

Universität Hamburg  
II. Institut für Experimentalphysik  
2 Hamburg 50, Luruper Chaussee 149

Messungen zur Qualitätskontrolle von  
Bauteilen des Eichkalorimeters für das  
elektromagnetische Vorwärtskalorimeter  
im H1-Detektor

Experimentell physikalische Diplomarbeit  
an der Universität Hamburg  
durchgeführt in der DESY-Arbeitsgruppe F21

von

Peter Loch

5. Juni 1987

Dipl. 663 1988/183

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>1 Energiemessung im Flüssig-Argon-Kalorimeter</b>	<b>6</b>
1.1 Grundlagen . . . . .	6
1.1.1 Elektromagnetisches Schauermodell . . . . .	6
1.1.2 Hadronische Schauer . . . . .	9
1.1.3 Das Flüssig-Argon-Kalorimeter . . . . .	10
1.2 Struktur des Eichkalorimeters . . . . .	11
1.2.1 Das elektromagnetische Viertelstack . . . . .	11
1.2.2 Das hadronische Viertelstack . . . . .	16
1.3 Signalerzeugung und -verstärkung . . . . .	20
1.3.1 Hochspannung und Ladungssammlung . . . . .	20
1.3.2 Signalverstärkung . . . . .	22
1.4 Energieauflösung . . . . .	23
1.4.1 Energieauflösung elektromagnetischer Kalorimeter . . . . .	23
1.4.2 Energieauflösung hadronischer Kalorimeter . . . . .	23
<b>2 Messungen zur Bauteilkontrolle</b>	<b>25</b>
2.1 Allgemeines . . . . .	25
2.2 Computergesteuertes Messen . . . . .	25
2.2.1 Technische Ausstattung . . . . .	26
2.2.2 Aufgaben des Meßprogramms . . . . .	27
2.2.3 Generelle Struktur der Meßroutinen . . . . .	28
<b>3 Tests von einzelnen Kalorimeterbauteilen</b>	<b>31</b>
3.1 Auslesekarten des elektromagnetischen Kalorimeterteils . . . . .	31
3.1.1 Durchgangstests . . . . .	33
3.1.2 Kurzschlußtests . . . . .	33
3.1.3 Ergebnisse und Probleme . . . . .	36
3.2 Messung des elektrischen Widerstandes einer hochohmigen Schicht . . . . .	37
3.2.1 Einfache statische Messungen . . . . .	38
3.2.2 Die Vierpolmethode . . . . .	39
<b>4 Kapazitive Tests an elektromagnetischen Ausleseplatten</b>	<b>43</b>
4.1 Verfahren A: Automatisch geschaltete Auslesekanäle . . . . .	45
4.1.1 Probleme beim Messen von Kapazitäten . . . . .	45

4.1.2	Durchführung der Messungen . . . . .	47
4.2	Verfahren B: Manuelle Messungen . . . . .	49
4.2.1	Durchführung der Messungen . . . . .	49
4.3	Vergleich der Ergebnisse aus beiden Verfahren . . . . .	49
4.3.1	Allgemeine Fehlerdiagnose . . . . .	49
4.3.2	Vergleich von Kapazitätswerten bei verschiedenen Temperaturen . . . . .	53
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	55
4.4.1	Verteilung der Kapazitätswerte . . . . .	55
4.4.2	Fehlerstatistik . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Abkühltest an einem Modell des hadronischen Absorbers</b>	<b>60</b>
5.1	Zielsetzung . . . . .	60
5.2	Der Wärmetransport im Absorbermodell . . . . .	62
5.2.1	Der Wärmetausch zwischen Stahl und Kühlmittel .	62
5.2.2	Der Wärmetransport im Stahl . . . . .	62
5.3	Durchführung der Messung . . . . .	64
5.3.1	Ergebnisse der Temperaturmessungen . . . . .	64
5.3.2	Konsequenzen aus dem Abkühlversuch . . . . .	65
	<b>Der aktuelle Stand und Ausblick</b>	<b>68</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>73</b>

# Einleitung

Zur Zeit wird in Hamburg die *Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA* gebaut, in der Protonen auf 820 GeV und Elektronen auf 30 GeV gegenläufig beschleunigt werden sollen. An zwei Wechselwirkungspunkten werden beide Teilchenarten zur Kollision gebracht und die z.B. durch inelastische Elektron-Quark-Streuung entstehenden Teilchen beobachtet. Zur Energie- und Impulsmessung dieser Sekundärteilchen wird an jedem der Wechselwirkungspunkte ein Detektorsystem (*H1* bzw. *Zeus*) aufgestellt.

Aufgrund der hohen Schwerpunktsenergie von etwa 314 GeV können bei einer Elektron-Proton-Kollision sehr energiereiche neue Teilchen entstehen. Deren Energie kann mit großer Genauigkeit in einem Absorptionsdetektor, dem Kalorimeter, gemessen werden, da dessen Energieauflösung  $\sigma(E)/E$  typischerweise proportional zu  $1/\sqrt{E}$  ist.

Die Prinzip der Energiemessung im Kalorimeter ist die Umwandlung der Energie eines eindringenden Teilchens in ein meßbares, der Einfallsenergie proportionales Signal (Ladung, Licht). Dabei wird ausgenutzt, daß die meisten hochenergetischen Teilchen beim Eindringen in Materie durch Reaktionen mit den Materieteilchen einen Schauer von weiteren Teilchen erzeugen können, auf die sich ihre Einfallsenergie verteilt und die schließlich zu Ionisationen oder Anregungen der Materieatome führen. Wird als Materie ein geeignetes Auslesemedium wie flüssiges Argon benutzt, kann die durch solche Ionisationen freigesetzte Ladungsmenge in einem elektrischen Feld gesammelt und die Einfallsenergie eines Teilchens bestimmt werden. Zusätzlich zum Auslesemedium enthalten Flüssig-Argon Kalorimeter - wie auch andere - ein Absorbermaterial, das einen Großteil der Schauerteilchen und damit der Einfallsenergie absorbiert. Mit einer Sandwichanordnung von Absorber und Auslesemedium kann dadurch eine kompakte Bauweise des Kalorimeters bei stichprobenartig zu messender erzeugter Ladungsmenge erreicht werden.

In den *H1*-Detektor werden Flüssig-Argon-Kalorimeter mit Blei- oder Edelmetallabsorbern - erstere zum Nachweis von Elektronen, letztere zum Nachweis von Hadronen - eingebaut. Wegen des großen Impulsüberschusses der Protonen werden die Sekundärteilchen bevorzugt in deren Flugrichtung gestreut. Dieses bedingt den asymmetrischen Aufbau des Kalorimeters (Abb.1,[H1TP]).

Die beiden *H1*-Vorwärtskalorimeter IF1E (Inner Forward 1 Electromagnetic) und IF2H (Inner Forward 2 Hadronic) werden von der DESY-Arbeitsgruppe F21 gebaut. Zur Eichung dieser beiden Kalorimeter werden zur Zeit Prototypen gleicher longitudinaler Struktur wie IF1E und IF2H



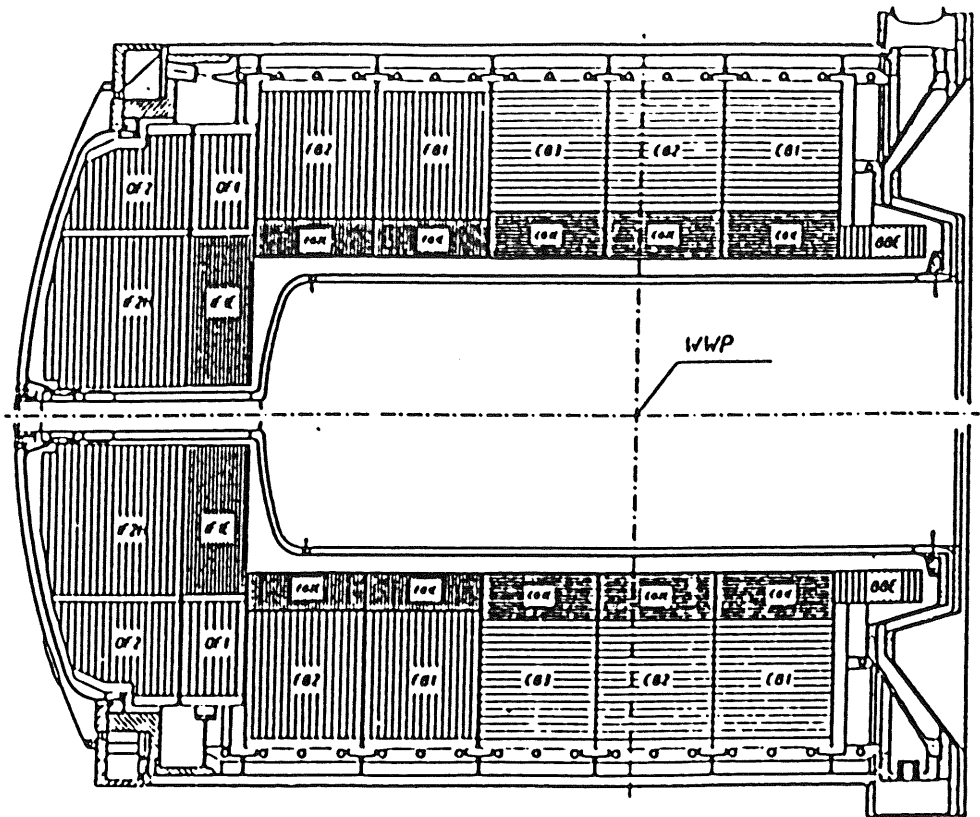


Abbildung .1: Das H1-Kalorimeter. Die Flugrichtung der Protonen in dieser Abbildung geht von rechts nach links.

zusammengesetzt. Diese Eichkalorimeter sollen im Juli/August 1988 beim CERN in Genf einem Strahltest unterzogen werden - Pionen und Elektronen bekannter Energie werden an definierten Orten in die Prototypen eingeschossen und die Ansprache der Prototypen auf die Teilchen gemessen. Da in Genf ein nur verhältnismäßig kleiner Kühlbehälter (Kryostat) für das flüssige Argon zur Verfügung steht, sind die Dimensionen für die Eichkalorimeter beschränkt. Sie haben die volle Tiefe, aber nur ein Viertel des Querschnittes der späteren Kalorimeter. Sie werden deswegen als *Viertelstacks* bezeichnet (Abb.2).

In dieser Arbeit werden Methoden zur Überprüfung verschiedener Kalorimeterbauteile auf elektrische Fehler vorgestellt. Die Datennahme bei einigen dieser Testmessungen erfolgt rechnergesteuert. Neben der Entwicklung und Erprobung von Testverfahren war die jeweils benötigte Software zu erstellen. Leider ist dieses nur für Bauteile des elektromagnetischen Eichkalorimeters möglich gewesen; die Teile für den hadronischen Teil sind bis zur Vorlage dieser Arbeit noch nicht fertiggestellt worden.

Im ersten Teil der Arbeit werden kurz die Grundlagen der Kalorimeterphysik dargestellt, die Struktur der beiden Prototypen beschrieben und die Energieauflösung für beide Kalorimeterteile diskutiert.

Im zweiten Teil werden - nach einer kurzen Erörterung allgemeiner Gesichtspunkte des rechnergesteuerten Messens - einige Meßverfahren vorgestellt und die auftretenden Probleme diskutiert. Der Schwerpunkt liegt

dabei auf kapazitiven Untersuchungen von Ausleseplatten des elektromagnetischen Viertelstacks.

Im letzten Teil wird schließlich noch ein Abkühlversuch mit einem Modell des späteren hadronischen H1-Edelstahlabsorbers besprochen.

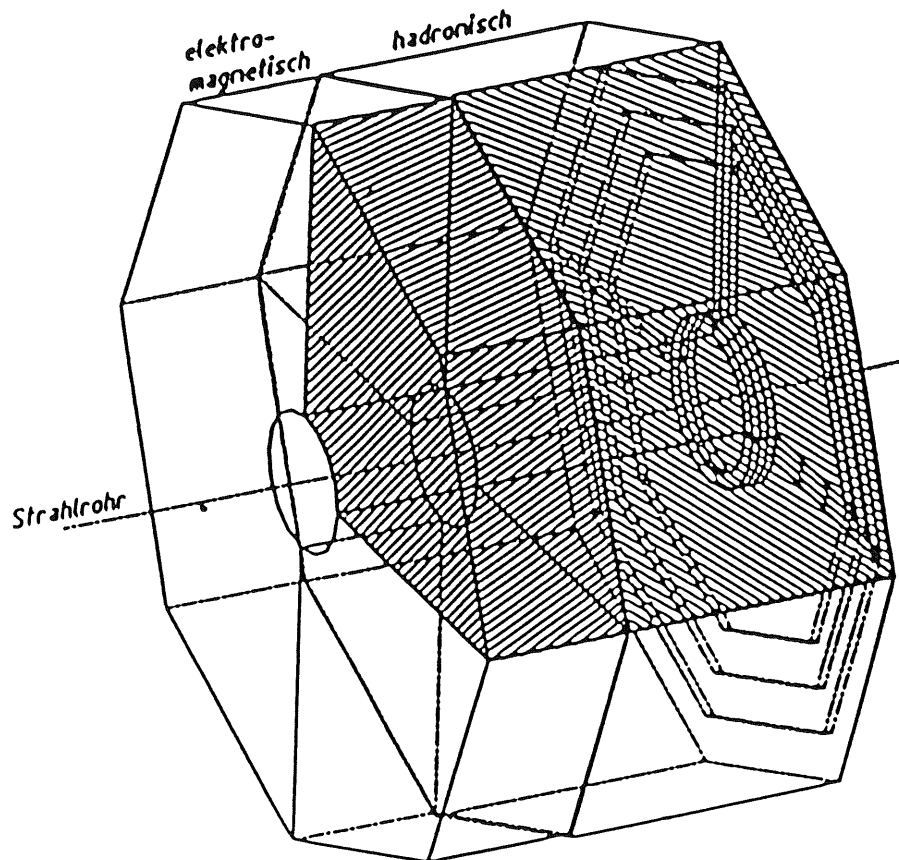


Abbildung .2: Das Eichkalorimeter als Segment des späteren H1-Vorwärtskalorimeters. Die Protonenrichtung im HERA-Ring geht auf dieser Abbildung von links nach rechts.

# Kapitel 1

## Energiemessung im Flüssig-Argon-Kalorimeter

### 1.1 Grundlagen

#### 1.1.1 Elektromagnetisches Schauermodell

Charakteristisch für die Wechselwirkung eines geladenen Teilchens mit Materie sind im wesentlichen zwei Effekte: Ionisation und Bremsstrahlung. Das Teilchen kann die Materieatome durch Stöße ionisieren. Der dabei im Mittel pro Wegelement  $dx$  entstehende Energieverlust des Teilchens ist durch die Bethe-Bloch-Formel<sup>1</sup> gegeben:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = -\frac{4\pi N_0 e^4}{mv^2} \cdot \frac{Z}{A} \cdot \left(\ln\left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2\right) \quad (1.1)$$

Dabei ist  $m$  die Elektronruhemasse,  $N_0$  die Loschmidtsche Zahl,  $v = \beta \cdot c$  die Teilchengeschwindigkeit,  $I$  das mittlere Ionisationspotential des Materials, und  $Z/A$  das Verhältnis von Kernladungs- zu Kernmassenzahl der Materieatome. Das qualitative Verhalten des Ionisationsverlusts ist in Abb.1.1 dargestellt; für große Teilchenenergien strebt er einem konstanten Wert zu.

Anders dagegen die Energieabhängigkeit des zweiten wichtigen Effekts, der Bremsstrahlung. Dieser durch das Abbremsen bzw. die Ablenkung eines schnellen geladenen Teilchens im Feld der Materieatomkerne und der damit verbundenen Emission von Photonen bedingte mittlere Energieverlust pro Wegelement läßt sich für genügend hohe Teilchenenergien  $E(\gg Mc^2, M$  Teilchenruhemasse) schreiben als

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = -\frac{E}{X_0} \quad (1.2)$$

$X_0$  ist die sogenannte Strahlungslänge, die die Strecke im Material angibt, auf der die Energie eines Teilchens durch Bremsstrahlung im Mittel auf

<sup>1</sup>Alle in diesem Abschnitt zitierten Formeln sind, soweit nicht anders angegeben, aus [Pe82]

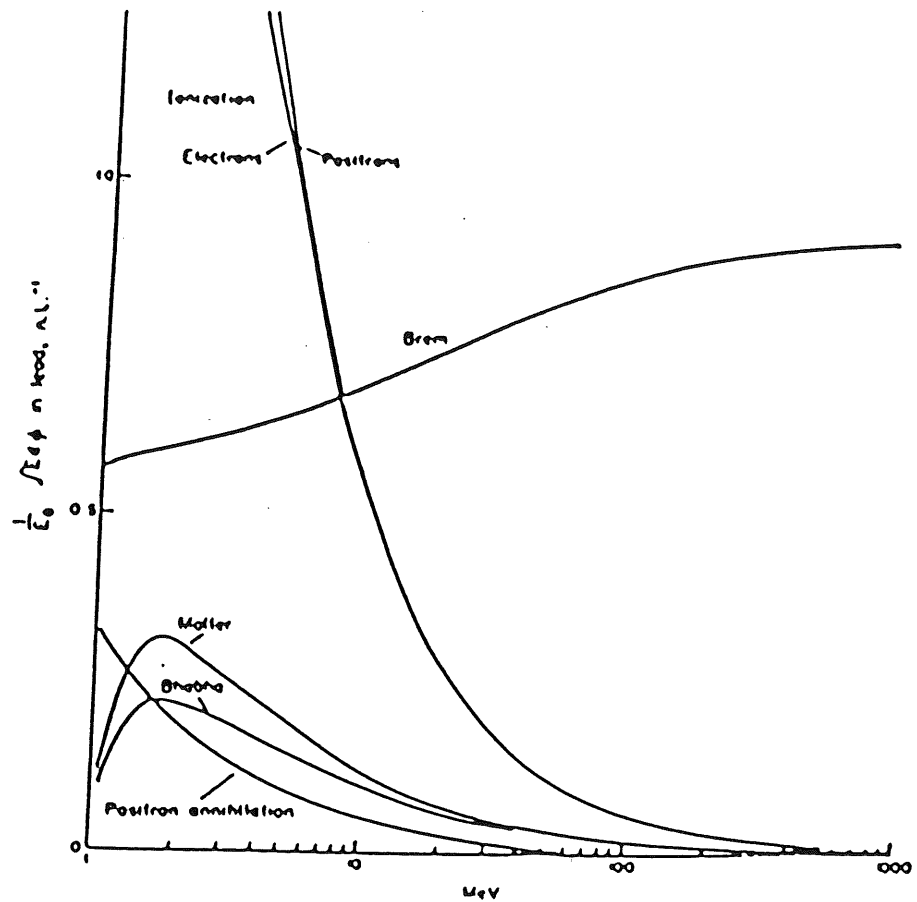


Abbildung 1.1: Der integrierte und auf die Einfallsenergie  $E_0$  der Teilchen normierte Energieverlust von Elektronen beim Durchgang durch Blei in Anhängigkeit von der Elektronenenergie [Me].

$E/c$  abgesunken ist. Das qualitative Verhalten von Gl.(1.2) ist ebenfalls in Abb.1.1 dargestellt.

Für hochenergetische Elektronen und Positronen dominiert also der Strahlungsverlust über den Ionisationsverlust; dagegen zeigt sich bei kleineren Elektronen-(Positronen-)energien genau das umgekehrte Verhalten. Ausgezeichnet ist die kritische Energie  $E_k$ , bei welcher der Energieverlust durch Bremsstrahlung gleich dem durch Ionisationen ist.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} \approx -\frac{E_k}{X_0} \quad (1.3)$$

Das Photon, welches wie ein Elektron (Positron) einen elektromagnetischen Schauer auslösen kann, zeigt bei der Wechselwirkung mit Materie drei Effekte. Ist seine Energie größer als 1 MeV, also als die zweifache Elektronenruhemasse, kann es in der Nähe eines Atomkerns in eine Elektron-Positron-Paar konvertieren. Die für diesen Prozeß charakteristische Größe ist die Konversionslänge  $X_c = \frac{9}{7} \cdot X_0$ , die Strecke, die ein Photonstrahl in Materie zurücklegt, bis seine Intensität durch Paarbildung vom Anfangswert  $I_0$  auf  $I_0/e$  abgesunken ist.

Photonen im Energiebereich von einigen 100 keV. bis zu einigen MeV verlieren Energie hauptsächlich durch Streuung an den quasi freien Elek-

tronen auf den Außenschalen der Materieatome. Bei dieser Compton-Streuung geht ein Teil der Photonenenergie auf die Elektronen über, die dadurch aus dem Atom befreit werden können.

Der Photoeffekt, also die direkte Ionisation durch Photonabsorption, tritt hauptsächlich für Photonen mit Energien bis zu einigen 100 keV auf. (Abb.1.2, [Ga81])

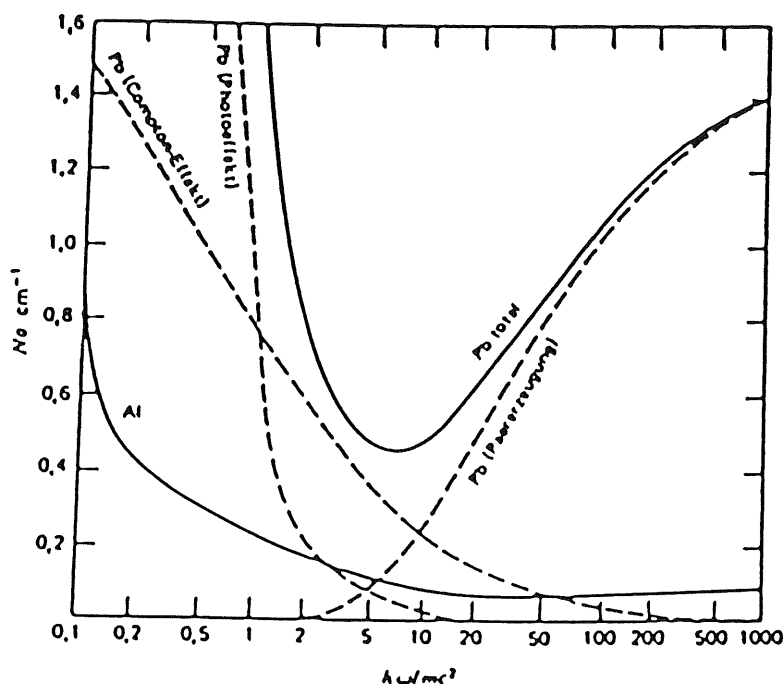


Abbildung 1.2: Totaler Absorptionskoeffizient für Photonen in Blei und Aluminium in Abhängigkeit von der Photonenenergie (letztere angegeben in Einheiten der Elektronruhemasse  $m = 0.51 \text{ MeV}$ )

Im einem einfachen Modell<sup>2</sup> des elektromagnetischen Schauers geht man von der Vorstellung aus, daß ein in Materie eintretendes Elektron auf einer Strahlungslänge  $X_0$  ein Photon emittiert. Dabei halbiert sich seine Energie. Das Photon wiederum wird innerhalb einer Konversionslänge ein Elektron-Positron-Paar erzeugen, wobei jedes Teilchen die Hälfte der Photonenergie, also ein Viertel der Einfallsenergie des Elektrons, übernimmt. Diese sekundär entstandenen Teilchen können nun selbst Bremsstrahlungsphotonen emittieren, genauso wie das primäre Elektron weitere Photonen erzeugt, die dann wieder in Elektron-Positron-Paare konvertieren. So entsteht also durch das Wechselspiel von Bremsstrahlung und Paarerzeugung ein Schauer von Elektronen, Photonen und Positronen. Ein hochfrequentes Photon kann ebenfalls einen Schauer auslösen; er fängt lediglich mit einer Paarerzeugung an und pflanzt sich dann völlig analog dem elektron-induzierten Schauer fort. In diesem Modell erwartet man nach  $t$  Strahlungslängen  $2^t$  Teilchen, die jeweils eine mittlere Energie von  $E_{ind.} = E_0/2^t$  haben.  $E_0$  ist dabei die Energie des schauerauslösenden Teilchens. Der Schauer erreicht sein Maximum bei  $E_{ind.} = E_k$ ; die nun

<sup>2</sup>siehe [Pe82]

für kleinere  $E_{ind.}$  verstärkt auftretenden Ionisationsverluste schmälern die Ausbeute an Bremsstrahlungsphotonen entscheidend. Die Wahrscheinlichkeit für Elektron-Positron-Vernichtung ( $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ ) und für Coulomb-Streuung nimmt zu. Der Schauer verbreitert sich dadurch stark, während er sich longitudinal nicht mehr wesentlich ausbreitet. [Am80]

Die Endprodukte sind schließlich neben den ionisierten Materieatomen eine große Zahl aus diesen Ionisationen entstandener oder durch Paarproduktion erzeugter und durch Streuung abgebremster Elektronen. Die Photonen sind im wesentlichen in atomare Anregungen und Ionisationen investiert worden, während die abgebremsten Positronen hauptsächlich durch eine Vernichtungsreaktion in oben beschriebener Form verschwunden sind.

### 1.1.2 Hadronische Schauer

Ebenso wie hochenergetische Elektronen und Photonen können auch energiereiche geladene und ungeladene Hadronen einen Schauer von Sekundärteilchen beim Eintritt in Materie auslösen. Allerdings gibt es aufgrund der relativ vielen möglichen Effekte bei Hadronen kein einfaches Schauermodell.

Ursache für die Erzeugung von Schauerteilchen ist die inelastische Streuung des einfallenden Hadrons an den Protonen und Neutronen der Materieatomkerne. Bei dieser starken Wechselwirkung entstehen hauptsächlich sekundäre Hadronen verschiedenster Art und Energie, welche wiederum durch Zerfälle und inelastische Reaktionen mit den Kernnukleonen in der Lage sind, weitere Teilchen zu erzeugen.

Zu den erzeugten Sekundärteilchen gehören im wesentlichen geladene und ungeladene Pionen sowie Nukleonen. In geringerer Zahl entstehen Kernfragmente aus induzierten Kernspaltungen, Myonen und Neutrinos. Einige dieser Teilchen tragen zu den Besonderheiten der hadronischen Schauerbildung bei:

- Die neutralen Pionen zerfallen schnell gemäß  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ . Die beiden Photonen können elektromagnetische Schauer auslösen. [Jo69]
- Neutrinos aus zerfallenden Myonen oder - weniger wahrscheinlich - Hadronen haben eine vergleichsweise geringe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit der Materie.
- Es kann auch in größerer Schauertiefe zur Entstehung von relativ schnellen, energiereichen Teilchen kommen. Die mittlere individuelle Energie aller Teilchen nimmt nicht wie im elektromagnetischen Fall einfach exponentiell ab. [Mu67]

Auch für hadronische Schauer gibt es eine charakteristische Größe, die Kernabsorptionslänge  $\lambda$ . Das ist der mittlere Weg eines Hadrons in Materie, auf dem es eine Wechselwirkung erfährt.  $\lambda$  ist nur vom Material abhängig und wesentlich größer als  $X_0$  (zum Beispiel für Eisen  $X_0 = 13.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,

$\lambda = 131.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (Die Zahlenwerte sind, wenn nicht anders angegeben, aus [Pa86]).

Am Ende eines hadronischen Schauers stehen - neben den Elektronen, Positronen und Photonen aus den sekundär induzierten elektromagnetischen Schauern - die durch tief ionisierende Teilchen wie Protonen oder geladene Kernfragmente erzeugten Elektronen, Photonen aus Kernprozessen, Myonen und Neutrinos aus Zerfällen, sowie Neutronen. Die Positronen und Photonen verschwinden über die schon beim elektromagnetischen Schauer genannten Prozesse. Thermische Neutronen können wie die durch Ionisationen abgebremsten Protonen in Kernprozessen eingefangen werden; ein Teil dieser Neutronen wird ebenso wie die Myonen und Neutrinos entweichen. Die Verteilung der Einfallenergie auf die möglichen Reaktionskanäle ist stark energieabhängig. Insbesondere die Zahl der erzeugten neutralen Pionen nimmt mit steigender Einfallenergie zu. Sie selbst zerfallen mit großer Wahrscheinlichkeit ohne weitere starke Wechselwirkung elektromagnetisch, aber die mit einer ähnlichen Rate erzeugten geladenen Pionen - und andere Hadronen - erfahren meistens weitere starke Wechselwirkungen mit den Kernnukleonen, bei der wiederum neutrale Pionen entstehen können ([Br88]).

### 1.1.3 Das Flüssig-Argon-Kalorimeter

Die Messung der Energie  $E$  eines Teilchens kann durch Umwandlung dieser in eine ihr proportionale Ladungsmenge<sup>3</sup> in einem Flüssig-Argon-Kalorimeter erfolgen (siehe Abschnitt (1.3.1)). Damit  $E$  vollständig in Form von freigesetzten Elektronen zu messen ist, also zu praktisch 100% im Kalorimeter deponiert wird, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Tiefe  $t$  des Kalorimeters ist im Fall des elektromagnetischen Schauers annähernd gegeben durch [Lo83]:

$$t \approx 3 \cdot x_{max} \approx X_0 \cdot \left( \log_2 \left( \frac{E}{E_k} \right) - 0.75 \right) \quad (1.4)$$

Dabei ist  $x_{max}$  die Tiefe des Schauers beim Maximum. Also ist die Tiefe des Kalorimeters durch die Einfallenergie der Teilchen und durch die erwünschte Energieauflösung (*Leakage*-Verluste, siehe Abschnitt (1.4)) bestimmt. Der elektromagnetische Teil des H1-Vorwärtskalorimeters hat eine Tiefe von ca.  $30X_0$  ([H1TP]).

Für Hadronen ist die notwendige Kalorimetertiefe ebenfalls durch die Einfallenergie und die Energieauflösung bestimmt. Das Vorwärtskalorimeter ist insgesamt etwa  $6.3\lambda$  tief; davon entfallen auf den hadronischen Teil etwa  $4.6\lambda$  ([H1TP]).

- Die Rekombinationsrate von freigesetzten Elektronen und den positiven Ionenrümpfen muß klein sein.

<sup>3</sup>Unter Vernachlässigung von Rekombinationsprozessen ist  $Q = \frac{E}{E_{ion}} \cdot e$ ;  $E_{ion}$  ist die Energie, die zur Produktion eines Ionenpaares in der Materie benötigt wird.

- Die Elektronen sollten eine hohe Mobilität zur schnellen Ladungssammlung haben.

Die letzten beiden Punkte erfüllt flüssiges Argon gut; es hat allerdings eine große Strahlungslänge ( $X_0^{fl.Ar.} = 14.0 \text{ cm} \equiv 19.55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). Durch Einbringen von Bleiabsorberplatten ( $X_0 \propto \frac{1}{Z}$ ,  $X_0^{Pb} = 0.56 \text{ cm} \equiv 6.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) wird eine kompakter Bauweise des Kalorimeters möglich. Allerdings kann die vom Blei absorbierte Energie nicht gemessen werden. Lediglich ein Anteil in der Größenordnung von 10% der Einfallsenergie wird im Argon deponiert. Daher ist die im Argon zu messende Ladungsmenge nur eine Stichprobe (Sampling).

Aufgrund der großen Absorptionslängen ist eine große Menge an Absorbermaterial in hadronischen Kalorimetern notwendig. Verwendet man dicke Absorberplatten, ist für eine vernünftig große Stichprobe aus dem Schauer ein Material mit kleiner Absorptions- und großer Strahlungslänge erforderlich, da ansonsten ein großer Teil der Energie der sekundär erzeugten elektromagnetischen Schauer vom Absorber "verschluckt" wird. Eisen eignet sich - wie Kupfer - gut als Absorber, Blei hat eine zu kleine Strahlungslänge.[En72]

Die im Argon freigesetzten Ladungsträger werden durch ein elektrisches Feld zwischen je zwei Absorberplatten gesammelt und mittels ladungsempfindlicher Verstärker gemessen. Aufgrund ihrer großen Mobilität werden die Elektronen schnell - Driftgeschwindigkeit in Argon:  $v_d \approx 5 \text{ mm}/\mu\text{s}$  bei einer Feldstärke von  $1 \text{ kV}/\text{mm}$  - an die Anode driften; dagegen tragen die positiven Argonionen wegen ihrer vergleichsweise geringen Beweglichkeit und der damit verbundenen langen Sammlungsdauer in nur geringem Maße zur Signalladung bei.[Wi74]

Die zwischen den Absorberplatten eines Blei-Flüssig-Argon-Kalorimeters gesammelte Ladungsmenge enthält die Energieinformation über ein einfallendes Teilchen. Somit ist die longitudinale<sup>4</sup> Struktur des Kalorimeters entscheidend für die Energiemessung und -auflösung. Die Ortsbestimmung dagegen erfolgt durch geeignet segmentierte Ausleseanoden und durch Vergleiche der Signalamplituden auf diesen Segmenten. Die Ortsauflösung hängt also von der transversalen Kalorimeterstruktur ab.

## 1.2 Struktur des Eichkalorimeters

### 1.2.1 Das elektromagnetische Viertelstack

#### Longitudinale Kalorimeterstruktur

Die Absorberstruktur des elektromagnetischen Eichkalorimeters besteht aus insgesamt 61 in konstantem Abstand hintereinander angeordneten Bleiplatten. Dazu kommen zwei Aluminiumplatten gleichen Querschnitts am Anfang und Ende des Stacks. Zwischen den Platten, in den sogenannten Gaps, befindet sich das flüssige Argon (bei etwa  $86^\circ\text{K}$ ).

<sup>4</sup>bezogen auf die Strahlachse



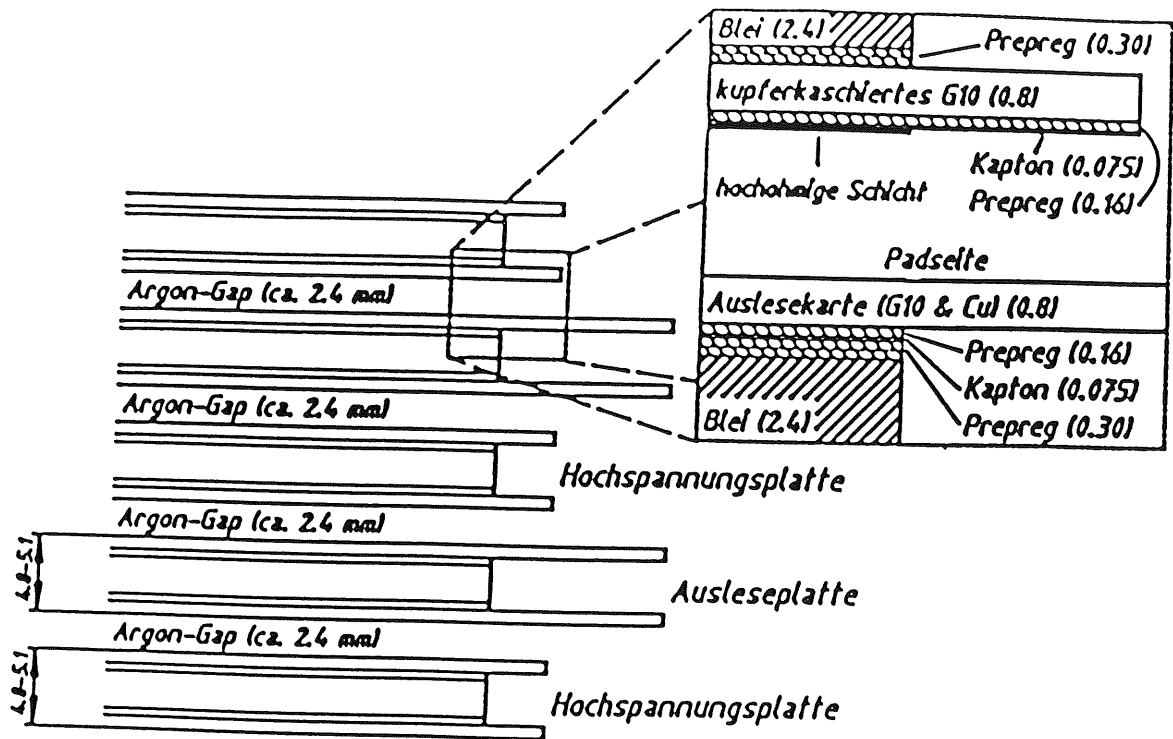


Abbildung 1.3: Longitudinale Auslesestruktur. Der Sandwich aus Hochspannungs- und Ausleseplatten wird als Stack bezeichnet. Maße in mm.

Jede zweite Bleiplatte des Stacks trägt beidseitig eine Auslesestruktur und wird im Folgenden als *Ausleseplatte* bezeichnet. Alle anderen Platten tragen, bis auf die erste und letzte Platte, ebenfalls beidseitig die Hochspannungszuführungen, so daß bei angelegter negativer Hochspannung über jedem der Argongaps ein auf die auf Masse liegende Ausleseplatte gerichtetes Feld anliegt. Die beiden Aluminiumplatten tragen entsprechend nur jeweils eine Hochspannungszuführung; die erste auf der Rück-, die zweite auf der Vorderseite. Die Richtung des Feldes alterniert also von Argongap zu Argongap.

Die Ausleseplatten sind beidseitig jeweils vier *Auslesekarten* oder *Read-out Boards* beklebt - eine genauere Beschreibung der Karten folgt im nächsten Abschnitt. Die Klebung der Read-out Boards auf die Bleiplatten erfolgt mittels einer Glasfaser-Epoxyharz-Mischung, dem Prepreg. Unter die Karten ist, zwischen zwei Prepreg-Schichten, noch eine Kaptonfolie geklebt. Diese hat sich als notwendig erwiesen, als bei der ersten Testklebung Kurzschlüsse zwischen den auf der Rückseite jeder Karte liegenden Leitungen und der Bleiplatte gefunden wurden. Die Dicke einer Ausleseplatte beträgt etwa 4.7 - 5.1 mm; die Bleiplatte alleine ist etwa 2.4 mm dick (Abb.1.3).

Die Hochspannungsplatten sind auf beiden Seiten mit je einer beidseitig mit Kupfer kaschierten G10-Platte ebenfalls mittels des Prepregs beklebt. Zum einen geben diese G10-Platten, die ebenso wie eine Auslesekarte etwa 0.8 mm dick sind, den Hochspannungsplatten eine größere Steifheit, zum anderen wird durch eine annähernd gleiche Beschichtung beider

Plattenarten ein homogener Kalorimetraufbau erreicht - beide Platten unterscheiden sich bezüglich ihres Absorptionsverhaltens praktisch nicht.

Auf die G10-Platten ist, wiederum mittels Prepreg, jeweils eine etwa 75  $\mu\text{m}$  dicke Kaptonfolie geklebt. Die Kaptonfolie wird, unter Aussparung aller massenahen Zonen am Rand der Platte und um die Montagelöcher, mit einer hochohmigen Schicht aus einem Ruß-Klebergemisch bemalt. Zwischen dieser Schicht und der Kaptonfolie befindet sich auf jeder Plattenseite am Rand noch ein Kontaktplättchen aus Kupferfolie als Hochspannungskontakt. Die Gesamtdicke einer Hochspannungsplatte beträgt ebenfalls etwa 4.7 - 5.1 mm.

### Transversale Kalorimeterstruktur

Die kleinste transversale Struktur zur Ladungssammlung im elektromagnetischen Eichkalorimeter und damit auch im IF1E-Kalorimeter sind kleine Kupferflächen, die sogenannten *Pads*. Ähnlich wie bei einer Leiterplatte sind die Pads auf eine G10-Platte aufgeklebt und bilden mit dieser eine Auslesekarte (*Read-out Board*). Die Struktur der Pads auf diesen Karten ist sowohl durch die Reaktionsgeometrie am Wechselwirkungspunkt als auch durch Erfordernisse bezüglich der Auslese-Elektronik bestimmt und in Abb.1.4 bzw. Abb.1.5 dargestellt.

Die G10-Platte einer Auslesekarte ist etwa 0.8 mm dick; die aufgeklebten Pads haben eine mittlere Dicke von ca. 33  $\mu\text{m}$ . Der Abstand zwischen zwei Padkanten beträgt 0.9 mm. Jedes der Pads ist durch eine Durchkontaktierung mit einer auf der Rückseite der G10-Platte aufgeklebten Signalleitung verbunden. Diese 0.3 mm breiten Leitungen führen je nach Lage des Pads zur Innen- oder Außenkante der Ausleseplatte, wo sich die entsprechenden Steckerkontakte befinden. Der minimale Abstand zwischen den Leitungen ist im Bereich der Stecker 0.3 mm, ansonsten ist er immer  $\geq 1$  mm.

Eine Ausleseplatte des Viertelstacks enthält jeweils vier Auslesekarten auf ihrer Vorder- und Rückseite. Die Padstruktur entsteht durch Zusammenlegen von einer Auslesekarte mit einer Bildstruktur und einer Auslesekarte mit einer entsprechenden gespiegelten Struktur zu einer Hälfte der Plattenoberfläche - einem Oktanten einer Ausleseplattenoberfläche des späteren H1-Kalorimeters. Die zweite Hälfte wird durch eine weitere Kombination einer Karte mit einer Bild- und einer Karte mit einer Spiegelbildstruktur aufgebaut (Abb.1.5).

Es gibt sieben verschiedene Strukturfamilien, die jeweils auf eine bestimmte Anzahl von Ausleseplatten (Tabelle 1.1) verteilt sind. Charakteristisch ist dabei die mit dem Abstand vom Wechselwirkungspunkt zunehmende Verschiebung der Padgrenzen zur Plattenaußenkante. Dieses Verhalten ist durch die Reaktionsgeometrie bestimmt und bewirkt, daß bei den am weitesten vom Wechselwirkungspunkt entfernten Ausleseplatten der Familie 7 im Gegensatz zu den am nächsten gelegenen Platten der Familie 1 eine Reihe von Pads fehlen. Sie sind gewissermaßen "aus dem Kalorimeterquerschnitt herausgedriftet".

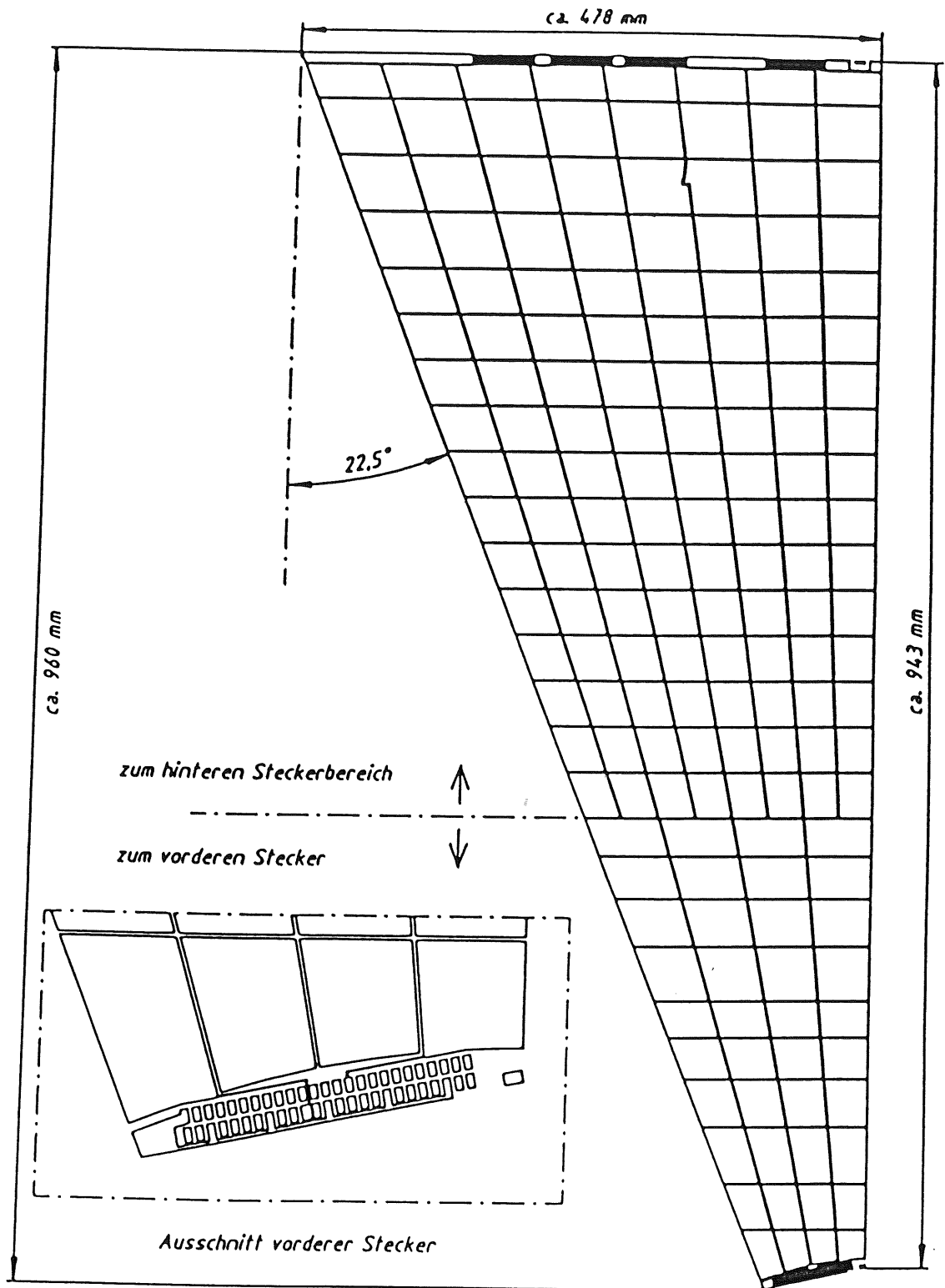


Abbildung 1.4: Eine Auslesekarte der zweiten Familie des elektromagnetischen Kalorimeters. Zu jeder Karte gibt es einen an dem langen Schenkel des rechten Winkels gespiegelten Partner. Zwei Bild- und zwei Spiegelbildkarten bilden eine Seite einer Ausleseplatte (Abb.1.5)

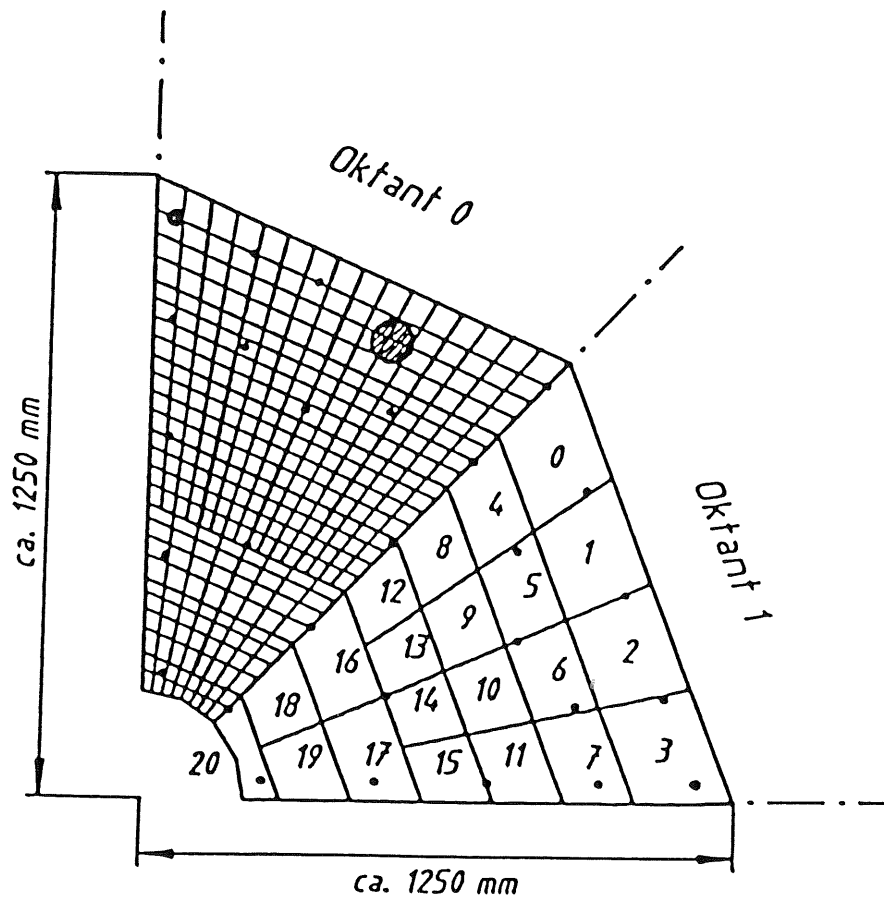


Abbildung 1.5: Padstruktur des elektromagnetischen Kalorimeters. Das Bild zeigt den Querschnitt einer Ausleseplatte des Viertelstacks mit der Padstruktur und den Montagelöchern. Im Oktant 1 ist nur die Nummerierung der noch zu besprechenden Triggertower wiedergegeben. Die Bezeichnungsweise ist bereits an das H1-Kalorimeter angepasst.

Familie Nummer	IF1E Ausleseplatten	IF2H Absorbergaps
1	3	6
2	3	6
3	3	7
4	4	7
5	4	8 <sup>+3</sup>
6	7	-
7	7	-

Tabelle 1.1: Die Verteilung der Boardfamilien im elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter. Die horizontalen Linien in der zweiten und dritten Spalte zeigen die longitudinalen Sektionen.

### Organisation der Auslesekäle

Zwei sich auf der Vorder- und Rückseite einer Ausleseplatte gegenüberliegende Pads sind über den zugehörigen Stecker elektrisch verbunden. Somit trägt sowohl die auf der Vorder- als auch die auf der Rückseite der Ausleseplatte gesammelte Ladung zum Signal bei. Weiterhin sind hintereinander liegende Pads auf im Stack hintereinander folgenden Ausleseplatten in vier longitudinalen Sektionen miteinander verbunden, sodaß ein Signal eines individuellen Auslesekanales aus den in einer bestimmten Anzahl von Gaps gesammelten Ladungen besteht (Abb.1.6, Tabelle 1.1).

Die bis zu 672 Auslesekäle einer Sektion sind in Paketen zu jeweils 16 in 42 sogenannte *Triggertower* organisiert (Abb.1.5). Dieses bedeutet, daß die Triggerung des H1-Kalorimeters im späteren Meßbetrieb jeweils für alle Pads eines dieser Tower gemeinsam erfolgt.

## 1.2.2 Das hadronische Viertelstack

### Longitudinale Struktur: das Independent Read-Out Board

Aus den im Abschnitt 1.1.3 erwähnten Gründen ist für die Messung der Energie von Hadronen Blei als Absorbermaterial nicht geeignet. Die Verwendung von relativ dicken, großflächigen Edelstahlplatten als Absorbermaterial im hadronischen Kalorimeter läßt allerdings einen dem elektromagnetischen Kalorimeter entsprechenden Aufbau mit auf die Absorberplatten geklebten Hochspannungszuführungen und Auslesekarten nicht zu. Die ohnehin schon deutlich schlechtere Energieauflösung für Hadronen (Abschnitt 1.4) erfordert ein möglichst homogenes elektrisches Feld im flüssigen Argon. Dieses läßt sich mit großen Edelstahlplatten als Elektroden aufgrund deren Unebenheit nicht realisieren. Durch Trennung der Absorber- von der Auslesestruktur durch separate, kleinere Elektrodenflächen mit besser definierten Abständen werden allzu große Inhomogenitäten des elektrischen Feldes vermieden.

Dieses Konzept ist durch das sogenannte *Independent Read-out Board*, die unabhängige Ausleseinheit, verwirklicht worden. Es besteht aus zwei

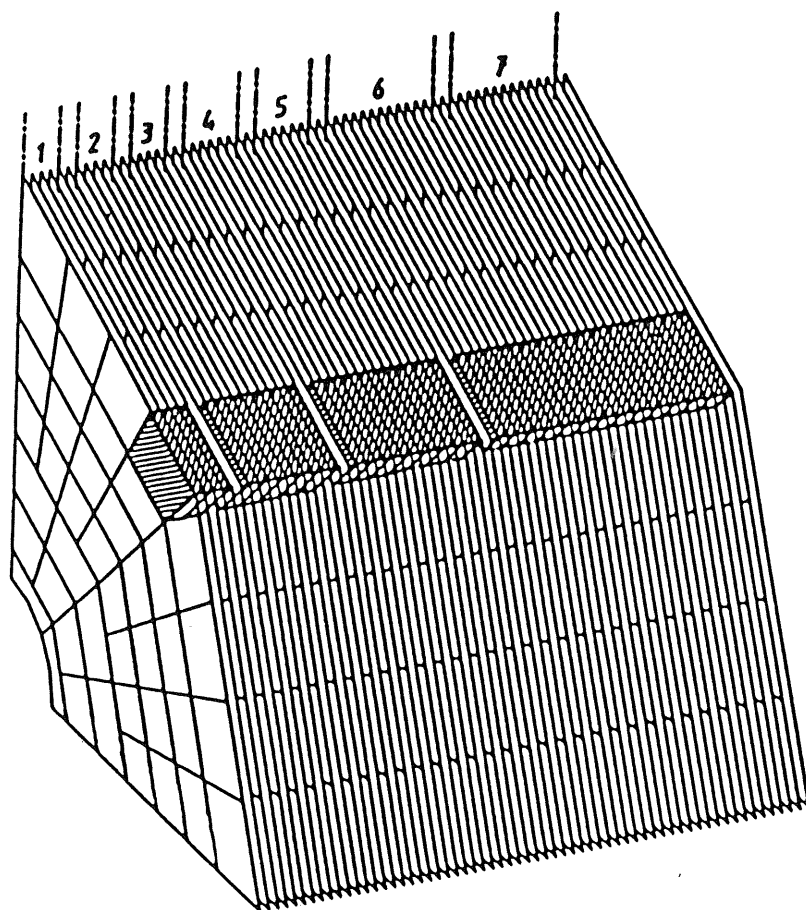


Abbildung 1.6: Das elektromagnetische Viertelstack ohne die erste Hochspannungsplatte. Das Bild zeigt die vier longitudinalen Sektionen (schraffiert) des Triggertowers 3 (vgl. Abb.1.5). Dabei wurde aus Übersichtsgründen das jeweils erste und letzte Argongap einer Sektion nicht mitschraffiert.

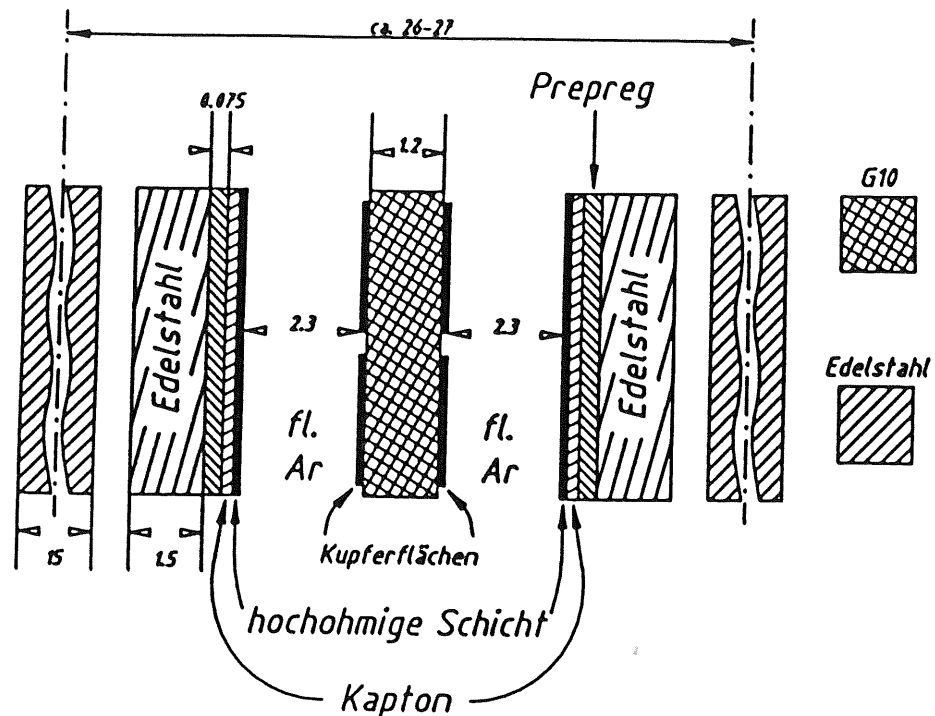


Abbildung 1.7: Longitudinaler Schnitt durch ein Independent Read-Out Board und den Stahlabsorber. Maße in mm.

in einem konstanten Abstand vernieteten etwa 1.5 mm dicken beschichteten Edelstahlplatten, zwischen denen sich eine Auslesekarte befindet. Letztere besteht ähnlich wie eine elektromagnetische Auslesekarte aus einer nun allerdings beidseitig mit einer Padstruktur beklebten G10-Platte.

Der Absorber des hadronischen Viertelstacks besteht aus 35 im Abstand von im Mittel 10.5 mm hintereinander montierten, je 16 mm dicken Edelstahlplatten. Am hinteren Ende des hadronischen Stackes sind noch drei im Querschnitt kleinere Stahlplatten gleicher Dicke und mit gleichem Abstand angebracht. In die Gaps zwischen den Absorberplatten werden jeweils vier Independent Read-out Boards eingeschoben.

Abb.1.7 zeigt einen longitudinalen Schnitt durch ein Absorbergap. Wie schon beim elektromagnetischen Viertelstack bildet auch hier eine hochohmige Schicht die Hochspannungskathode; die Pads auf der Auslesekarte liegen über die an jeden Kanal angeschlossenen Verstärker auf Masse und bilden die die Anode. Die Pads auf der Auslesekarte sammeln also die auf der Vorder- und Rückseite der Karte im Argon freigesetzten Ladungen.

### Transversale Struktur

Die Padstruktur einer Auslesekarte des hadronischen Kalorimeters zeigt das Abb.1.8. Insgesamt gibt es fünf verschiedene Strukturfamilien.

Die Auslesekarte besteht aus einer G10-Platte (ca. 1.2 mm dick) mit aufgeklebten Kupferflächen. Im Gegensatz zum Read-Out Board des elektromagnetischen Kalorimeters sind in diesem Fall beide Seiten der Karte

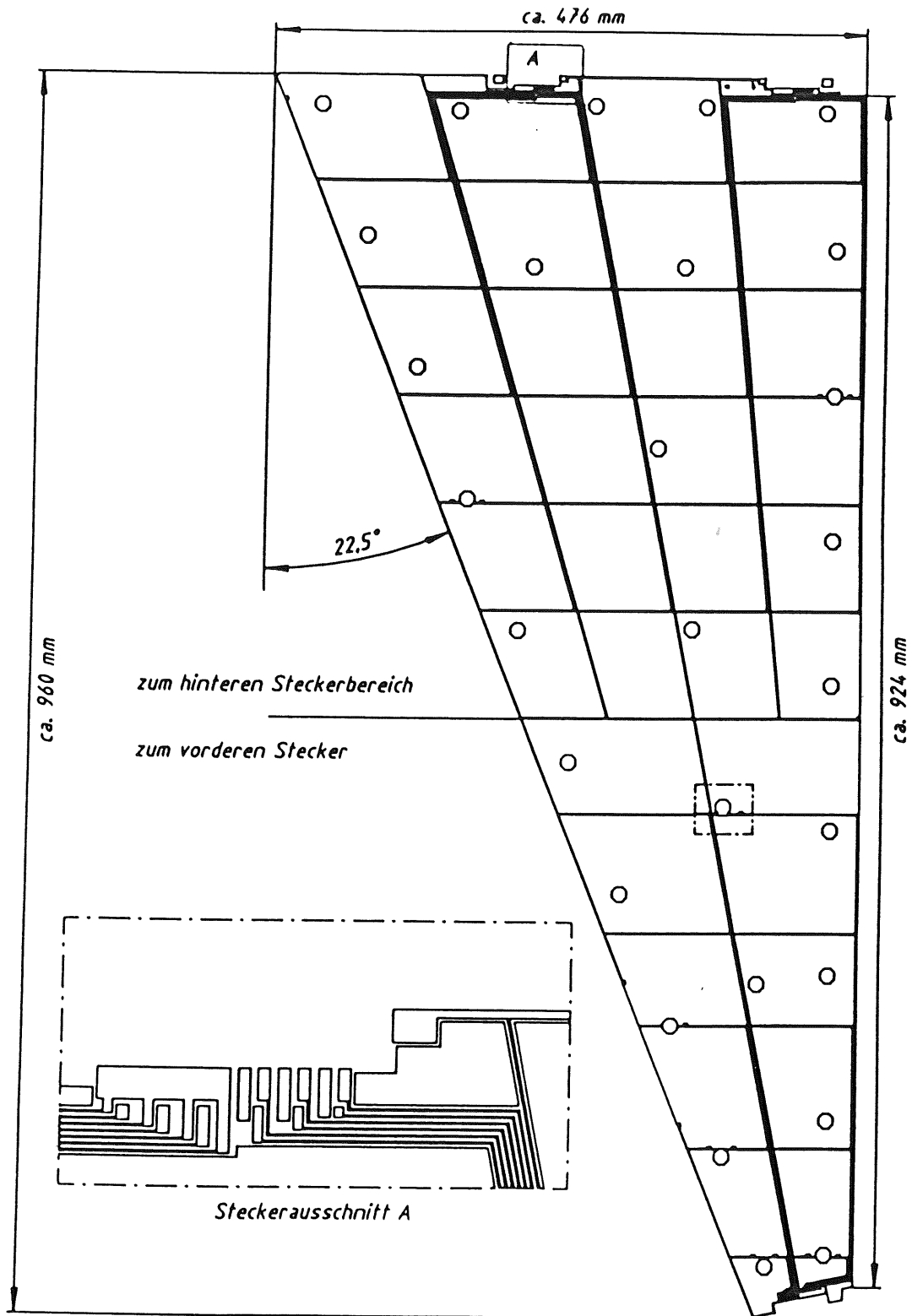


Abbildung 1.8: Eine Auslesekarte des hadronischen Kalorimeters. Die Karten einer Familie sind identisch - es gibt keine Bilder und Spiegelbilder wie beim elektromagnetischen Viertelstack. Ober- und Unterseite einer Karte sind nicht identisch, da die Leitungsführung für die Padreihen zwischen Ober- und Unterseite alterniert.



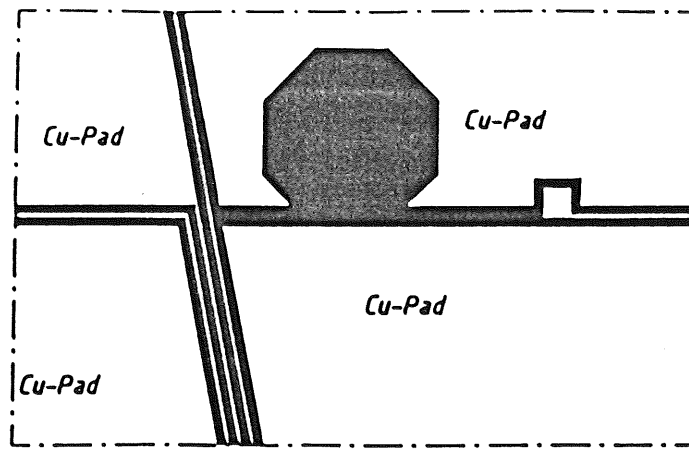


Abbildung 1.9: Durchführung von Signalleitungen zwischen den Pads des hadronischen Boards. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus der Filmvorlage der Karte. Die schwarzen Flächen sind G10-Trägermaterial, die weißen Flächen Kupfer. Die große achteckige Fläche ist bei der Karte durchgebohrt. Das Bild entspricht dem in Abb.1.8 auf der Karte markierten Ausschnitt.

mit einer Auslesestruktur bedruckt. Die beiden sich auf der G10-Folie jeweils gegenüberliegenden Ausleseflächen sind per Durchkontaktierung verbunden.

Die 0.3 mm breiten Ausleseleitungen führen zwischen den Pads durch zu den Steckern. Dabei werden sowohl die Signalleitungen als auch die Pads jeweils durch 0.3 mm breiten Masseleitungen gegeneinander abgeschirmt (Abb.1.9). Der Abstand der Leitungen untereinander und von der Padkante beträgt 0.5 mm.

Die Verteilung der Independent Read-out Boards der fünf Strukturfamilien auf die insgesamt 34 Gaps der Absorberstruktur Tabelle 1.1. Dazu kommen noch drei Gaps mit kleinerem Querschnitt am hinteren, am weitesten vom Wechselwirkungspunkt entfernten Ende des hadronischen Viertelstacks. In diesen befinden sich jeweils vier sogenannte Rucksackboards.

Es gibt fünf Sektionen, in denen hintereinander liegende Pads miteinander verbunden sind. Außerdem werden, wie beim elektromagnetischen Kalorimeter, Gruppen von Pads gemeinsam getriggert.

## 1.3 Signalerzeugung und -verstärkung

### 1.3.1 Hochspannung und Ladungssammlung

#### Die Hochspannungszuführung

In beiden Kalorimetern erfolgt die Zuführung der negativen Hochspannung ( $\sim 2$  kV) zur Erzeugung des elektrischen Feldes im flüssigen Argon durch auf die Kaptonfolie geklebte Kontaktstreifen. Diese sind zusammen mit dem Kapton mit der hochohmigen Schicht bedruckt. Die gesamte Absorberstruktur beider Kalorimeter und die Edelstahlplatten des hadro-

nischen Kalorimeters liegen auf Masse. Somit isolieren die Kaptonfolie und das Prepreg die hochspannungsführende hochohmige Schicht gegen Masse. Zudem bildet die hochohmige Schicht über die Kaptonfolie und das Prepreg eine große Kapazität. Diese ist sehr viel größer als die Detektorkapazität, die die hochohmige Schicht mit den Pads über das Argongap bildet. Dadurch werden sowohl Störungen in der Hochspannung, die zu Inhomogenitäten des elektrischen Feldes im Argon führen und damit die Energieauflösung verschlechtern können, ausgekoppelt, als auch das Überkoppeln eines Signals über das Gap reduziert ([Bu88,Zei88]).

Sowohl die Kaptonfolie als auch das Prepreg müssen eine aufgrund der in ihnen herrschenden großen elektrischen Feldstärke (größenordnungsmäßig  $10 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) eine hohe Durchschlagfestigkeit haben. Dieses bedeutet insbesondere die Vermeidung von Rissen und Löchern im Kapton und von Luftbläschen in der Klebeschicht. Die industriell hergestellten und verklebten Platten und Folien müssen zur Gewährleistung der späteren Betriebssicherheit im Kalorimeter deshalb auf ihr Hochspannungsverhalten hin geprüft werden.

Die hochohmige Schicht begrenzt den Strom über die Hochspannungsplatte und reduziert damit das Überkoppeln. Deswegen darf ihr Widerstand nicht kleiner als etwa  $1\text{-}3 \text{ M}\Omega/\square$  - je nach Kalorimeteraufbau - sein.<sup>5</sup> Andererseits sollte er aber  $30\text{-}100 \text{ M}\Omega/\square$  nicht übersteigen, da ansonsten eine schnelle Ladungssammlung im Argon nicht mehr möglich ist. Aufgrund großer Inhomogenitäten in der per Siebdruck oder per Anstrich auf die Kaptonfolie gebrachten Schicht ist ein Test des Widerstandes für alle Platten obligatorisch.

### Ladungssammlung

Ein Teilchen einer bestimmten Einfallenergie setzt beim Durchgang durch ein Argongap der Breite  $d$   $N$  Elektronen frei. Da die Durchgangszeit des Teilchens sehr viel kleiner ist als die typische Driftzeit der Elektronen im Gap (etwa um einen Faktor  $10^4 - 10^5$ ), ist die Annahme gerechtfertigt, daß zur Zeit  $t = 0$  nach dem Teilchendurchgang die freigesetzten Ladungsträger homogen über das Gap verteilt sind. Da das elektrische Feld im Kalorimeter in sehr guter Näherung homogen ist, ist der durch die Sammlung der Elektronen an der Anode bedingte Strom  $I(t)$  zur Zeit  $t$  nach dem Teilchendurchgang gegeben durch [Wi74]:

$$I(t) = Ne \cdot \frac{v_d}{d} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right). \quad (1.5)$$

$v_d$  ist die annähernd konstante Driftgeschwindigkeit der Elektronen. Die zur Zeit  $t$  gesammelte Ladungsmenge ist dann:

$$Q(t) = \int_0^t I dt = Ne \cdot \left(\frac{t}{t_d} - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_d}\right)^2\right)$$

<sup>5</sup>zur Einheit siehe Seite 37

Nach  $t = t_d$  ist die Ladungssammlung beendet. Die zu messende Ladungsmenge ist:

$$Q(t_d) = \frac{1}{2} Ne \quad (1.6)$$

Das bedeutet, daß im Mittel die Hälfte der erzeugten Ladungsmenge  $Ne$  an der Anode zu messen ist. Daraus ergibt sich eine minimale Energie, ab der ein Teilchen im Kalorimeter überhaupt erst nachweisbar wird. Zur Erzeugung eines Ionenpaares im Argon ist eine Energie von  $E_{ion} = 23.6 \text{ eV}$  nötig. Demnach müssen Primärteilchen eine mittlere Energie  $E = 47.2 \text{ eV}$  haben, um gewissermaßen "sichtbar" zu werden. Da aber im Argon nur  $\sim 10\%$  der Einfallenergie deponiert werden, wird im Mittel pro  $528 \text{ eV}$  Teilchenenergie eine Ladung von  $1 \cdot e$  gemessen. Damit ergibt sich die pro  $\text{GeV}$  Teilchenenergie zu messende mittlere Ladungsmenge zu etwa  $300 \times 10^{-15} \text{ C}$  oder  $300 \text{ fC}$ . [Wi74, Zei88]

Die zu messende Ladungsmenge wird weiter durch Atomrekombinationen ( $Ar^+ + e^- \rightarrow Ar$ ) und durch Elektroneneinfang durch elektronegative Verunreinigungen, insbesondere Sauerstoff, verringert. Da diese Effekte feldstärkeabhängig sind, ist auch die sichtbare Ladung  $q$  abhängig von der elektrischen Feldstärke  $\mathcal{E}$ . Diese Abhängigkeit wird durch eine Hochspannungskurve  $q(\mathcal{E})$  dargestellt. Für große Feldstärken zeigt diese Kurve ein Plateau mit  $q(\mathcal{E}) = Q(t_d)$ .

### 1.3.2 Signalverstärkung

Die in einem Auslesesegment gesammelte Ladung wird über einen ladungsempfindlichen Verstärker ausgelesen. In einem dem Verstärker nachgeschalteten Analog-Digital-Wandler wird das Verstärkersignal mittels eines geeigneten Triggers über eine bestimmte Zeit (das sogenannte Gate) integriert ([Zei88, Bu88]). Der der Integrationsfläche und damit der gemessenen Ladung proportionale digitale Wert wird per Computer ausgelesen und auf einem Massenspeicher zur späteren Analyse abgelegt.

Im H1-Kalorimeter werden immer die die Kanäle eines der bereits erwähnten Tower gemeinsam getriggert. Für eine stabile Gatelage und damit zur Vermeidung von Interkalibrationsfehlern ist es wichtig, daß die Padkapazitäten  $C_d^i$  innerhalb des Triggertowers möglichst konstant sind (die Gatelage hängt von der Zeitkonstanten  $R_i C_d^i$  ab, wobei  $R_i$  der Verstärkerinnenwiderstand ist). Deswegen sollen die Flächeninhalte dieser Pads um nicht mehr als 5-10 Prozent voneinander abweichen. Diese Überlegungen bestimmen neben der Reaktionskinematik die Auslesestrukturen des Kalorimeters.

## 1.4 Energieauflösung

### 1.4.1 Energieauflösung elektromagnetischer Kalorimeter

Quantitativ findet man für Elektronen in Blei-Flüssig-Argon-Kalorimetern eine typische Energieauflösung von  $\sigma(E)/E = 10\%/\sqrt{E}$  (z.B. in [H187]). Sie ist hauptsächlich durch drei Terme bestimmt:[En84,En85]

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)^2 = \left(\frac{A}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{B}{E}\right)^2 + C^2 \quad (1.7)$$

$E$  ist die Anfangsenergie des Teilchens und  $A$ ,  $B$  und  $C$  sind bestimmt durch:

- $A/\sqrt{E}$  ist die sogenannte Sampling-Fluktuation. Diese beschreibt die Schwankungen des im Argon deponierten Energieanteils.
- Der Term  $B/E$  beinhaltet die Einflüsse der Ausleseelektronik, insbesondere das elektronische Rauschen, sowie Einflüsse durch Materialien vor dem eigentlichen Kalorimeter.
- Der konstante Term  $C$  ist der sogenannte Interkalibrationsfehler und umfaßt alle durch falsche Kalibration, durch Ausfälle oder Kurzschlüsse von Pads oder sonstige Inhomogenitäten im Aufbau bedingten Effekte.

Zusätzlich wird die Energieauflösung durch den nicht im Kalorimeter deponierten Energieanteil (longitudinal und transversal aus dem Kalorimetervolumen heraustretende Teilchen) verschlechtert. Der transversale Anteil des sogenannten *Leakage* an der Energieauflösung spielt normalerweise nur eine geringe Rolle, während der longitudinale Anteil proportional zu  $\ln E$  ansteigt.[En85]

Für hohe Teilchenenergien wird der Term  $C$  für die Energieauflösung dominierend. Deswegen ist beim Bau des Kalorimeters auf eine möglichst homogene Gapbreite (Ortsunabhängigkeit der Energiemessung) zu achten. Außerdem müssen möglichst alle eingebauten Auslesekarten fehlerfrei sein. Schon aus diesem Grund ist eine Überprüfung der Karten - besonders auch nach deren Klebung auf eine Bleiplatte oder deren Einbau in ein Independent Read-Out Board - wichtig.

### 1.4.2 Energieauflösung hadronischer Kalorimeter

In diesem Fall finden sich typische Auflösungen von  $\sigma(E)/E = 50\%/\sqrt{E}$  ([Fa85,H187]). Die deutlich schlechtere Auflösung für durch Hadronen ausgelöste Schauer - im Gegensatz zu den Elektron-Photon-Schauern - liegt in dem charakteristischen Verhalten der auftretenden Reaktionsprodukte, insbesondere der geladenen und ungeladenen Pionen begründet. Bei hohen Einfallenergien sind die Schwankungen in der  $\pi^0/\pi^\pm$ -Produktionsrate

aufgrund der unterschiedlichen Ansprachen beider Teilchen entscheidend für die Energieauflösung - ungeladene Pionen erzeugen in hadronischen Kalorimetern des hier vorgestellten Typs durch die sekundär induzierten elektromagnetischen Schauer ein größeres Signal als die geladenen Pionen. Ein weiterer wichtiger Effekt sind die Schwankungen im durch Aufbrechen von Kernen entstandenen Energieverlust. Einen kleineren Anteil an der Energieauflösung haben zerfallende Pionen und Myonen. Da die entstehenden Neutrinos mit nur geringer Wahrscheinlichkeit im Kalorimeter nachgewiesen werden können, entweicht ein ihrer Zahl proportionaler Energieanteil unerkannt aus dem Kalorimeter. Meistens wechselwirken die Pionen aber innerhalb ihrer Lebensdauer wieder mit den Kernnukleonen der Materie. Tabelle 1.2 zeigt die wichtigsten Einflüsse einzelner Reaktionswege an der Energieauflösung.

Reaktion	Einfluß auf die Energieauflösung
Hadronen Produktion	$\pi^0/\pi^+$ -Rate, Bindungsenergieverluste
Nukleare Rekombinationen	Bindungsenergieverluste, geringe oder uneinheitliche Ansprache auf Neutronen
$\pi^-$ und $\mu^-$ -Zerfälle	$\nu^-$ -Verluste
Zerfall von schwereren Teilchen in hochenergetischen Schauern	$\nu^-$ -Verluste

Tabelle 1.2: *Qualitative Verteilung der Anteile verschiedener Reaktionskanäle auf die Energieauflösung in hadronischen Kalorimetern (nach [Fa85]).*

# Kapitel 2

## Messungen zur Bauteilkontrolle

### 2.1 Allgemeines

Die einzelnen Bauteile beider Eichkalorimeterteile werden einer Reihe von elektrischen und mechanischen Tests unterzogen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Messungen beschrieben, deren Durchführung computergesteuert erfolgt (einen Überblick liefert Tabelle 2.1 und Abb.2.1). Das sind im Einzelnen:

- Kontrolle der elektrischen Verbindung zwischen den Pads und den jeweils dazugehörigen Steckerkontakten auf den elektromagnetischen Auslesekarten (Durchgangstest).
- Überprüfung auf Kurzschlüsse zwischen den Pads, den Signalleitungen und zwischen Signal- und Massekontakten dieser Karten (Kurzschlußtests).
- Kombination der beiden obigen Tests für die geklebten Ausleseplatten des elektromagnetischen Kalorimeterteils. Zudem müssen die Platten auf Kurzschlüsse zwischen dem Blei und den Pads untersucht werden.

Prinzipiell sind die oben beschriebenen Tests auch für die Ausseeelemente des hadronischen Kalorimeterteils obligatorisch; leider standen aber bis zur Vorlage dieser Arbeit diese nicht oder in nicht testbarer Form zur Verfügung.

Zusätzlich werden Möglichkeiten zur Messung des Widerstandwertes der hochohmigen Schicht auf den Hochspannungsplatten beider Kalorimeterteile (beklebte Edelstahl- oder Bleiplatten) und ein Kühltest für ein hadronisches Absorbermodell besprochen.

### 2.2 Computergesteuertes Messen

An dieser Stelle werden kurz die allgemeinen Aspekte der Datennahme, der Datenverarbeitung und die zur Verfügung stehenden Meßgeräte vorge-

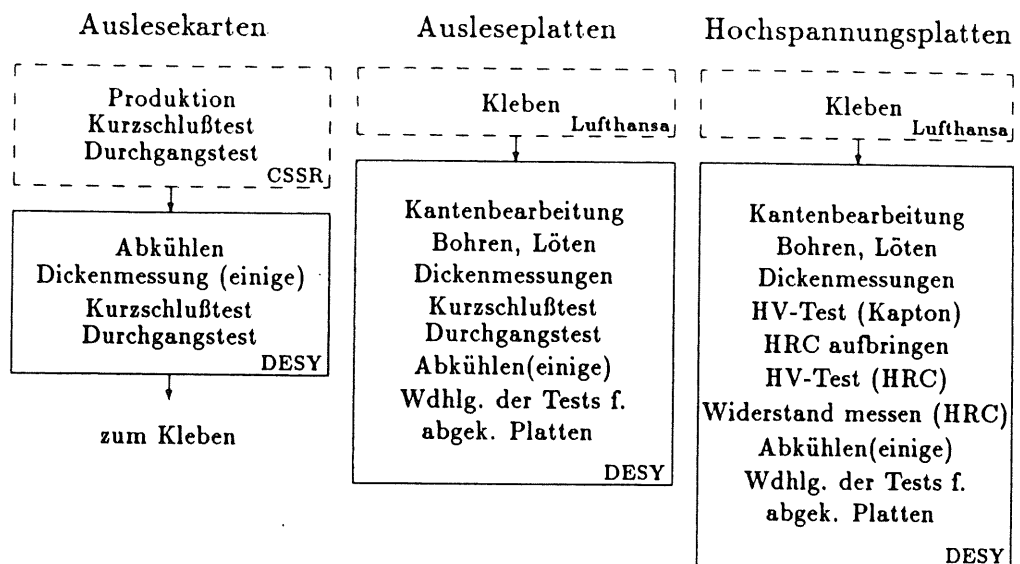


Abbildung 2.1: *Produktion und Test von Bauteilen des elektromagnetischen Prototypen. Reparaturen von bei Tests festgestellten Fehlern werden sofort durchgeführt; Ausschuß ist nur bei den Karten vorgesehen (HRC ist das High Resistive Coating, die hochohmige Schicht).*

stellt. Eine genauere Beschreibung insbesondere der Programmstrukturen erfolgt, soweit sinnvoll, jeweils bei der Diskussion der Meßverfahren im Einzelnen.

### 2.2.1 Technische Ausstattung

Das zentrale Element der Steuerung und des Auslesens von Meßgeräten ist in unserer Anwendung ein IBM PC/AT Personal Computer. Er ist über eine Datentransfer- und Kontrolleitung (den IEEE488-Bus) mit den jeweils benötigten Meßgeräten verbunden. Außerdem besteht eine Datentransferleitung zwischen dem PC/AT und dem Großcomputer des Rechenzentrums (siehe dazu auch Abb.2.2).

Der IEEE488-Bus hat acht Daten- und acht Kontrolleitungen. Erstere dienen zur (bitparallelen) Übertragung von Steuersequenzen und Meßdaten; letztere kontrollieren die Kommunikation zwischen dem Rechner und den einzelnen Geräten. Dazu gehören insbesondere die Überprüfungen auf Fehlermeldungen und auf Ende der Datennahme.

Es stehen zwei digitale Vielfachmeßinstrumente (Philips PM2528 und Keithley 197) zur Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessung mit individuell unterschiedlicher Auflösung und Meßzeit sowie das Hewlett Packard 4276A zur Messung von Kapazitäten, Induktivitäten und Impedanzen zur Verfügung. Alle oben genannten Instrumente liefern direkt auslesbare digitalisierte Meßwerte.

Desweiteren verfügen wir über ein Paket von 120 computersteuerbaren Relais (einen sogenannten Scanner) der Firma Philips. Dieser kann in verschiedenen Moden wahlweise 60 oder 120 Kanäle schalten. In unserer Anwendung dient er z.B. zur Ansteuerung eines bestimmten Kanals auf

IF1E	Durchgangstests	Kurzschlußtests	Hochspannungstests	Widerstandstests	Dimensionen
Auslesekarten	$R$	$I$	$I$	-	$d$
Hochspannungsplatten	-	-	$I$	$R_{\square}$	$d$
geklebte Ausleseplatten	$C$	$C$	-	-	$d$
IF2H					
Auslesekarten	$C, R$	$C, I$	$I$	-	$d$
beklebte Edelstahlplatten	-	-	$I$	$R_{\square}$	$d$
Unabhängige Auslese-einheiten	$C, R$	$C, I$	$I$	-	$g$

Tabelle 2.1: Übersicht über die wichtigsten zu messenden Größen.  $d$  ist die Plattendicke,  $g$  die Gapbreite; die Messung der  $\square$ Größen wird in dieser Arbeit diskutiert.

einer Auslesekarte.

## 2.2.2 Aufgaben des Meßprogramms

Sämtliche zum Messen benötigte Software ist im Fortran 77 Code erstellt. Das Ansprechen der Steuer- und Transferleitungen erfolgt über spezielle Routinen, die direkt als Unterprogramme aufgerufen werden können. In der folgende Liste sind die allgemeinen Aufgaben des Meßprogramms zusammengefaßt:

- I. Steuerung und Kontrolle der angeschlossenen Meßgeräte.
- II. Daten einlesen und abspeichern. Hierzu gehört auch die Zuordnung der Topologie des Testobjekts - z.B. die Padstruktur auf den Auslesekarten - zu den entsprechenden (physikalischen) Kanälen.
- III. Plausibilitätskontrolle von eingegangenen Daten zur schnellen Meldung von Fehlern am Testobjekt; insbesondere Protokollierung dieser (Statusverwaltung).



IV. Die Zahl der durch manuelle Bedienung möglichen Fehler zu minimalisieren.

Besonders der letzte Punkt hat sich als wichtig erwiesen, da die Zahl der Fehlermöglichkeiten schon im Aufbau relativ hoch ist. Zusätzlich sind auch bei der Datennahme selbst eine Reihe von Bedienungsfehlern möglich, die an entsprechender Stelle noch besprochen werden.

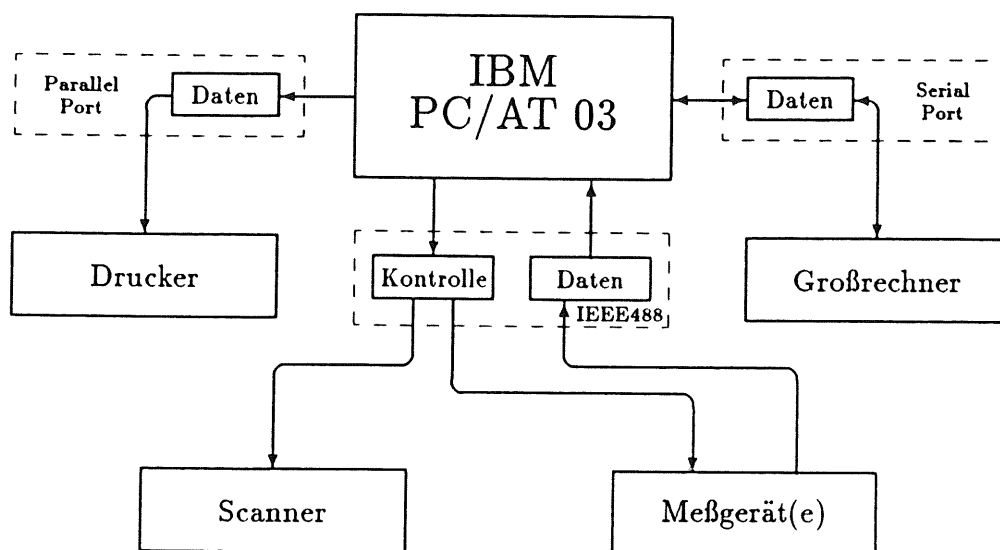


Abbildung 2.2: Installation des IBM PC/AT03 zur Datennahme. Die serielle Schnittstelle dient zum Transfer von Daten zum Großrechner, die parallele Schnittstelle (Centronics) treibt den Drucker.

### 2.2.3 Generelle Struktur der Meßroutinen

Die Struktur der Meßroutinen ist für alle vorgestellten Anwendungen sehr ähnlich. Nach Identifizierung des jeweiligen Testobjekts (im Regelfall durch manuelle Eingabe einer Nummer) initialisiert das Programm den IEEE488-Bus und kontrolliert dabei gleich die benötigten Geräte hinsichtlich ihres Netz- und Busanschlusses. Im Falle eines Fehlers - z.B. wenn ein angesprochenes Gerät nicht eingeschaltet ist - erfolgt eine entsprechende Meldung und man hat die Möglichkeit, die Störung zu beseitigen.

Danach beginnt die eigentliche Messung mit der Erstellung der jeweils notwendigen Schaltsituation. Dazu wird ein Triggersignal auf den Bus geschrieben (Softwaretrigger). Dieses initialisiert den gewünschten Schaltvorgang im Scanner. Nach Realisierung der Schaltung erfolgt ein weiteres Triggersignal an das Meßgerät (auch mehrere gleichzeitig oder hintereinander, je nach Anwendung) und es wird der Meßwert aufgenommen und geräteintern digitalisiert. Der digitalisierte Wert wird schließlich vom Rechner ausgelesen und auf einer Festplatte in einer an der Objektgeometrie orientierten Datenstruktur gespeichert.

## Synchronisation

Das Zusammenwirken von Scanner und einem oder mehreren Meßgeräten erfordert eine sorgfältige Synchronisation, um Schaltfehler zu vermeiden. Dazu werden entweder die Kontrolleitungen des Buses oder, wie im Falle des Scanners, spezielle Abfragen der Datenleitungen benutzt.

Nach Senden eines Triggersignals an ein bestimmtes Gerät fragt der PC solange den Status des Buses ab, bis ein geräteabhängiger Arbeitsende-Code gefunden wird. Selbstverständlich wird innerhalb dieser Abfrage auch nach Fehlermeldungen - ebenfalls durch geräteabhängige Codes bestimmt - gesucht und gegebenenfalls eine Fehlerbehandlung soweit vom Programm her möglich eingeleitet.

Das Finden eines Ende-Codes nach Ansprache des Scanners bedeutet, daß dieser die Schaltung hergestellt hat. Dazu benötigt er  $\sim 40$  ms (im Regelfall Öffnen und Schließen zweier Relais). Danach erfolgt ein Triggersignal z.B. an ein Meßgerät. Die Zeit, die die Meßgeräte benötigen, um einen Wert aufzunehmen und zu digitalisieren, ist abhängig von der Art der Messung ( $U$ ,  $I$ ,  $C$ ,  $R$ ), von dem gewählten Meßbereich und der gewählten Auflösung und liegt typischerweise zwischen 50 ms und 1 s. Ist die Messung beendet, kann ein neuer Schaltzustand hergestellt werden (siehe auch Abb.2.3).

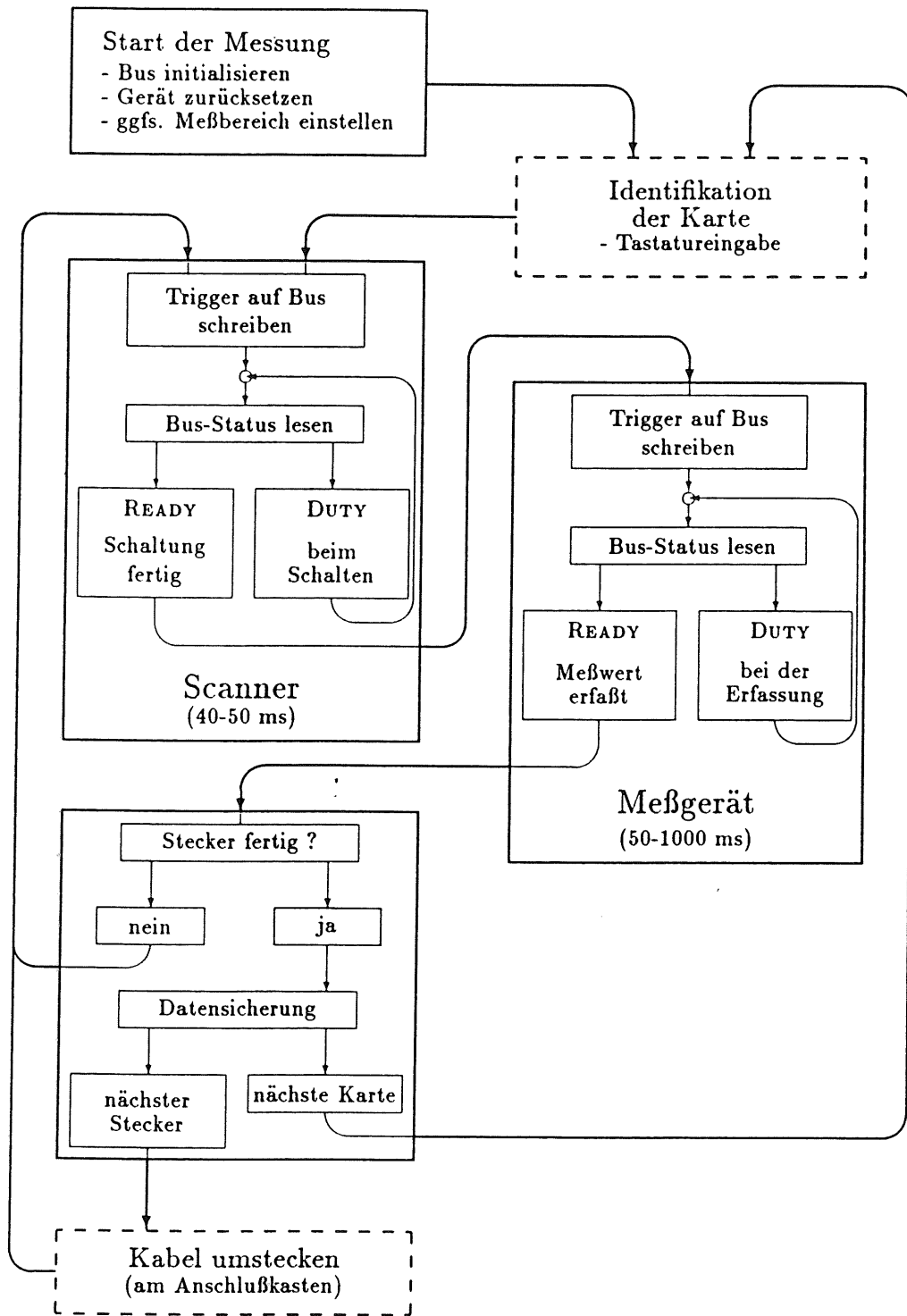


Abbildung 2.3: Ablauf einer Meßroutine

# Kapitel 3

## Tests von einzelnen Kalorimeterbauteilen

Eine Reihe von mechanischen und elektrischen Tests an Blei- oder Stahlplatten in den verschiedenen Bearbeitungsstufen und an den Auslesekarten sind notwendig. Zu den ersteren gehören Dickenmessungen an allen die Breite des Argongaps bestimmenden Bauteilen (Hochspannungs- und Ausleseplatten im elektromagnetischen Kalorimeter, Auslesekarten im hadronischen Kalorimeter). Zu den elektrischen Tests gehören außer den im Folgenden besprochenen Messungen insbesondere noch Hochspannungstests an den kaptonbeschichteten und mit der hochohmigen Schicht versehenen Blei- oder Stahlplatten (Leckströme zwischen der hochohmigen Schicht und der jeweiligen Metallplatte, Durchschlagsfestigkeit der Kaptonfolie). Desweiteren werden Auslesekarten einem Hochspannungstest unterzogen indem zwischen einem Pad und allen direkten oder indirekten (durch die Leitungsführung) Nachbarpads eine Spannung zwischen etwa 800 V und 1000 V angelegt wird und auf einen maximal zulässigen Strom ( $\sim 1 \mu\text{A}$ ) mittels eines akustischen Signals getestet wird. Auf diese Weise können neben hochohmigen Kurzschlüssen auch lose Kupferfäden an den Kanten der Leitungsstege gefunden werden (Funkenbildung).

### 3.1 Auslesekarten des elektromagnetischen Kalorimeterteils

Mit dem im Nachfolgenden beschriebenen Verfahren können sowohl nieder- als auch hochohmige Kurzschlüsse zwischen einzelnen Signalleitungen und/oder Massekontakten auf elektromagnetischen Auslesekarten gefunden werden. Außerdem kann die elektrische Verbindung zwischen Steckerkontakt und dem zugehörigen Pad getestet werden.

Die Auslesekarten sind vom Hersteller bereits auf Kurzschlüsse und Leitungsunterbrechungen hin untersucht worden. Sie werden nach ihrer Anlieferung zunächst in flüssigem Stickstoff bei etwa  $-196^\circ \text{C}$  abgekühlt. Danach erfolgen dann Kurzschluß- und Durchgangstests. Damit können die Karten gleichzeitig auf Transportschäden und Schäden durch die Ab-

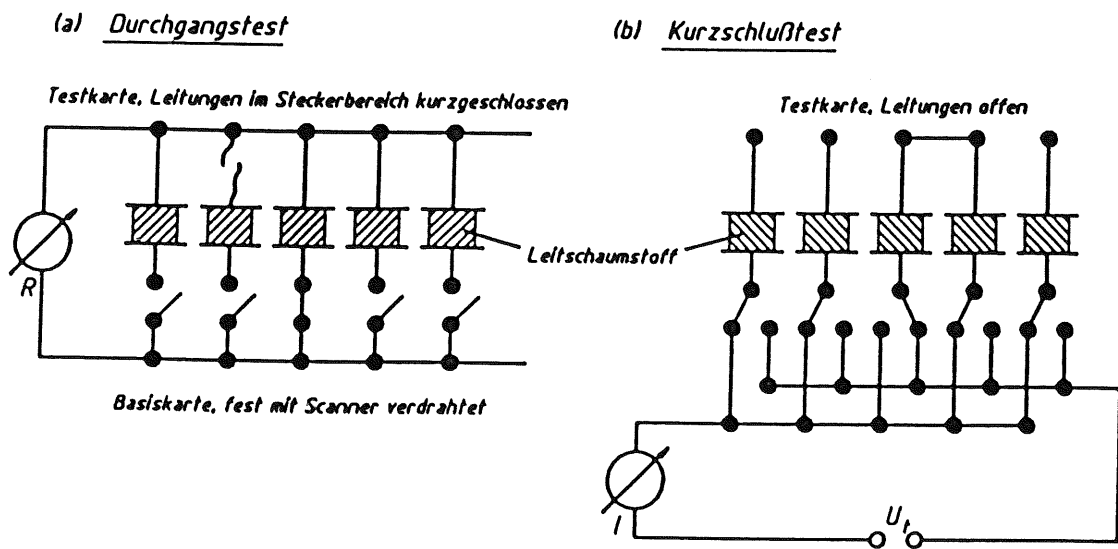


Abbildung 3.1: Der Testaufbau zum Durchgangs- und Kurzschlußtest von elektromagnetischen Auslesekarten. Die beiden Schaltbilder zeigen die Scannerschaltung für die beiden Kartentests. In beiden Bildern ist jeweils ein typischer Fehler eingetragen (Leitungsbruch bzw. Kurzschluß). Beim Kurzschlußtest sind die Spannungszufuhr und die Strommessung vereinfacht dargestellt. Abb.3.2 zeigt diesen Teil genauer.

kühlung untersucht werden.

Der Aufbau der Testmessungen ist für beide Kriterien sehr ähnlich. Vorversuche haben gezeigt, daß das größte Problem beim Testen individueller Kanäle (unter automatischer Kontrolle) das Anbringen eines Steckers an der zu testenden Karte ist, der nach dem Test problemlos wieder entfernt werden kann. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, ist die Benutzung einer speziellen Karte mit festen Zuleitungen. Auf dieser als Referenz dienenden, intakten Karte sind auf jedem Pad kleine Zylinderscheiben aus elektrisch leitendem Schaumstoff befestigt. Durch Auflegen und Andrücken der entsprechenden gespiegelten Karte, also des eigentlichen Testobjekts, wird bei Schaltung eines bestimmten festen Kanals auf der Referenzkarte ein elektrischer Kontakt zu dem entsprechende Pad auf dem Testobjekt hergestellt (siehe dazu auch Abb.3.1).

Ihre große Anzahl auf der elektromagnetischen Auslekarte macht es unmöglich, alle Kanäle in einem Durchgang abzufragen. Es ist möglich, in dem angewendeten Scannermodus 60 Kanäle zu schalten. In Anlehnung an die Organisation der maximal 168 Kartenkanäle zu einem 50- und vier 40-poligen Steckern wird immer über einen dieser Stecker geschaltet. Dann erfolgt ein manueller Kabelwechsel zu einem der anderen Stecker. Der Ablauf wird vom Rechner vorgegeben.

### 3.1.1 Durchgangstests

Zur Durchführung des Durchgangstests werden die Steckerkontakte der zu testenden Karte mittels eines schmalen Streifens aus leitendem Schaumstoff auf der Padseite der Karte (Oberseite) kurzgeschlossen (Abb.3.1). Schaltet man nun einen Kanal, so ist bei vorhandenen Durchkontaktierungen und durchgehenden Leitungsstegen der zu messende Ohmsche Widerstand zwischen dem geschalteten Kanal und allen anderen durch den Widerstand des leitenden Schaumstoffs (einige  $k\Omega$ , typischerweise) bestimmt. Er wird mittels eines auslesbaren Ohmmeters gemessen. Sollte ein ungewöhnlich hoher Wert auftreten oder das Meßgerät einen OVERFLOW melden, bringt der Computer eine Warnung und die Karte muß einer genaueren Prüfung unterzogen werden.

Die Struktur des Meßprogramms entspricht in der Meßwerterfassung der bereits beschriebenen; daneben wird eine Statusdatei verwaltet, in der Zeitpunkt und Art der Messung festgehalten werden. Außerdem wird das Bild der Belegung der Kontakte des gerade aktuellen Steckers auf den Monitor des PC's gebracht und eventuelle Fehler werden sofort markiert. Wiederholungsmessungen beliebiger Stecker einer Karte sind ebenfalls möglich.

### 3.1.2 Kurzschlußtests

Da beim Durchgangstest Kurzschlüsse nicht zu finden sind, wird ein spezieller Test mit sehr ähnlichem Aufbau zusätzlich durchgeführt. Nach Anlegen einer im Hinblick auf die Betriebssicherheit der benutzten Geräte

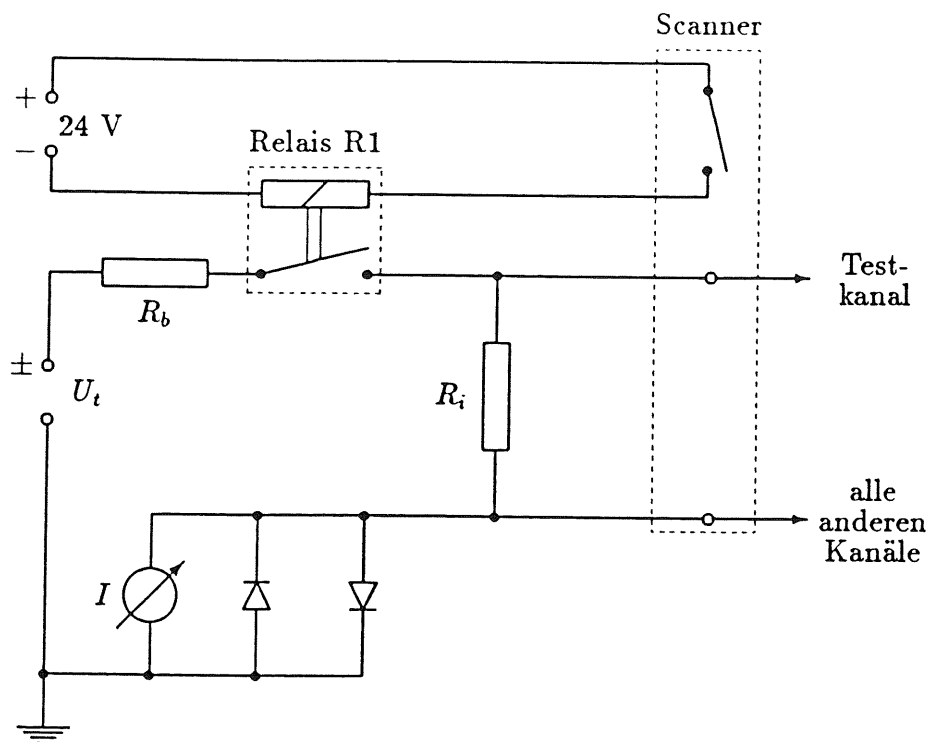


Abbildung 3.2: Schaltung zum Kurzschlußtest.

Die zum Strommeßinstrument parallel geschalteten Dioden schützen dieses vor Überstrom (unabhängig von der Polarität von  $U_i$ ).

maximal zulässigen Spannung von 150 V zwischen dem zu testenden Pad und allen anderen wird der Strom gemessen. Die Steckerleisten des Testobjekts dürfen also nicht mehr kurzgeschlossen sein.

Da der Scanner normalerweise nur 30 V schalten darf, wird die in Abb.3.2 gezeigte Schaltung realisiert. Das Relais R1 schließt erst, wenn der Scanner einen neuen Testkanal angeschaltet hat. Es wird über einen Scannerkanal ferngesteuert. Auf diese Weise wird vermieden, daß irgend eines der Miniaturrelais im Scanner die 150 V direkt schaltet. Der Vorwiderstand  $R_b$  begrenzt den Kurzschlußstrom auf 3 mA; dieser ist damit mit der zulässigen Höchstleistung des Scanners von 10 W verträglich.

Wenn es keinen Kurzschluß zwischen dem angesprochenen Pad und irgendeinem anderen oder einem Massekontakt gibt, wird der bei einer festen Spannung  $U_i$  zu messende Strom  $I$  durch den Widerstand der offenen Kontakte in den Miniaturrelais des Scanners ( $R_i$ ) bestimmt. Dieser ist in der Größenordnung von  $\geq 10^9 \Omega$ . Bei  $U_i = 150 \text{ V}$  ergibt sich ein zu erwartender Leckstrom von maximal ca.  $0.15 \mu\text{A}$  (mit dem Philips Meßgerät sind Ströme von 0.1 nA auflösbar). Abb.3.3 zeigt das typische Stromverhalten nach Einschalten von  $U_i$  über das Relais. Die in Abb.3.3.a angepaßten Kurven werden durch die Funktion  $I(t) = I_0 + I_C \cdot e^{-t/RC}$  beschrieben.  $I_0$  ist dabei der konstante Offsetstrom (bestimmt durch die Eigenschaften der individuellen Scannerkanäle) und  $I_C$  der maximale Ladestrom der Kabelkapazitäten. Deutlich ist zu sehen, daß in der Regel der Leckstrom nicht mehr als 10 nA beträgt. Der kurz nach dem Einschal-

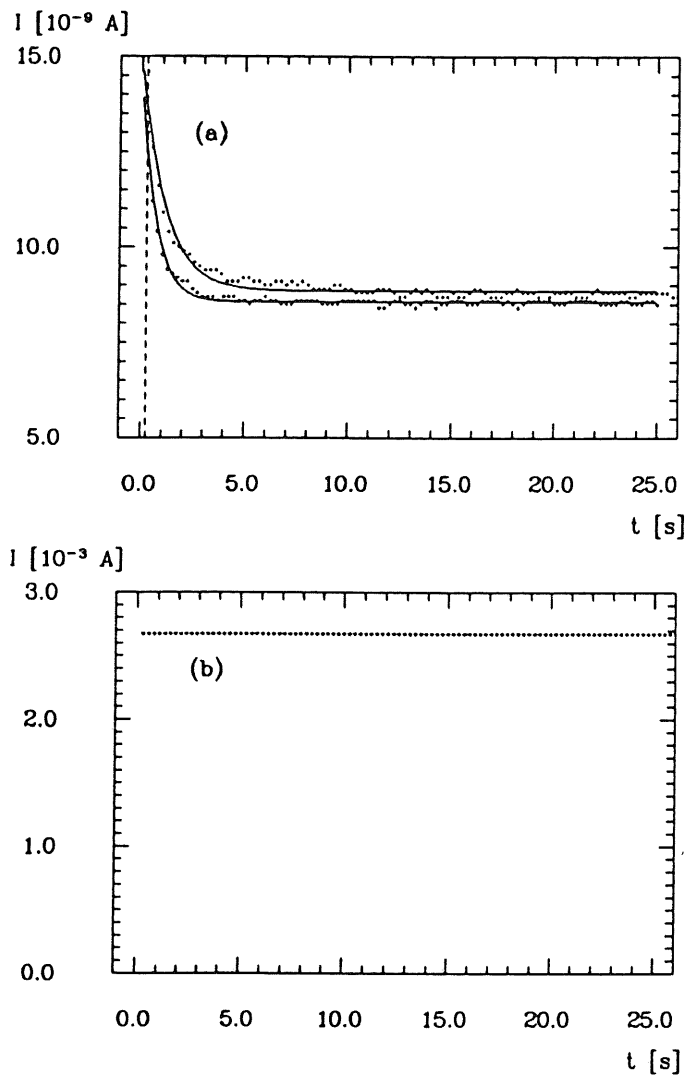


Abbildung 3.3: Stromverhalten normal (a) und bei Kurzschluß (b).  $t$  ist die nach Einschalten von  $U_i$  vergangene Zeit. In (a) sind die Daten zwei verschiedener Kabel dargestellt: Die Kurve mit der längeren Abklingzeit korrespondiert mit den Werten einer Leitung aus der Mitte eines Flachbandkabels (maximale Kapazität); die untere Kurve zeigt das Stromverhalten einer Leitung an der Kabelkante (minimale Kapazität).



ten hohe Strom liegt in der Kabelkapazität begründet. Das  $RC$ -Glied der kompletten Anordnung bestimmt sein Abklingen.

Das Auftreten eines Kurzschlusses ist gekennzeichnet durch:

- **Niederohmige Kurzschlüsse:** Der gemessene Strom ist in der Größenordnung des maximalen Kurzschlußstroms ( $10^{-3}$  A). Dieser Strom ist nicht zeitabhängig ( $\ll 1\%$  kurz nach dem Anschalten von  $U_t$ , siehe Abb.3.3).
- **Hochohmige Kurzschlüsse:** In diesem Fall ist der zeitliche Stromverlauf zu beachten. Eine zu frühe Messung kann einen hochohmigen Kurzschluß vortäuschen. Deswegen sollte die Messung möglichst erst im Stromplateau ( $t > 5 - 6$  s) vorgenommen werden. Wir haben einen Kompromiß ( $250 \mu\text{s}$ ) als Wartezeit gewählt, um die Gesamtmeßdauer nicht zu lang werden zu lassen (die gestrichelte senkrechte Linie in Abb.3.3.a markiert den Meßzeitpunkt).

### 3.1.3 Ergebnisse und Probleme

Das Ergebnis beider Tests für die Auslesearten beschränkt sich auf eine rein statistische Betrachtung, da die Tests nur eine "defekt/nicht defekt"-Entscheidung zulassen. Einzig kritisch sind hochohmige Kurzschlüsse, die aber bei den Karten nicht gefunden wurden. Sie treten erst bei den Auslesepunkten auf. Am häufigsten sind bei den insgesamt 320 gelieferten Karten Funkenstrecken mit dem eingangs kurz beschriebenen Hochspannungstest gesehen worden; Leitungsbrüche kamen in nur vier Fällen vor. Die Tabelle 3.1 zeigt eine Statistik der aufgetretenen Fehler für alle getesteten Karten.

Kurzschluß pro Karte	Kurzschluß zwischen		
	2 Pads	3 Pads	Pad-Masse
1	25 (7.8 %)	4 (1.25 %)	5 (1.6 %)
2	5 (1.6 %)	–	–
3	2 (0.6 %)	–	–
7	1 (0.3 %)	–	–

Tabelle 3.1: Statistik der Kartentests. In der linken Spalte ist die Zahl der pro Karte aufgetretenen Kurzschlüsse angegeben, die rechten Spalten geben die Zahl der kurzgeschlossenen Kanäle an. Die Prozentangaben sind auf die Gesamtzahl von 320 getesteten Karten bezogen.

Als problematisch bei der Durchführung der Tests erweisen sich alle elektrischen Verbindungen über den Leitschaumstoff. Besonders wird durch Anbringen des Kurzschlußstreifens über den Steckerleisten des Testobjekts beim Durchgangstest kein gleichmäßig guter Kontakt über alle Lötunkte erreicht. In der Regel gibt es dadurch um einen Faktor 5 bis 10 mehr Fehlermeldungen, als Fehler wirklich auftreten. Dadurch wiederum nimmt die zum Testen benötigte Zeit in einem nicht mehr akzeptablen Maß zu.

Eine Verbesserung kann die Verwendung weicheren Leitschaumstoffs erbringen; außerdem wird zur Zeit die Möglichkeit überprüft, durch federnde metallische Kontaktstifte einen direkten Kontakt zur zu testenden Karte herzustellen.

### 3.2 Messung des elektrischen Widerstandes einer hochohmigen Schicht

Eine besondere Problematik ist das Messen des Widerstands der hochohmigen Schicht. Er wird bezüglich einer Testfläche  $\square$  definiert und sollte für die elektromagnetischen Hochspannungsplatten nicht kleiner als  $3 \text{ M}\Omega/\square$ , aber auch nicht größer als  $30 \text{ M}\Omega/\square$  sein. Interessant sind die Schwankungen des absoluten Wertes über die gesamte Oberfläche einer Hochspannungsplatte. Lokale Unter- bzw. Überschreitungen der Toleranzen führen zu Inhomogenitäten im Kalorimeter und damit wegen unterschiedlicher Ladungssammlungszeiten<sup>1</sup> zu einer Ortsabhängigkeit der Energiemessung.

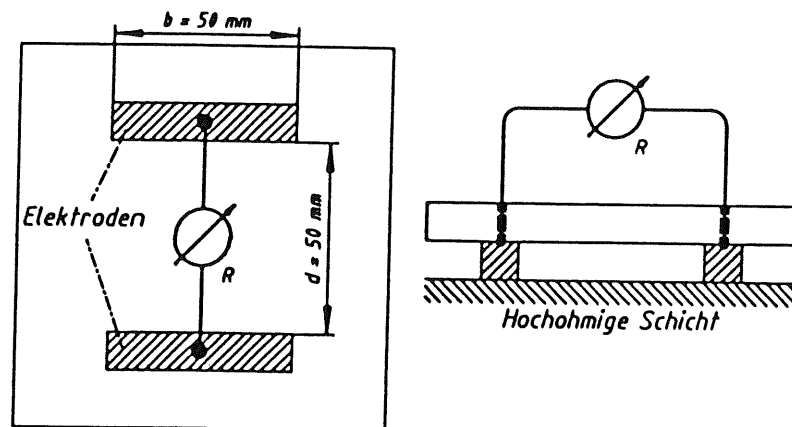


Abbildung 3.4: Aufbau der Meßbrücke zur Widerstandsmessung mit der Zweipolmethode. Der Träger besteht aus einer  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$  großen, etwa 1 cm dicken Plexiglasplatte.

Unter der Voraussetzung, daß der elektrische Widerstand über dieser Testfläche konstant und die Fläche rechtwinklig ist, folgt aus dem Ohmschen Gesetz der elektrische Widerstand  $R$ :

$$R = \frac{\int \vec{E} \cdot d\vec{r}}{\int \vec{j} \cdot d\vec{f}} = \frac{U}{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{d} \cdot b \cdot h} = \frac{\rho \cdot d}{b \cdot h} \quad (3.1)$$

Die Integration des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  erfolgt zwischen zwei sich im Abstand  $d$  gegenüberliegende Kontakte an den Kanten der Testfläche; die Stromintegration erfolgt über die Querschnittsfläche der hochohmigen Schicht ( $d\vec{f} \perp$  der Querschnittsfläche  $b \cdot h$ ). Dabei ist  $b$  die Länge der Kontakte und  $h$  ist die Dicke der hochohmigen Schicht (senkrecht zur

<sup>1</sup> [FK88]

Testfläche).  $\rho$  ist der spezifische Widerstand in  $\Omega \cdot m$ . Somit ist die eigentlich zu messende probenabhängige Größe  $\rho/h$ , die im Falle einer quadratischen Testfläche ( $b = d$ ) direkt gleich dem gemessenen Widerstand  $R$  ist. Allerdings sind alle Randeffekte vernachlässigt.

Die Messung des Widerstandes pro quadratischem Flächenelement ( $R_{\square} \equiv \rho/h$  aus Gl.(3.1)) kann durch Aufbringen von geeigneten Kontakten, welche eine rechtwinklige Fläche aufspannen, auf die hochohmige Schicht erfolgen. Dann wird  $R$  zwischen diesen Kontakten entweder mit einer einfachen Zweipolmessung oder unter Verwendung der Vierpolmethode gemessen. Abhängig von der Geometrie des Aufnehmers kann daraus  $R_{\square}$  berechnet werden.

### 3.2.1 Einfache statische Messungen

Zunächst wurden verschiedene Kontaktmaterialien mit einem einfachen Aufbau (Abb.3.4) untersucht. Dazu wurde über einer bestimmten Testfläche der Widerstand mit Elektroden aus verschiedenen Materialien gemessen. Außerdem wurde seine Variation über die Meßzeit sowie seine Abhängigkeit vom Auflagedruck gemessen.

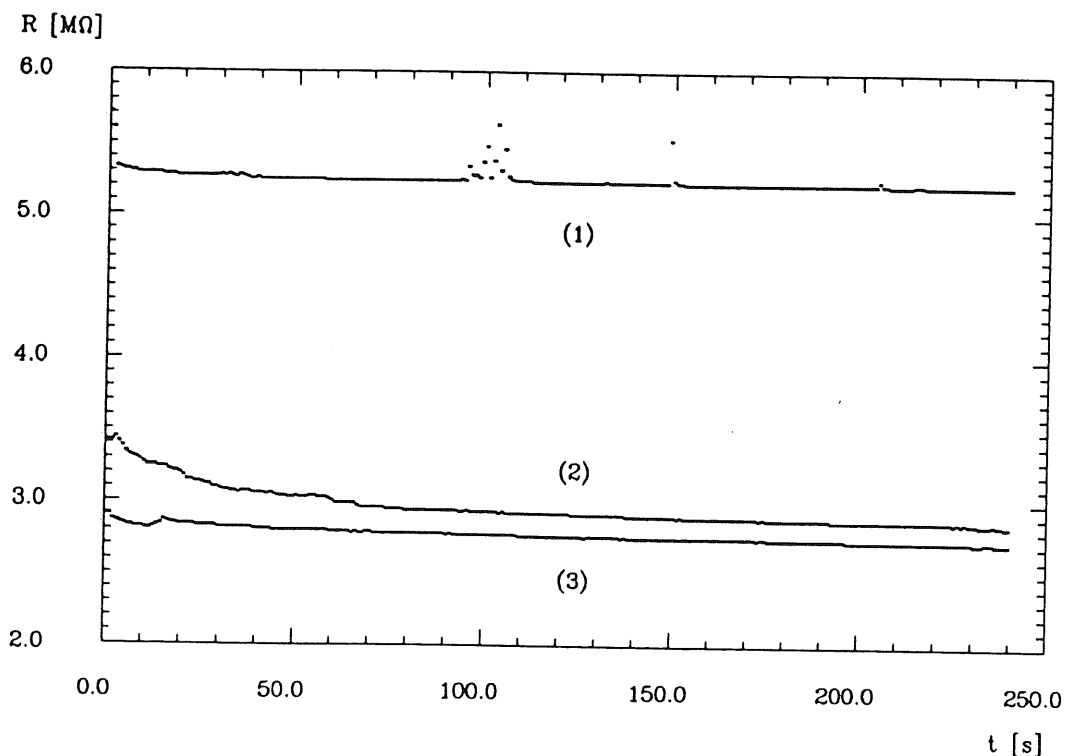


Abbildung 3.5: Messung des elektrischen Widerstands über eine  $25 \text{ cm}^2$  große quadratische Testfläche mit verschiedenen Elektrodenmaterialien - (1) metallische Elektrode, (2) Schaumstoff mit Silberleitlack bestrichen und (3) Leitschaumstoff.

Die Herstellung eines guten Kontakts erwies sich aufgrund der rauhen Oberflächenbeschaffenheit der hochohmigen Schicht als schwierig. Erste Versuche mit metallischen Kontakten brachten ein nur unbefriedigendes

Ergebnis. Schon bei der kleinsten Erschütterung kann der gemessene Widerstandswert stark ansteigen. Eine Verbesserung brachten mit Silberleitlack bestrichene Schaumstoffkontakte. In diesem Fall ist die Abhängigkeit von äußeren mechanischen Einflüssen sehr viel kleiner. Als drittes Elektrodenmaterial wurde noch der leitfähige Schaumstoff benutzt. Er zeigt die stabilsten Eigenschaften. (Abb.3.5).

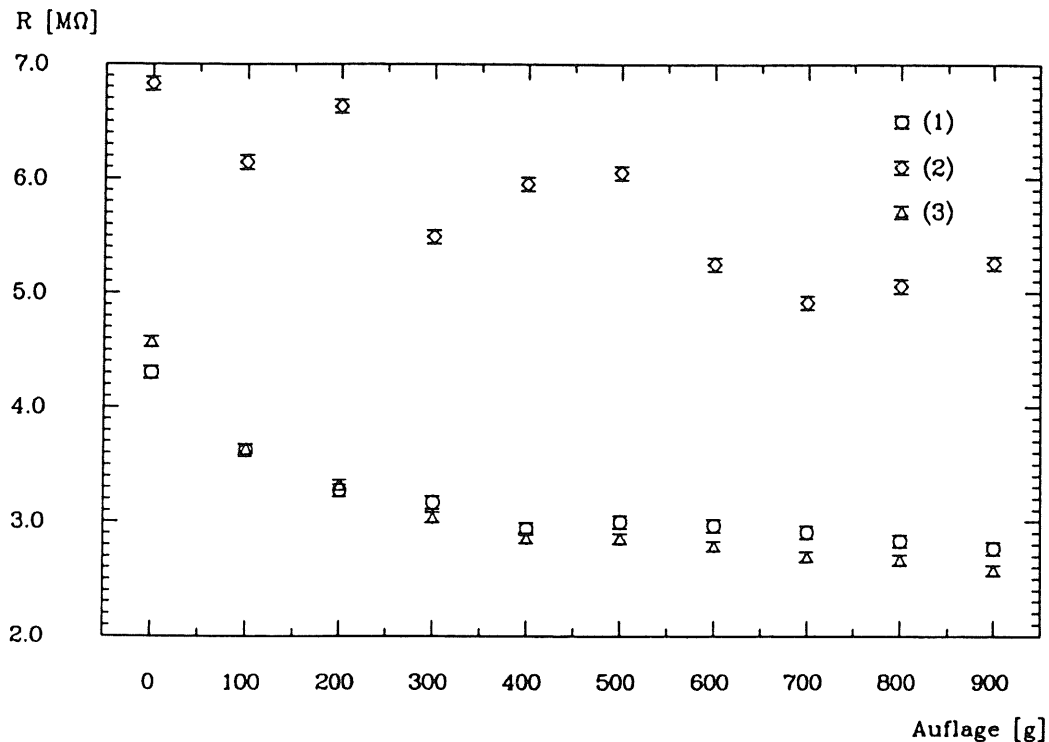


Abbildung 3.6: Abhängigkeit des gemessenen Widerstandswertes vom Auflagedruck für drei verschiedene Elektrodenmaterialien ((1) mit Silberleitlack lackierte Schaumstoffelektroden, (2) metallische Elektroden und (3) Elektroden aus Leitschaumstoff)

Charakteristisch ist die Zeitabhängigkeit des Widerstandswertes bei metallischen und lackierten Elektroden. Sie und die Instabilitäten der Meßwerte für diese beiden Materialien favorisieren den Leitschaumstoff als Kontaktmaterial. Abb.3.6 zeigt die Abhängigkeit des gemessenen Widerstandswertes vom Auflagedruck. Man beachte, daß diese für Andruckgewichte  $> 500$  gr bei den weichen Elektrodenmaterialien eine nur kleine Variation bringt.

### 3.2.2 Die Vierpolmethode

Sehr stabile Ergebnisse werden durch Verwendung der Vierpolmethode<sup>2</sup> erreicht. Das Prinzip ist dabei, aus einem externen konstantem Strom einen Spannungsabgriff über die Testfläche zu machen (Abb.3.7 zeigt Aufbau und Schaltbild). Zur Bestimmung des Widerstands  $R_x$  ist es notwendig, daß der Innenwiderstand  $R_i$  des Spannungsmeßgerätes zusammen

<sup>2</sup>[Wo88]

mit den Kontaktwiderständen  $R_{k2}$  und  $R_{k3}$  sehr viel größer als  $R_x \approx 10^6 \Omega$  ist. Dann ist der durch das Meßgerät fließende Strom gegenüber dem in der Testfläche fließenden vernachlässigbar und der Spannungsabfall zwischen den beiden inneren Kontakten allein durch  $R_x$  bestimmt. Das von uns benutzte Voltmeter (Keithley 197) hat im 2 V - Meßbereich einen Eingangswiderstand  $R_i > 10^9 \Omega$ . Damit werden die Übergangswiderstände  $R_{ki}$  zwischen den Kontakten und der hochohmigen Schicht vernachlässigbar. Außerdem gibt es keine Randeffekte, da die Spannung von separaten Kontakten nur zwischen den felderzeugenden Elektroden gemessen wird. Das elektrische Feld und damit der Strom zwischen diesen nicht abhängig ist von dem Feld außerhalb.

Durch Messung der Spannung  $U$  erhalten wir den Widerstand  $R = \frac{U}{I}$ . Die Umrechnung von  $R$  auf  $R_{\square}$  ist durch Gl.(3.1) gegeben; es gehen dabei nur die Kontaktbreite  $b$  und der Kontaktabstand  $d$  der Spannungskontakte ein. Es hat sich gezeigt, daß der Wert  $R$  im Fall der Vierpolmethode praktisch nicht zeitabhängig ist. Dadurch ist dieses Verfahren in Bezug auf eine notwendige große Zahl von Messungen interessant. Einzig problematisch ist die Unhandlichkeit des Detektors; zur Einstellung eines konstanten Stroms ist ein Auflagegewicht von ca. 8 kg notwendig.

### Ergebnisse von Messungen mit der Vierpolmethode

Ein Problem bei allen besprochenen Verfahren ist die Reproduzierbarkeit der Meßwerte. Dazu werden eine Reihe von Messungen über immer die gleichen Testflächen einer Hochspannungsplatte des elektromagnetischen Kalorimeters durchgeführt. Die Variation der Werte an jeweils gleichen Orten gibt ein Maß für die Reproduzierbarkeit. Die Ergebnisse zeigen, daß die erhaltenen Werte im Mittel innerhalb einer Toleranz von  $\pm 10\%$  reproduzierbar sind (Abb.3.8).

Die relativen lokalen Variationen zeigt ebenfalls Abb.3.8. Sie sind ein Maß für die "echten" fertigungsbedingten Schwankungen von  $R_{\square}$  über die gesamte Fläche. Die Toleranzbedingung ( $3 M\Omega \leq R_{\square} \leq 30 M\Omega$ ) wird für diese eine Platte in einigen Punkten nicht erfüllt. Leider liegen noch keine Erfahrungen - für beide Meßmethoden - für eine größere Anzahl von elektromagnetischen Hochspannungsplatten vor.

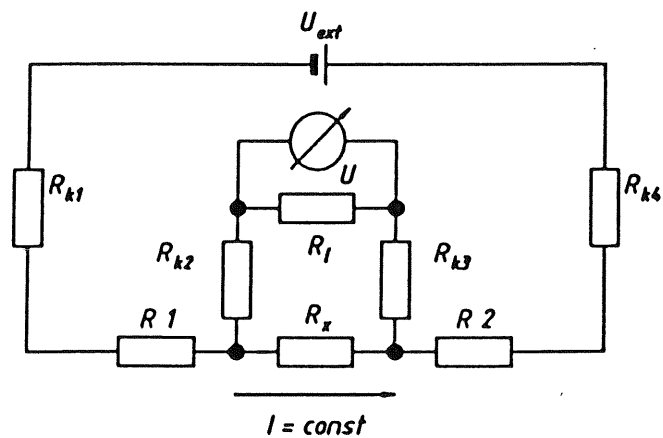
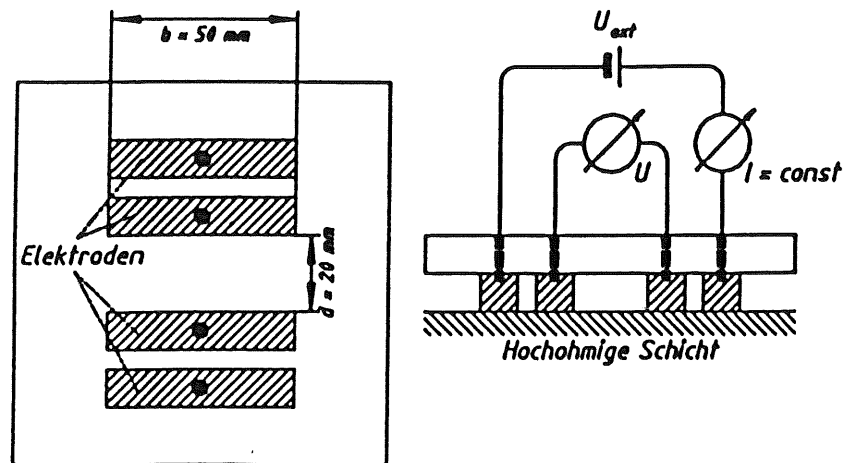


Abbildung 3.7: Aufbau und Schaltbild zur Vierpolmethode.  $R_x$  ist der Widerstand über der Testfläche. Die  $R_{k_i}$  sind die insgesamt auftretenden Kontaktwiderstände der Leitschaumstoffelektroden zur hochohmigen Schicht.  $R_1$  und  $R_2$  sind die Schichtwiderstände, die nur von Strom gesehen werden. Wenn der Innenwiderstand des Spannungsmessgeräts  $R_i$  viel größer ist als  $R_x$ , fließt durch  $R_i$  kein Strom und es wird direkt der Spannungsabfall über  $R_x$  - ohne Einfluß der Kontaktwiderstände - gemessen. Der Elektrodenträger ist der selbe wie der bei der Zweipolmeßbrücke.

Pkt.	(a)	(b)
1	3.29	0.11
2	3.60	0.22
3	4.16	0.16
4	3.73	0.23
5	4.54	0.10
6	4.31	0.11
7	3.35	0.07
8	3.41	0.18
9	2.91	0.11
10	2.90	0.16
11	3.37	0.20
12	3.56	0.12
13	3.83	0.14
14	3.30	0.05
15	2.22	0.24
16	2.38	0.24
17	2.64	0.13
18	3.01	0.11
19	3.07	0.07
20	3.18	0.11
21	3.70	0.09
22	4.30	0.29
23	2.87	0.13
24	2.30	0.08
25	2.57	0.11
26	2.30	0.21
27	2.26	0.05

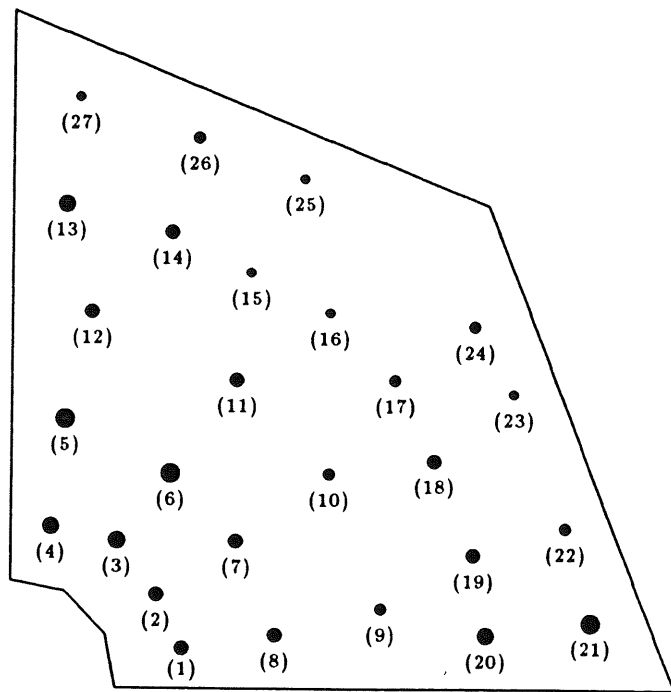


Abbildung 3.8: Variationen der Widerstandswerte über eine Hochspannungsplatte. In Spalte (a) ist der Mittelwert für sechs Messungen pro Punkt eingetragen, in (b) der Fehler des Mittelwertes (alle Werte in  $M\Omega/\square$ ).

## Kapitel 4

# Kapazitive Tests an elektromagnetischen Ausleseplatten

Nach dem Kleben und dem Anbringen aller notwendigen Stecker und Kontakte werden die fertigen Ausleseplatten des elektromagnetischen Kalorimeters nochmals auf Kurzschlüsse und Leitungsbrüche hin untersucht. Diese Untersuchung erfolgt durch Messen der Kapazität der einzelnen Signalkanäle gegen die Bleiplatte.

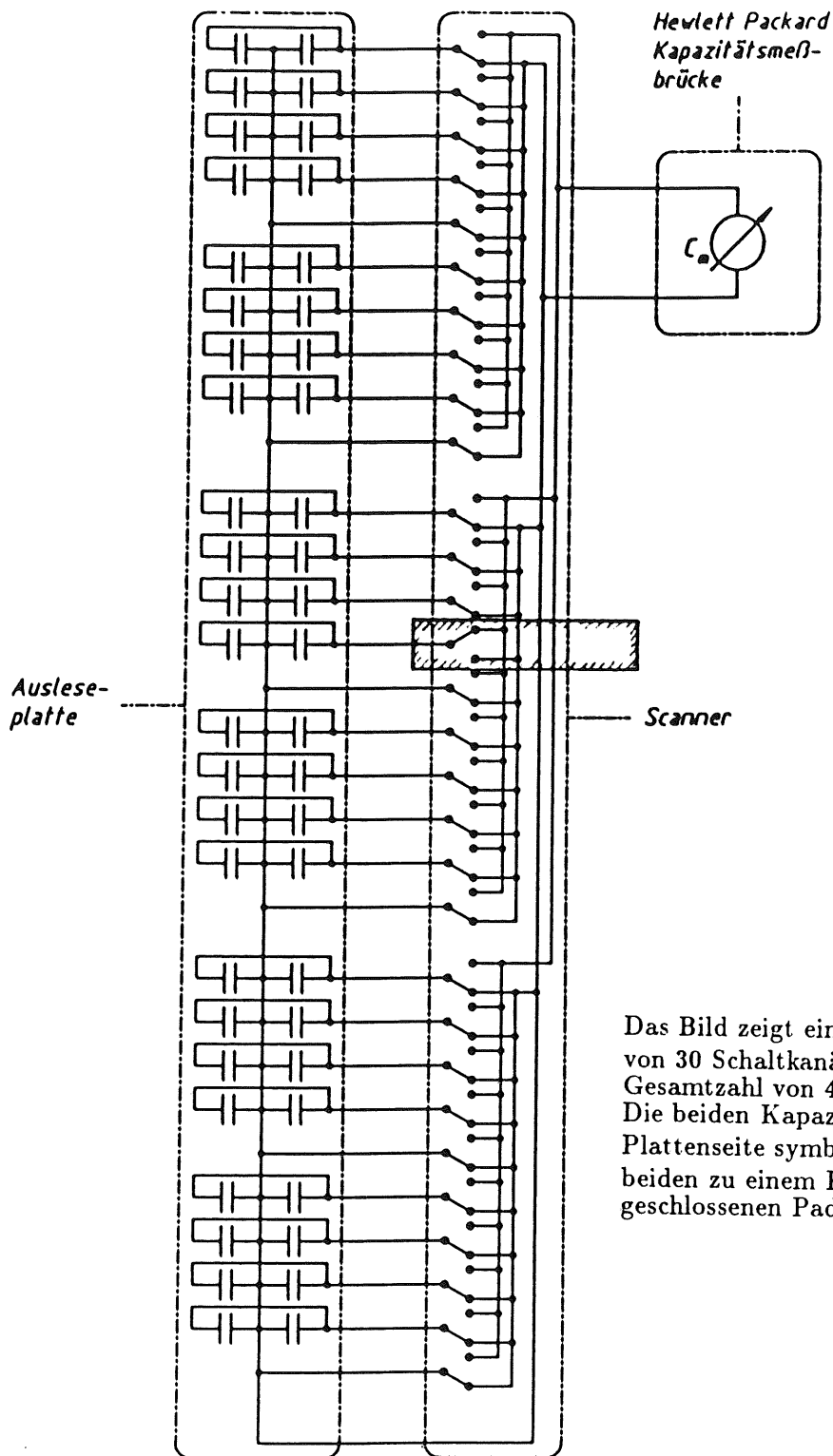
Anhand des für jeden Kanal bestimmten Kapazitätswertes lassen sich verschiedene Fehler auf den Platten identifizieren. Der Vorteil gegenüber den schon beschriebenen Strom- bzw. Widerstandsmeßverfahren bei den Kartentests besteht darin, daß anhand nur eines Meßwertes eine Entscheidung sowohl über das Auftreten als auch über die Art von Fehlern getroffen werden kann.

Das Auftreten ungewöhnlich kleiner Werte signalisiert einen Leitungsbruch; ungewöhnlich hohe Werte dagegen einen Kurzschluß. Durch die Wahl eines speziellen Meßverfahrens ist zudem noch eine weitere Klassifizierung der Kurzschlüsse - z.B. nach Anzahl der beteiligten Kanäle - möglich. Der als Entscheidungsgrundlage für die o.g. Fälle dienende Bezugswert ist dabei die mittlere Kapazität von jeweils 16 zu einem Triggertower zusammengefaßten Pads.

Die Testprozedur für die Ausleseplatten läuft wie folgt ab:

- Einige Platten werden vor dem Anlöten der Stecker kapazitiv untersucht. Dieser Test ist auf beiden Plattenseiten empfindlich, d.h. die Lokalisation eventuell auftretender Fehler ist nicht nur auf Signalkanäle - die jeweils gegenüberliegenden Pads auf der Ober- und Unterseite einer Ausleseplatte sind zu einem Kanal verbunden - beschränkt. Es besteht die Möglichkeit, einzelne Pads direkt zu testen. Der Test kann allerdings aus Zeitgründen nur für eine kleine Auswahl von Platten erfolgen. Danach wird auch mit diesen Platten der im nächsten Punkt beschriebene Test durchgeführt.
- Alle Platten werden nach dem Anlöten der Stecker auf elektrische





Das Bild zeigt einen Ausschnitt von 30 Schaltkanälen aus einer Gesamtzahl von 40 oder 50. Die beiden Kapazitäten auf der Plattenseite symbolisieren die beiden zu einem Kanal zusammengeschlossenen Pads.

Abbildung 4.1: Schaltung zur Messung von Kapazitäten. Das eingetragene Rechteck markiert den momentanen Testkanal. Seine Kapazität gegen die Bleiplatte und alle anderen Kanäle wird gemessen.

Fehler ebenfalls mittels einer Kapazitätsmessung untersucht. Danach werden einige der getesteten Platten in flüssigem Stickstoff bei etwa  $-196^{\circ}\text{C}$  abgekühlt und im Kalten untersucht. Nach dem Aufwärmen erfolgt schließlich der letzte kapazitive Test mit diesen Platten.

Die Messung der Kapazitäten kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen besteht die Möglichkeit einer automatisierten Messung mit Hilfe des Scanners; zum anderen kann eine manuelle Messung mit rechnergesteuerter Datennahme durchgeführt werden. Beide Verfahren werden im Folgenden mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen vorgestellt und verglichen.

## 4.1 Verfahren A: Automatisch geschaltete Auslesekanäle

Dieses Verfahren ist nur möglich für Platten mit bereits angelöteten Steckern. Damit ist ein auf die einzelnen Pads sensitiver Test nicht möglich, da die Verbindung der sich gegenüberliegenden Pads durch die Stecker erfolgt. Andererseits ist das im Folgenden beschriebene Verfahren die einzige Möglichkeit, Kapazitäten bei Flüssig-Stickstoff-Temperatur zu messen.

Jede Ausleseplatte hat 16 40-polige Stecker, an denen jeweils je nach Familie bis zu 32 Kanäle angeschlossen sind. Die Stecker befinden sich an der Außenkante der Platte. An der Innenkante (am Strahlrohrausschnitt) befinden sich vier 50-polige Stecker mit je 40 Kanälen. Damit ergibt sich die maximal zu schaltende Kanalzahl zu 672 pro Platte. Die Zuleitung zum Scanner erfolgt über lange 40- oder 50-polige Flachbandkabel.

### 4.1.1 Probleme beim Messen von Kapazitäten

Ein Problem beim Messen relativ kleiner Kapazitäten, wie sie bei uns auftreten ( $\sim$  einige 100 pF), ist das Vorhandensein einer Fülle von parasitären Kapazitäten im Aufbau. Dazu gehören insbesondere die Kabelkapazitäten. Diese sind direkt proportional zur Kabellänge; da wir auch im Kalten messen, sind wir gezwungen, Kabel von 2 bis 3 m Länge zu benutzen. Aufgrund einer Vielzahl von Leitungen ist eine große Zahl von kapazitiven Kopplungen zwischen den Kanälen möglich. Diese Kopplungen sind im Regelfall von der aktuellen Lage der einzelnen Kabel abhängig; dies ergibt Probleme bei der Reproduzierbarkeit der Kapazitätswerte einzelner Kanäle oder beim Vergleich der Werte verschiedener Platten.

Betrachten wir kurz zwei Meßverfahren mit verschiedenen Kopplungen der einzelnen Leitungen:

- 1.) Außer der Testleitung haben alle Leitungen ein offenes Ende, dh. an einem Ende hängt die Padkapazität, das andere Ende ist nicht geschaltet. In diesem Fall zeigt das Ersatzschaltbild 4.2 die auftretenden kapazitiven Kopplungen. Die gemessene Kapazität ergibt

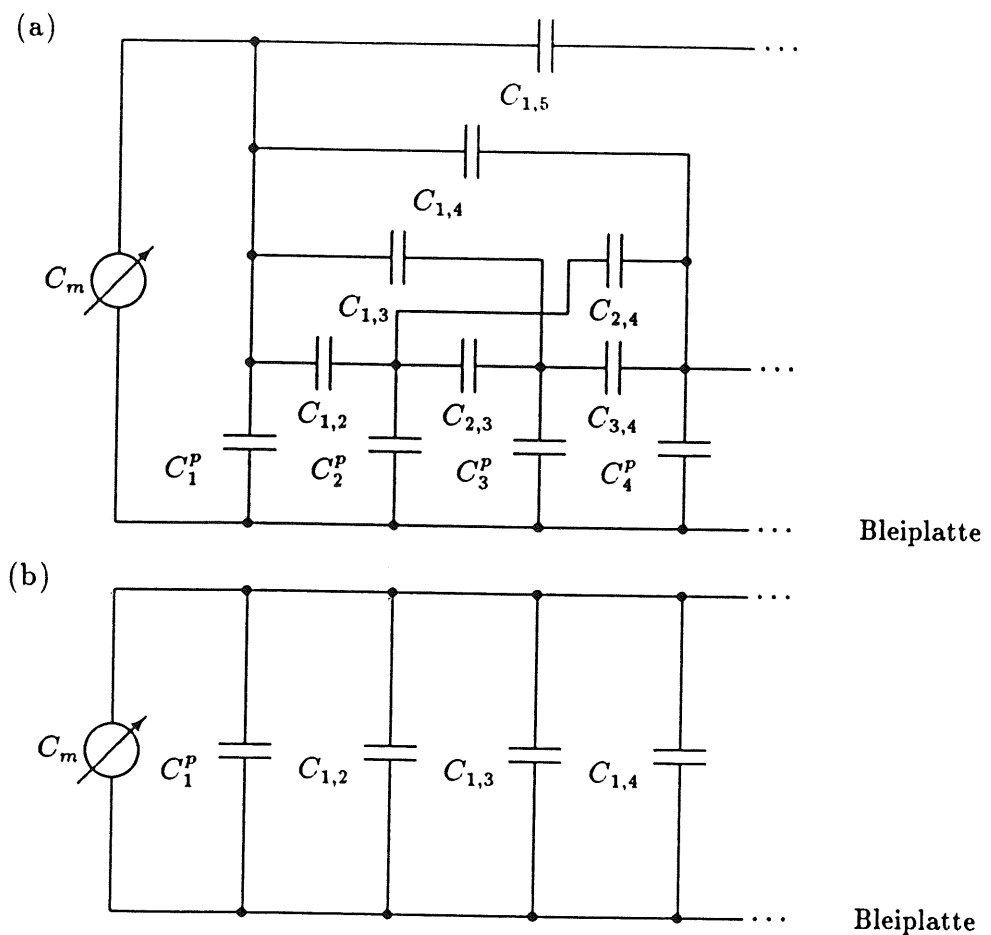


Abbildung 4.2: Schaltbilder zur Kopplung von einer Testleitung zu ihren Nachbarn. (a) zeigt einige der möglichen Kopplungen an offene Leitungen, (b) die Kopplungen gegen auf Bleiplattenniveau liegende Leitungen.

sich unter Vernachlässigung aller Kopplungen zweiter und höherer Ordnung zu:

$$C_m = C_j^P + \sum_{i=1}^{i_{max}} \frac{C_{j,i} \cdot C_i^P}{C_{j,i} + C_i^P}, \quad (i \neq j) \quad (4.1)$$

$C_m$  ist die gemessene Kapazität,  $C_j^P$  die (wahre) Kapazität des zu testenden Kanals,  $C_{j,i}$  die Koppelkapazität zwischen dem Testkanal und dem  $i$ -ten Kanal,  $C_i^P$  die Kapazität des  $i$ -ten Kanals und  $i_{max}$  die maximale Zahl der Kanäle auf der Platte. Also gilt für die gemessene Kapazität  $C_m$  z.B. des Kanals 1:

$$C_m = C_1^P + \mathcal{C}(C_2^P, C_3^P, \dots, C_{max}^P, C_{1,2}, C_{1,3}, \dots, C_{1,max})$$

Der Zusammenhang  $\mathcal{C}$  zwischen  $C_m$  und der gesuchten Größe  $C_1^P$  in diesem Beispiel läßt sich nur in aufwendiger Weise durch Messungen herstellen, zumal Näherungen über einzelne Größen nicht möglich sind, da alle auftretenden Kapazitätswerte die gleiche Größenordnung haben.

- 2.) Alle nicht getesteten Kanäle zumindest des Steckers, auf dem sich der Testkanal befindet, werden auf das Potential der Bleiplatte geschaltet. Es ergibt sich das in Abb.4.2.b dargestellte Schaltbild. In diesem Fall sind die einzig auftretenden Kopplungen die gegen das Plattenpotential. Damit läßt sich die Testkapazität in elementarer Weise berechnen. Für den Zusammenhang zwischen der gemessenen Kapazität  $C_m$  und der Testkapazität  $C_j^p$  gilt dann nämlich:

$$C_m = C_j^p + \sum_{i=1}^{i_{\max}} C_{j,i}, \quad (i \neq j)$$

$$\Rightarrow C_j^p = C_m - C_j^{Kpl} \quad (4.2)$$

$C_j^{Kpl}$  ist die globale Koppelkapazität des  $j$ -ten Kanals gegen alle anderen Kanäle eines Kabels. Sie läßt sich für jeden Kanal durch Eichmessungen bestimmen (siehe unten). Vernachlässigt werden bei dieser Vorgehensweise alle Kopplungen zu Kanälen anderer Kabel.

#### 4.1.2 Durchführung der Messungen

Aufgrund der kleinen Zahl von nur 60 schaltbaren Kanälen ist es erforderlich, jeden Stecker einzeln durchzumessen. Demzufolge ist nach jeder Messung das Kabel an der 40- oder 50-poligen Steckleiste des Anschaltkastens auszutauschen. Dabei gibt das Programm die Reihenfolge vor. Leider besteht keine programmtechnische Möglichkeit, die Richtigkeit des angeschlossenen Kabels zu überprüfen. Nach Fertigstellung der Schaltung im Scanner erfolgt die Abfrage des Kapazitätswertes an die Hewlett Packard Meßbrücke. Der erhaltene Wert wird nach dem auf seine Plausibilität überprüft (die Beschreibung der Plausibilitätsüberprüfung und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 4.3.). Nach der Schaltung aller Signalkanäle eines Steckers erfolgt die Aufforderung zum Steckerwechsel, oder, falls die Platte vollständig durchgemessen ist, die Datensicherung. Abb.4.1 zeigt einen Ausschnitt aus der Scanner-Schaltung.

#### Kabelkalibration

Wegen des schon besprochenen Problems der Kabelkapazitäten  $C_j^{Kpl}$  - diese beinhalten auch sämtliche interne Scannerkapazitäten - ist eine Korrektur der erhaltenen Meßwerte  $C_m$  notwendig. Durch eine Eichmessung wird jedem Kanal  $j$  die Offset-Kapazität  $C_j^{Kpl}$  zugeordnet, die dann die Berechnung der "wahren" Kapazität  $C_j^p$  gemäß Gl.(4.2) erlaubt. Wegen der unterschiedlichen Kabellagen und -längen ist die individuelle Zuordnung notwendig.

Die Durchführung der Eichmessung unterscheidet sich nicht von der einer Testmessung; es werden die Kabel allerdings nicht an die Stecker der Ausleseplatte angeschlossen. Wegen des relativ großen Zeitaufwands für eine Messung konnten die vorhandenen Kabel nur viermal durchgemessen werden. Zur Überprüfung der Abhängigkeit der  $C_j^{Kpl}$  von der aktuellen

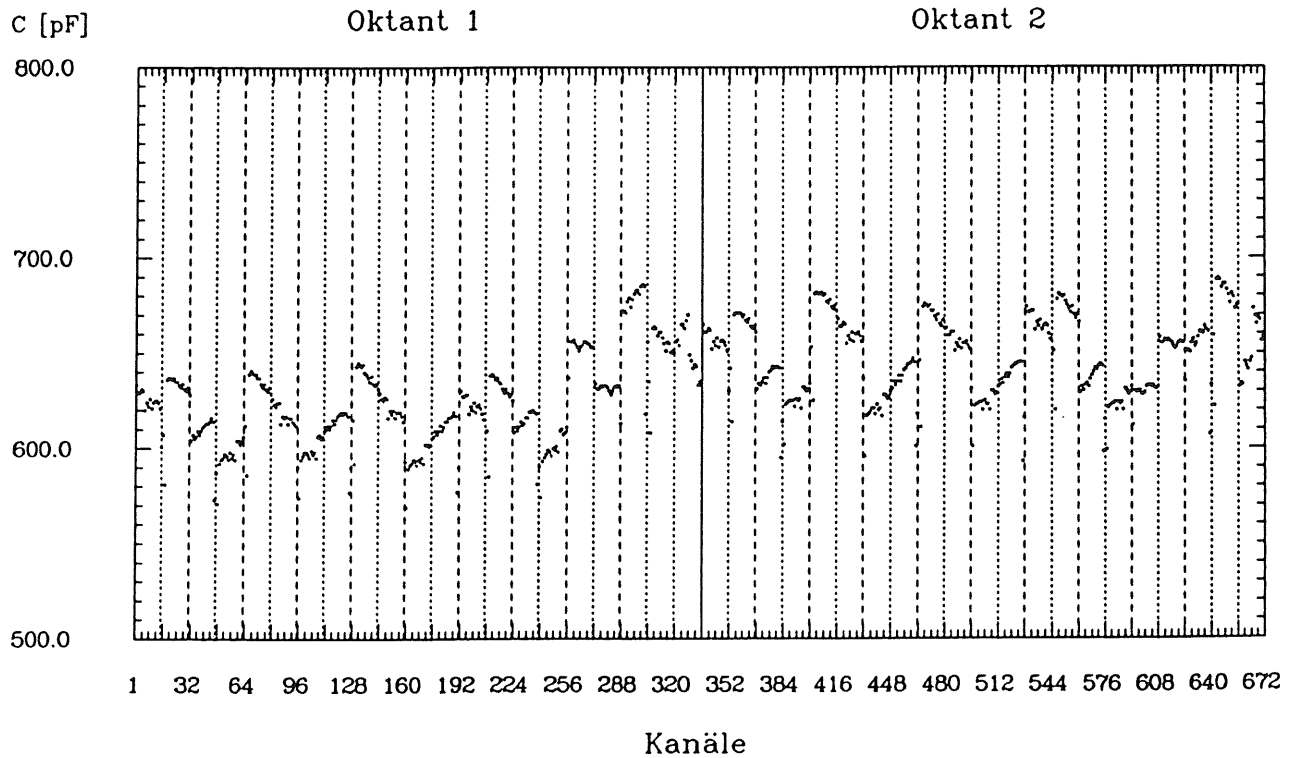
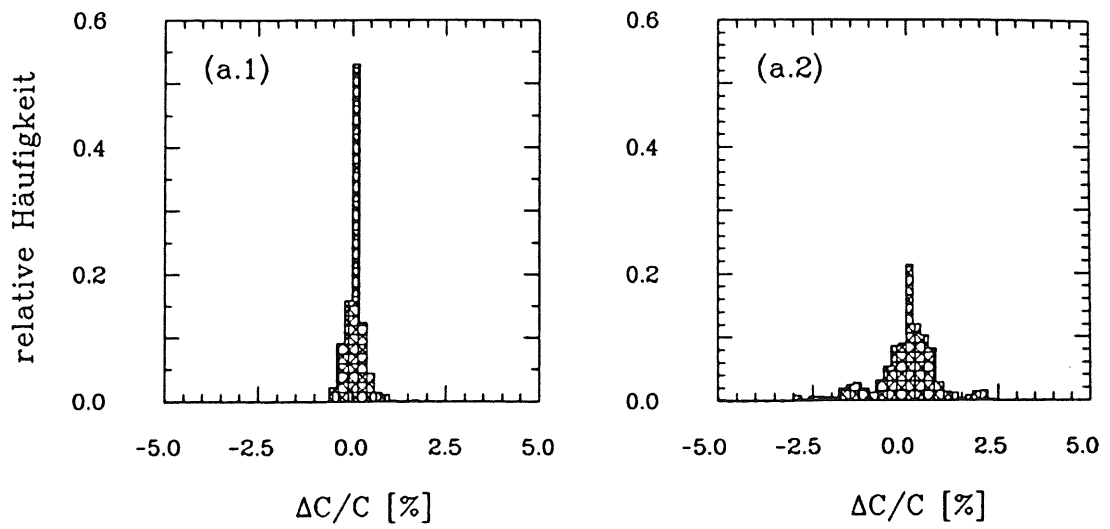


Abbildung 4.3: Messung der Kapazitäten jeweils gleicher Leitungen in variierten Aufbauten - oben die relative Verteilung der prozentualen Abweichungen, unten die Absolutwerte einer Messung. Die gestrichelten Linien in der unteren Abbildung markieren Kanalbereiche, die auf ein gemeinsames Flachbandkabel gehen. In die oberen Histogramme sind jeweils 672 Kanäle eingezählt.

Kabellage wird zwischen den Messungen der Aufbau variiert. In der Abbildung 4.3a.1 sind die relativen Häufigkeiten der gemessenen prozentualen Variationen im besten, in der Abbildung 4.3a.2 im ungünstigsten Fall dargestellt; die maximale prozentuale Variation in einem Kanal beträgt  $\sim 3\%$ . Die Verteilung der Absolutwerte im unteren Teil der Abbildung über den zur jeweiligen Leitung zugehörigen Auslesekanälen zeigt deutlich die Abhängigkeit der Koppelkapazität von der Lage der Leitung. Die mittleren Leitungen auf dem Flachbandkabel haben die größten Kopplungen, da sie die minimale Entfernung zu allen Nachbarn haben und somit deren Einflüsse am stärksten spüren. Leitungen an der Kabelkante fallen durch entsprechend sehr viel niedrigere Koppelkapazitäten auf. Im Folgenden ist der Meßwert  $C_m$  bei der automatischen Messung als auf die Kabelkapazität korrigiert zu betrachten.

## 4.2 Verfahren B: Manuelle Messungen

Aufgrund der Unsicherheit in den Kabelkapazitäten und der relativ geringen Aussagekraft der automatischen Messungen wird eine weitere Art der Kapazitätsmessung durchgeführt, bei der Computer lediglich die Datenaufnahme und Speicherung übernimmt. Messungen im Kalten sind nicht möglich. Dafür ist das Testen einzelner Pads an Ausleseplatten ohne Stecker möglich.

### 4.2.1 Durchführung der Messungen

Die Durchführung der Messungen ist einfach. Der Rechner gibt ein Pad auf der Platte vor, auf welches dann manuell ein mit der Kapazitätsmeßbrücke verbundener Kontaktstift positioniert wird. Bei Betätigung einer Keyboard-Taste wird der so gefundene Kapazitätswert des Pads gegen die Bleiplatte vom Rechner ausgelesen und die Position des nächsten Pads vorgegeben. Die größte Unsicherheit bei diesem Verfahren liegt darin, daß die Zuordnung der elektrischen Kanäle zur Oktant-Tower-Pad-Struktur der Ausleseplatte nicht mehr automatisch erfolgt. Auf der anderen Seite gibt es als Kopplung zwischen Kanälen nur noch die Übersprechkapazitäten, die auch im späteren Meßbetrieb vorhanden sind. Diese sind besser reproduzierbar als die über das Kabel laufenden Kopplungen, da sie nicht vom aktuellen Testaufbau abhängen.

## 4.3 Vergleich der Ergebnisse aus beiden Verfahren

### 4.3.1 Allgemeine Fehlerdiagnose

Die Untersuchung der einzelnen Platten auf die in Tabelle 4.1 dargestellten Fehler erfolgt entweder direkt bei der Datennahme oder durch eine spätere

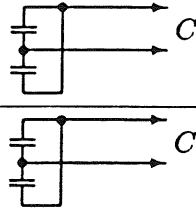
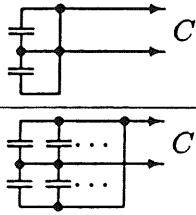
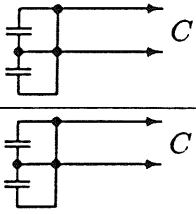
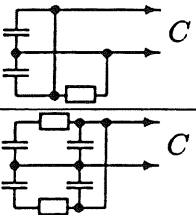
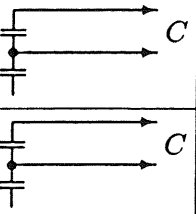
Fehler	Ersatz-Schaltung	automatisch		manuell	
		Daten	$C/\bar{C}_t$	Daten	$C/\bar{C}_t$
keine		NORMAL	$\sim 1$	NORMAL	$\sim 1$
Kurzschluß zu $n$ Nachbarpads		OVERFLOW	$\gg 10^6$	NORMAL	$\sim n + 1$
Kurzschluß zur Bleiplatte		OVERFLOW	$\gg 10^6$	OVERFLOW	$\gg 10^6$
hochohmiger Kurzschluß zu $n$ Nachbarpads		NORMAL	$\sim 1$	NORMAL	$\sim n + 1$
einfacher Leitungsbruch		NORMAL	$\frac{1}{2} - \frac{3}{4}$	NORMAL	$\frac{1}{2} - \frac{3}{4}$

Tabelle 4.1: Fehlersignatur für die beiden kapazitiven Meßverfahren.  $\bar{C}_t$  ist die mittlere Kapazität des Towers, indem der fehlerhafte Kanal aufgetreten ist. Der obere Teil in der zweiten Spalte zeigt jeweils die Situation im Fall der automatischen, der untere Teil im Fall der manuellen Messung.  $C$  ist im Fall der automatischen Messung auf die jeweilige Kabelkapazität  $C_j^{Kpl}$  korrigiert. Hochohmige Massekurzschlüsse unterscheiden sich in ihrer Signatur nicht von den niederohmigen.

Datenanalyse. Es hat sich gezeigt, daß eine schnelle Diagnose mit beiden Verfahren nur für Kurzschlüsse zwischen Auslesekanal und Bleiplatte sicher möglich ist. Kurzschlüsse zwischen Pads und Leitungsbrüche sind sicher nur in einer nachträglichen Datenanalyse zu finden. Dabei wird ein Auswerteverfahren mit dem *Truncated Mean* angewendet. Aus der Verteilung der der 16 Kanalkapazitäten eines Towers wird der Mittelwert gebildet. Das *Truncated Mean*  $\bar{C}_t$  erhält man durch eine weitere Mittelwertbildung über nur die Werte, die innerhalb einer  $2\sigma$ -Umgebung des "normalen" Mittelwertes liegen. Erfahrungsgemäß können die Kanäle als fehlerhaft angesehen werden, deren Kapazitätswerte außerhalb der jetzt modifizierten  $2\sigma_t$ -Umgebung von  $\bar{C}_t$  liegen (dazu Abb.4.6). Zusätzlich muß die Plattentopologie - die Lage der Löcher - noch in diese Betrachtung investiert werden, sodaß sich für die Fehlersuche folgendes Entscheidungsschema ergibt:

$$\underbrace{\{(C_j^p < (\bar{C}_t - 2\sigma_t)) \vee (C_j^p > (\bar{C}_t + 2\sigma_t))\}}_{\text{Fehlerentscheidung}} \wedge (\text{Topologie})$$

Schon wegen der schwachen Statistik von - je nach Auslesefamilie und - tower - nur 8 bis 16 Kapazitätswerten zur Bildung des Mittelwertes sind im Zweifelsfall weitere manuelle Untersuchungen notwendig. Sie erfolgen durch z.B. direkte Widerstandsmessungen zwischen Kanälen bei Kurzschlußverdacht.

### Test auf Leitungsbrüche

Sowohl Verfahren A als auch Verfahren B läßt prinzipiell einen Test auf unterbrochene Pad-Stecker-Leitungen zu. Das Erkennungsmerkmal dieser Unterbrechung in einem bestimmten Kanal ist das Auftreten von im Vergleich zu den anderen Pads im gleichen Tower kleinen Kapazitäten. Für die Kapazität  $C_m$  ohne Leitungsbruch gilt unter Vernachlässigung von unterschiedlichen Dicken der Klebeschichten gegenüberliegender Pads:

$$C_m = 2 \cdot (C_j^l + C_j^p),$$

wobei  $C_j^l$  die Leitungs- und  $C_j^p$  die Padkapazität eines Kanals auf einer Plattenseite ist. Bei Auftreten eines Leitungsbruches an der Stelle  $xL$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) auf der Leitung der Länge  $L$  wird die Kapazität  $C'_m$  gemessen. Dann gilt:

$$C'_m = C_j^p + (1 + x)C_j^l. \quad (4.3)$$

Im Fall eines pad-nahen Leitungsbruches ist  $x = 1$  und die Kapazität des Kanals verringert sich um bis zu 25%, für  $x = 0$  ergibt sich eine Kapazitätsminderung im selben Kanal von 50%.

Bei mehr als einem Leitungsbruch pro Kanal wird die zu messende Kapazität  $C'_m$  durch

$$C'_m = (x_o + x_u) \cdot C_j^l$$



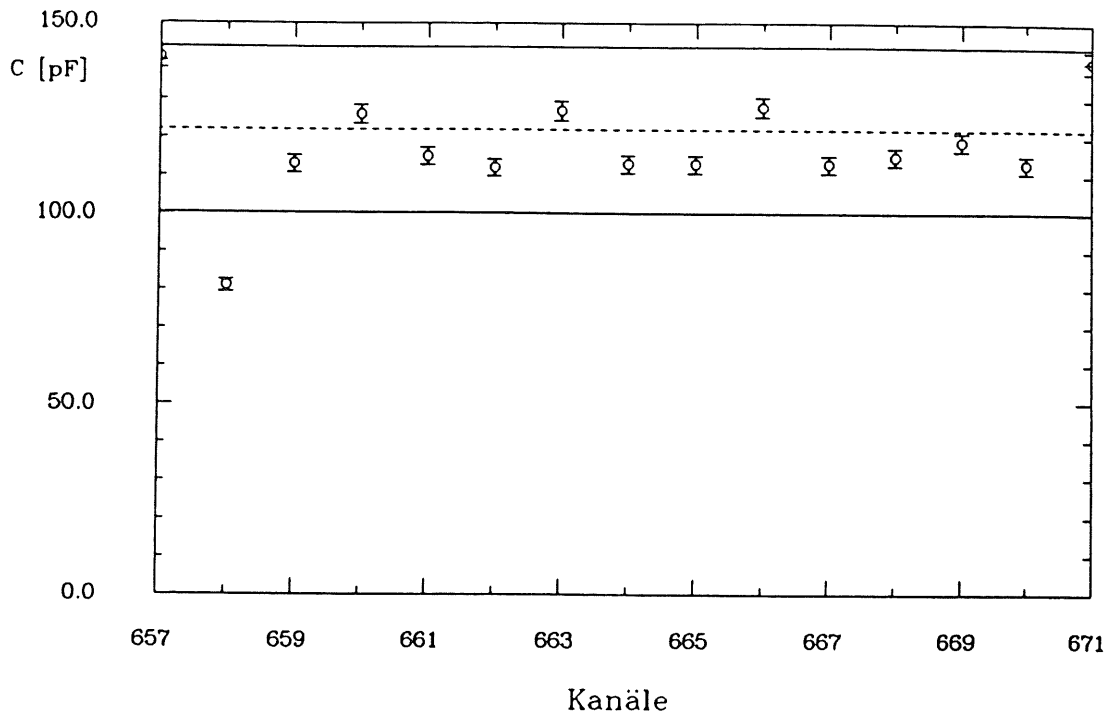


Abbildung 4.4: Signatur eines einfachen Leitungsbruchs auf einer Ausleseplatte. Der Kanal 658 hat eine um 34.4% geringere Kapazität als das Towermittel (gestrichelte Linie). Er fällt deutlich aus der  $2\sigma_t$ -Umgebung (zwischen den beiden durchgezogenen Linien) heraus.

bestimmt.  $x_o$  und  $x_u$  geben dabei den prozentualen Anteil der noch an die Kapazitätsmeßbrücke angeschlossenen Leitungsteile an der Gesamtleitlänge auf der Ober- und Unterseite der Ausleseplatte an. Für  $C'_m$  sind Werte zwischen 0 und 47% von  $C_m$  möglich.<sup>1</sup>

Abb.4.4 zeigt die Signatur eines Leitungsbruches auf einer Ausleseplatte.

### Kurzschlüsse

Prinzipiell gibt es drei Qualitäten von Kurzschlüssen (Tabelle 4.1). Das Verfahren A erlaubt nur die Feststellung eines OVERFLOWS in den Daten für alle möglichen Meßbereiche. Der verursachende Kurzschluß hat eine unendlichgroße Kapazität und ist nicht mehr weiter zu spezifizieren (Pad - Pad, Pad - Bleiplatte/Masse). Hochohmige Kurzschlüsse (typischerweise 500 - 1500 k $\Omega$ ) werden nicht erkannt, da das Hewlett Packard Meßgerät bei der Kalkulation eines Kapazitätswertes nur den Imaginärteil einer Impedanz benutzt und somit parallel geschaltete ohmsche Widerstände nicht erkennt. Im Verfahren B dagegen ist es möglich, die auftretenden Kurzschlüsse aufgrund einer Betrachtung der zugehörigen Kapazitätswerte näher zu beschreiben. Kurzschlüsse zur Masse (Bleiplatte) haben eine unendlich große Kapazität und werden als Daten-OVERFLOWS gemeldet;

<sup>1</sup>alle prozentualen Angaben in diesem Teil beziehen sich auf die maximal auftretende Leitungslänge von 550 mm.

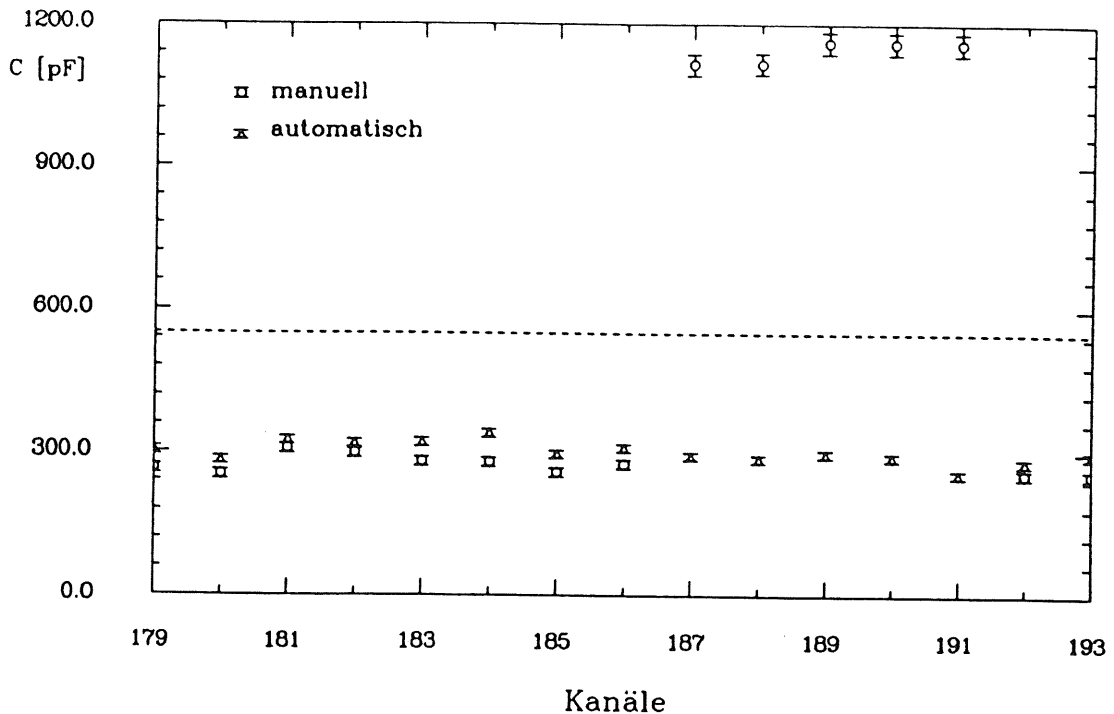


Abbildung 4.5: Kurzschluß über fünf Kanäle. Die gestrichelte Linie zeigt das Towermittel, welches durch die Kurzschlüsse stark verschoben ist. Die Widerstandswerte der einzelnen Verbindungen betragen jeweils  $\sim 600 \Omega$ . Deutlich ist zu sehen, daß im Fall der automatischen Messung die hochohmigen Kurzschlüsse nicht erkannt werden.

Kurzschlüsse zwischen  $n$  Pads vervielfachen die entsprechenden Kanalkapazitäten. Hochohmige Kurzschlüsse können wegen der in diesem Fall über den ohmschen Widerstand parallel geschalteten Kapazitäten erkannt werden. Sie sind in ihren Werten nicht von niederohmigen Kurzschlüssen zu unterscheiden. Abb.4.5 zeigt typische Kapazitätswerte eines mehrfachen hochohmigen Kurzschlusses.

Niederohmige Kurzschlüsse ( $\sim 1 \Omega$ ) entstehen zumeist beim Anlöten der Stecker (verifiziert durch Messung von Kapazitäten vor und nach dem Löten) und sind im Regelfall durch einfaches Entfernen von Lötbrücken zu beseitigen. Die Ursachen für die hochohmigen Kurzschlüsse, deren individuelle Qualität stark schwankt, sind noch nicht geklärt. Es besteht die Vermutung einer Verunreinigung der Prepreg-Schicht durch z.B. Einschlüsse von Wassertröpfchen, die die Leitungen auf der Rückseite der Karten mit je nach äußeren Bedingungen variierenden Widerständen verbinden.

#### 4.3.2 Vergleich von Kapazitätswerten bei verschiedenen Temperaturen

Einige der Ausleseplatten durchlaufen einen Meßzyklus, indem sie zunächst bei Zimmertemperatur, dann in flüssigem Stickstoff, und dann wieder bei Zimmertemperatur mit dem Verfahren A kapazitiv untersucht werden.

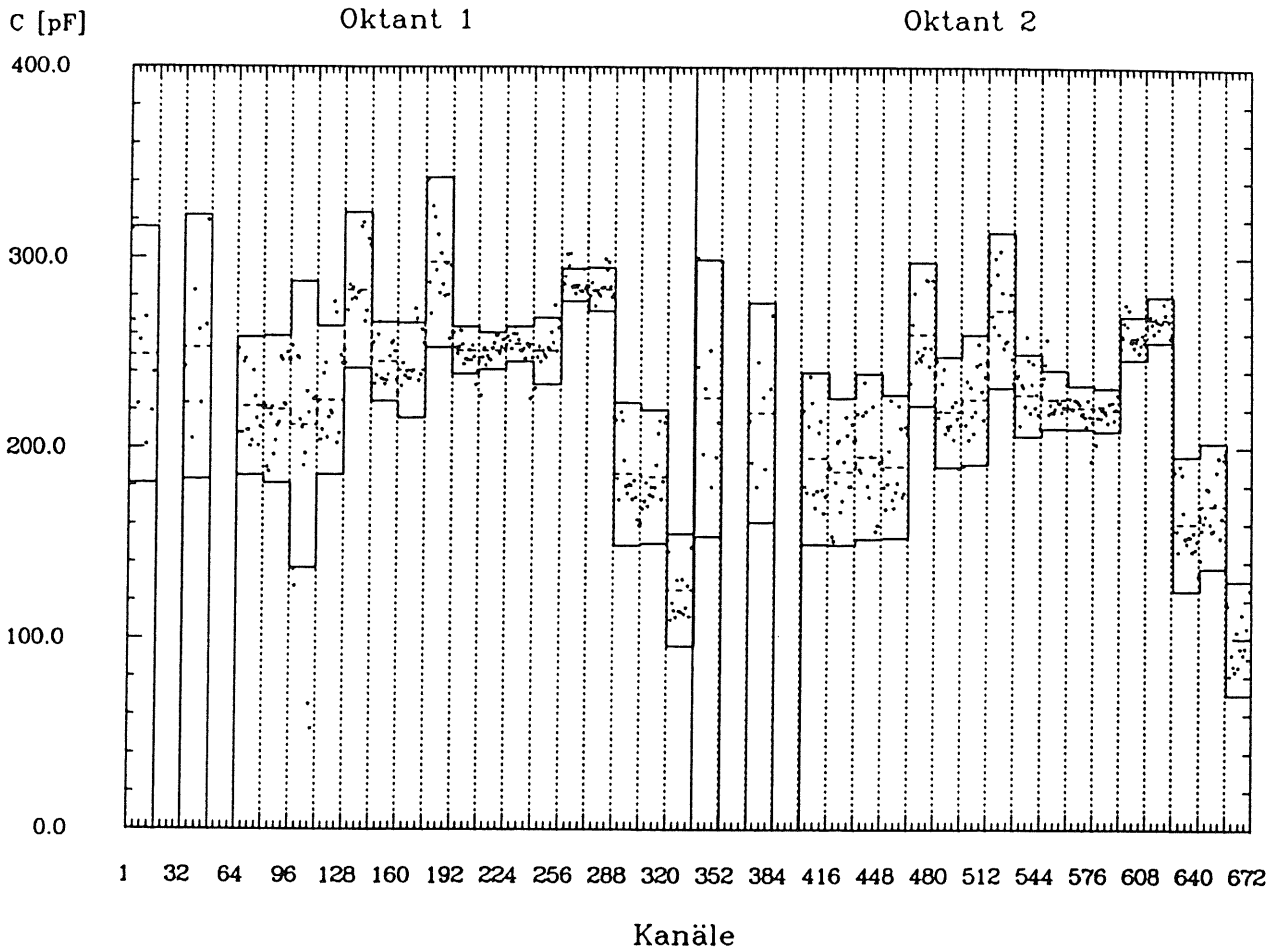


Abbildung 4.6: Absolute Kapazitäten der Plattenkanäle einer Ausleseplatte der Familie 7. Die vertikale Unterteilung in der Abbildung entspricht der transversalen Towerstruktur in den beiden Oktanten der Platte. Die Werte für nicht defekte Kanäle sollen innerhalb der beiden waagerechten Linien im jeweiligen Tower liegen. Es ist zu beachten, daß in der Familie 7 die Tower 1 und 3 nicht existieren (Kanäle 17-32, 47-64, 353-368 und 385-400 in obiger Abbildung).

Es ist zu erwarten, daß sich die "warmen" und "kalten" Kapazitätswerte nur geringfügig voneinander unterscheiden. Ihre Größe ist durch die wenig temperaturabhängigen Leitungs- und Paddimensionen und -abstände zur Bleiplatte sowie durch die Dielektrizitätskonstanten der Prepeg- und Kaptonsichten bestimmt. Letztere sind ebenfalls in nur geringem Maße temperaturabhängig, wie durch die erhaltenen Resultate bestätigt wird.

Einen Vergleich zwischen einer Warm- und Kaltmessung zeigt der Korrelationsplot in Abb.4.7. Die schon bei den Kartentests gewonnene Erfahrung, daß das Abkühlen an sich nicht zu Schäden führt, wird durch die gute Korrelation der Kapazitätswerte bestätigt. Im Testverfahren selbst sind Fehlermöglichkeiten gegeben, wie das Bild der unkorrelierten Verteilung zeigt. In diesem Fall ist nach dem Auftauen die durch Kondensation entstandene Wasserschicht auf der Platte nicht entfernt worden. Ihr Ein-

Bereich	1	2 <sup>†</sup>	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tower	0,3 <sup>†</sup>	1,2	4,7	5,6	8,11	9,10	12,15	13,14	16,17	18,19	20

Tabelle 4.2: Verteilung der Tower auf nur 11 Gebiete unterschiedlicher mittlerer Kapazitäten - siehe dazu auch die Pad- und Towerstruktur in Abb.1.5 auf Seite 15.

†- 0,2 in Familie 6 und 7, ‡- existiert nicht für Familie 6 und 7.

fluß erhöht die Kapazität einzelner Kanäle bis zu einem Faktor 10.

## 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abschließend werden die in diesem Abschnitt besprochenen Ergebnisse sowohl in Bezug auf die Häufigkeit des Auftretens spezieller Fehler als auch in Bezug auf die Kapazitätswerte selbst zusammengefaßt.

### 4.4.1 Verteilung der Kapazitätswerte

Vom Design der Auslesekarten her sollen Padkapazitäten in einem Tower einer bestimmten Familie um nur maximal 10% voneinander abweichen. Dabei wird von der idealen Konstellation gleicher Abstände aller Pads und Leitungen von der Bleiplatte ausgegangen. Diese ist, wie Messungen der Plattendicken zeigen, in der Realität nicht zu erreichen. Die real gemessenen mittleren prozentualen Variationen für alle getesteten 33 Platten sind in Abb.4.8 und Abb.4.9 dargestellt. Extrem große Abweichungen treten besonders für die Tower an der Innen- und an der Außenkante der Platte auf (Randeffekte aufgrund der Endlichkeit des Kalorimeters).

Die Ausleseplatten können in je 11 Bereiche gleicher mittlerer Kapazität aufgeteilt werden. Die Zuordnung der Tower zu diesen ist der Tabelle 4.2 zu entnehmen. Jeder Bereich mit Ausnahme des nur aus Tower 20 bestehenden Bereichs 11 ist auf einer Ausleseplatte viermal zu finden (Bereich 11 tritt zweimal pro Platte auf). Die mittleren Kapazitätswerte in den Abb.4.8 und 4.9 beruhen also auf einer Statistik von  $n \times 4$  bzw.  $n \times 2$  Mittelwerten einzelner Tower. Dabei ist  $n$  die Zahl der Platten pro Familie.

### 4.4.2 Fehlerstatistik

Von allen 33 getesteten Ausleseplatten des elektromagnetischen Viertelstacks sind drei völlig ohne Fehler gefunden worden. Der Rest hat jeweils zwischen ein bis sechs Defekte. Abb.4.10 zeigt die Anteile der fehlerhaften Plattenkanäle, sortiert nach den verschiedenen Fehlerqualitäten. Besonders der relativ hohe Anteil der hochohmigen Kurzschlüsse ist bemerkenswert und läßt die Vermutung einer leitenden Verunreinigung im Prepreg aufkommen. Die genaue Ursache ist aber noch nicht verstanden.

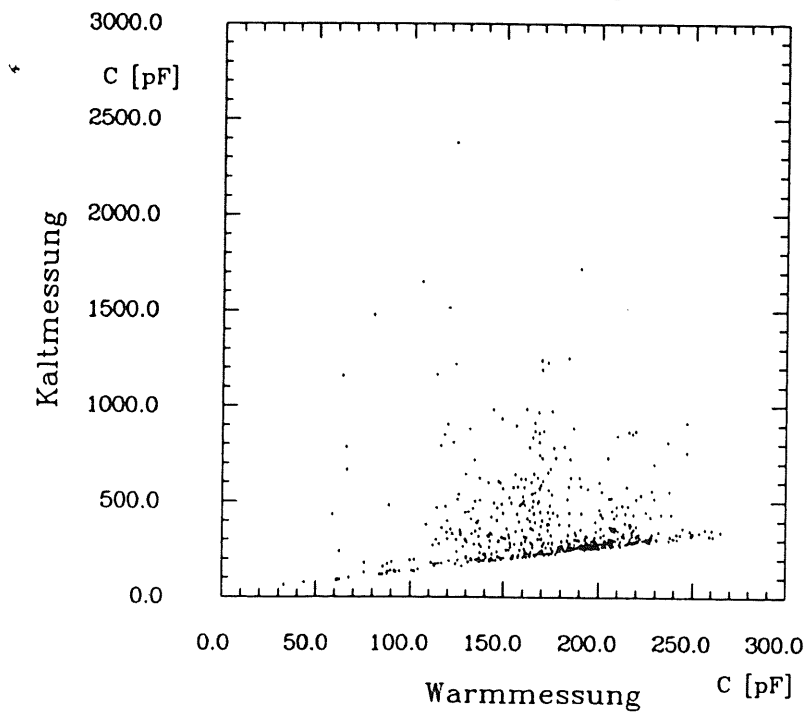
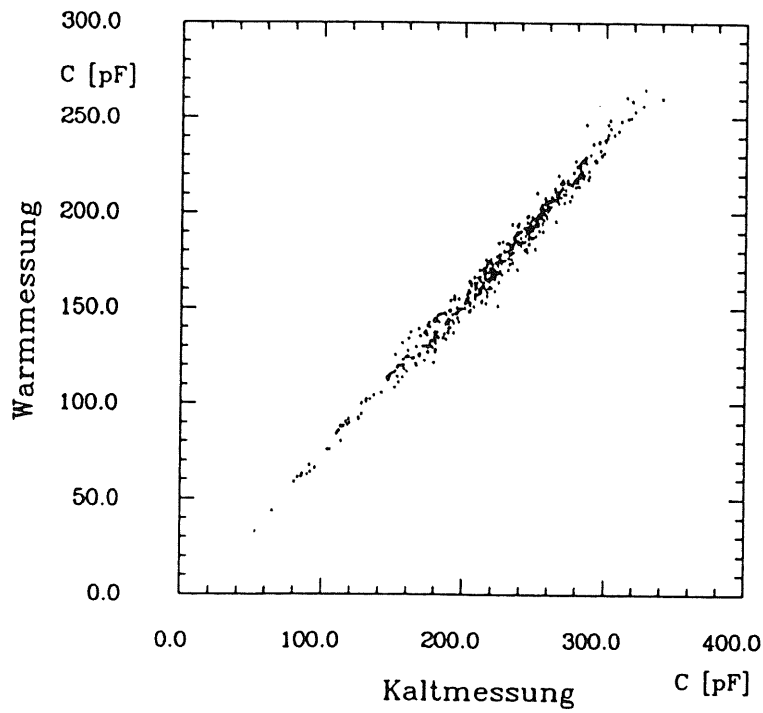


Abbildung 4.7: Korrelation zwischen "warmen" und "kalten" Meßwerten. Das untere Bild zeigt die Ergebnisse einer fehlerhaft durchgeführten Messung.

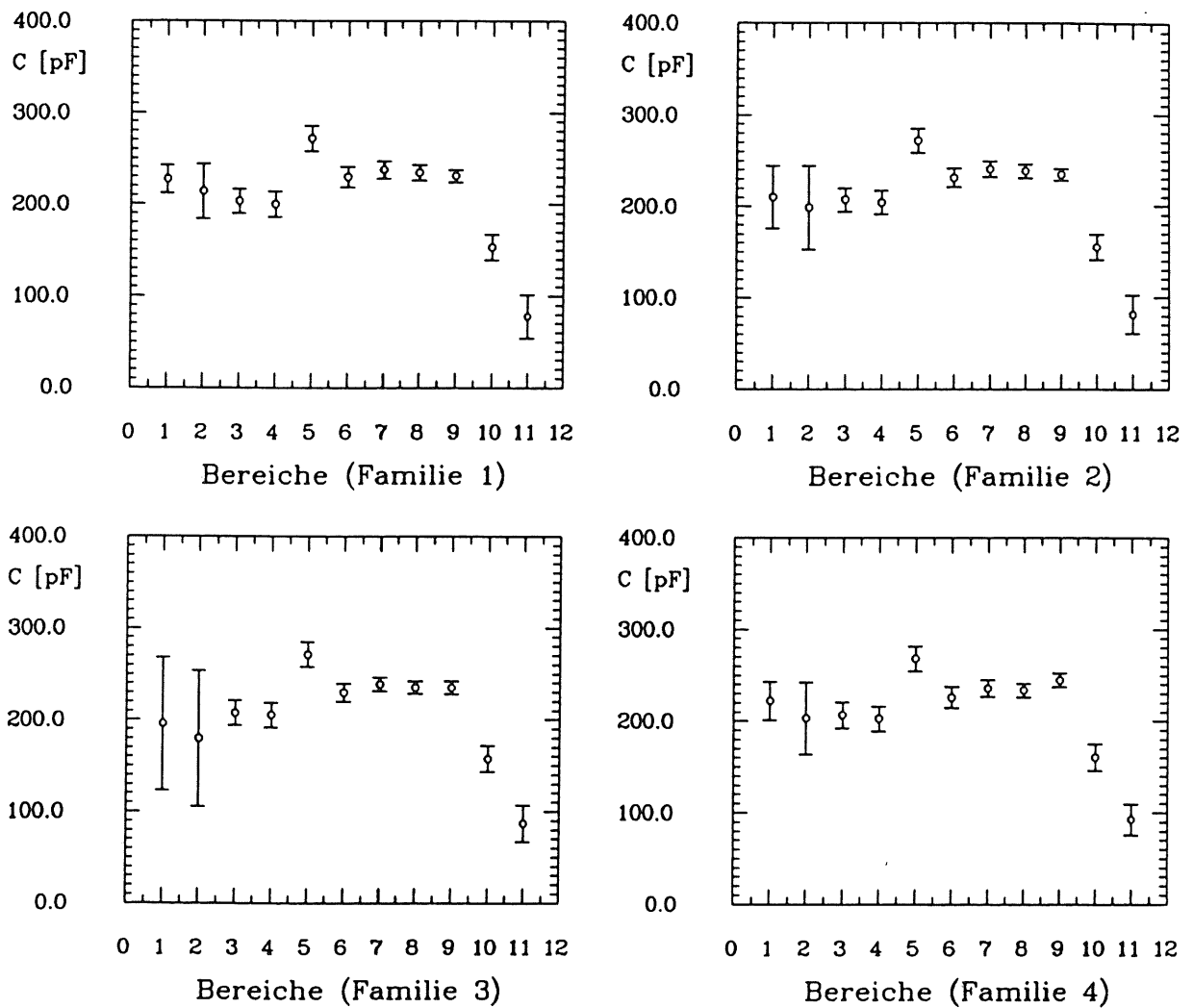


Abbildung 4.8: Die mittleren Kapazitäten für die 11 verschiedenen Bereiche einer Ausleseplatte. In dieser Abbildung sind die Werte der Familien 1 bis 4 dargestellt. Auffallend sind die relativ großen mittleren Abweichungen für kantennahe Bereiche (1,2,11) (die Balken an den Punkten geben nicht den Fehler des Mittelwertes an, sondern das mittlere  $\sigma_t$  über alle Platten einer Familie). Zur Statistik: von Familie 1,2 und 3 sind jeweils drei Platten gemessen worden, von Familie 4 und 5 vier, von Familie 6 sechs, und von Familie 7 sind es acht.

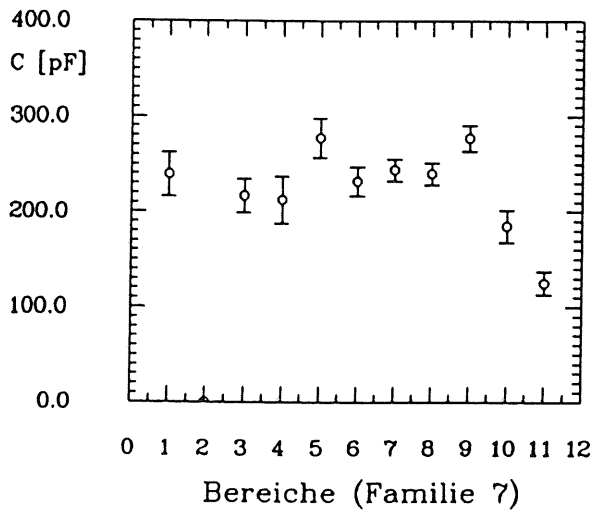
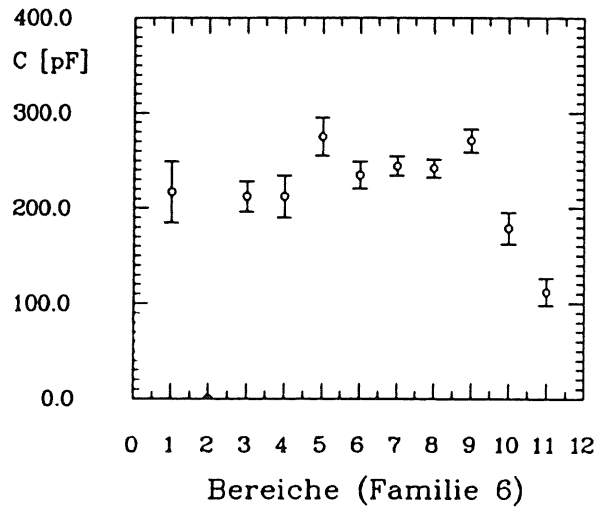
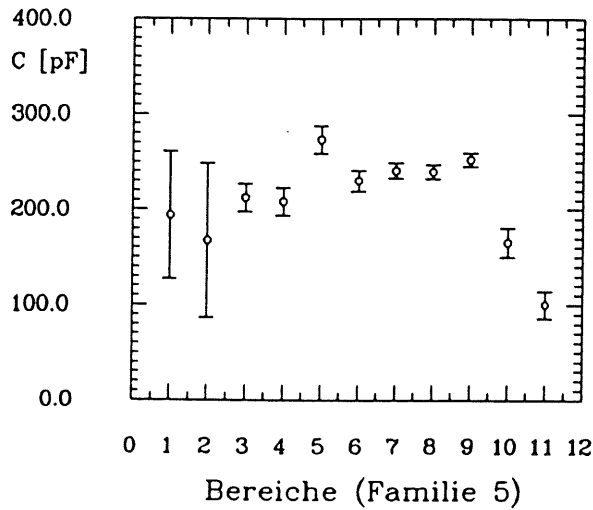


Abbildung 4.9: Die mittleren Kapazitäten für die 11 verschiedenen Bereiche einer Ausleseplatte. In dieser Abbildung sind die Werte der Familien 5 bis 7 dargestellt. Für diese Messungen gilt das schon bei den vorherigen Familien Gesagte.

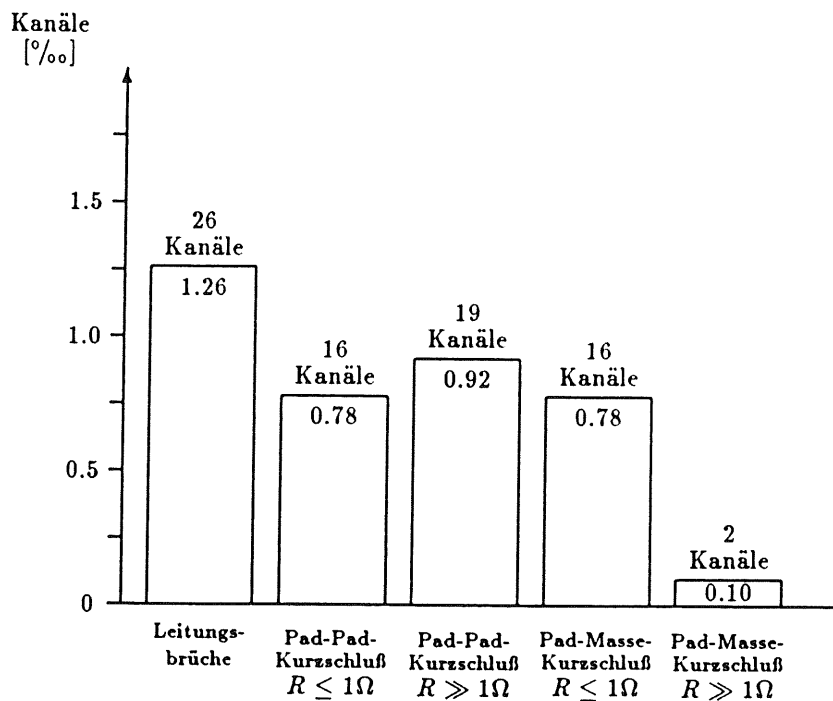


Abbildung 4.10: *Relative Verteilung der Fehlerqualitäten. Die Gesamtzahl der berücksichtigten Plattenkanäle ist 20608, verteilt auf 33 Ausleseplatten. Es ist zu beachten, daß die Zahl der Kanäle nicht der Zahl der elektronischen Auslesekanäle entspricht - diese ist wegen des longitudinalen Zusammenschlusses der Plattenkanäle zu Auslesekanälen in den Tovern viel kleiner. Hier sind die individuellen Kanäle der Ausleseplatten gemeint, also die Verbindung von jeweils zwei Pads an einem Steckerkontakt der Platten. Bei den Pad-Pad-Kurzschlüssen wird jeder Fehler einem Kanal zugeordnet.*



# Kapitel 5

## Abkühltest an einem Modell des hadronischen Absorbers

### 5.1 Zielsetzung

Als letztes Projekt wird noch kurz das Abkühlen eines Modells des hadronischen Absorbers besprochen. Es soll untersucht werden, ob es möglich ist, das komplette Modell aufrecht stehend auf eine möglichst niedrige Temperatur abzukühlen, ohne es vollständig mit dem Kühlmittel (flüssiger Stickstoff) zu bedecken. Dabei soll der Temperaturgradient über den Stahlplatten ermittelt werden.

Das Modell des Edelstahlabsorbers für das hadronische Vorwärtskalorimeter IF2H besteht aus vier im Abstand von etwa 11 mm hintereinander angeordneten Stahlplatten, deren Querschnitt der halben Querschnittsfläche des späteren Absorbers entspricht (die Höhe beträgt etwa 1250 mm, die Gesamtbreite etwa 2500 mm). Mittels einer Stützstruktur aus Aluminium wird dieses Modell in einer etwa 50 cm hohen, mit Rohazell isolierten Aluminiumwanne aufrecht aufgestellt (Abb.5.1). An das Modell werden dann noch Aluminiumplatten angelegt, deren Wirkung noch besprochen wird. Durch Anbringen von Styrodurplatten werden die Seitenwände der Wanne auf insgesamt etwa 1.30 m erhöht. Weitere Styrodurplatten werden lose als Abdeckung über den Behälter gelegt - aus Sicherheitsgründen darf innerhalb des Behälters kein Druck aufgebaut werden.

Es ist bereits eine kleinere Stahlplatte in vertikaler Lage abgekühlt worden ([LG87]). Dabei wurde der flüssige Stickstoff im Kühlgefäß auf einem relativ niedrigen Stand gehalten ( $\sim 4.5$  cm bei einer Höhe der Stahlplatte von ca. 50 cm) und der zeitliche Temperaturverlauf an übereinanderliegenden, äquidistanten Punkten auf der Plattenoberfläche aufgenommen. Nach etwa vier Stunden stellte sich ein stabiler Zustand mit einem Gradienten von  $\sim 1 \text{ grad}\cdot\text{cm}^{-1}$  ein.

Dieser Test soll nun für die große Struktur wiederholt werden. Außerdem werden die Gaps auf eine Minimalbedingung ( $d \geq 100$  mm) hin überprüft. Dazu werden Streifen mit Kontakten der entsprechenden Höhe in die Gaps geschoben. Berührt eine Stahlplatte einen der Kontakte,

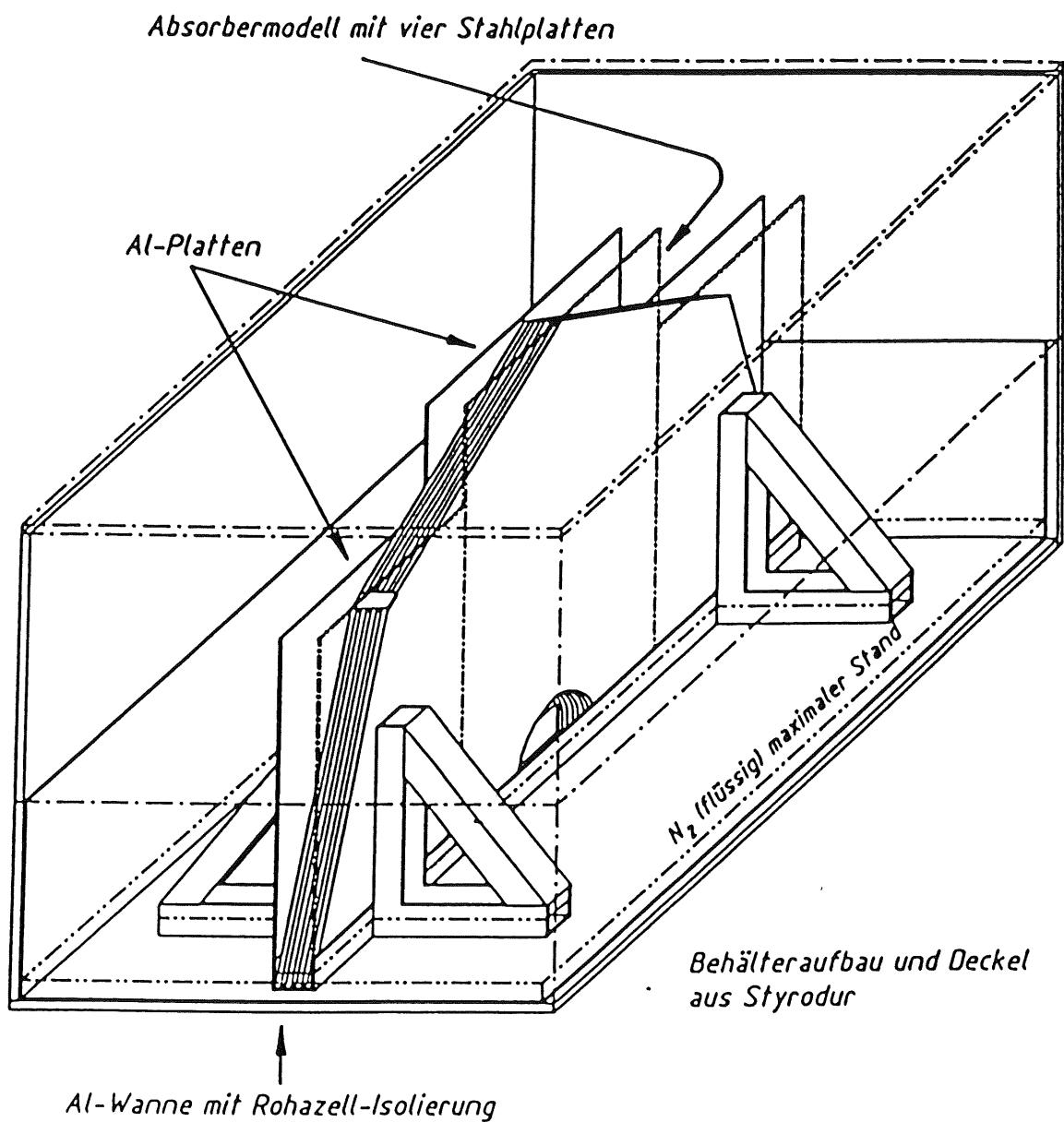


Abbildung 5.1: Aufbau des Abkühlversuchs. Das Absorbermodell besteht aus vier 16 mm dicken Edelstahlplatten, die der halben Querschnittsfläche des späteren H1-Absorbers entsprechen.

springt der elektrische Widerstand zwischen diesem und der Stahlplatte von  $\infty$  auf einen kleinen endlichen Wert. Diese Überprüfung ist notwendig, um sicherzustellen, daß die unabhängigen Ausleseeinheiten (maximale Breite 9.6 mm) auch im Kalten noch in die Gaps passen und nicht etwa durch mechanische Verformungen der Absorberplatten zerstört werden. Bei liegender vollständiger Abkühlung des Modells ist in einem vorhergehenden Versuch festgestellt worden, daß obiger Effekt nicht auftritt; dieses Ergebnis wird für den - wie im späteren Kalorimeter - senkrecht stehenden Absorber bestätigt. Ein Kontakt wird nicht gefunden.

## 5.2 Der Wärmetransport im Absorbermodell

### 5.2.1 Der Wärmehaushalt zwischen Stahl und Kühlmittel

Der Pegel des flüssigen Stickstoffs soll dem vorhandenen Behälter angepaßt werden, um das Absorbermodell ohne einen zu großen Aufwand durch z.B. Bau eines speziellen Kryostaten abzukühlen. Er beträgt maximal 50 mm über dem Wannenboden. Damit erfolgt die Abkühlung durch den Transport der in den vier Stahlplatten gespeicherten Wärmemenge nach unten. Dort wird die Wärme an den flüssigen Stickstoff abgegeben, welcher dadurch verdampft und somit zur Konstanthaltung des Flüssigkeitsstandes (und damit zur weiteren Wärmeabfuhr) aus einer externen Quelle nachgefüllt wird. Die dem Stickstoff zugeführte Verdampfungswärme wird dem Stahl entzogen, er kühlt sich ab. Einen weiteren Kühleffekt neben der Verdampfung des Kühlmittels bringt der Wärmehaushalt zwischen den Stahlplatten und dem entstehenden kalten Stickstoffgas. Quantitativ sind diese Effekte nur sehr schwer abzuschätzen, zumal der Behälter zur Vermeidung von Überdruck durch die Kühlmittelverdampfung nicht absolut dicht sein durfte. Es fand ein ständiges Abdampfen des sich entlang der Stahlplatten erwärmenden Stickstoffgases in die Halle statt; dieser Gas- und Energieverlust war nicht zu berechnen oder zu messen.

### 5.2.2 Der Wärmetransport im Stahl

Der Transport von Wärme aus dem über dem direkten Austauschbereich liegenden Absorberteil nach unten läßt sich in Analogie zur elektrischen Stromdichte im statischen Fall  $\partial T/\partial t = 0$  durch [Kl56, Ki80]

$$\vec{j} = -\kappa \cdot \vec{\nabla} T \quad (5.1)$$

beschreiben.  $\kappa$  ist dabei die thermische Leitfähigkeit (in  $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$ ). Der Wärmestrom  $W$  durch eine senkrecht zu  $\vec{j}$  liegende Fläche  $A$  ergibt sich dann zu

$$W = \int \vec{j} \cdot d\vec{f} = -\kappa \cdot \frac{\partial T}{\partial s} \cdot A. \quad (5.2)$$

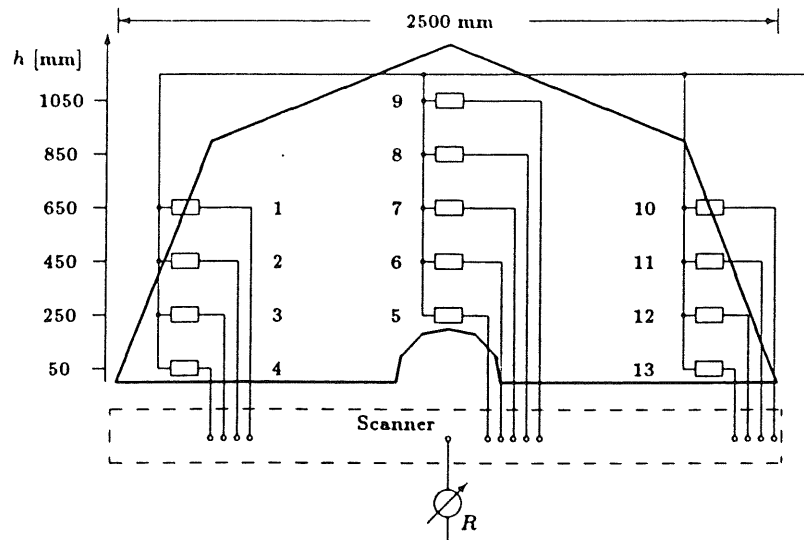


Abbildung 5.2: Die Position der zur Bestimmung der Temperaturverteilung benutzten Pt100-Widerstände. Der vertikale Abstand zwischen den Meßpunkten einer Reihe ist jeweils 20 cm; horizontal benachbarte Punkte liegen auf gleicher Höhe.

$\partial T/\partial s$  ist der Temperaturgradient in Richtung der Flächennormalen von A. Somit ist der Wärmestrom (wie auch der elektrische Strom) proportional zur Querschnittsfläche und umgekehrt proportional zur Länge des Leiters. Die starke Analogie zwischen beiden Strömen liegt in der Tatsache begründet, daß zumindest in reinen Metallen die Wärmeleitung durch die Leitungselektronen erfolgt und das Gitter einen nur unwesentlichen Beitrag liefert. In einer Legierungen wie Edelstahl werden Gittereffekte die Wärmeleitfähigkeit verschlechtern; dennoch gilt auch in diesem Fall Gl.(5.2). Die Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit ist besonders bei tiefen Temperaturen für Edelstähle nicht in Form einer Funktion zu beschreiben. Es liegen allenfalls diskrete Werte für bestimmte Temperaturen vor, die zu einer Abnahme der Leitfähigkeit mit abnehmender Temperatur tendieren (bei  $100^\circ\text{K}$  ist  $\kappa = 9.0 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{grad}^{-1}$  für die von uns benutzte Stahllegierung, aus [LB72]).

Neben der Abkühlung durch Wärmeleitung wird dem Absorbermodell durch Wärmestrahlung aus dem ihn umgebenden Luftvolumen Wärme zugeführt. Um diesen unerwünschten Effekt möglichst klein zu halten, werden an die Edelstahlstruktur Aluminiumplatten angelegt (Abb.5.1). Sie übernehmen eine Abschirmfunktion, da Aluminium eine sehr viel größere Wärmeleitfähigkeit als der Edelstahl hat. Die von außen zugeführte Wärme wird also durch das Aluminium schnell in das Kühlmittel abgeleitet.

## 5.3 Durchführung der Messung

Die Temperaturmessung erfolgt durch in die Stahlplatten eingeklebte temperaturabhängig Widerstände (Pt 100). An bestimmten Punkten der vorderen Stahlplatten sind dafür entsprechende Nuten eingefräst. Damit wird ein guter Temperaturübertrag vom Stahl auf die Widerstände erreicht (größtmögliche Kontaktfläche).

Der Widerstandwert der Pt 100 ist im Temperaturbereich von  $-200^{\circ}\text{C}$  bis  $+20^{\circ}\text{C}$  linear von der Temperatur abhängig. Durch wiederholte Messung des elektrischen Widerstands bei zwei gut bekannten Temperaturen  $-0^{\circ}\text{C}$  (Kältemischung) und  $-196^{\circ}\text{C}$  (flüssiger Stickstoff) - werden die insgesamt 16 zur Auswertung benutzten Temperaturfühler geeicht (Zweipunktkalibration).

### Messen der Temperaturverteilung

Die eigentliche Messung beginnt mit langsamen Einfüllen des flüssigen Stickstoffs in den Kühlbehälter. Gleichzeitig startet eine kontinuierliche Abfrage der Widerstandswerte über den Scanner an die Temperaturfühler. Alle fünf Minuten werden die Werte eines gerade durchlaufenen Abfragezyklus gesichert. Zur Auswertung wird die vollständig ermittelte Temperaturverteilung auf der einen Seite des Absorbermodells herangezogen.

### 5.3.1 Ergebnisse der Temperaturmessungen

#### Zeitlicher Temperaturverlauf

Abb.5.3 zeigt den Verlauf der Temperatur an den verschiedenen Meßpunkten in Abhängigkeit von der Kühldauer. Nach etwa  $11\frac{1}{3}$  Stunden ist ein quasi stationärer Temperaturgradient über der Stahloberfläche erreicht ( $\partial T/\partial t \ll \frac{1}{100} \text{ grad}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Weitere Stickstoffzufuhr (bei konstanter Füllhöhe) gleicht im wesentlichen nur noch die Wärmezufuhr an den Absorber durch die Undichtigkeiten im Behälteraufbau aus. Der Versuch wird abgebrochen. Der zuletzt erreichte Kühlmittelstand in der Wanne beträgt etwa 50 mm über dem Boden. Diese Aussage stützt sich einerseits auf den Temperaturverlauf an den beiden niedrigsten Meßpunkten 4 und 13 ( $T = \text{const}$ ) und andererseits auf die gegenüber dem Startzeitpunkt unveränderte Kapazität eines in einer Höhe von etwa 55 mm über dem Behälterboden angebrachten Füllstandkondensators. Letzterer zeigt die Füllstandshöhe des Kühlmittels als Kapazitätserhöhung an. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, daß die Dielektrizitätskonstante des flüssigen Stickstoffs etwa  $1.5 \cdot \epsilon_{\text{Luft}}$  beträgt.

Die Abkühlgeschwindigkeit ist in Abb.5.5 für verschiedene Punkte dargestellt. Abgesehen von den sprunghaften Temperaturänderungen an Punkten, an denen die Stahlplatten in das Kühlmittel eintauchen, wurde ein relativ langsames Abkühlen - weniger als 1 grad/min - erreicht.

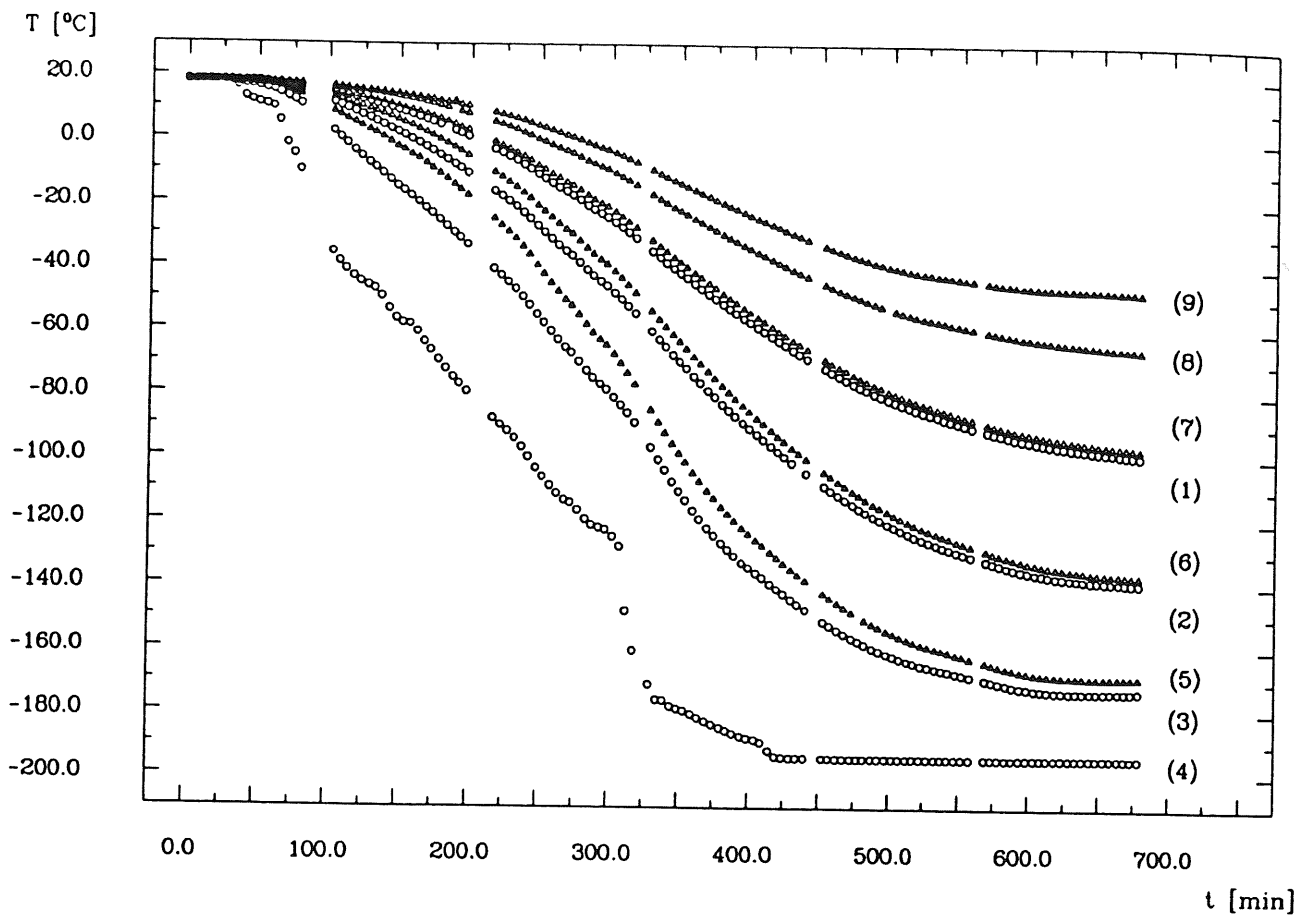


Abbildung 5.3: Zeitlicher Verlauf der Abkühlung an den in Abb.5.2 gezeigten Punkten. Deutlich ist der Temperatursprung am Punkt 4 zu sehen. Nach etwa 5 Stunden hat der Kühlmittelstand diesen Punkt erreicht.

### Der Temperaturgradient

Entlang drei "Bahnen" auf der vorderen Stahlplatte kann der vertikale Temperaturgradient bestimmt werden. Er ist ein Maß für die auftretenden Spannungen im Absorber, deren Diskussion an dieser Stelle zu weit führen würde. Der horizontale Gradient ist sehr klein (dazu Abb.5.3 und 5.4). Trotz der in der Plattenmitte am Strahlrohrausschnitt fehlenden Austauschzone hat die Stahlplatte an Orten gleicher Höhe über dem Kühlmittel eine annähernd konstante Temperatur. Dies deutet auf eine gleichmäßige Abkühlung hin.

### 5.3.2 Konsequenzen aus dem Abkühlversuch

Der Versuch hat gezeigt, daß das Abkühlen einer relativ großen Stahlkonstruktion (der Viertelstackabsorber ist nochmal um einen Faktor  $\sim 4.5$  schwerer als dieses Modell) nur durch die Wärmeleitung im Stahl - bei einer relativ kleinen Wärmeaustauschzone - nicht realisierbar ist. Die erreichten Temperaturgradienten bedeuten eine erheblich zu große mechanische Beanspruchung der Struktur.

Eventuell kann der einfache Aufbau dieses Versuches noch durch eine Einrichtung zur künstlichen Verdampfung des Kühlmittels, z.B. durch eine Heizschlange, ergänzt werden. Damit kann die Gastemperatur im

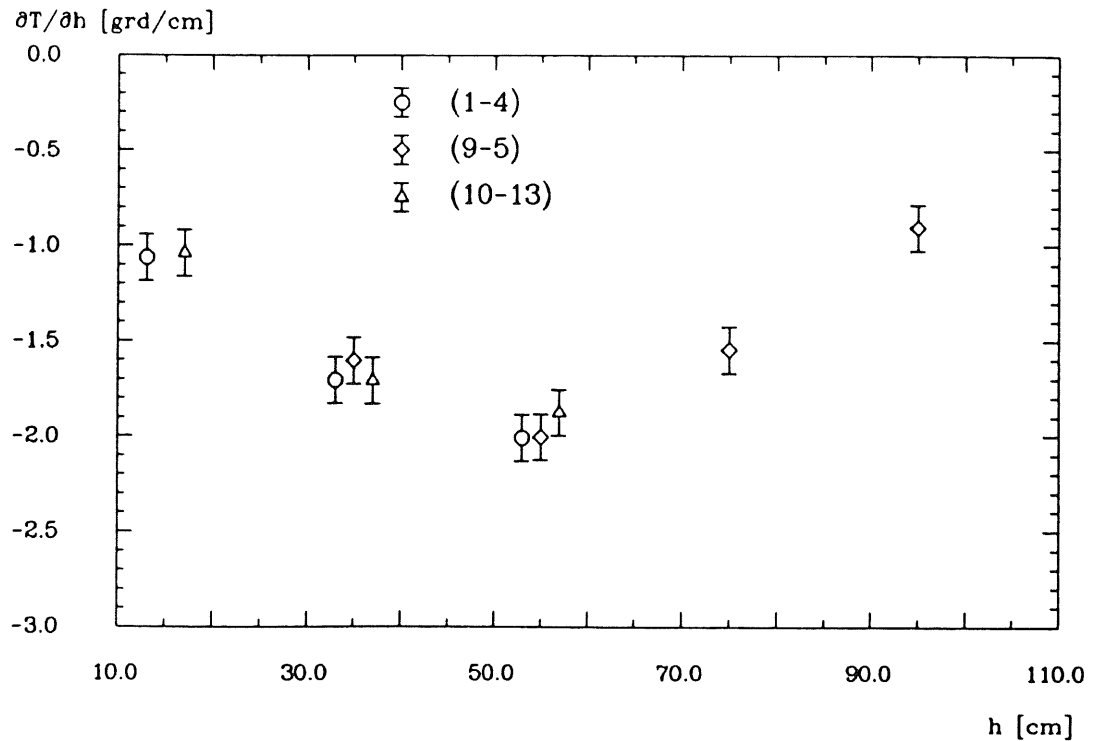


Abbildung 5.4: Der Temperaturgradient nach Beendigung der Abkühlung. Die Höhen, an denen der Gradient bestimmt wird, sind jeweils identisch; die Punkte sind nur aus Übersichtsgründen auseinandergezogen.

oberen Behälterbereich herabgesenkt werden und somit ein zusätzlicher Kühleffekt entstehen. Ob dieser ausreicht, um den Temperaturgradienten deutlich zu verringern, ist fraglich und einem weiteren Test vorbehalten. Für ein Abkühlen des Viertelstackabsorbers zu Testzwecken bleibt nur der Bau eines "echten" Kryostaten, in dem er vollständig und langsam abgekühlt werden kann.

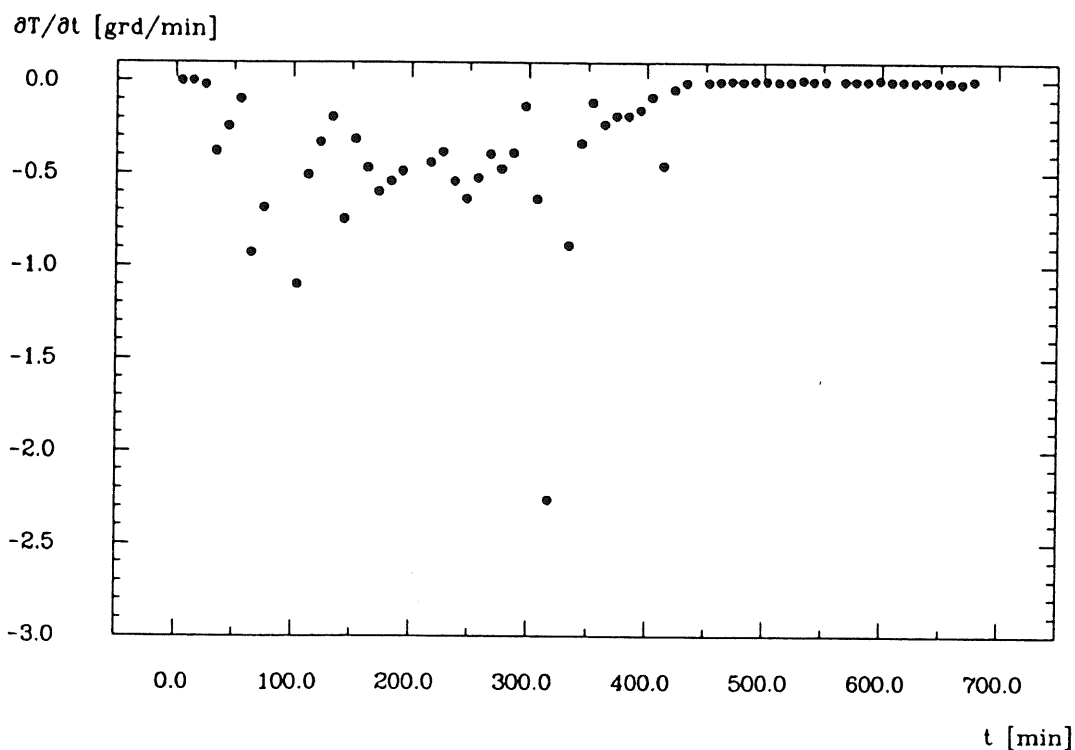
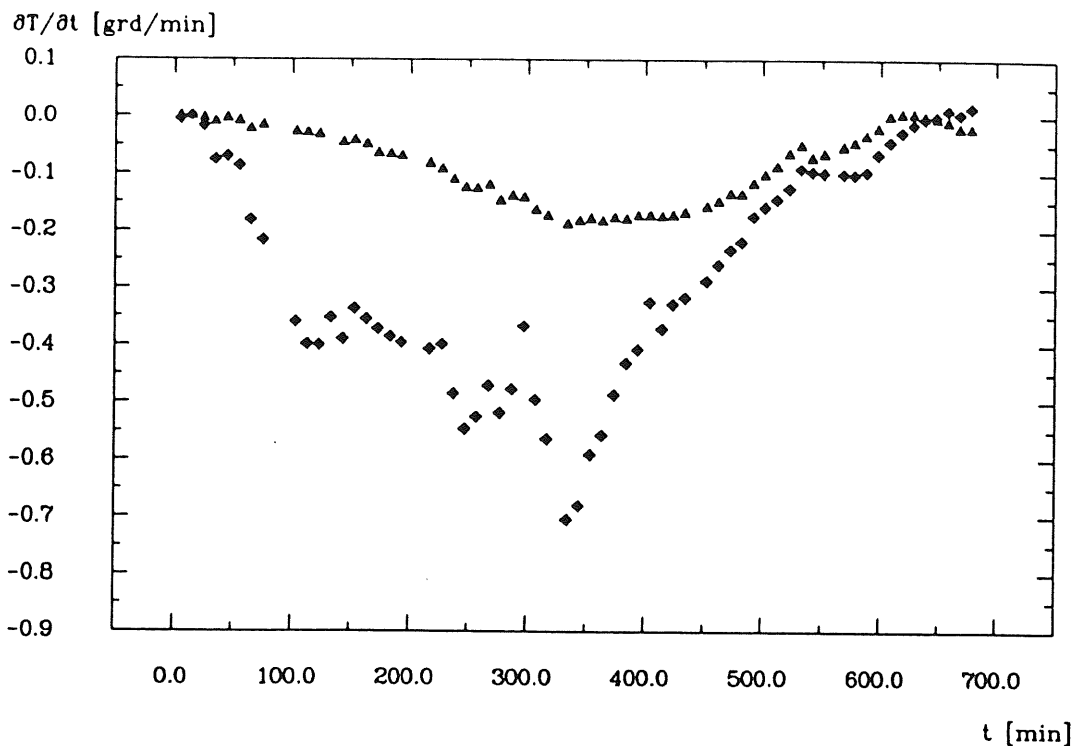


Abbildung 5.5: Zur Abkühlgeschwindigkeit: Im oberen Bild ist die Temperaturänderung pro Minute für den obersten (9, Dreiecke) und einen mitten auf der Stahlplatte liegenden Punkt (7, Rauten) dargestellt. Das untere Bild zeigt die Abkühlung am Punkt 4. Die sprunghafte Abkühlung im unteren Bereich ist durch den Übergang von der Kühlung nur durch kaltes Stickstoffgas zum direkten Wärmeaustausch zwischen flüssigem Stickstoff und dem Absorbermodell bedingt. Ansonsten wurde versucht, die Stahlstruktur nicht schneller als etwa 1 grad/min abzukühlen.



# Der aktuelle Stand und Ausblick

Abschließend wird der bei Vorlage dieser Arbeit erreichte Stand beim Aufbau des Eichkalorimeters zusammengefaßt. Die mechanischen Arbeiten am elektromagnetischen Teil, also das Kleben der Auslese- und Hochspannungsplatten, das Anlöten der Stecker an die Ausleseplatten und das Auftragen der hochohmigen Schicht auf die Hochspannungsplatten, sind praktisch abgeschlossen. In Kürze kann mit dem Zusammenstellen der Platten zum Stack begonnen werden. Bis dahin werden noch Leitungsfehler auf den Ausleseplatten - soweit möglich - repariert.

Im hadronischen Teil beginnt zur Zeit die Lieferung der Auslesekarten. Sie müssen dann ähnlich den elektromagnetischen Auslesekarten auf Leitungsbrüche und -kurzschlüsse getestet werden. Eine besondere Schwierigkeit ist dabei der Test auf nicht angeschlossene Teile des Massenetzes auf jeder Karte. Es werden Möglichkeiten einer kapazitiven Überprüfung (neben einem Stromtest wie im elektromagnetischen Fall) diskutiert. Dazu sind allerdings sehr genaue Kapazitätsmessungen notwendig, da ein kurzes nicht angeschlossenes Leitungsstück eine nur geringe Kapazitätsverminderung gegenüber einer entsprechend intakten Karte bedeutet.

Die Stahlbleche für die unabhängigen Ausleseeinheiten werden ebenfalls gerade mit Kaptonfolie beklebt, gebohrt und zugeschnitten. Danach wird die hochohmige Schicht aufgedruckt und jeweils zwei Bleche mit einer Auslesekarte zu einem Independent Read-Out Board zusammengenietet. Die fertigen Einheiten werden schließlich in den Edelstahlabsorber eingeschoben und per Spannschrauben fixiert.

Die fertigen Stacks sind besonders hinsichtlich ihrer Hochspannungsfestigkeit zu überprüfen. Dazu werden alle Kanäle zusammen mit dem Blei- oder Stahlabsorber auf Masse gelegt und eine negative Hochspannung auf die hochohmigen Flächen gebracht. Dabei können Funkenbildungen, aber auch Kriechströme beobachtet werden. Außerdem wird ein einfacher Test auf Pad-Masse-Kurzschlüsse im vollständigen Stack durchgeführt. Dazu werden mittels speziell präparierter Stecker alle Auslesekanäle miteinander verbunden und dann der Widerstand zwischen diesen und der Stackmasse gemessen.

Schließlich sollen beide Eichkalorimeter im Sommer 1988 beim CERN in Genf einem Strahltest zur Kalibration der Auslesekanäle unterzogen werden. Im Rahmen dieses Tests wird auch die für die H1-Kalorimeter IF1E und IF2H zu erwartende Energie- und Ortsauflösung gemessen.

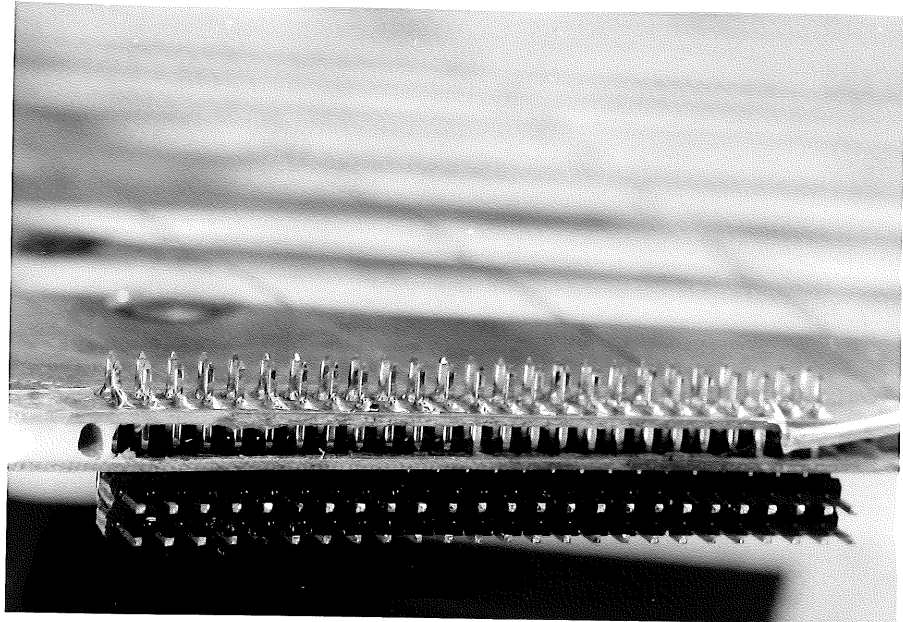


Abbildung 5.6: *Ein Stecker einer Ausleseplatte des elektromagnetischen Viertelstacks.*

Nachfolgend werden noch einige Photos aus der Produktion und der Durchführung einiger Testmessungen gezeigt.

Abb.5.6 zeigt einen Stecker an der Kante einer Ausleseplatte. Die Steckersockel stellen die elektrische Verbindung zwischen zwei sich gegenüberliegenden Pads her.

Abb.5.7 zeigt das Aufbringen der hochohmigen Schicht auf eine Hochspannungsplatte mittels einer Schaumstoffrolle. Die Kantenbereiche und die Bereiche um die Montagelöcher werden durch Abkleben ausgespart. Nach dem Anstrich werden die Hochspannungsplatten in einem Ofen bei etwa  $75^{\circ}\text{C}$  "gebacken". Dabei härtet die hochohmige Schicht aus. Das Einbringen einer Platte in den Ofen ist in Abb.5.8 dargestellt.

Nach dem Aushärten der hochohmigen Schicht wird ihr Widerstand an einigen Punkten gemessen (Abb.5.9).

Abb.5.10 zeigt ein auf eine Hochspannungsplatte geklebtes Testgitter, welches Koordinaten auf der Platte festlegt. Die Ergebnisse der Messung des Widerstandes der hochohmigen Schicht an den durch dieses Gitter definierten Punkten ist auf Seite 42 dargestellt.

Im nächsten Bild (Abb.5.11) ist der kapazitive Test einer Ausleseplatte nach Verfahren B dargestellt. Ein Kontaktstift wird manuell auf ein vom Rechner vorgegebenes Pad positioniert. Der Kapazitätswert dieses Kanals wird per Tastendruck vom Computer aufgenommen und gespeichert. Eventuell gefundene Fehler werden auf der Platte markiert und repariert (Abb.5.12).

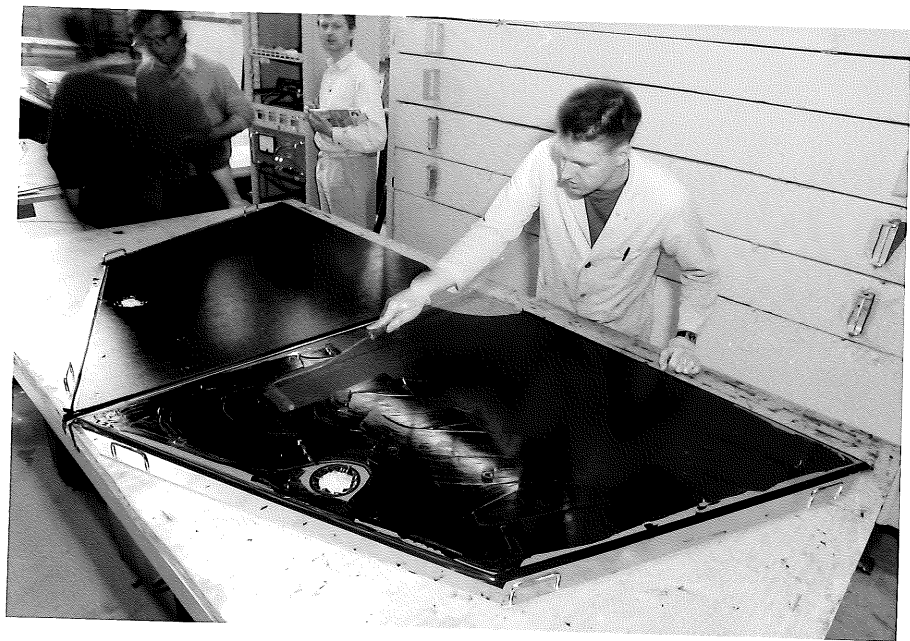


Abbildung 5.7: *Aufbringen der hochohmigen Schicht auf die Hochspannungsplatten des elektromagnetischen Viertelstacks.*

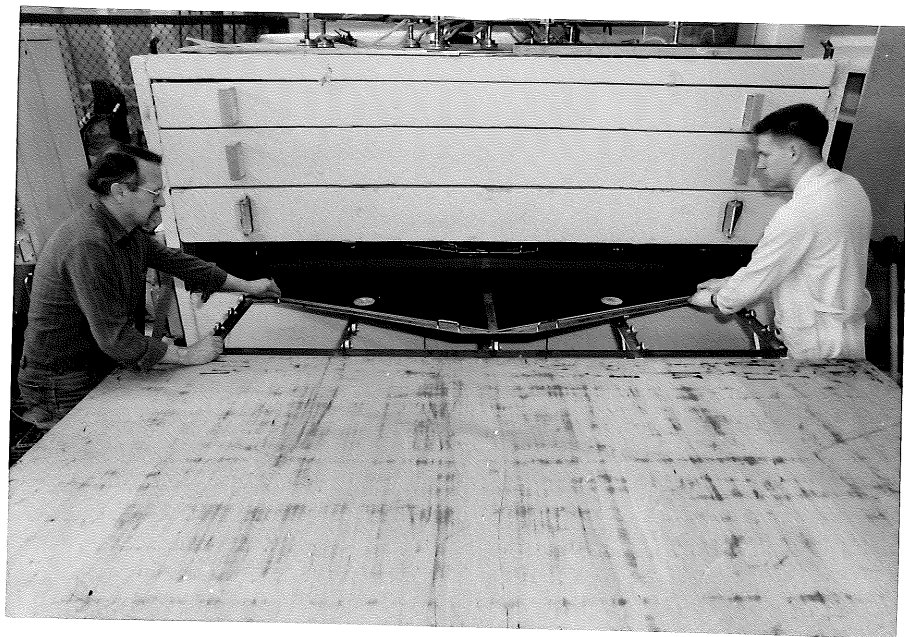


Abbildung 5.8: *Die Hochspannungsplatte wird in den Ofen gebracht und dort gebacken.*



Abbildung 5.9: Nach dem "Backen" wird der Widerstand der hochohmigen Schicht an einigen Punkten gemessen.



Abbildung 5.10: Koordinatenmuster für Testmessungen des Widerstandes der hochohmigen Schicht.



Abbildung 5.11: *Kapazitiver Plattentest nach dem Verfahren B.*

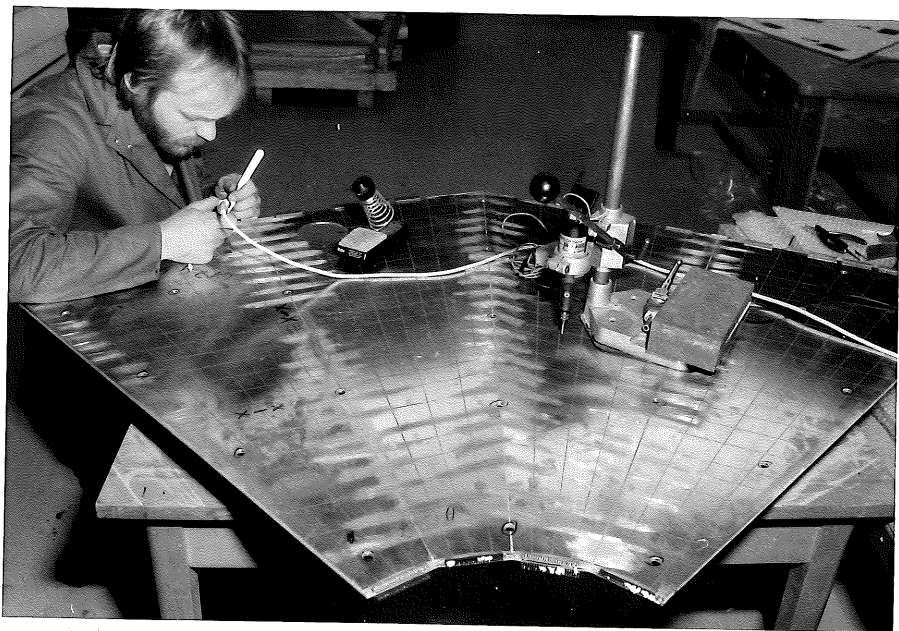


Abbildung 5.12: *Reparaturarbeitsplatz für Ausleseplatten.*

# Danksagung

Für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung möchte ich mich bei allen Gruppenmitgliedern der F21 bedanken. Insbesondere danke ich

- F. Brasse, W. Flauger, J. Gayler und V. Korbel für die Betreuung der Arbeit sowie einer Fülle von Diskussionen und Anregungen;
- H. Küster für die Unterstützung bei den Meßverfahren und wertvolle Hinweise bei der Software;
- G. Falley, J. Koll und K. Thiele für die Hinweise bei den die Konstruktion, den Bau des Eichkalorimeters und die verwendeten Materialien betreffenden Fragen;
- A. Bruhnsen für die Durchführung einer ganzen Reihe sehr spezieller Messungen;
- und meinen (zeitweiligen) Mitdiplomanden W. Burmeister, P. Haase und C. Zeitnitz für die Hilfe und Diskussionen bei allen die Kalorimeterphysik betreffenden Fragen.

Ganz besonders möchte ich auch meinen Eltern danken, die mir durch ihre Unterstützung das Studium und damit diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben.

*...and of course many thanks for a lot of ideas and discussions to Igor Tichomirow from ITEP, Moscow!*

Ich versichere, die vorliegende Arbeit unter Angabe aller wesentlichen Quellen und Hilfsmittel selbstständig angefertigt zu haben.



# Literaturverzeichnis

- [Am80] U. Amaldi, *Fluctuations in Calorimetry Measurements*, CERN-EP/80-212, 1980
- [Br88] Interne Mitteilung von F. Brasse, Mai 1988
- [Bu88] W. Burmester, *Messung der Energie von Elektronen mit Blei-Flüssigargon-Kalorimetern*, Diplomarbeit DESY F21, März 1988
- [En72] J. Engler *et. al.*, *A Total Absorption Spectrometer for Energy Measurements of High-energy Particles*, Nuclear Instruments and Methods 106 (1973) 189-200, North Holland Publishing, Amsterdam
- [En84] J. Engler, *Status and Perspectives of Liquid Argon Calorimeters*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 225 (1984) 301-309, North Holland Publishing, Amsterdam
- [En85] J. Engler, *Perspectives in Calorimetry*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A235 (1985) 525-529, North Holland Publishing, Amsterdam
- [Fa85] C. W. Fabjan, *Calorimetry in High Energy Physics*, CERN-EP/35-54, 1985
- [FK88] Interne Mitteilung von H. Küster und G. Falley, 4. April 1988
- [Ga81] S. Gasiorowicz, *Quantenphysik*, Oldenbourg, 1981, 2<sup>te</sup> Aufl.
- [H1TP] H1 Collaboration, *Technical Progress Report*, 4. Oktober 1987
- [H187] H1-Collaboration, *Results from a Test of a Pb-Cu Liquid Argon Calorimeter*, DESY 87-098, August 1987
- [Jo69] W. Jones, *Nuclear-electromagnetic Cascades in Glass, Iron and Tungsten Absorbers*, Physical Review D, Particles and Fields, 3<sup>rd</sup> Series, 1, No.8, 1970
- [Ki80] C. Kittel, *Einführung in die Festkörperphysik*, Oldenbourg, 1980, 5<sup>te</sup> Aufl.
- [Kl87] K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, Teubner, 1987, 2<sup>te</sup> Aufl.

- [Kl56] P. G. Klemens, *Thermal Conductivity of Solids at Low Temperature*, in *Encyclopedia of Physics, Vol. 14, Low Temperature Physics I*, Springer, 1956
- [LB72] Landolt-Börnstein, *Zahlenwerte und Funktionen*, 4<sup>ter</sup> Band, Teil 4b, *Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen*, Springer, 1972, 6<sup>te</sup> Aufl.
- [LG87] Internes Papier der Lebedev-Gruppe in der H1-Kollaboration, November 1987
- [Lo83] E. Lohrmann, *Einführung in die Elementarteilchenphysik*, Teubner, 1983
- [Me] H. Messel, D.F. Crawford, *Electron-Photon Shower Distribution Function*, Pergamon Press
- [Mu67] V. Murzin, *Principles and Application of the Ionization Calorimeter*, aus: *Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*, Herausg.: J. Wilson, S. Wouthuysen, North Holland Publishing, Amsterdam 1967
- [Pa86] Particle Data Group, *Particle Properties Data Booklet*, North Holland Publishing, 1986
- [Pe82] D. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Addison-Wesley, 1982, 2<sup>nd</sup> Edition
- [Wi74] W. Willis, V. Radeka, *LAr Ionization Chambers as Total-Absorption Detectors*, Nuclear Instruments and Methods, 120 (1974) 221-236, North Holland Publishing, Amsterdam
- [Wo88] interne Mitteilung von A. Wolter, Universität Karlsruhe
- [Zei88] C. Zeitnitz, *Test eines Blei-Flüssig-Argon-Kalorimeters mit einer speziellen Hochspannungszuführung mit hochohmigen Schichten*, Diplomarbeit DESY F21, November 1987

Die Photographien sind von J. Schmidt, DESY.