4: Pad-Einteilung auf der Ausleseplatte im Kalorimeter FB2E

5.1.2 Beschreibung von BBE

Daten und Einzelheiten über das elektromagnetische Kalorimeter BBE sind bei K. Borrás (Universität Dortmund, Lehrstuhl für experimentelle Physik V) zu erfahren sowie im [TP89]. Die Hauptunterschiede zwischen FB2E und BBE sind die Anzahl der Platten bzw. der Nachweisschichten sowie die Form der Platten. FB2E verfügt über 120 und BBE über 80 Nachweisschichten. Die Form der BBE-Platten wurde von K. Borrás so optimiert, daß über den ganzen azimutalen Winkelbereich die Materialdicke über 10 Strahlungslängen beträgt. Das ist eine Voraussetzung für eine möglichst gute e/π -Trennung.

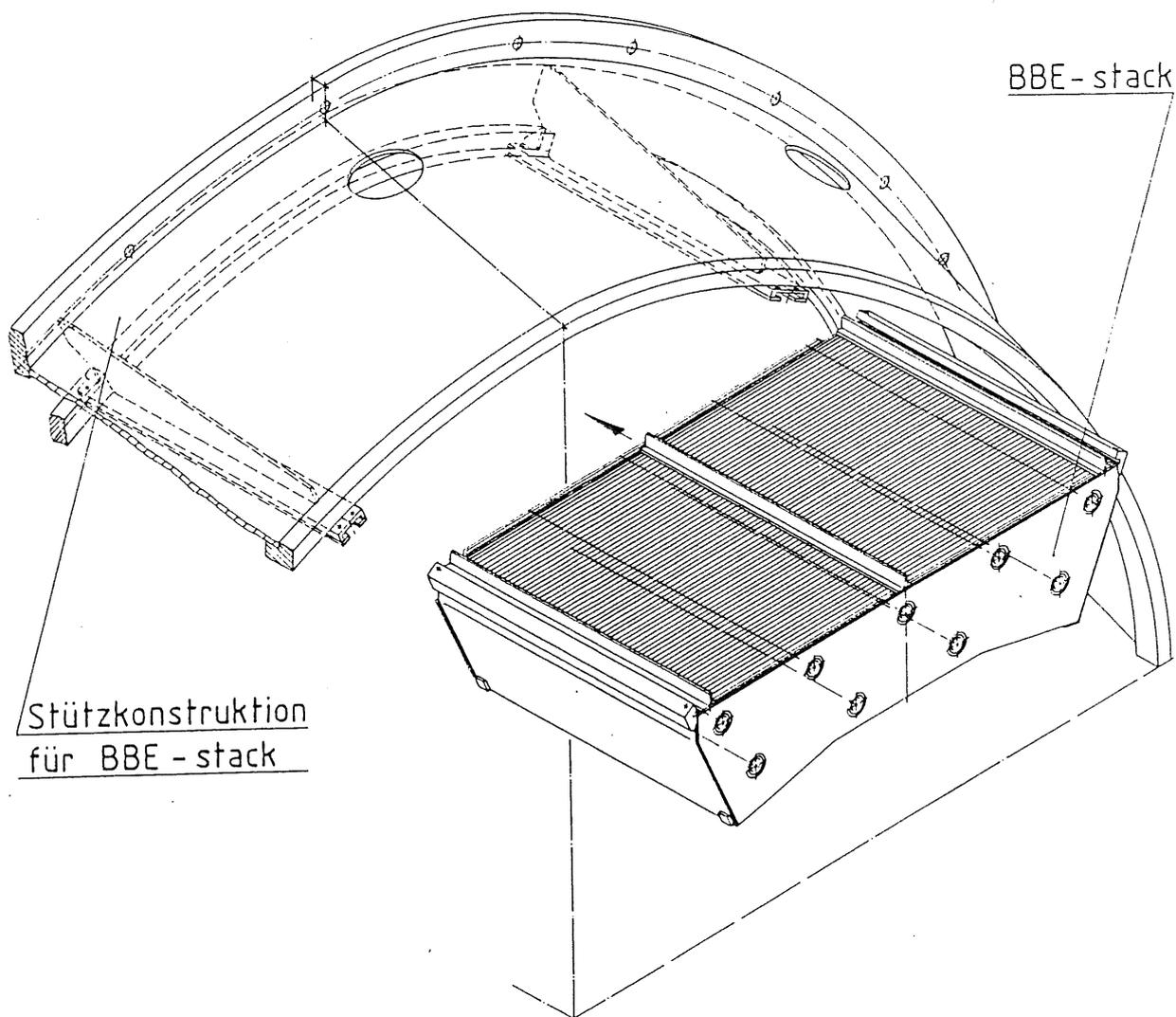


Abbildung 5.5: Perspektivische Darstellung eines BBE-Stacks

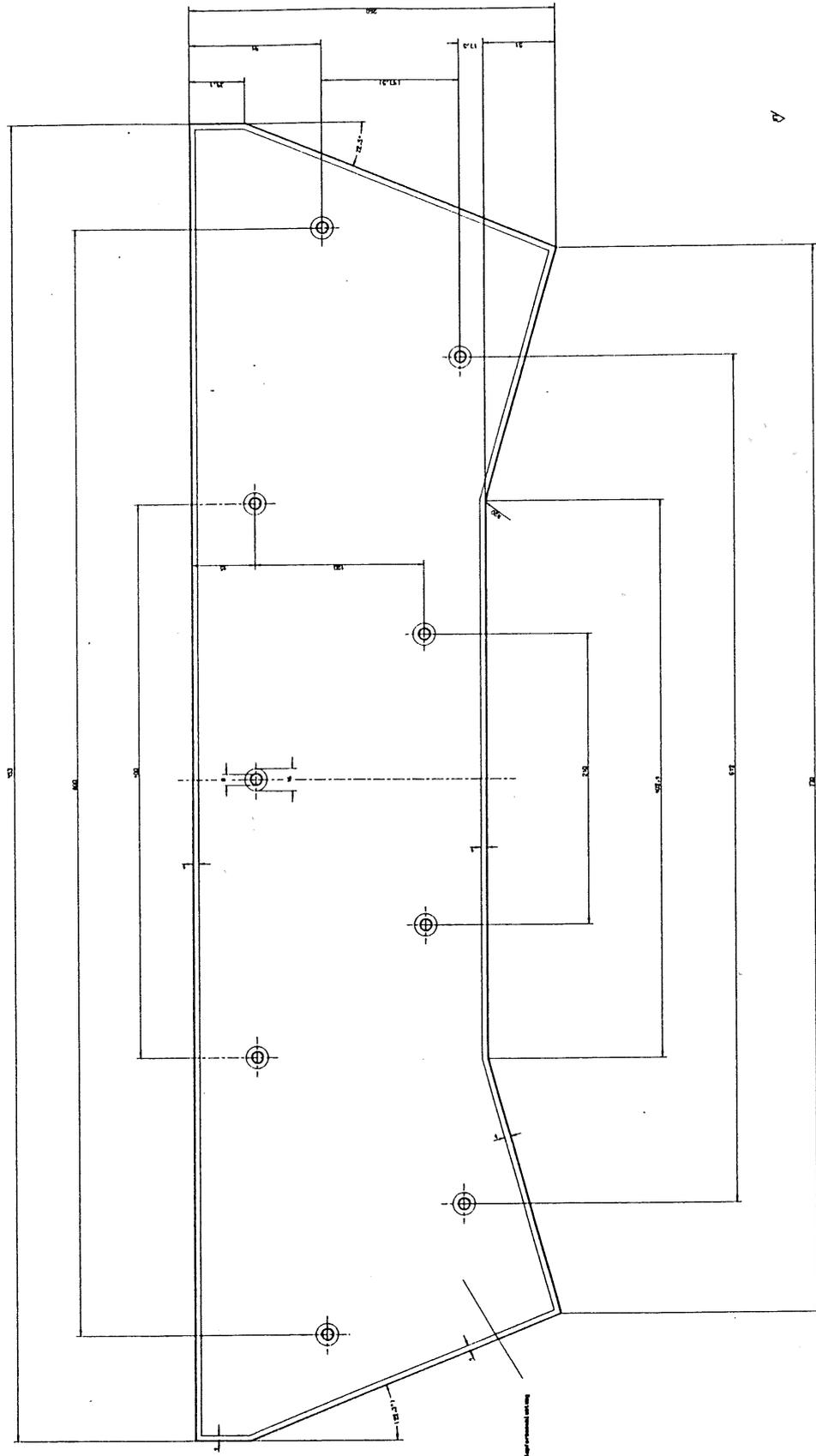


Abbildung 5.6: Zeichnung einer BBE-Platte

5.2 Herstellung und Eigenschaften der hochohmigen Widerstandsbeschichtung der HV-Platten

Die HV-Platten erhielten ihre hochohmige Widerstandsbeschichtung, indem eine Harz-Ruß-Mischung im Siebdruckverfahren auf ihre Kaptonoberfläche gebracht wurde. Es wurde ein Zweikomponenten-Epoxydharz (Eurepox 710 mit dem Härter TB 0561 der Firma Schering) verwendet, in den dann der vorher gesiebte Ruß (Printex L der Firma Degussa) so untergerührt wurde, daß eine möglichst homogene Mischung entstand. Für die erste Seite einer HV-Platte wurde ein Rußanteil von 11.3 Gewichtsprozent gewählt und für die zweite 13.0 Gewichtsprozent. Die Begründung dafür liefert die Tatsache, daß nicht beide Seiten gleichzeitig bedruckt werden können. Nachdem die erste Seite bedruckt worden ist, muß sie zwei Stunden lang in einem Ofen bei 70 °C aushärten. Erst danach kann die zweite Seite bedruckt werden. Da auch sie anschließend zwei Stunden bei 70 °C aushärten muß, wird die erste Seite insgesamt vier Stunden dieser Temperatur ausgesetzt. Es hat sich gezeigt (s. Abbildung 5.7), daß dadurch der Widerstand der Beschichtung sinkt. Um die Widerstände beider Seiten anzugleichen, muß daher die Leitfähigkeit der ersten Beschichtung gesenkt werden. Das geschieht durch die Verringerung des Rußanteils, der schließlich für die Leitung in der Schicht verantwortlich ist. Man kann davon ausgehen, daß der Strom in der Oberfläche der 25 bis 50 µm dicken Beschichtung von Rußpartikel zu Rußpartikel tunnelt. Für diese Annahme spricht die Beobachtung, daß eine Glättung der Oberfläche mit Schmirgelpapier den Oberflächenwiderstand der Beschichtung dermaßen erhöht, daß er mit herkömmlichen Methoden (s. Kapitel 6.3.2 und 6.3.5) nicht mehr meßbar ist, d. h. durch ein Oberflächenstück von ca. 8.5 cm² fließt bei einer angelegten Spannung von 500 V kein meßbarer Strom mehr. [KOL90P]

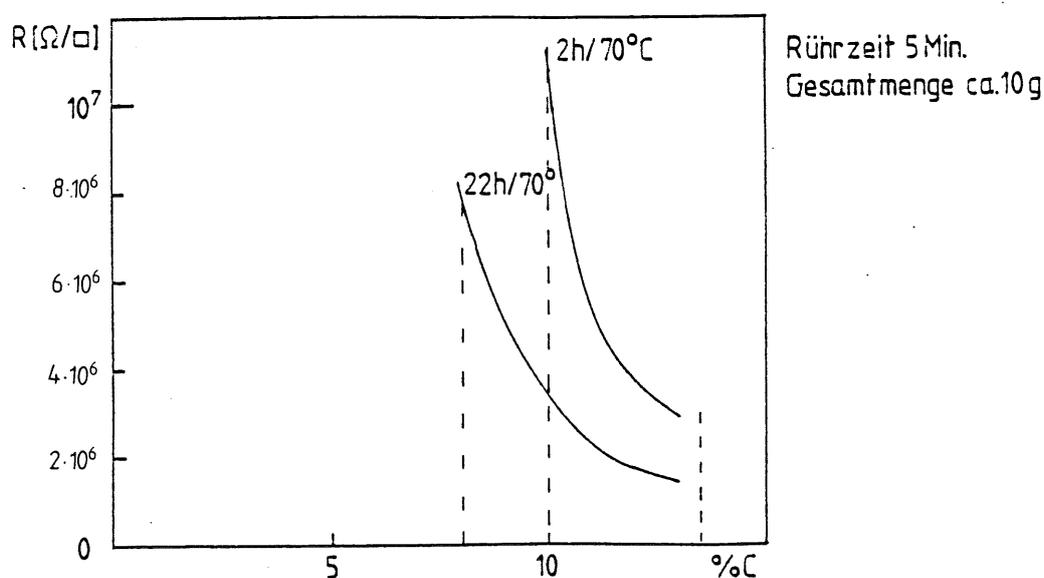


Abbildung 5.7: Abhängigkeit des Oberflächenwiderstandes der HV-Platten-Beschichtung von der Härtungsdauer und vom Rußanteil in Gewichtsprozent [KOL88]

Zur Aushärtung wurden zwei verschiedene Öfen benutzt, in denen jeweils mehrere HV-Platten gleichzeitig auf Rosten übereinanderlagen. Der eine ist ein normaler Konvektionsofen, bei dem die von unten erwärmte Luft nach oben steigt. Dadurch entsteht eine Temperaturdifferenz von ca. 10 °C zwischen dem obersten und dem untersten Rost. Die Temperatur wurde so eingestellt, daß sie im oberen Bereich bei 80 °C und im unteren bei 70 °C lag. Trotzdem mußten die unteren Platten noch 10 Minuten länger im Ofen bleiben, um ausreichend auszuhärten. Bei dem anderen Ofen handelt es sich um einen Umluftofen, der mit Hilfe eines Ventilators die Luft im Inneren des Ofens so gut durchmischt, daß er eine wesentlich gleichmäßigere Temperaturverteilung aufweist. [KOL90P]

Neben der Härtungsdauer und dem Rußanteil ist der Oberflächenwiderstand auch noch von dem Trägermaterial der Beschichtung abhängig. So wies eine aus Blei, G10 und Kapton bestehende HV-Platte einen 3- bis 4fach höheren Widerstandswert auf als eine unter gleichen Bedingungen bedruckte Kaptonfolie. Offenbar wird der Härtungsprozeß und damit der Oberflächenwiderstand durch die Wärmekapazität C des Trägers beeinflusst gemäß $C = c \cdot m$, mit der spezifischen Wärmekapazität c und der Masse m des Körpers. Je größer die Wärmekapazität, desto länger dauert es, bis das bedruckte Material die nötige Aushärtungstemperatur erreicht hat (s. auch Kapitel 7.2). [KOL88]

Der Zweck der HV-Platten-Beschichtung ist die Gewährleistung eines hochohmigen Oberflächenwiderstandes, daher die Bezeichnung: Hochwiderstandsbeschichtung, im folgenden auch gelegentlich mit HRC-Schicht (High Resistive Coating) abgekürzt. Der gewünschte mittlere Oberflächenwiderstand jeder HV-Plattenseite liegt bei 3 MΩ. Die untere zulässige Grenze ist auf 1 MΩ und die obere auf 10 MΩ festgesetzt worden. Da zwischen HV-Platten und Ausleseplatten eine Spannung von 2500 V anliegt, dient der Mindestwiderstand in erster Linie der Sicherheit des Kalorimeters. Er schützt die Elektronik gegen Durchschläge und Entladungen im flüssigen Argon, indem er den Strom I begrenzt: $I = U/R$, mit der Spannung U und dem Widerstand R . Ebenso soll ein Übersprechen (Crosstalk) zwischen den Auslesesegmenten (Pads) unterdrückt werden. Das geschieht folgendermaßen: im Nachweismedium zwischen den Platten werden Teilchen ionisiert, und Elektronen sowie positive Ionen wandern unter dem Einfluß der Hochspannung in entgegengesetzte Richtungen zur HV- und zur Ausleseplatte, die auf Masse liegt. Dort erzeugen sie durch Influenz auf einem Pad ein Spannungssignal, das verstärkt und ausgelesen wird. Dieser Puls entlädt auch die HRC-Schicht. Ihr großer Widerstand sorgt dafür, daß der Strom nur lokal fließt. Denn eine zu schnelle Ausbreitung würde dazu führen, daß über die kapazitive Kopplung von HV-Platte zu Ausleseplatte auch noch andere Pads ansprechen (Crosstalk). Neben einem hohen HRC-Widerstand R ist es für die gegenseitige Entkopplung der Pads wichtig, daß die Kapazität C von der Hochwiderstandsbeschichtung durch die Kaptonfolie zur Masse groß ist gegen die Kapazität zwischen den Platten. Beides erhöht die Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$, die damit sehr viel größer ist als die Pulslänge.

Andererseits darf der Widerstand aber auch nicht zu hoch sein, da sonst bei großem Untergrund der Stromfluß einen zu starken Spannungsabfall bewirkt. Die gesammelte Ladung beträgt pro 1 GeV absorbiertes Energie ca. 0.25 pC [HAR90].

Eine kleinere Spannung zwischen den Platten führt zu einer Senkung der influenzierten Ladung Q_x (s. [RAU78]) und damit zu einer Schwächung des Signals. Um solche unerwünschten Effekte zu vermeiden, darf sich die angelegte Spannung höchstens um 1 % ändern, wenn Strom fließt. Daraus ergibt sich die Obergrenze von $10 \text{ M}\Omega$ für den Oberflächenwiderstand der HRC-Schicht. [RAU90P]

Die Definition und die Meßmethode für Oberflächenwiderstände wird im folgenden Kapitel 6 beschrieben.

6. Messung von Oberflächenwiderständen

Allgemein ist der Widerstand R eines Leiters proportional zu seiner Länge l und umgekehrt proportional zu seinem Querschnitt A :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} .$$

Dabei ist ρ der spezifische Widerstand ($[\rho] = 1 \Omega\text{m}$).

Die Querschnittsfläche A eines quaderförmigen Leiters habe die Kantenlängen b und d :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{d \cdot b} .$$

Läßt man d gegen Null gehen, erhält man einen flächenförmigen Leiter der Länge l und der Breite b . Als Oberflächenwiderstand R_F definiert man nun für einen Leiter mit $l/b = 1$ die Größe

$$R_F = \frac{\rho}{\delta} ,$$

wobei δ die Leitschichtdicke ist [LUE60]. Der Zusammenhang zwischen Oberflächenwiderstand und Widerstand wird also über einen Geometriefaktor G hergestellt:

$$R_F = G \cdot R , \text{ mit } G = \frac{b}{l} .$$

Der Begriff des Geometriefaktors erlaubt die Verallgemeinerung auf beliebig geformte Flächenleiter. Dafür berechnet man den Widerstand aus dem Verlauf des elektrischen Feldes E . Es gilt:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\int dU}{\int dI}$$

$$\text{mit } dU = E \cdot dl \text{ und } dI = j \cdot da .$$

Setzt man für die Stromdichte j die Beziehung

$$j = \frac{1}{\rho} \cdot E$$

ein, so ergibt sich mit

$$\rho = R_F \cdot \delta \text{ und } da = ds \cdot \delta \cdot n \quad (n \text{ ist die Normale des Flächenelementes } da)$$

$$dI = \frac{1}{R_F} \cdot E \cdot n \cdot ds .$$

Das führt schließlich zu der Gleichung

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\int E \cdot dl}{\int \frac{1}{R_F} \cdot E \cdot n \cdot ds} \cdot R_F .$$

Der Oberflächenwiderstand R_{f} kann also bestimmt werden, indem man die über dem Leiter abfallende Spannung U und den Strom I mißt, der ihn dabei durchfließt. Das Verhältnis von U und I muß dann noch mit dem Geometriefaktor G multipliziert werden, der aus dem Verlauf des elektrischen Feldes E und der Leiterform berechnet wird.

6.1 Messung von Widerständen

Je nach Größe des elektrischen Widerstandes werden für die Strom- und Spannungsmessung zwei Grundschaltungen verwendet (Abbildungen 6.1 und 6.2) [KOH85].

a) Stromfehlermessung für kleine Widerstände

Der Strom I_{v} , der durch den Innenwiderstand R_{iL} des Spannungsmeßgerätes fließt, wird mitgemessen.

- U Speisespannung
- U_{x} Spannungsabfall über dem zu messenden Widerstand
- I Gesamtstrom
- I_{v} Strom durch das Spannungsmeßgerät
- R_{iL} Innenwiderstand des Spannungsmeßgerätes
- R_{x} zu messender Widerstand

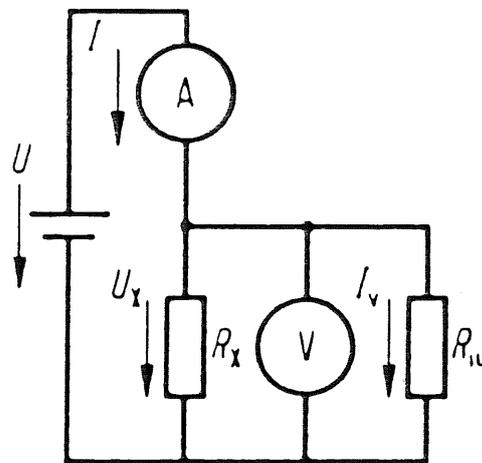


Abbildung 6.1: Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmeßgerät
Schaltung für kleine Widerstände

Bei dieser Schaltung wird der Leitwert ($1/R$) des Spannungsmeßgerätes (Innenwiderstand R_{iL}) zusammen mit dem Leitwert des zu messenden Widerstandes R_{x} gemessen:

$$R_{\text{x}} = \frac{U_{\text{x}}}{I - U_{\text{x}}/R_{\text{iL}}}$$

Hier muß die Bedingung

$$R_{\text{iL}} \gg R_{\text{x}}$$

erfüllt sein, damit R_{x} möglichst genau aus den Meßwerten bestimmt werden kann.

b) Spannungsfehlermessung für große Widerstände

Die Spannung U_{in} , die über dem Innenwiderstand R_{in} des Strommeßgerätes abfällt, wird mitgemessen.

- U Speisespannung
 U_{in} Spannungsabfall über dem Strommeßgerät
 U_x Spannungsabfall über dem zu messenden Widerstand
 I Gesamtstrom
 I_x Strom durch den zu messenden Widerstand
 R_{in} Innenwiderstand des Strommeßgerätes
 R_x zu messender Widerstand

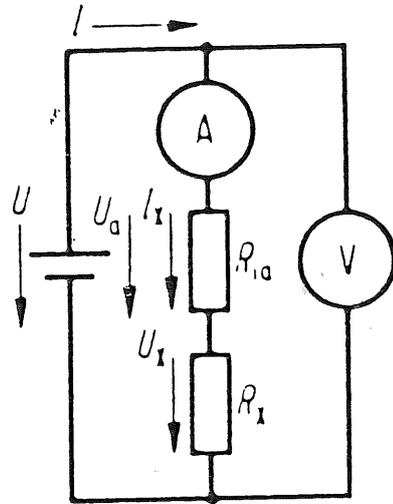


Abbildung 6.2: Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmeßgerät
Schaltung für große Widerstände

Bei dieser Schaltung wird der Innenwiderstand R_{in} des Strommeßgerätes in Reihe mit dem zu messenden Widerstand R_x mitgemessen. Es ist dann

$$R_x = \frac{U - U_{\text{in}}}{I_x} \quad \text{oder} \quad R_x = \frac{U}{I_x} - R_{\text{in}}$$

Hier muß die Bedingung

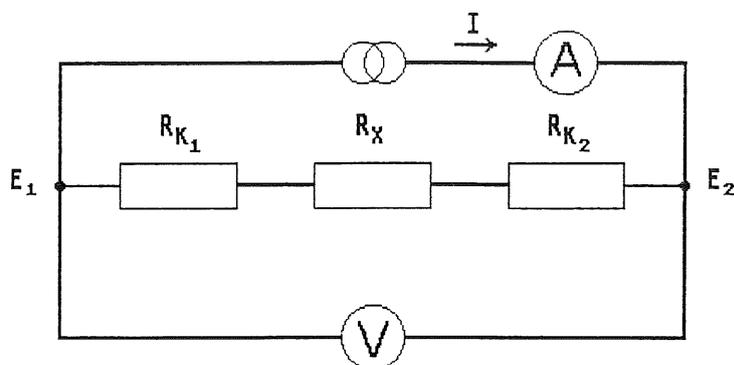
$$R_x \gg R_{\text{in}}$$

erfüllt sein, damit R_x möglichst genau aus den Meßwerten bestimmt werden kann.

6.2 Berücksichtigung von Kontaktwiderständen

Wird ein Oberflächenwiderstand mit Hilfe eines Meßkopfes gemessen, treten an den Berührungsflächen zwischen dem Flächenleiter und den Elektroden des Meßkopfes unbekannte Kontaktwiderstände auf.

Bei Verwendung eines Meßkopfes in Zweipolausführung, das heißt mit gemeinsamen Elektroden für Stromzuführung und Spannungsabgriff, führen die Kontaktwiderstände zu einer verfälschten Spannungsmessung (s. Abbildung 6.3).

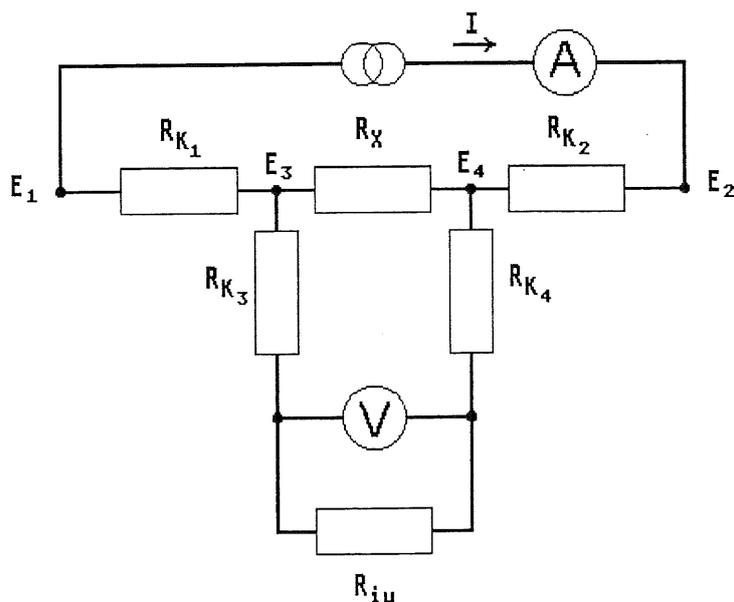


R_{K1}, R_{K2} : Kontaktwiderstände
 R_X : zu messender Oberflächenwiderstand
 E_1, E_2 : Elektroden des Meßkopfes

Abbildung 6.3: Zweipolschaltung

Die Kontaktwiderstände R_{K1} und R_{K2} sind in Reihe mit dem zu messenden Oberflächenwiderstand R_X geschaltet. Damit kann der Spannungsabfall über R_X nicht bestimmt werden.

Um die unbekanntenen Kontaktwiderstände in den Messungen zu umgehen, muß ein Meßkopf in Vierpolausführung benutzt werden (s. Abbildung 6.4).



$R_{K1}, R_{K2}, R_{K3}, R_{K4}$: Kontaktwiderstände
 R_{iU} : Innenwiderstand des Spannungsmeßgerätes
 R_X : zu messender Oberflächenwiderstand
 E_1, E_2, E_3, E_4 : Elektroden des Meßkopfes

Abbildung 6.4: Vierpolschaltung

Gilt sowohl

$$R_{iL} \gg R_x \text{ als auch } R_{iL} \gg R_{K_1}, R_{K_2},$$

dann fließt durch den Kreis mit dem Spannungsmeßgerät ein bedeutungslos kleiner Strom (Stromfehlermessung), und der Spannungsabfall an den Kontaktwiderständen R_{K_3} und R_{K_4} kann vernachlässigt werden.

6.3 Die Entwicklung von Meßköpfen

Ein Meßkopf für Oberflächenwiderstände sollte also, wie wir oben gesehen haben, mit vier Elektroden ausgestattet sein, um eine Trennung zwischen Stromzuführung und Spannungsabgriff zu gewährleisten. Denn nur so spielen die unbekannteren Kontaktwiderstände, die beim Aufsetzen der Elektroden auf den Flächenleiter auftreten, für die Messung des Widerstandes aus Stromfluß und Spannungsabfall keine Rolle.

Welche Form für die Elektroden ist nun am günstigsten?

Von entscheidender Bedeutung ist der Verlauf der elektrischen Felder zwischen den Elektroden sowie deren Berechenbarkeit zur Bestimmung des Geometriefaktors G .

Auf den ersten Blick scheint eine parallele Anordnung schmaler, gerader Elektroden den Anforderungen zu entsprechen. Jedoch geht die Homogenität des elektrischen Feldes an den Enden der Elektroden verloren, und es treten schwer kalkulierbare Randeffekte auf. Es ist daher ratsam, zu einer geschlossenen Form überzugehen, d. h., daß die vier Elektroden konzentrisch angelegt werden. Hier bietet sich nun besonders die Kreisform an, die sich durch einfache Äquipotentiallinien auszeichnet. Unter der Bedingung, daß die Breite der Elektroden gegen ihren Abstand zueinander vernachlässigbar klein ist, gilt dann, daß sie auf den Äquipotentiallinien liegen. Es ergibt sich so folgende Konstellation (s. Abbildung 6.5), wobei die innerste und die äußerste Elektrode der Stromzuführung dienen, und an den beiden mittleren (Radien r_i und r_a) der Spannungsabfall über dem Oberflächenwiderstand der eingeschlossenen, ringförmigen Fläche (schraffiert) gemessen wird.

schraffiert: Fläche, deren
Oberflächenwiderstand
gemessen wird

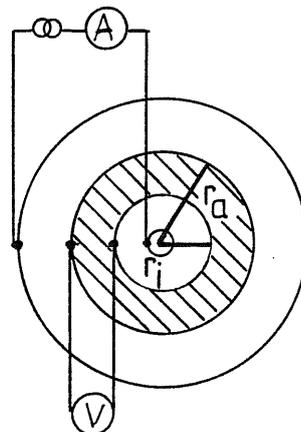


Abbildung 6.5: Anordnung der vier Elektroden eines Meßkopfes zur Bestimmung

6.3.1 Die Berechnung des Geometriefaktors

Zu Beginn des 6. Kapitels wurde die Beziehung

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\int E \cdot d\mathbf{l}}{\int E \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{s}} \cdot R_F$$

hergeleitet. Dabei ist der Term vor R_F gleich dem Kehrwert des Geometriefaktors G . Bei der vorliegenden Anordnung konzentrischer, zylinderförmiger Elektroden verläuft das elektrische Feld radial und steht damit senkrecht auf den Mantelflächen der Zylinder. Die Anwendung des Gaußschen Satzes liefert den Betrag E des elektrischen Feldes zwischen zwei Zylindern in Abhängigkeit vom Radius r (in cgs-Einheiten):

$$\oint E(r) da = E(r) \cdot 2\pi r \cdot h = 4\pi q \quad , \text{ d.h.}$$

$$E(r) = 2 \frac{q}{h} \cdot \frac{1}{r}$$

Hierbei ist q die Ladung und h die Höhe der Zylinder.

Die Integration über den Radius liefert die Spannung zwischen zwei zylinderförmigen Elektroden. Die Innere habe den Radius r_i und die Äußere den Radius r_a . Dann ist der Betrag der Spannung U :

$$U = \int_{r_i}^{r_a} E(r) dr = 2 \frac{q}{h} \int_{r_i}^{r_a} \frac{1}{r} dr = 2 \frac{q}{h} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i}$$

Den Strom I erhält man durch Integration der Feldstärke über den Umfang eines Kreises für einen gegebenen Radius r :

$$I = \frac{1}{R_F} \int_0^{2\pi r} E ds = \frac{1}{R_F} \cdot 2 \frac{q}{h} \int_0^{2\pi r} \frac{1}{r} ds = \frac{1}{R_F} \cdot 4\pi \frac{q}{h}$$

Durch Einsetzen ergibt sich damit

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \cdot R_F$$

und schließlich

$$R_F = 2\pi \cdot \left(1 / \ln \frac{r_a}{r_i}\right) \cdot \frac{U}{I} \quad \text{und} \quad G = 2\pi \cdot \left(1 / \ln \frac{r_a}{r_i}\right)$$

Aus

$$R_p = G \cdot R = G \cdot \frac{U}{I}$$

folgt, daß der Geometriefaktor G klein sein muß, um bei konstant gehaltenem Strom I einen möglichst großen Meßwert des Spannungsabfalls U zu erzielen. Wie wir oben gesehen haben, ist der Geometriefaktor G nur abhängig von der Wahl der beiden Radien r_a und r_i , wobei eine Verdoppelung des äußeren Radius r_a die gleiche Änderung hervorruft wie eine Halbierung des inneren Radius r_i . Die folgenden Abbildungen 6.6 und 6.7 zeigen den Verlauf von G als Funktion jeweils eines der Radien für mehrere ausgesuchte Werte von r_a bzw. von r_i .

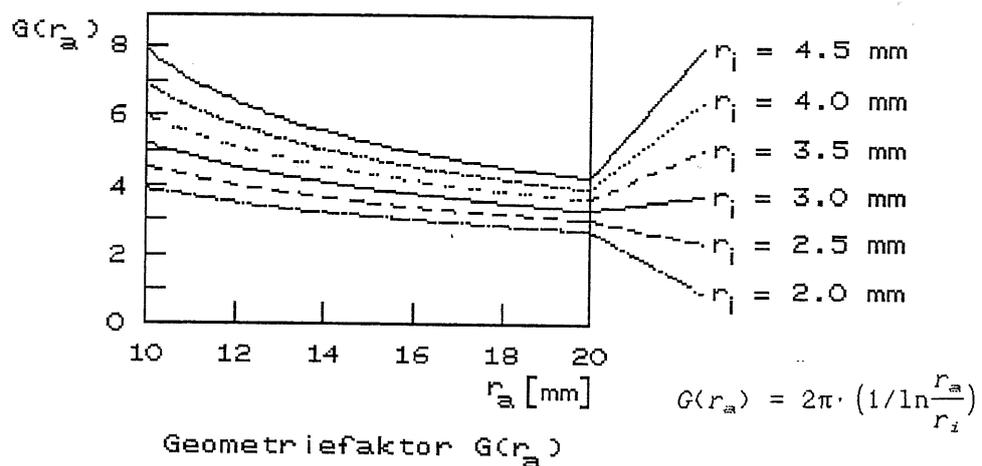


Abbildung 6.6: Der Geometriefaktor G als Funktion des äußeren Radius r_a für mehrere ausgesuchte Werte des inneren Radius r_i

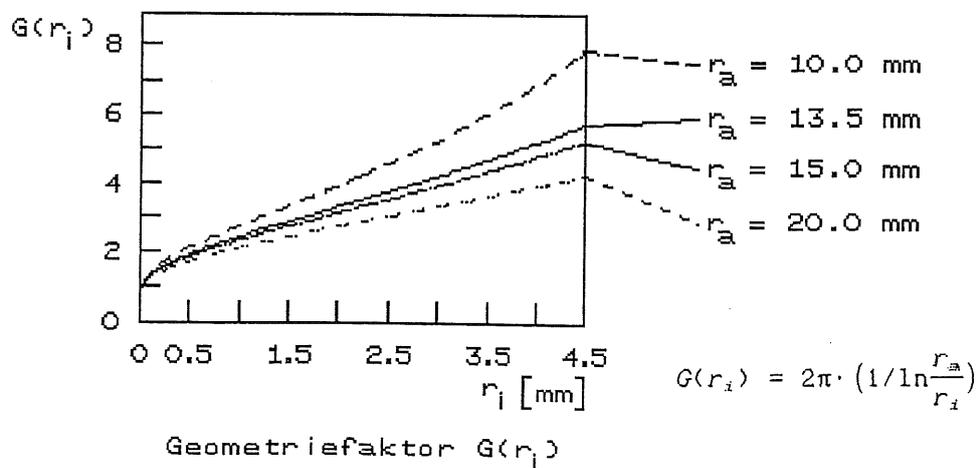


Abbildung 6.7: Der Geometriefaktor G als Funktion des inneren Radius r_i für mehrere ausgesuchte Werte des äußeren Radius r_a

6.3.2 Die Konstruktion des ersten Meßkopfes

Die Wahl der Radien r_a und r_i hängt neben der Optimierung des Geometriefaktors G auch noch von einigen Rahmenbedingungen ab. So soll der Durchmesser der äußersten Elektrode des Meßkopfes 40 mm nicht überschreiten, der gegenseitige Abstand der Elektroden darf aus technischen Gründen nicht kleiner als 1 mm sein, und die Elektroden müssen auch materialbedingt eine Mindestdicke haben.

Um sich der Oberflächenstruktur der Hochwiderstandsbeschichtung der HV-Platten anzupassen, d. h. um einen möglichst guten Kontakt zu gewährleisten, und um die empfindliche Beschichtung nicht zu beschädigen, wurde für die Stromzuführungselektroden ein leitender Verpackungsschaumstoff mit einem Widerstand von ca. 25 k Ω für die äußere Elektrode verwendet. Dieser 3 mm dicke Schaumstoff, aus dem die Elektroden gestanzt wurden, zeichnet sich durch große Elastizität und Formstabilität aus. Die innerste Elektrode besteht aus einem Kreis mit einem Durchmesser von 6 mm, die äußerste ist ringförmig mit einer Breite von 3 mm und einem mittleren Durchmesser von 37 mm. Um die Kontaktwiderstände zu verringern, wurde auf die innerste Elektrode mit Silberleitkleber eine dünne Aluminiumfolie geklebt. Das führte wie beabsichtigt dazu, daß der durch ein Hochspannungs-Netzgerät gelieferte, konstant gehaltene Stromwert bereits bei niedrigeren Versorgungsspannungen gewährleistet werden konnte.

Für die beiden mittleren Elektroden wurden vergoldete, 12 mm hohe Kupferzylinder gewählt, die beide auf einem gemeinsamen PVC-Zylinder befestigt wurden. Dieser PVC-Zylinder wiederum ist im Meßkopf beweglich gelagert und wird durch eine Feder nach außen gedrückt. Der Andruck kann durch zusätzliche Unterscheiben verstärkt werden. Beide Elektroden sind an ihren Enden abgeschrägt, um ihre Breite auf ein Minimum zu reduzieren, und rundgeschliffen, um die Hochwiderstandsbeschichtung zu schonen. Die Wandstärke der inneren Elektrode beträgt 1 mm, und der Radius r_i ihrer äußersten Spitze, mit der sie schließlich die Oberfläche der HV-Platten berührt, hat einen durch Messung bestimmten Wert von (4.3 ± 0.1) mm. Die äußere Elektrode besitzt eine Wandstärke von 2 mm und einen ebenfalls ausgemessenen Radius r_a ihrer äußersten Spitze von (13.7 ± 0.1) mm. Die tragenden Bauteile des Meßkopfes wurden aus PVC-Blöcken gearbeitet und durch drei Schrauben miteinander verbunden. Durch einzelne Bohrungen werden die Kabel zu den jeweiligen Elektroden geführt, an die sie gelötet bzw. mit Silberleitkleber festgeklebt sind. Der komplette Durchmesser des Meßkopfes umfaßt 60 mm, und seine Höhe beträgt 45 mm. Sein Längsschnitt ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Zur Messung der Oberflächenwiderstände wurde der Meßkopf durch zwei Bleiquader mit einem Gesamtgewicht von ca. 5.5 kg beschwert, um den nötigen Andruck für einen guten Kontakt zwischen den Elektroden und der Hochwiderstandsbeschichtung zu erreichen. Bei einem zu starken Gewicht können sich die Metallelektroden in die Beschichtung eindrücken und sie damit soweit beschädigen, daß der Oberflächenwiderstand an dieser Stelle extrem hoch geht.

Der Geometriefaktor G ergibt sich aus r_a und r_i zu $G = 5.42 \pm 0.11$ (relativer Fehler: 2 %).

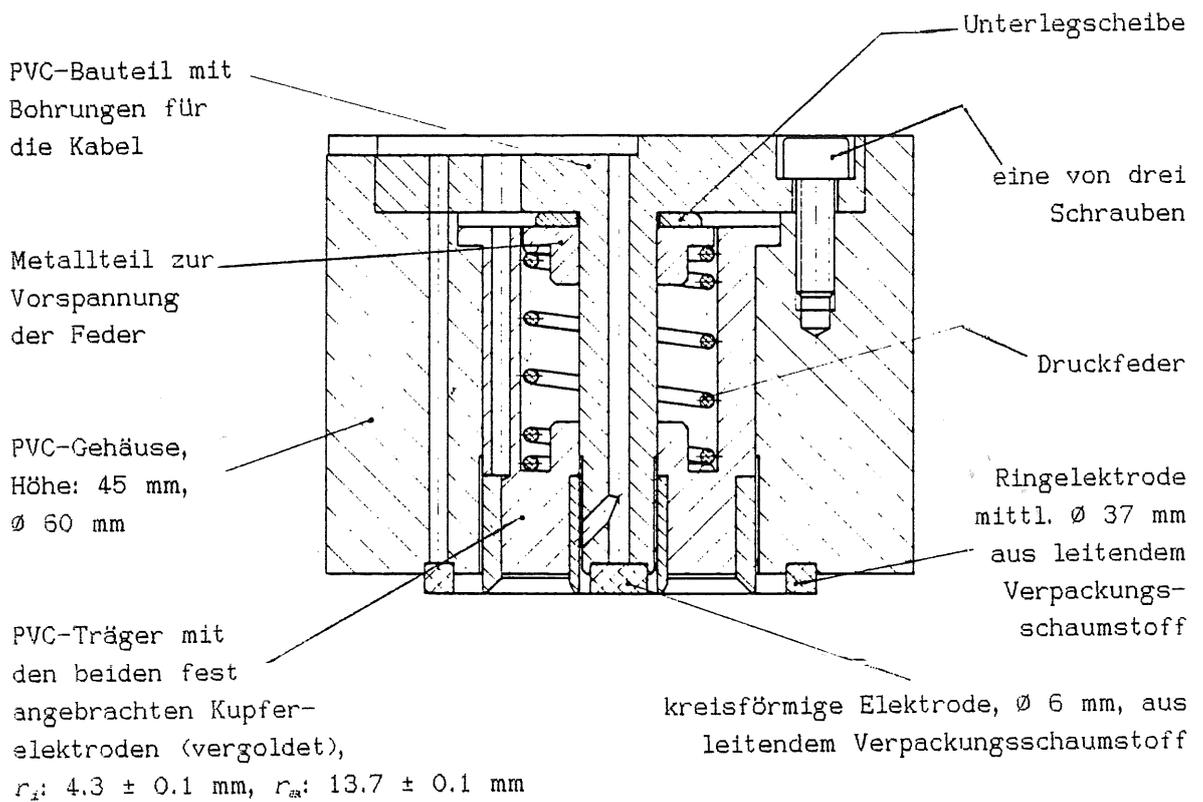


Abbildung 6.8: Längsschnitt des ersten Meßkopfes für Oberflächenwiderstände

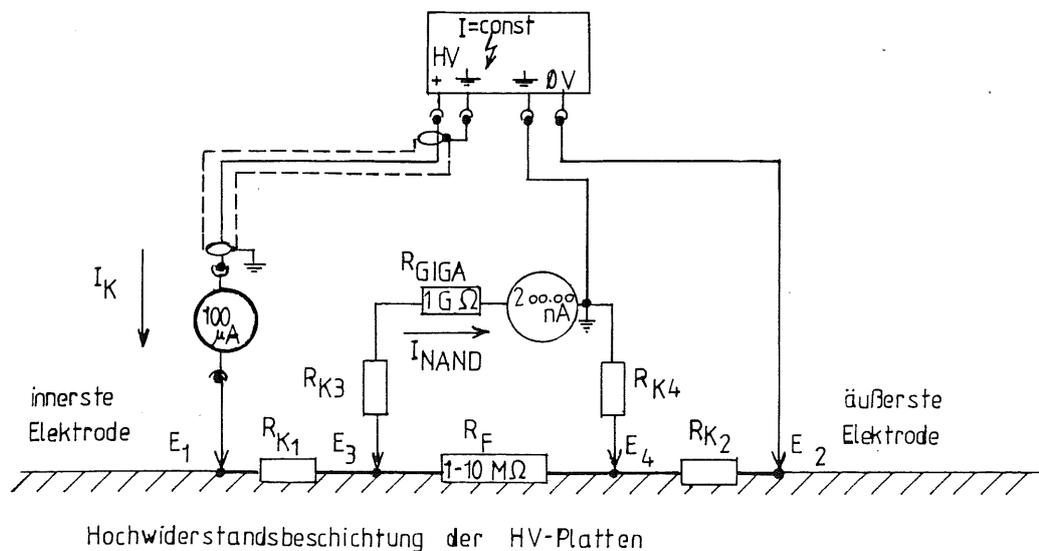


Abbildung 6.9: 1. benutzte Schaltung zur Messung von Oberflächenwiderständen

Abbildung 6.9 zeigt die Schaltung, die für die Messungen verwendet wurde. Aus Sicherheitsgründen liegt die äußerste Elektrode auf 0 V, während die innerste unter positiver Spannung (maximal 500 V) steht. An die Stelle eines Spannungsmeßgerätes mit ausreichend hohem Innenwiderstand wurde ein Digital-Amperemeter mit einer Empfindlichkeit bis zu 0.1 pA in Reihe mit einem ohmschen Widerstand R_{GIGA} , von 1.12 G Ω geschaltet. Der Innenwiderstand des Amperemeters ist mit 1k Ω im verwendeten Meßbereich bis 200 nA (Meßgenauigkeit ± 0.01 nA) dagegen vernachlässigbar. Das Produkt aus dem jeweiligen Meßwert I_{NANO} dieses Amperemeters und dem Wert von 1.12 G Ω ergibt dann die Spannung U , die über dem Oberflächenwiderstand R_F abfällt. Der von einem Hochspannungs-Netzgerät gelieferte Strom I_K , der den Oberflächenwiderstand R_F durchfließt, wird konstant auf (101.1 ± 0.2) μ A gehalten. Somit ist

$$R_F = \frac{G \cdot R_{GIGA}}{I_K} \cdot I_{NANO} \quad \text{oder} \quad R_F = 0.06 \cdot \frac{I_{NANO}}{\text{nA}} \text{ M}\Omega$$

Es wird gefordert, daß der mittlere Oberflächenwiderstand einer HV-Platte zwischen 1 M Ω und 10 M Ω und idealerweise bei 3 M Ω liegen soll.

Die Bedingung $R_{GIGA} \gg R_F$ ist also erfüllt, so daß der Strom I_{NANO} , der durch R_{GIGA} fließt und in der Größenordnung von 100 nA liegt, gegen den Konstantstrom I_K von 101.1 μ A vernachlässigbar ist.

6.3.3 Tests mit dem ersten Meßkopf

Die mit dem Meßkopf ermittelten Widerstandswerte müssen zunächst einmal mit Kontrollmessungen verglichen werden, um ihre Zuverlässigkeit zu überprüfen und um gegebenenfalls den Meßkopf zu eichen. Dazu wurden bei vier HV-Platten jeweils sieben Quadrate (Kantenlänge 50 mm) in die Hochwiderstandsbeschichtung einer Seite geschnitten, so daß es zwischen der Beschichtung innerhalb und außerhalb eines Quadrates keine leitende Verbindung mehr gab. In den Quadraten wurden dann vier parallele, 50 mm lange und ca. 1 mm schmale Streifen mit Silberleitkleber bestrichen. Die beiden äußeren Streifen haben voneinander einen Abstand von (50.0 ± 0.1) mm, die beiden inneren liegen (43.0 ± 0.1) mm auseinander. Sie dienen mit ihrem optimalen Kontakt zur Oberfläche als Elektroden für eine Oberflächenwiderstandsmessung mittels der Vierpoltechnik. Die Stromzuleitung an den äußeren und der Spannungsabgriff an den inneren Elektroden erfolgte durch Meßfühler, die auf die Elektroden gedrückt wurden. Der Geometriefaktor G dieser Anordnung beträgt: $G = 1.163 \pm 0.004$. Inhomogenitäten des elektrischen Feldes an den Enden der Elektroden sowie sonstige Störeffekte, wie ein Fließen des Stroms über die Elektroden hinaus durch die umliegende HRC-Schicht, werden durch die Schnitte entlang der Quadrate vermieden. Auf diese Weise erhält man definierte Eichfelder, die die Referenzwerte liefern für die Meßwerte, die auf diesen Feldern mit dem Meßkopf ermittelt werden.

Die Messungen mit dem Meßkopf wurden gemeinsam mit den Kontrollmessungen an mehreren Tagen und bei unterschiedlichen Bedingungen, wie z. B. Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur durchgeführt. So erhielt man an einem Tag als Mittelwert \bar{R}_K aller Kontrollmessungen: $\bar{R}_K = 2.91 \text{ M}\Omega$ und vier Wochen später: $\bar{R}_K = 2.77 \text{ M}\Omega$, was einer relativen Abweichung von -5% entspricht. An denselben Tagen lagen die Mittelwerte aller Meßkopfmessungen in der gleichen Größenordnung bei $2.94 \text{ M}\Omega$ bzw. bei $2.72 \text{ M}\Omega$. Die relativen Abweichungen zwischen den Kontrollwerten und den Meßkopfwerten liegen zum größten Teil zwischen $\pm 3 \%$ und, von wenigen Ausnahmen abgesehen, maximal bei $\pm 5 \%$ (s. Abbildung 6.10).

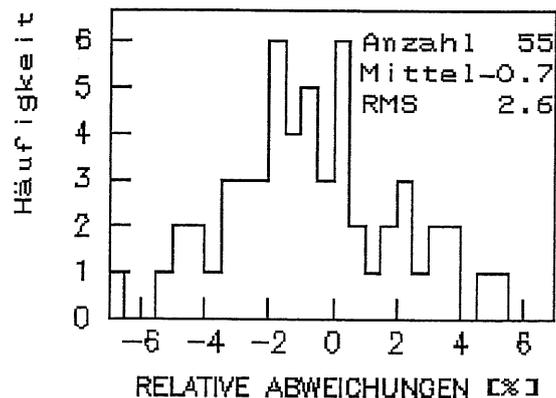


Abbildung 6.10: Relative Abweichungen zwischen den Meßwerten der Oberflächenwiderstände, die mit dem Meßkopf bestimmt wurden, und den Kontrollmessungen an definierten, quadratischen HRC-Flächen

Die Auswirkungen der äußeren Einflüsse auf die Widerstandswerte sind im folgenden einmal exemplarisch für ein einzelnes HRC-Eichfeld einer HV-Platte aufgeführt. In diesem Fall wurden nur zwei parallele Streifen entlang den inneren Kanten eines Quadrats mit Silberleitkleber bestrichen, und der Oberflächenwiderstand wurde direkt mit einem Digital-Ohmmeter (FLUKE 77) gemessen, indem die beiden Meßfühler auf die Streifen gedrückt wurden. Die auf diese Weise erzielten Widerstandswerte lagen innerhalb des $\pm 5\%$ igen Schwankungsbereichs der Meßwerte, die anschließend, nach Auftragung zweier weiterer Streifen in dem Quadrat, mit der Vierpoltechnik (s. oben) bestimmt wurden.

Die Messungen fanden Ende November statt.
Es ergaben sich folgende Ergebnisse :

- | | |
|---|------------------|
| a) Zimmertemperatur und geschlossenes Fenster: | (4.45 ± 0.05) MΩ |
| b) abgekühlter Raum und geöffnetes Fenster: | 4.25 MΩ |
| c) während der Messung Anhauchen des Meßfeldes: | 4.35 MΩ |

Erwartungsgemäß sinkt also mit steigender Luftfeuchtigkeit der Widerstandswert, in diesem Fall maximal um ca. 5 %. Der Einfluß der Temperatur wurde noch gesondert untersucht, indem mit einem Heißluftgerät während der Messung heiße Luft auf das Meßfeld geblasen wurde. Bei der Messung mit dem Meßkopf stieg der Strom I_{NANO} von 53 nA auf 70 nA, was einer 33%igen Steigerung des Oberflächenwiderstandes R_F von 3.6 MΩ auf 4.8 MΩ entspricht. Nach längerer Heißluftbehandlung wurde jedoch mit dem Digital-Ohmmeter ein Wert von 21.3 MΩ gemessen, der auch nach Abkühlen des Meßfeldes nicht wieder sank.

Der nächste wichtige Punkt, der untersucht wurde, war die Reproduzierbarkeit der Meßwerte, die auf einer bestimmten Stelle einer HV-Platte mit dem Meßkopf ermittelt wurden. Dabei betrug der reine Meßfehler von I_{NANO} stets ± 0.3 nA. Das ergibt einen relativen Fehler von 1 % für die niedrigen Stromwerte um 30 nA und 0.4 % für die hohen um 75 nA. Allerdings war der Wert von I_{NANO} äußerst empfindlich auf Bewegungen, die in der Nähe der Meßapparatur stattfanden. Die Schwankungen lagen dann bei ± 1 nA, und nur bei Abwesenheit jeglicher Störungen stellte sich der ursprüngliche Wert wieder ein.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde der Meßkopf mehrfach (bis zu 15mal) auf ein gegebenes Eichfeld aufgesetzt und der jeweilige Widerstandswert genommen. So lieferte z. B. eine Meßreihe von 13 Einzelmessungen einen mittleren Oberflächenwiderstand \bar{R}_F von 1.98 MΩ mit einer Differenz von ± 0.03 MΩ (= ± 1.5 %) zum maximalen und zum minimalen Wert aller Messungen.

Eine andere Meßreihe beschäftigte sich mit den Unsicherheiten, die aus einer unsymmetrischen Plazierung der beiden Viertelsteine zur Beschwerung des Meßkopfes resultieren. Hierzu wurden die Viertelsteine zusammen in vier entgegengesetzten Richtungen etwas über den Mittelpunkt des Meßkopfes verschoben. Der höchste Wert der 13 Messungen betrug 2.25 MΩ und der niedrigste 1.91 MΩ. Das bedeutet für den Mittelwert von 2.08 MΩ eine Differenz von ± 0.17 MΩ oder ± 8 bis 9 %. Ein unsymmetrischer Andruck des Meßkopfes kann dazu führen, daß die weniger belastete Seite nur noch geringen Kontakt zur HRC-Oberfläche bekommt, was durch die Nachgiebigkeit des Schaumstoffes zusätzlich begünstigt wird.

Faßt man die Ergebnisse der verschiedenen Tests zusammen, so sind die Messungen mit dem Meßkopf, sofern sie sorgfältig durchgeführt werden, im Schnitt mit einem Fehler von ± 5 % behaftet. Schlimmstenfalls liegen die Meßfehler bei ± 10 %.

6.3.4 Messungen an 30 HV-Platten

Um die Tauglichkeit der Meßmethode für Serienmessungen zu prüfen, wurde eine Testreihe mit 30 HV-Platten durchgeführt. Auf jeder Seite wurden sechs bestimmte Stellen gemessen (s. Abbildung 6.11).

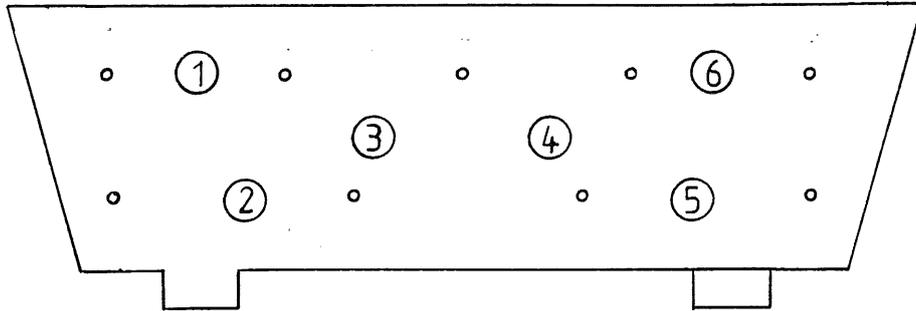
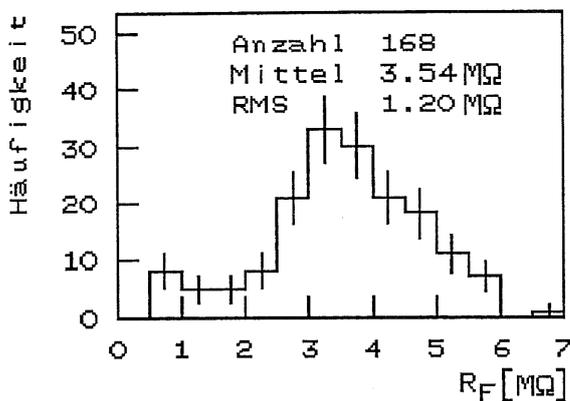
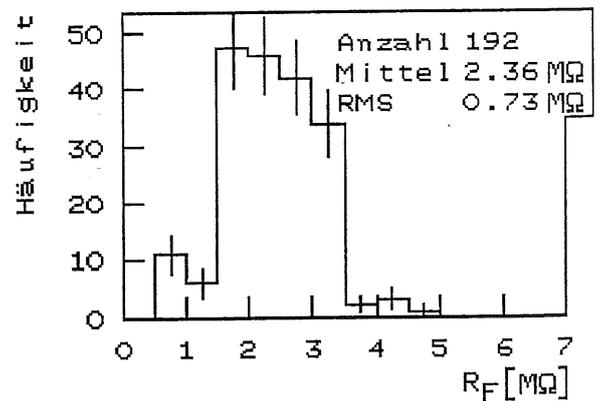


Abbildung 6.11: Schematische Darstellung der Verteilung der sechs Meßpositionen auf einer HV-Platte

Die HV-Platten wurden so ausgewählt, daß untersucht werden konnte, inwieweit die Widerstandswerte davon abhängig sind, in welchem Ofen die Platten gehärtet wurden. Es wurden jeweils nur die oberen Roste und der Boden jedes Ofens belegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.12 a) und b) dargestellt.



Umluftofen (Alle Punkte)



Konvektionsofen (Alle Punkte)

a)

b)

Abbildung 6.12: Verteilungen aller Oberflächenwiderstandswerte

- a) von HV-Platten, die in einem Umluftofen gehärtet wurden
- b) von HV-Platten, die in einem Konvektionsofen gehärtet wurden

Man erkennt deutlich, daß die Widerstandswerte der Platten, die im Umluftofen gehärtet wurden, um gut 1 M Ω höher liegen als die Werte der Platten, die im Konvektionsofen gehärtet wurden. Das ist offenbar eine Folge davon, daß die Temperatur am Konvektionsofen höher eingestellt wurde als am Umluftofen, um die schlechtere Temperaturverteilung auszugleichen (s. Kapitel 5.2). Eine höhere Temperatur bewirkt eine bessere Aushärtung und damit einen niedrigeren Oberflächenwiderstand. Die Widerstandswerte unter 1 M Ω stammen durchweg von Plattenseiten, die in beiden Öfen auf dem gewellten Boden und nicht mehr auf den Rosten lagen. Da sich in den Böden die Heizstäbe befinden, sind die Platten dort durch den direkten Kontakt besonders hohen Temperaturen ausgesetzt. Das bedeutet, wie gesagt, daß die HRC-Schicht wesentlich intensiver aushärten kann, wodurch der Oberflächenwiderstand sinkt.

Der Vergleich zwischen den Werten der erst- und der zweitbedruckten Seiten zeigte für die erstbedruckten Seiten mit einem Durchschnitt von 3.07 M Ω rund 10 % höhere Ergebnisse als die zweitbedruckten Seiten mit 2.75 M Ω . Näheres dazu s. Kapitel 7, Abbildungen 7.4 und 7.9.

Der Mittelwert aller 360 Einzelmessungen beträgt 2.91 M Ω mit einer mittleren quadratischen Abweichung (RMS) von 1.14 M Ω . Die Mittelwerte der jeweils 60 Messungen pro Meßposition sind im folgenden aufgeführt:

Meßposition:	1	2	3	4	5	6
Mittelwert [M Ω]:	2.89	2.84	3.09	3.01	2.80	2.83
RMS [M Ω]:	1.14	1.03	1.34	1.23	0.99	1.05

Obwohl die Mittelwerte der einzelnen Meßpositionen keine größeren Differenzen aufweisen, kann doch der Oberflächenwiderstand auf einer Plattenseite um bis zu 1.5 M Ω oder 50 % schwanken.

Die andere Frage dieser Testreihe nach der Tauglichkeit der Meßmethode für Serienmessungen mußte allerdings verneint werden, da sich der Meßvorgang als zu zeitaufwendig und unkomfortabel erwies. Auch für den Meßkopf sollte es noch einige Verbesserungen geben.

6.3.5 Konstruktion und Eigenschaften des zweiten Meßkopfes

Zunächst einmal wurde der Geometriefaktor G optimiert (s. Abbildungen 6.6 und 6.7) und von $G = 5.42$ auf $G = 3.86 \pm 0.08$ (relativer Fehler: 2.1 %) verringert. Der Radius r_i der inneren Elektrode beträgt nun (2.9 ± 0.1) mm und der Radius r_a der äußeren (14.75 ± 0.1) mm.

Ein schematischer Längsschnitt des Meßkopfes ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Die wesentlichen Verbesserungen bestehen in dem nun fest montierten Gewicht mit Griff und den jetzt voneinander unabhängig in der Vertikalen verschiebbaren, durch jeweils eine eigene Feder andrückbaren Elektroden. Der leitende Schaumstoff für die Stromzuleitung wurde komplett durch vergoldete Kupfer- bzw. Messingelektroden ersetzt.

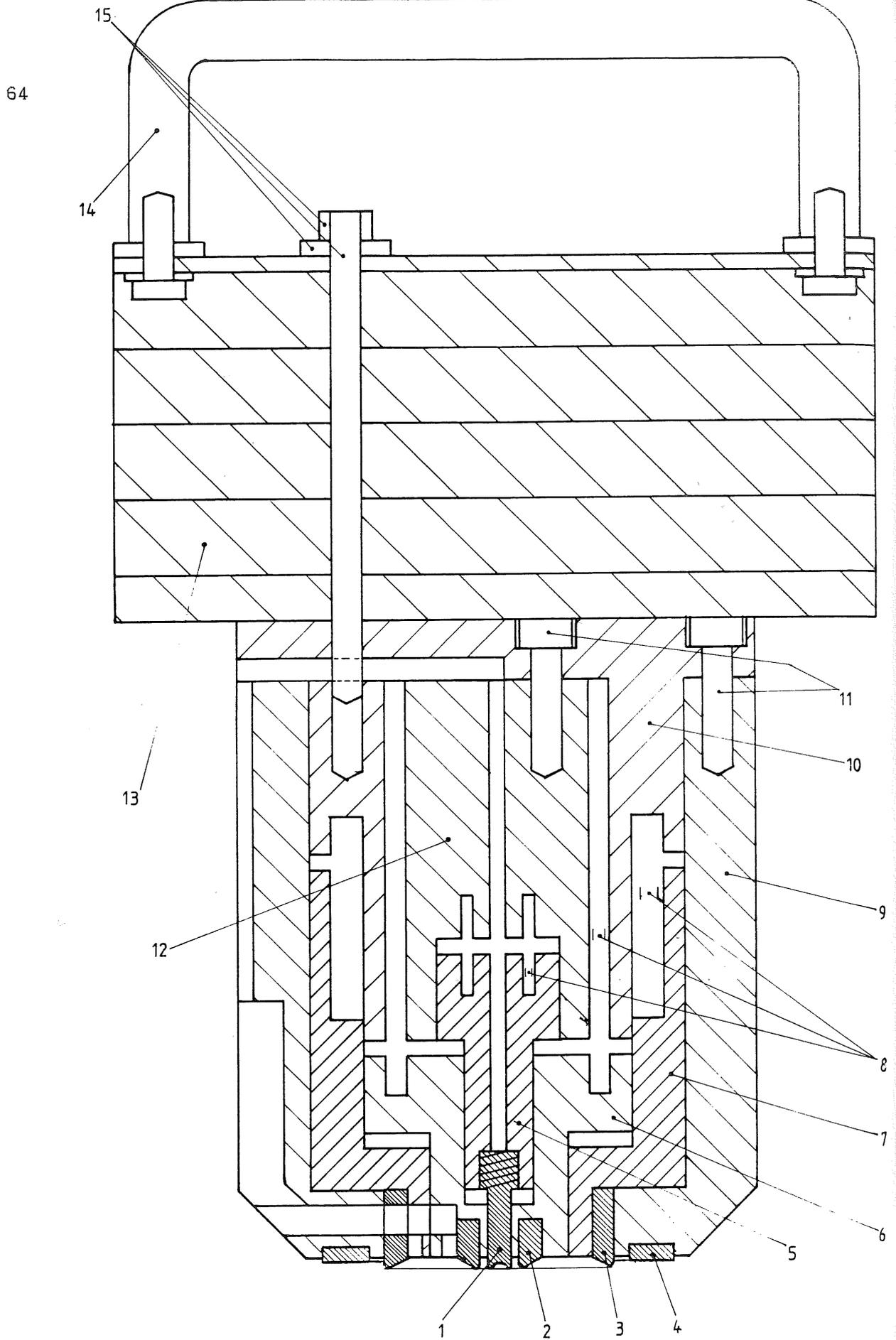


Abbildung 6.13: Schematischer Längsschnitt des zweiten Meßkopfes für Oberflächenwiderstände (Erläuterungen s. nächste Seite)

- 1: konkave, vergoldete Kupferelektrode (\varnothing 3mm, Gesamthöhe: 15.5 mm), die in das Messing-Trägerbauteil 5 geschraubt ist
- 2: vergoldete Kupferelektrode, Höhe: 6.5 mm, Radius r_z der rundgeschliffenen Spitze: (2.9 ± 0.1) mm
- 3: vergoldete Kupferelektrode, fest mit Messing-Trägerbauteil 7 verbunden, Höhe: 10.5 mm, Radius r_a der rundgeschliffenen Spitze: (14.75 ± 0.1) mm
- 4: vergoldete Messingelektrode mit polierter Oberfläche und abgerundeten Kanten, Höhe: 2.75 mm, innerer \varnothing : 33 mm, äußerer \varnothing : 45 mm
- 5: Messing-Trägerbauteil (größter \varnothing : 16 mm, Höhe: 31 mm) mit Bohrung (\varnothing 2 mm) für das Kabel und Nut für die Druckfeder der Elektrode 1
- 6: PVC-Trägerbauteil (größter \varnothing : 35 mm, Höhe 16.4 mm) mit Nut für die Druckfeder der Elektrode 2
- 7: Messing-Trägerbauteil (größter \varnothing : 49 mm, Höhe 51 mm) für die Elektrode 3
- 8: 3 Druckfedern:
 - innere: mittlerer \varnothing : 3.0 mm, Länge: 13 mm, Federkonstante: 5.68 N/mm
 - mittlere: mittlerer \varnothing : 26.4 mm, Länge: 55 mm, Federkonstante: 1.035 N/mm
 - äußere: mittlerer \varnothing : 38.8 mm, Länge: 33 mm, Federkonstante: 0.742 N/mm
- 9: PVC-Gehäusebauteil, \varnothing 68 mm, Höhe: 76 mm, mit Langlöchern und Bohrung (\varnothing 4mm) für die Kabel der Elektroden 2, 3 und 4
- 10: PVC-Trägerbauteil, Gesamthöhe: 55.5 mm, größter \varnothing : 68 mm, mit Nut für die Druckfeder der Elektrode 3
- 11: je 3 M4-Schrauben, die die PVC-Träger- und Gehäusebauteile 9,10 und 12 miteinander verbinden
- 12: PVC-Block (\varnothing 23.8 mm, Höhe: 47.5 mm) mit Bohrung (\varnothing 2 mm) für das Kabel und Nut für die Druckfeder der Elektrode 1
- 13: 5 Stahlplatten, die als Andruckgewicht dienen, \varnothing 100 mm, Gesamthöhe: 46 mm, Gesamtgewicht: ca. 3 kg
- 14: Haltegriff
- 15: eine von 3 Gewindestangen mit Mutter und Unterlegscheibe zur Befestigung der Stahlplatten am Meßkopf

Die Gesamthöhe des Meßkopfes ohne Stahlplatten beträgt 87 mm und mit Stahlplatten einschließlich des Haltegriffs 167 mm. Sein Durchmesser ist 68 mm.

Beim ersten Meßkopf sollten eventuelle Plattenunebenheiten und die Oberflächenstruktur der HRC-Schicht durch die Verwendung von leitendem Schaumstoff ausgeglichen werden. Jedoch zeigte die Erfahrung dann mehr Nachteile als Vorteile. Die Porosität des Schaumstoffs führte zum Ausfransen der Ränder und bewirkte auch mit der schlechten Leitfähigkeit zu hohe Kontaktwiderstände. Das machte sich dadurch bemerkbar, daß der durch ein Hochspannungs-Netzgerät gelieferte, konstant gehaltene Strom I_k bereits bei niedrigeren Versorgungsspannungen gewährleistet werden konnte, nachdem auf die innerste Elektrode mit Silberleitkleber eine dünne Aluminiumfolie geklebt wurde (s. auch Kapitel 6.3.2). Neben den unglatten Rändern erwies sich auch die Nachgiebigkeit des Schaumstoffes als Unsicherheitsfaktor sowohl für den Verlauf des elektrischen Feldes als auch für einen gleichmäßigen Kontakt der Elektroden mit der HRC-Oberfläche. Um trotzdem eine Anpassung an die Plattenoberfläche zu ermöglichen, wurden nun beim zweiten Meßkopf alle Elektroden, bis auf die äußerste, voneinander unabhängig vertikal gegeneinander verschiebbar mit jeweils einer eigenen Andruckfeder versehen. Die Federn können durch die Länge ihrer Nuten entsprechend vorgespannt und ihr Druck damit aneinander angeglichen werden. Die drei inneren Elektroden üben nun im Schnitt einen Druck von 50 N/cm^2 auf die HRC-Schicht aus, wodurch ein guter Kontakt erzielt wird. Die Belastbarkeit der Schicht stößt damit allerdings an ihre Grenzen. Wirkt auf die Elektroden eine noch größere Kraft, hinterlassen sie auf der HRC-Schicht Eindrücke. Solche Beschädigungen stören die Leitfähigkeit der Schicht und erhöhen den Oberflächenwiderstand. Die Schonung der empfindlichen Hochwiderstandsbeschichtung wird durch die äußerste vergoldete Messingelektrode gewährleistet. Sie besitzt eine polierte Oberfläche sowie abgerundete Ränder und drückt bei einer Breite von 6 mm nur mit ca. 3 N/cm^2 auf die HRC-Schicht.

Auch bei der Schaltung (s. Abbildung 6.13) wurden wesentliche Verbesserungen der Meßmethode erreicht, die letztendlich die Voraussetzung für die Serienmessungen lieferten. Die Abschirmung aller Kabel bewirkte die Stabilisierung der Meßwerte, die damit auf Bewegungen in der Nähe der Meßapparatur nicht mehr empfindlich waren (s. Kapitel 6.3.3). Das Digital-Amperemeter zur Messung des Stroms I_{NAND} wurde durch ein Digital-Multimeter ersetzt, das mit einer IEEE/IEC-Schnittstelle versehen ist und von einem PC aus gesteuert und ausgelesen werden kann. Mit dem Multimeter wurde der Strom I_{NAND} im Bereich bis $1 \mu\text{A}$ bei einer Auflösung von 0.1 nA gemessen.

Das Programm zur Steuerung und Auslese des Multimeters wurde von M. Korn geschrieben. Der Meßvorgang läuft nun folgendermaßen ab:

Durch Eingabe eines Befehls am PC wird das Programm gestartet. Es stellt zuerst das Multimeter auf Gleichstrommessung im Bereich bis $1 \mu\text{A}$ ein und erlaubt dann die Messung des Oberflächenwiderstandes durch einen Tastendruck, sobald der Meßkopf auf der richtigen Position steht.

Nach einer Sekunde nimmt das Multimeter den Wert von I_{NANO} auf und überträgt ihn über den IEEE-Bus zum PC, wo er zur Berechnung des Oberflächenwiderstandes nach der Formel

$$R_F = \frac{G \cdot R_{GIGA} \cdot I_{NANO}}{I_K} \quad \text{oder} \quad R_F = 0.04 \cdot \frac{I_{NANO}}{\text{nA}} \text{ M}\Omega ,$$

mit $G = 3.86$, $R_{GIGA} = 1.12 \text{ G}\Omega$ und $I_K = 101.1 \mu\text{A}$,

weiterverarbeitet wird. Nach weiteren zwei Sekunden wird der Vorgang automatisch wiederholt und der neue Widerstandswert mit dem vorherigen verglichen. Sofern die Abweichung zum ersten Wert kleiner als 1 % ist, wird der zweite Widerstandswert zwischengespeichert. Ist die Abweichung größer als 1 %, wird der Vorgang so oft wiederholt (höchstens 10mal), bis die Bedingung erfüllt ist. Sobald für eine Meßposition ein Widerstandswert zwischengespeichert worden ist, kann durch einen Tastendruck die Messung für diese Position wiederholt oder die nächste durchgeführt werden. Nachdem alle Positionen einer Platte gemessen worden sind, werden alle ermittelten Widerstandswerte in einer Datei auf der Festplatte des PCs abgespeichert. Zum Schluß liefert das Programm eine grafische Darstellung der Meßwerte für jede Platte einschließlich der daraus berechneten Mittelwerte.

Auf diese Weise sind sehr komfortable und zügige Serienmessungen möglich.

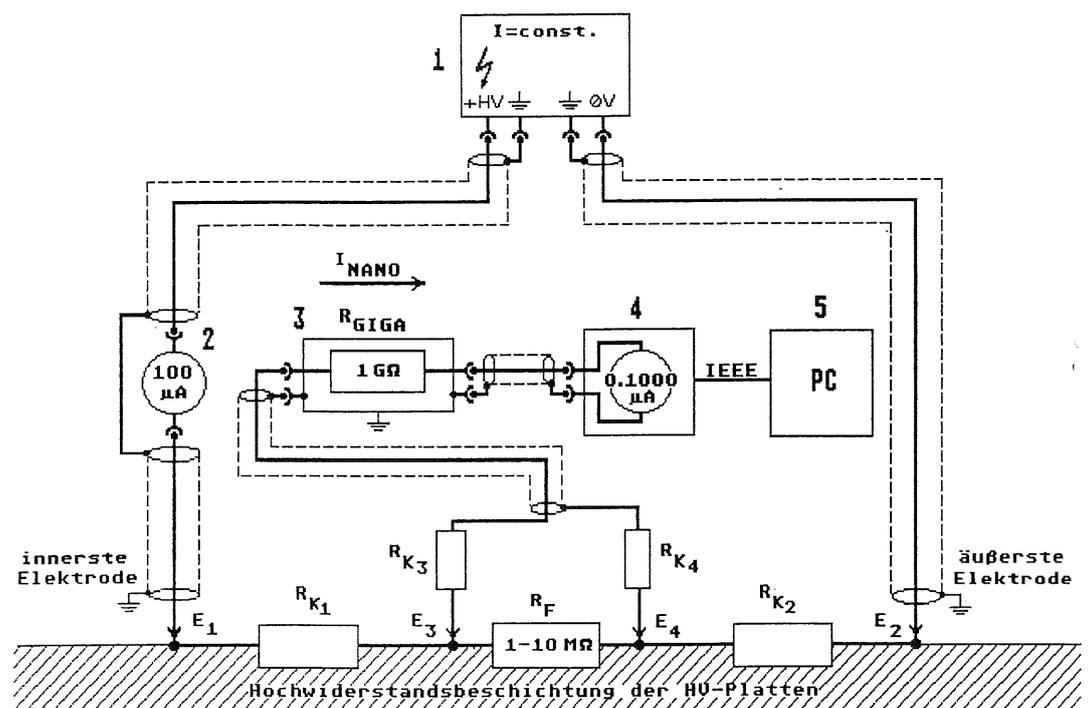


Abbildung 6.14: 2) verwendete Schaltung zur Serienmessung von Oberflächenwiderständen

- 1 Hochspannungsnetzgerät (fug, Modell HCN 140-12500)
- 2 Digitalmultimeter (Hewlett Packard, Modell 3435A)
- 3 abgeschirmter Vorwiderstand
- 4 Multimeter versehen mit einer IEEE-488/IEC-625-Schnittstelle
(Philips, Modell PM2525)
- 5 IBM-kompatibler PC (Industry Computer Int.)

Auch der zweite Meßkopf wurde verschiedenen Prüfungen unterzogen. Als Eichfelder dienten dieselben in die HRC-Schicht geschnittenen Quadrate wie für den ersten Meßkopf (s. Kapitel 6.3.3). Die Tests der Reproduzierbarkeit und der Vergleich der Werte des zweiten Meßkopfes mit den Eichmessungen sowie mit den Werten des ersten Meßkopfes verliefen zufriedenstellend und ergaben Differenzen von durchschnittlich $\pm 5\%$.

Im Verlauf der Serienmessungen wurde der Meßkopf wiederholt an einem Eichfeld überprüft.

7. Die Serienmessungen und ihre Auswertungen

In den Zeiträumen vom 13.6.1989 bis zum 20.10.1989 und vom 20.12.1990 bis zum 15.5.1990 wurden die Oberflächenwiderstände der HV-Platten sowie die Massen der HV- und der Ausleseplatten der elektromagnetischen Kalorimeterringe FB2E und BBE des H1-Detektors gemessen. Hierzu wurde der zweite Meßkopf und die in Abbildung 6.14 gezeigte Schaltung verwendet. Für die Serienmessungen genügte die Bestimmung der Oberflächenwiderstände von jeweils drei definierten Stellen auf jeder Plattenseite (s. Abbildungen 7.1 und 7.6). Ziel der Messungen war die Sicherstellung, daß alle HV-Platten in den beiden Kalorimeterringen Oberflächenwiderstände aufweisen, die über eine Seite gemittelt zwischen 1 und 10 M Ω liegen und lokal nicht größer sind als 20 M Ω .

7.1 FB2E

In Abbildung 7.1 ist die diagonale Anordnung der drei Meßpositionen für die Ober- und die Unterseite dargestellt.

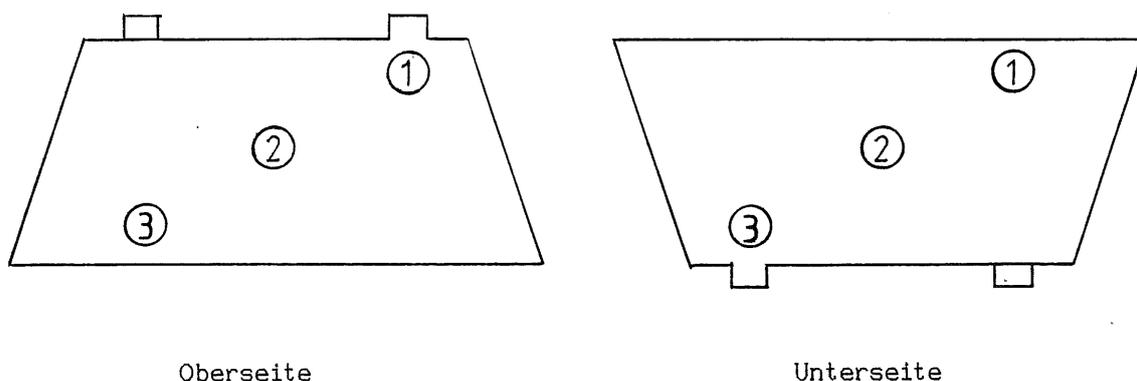
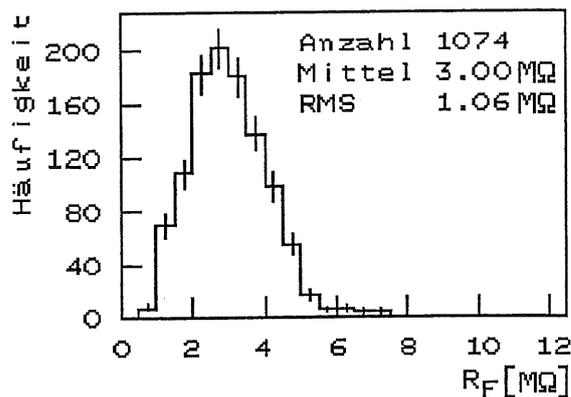


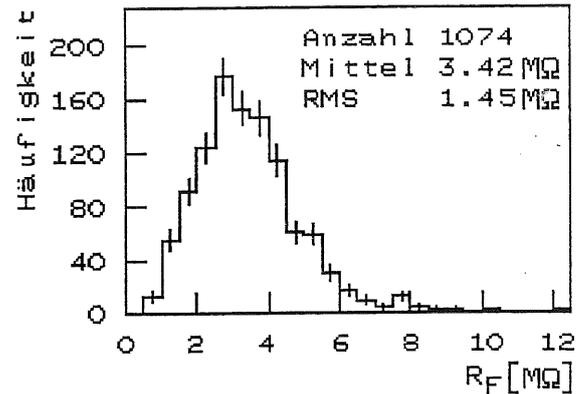
Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Verteilung der drei Meßpositionen auf der Ober- und der Unterseite einer FB2E-HV-Platte

HV-Platten, bei denen lokal ein Oberflächenwiderstand größer als 20 M Ω auftrat, wurden von vornherein nicht in die Auswertung einbezogen. Ihr Anteil betrug ca. 3 %. Abbildung 7.2 zeigt für jede Meßposition einzeln sowie für alle Einzelmessungen zusammen die Verteilungen der Widerstandswerte von insgesamt 537 HV-Platten. Ungefähr 2 % aller Platten haben einen mittleren Oberflächenwiderstand kleiner als 1 M Ω .



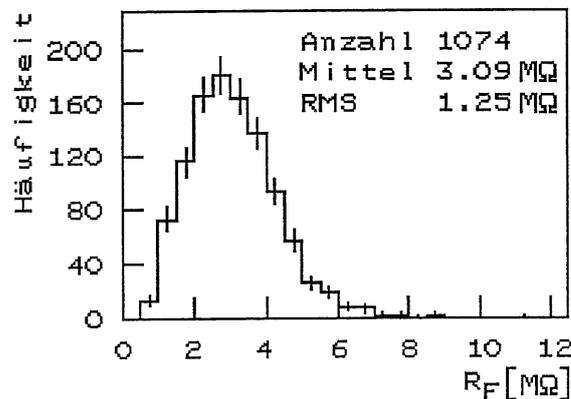
Widerstand (Punkt 1)

a)



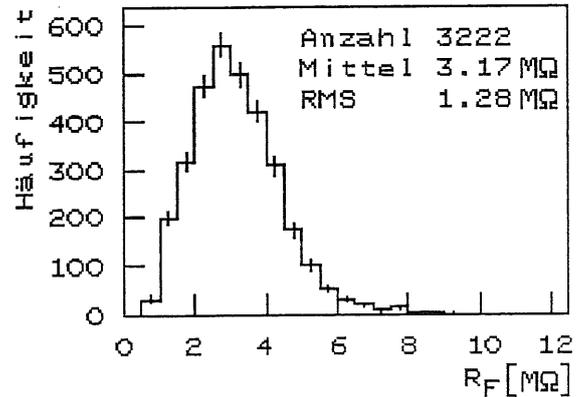
Widerstand (Punkt 2)

b)



Widerstand (Punkt 3)

c)



Widerstand (alle Punkte)

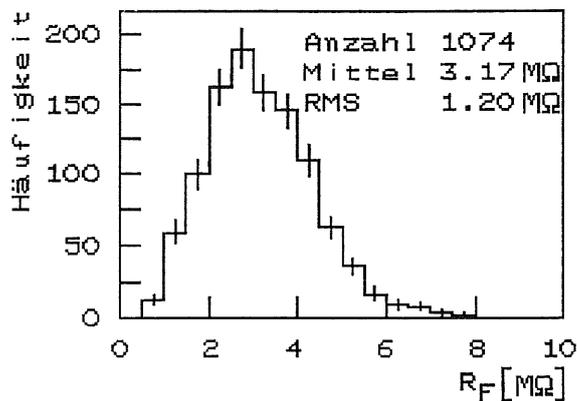
d)

Abbildung 7.2: Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der FB2E-HV-Plattenseiten

- a) für Meßposition 1
- b) für Meßposition 2
- c) für Meßposition 3
- d) für alle Meßpositionen zusammen

Alle Widerstände unterliegen Verteilungen, die zwar Ausläufer zu höheren Werten besitzen, aber ansonsten ungefähr den gewünschten Mittelwert von 3 MΩ aufweisen. Man erkennt jedoch, daß der Mittelwert der Position 2 etwa 10 bis 14 % über den Mittelwerten der Positionen 1 und 3 liegt und daß dort auch die Werte stärker streuen. Offenbar ist dafür wieder die Temperaturverteilung in den Öfen verantwortlich (s. Kapitel 6.3.4). Während die Temperatur an den Rändern der Platten noch relativ hoch ist, nimmt sie zur Mitte hin ab und bewirkt dadurch eine schlechtere Aushärtung und somit einen niedrigeren Oberflächenwiderstand.

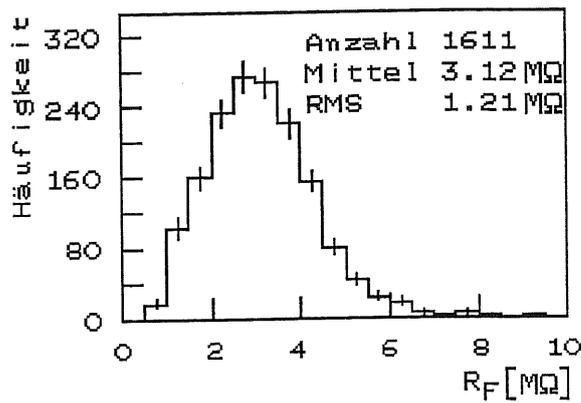
Die nächste Abbildung 7.3 zeigt, daß auch die Mittelungen über die einzelnen Plattenseiten die Anforderungen erfüllen.



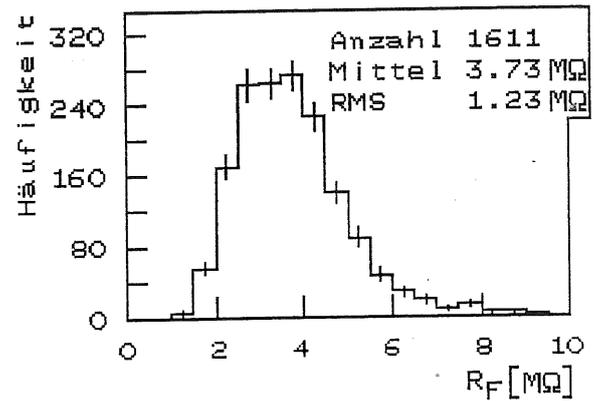
mittl. Widerstand d. Boards

Abbildung 7.3: Verteilung der mittleren Oberflächenwiderstände der FB2E-HV-Plattenseiten

Eine Unterscheidung der Plattenseiten in Ober- und Unterseiten ergibt keine wesentliche Differenz zwischen den Mittelwerten ihrer Verteilungen (s. Abbildungen 7.4 a) und c)). Das liegt daran, daß die definierte Oberseite einer Platte nicht unbedingt auch die mit der HRC-Schicht erstbedruckte Seite war. Die erstbedruckte Seite unterscheidet sich jedoch von der zweitbedruckten dadurch, daß sie zwar doppelt so lange aushärtet, dafür aber einen geringeren Rußanteil von 11.3 % gegenüber 13.0 % hat (s. Kapitel 5.2). Ersteres bewirkt eine Senkung des Widerstandes und letzteres eine Erhöhung. Allerdings führte das in der Massenproduktion der HRC-Schicht auf den HV-Platten zu einer Überkompensation: die Verringerung der Leitfähigkeit durch Senkung des Rußanteils wirkte sich stärker aus als der die Leitfähigkeit erhöhende Effekt der besseren Aushärtung. Das geht deutlich aus den Abbildungen 7.4 b) und d) hervor. Für jede Platte wurden die Mittelwerte beider Seiten bestimmt. Die Einzelwerte der Seite mit dem höheren Mittelwert wurden dann dem Histogramm "Große Werte" (Abbildung 7.4 b)) zugeordnet, die Einzelwerte der anderen Seite dem Histogramm "Kleine Werte" (Abbildung 7.4 d)). Hier ergibt sich nun eine klare Differenz zwischen den Mittelwerten der Verteilungen von über 1 $M\Omega$.



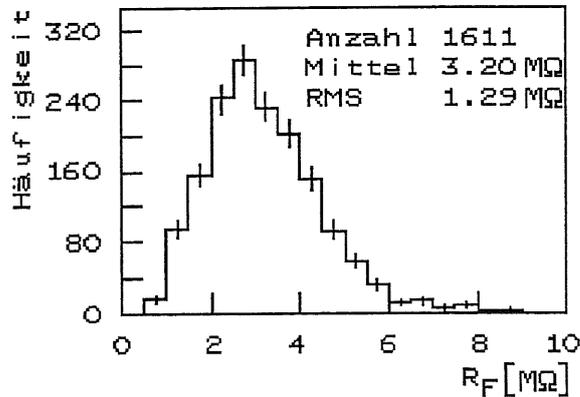
Oberseite (alle Punkte)



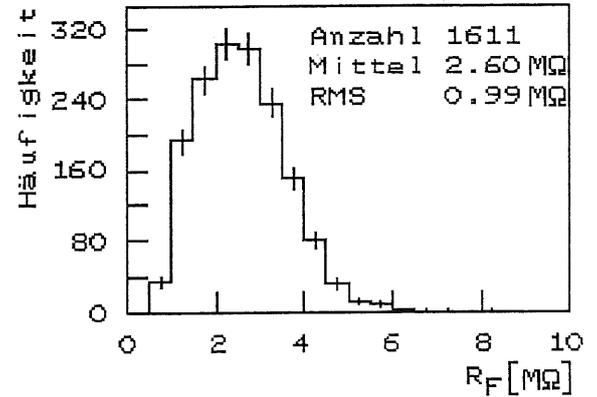
Grosse Werte (alle Punkte)

a)

b)



Unterseite (alle Punkte)



Kleine Werte (alle Punkte)

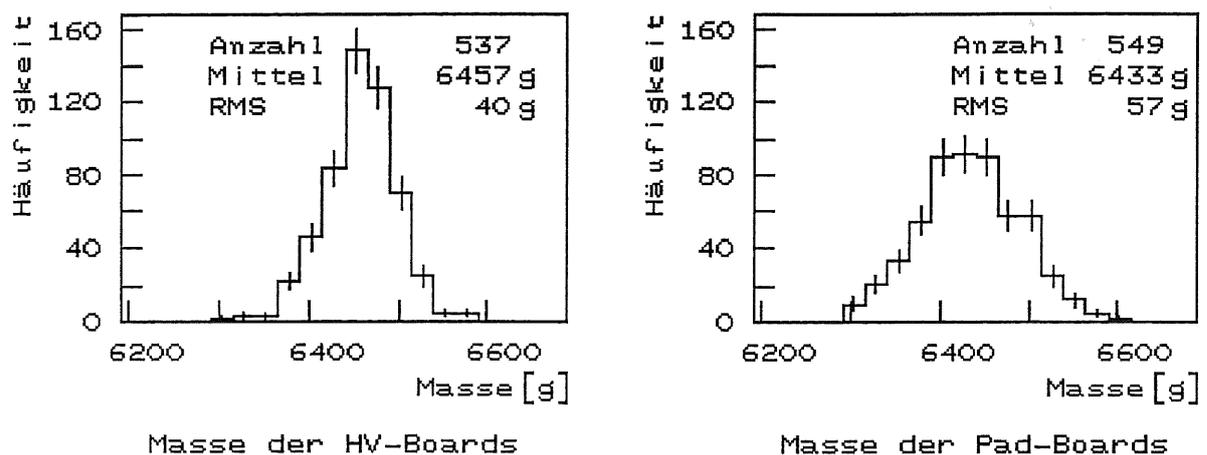
c)

d)

Abbildung 7.4: Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der FB2E-HV-Plattenseiten

- a) für die definierte Oberseite
- b) für die Seite mit dem höheren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte
- c) für die definierte Unterseite
- d) für die Seite mit dem niedrigeren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte

Zum Schluß sind in Abbildung 7.5 a) und b) noch die Verteilungen der Massen der HV- und der Ausleseplatten (Pad-Boards) aufgeführt. Sie konnten mit einer Waage auf ± 5 g genau bestimmt werden und streuen nur um etwa 0.9 %. Ihre Kenntnis ist wichtig für die Berechnung des Absorbermaterials im Kalorimeter. Von der Masse einer Platte schließt man auf die Dicke ihres Bleiskerns (die Massen der Beschichtungen sind dagegen vernachlässigbar) und damit auf das Verhältnis zwischen den Schichtdicken, d. h. den Anteilen, des Nachweismediums und des Absorbers für jede Auslesezone (s.Kapitel 5.1).



a)

b)

Abbildung 7.5: Verteilung der Massen
 a) der FB2E-HV-Platten
 b) der FB2E-Ausleseplatten (Pad-Boards)

7.2 BBE

Entsprechend den FB2E-HV-Platten wurden auch die Oberflächenwiderstände der HV-Platten des BBE-Kalorimeterrings gemessen. Abbildung 7.6 zeigt die Anordnung der jeweils drei Meßpositionen auf den Plattenseiten.

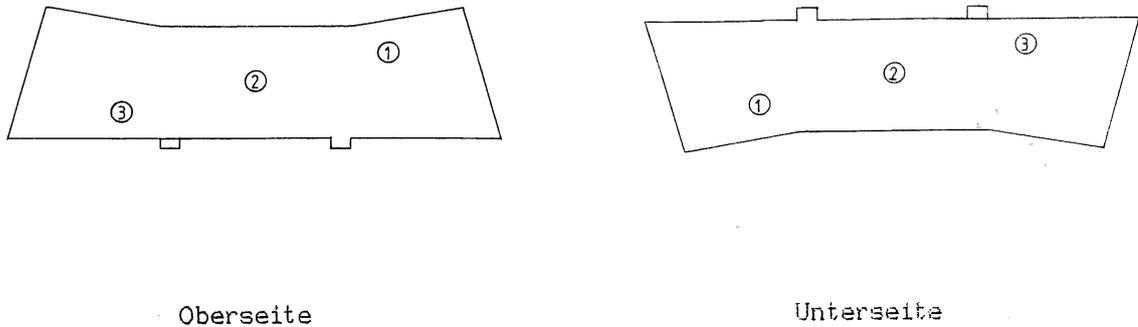
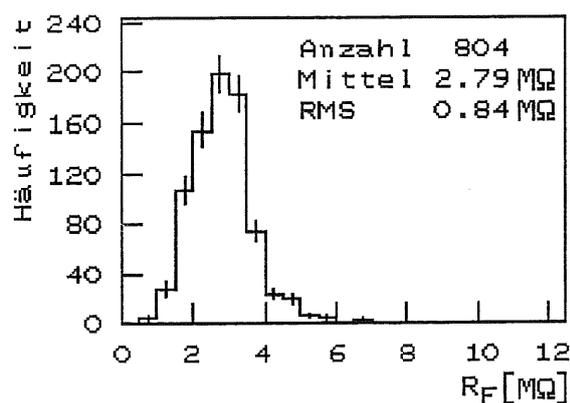


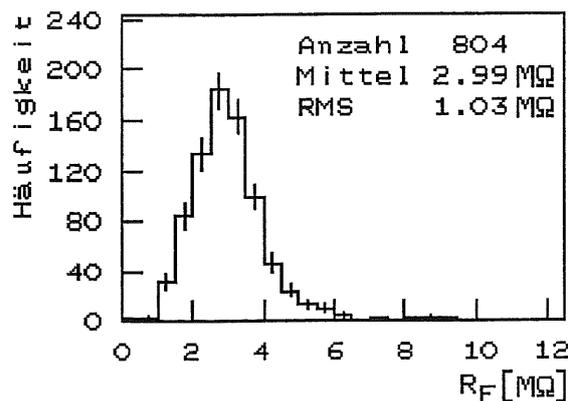
Abbildung 7.6: Schematische Darstellung der Verteilung der drei Meßpositionen auf der Ober- und der Unterseite einer BBE-HV-Platte

Auch hier galten die gleichen Anforderungen wie bei FB2E, und HV-Platten mit lokalen Oberflächenwiderständen von über $20 \text{ M}\Omega$ wurden aus der Auswertung herausgenommen. Ihr Anteil betrug knapp 1 %.

Die folgende Abbildung 7.7 stellt die Verteilungen der Widerstandswerte für die einzelnen Meßpositionen sowie für alle zusammen dar. Von den insgesamt 402 HV-Platten haben ca. 1 % einen mittleren Oberflächenwiderstand kleiner als $1 \text{ M}\Omega$. Die Ausschußrate konnte also gegenüber FB2E durch die in seiner Produktion gesammelten Erfahrungen gesenkt werden.



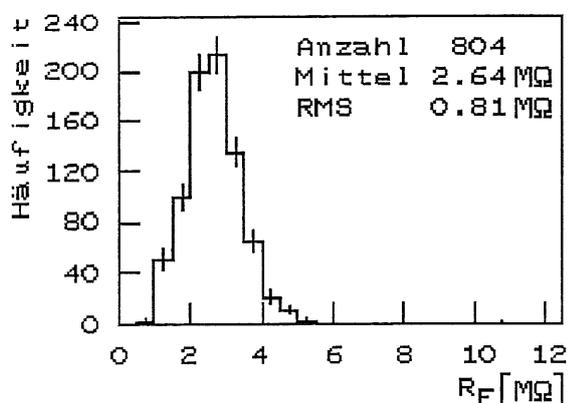
Widerstand (Punkt 1)



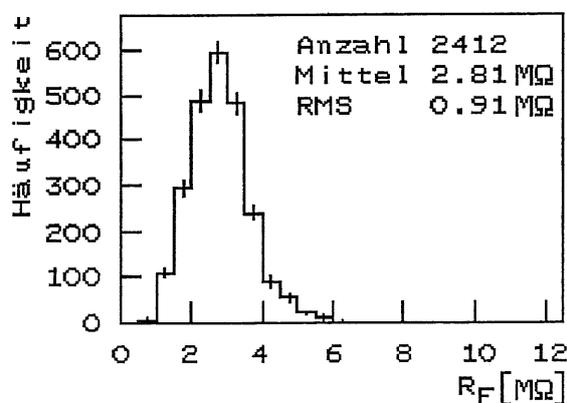
Widerstand (Punkt 2)

a)

b)



Widerstand (Punkt 3)



Widerstand (alle Punkte)

c)

d)

Abbildung 7.7: Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der BBE-HV-Plattenseiten

- a) für Meßposition 1
- b) für Meßposition 2
- c) für Meßposition 3
- d) für alle Meßpositionen zusammen

Die Verteilungen der Widerstandswerte der BBE-HV-Platten ähneln zwar denen von FB2E. Allerdings liegen die Mittelwerte der Verteilungen im Schnitt um 0.36 M Ω bzw. 12 % niedriger als bei FB2E. Die Ursache dafür können die um ca. 8 % kleineren Massen der BBE-HV-Platten sein (s. Abbildung 7.10 a)), denn sie senken die Wärmekapazität C gemäß: $C = c \cdot m$, mit der spezifischen Wärmekapazität c und der Masse m des Körpers. Das bedeutet, daß es am Anfang nicht so

lange dauert, bis die gesamte Platte die erforderliche Aushärtungstemperatur erreicht hat (s. auch Kapitel 5.2).

Gegenüber FB2E streuen die Meßwerte um durchschnittlich 3 % weniger. Auch das deutet, wie schon die geringere Ausschußrate, auf einen einheitlicheren Produktionsprozeß hin.

Der mittlere Widerstand der Position 2 ist diesmal um 7 % und um 13 % größer als bei den Positionen 1 und 3, und die Werte streuen dort um 4 % mehr. Als Erklärung dafür dient wiederum die Möglichkeit der besseren Aushärtung an den Rändern der Platten (s. Kapitel 7.1 und 6.3.4).

Die Verteilung der mittleren Oberflächenwiderstände der BBE-HV-Plattenseiten wird in Abbildung 7.8 gezeigt.

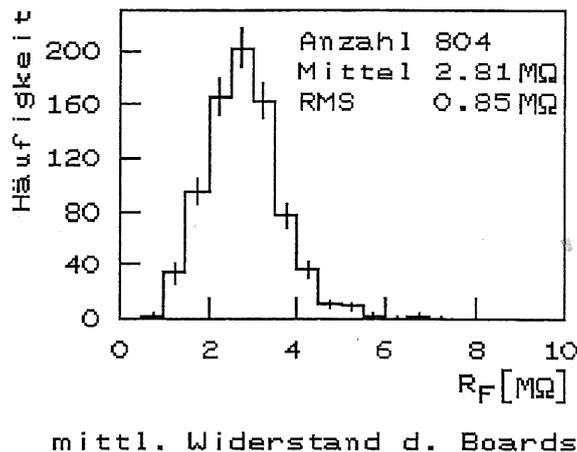
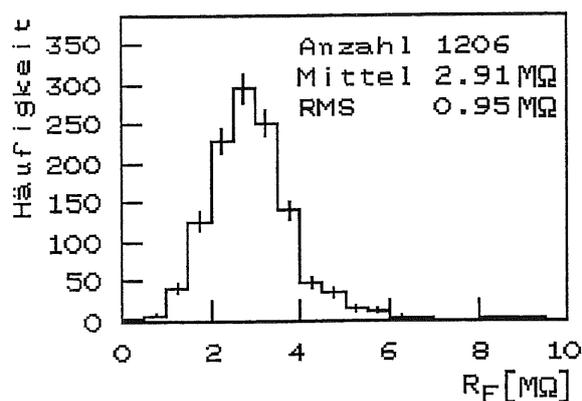
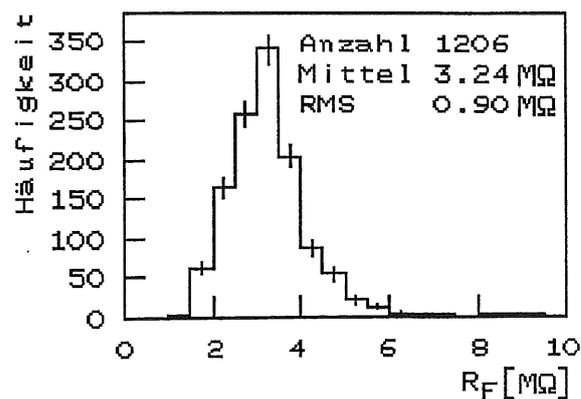


Abbildung 7.8: Verteilung der mittleren Oberflächenwiderstände der BBE-HV-Plattenseiten

Ebenso wie bei FB2E weisen die Verteilungen der Widerstandswerte keine wesentlichen Unterschiede auf, wenn man sie für die durch Nummern definierten Ober- und Unterseiten der HV-Platten betrachtet (s. Abbildungen 7.9 a) und c)). Dagegen ergibt sich wieder eine deutliche Differenz zwischen den Mittelwerten der Verteilungen von knapp 0.9 MΩ für eine Aufteilung der Seiten, in die mit dem jeweils höheren und in die mit dem jeweils niedrigeren Mittelwert der beiden Seiten einer HV-Platte. Die zugehörigen Einzelwerte sind entsprechend den Histogrammen "Große Werte" (Abbildung 7.9 b)) bzw. "Kleine Werte" (Abbildung 7.9 d)) zugeordnet. Die Erklärung ist dieselbe wie bei FB2E (s. Kapitel 7.1): der geringere Rußanteil der erstbedruckten Seite hebt den Oberflächenwiderstand mehr an, als ihn die doppelt so lange Aushärtung senkt.



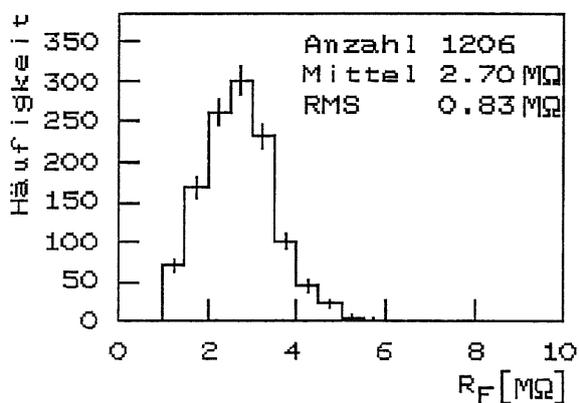
Oberseite (alle Punkte)



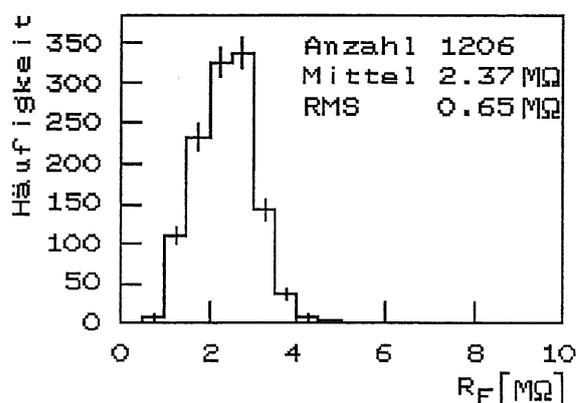
Grosse Werte (alle Punkte)

a)

b)



Unterseite (alle Punkte)



Kleine Werte (alle Punkte)

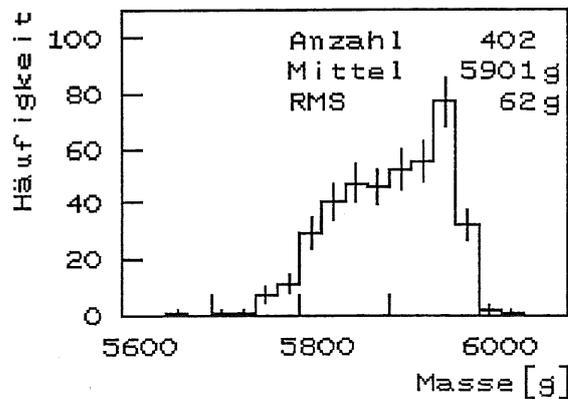
c)

d)

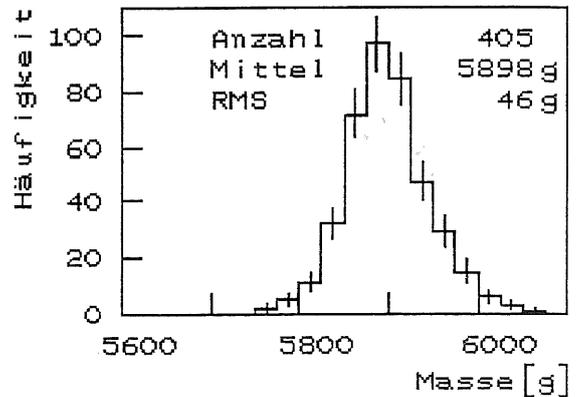
Abbildung 7.9: Verteilungen der Oberflächenwiderstandswerte R_F der BBE-HV-Plattenseiten

- für die definierte Oberseite
- für die Seite mit dem höheren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte
- für die definierte Unterseite
- für die Seite mit dem niedrigeren mittleren Oberflächenwiderstand der beiden Seiten einer HV-Platte

Die Massen der BBE-HV- und der BBE-Ausleseplatten (Pad-Boards) wurden mit derselben Waage wie bei FB2E auf ± 5 g genau bestimmt und streuen auch nur um ca. 1 %. Bei den Verteilungen der Massen, die zum Abschluß in Abbildung 7.10 a) und b) aufgeführt sind, fällt auf, daß die BBE-Platten um gut 500 g leichter sind als die FB2E-Platten. Das ist natürlich eine Folge ihres geringeren Volumens.



Masse der HV-Boards



Masse der Pad-Boards

a)

b)

Abbildung 7.10: Verteilung der Massen

a) der BBE-HV-Platten

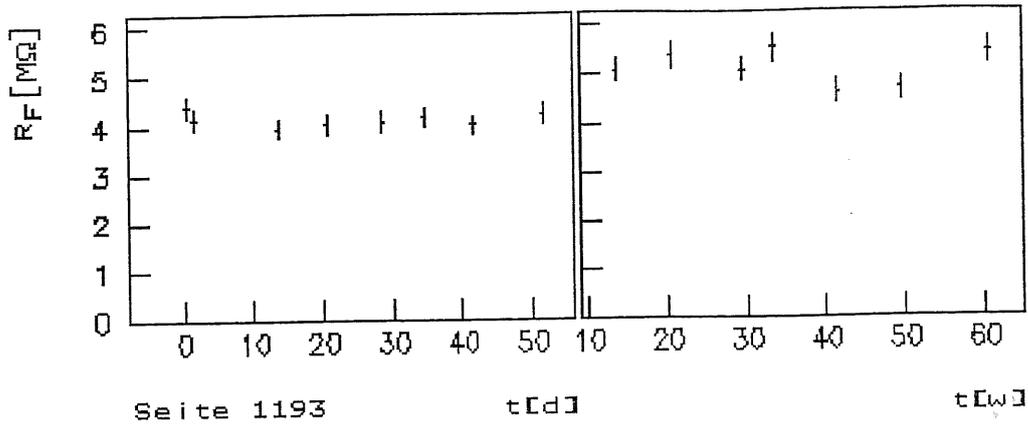
b) der BBE-Ausleseplatten (Pad-Boards)

7.3 Messung von Alterungserscheinungen der Widerstandsbeschichtung

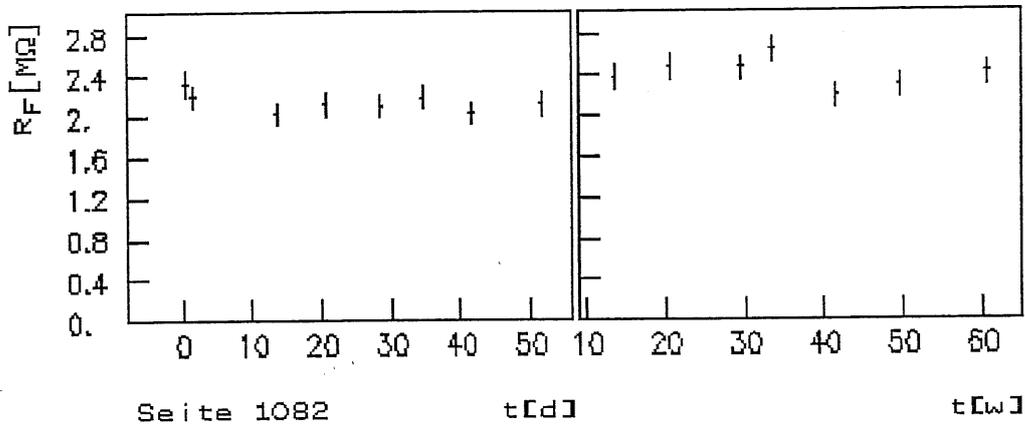
Eine weitere wichtige Frage ist die, inwieweit die HRC-Beschichtung Alterungsprozessen unterworfen ist, denn der H1-Detektor wird über Jahre hinweg in Betrieb sein. Dazu wurden die Oberflächenwiderstände zweier FB2E-HV-Platten über ein Jahr lang in gewissen zeitlichen Abständen bestimmt. Die Platte mit der Laufnummer 1082/1193 wurde in der Mitte des Umluftofens gehärtet, die Platte mit der Laufnummer 976/954 in der Mitte des Konvektionsofens. Dabei wurden die Seiten 1193 und 976 am 21.03.1989 gedruckt und gehärtet und die Seiten 1082 und 954 einen Tag später. Die Platten wurden direkt am 22.03.1989, dem Tag ihrer Fertigstellung, zum ersten Mal gemessen. Auf jeder Seite wurden wie in Abbildung 6.11 sechs Meßpositionen festgelegt. Einen Tag später erfolgte die nächste Messung. Alle Seiten außer 976 wiesen dabei einen um ca. 6 % niedrigeren mittleren Oberflächenwiderstand auf. Bei der Seite 976 war er sogar um fast 50 % gesunken. Dieser starke Abfall rührte vor allem von den beiden Positionen 3 und 4 auf der Mitte der Seite 976 her: der Widerstand der Stelle 3 fiel von 15.3 M Ω auf 8.4 M Ω und bei der Stelle 4 von 19.2 M Ω auf 11.3 M Ω . Verantwortlich für die allgemeine Senkung des Oberflächenwiderstandes innerhalb von 24 Stunden, nachdem die Platten aus den Öfen geholt worden waren, ist die Fortführung und Beendigung des Aushärtungsprozesses an der Luft.

Danach wurde ungefähr jede Woche einmal gemessen. Während in den ersten sechs Wochen noch der erste Meßkopf (s. Kapitel 6.3.2) benutzt wurde, fanden die darauffolgenden Messungen (ab dem 50. Tag) mit dem zweiten Meßkopf (s. Kapitel 6.3.5) statt. Ab der 8. Woche wurde dann nur noch in monatlichen Abständen gemessen. In den Abbildungen 7.11 und 7.12 sind die aus den jeweils sechs Einzelmessungen gemittelten Oberflächenwiderstände der vier HV-Plattenseiten gegen die Zeit aufgetragen. Dabei ist die zeitliche Skala bis zur 8. Woche in (56) Tage eingeteilt und ab dann in Wochen.

Zunächst bestätigt sich wieder (s. Kapitel 7.1), daß die erstbedruckten Seiten durch den geringeren Rußanteil einen höheren Oberflächenwiderstand aufweisen als die zweitbedruckten Seiten. Für die Seiten 1193 und 1082 liegen die Werte bei 4 M Ω und bei gut 2 M Ω , für die Seiten 976 und 954 erhält man 6 M Ω und 3 M Ω . Während man in den ersten 50 Tagen noch für alle Seiten einen relativ konstanten Wert beobachtet, ergeben sich bei den Messungen, die in den anschließenden Monaten in längeren zeitlichen Abständen stattfinden, größere Schwankungen bis zu ± 20 %. Das liegt weit außerhalb der Toleranzgrenze von ± 5 %, die jedem über eine Seite gemittelten Oberflächenwiderstand zugeschrieben wurde. Dabei wurde für jeden der sechs Einzelmeßwerte ein Fehler von ca. ± 10 % angenommen, in den vor allem die Unsicherheit eingeht, immer dieselbe Meßposition mit stets gleich gutem Kontakt zu treffen. Denn wie sich gezeigt hat (s. Kapitel 6.3.4), kann der Oberflächenwiderstand auf einer Seite um 50 % differieren. Das bedeutet, daß bereits kleine Verschiebungen der Meßposition eine Änderung des dort gemessenen Widerstandswertes um 10 % bewirken können.



a)



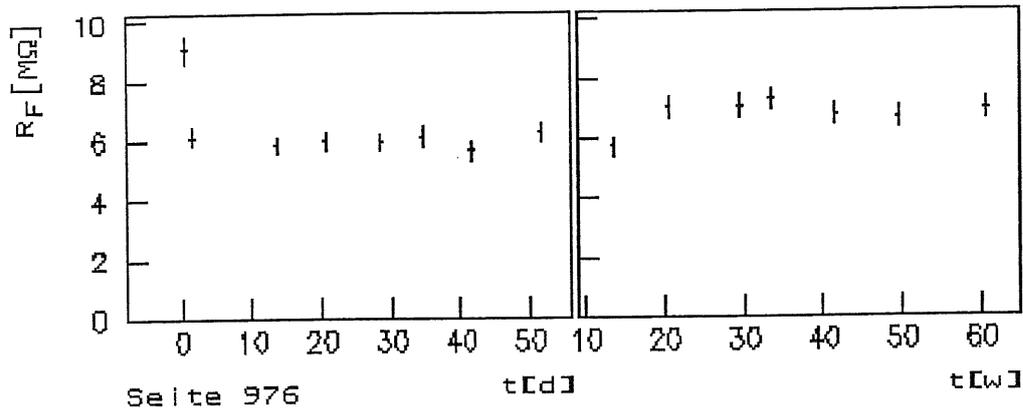
b)

Abbildung 7.11: Zeitlicher Verlauf des mittleren Oberflächenwiderstandes R_F einer FB2E-HV-Platte, die in der Mitte des Umluftofens gehärtet wurde

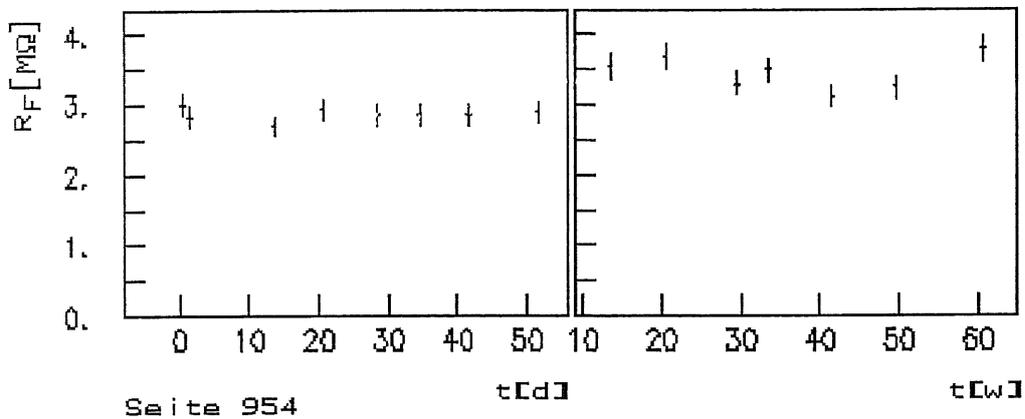
- a) Verlauf für die am 21.03.1989 bedruckte Seite 1193
- b) Verlauf für die am 22.03.1989 bedruckte Seite 1082

Die Fehlerbalken entsprechen $\pm 5\%$ des eingezeichneten Wertes, der aus der Mittelung von jeweils sechs Einzelmessungen pro Plattenseite berechnet wurde. Einer Einzelmessung wurde dabei ein Fehler von $\pm 10\%$ zugeschrieben.

Die Einheit der zeitlichen Skala wechselt nach 56 Tagen von Tagen in Wochen über.



a)



b)

Abbildung 7.12: Zeitlicher Verlauf des mittleren Oberflächenwiderstandes R_F einer FB2E-HV-Platte, die in der Mitte des Konvektionsofens gehärtet wurde

- a) Verlauf für die am 21.03.1989 bedruckte Seite 976
 b) Verlauf für die am 22.03.1989 bedruckte Seite 954

Die Fehlerbalken entsprechen $\pm 5\%$ des eingezeichneten Wertes, der aus der Mittelung von jeweils sechs Einzelmessungen pro Plattenseite berechnet wurde. Einer Einzelmessung wurde dabei ein Fehler von $\pm 10\%$ zugeschrieben.

Die Einheit der zeitlichen Skala wechselt nach 56 Tagen von Tagen in Wochen über.

Bei genauerer Betrachtung der Schwankungen in den zeitlichen Entwicklungen der Oberflächenwiderstände, erkennt man, daß sich die Verläufe für die einzelnen Seiten untereinander sehr ähneln. Die Widerstandswerte weichen an den Meßtagen stets bei allen Seiten in ungefähr gleichem Maße nach oben oder unten ab. Das deutet darauf hin, daß die Meßwerte offenbar stärker als angenommen (s. Kapitel 6.3.3) von den äußeren Bedingungen, wie Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur beeinflußt werden. Ein annähernd wellenförmiger Verlauf der Widerstandswerte nach der 8. Woche läßt auch eine jahreszeitliche Abhängigkeit vermuten. So sind die Platten im Winter der Heizluft ausgesetzt, während in den wärmeren Monaten die Luftfeuchtigkeit zunimmt.

Insgesamt macht sich eine leicht steigende Tendenz der Oberflächenwiderstände bemerkbar. Vergleicht man die Werte der ersten acht Wochen mit den darauffolgenden, so ergibt sich eine Erhöhung von durchschnittlich 15 %. Hierfür ist wahrscheinlich die allmähliche Abnutzung der empfindlichen HRC-Schicht verantwortlich, die durch jeden Meßvorgang und auch durch die Lagerung und Handhabung der Platten mehr oder weniger stark beansprucht wird.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Produktion schwerer Quarks bei HERA mit Hilfe von geeigneten Generatoren auf dem Computer simuliert. Dazu war es zunächst notwendig, die nötigen Programmpakete auf dem Hochschulrechner der Universität Dortmund zu installieren. Neben den charakteristischen Größen der Wechselwirkungen wurden vor allem die Impulsverteilungen der Teilchen des Endzustandes für die acht Kalorimetermodule des H1-Detektors erstellt.

Aus der Beteiligung des Lehrstuhls EV der Universität Dortmund am Bau des H1-Detektors ergab sich die zweite Aufgabe dieser Arbeit. Es wurden Meßköpfe sowie ein Verfahren entwickelt, das die Serienmessung der hochohmigen Beschichtung der Hochspannungsplatten für die beiden elektromagnetischen Kalorimetermodule FB2E und BBE des H1-Detektors ermöglichte. Dabei zeigten die Oberflächenwiderstände der Platten das gewünschte Verhalten. Ihr Mittelwert liegt bei 3 M Ω . Die Messung des Oberflächenwiderstandes zweier ausgewählter Platten über die Dauer eines Jahres ergab allenfalls einen leichten Anstieg der Werte, die jedoch in monatlichen Abständen Schwankungen von bis zu $\pm 20\%$ unterworfen waren.

Anhang

Auf den folgenden Seiten sind die Impulsspektren der Teilchen aus dem Endzustand von jeweils ca. 150000 Bottom-Antibottom- und Charm-Anticharm-Produktionen dargestellt. Die Ereignisse wurden mit den Programmpaketen HFLGEN 1.3 in Verbindung mit LEPTO 5.2 und JETSET 6.3 simuliert und sind durch Elektron-Proton-Streuung aus dem Prozess der Boson-Gluon-Fusion mit neutralen Strömen hervorgegangen. Die Energie des Elektrons betrug 30 GeV und die des Protons 820 GeV. Die Teilchen des Endzustandes wurden in drei mal vier Gruppen aufgeteilt:

	Hadronen	Elektronen	Photonen
aus allen Reaktionen	1	2	3
aus den $Q\bar{Q}$ -Zerfällen	4	5	6
aus den Spectator-Zerfällen	7	8	9
aus übrigen Reaktionen	-	10	-

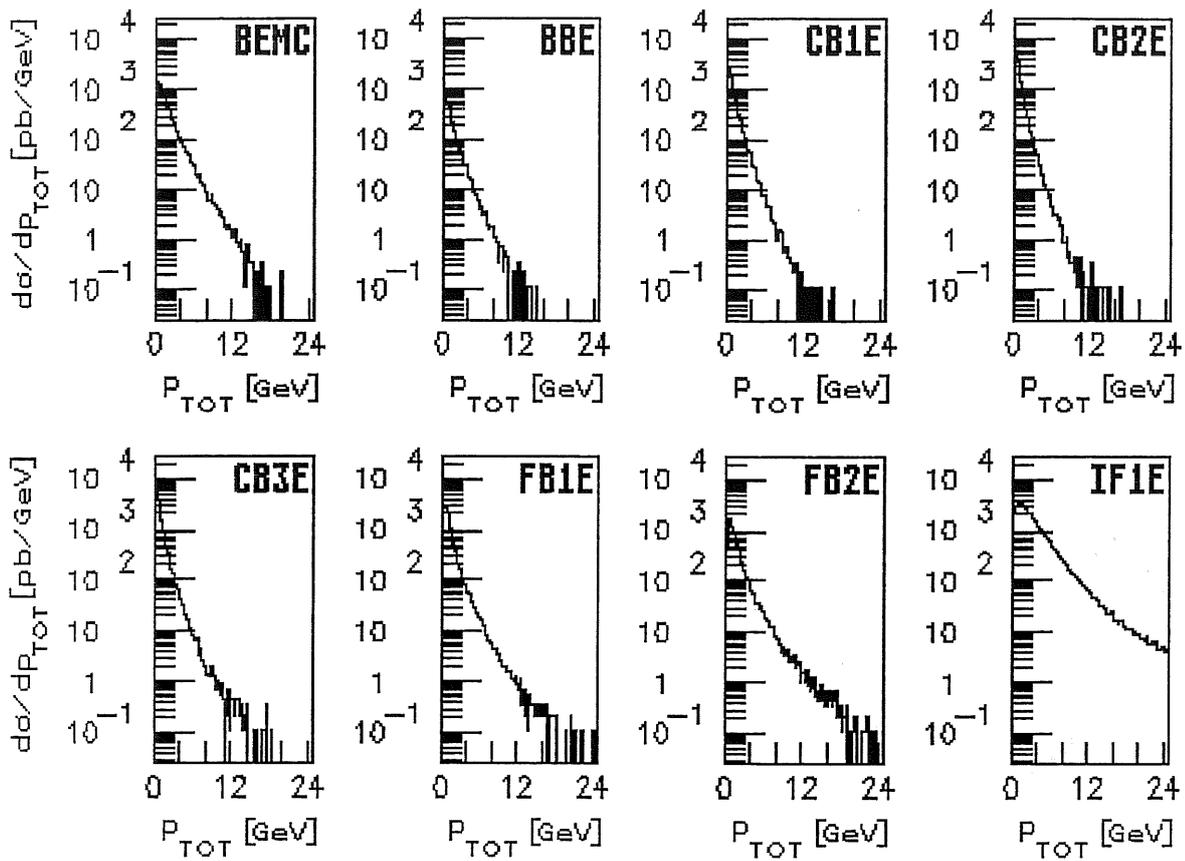
Die Zahlen geben die Reihenfolge der gezeigten Verteilungen an. Unter den Teilchen aus den "übrigen Reaktionen" befinden sich nur die gestreuten Elektronen. Mit $Q\bar{Q}$ ist Bottom-Antibottom bzw. Charm-Anticharm gemeint, mit dem Begriff "Spectator" (Zuschauer) bezeichnet man die Protonreste, die beim Prozeß der Boson-Gluon-Fusion entstehen.

Die Spektren der Gesamtimpulse p_{TOT} sind in der Form $d\sigma/dp_{TOT}$ ($d\sigma$ ist der differentielle Wirkungsquerschnitt) für jedes einzelne Modul des H1-Detektors aufgeführt ($[d\sigma/dp_{TOT}] = \text{pb/GeV}$). Dabei wurde den Modulen jeweils ein bestimmter Polarwinkelbereich des Detektors zugeordnet. Die Einteilung ist aus Abbildung 4.1 und Kapitel 4.1 ersichtlich. Angegeben sind die Namen der einzelnen elektromagnetischen Kalorimetermodule.

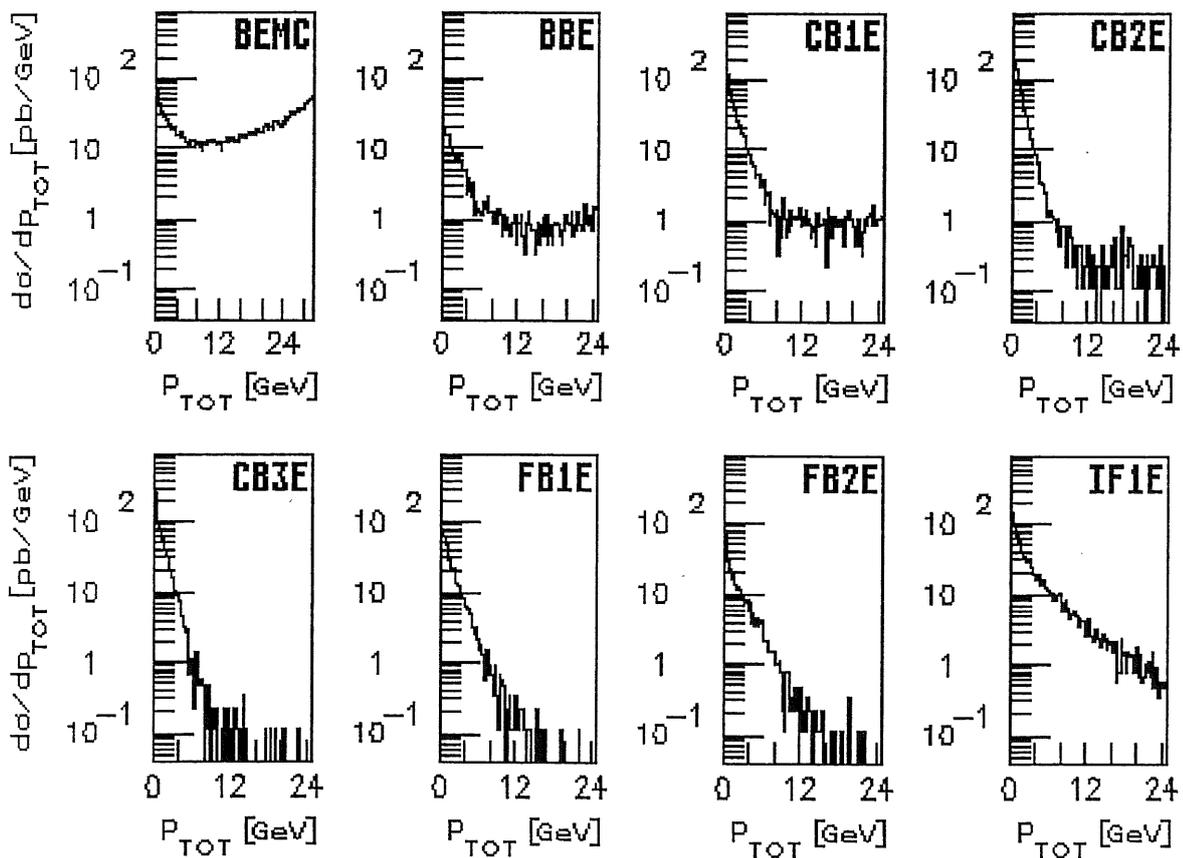
BEMC : Backward Electromagnetic Calorimeter
 BBE : Backward Barrel Electromagnetic
 CB1E : Central Barrel 1st Electromagnetic
 CB2E : Central Barrel 2nd Electromagnetic
 CB3E : Central Barrel 3rd Electromagnetic
 FB1E : Forward Barrel 1st Electromagnetic
 FB2E : Forward Barrel 2nd Electromagnetic
 IF1E : Innner Forward 1st Electromagnetic

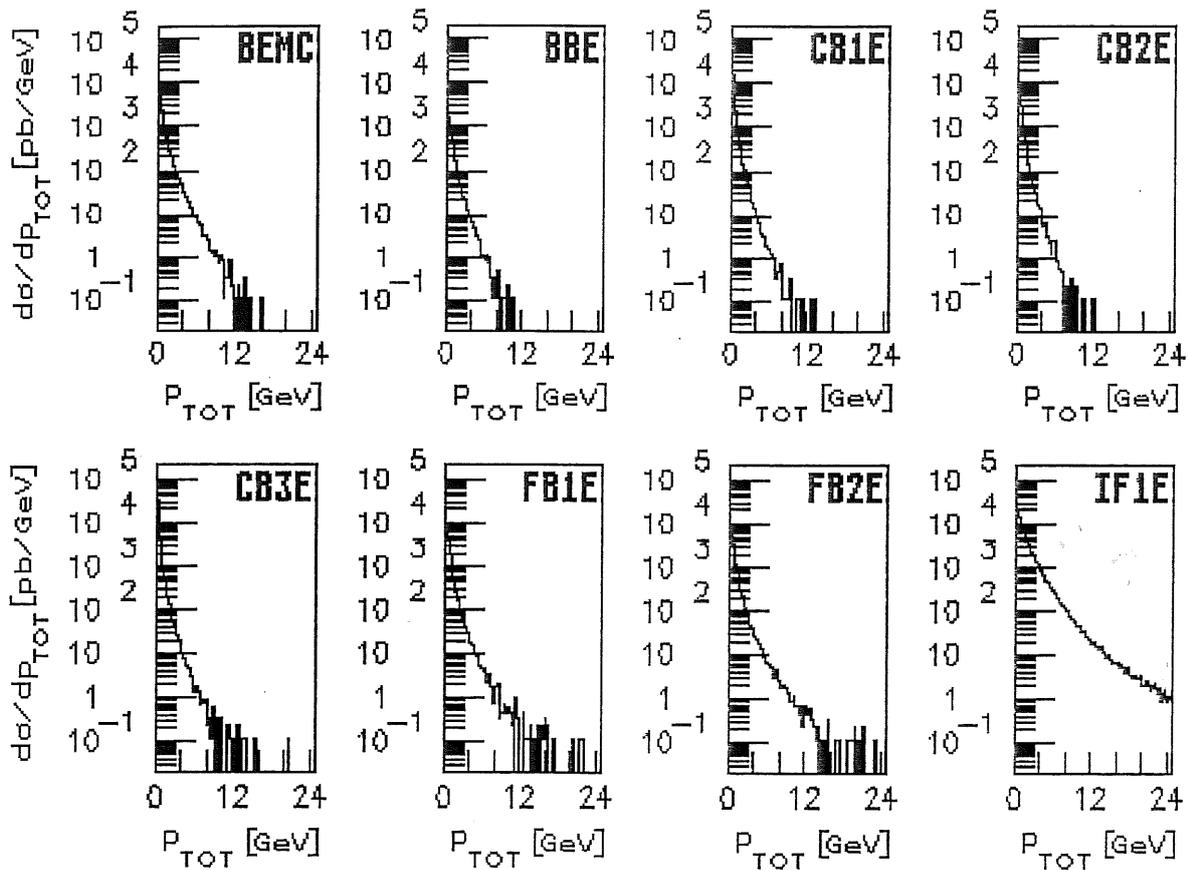
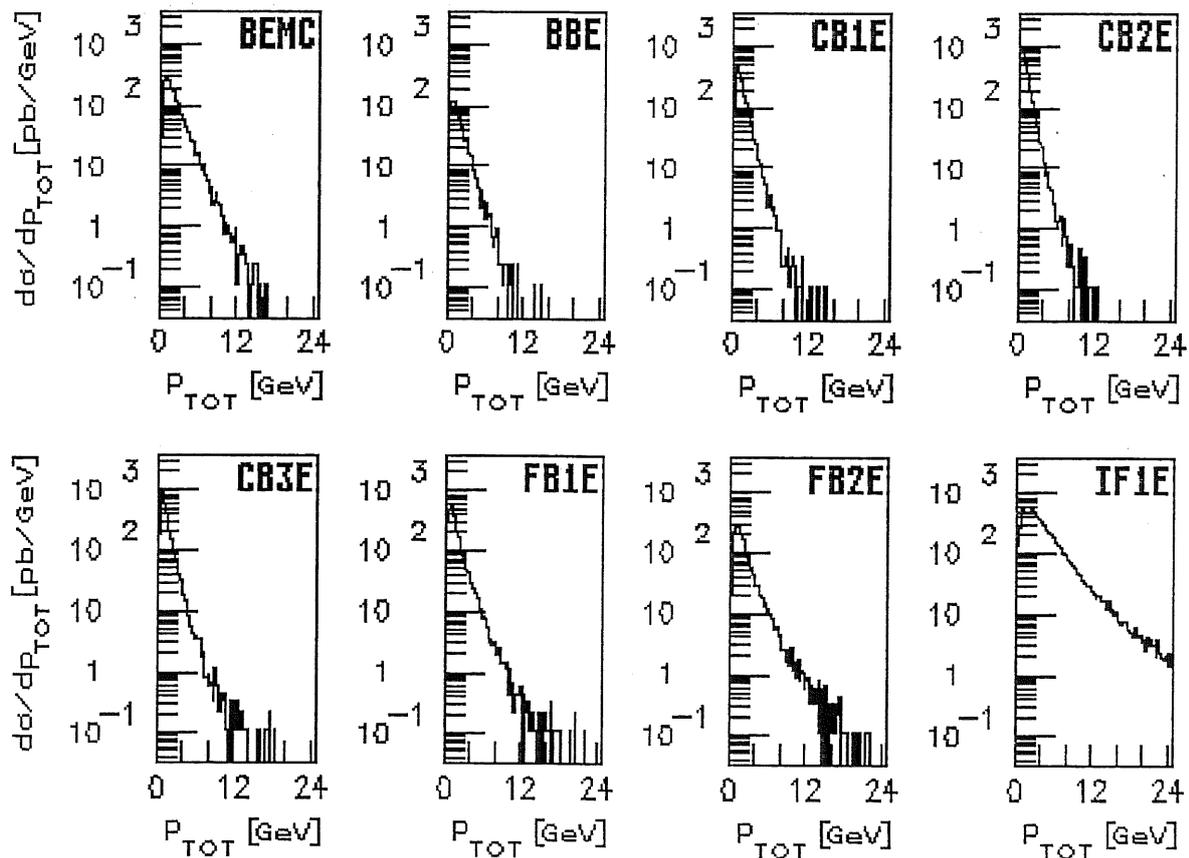
Es folgen zuerst alle Spektren der Bottom-Antibottom-Produktion ($b\bar{b}$) und danach alle Spektren der Charm-Anticharm-Produktion ($c\bar{c}$).

Alle Hadronen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

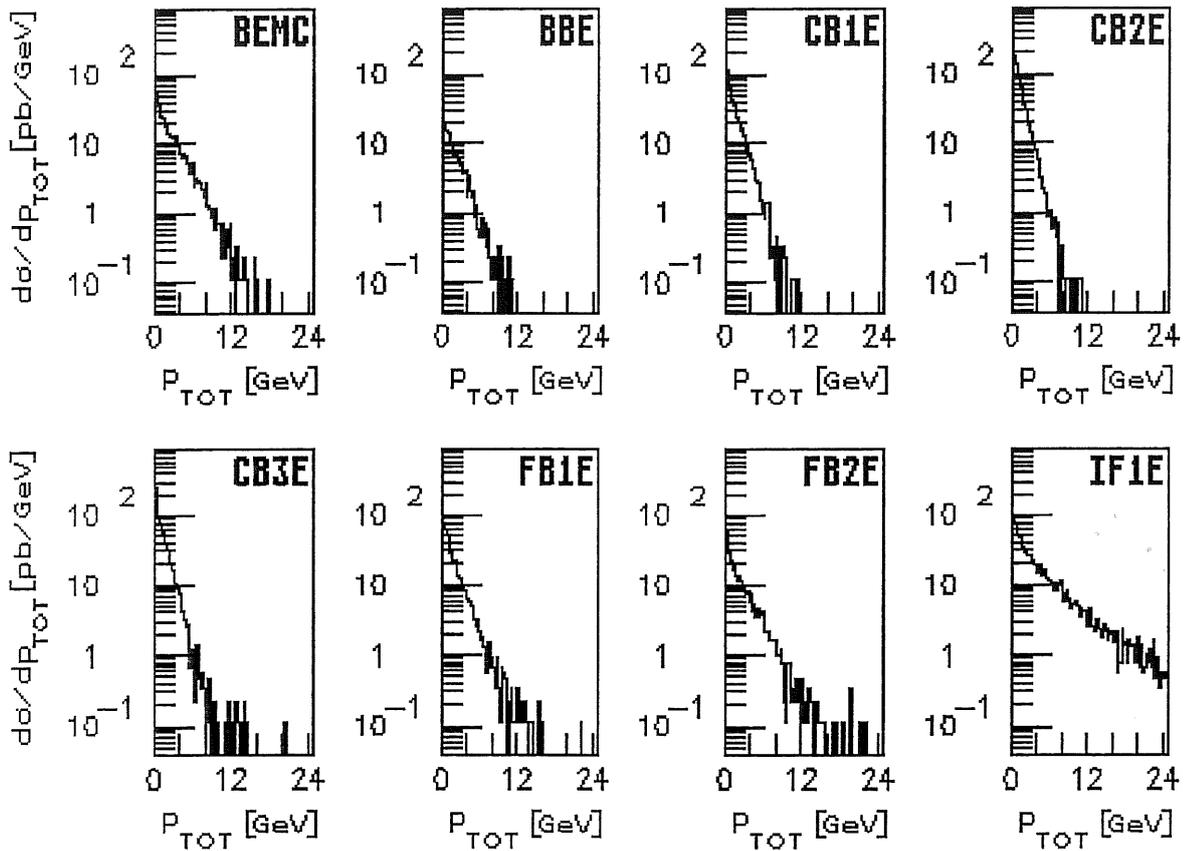


Alle Elektronen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

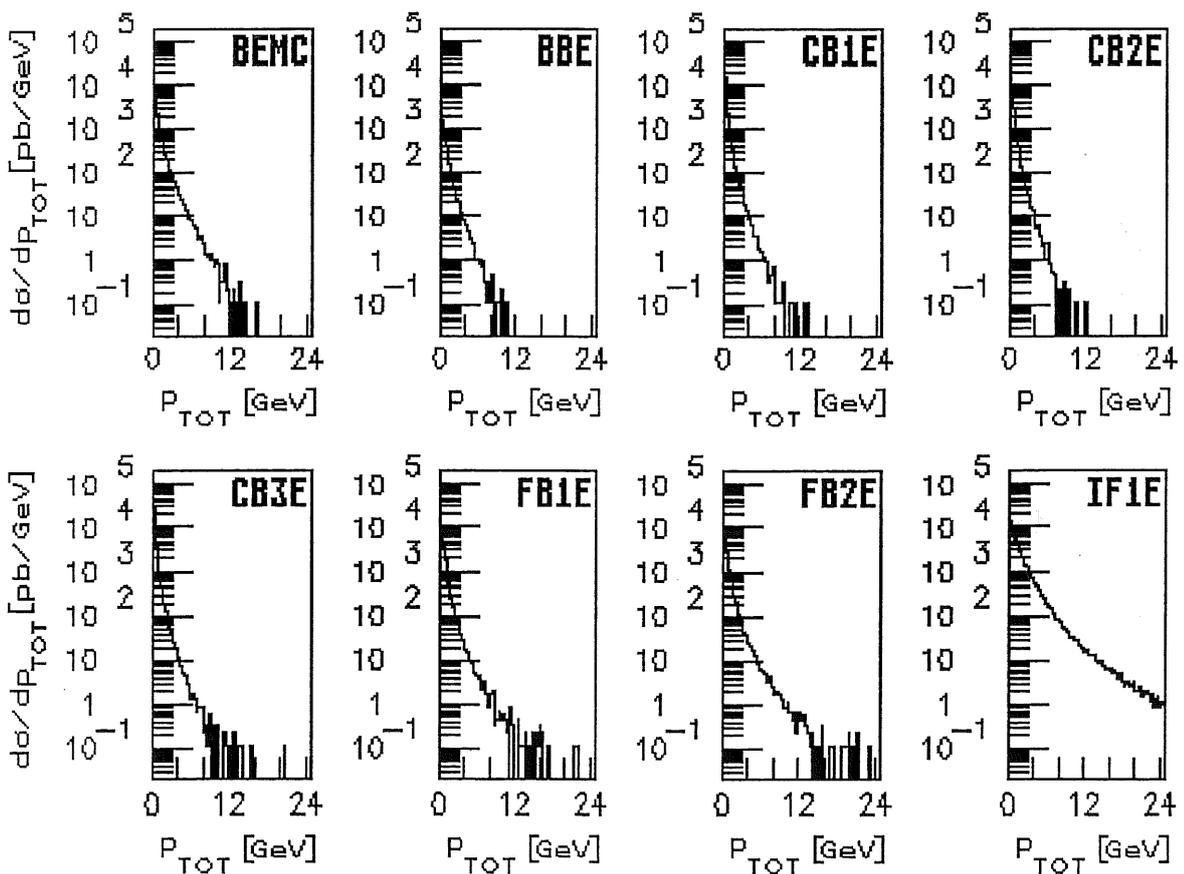


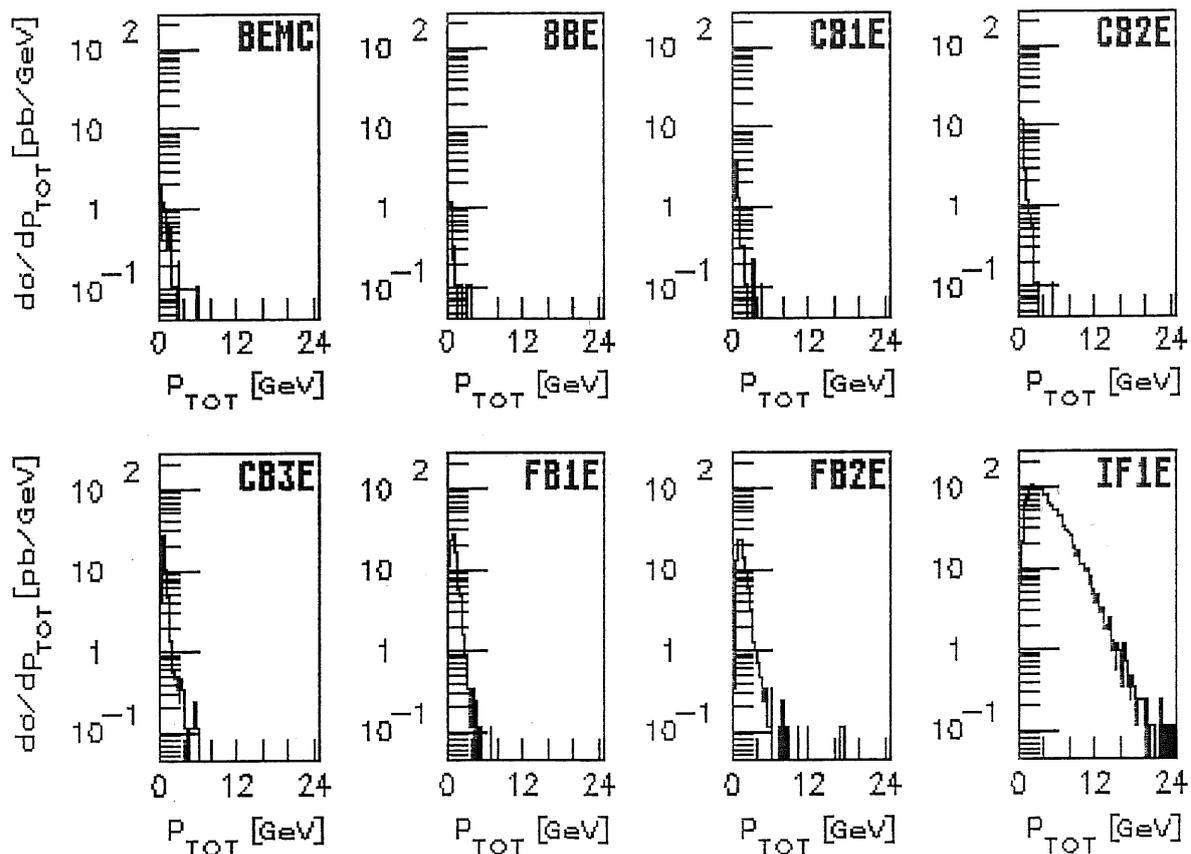
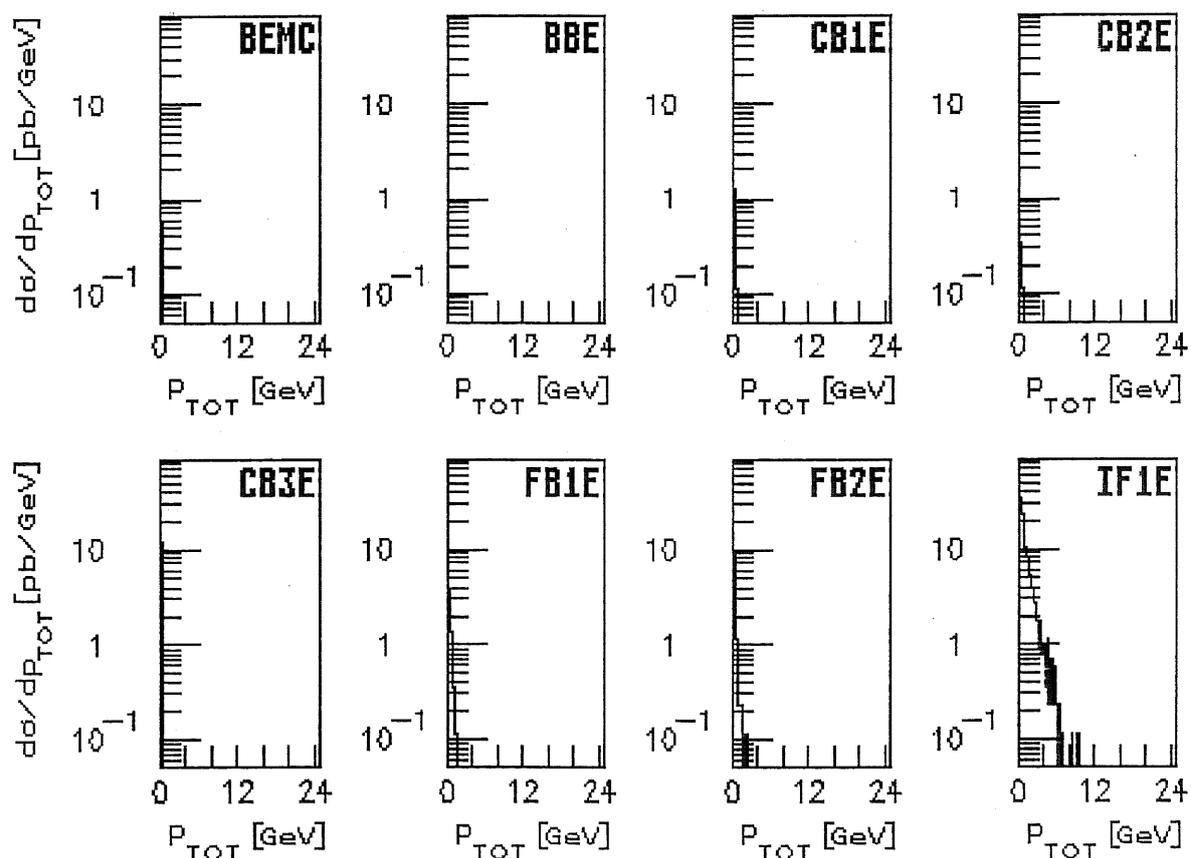
Alle Photonen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)Alle Hadronen aus B-Zerfällen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

Alle Elektronen aus B-Zerfällen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

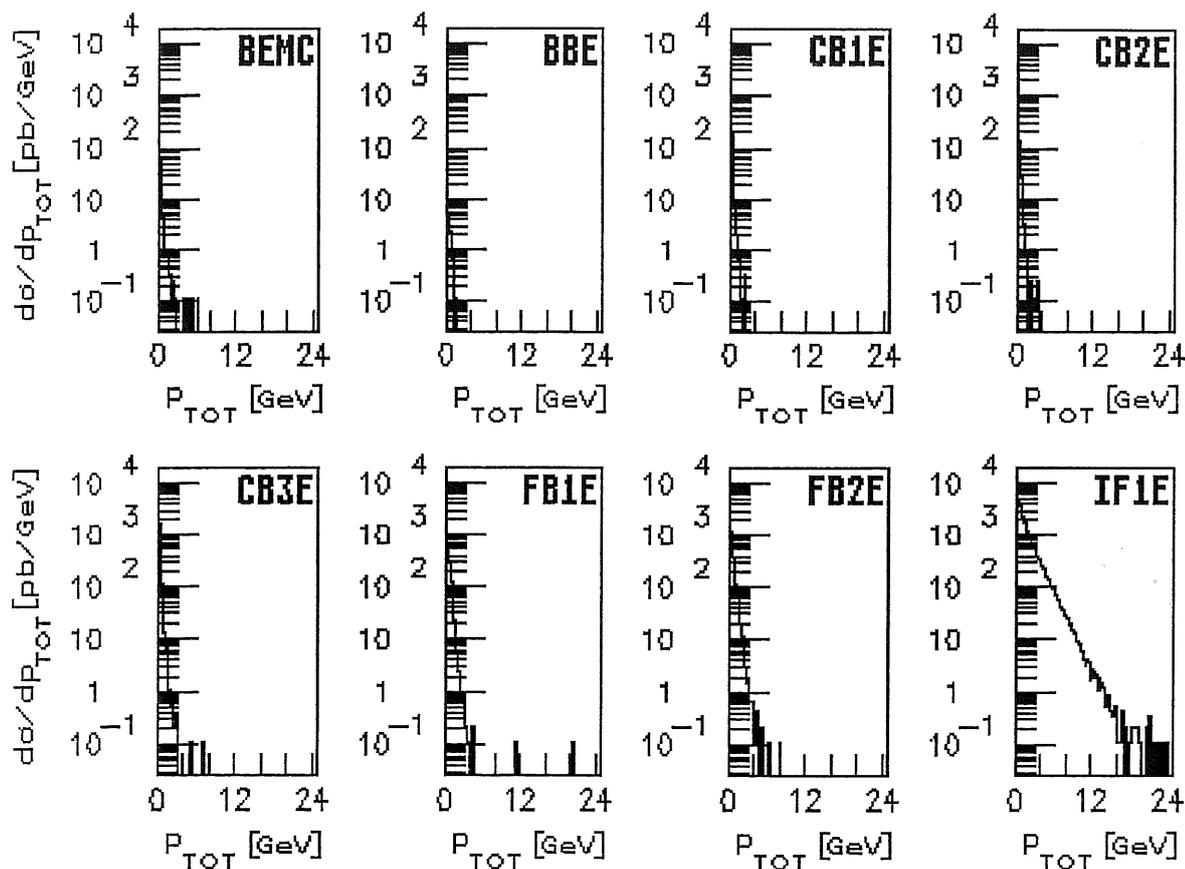


Alle Photonen aus B-Zerfällen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

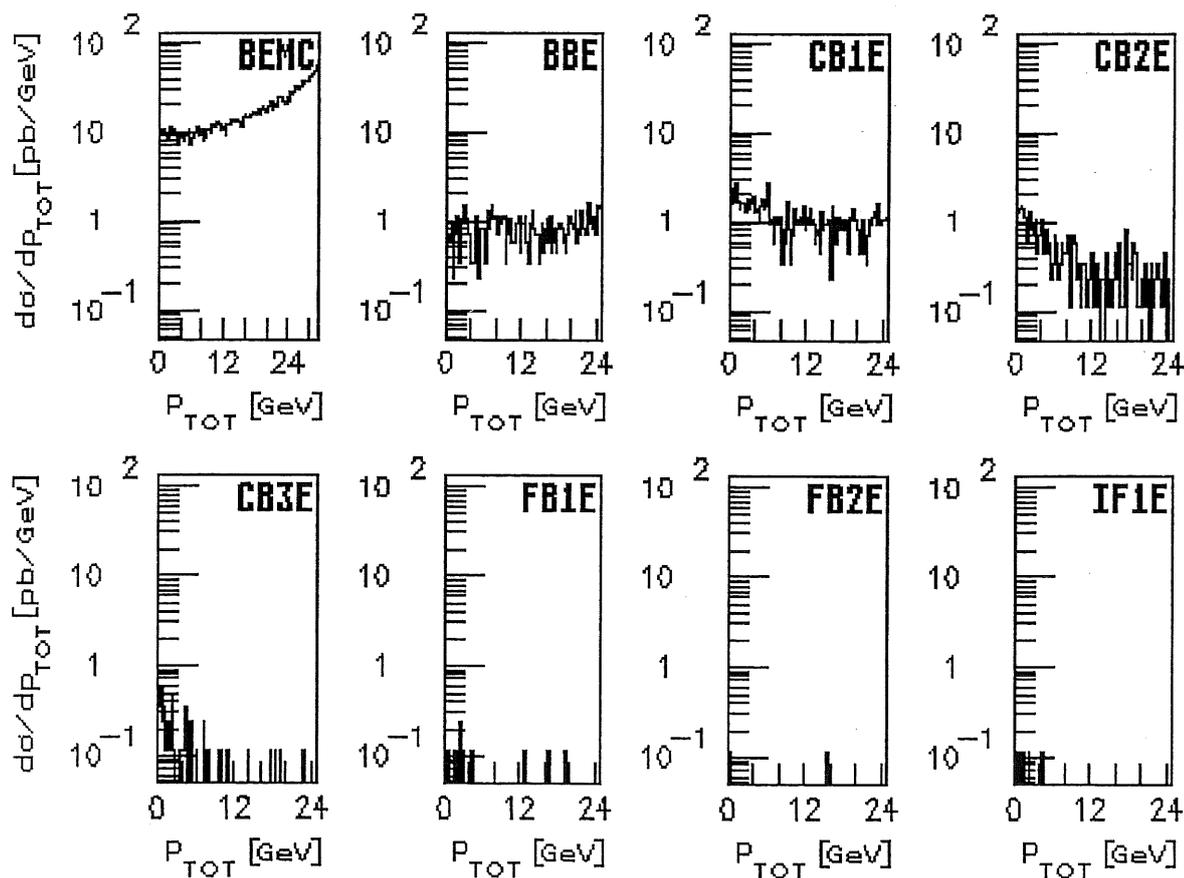


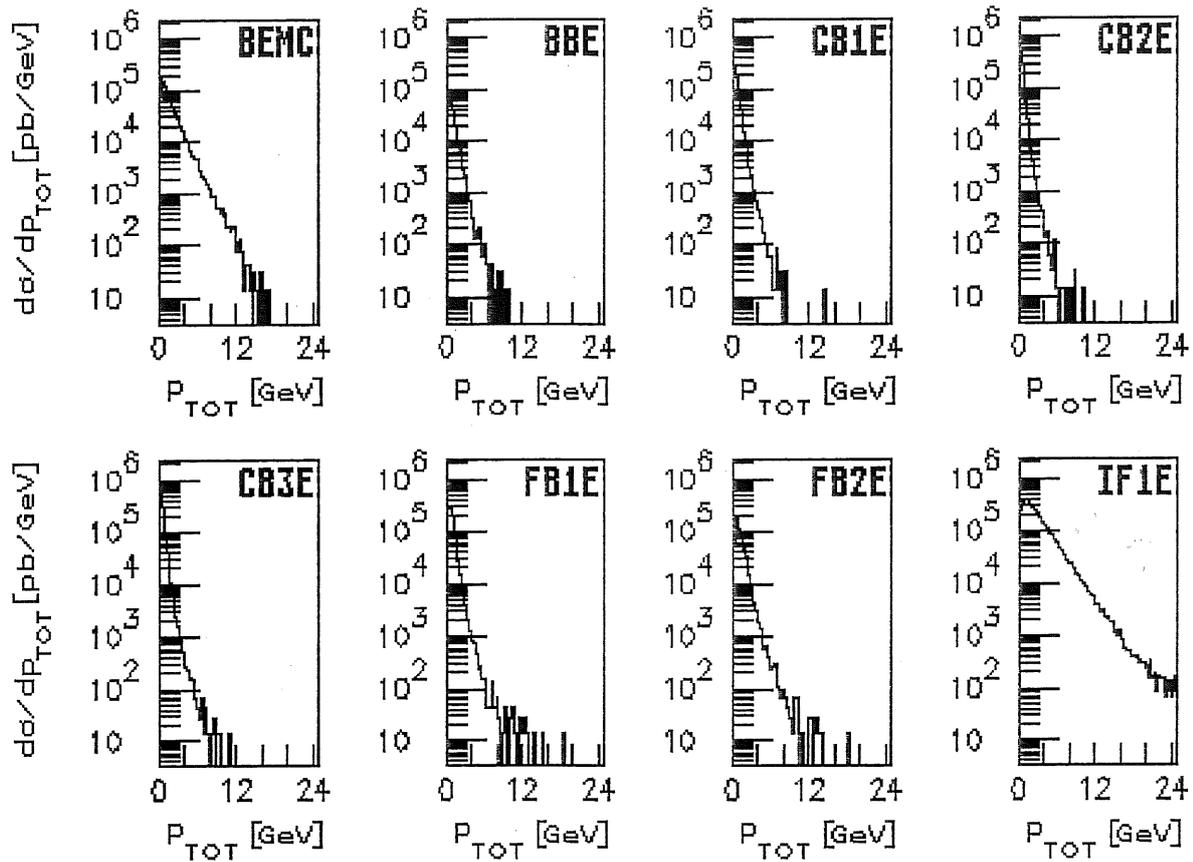
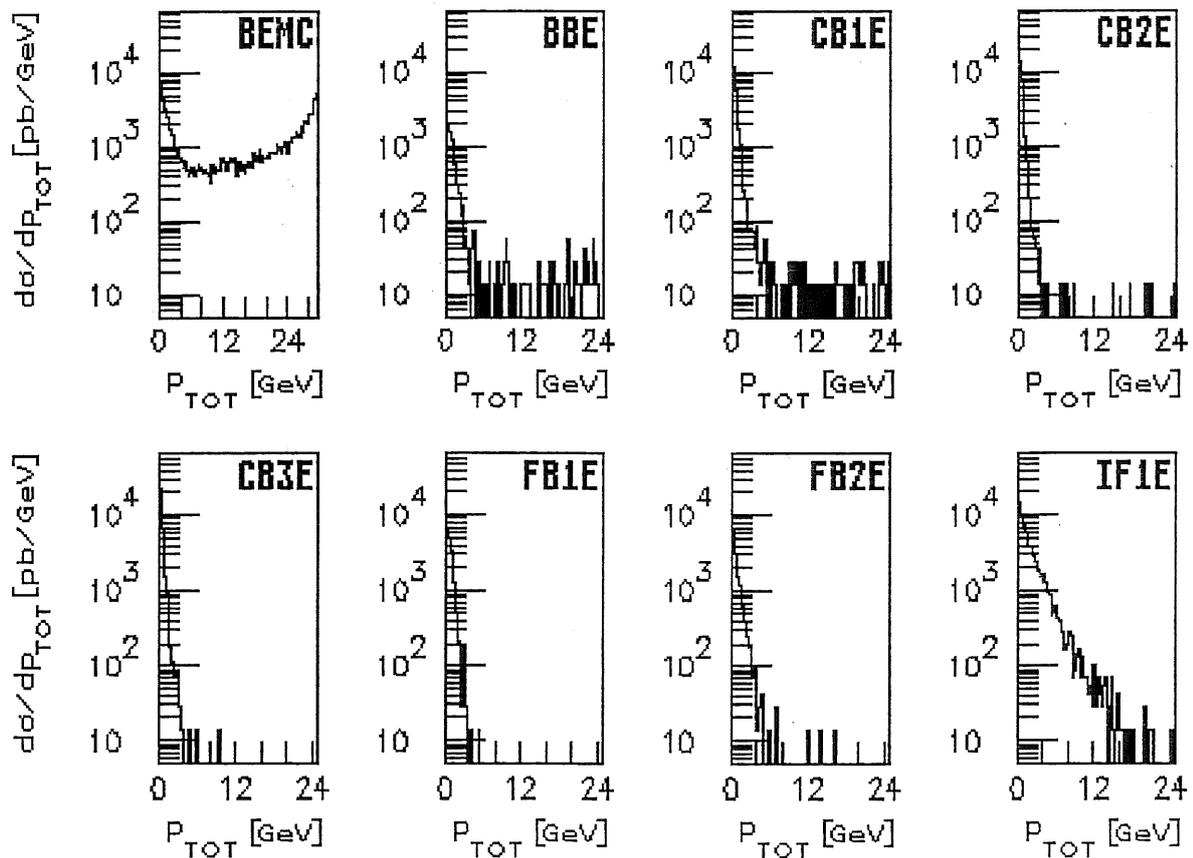
Alle Spectator-Hadronen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)Alle Spectator-Elektronen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

Alle Spectator-Photonen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

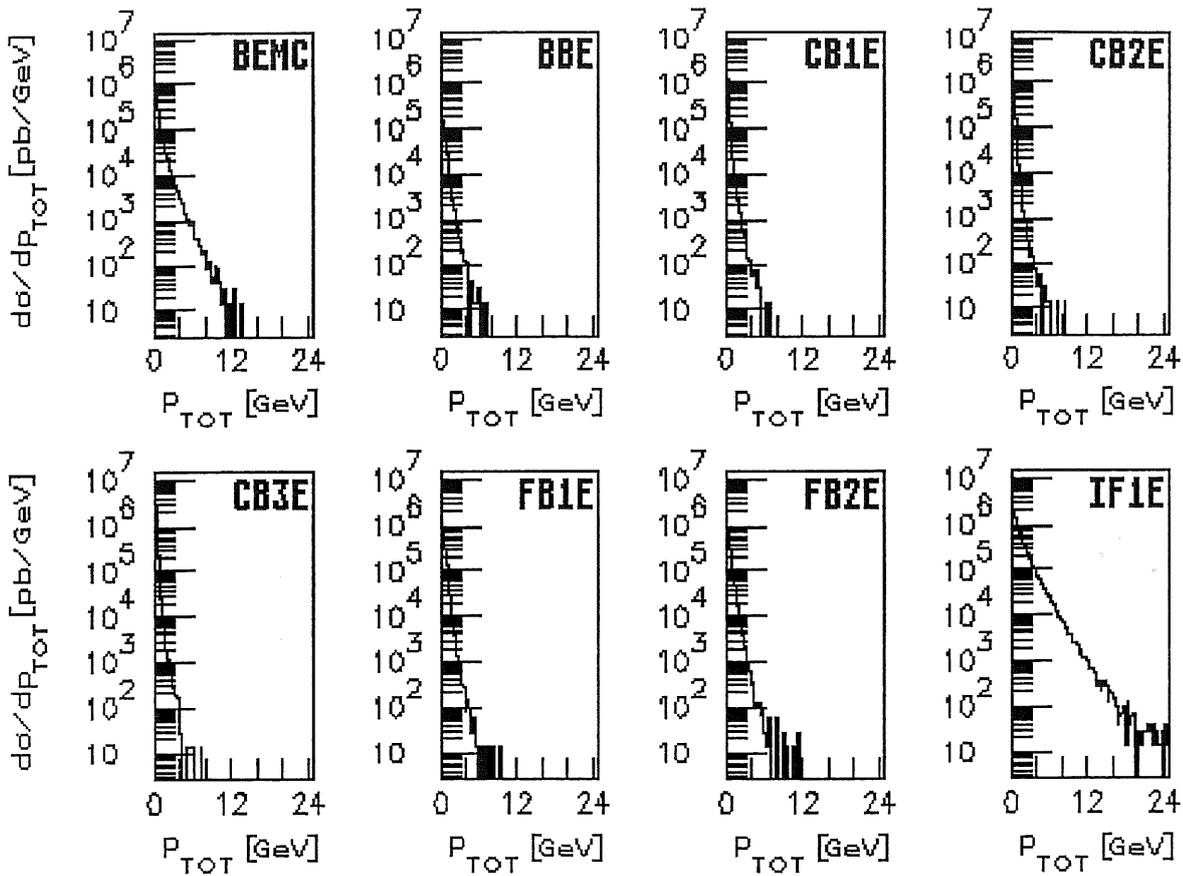


Alle gestreuten Elektronen (aus 148000 $b\bar{b}$ -Ereignissen)

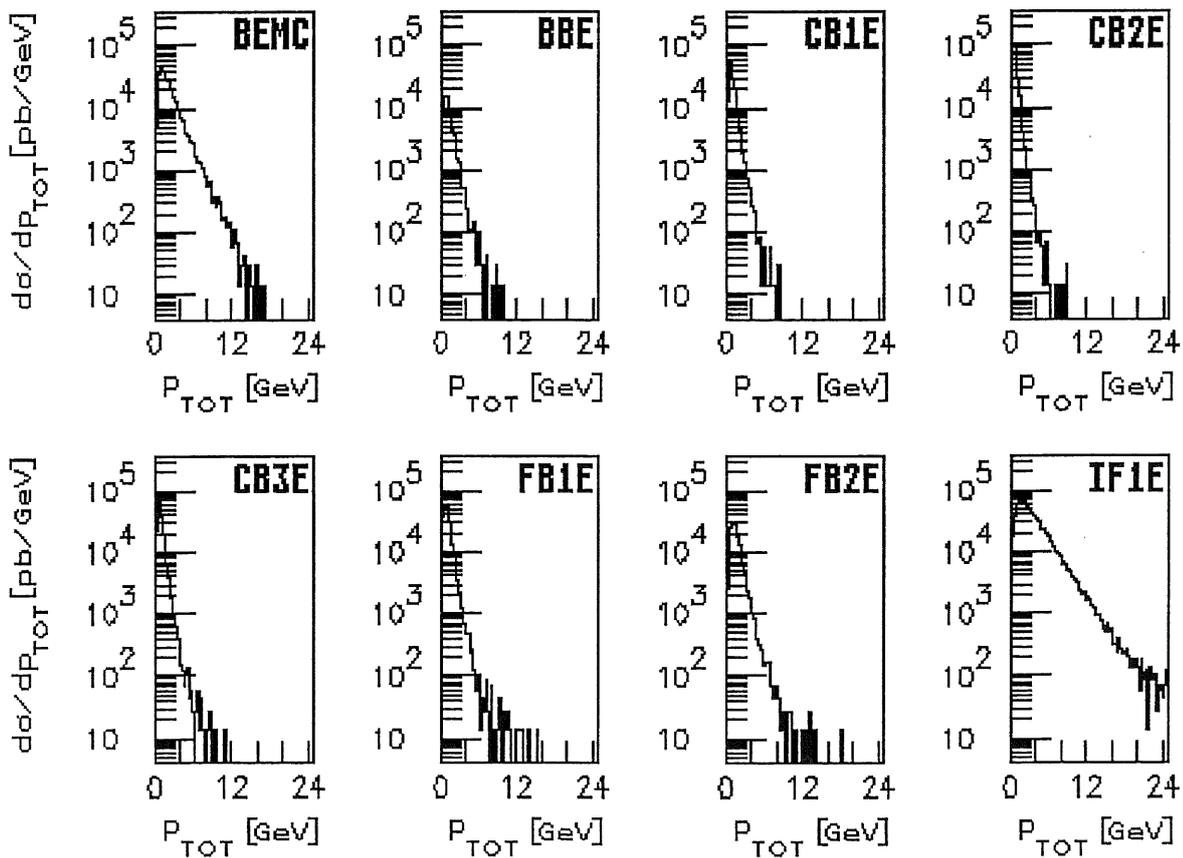


Alle Hadronen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)Alle Elektronen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)

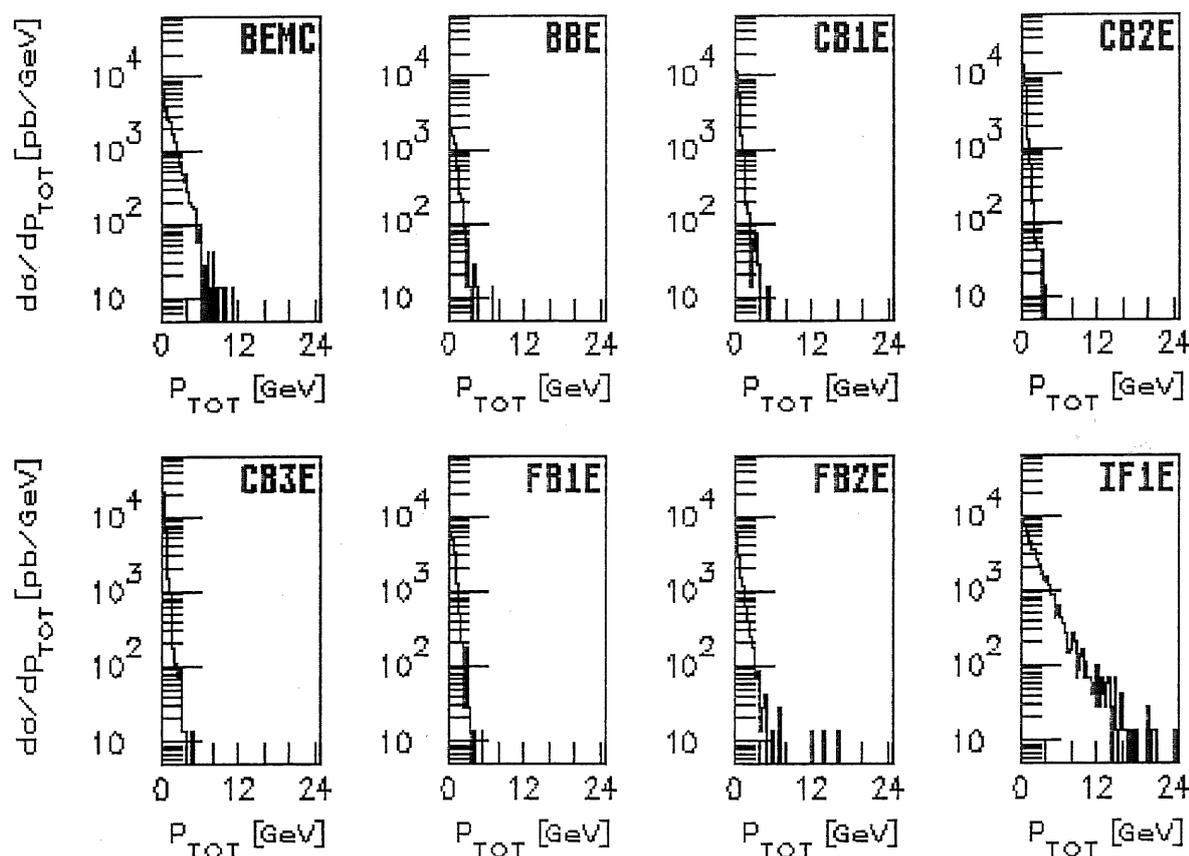
Alle Photonen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



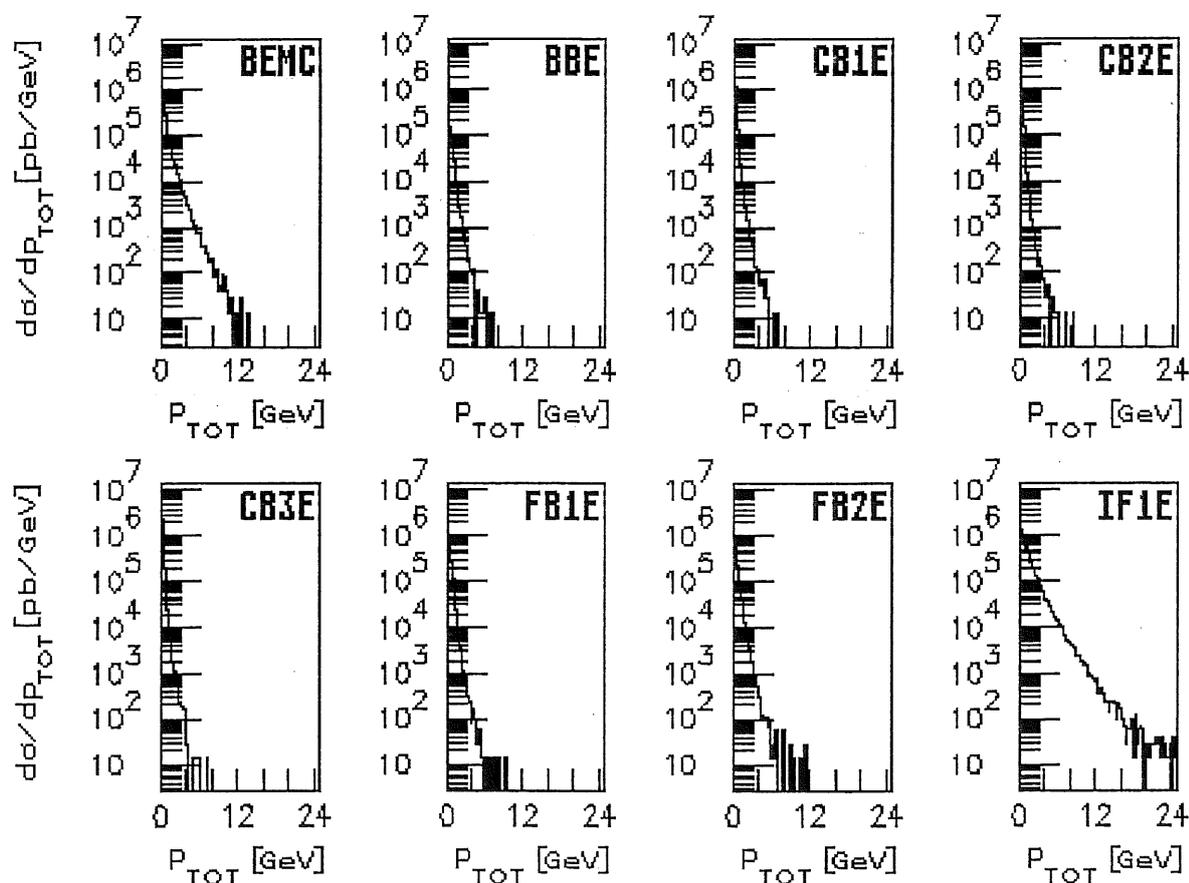
Alle Hadronen aus C-Zerfällen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



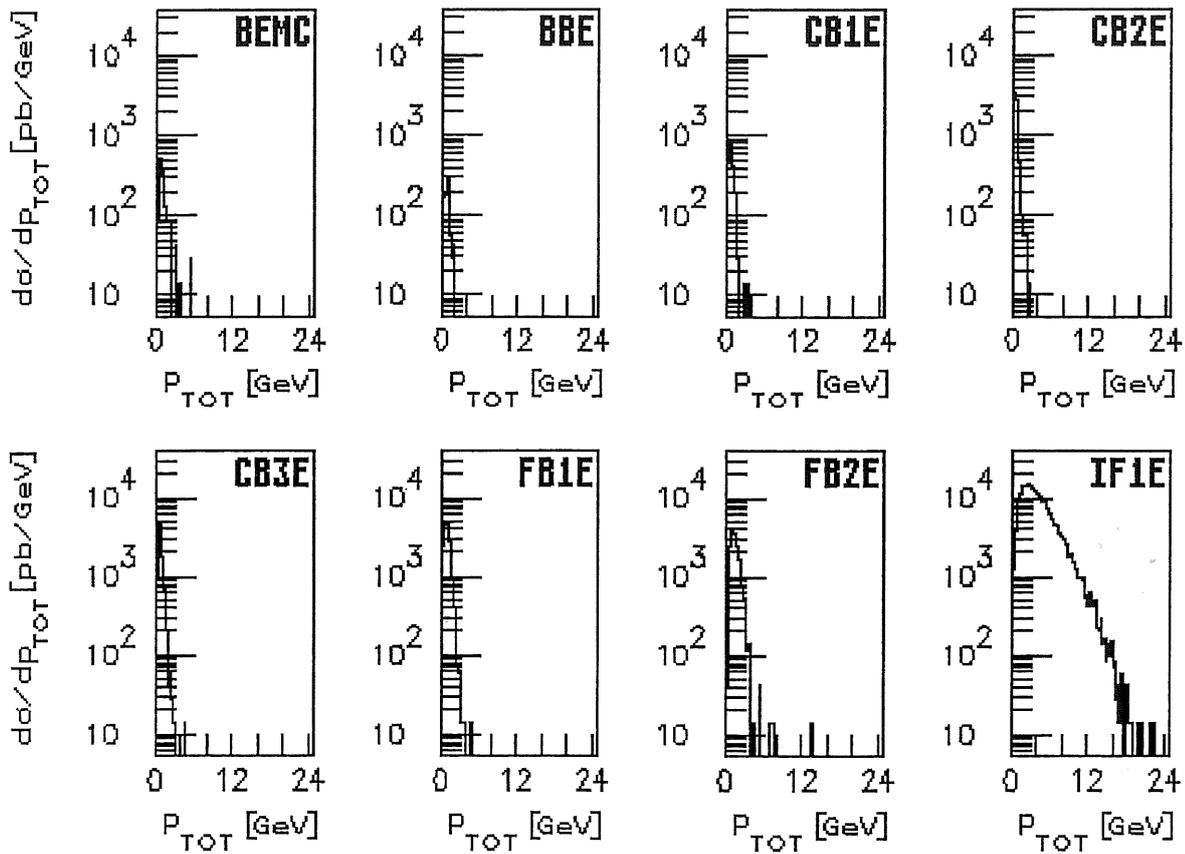
Alle Elektronen aus C-Zerfällen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



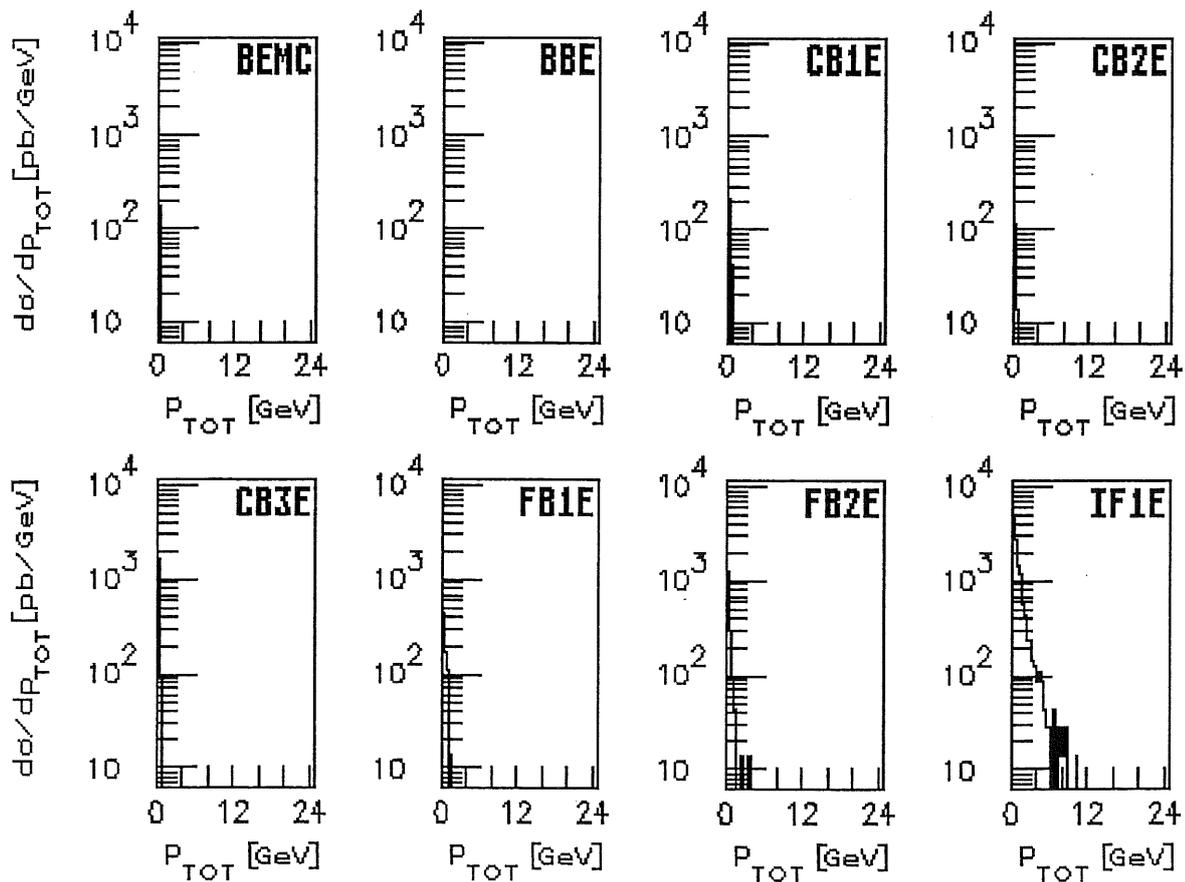
Alle Photonen aus C-Zerfällen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



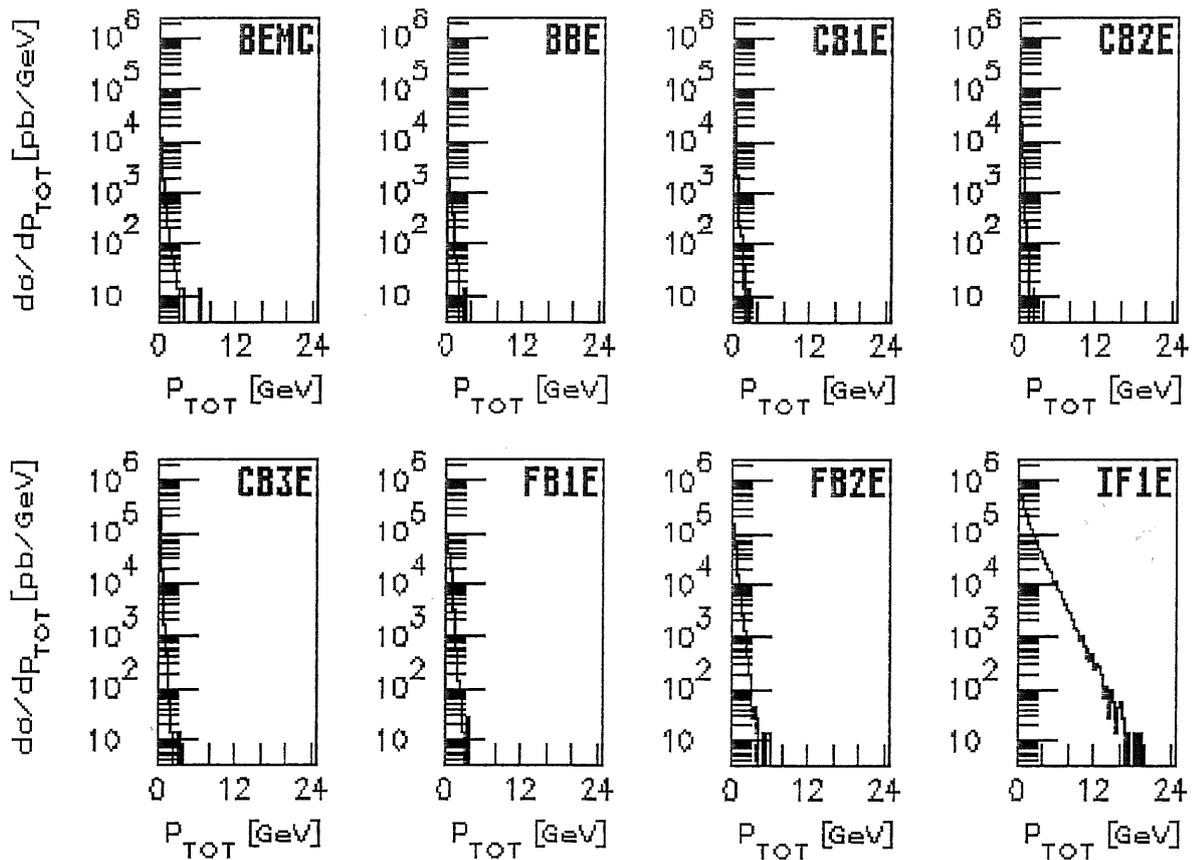
Alle Spectator-Hadronen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



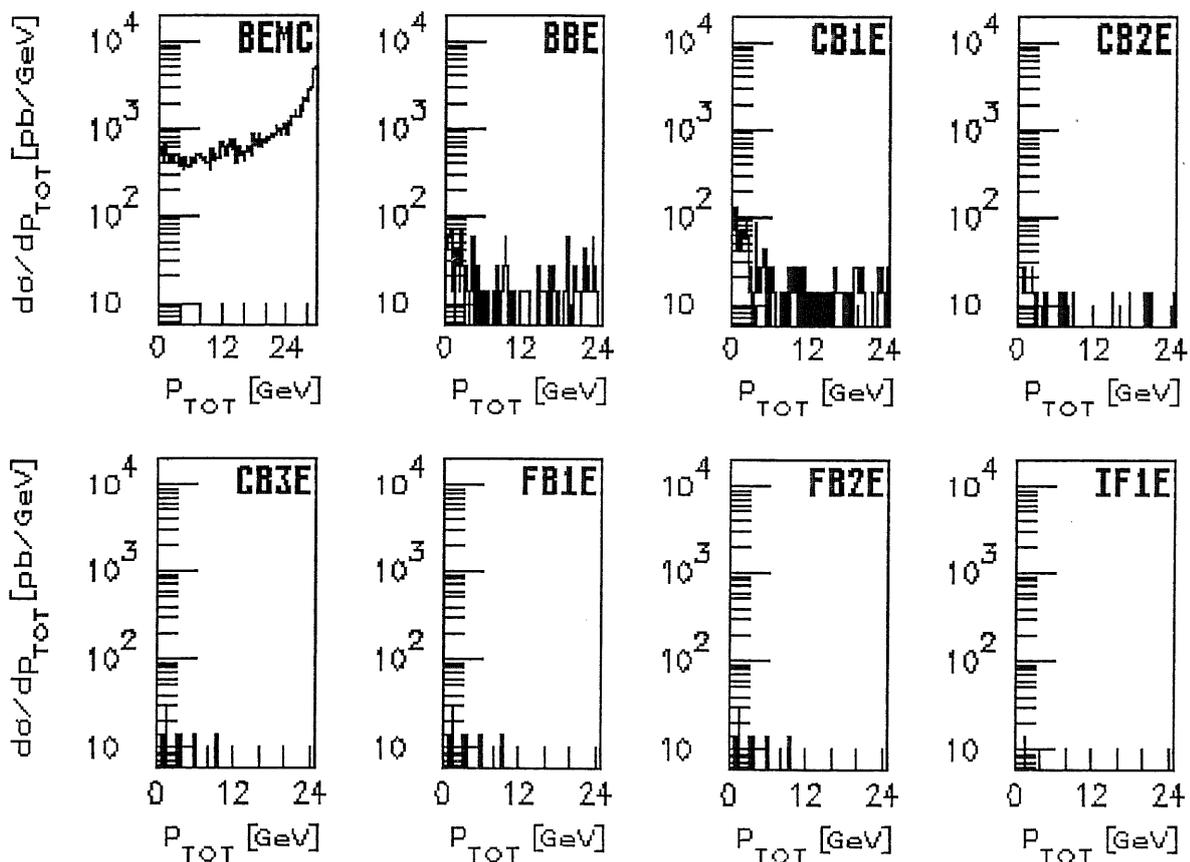
Alle Spectator-Elektronen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



Alle Spectator-Photonen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



Alle gestreuten Elektronen (aus 148000 $c\bar{c}$ -Ereignissen)



Literaturverzeichnis

- [BAR89]/[BGT89] F. BARREIRO; M. A. GARCÍA, J. F. de TROCÓNIZ
Experimental Aspects of Heavy Quark Physics at HERA
DESY 89-116
FUTAM-EP-89/01
September 1989
- [BOR87] K. BORRAS
Simulation des Teilchennachweises mit dem elektromagnetischen
Flüssig-Argon-Testkalorimeter des H1-Detektors
Diplomarbeit, Universität Dortmund
November 1987
- [EHLQ84] E. EICHTEN, I. HINCHLIFFE, K. KANE, C. QUIGG
Errata: Supercollider Physics
Rev. Mod. Phys. 56 (1984) 579, ibid. 58 (1986) 1047
- [EIKU88] R. A. EICHLER, Z. KUNSZT
Charm, Bottom und Top Production in High Energy Electron Proton
Collisions
ETHZ-IMP P/88-1
Februar 1988
- [FÜR89] HERMANN FÜRSTENAU
Monte-Carlo-Studien zur Suche von Top-Quarks bei HERA
Diplomarbeit an der Universität Hamburg
MPI-PAE/Exp. El. 213
Juni 1988
- [HERA88] HERA-BULLETIN
Nr.13
Juni 1988
- [HAR90] P. HARTZ
Dissertation in Vorbereitung
Universität Dortmund
Juni 1990
- [HÜT62] HÜTTE
Des Ingenieurs Taschenbuch
herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, e. V. in Berlin
28. Auflage
Band IV B
Fernmeldetechnik
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München 1962

- [INSC88] G. INGELMAN, G. A. SCHULER
Characteristics of Heavy Flavour Production in ep Collisions
DESY 88-020
Februar 1988
- [KOH85] F. KOHLRAUSCH
Praktische Physik Band 2
23. Auflage
B. G. Teubner, Stuttgart 1985
- [KOL88] M. KOLANDER
Interne Unterlagen von 1988
- [KOL90P] M. KOLANDER
Persönliche Mitteilung
Juni 1990
- [LEN89] U. LENHARDT
Optimierungsuntersuchungen an einem elektromagnetischen
Flüssig-Argon-Kalorimeter des H1-Detektors
Diplomarbeit, Universität Dortmund
Januar 1989
- [LUE60] LUEGER
Lexikon der Technik
4. Auflage in 17 Bänden
herausgegeben von Alfred Erhardt und Hermann Franke
Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart
Band 2: Grundlagen der Elektrotechnik und Kerntechnik A-Z
herausgegeben von W. Putz, Mülheim/ Ruhr
Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart 1960
- [RAU78] K. RAUSCHNABEL
Messung elektromagnetischer und hadronischer Schauer mit
Flüssigargon-Kalorimetern
Diplomarbeit, Kernforschungszentrum Karlsruhe
Mai 1978
- [RAU90P] K. RAUSCHNABEL
Persönliche Mitteilung
Juni 1990

- [SCHM87] PETER SCHMÜSER
Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie und den zwischen
ihnen wirkenden Kräften
Überarbeiteter Nachdruck aus uni hh XIX 1985
Herausgeber: DESY-PR-Abteilung
September 1987
- [SCH2/89] G. A. SCHULER
Heavy Flavour Production in High Energy Electron-Proton Collisions
DESY 89-018
Februar 1989
- [SCH6/89] G. A. SCHULER
Perspectives on Physics at HERA
DESY 89-075
Juni 1989
- [SCHU88] G. A. SCHULER
Heavy Flavour Production at HERA
Nuclear Physics B299 (1988) 21-51
- [SJBE87] T. SJÖSTRAND, M. BENGTSSON
The Lund Monte Carlo for Jet Fragmentation and e^+e^- Physics
-Jetset Version 6.3- an Update
Comput. Phys. Commun. 43 (1987) 367-379
- [SJÖ86] T. SJÖSTRAND
The Lund Monte Carlo for Jet Fragmentation and e^+e^- Physics
-Jetset Version 6.2
Comput. Phys. Commun. 39 (1986) 347-407
- [SON88] V. SONDERMANN
Entwicklung einer automatischen Kontrolle des elektronischen
Verhaltens eines Schauerzählers des H1-Experimentes
Diplomarbeit, Universität Dortmund
Juni 1988
- [TP86] TECHNICAL PROPOSAL FOR THE H1-DETEKTOR
H1-Collaboration
März 1986
- [TP87] TECHNICAL PROGRESS REPORT
H1-Collaboration
Oktober 1987

[TP89] TECHNICAL PROGRESS REPORT
H1-Collaboration
August 1989

[WOL86] G. WOLF
HERA: Physics, Machine and Experiments
DESY 36-089
August 1986

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. H. Kolanoski für die Themenstellung und Betreuung dieser Arbeit und viele hilfreiche Diskussionen bedanken.

Herrn Prof. Dr. D. Wegener danke ich für zahlreiche Ratschläge und Anregungen.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Dr. K. Rauschnabel, der mir in allen wichtigen Fragen weitergeholfen hat.

Allen Mitgliedern des Lehrstuhls EV der Abteilung Physik an der Universität Dortmund danke ich für das ausgezeichnete Betriebsklima und die gute Zusammenarbeit. Ganz besonders möchte ich mich bei P. Hartz bedanken, der mir nicht nur den Einstieg sehr erleichtert hat, sondern auch während der ganzen Zeit immer äußerst hilfsbereit war und mich tatkräftig unterstützt hat.

Für ihre hervorragende Arbeit und stets freundliche Hilfsbereitschaft danke ich den Beschäftigten der Mechanischen Werkstatt und der Elektrischen Werkstatt sowie den Angestellten des Konstruktionsbüros und den Technikern des Lehrstuhls EV.

Bei G. Ingelman und G. Schuler bedanke ich mich für die Generatoren, die sie mir freundlicherweise zur Verfügung gestellt haben.

Nicht zuletzt danke ich allen, die mich auf dem langen Weg bis hierher begleitet und mir zur Seite gestanden haben.

Meiner Familie tausend Dank für alles!

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert (BMFT-Projektnummer: 05 5DO 59I).