

Aufbau des Experimentsteuerungssystems der
Dreispektrometeranlage und Messung von $^{12}\text{C}(e, e'x)$ mit
der BGO-Kristallkugel

Dissertation

zur Erlangung des Grades

„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich Physik der Johannes-Gutenberg-Universität

in Mainz

vorgelegt von

Volker Kunde

geboren in Mainz

Institut für Kernphysik
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
April 1996

Dekan:

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. G. Huber

Prof. Dr. Th. Walcher

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	3
2. Experimentsteuerungssystem	5
2.1 Rahmenbedingungen der Spektrometeranlage	5
2.2 Anforderungen und Konzeption	7
2.3 Aufbau des Steuerungssystems	10
2.4 Datenbank	22
2.4.1 Anforderungen	22
2.4.2 Frontenddatenbank	23
2.4.3 Hintergrunddatenbank	26
2.4.4 Status-Server-Datenbank	29
3. Programme des Steuerungssystems	32
3.1 Magneto-optische Elemente	34
3.2 Detektorsysteme	39
3.3 Targets	41
3.4 Strahlmonitore	43
3.5 Prozeßverwaltung	43
3.6 Schnittstellenumsetzer	45
3.7 Benutzeroberflächen	52
3.8 Ausblick	57
4. Datenerfassungssystem	62
4.1 Grundlagen und Anforderungen	62
4.2 Konzepte und Eigenschaften	63
4.3 Anwendungen	63
4.4 Stand und Ausblick	64
5. Messung von $^{12}C(e, e'x)$ mit der BGO-Kristallkugel	65
5.1 Physikalische Motivation	65
5.1.1 Kinematik	66
5.1.2 Koinzidenzwirkungsquerschnitt	67
5.2 Experimentaufbau	69
5.2.1 Target	69
5.2.2 Elektronenspektrometer	70
5.2.3 BGO-Kristallkugel	71
5.2.4 Meßelektronik und Datenerfassung	73
5.2.5 Meßprogramm	77
5.3 Eichmessungen $H(e, e'p)$	77
5.3.1 Entkopplung der Plastik-BGO-Detektorspektren	77
5.3.2 Energiekalibration	81
5.4 Luminositätsmessung	84
5.5 Diskussion der Ergebnisse	87
5.5.1 Messung der inklusiven Reaktion $^{12}C(e, e')$	87
5.5.2 Messung der semi-exklusiven Reaktionen $^{12}C(e, e'x)$	93
6. Zusammenfassung	100

Literaturverzeichnis	103
Abbildungsverzeichnis	108
Tabellenverzeichnis	109
A. Start des Steuerungssystems	110
B. Struktur der Datenbank	113
C. Protokoll des Steuerungssystems	115
C.1 Aufbau des Protokolls	115
C.2 Entity-Relationship-Modell	119
D. Schnittstellenumsetzer	121
D.1 Allgemeine Struktur	121
D.2 ADC-Schnittstellenumsetzer	122
D.3 Digital-Eingabe/Ausgabe-Schnittstellenumsetzer	124
D.4 DAC-Schnittstellenumsetzer	126
D.5 CAMAC-Schnittstellenumsetzer	127
E. Geräte-Treiber	128
E.1 Magnet	128
E.2 Trigger	129
E.3 Driftkammer	132
F. Konfiguration des ECS	133
F.1 Unterstützte Hardware	134
F.2 Anschlußbelegung	139
F.3 Modulreferenzliste	140
G. BGO-Spektren	141
G.1 Spektren des Energieübertrags	141
G.2 Fehlende Energie	143
H. Glossar	147
I. Danksagung	148

Kapitel 1

Einleitung und Zielsetzung

Das Institut für Kernphysik der Universität Mainz betreibt seit vielen Jahren Elektronenbeschleuniger zur Erforschung des Atomkerns und seiner Bestandteile. In den letzten Jahren wurde der neue Beschleuniger MAMI¹ aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Beschleuniger ist als dreistufiges Mikrotron [Herm-76] konzipiert und in der Lage, einen Dauerstrichelektronenstrahl mit Energien bis zu 855 MeV bei einem maximalen Strahlstrom von 100 μA zu liefern. Der Dauerstrichbetrieb ermöglicht Koinzidenzexperimente mit sehr hoher Präzision durchzuführen. Für diese Experimente hat die A1-Kollaboration die Dreispektrometeranlage geplant und aufgebaut. Sie ermöglicht durch ihre drei hochauflösenden Magnetspektrometer neuartige Experimente zur Untersuchung der Struktur des Atomkerns und des Nukleons.

Die bei den Messungen freigesetzte Strahlung verhindert während der Experimente den direkten Zugang zur Meßapparatur. Aus diesem Grund wurden die Geräte in früheren Experimentieranordnungen über lange Kabel von außen bedient und überwacht. Diese Methode ist durch die wesentlich höhere Zahl von Geräten an der neuen Spektrometeranlage nicht mehr möglich. Die Größe der Halle und die variable Anordnung der Geräte auf den Spektrometern würde einen sehr hohen, praktisch nicht durchführbaren, Verkabelungsaufwand erfordern. Ein weiteres Problem ist die Bedienung der nun wesentlich komplexeren Anlage durch die Experimentatoren. Die Steuerung der Anlage kann daher nur durch massiven Rechnereinsatz ermöglicht werden. Wenn jedoch ohnehin Rechner eingesetzt werden müssen, ist es konsequent, sie so dicht wie möglich an die zu steuernden Geräte heranzubringen, um eine einfache Verkabelung zu ermöglichen. Dies führte bei der neuen Spektrometeranlage zu einem dezentralen Rechnerkonzept mit je einem VMEbus-System auf den Spektrometern und einem zusätzlichen System auf dem Hallenboden in der Nähe der Netzgeräte. Für den Einsatz der Rechner an den verschiedenen Komponenten der Spektrometeranlage ist ein umfangreiches Softwaresystem erforderlich. Die große Anzahl unterschiedlicher Geräte macht ein einheitliches Konzept zur Erstellung der einzelnen Programme und ihrer Schnittstellen zum Benutzer notwendig.

Die Entwicklung eines umfassenden Konzepts zur Experimentsteuerung und Experimentkontrolle soll die einfache Bedien- und Wartbarkeit des Systems dauerhaft gewährleisten. Das Experimentsteuerungssystem soll alle Parameter der Spektrometeranlage weitgehend automatisch steuern und überwachen. Das Ziel ist die Durchführung von Experimenten über längere Zeiträume mit geringem Personaleinsatz und im Routinebetrieb ohne den Einsatz von Experten. Zusätzlich sollen die Programme des Steuerungssystems komplexe Regelungen an verschiedenen Komponenten der Spektrometeranlage quasi gleichzeitig durchführen

¹Mainzer Mikrotron

können. Vor allem die zeitaufwendige, präzise und reproduzierbare Feldeinstellung der Spektrometermagnete soll durch das Steuerungssystem möglich werden. Da ein Steuerungssystem zur Durchführung aller kernphysikalischen Experimente an der Spektrometeranlage benötigt wird, ist das Ziel dieser Arbeit, die Planung, der Aufbau und der anschließende Test des Experimentsteuerungssystems. Der Test des Systems wird im Rahmen des ersten Koinzidenzexperimentes an der Spektrometeranlage durchgeführt.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Möglichkeiten zur präzisen Bestimmung der Luminosität bei geringen Strahlströmen. Ihre genaue Kenntnis ist zur Anbindung der überlappenden Magnetfeldeinstellungen des Spektrometers bei der Bestimmung des inklusiven Wirkungsquerschnittes als Funktion des Energieübertrages notwendig. Zusätzlich soll der semi-exklusive Wirkungsquerschnitt der Multihadron-Produktion an ^{12}C vermessen werden. Der Impuls des gestreuten Elektrons wird im ersten zur Verfügung stehenden Magnetspektrometer, die hadronischen Reaktionsprodukte mit einer BGO-Kristallkugel [Morr-92] nachgewiesen.

Hierzu ist im Rahmen dieser Arbeit die gesamte Detektorelektronik für die Messungen mit dem BGO-Detektor entwickelt und aufgebaut worden. In der anschließenden Analyse der durchgeführten Experimente werden die Multihadron-Beiträge zum inklusiven $^{12}\text{C}(e, e')$ Wirkungsquerschnitt vom quasielastischen Bereich bis über die Δ -Resonanz hinaus untersucht. Dies soll durch Bestimmung der semi-exklusiven Wirkungsquerschnitte für $^{12}\text{C}(e, e'X)$ mit $X = p, p\pi, pp, ppp, d, d\pi$ erfolgen. Sie erlauben einen Vergleich der gemessenen Daten mit Rechnungen zu den Beiträgen des inklusiven Wirkungsquerschnitts.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst die Dreispektrometeranlage mit den zu steuernden Geräten beschrieben. Anschließend werden die Konzepte, Methoden und die Programme des Experimentsteuerungssystems vorgestellt. Das folgende Kapitel beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Teile der Datenerfassung, die zur Durchführung aller Experimente an der Dreispektrometeranlage eingesetzt werden. Im letzten Kapitel wird der Aufbau des BGO-Kristallkugel-Experimentes erläutert und die Meßergebnisse analysiert.

Kapitel 2

Experimentsteuerungssystem

Das Experimentsteuerungssystem ECS¹ ist eine aufeinander abgestimmte Kombination aus Hard- und Softwaremodulen zur Steuerung und Überwachung aller Komponenten der Dreispektrometeranlage. Im Gegensatz zu einem Meßdatenerfassungssystem DAQ² wird ein Experimentkontrollsystem im allgemeinen so aufgebaut, daß Aktionen und Reaktionen auf Ereignisse nur unter eingeschränkten Echtzeitbedingungen erfolgen.

2.1 Rahmenbedingungen der Spektrometeranlage

Die Spektrometeranlage in Abbildung 2.1 besteht aus drei Magnetspektrometern. Sie sind zur Winkelpositionierung auf Lafetten über einem Drehkranz angeordnet. Der Targetort befindet sich über der gemeinsamen Drehachse. Die Spektro-

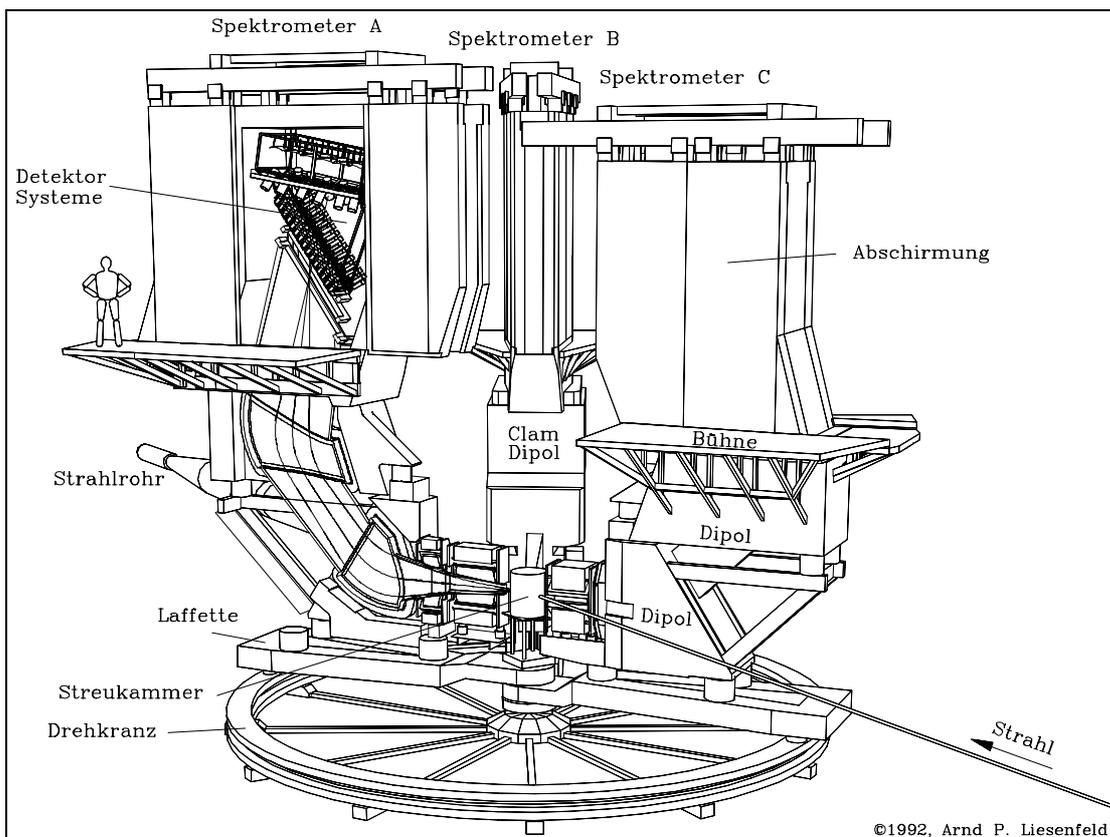


Abb. 2.1: Gesamtansicht der Dreispektrometeranlage

¹experiment control system

²data aquisition system

meter A und C decken einen Raumwinkelbereich von 28.0 msr, Spektrometer B von 5.6 msr ab. Die Spektrometer gliedern sich in magnetoptische Elemente zur Teilchenablenkung und in Detektorsysteme zum Teilchennachweis. Die magnetoptischen Elemente fokussieren die bei kernphysikalischen Prozessen im Target gestreuten oder freigesetzten, geladenen Teilchen nach Impulsen getrennt in die Bildebene. Dort werden sie mit den Detektorsystemen nachgewiesen.

Der Aufbau der magnetoptischen Elemente von Spektrometer A und C ist identisch. Die Spektrometer bestehen aus je einem Quadrupol- und Sextupolmagneten sowie aus zwei hintereinander angeordneten Dipolmagneten. Die Aufgabe der Dipole besteht in der Impulsselektion der geladenen Teilchen. Der Quadrupolmagnet dient zur Erweiterung der geometrischen Akzeptanz der Spektrometer in nicht-dispersiver Richtung bei gleichzeitiger Erhöhung der Impulsauflösung. Dadurch reduziert sich die notwendige Meßzeit, und große kinematische Bereiche können mit wenigen Spektrometereinstellungen abgedeckt werden. Die Abbildungsfehler zweiter Ordnung werden von einem reinen Sextupolmagneten kompensiert. Zur Korrektur von Abbildungsfehlern höherer Ordnung besitzt das Magnetfeld des Quadrupolmagneten auch Oktupol- und Duodekapolanteile.

Spektrometer B ist ein *clam-shell*-Dipolmagnet. Bei dieser Magnetkonstruktion sind die Polschuhplatten nicht parallel sondern stehen in einem festen Winkel von $3,495^\circ$ zueinander. In dieser Anordnung wird das Spektrometer sowohl in der dispersiven als auch in der nicht-dispersiven Ebene Punkt-zu-Punkt abbildend und besitzt keine weiteren Korrekturmagnete. Dies ermöglicht ein hohes Ortsauflösungsvermögen am Target und damit die Verwendung ausgedehnter Targets.

Bei allen drei Spektrometern bestehen die Detektorsysteme aus je zwei Doppeldriftkammern zur Spurrekonstruktion und den Triggerdetektoren. Diese dienen der Bestimmung des Triggerzeitpunktes und der Teilchenidentifikation. Aus den Daten der Driftkammern kann der Impuls sowie der horizontale und vertikale Streuwinkel des einfallenden Teilchens bestimmt werden. Jedes Spektrometer besitzt einen Gas-Tscherenkow-Detektor zur Identifikation bzw. Diskriminierung von Elektronen.

Eine wichtige Komponente mit direktem Einfluß auf die Meßergebnisse bilden die unterschiedlichen Targetaufbauten:

- das Standardtargetsysteem
Es besteht aus einer Targetleiter, die bis zu sieben verschiedene Feststofftargets aufnehmen kann. Die Targets können sowohl in der Höhe als auch im Winkel sehr präzise eingestellt werden, wobei die maximale Bewegung durch Endschalter begrenzt ist. Das Targetsysteem befindet sich in einem evakuierten Aluminiumtopf. Der Anschluß an die Spektrometer erfolgt entweder mittels Vakuumabschlußfolien aus Kapton an den Spektrometern und an der Streukammer über die Luft oder durch Aluminiumflansche zur direkten Verbindung der Spektrometer mit dem Vakuum der Streukammer.
- das Kryotargetsystem für Wasserstoff und Deuterium
Wegen der chemischen Reaktivität von Wasserstoff ist der Umgang mit diesem Kryotarget nicht ungefährlich, daher müssen Fehlbedienungen unter allen Umständen ausgeschlossen werden.

- das Kryotargetsystem für Helium
Es wird für Messungen an den verschiedenen Isotopen des Heliums eingesetzt.
- das Wasserfalltarget
Bei diesem Target wird ein dünner Wasserfilm in den Elektronenstrahl gebracht.

Eine gemeinsame Eigenschaft aller Targets ist, daß sie häufig bewegt werden müssen. Dies ist vor allem während der Optimierung des Elektronenstrahls notwendig, wenn spezielle Targets zur optischen Lagekontrolle in den Strahl eingebracht werden.

Zur Messung der Strahlintensität sind spezielle Monitore [Mitt-92] in die Strahlführung eingebaut worden. Die von den Resonatoren aufgenommene Leistung ist proportional zum Quadrat des Strahlstroms. Mit dieser Methode kann der Strahlstrom auch bei kleinen Intensitäten sehr genau gemessen werden. Dies ist besonders im Hinblick auf die in Kapitel 5 beschriebene Messung relevant.

2.2 Anforderungen und Konzeption

Die Anforderungen an das Experimentkontrollsystem ergeben sich ganz natürlich aus dem Experimentverlauf. Ein typischer Ablauf stellt sich folgendermaßen dar:

1. Einstellung und Überprüfung der Experimentparameter
2. Speicherung des Anfangszustandes der Experimentieranordnung
3. Start der Messung
4. Aufnahme der Meßdaten auf Massenspeicher
5. Periodische Speicherung des aktuellen Zustandes
6. Stopp der Messung
7. Speicherung des Endzustandes der Experimentieranordnung
8. Beenden der Meßperiode
9. entweder Punkt 1. oder -
Einstellung der Ruheparameter

Für die Dreispektrometeranlage der A1-Kollaboration ist ein Steuerungs- und Überwachungssystem entwickelt und implementiert worden.

Auf Grundlage der bisherigen Erfahrungen mit der Beschleunigersteuerung von MAMI, ist unter Einbeziehung moderner Soft- und Hardwarekonzepte ein neues Experimentkontrollsystem aufgebaut worden. Die Aufgabe gliedert sich in folgende Schwerpunkte:

- Konzeption des Gesamtsteuerungssystems der Dreispektrometeranlage
- Planung und Beschaffung bzw. Entwicklung der benötigten Hardwareschnittstellen (Analog-Digital-Wandler (ADC), Digital-Analog-Wandler (DAC), digitale Ein- und Ausgänge (digital I/O), serielle Schnittstellen (RS232/V24, RS485), Mikro-Kontroller (Feld-Bus), IEC-Bus-Kontroller)

- Entwicklung eines problemorientierten Kommunikationsprotokolls für den geordneten Datenaustausch der einzelnen Teile des Steuerungssystems
- Erstellung allgemeiner Softwarekomponenten zur Überwachung und Steuerung der einzelnen Einheiten in standardisierter Form
- Schrittweise Entwicklung und Realisierung der notwendigen Steuerungsprogramme für die verwendeten Geräte
- Erstellung allgemeiner Rahmensoftware zur Vorbereitung für die standardisierte Integration noch nicht spezifizierter Geräte

Eine Grundvoraussetzung bei der Entwicklung des Steuerungssystems war die frühe und dauerhafte Verfügbarkeit. Die entwickelten Softwarekomponenten wurden sofort an den bereits vorhandenen Geräten eingesetzt und gegebenenfalls in einem zweiten Schritt nachträglich optimiert. Die Verwendung damals bereits existierender, sehr spezieller Steuerungssysteme (z.B. MAMI, DESY) war aufgrund der besonderen Anforderungen durch die Spektrometeranlage nicht möglich. Prinzipiell gibt es drei verschiedene Ansätze zur Erstellung großer Steuerungssysteme:

1. Der Programmansatz,
hier erfolgt die gesamte Steuerung durch ein einziges, zustandsbehaftetes Programm auf einem sehr leistungsfähigen Rechner. Die Vorteile liegen in der relativ schnellen Implementation eines solchen Systems, wenn auf gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Aufträge verzichtet werden kann. Die Nachteile ergeben sich vor allem bei Änderungen am System. Jede Modifikation eines Teilsystems, die nicht allein durch Änderung von Tabelleneinträgen in der Datenbank erreicht werden kann, erfordert nach der Modifikation des Quelltextes die erneute Übersetzung der geänderten Teile des Systems. Anschließend muß das gesamte System neu gebunden werden. Dadurch kann das Zeitverhalten und die Integrität des Gesamtsystems negativ beeinflußt werden.
2. Der Transaktionsansatz³,
er ist eine Erweiterung des Programmansatzes durch die Verteilung eines Programmes auf mehrere Rechner und die synchrone Bearbeitung der Teilsysteme. Ein Transaktionsmonitor stellt die Integrität der Transaktionen im Netzwerk sicher. Eine häufig verwendete Variante ist die Einbeziehung einer Datenbank zur gleichzeitigen Datenspeicherung und Transaktionssicherung. Sie bildet jedoch gleichzeitig auch den Engpaß bei dieser Art der Kommunikation.
3. Der “verteilte” Ansatz,
hier werden eigenständige Subsysteme gebildet. Sie können asynchron zueinander verschiedene Aufgaben erledigen und erhöhen dadurch die Fehlertoleranz des Gesamtsystems durch Vermeidung eines “single point of failure”. Die Bedienbarkeit des Systems wird durch die Verwendung einer einheitlichen Benutzerschnittstelle garantiert.

³Eine Transaktion ist eine in sich abgeschlossene Sequenz von Programmteilen, die auf verschiedenen Prozessen (ggf. auf mehreren Prozessoren) ablaufen und nicht unterbrochen werden

Die bisher vorhandenen Steuerungssysteme sind vom ersten Typ gewesen. Daher waren sie konzeptionell und funktionell nicht in der Lage, die Anforderungen an ein modernes Steuerungssystem (Klienten/Server-Struktur in heterogener Rechnerkonfiguration mit VMEbus-CPU's und variabler Benutzerschnittstellen) zu erfüllen.

Eine der Stärken des erstellten Steuerungssystems liegt in der konsequenten Umsetzung des objektorientierten Programmieransatzes. Er läßt sich sehr einfach auf die Struktur der Spektrometeranlage abbilden. Die einzelnen Geräte und die zugehörige Software bilden abgeschlossene Einheiten, sogenannte Objekte⁴ (siehe auch Kapitel H im Anhang). Sie werden innerhalb des Steuerungssystems gemäß ihrer Funktionalität untergliedert in Schnittstellenumsetzer⁵, Geräte-Handler⁶ und Benutzeroberflächen. Die Skizze 2.2 zeigt die Abbildung der Geräte und ihrer Schnittstellen auf Softwarekomponenten innerhalb des Steuerungssystems. Durch die Benutzung eines Nachrichtenübermittlungssystems ist die Bindung der einzelnen Objekte/Teilobjekte untereinander nicht starr. Hierdurch wird das Gesamtsystem un-

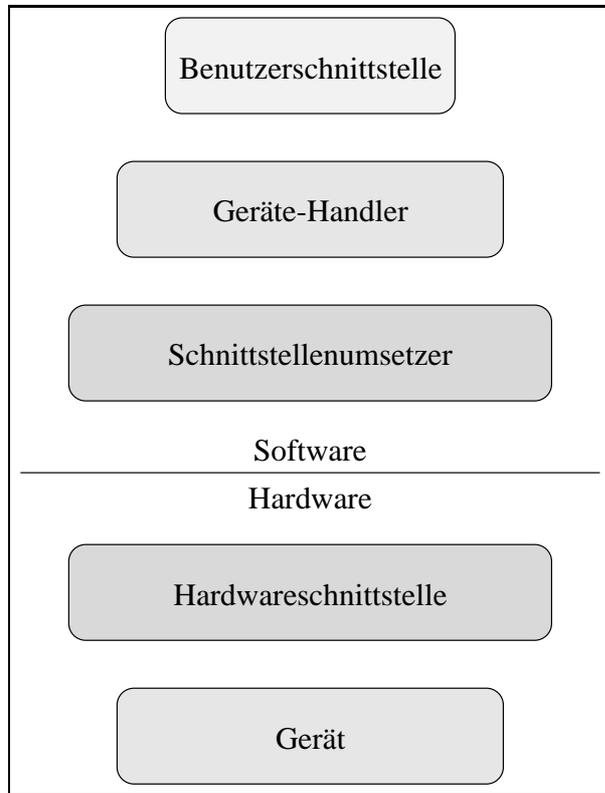


Abb. 2.2: zeigt die spiegelsymmetrische Abbildung der Hardwarestrukturen durch die Softwarekomponenten auf das Steuerungssystem

anfällig gegen mögliche Störungen einzelner Komponenten. Eine Blockierung des Gesamtsystems ist praktisch ausgeschlossen solange das Nachrichtensystem und das darunterliegende Betriebssystem einwandfrei arbeiten. Der erste Ansatz für ein Nachrichtenübermittlungssystem war die Verwendung der UNIX Interprozeßkommunikation über named pipes⁷. Hierbei besitzt jeder Prozeß eine eigene Eingangsqueue und kommuniziert mit den anderen Prozessen durch das Schreiben von Nachrichten in die Eingangsqueues der anderen Prozesse. Ein direk-

⁴Ein Objekt läßt sich durch typische Eigenschaften und Verhaltensweisen charakterisieren. Es besitzt einen Zustand und eine Identität und wird zur Laufzeit erzeugt bzw. bei dauerhaften (persistenten) Objekten aus einer Datenbank geladen

⁵Kombination aus Hardware und Software zur standardisierten Interaktion mit den zu steuernden Geräten

⁶Spezielle Programme zur Steuerung und Kontrolle von Geräten durch das Experimentsteuerungssystem

⁷Einfache, mit einem eindeutigen, adressierbaren Namen ausgestattete fifo-Speicher (first in first out)

ter Nachteil dieser Methode ist die Bindung der einzelnen Prozesse auf einen einzigen Prozessor. Zusätzlich ist die Fehlerbehandlung in derartigen Systemen relativ schwierig und zeitaufwendig, da die Auftrennung der Daten in einzelne Nachrichtenpakete innerhalb der Eingangsqueue nur auf Basis der verwendeten Protokollstrukturen möglich ist. Dies impliziert unvermeidlich Einflüsse von neu erstellter, möglicherweise fehlerhafter Software auf das bestehende Gesamtsystem. Die Einschränkung der Kommunikation auf einen einzelnen Prozessor konnte durch die Verwendung der Netzwerksoftware OS9Net gelöst werden. Es zeigte sich jedoch, daß die Kommunikation über OS9Net bei steigender Last im Netzwerk aufgrund mangelnder Fehlersicherung innerhalb des OS9Net-Protokolls nicht zuverlässig funktionierte. Daher wurde ein spezielles Kommunikationssystem für die Bedürfnisse der Experimentsteuerung entwickelt. Das Nachrichtensystem MUIX⁸ [Kram-95] dient als Basis für den Einsatz des Steuerungssystems im heterogenen Netzwerk auf Rechnern verschiedenster Hardwarearchitekturen mit unterschiedlichen Betriebssystemen. Die einzige Verbindung der Rechner untereinander ist eine Netzwerk-Verbindung, z.B. ein Ethernet-Koaxialkabel. Dies entspricht dem gewählten Konzept einer dezentralen Steuerung, das sich durch die Gliederung der Gesamtapparatur in drei Spektrometer anbietet. Die lose Kopplung der einzelnen Komponenten bei gleichzeitiger Standardisierung der Struktur des Kommunikationsprotokolls erlaubt den Einsatz verschiedener Benutzeroberflächen. Zum einen moderne, graphische Oberflächen (X11/Motif⁹) zum anderen herkömmliche Terminals (Curses-Bibliothek¹⁰), die sogar über einfache Modemverbindungen betrieben werden können. Dies wird durch eine flexible Konfiguration der Benutzerschnittstellen über die Datenbank ermöglicht.

Die oben beschriebene, allgemeine Basissoftware bildet jedoch nur einen relativ kleinen Teil der gesamten Software. Der größte Teil besteht aus den speziellen Gerätetreibern für die Hardware der Dreispektrometeranlage. Zum Zeitpunkt der Softwarekonzeption war nur ein geringer Teil der zu steuernden und zu überwachenden Geräte mit ihren Schnittstellen bereits endgültig spezifiziert. Aus dieser Situation heraus wurde ein Programmrahmen für Geräte-Handler erstellt, der die gesamten Verwaltungsaufgaben und das Steuerungsprotokoll abhandelt. Für einen speziellen Geräte-Handler genügt daher die Erstellung der gerätespezifischen Routinen und ihre Eingliederung in den allgemeinen Rahmen. Dieses Konzept erlaubt schon nach kurzer Einarbeitungszeit die Erstellung von einfachen Geräte-Handlern durch Programmierer mit Grundkenntnissen in C/C++.

2.3 Aufbau des Steuerungssystems

Das Computersystem der Experimentsteuerung besteht, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, aus mehreren über Ethernet verbundenen Rechnern. Die Rechner werden gemeinsam mit der Datenerfassung genutzt. Sowohl die Architekturen

⁸multi processor interprocess communication system

⁹Standardisierte Bibliothek zur Erstellung betriebssystemunabhängiger graphischer Benutzeroberflächen nach dem Klienten/Server-Prinzip

¹⁰Standardisierte Bibliothek zur Erstellung einfacher betriebssystem- und terminalunabhängiger Benutzeroberflächen. Die Entwicklung der Bibliothek war offenbar schwierig (*curses* → Fluch)

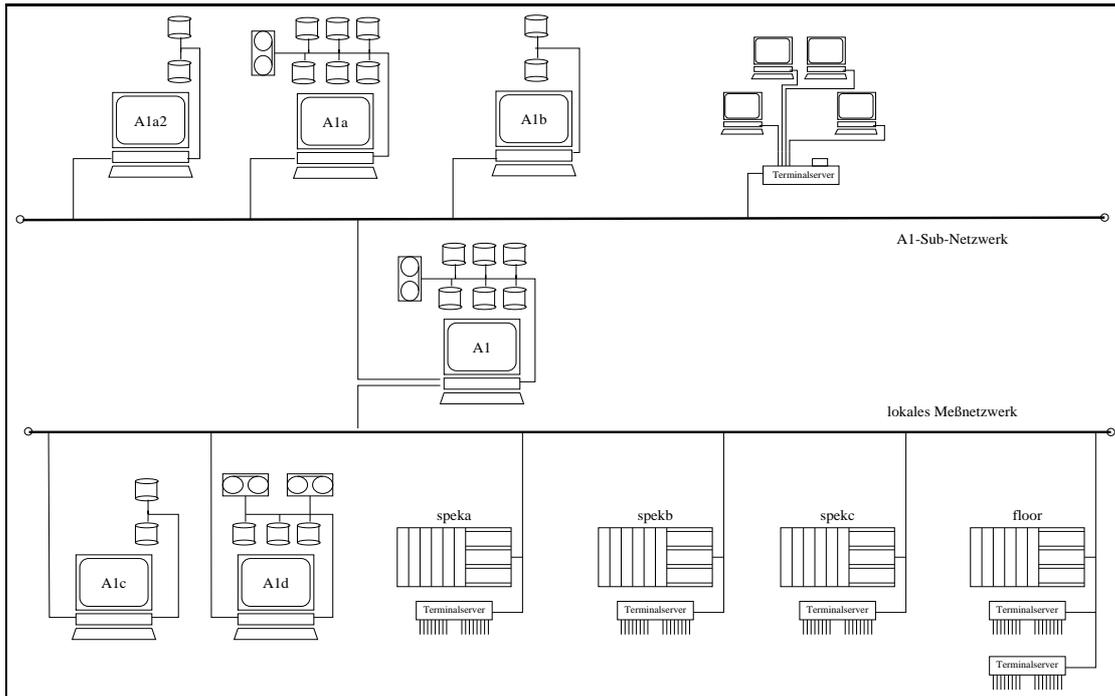


Abb. 2.3: Rechnerkonfiguration des Steuerungssystems

als auch die Betriebssysteme sind ihren speziellen Aufgaben entsprechend ausgewählt worden. Durch Aufteilung des Gesamtsteuerungssystems in parallel arbeitende Prozesse auf unterschiedlichen Rechnern ist ein Interprozeßkommunikationssystem unabdingbar. Es muß den netzwerkweiten und sicheren Informationsaustausch und die Synchronisation der Steuerungsprozesse gewährleisten. Die Aufteilung eines großen Systems auf mehrere, spezialisierte Rechner ist heute eine allgemein verwendete Methode. Aufgaben, die früher von einem einzigen Programm auf einem einzigen Großrechner bearbeitet wurden, werden auf eine Gruppe von Arbeitsplatzrechnern verteilt. Um die Rechner gleichmäßig auszulasten und Redundanzen zu vermeiden, werden die Aufgaben gegliedert. Es existiert ein Server, der eine Leistung netzwerkweit zur Verfügung stellt und ein oder mehrere Klienten, welche die Leistung des Servers nachfragen.

Struktur der Steuerung

Das Experimentsteuerungssystem ist in verschiedene Objekte aufgeteilt. Sie bestehen in der Regel aus einem oder mehreren, physikalischen Geräten und der dazugehörigen Software. Die Objekte kommunizieren untereinander durch das Nachrichtenübermittlungssystem. Ein Objekt entspricht der Zusammenfassung einzelner, logisch zusammengehörender Felder¹¹. Abbildung 2.4 zeigt dies am Beispiel eines Magnetobjektes. Ein Feld charakterisiert einen adressierbaren und veränderbaren Zustand innerhalb eines Objektes. Der Zustand eines Feldes ändert sich nur durch Vorgänge im Objekt selbst oder durch Nachrichten mit genau definierten Aktionen an das Feld.

¹¹Felder sind die adressierbaren Untereinheiten von Objekten

Der Ausschnitt des Steuerungssystems in Abbildung 2.5 zeigt die verschiedenen Ebenen mit ihren unterschiedlichen Aufgaben. Die unterste, hardwarenahe Schicht der Steuerungssoftware bilden Hardwareumsetzer bzw. standardisierte Schnittstellen für die unterschiedlichen Ein- und Ausgabemedien. Die Umsetzer werden komplett über die Datenbank initialisiert und sind somit leicht konfigurierbar. Die Schnittstellenumsetzer stellen ihre Dienste über das Nachrichtensystem netzwerkweit zur Verfügung und erlauben den Zugriff auf die entsprechende Hardware über Nachrichten.

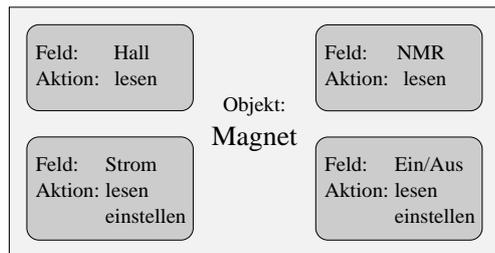


Abb. 2.4: Struktur der Magnetobjekte mit den zugehörigen Feldern

Die nächste Ebene der Steuerung bilden die Geräte-Handler. Sie sind im Gegensatz zu Treibern, welche üblicherweise zur Hardwareansteuerung verwendet werden, unabhängig von einem speziellen Betriebssystem und daher sehr portabel. Geräte-Handler stellen das Gegenstück zu den physikalischen Geräten dar und ermöglichen den kontrollierten Zugriff auf

die Hardware. Hierdurch wird zusätzlich eine Erweiterung des Funktionsumfangs ermöglicht. Die Softwarekomponente der Handler verleiht den Geräten ein Gedächtnis und kontrolliert die angeschlossene Hardware bezüglich der Einhaltung der Sollwerte und meldet unerwünschte Zustandsänderungen als Alarm an den zentralen Status-Server *opcon*. Eine große Anzahl derartiger Programme ist für die unterschiedlichsten Geräte der Dreispektrometeranlage im Rahmen dieser Arbeit erstellt worden. Eine ausführliche Darstellung der erstellten Software bietet Kapitel 3.

Die oberste Ebene bilden komplexe Geräte-Handler, die eine komplette Gerätegruppe repräsentieren und kontrollieren. Sie verfügen über Fähigkeiten, die weit über die reine Ansteuerung der Hardware hinausgehen. Ein Beispiel hierfür ist das Programmsystem zur Steuerung und Kontrolle der Magnetspektrometer. Ein einzelner Befehl reicht aus, um jedes der Spektrometer so einzustellen, daß Teilchen eines ganz bestimmten Impulses in die Mitte der Fokalebene des Spektrometers abgebildet werden. Diese Prozeduren benötigen je nach Vorgeschichte der Magneten bis zu zweieinhalb Stunden. Dabei durchläuft das Spektrometer verschiedene Zustände, die nur durch die Software vorgegeben werden.

Ein derartiges Programm entspricht in der Steuerungstechnik einem Regler. Die Abbildung 2.6 zeigt die allgemeine Struktur eines Reglers im Steuerungssystem. Die Basis bildet das zu regelnde Gerät, beispielsweise ein Stromnetzgerät der Spektrometernagnete. Der Zustand des Netzgerätes wird über einen Sensor, in diesem Beispiel durch ein Ampèremeter gemessen und in eine analoge Spannung umgewandelt. Der Schnittstellenumsetzer (Analog-Digital-Wandler) setzt die analogen Spannungen des Eingangs in Nachrichten innerhalb des Steuerungssystems um. Diese werden von einem Ausleseprogramm bearbeitet und mit Umrechnungsfaktoren und Eich Tabellen auf physikalische Ströme abgebildet. Der Strom repräsentiert den Ist-Zustand des Stromnetzgerätes. Das Regelungsprogramm meldet den Zustand als Information an den Status-Server, der wiederum

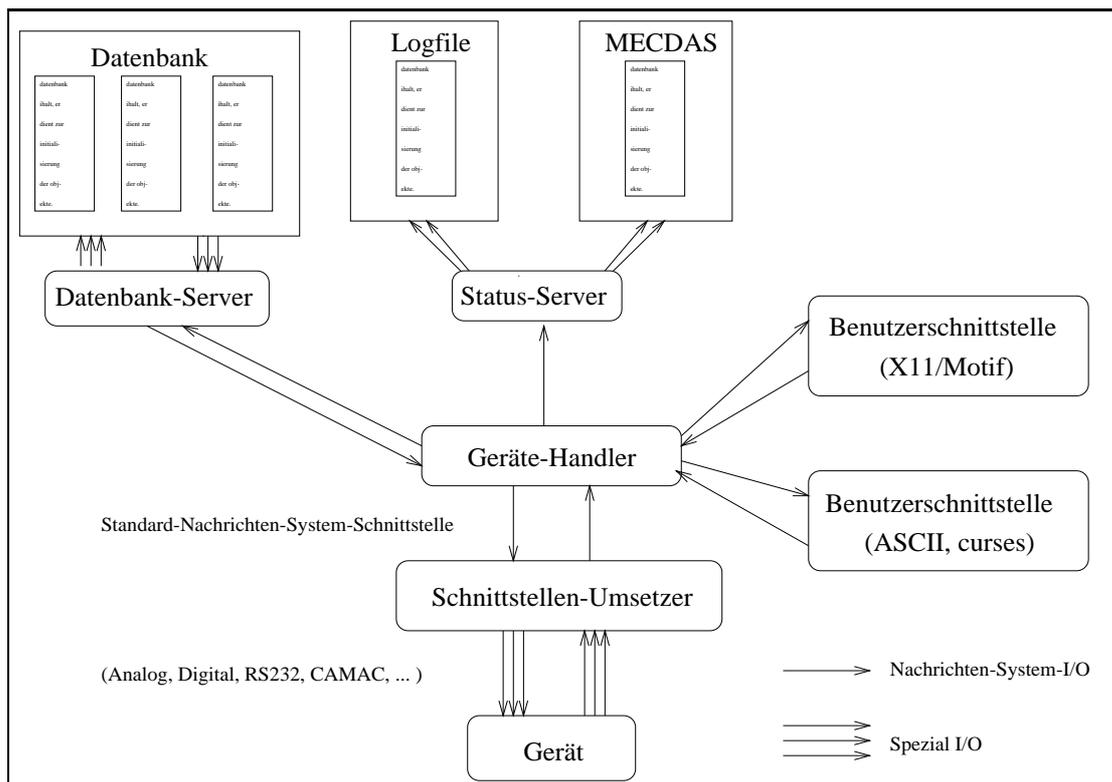


Abb. 2.5: Struktur des Experimentsteuerungssystems mit Hardwaregeräten und den korrespondierenden Softwarekomponenten (Geräte-Handler)

die Zustandsänderung an alle Überwachungssysteme weiterleitet, die zuvor Interesse an diesem Objekt angemeldet haben. Zusätzlich meldet die Regelung den Ist-Zustand an das Programm, welches die Aktion zur Zustandsänderung initiiert hat, z.B. eine interaktive Benutzeroberfläche. Anschließend wird der Istwert mit dem Sollwert verglichen. Bei Abweichungen wird ein neuer Stellwert errechnet und über das Einstellprogramm und den Schnittstellenumsetzer an das Gerät weitergeleitet. Dieser Regelkreis wird so lange durchlaufen bis die Differenz zwischen Soll- und Istwert unterhalb der zuvor definierten Genauigkeitsschwelle liegt.

Nachrichtenübermittlungssystem

Im Laufe der Entwicklung des Experimentkontrollsystems sind mehrere Nachrichtenübertragungssysteme zum Informationsaustausch getestet worden. Zu Beginn kamen zur direkten Geräteansteuerung VMEbus-Rechner unter dem Betriebssystem OS9 zum Einsatz. Die hardwareunabhängigen Steuerungsteile befanden sich unter den Betriebssystemen UNIX und VMS auf Arbeitsplatzrechnern. Die Basis der Kommunikation bildete das ethernetbasierende Netzwerkprotokoll OS9-Net. Die Anbindung an die Arbeitsplatzrechner erfolgte über spezielle OS9-Net-Server [Kryg-96]. Da das OS9-Net-Protokoll zum damaligen Zeitpunkt keine Sicherungen gegen Übertragungsfehler beim Datentransfer zur Verfügung stellen konnte, war es für den Einsatz innerhalb des Steuerungssystems ungeeignet. Ein weiteres Problem ist die starke Hardwareabhängigkeit der OS9-Treibersoftware.

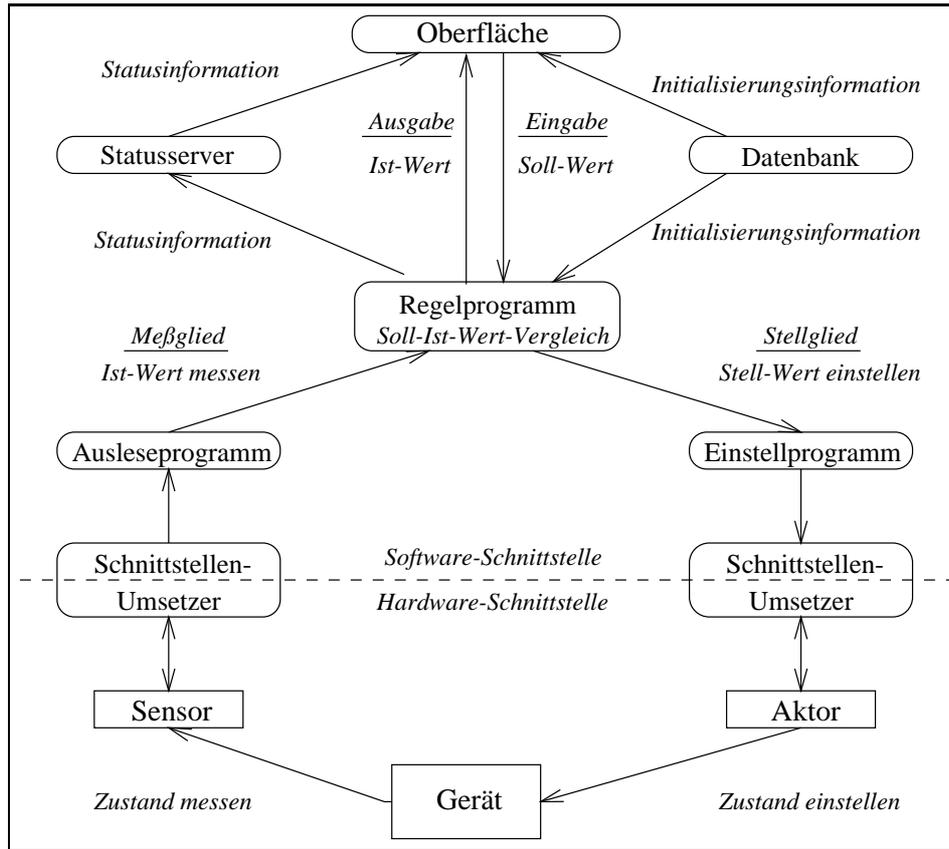


Abb. 2.6: Struktur einer typischen Regelung im Experimentsteuerungssystem

Sie erfordert personal- und zeitintensive Anpassungsarbeiten, die auf Dauer nicht gewährleistet werden können.

Parallel dazu wurde am Institut mit der Entwicklung eines eigenen, modernen Nachrichtenübermittlungssystems begonnen. Das System beruhte auf dem direkten Zugriff auf die Ethernet-Rohdaten. Es zeigte sich jedoch, daß die Implementation betriebssystemabhängig und daher mit hohem Wartungsaufwand verbunden war.

Letztlich ist ein Messagesystem entwickelt worden, das auf Basis der Standard-UNIX-Netzwerk-Schnittstellen¹² unter Verwendung des Protokolls UDP/IP¹³ arbeitet [Kram-95]. Das UDP-Protokoll ermöglicht den Nachrichtentransport im Internet-Netzwerk zwischen beliebigen Prozessen auf unterschiedlichen Rechnern. Das Nachrichtenübermittlungspaket MUIPIX erweitert das UDP-Protokoll um die gesicherte Datenübertragung. Es stellt die Übermittlung der Daten an den Empfänger sicher oder meldet nach einer definierten Zeit die Unzustellbarkeit der Nachricht an den Absender zurück. Ein anschauliches Beispiel für ein Messagesystem ist der Briefverkehr der Post. Sie garantiert die gesicherte Übermittlung durch persönliche Auslieferung, Nachsenden an eine neue Adresse oder Rücksendung an den Absender, falls der Brief unzustellbar ist. Zusätzlich erlaubt MUIPIX die namensbasierte Adressierung des Empfängers der Nachricht. Hierunter

¹²BSD-Sockets

¹³user datagram protocol / internet protocol

versteht man die Auswahl des Adressaten über einen logischen Namen, der üblicherweise mit seiner Funktion korreliert ist. Durch diesen Mechanismus muß der Absender weder den Prozeß noch den Rechner des Empfängers kennen.

Eine weitere Eigenschaft des Messagesystems ist die sequentielle Datenübertragung. Im Steuerungssystem ist es meistens notwendig, daß Aufgaben in einer festen Reihenfolge verarbeitet werden müssen. Zum Beispiel ist beim definierten Einstellen eines Elektromagneten die zeitliche Reihenfolge der Anweisungen an das Stromnetzgerät entscheidend.

Bei der Entwicklung der Geräte-Handler des Experimentsteuerungssystems ergab sich die Notwendigkeit, Tätigkeiten in festen Zeitintervallen auszuführen. Hierzu benötigt man eine interne Uhr, die ein Ereignis nach Ablauf einer definierten Zeitspanne generiert. Das Betriebssystem stellt normalerweise nur eine einzige, interne Uhr zur Verfügung. Sie wird jedoch bereits vom Messagesystem zur Behandlung des Transportprotokolls benötigt. Daher wurde das Nachrichtenübermittlungssystem um eine weitere, wichtige Funktion erweitert [Kram-95]. Der Multimer erlaubt zum einen die asynchrone Behandlung von Zeitereignissen und zum anderen die synchrone Behandlung der Ereignisse in Form der virtuellen Zustellung von vorher definierten Nachrichten. Dies ermöglicht eine einfache Programmierung der Geräte-Handler über eine zentrale Nachrichteneingangsroutine. Diese Eigenschaft wird intensiv zur Eigenüberwachung der Geräte-Handler und der angeschlossenen Geräte verwendet. Die Eigenüberwachung reduziert die Anzahl der über das Netzwerk übertragenen Nachrichten bei gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheit. Die interne Nachrichtenübermittlung ermöglicht es zusätzlich, Geräte-Handler bei langandauernden Tätigkeiten (z.B. Magnete beim Durchlaufen großer Regelungsschleifen) weiterhin ansprechbar (zustandslos) zu halten. Hierdurch ist es jederzeit möglich, den Zustand der Geräte abzufragen und gegebenenfalls alte Aufträge abubrechen und durch neue Aufträge zu ersetzen.

Die Adressierung mehrerer gleichartiger Prozesse (Multi-Adressierung) konnte im Rahmen des verwendeten Nachrichtenübermittlungssystems MUPIX bisher noch nicht implementiert werden. Diese Eigenschaft würde den Betrieb des Steuerungssystems erleichtern. Es wäre z.B. möglich, alle Diskriminatoren auf einmal *remote* zu schalten oder alle Geräte-Handler und -Treiber gleichzeitig zu terminieren, wobei die einzelnen Namen nicht bekannt sein müßten (*specca/trigger/discr/**).

Adressierung

Die Adressierung innerhalb des Experimentkontrollsystems erfolgt über logische Namen. Eine Forderung an die Wahl und Strukturierung der Namen ist die enge Verbindung zur Struktur der Dreispektrometeranlage. Bei der Beschleunigersteuerung werden die Geräte nach ihrer Gattung sortiert und aufsteigend nummeriert z.B. QUADRUPOL07, WEDLER43. Dieses System ist für die Bedienung durch Experten sehr effizient, da in wenigen Zeichen sehr viel Information kodiert wird. Für die korrekte Bedienung ist ein breites Hintergrundwissen erforderlich, da der Aufstellungsort und die Funktion des Gerätes bekannt sein müssen. Daher kann die Bedienung des Beschleunigers nur durch speziell geschultes Personal erfolgen.

Im Gegensatz dazu ist bei der Namenskonvention des Experimentsteuerungssystems auf suggestive und selbsterklärende Namen Wert gelegt worden. Die gewählte Adressierungsmethode soll ein natürliches Ordnungsprinzip für den logischen Zugriff auf die einzelnen Komponenten des Steuerungssystems ermöglichen. Hierzu enthält die erste Komponente der hierarchischen Adressierung das Teilsystem (z.B. *speca*), jede weitere Komponente des logischen Namens spezifiziert das gewählte Objekt eine Stufe präziser (z. B. *speca/magnet/quad/current/water/temp*). Die verwendete Methode, Objekte immer genauer zu detaillieren, eröffnet viele Möglichkeiten die Adressierung logisch zu erweitern. Geräte werden über ihre Gattung (z. B. *speca/magnet/current* für ein Netzgerät) adressiert, der spezielle Typ hat für den Anwender bei der Adressierung keinerlei Bedeutung. Die Adressierung enthält keine überflüssigen Ortsinformationen sondern nur die zur eindeutigen Identifizierung notwendigen logischen Beziehungen zu den übrigen Teilsystemen.

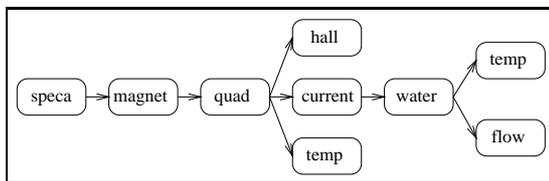


Abb. 2.7: Beispiel für die logische Adressierung über strukturierte Namen innerhalb des Experimentsteuerungssystems

Die Verwaltung der Namen erfolgt dynamisch durch einen speziellen Prozeß des Nachrichtenübermittlungssystems (*nameserver*). Er übernimmt die Funktion einer Adreßdatenbank und ordnet beim Erzeugen der einzelnen Objekte die logischen Namen den aktuellen physikalischen Adressen zu.

Diese Funktionalität kennzeichnet in der Sprache der verteilten objektorientierten Programmierung einen *object request broker*. Ähnliche Ansätze werden bereits seit längerem in vereinfachter Form auf UNIX-Rechnern z. B. für RPCs¹⁴ zur Verfügung gestellt. Die in der Tabelle */etc/services* definierten Dienste eines Rechners werden netzwerkweit zur Verfügung gestellt. Der Unterschied liegt in der einfachen Punkt zu Punkt¹⁵ Struktur der definierten Dienste. Eine Klienten-Komponente kann nur Verbindungen zu Diensten aufbauen, von denen sie die Netzwerkadresse des Servers und die Portnummer des entsprechenden Services bereits kennt. Die Kenntnis der Art des Dienstes (logischer Name) reicht hier im Gegensatz zum Nachrichtenübermittlungssystem MUIPX nicht aus. Mit Rücksicht auf die Effizienz des verwendeten Nachrichtenübermittlungssystems ist die Namenslänge auf maximal 31 Zeichen begrenzt worden. Die Struktur der gewählten Namenskonvention zeigt Abbildung 2.7, sie ist im Sinne der Informatik ein gerichteter Graph (Baum). Dadurch lassen sich die Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten voneinander ableiten. Im obigen Beispiel hängen *water/temp* und *water/flow* von *speca/magnet/quad/current* ab. Diese hierarchisch gegliederte Abhängigkeit wird insbesondere von der Startlogik des Steuerungssystems (Abschnitt 3.5) intensiv genutzt.

¹⁴remote procedure call

¹⁵peer to peer

Protokoll

Die Aufgabe des Protokolls¹⁶ ist die Definition der Form und des Inhaltes der zwischen den einzelnen Objekten ausgetauschten Datenstrukturen. Es hat sich gezeigt, daß eine Aufteilung der ausgetauschten Datenstruktur in mehrere Schichten (OSI¹⁷-Referenzmodell) zu einer Vereinfachung der Bearbeitung und die Möglichkeit der Kapselung einzelner Schichten erlaubt. Das Modell umfaßt sieben Schichten. In jeder Schicht existieren Instanzen¹⁸, durch die schichtspezifische Leistungen erbracht werden. Die Anordnung ist streng hierarchisch, d.h. eine Instanz der Schicht N kann nur das Dienstangebot einer Instanz der direkt darunterliegenden Schicht $N - 1$ in Anspruch nehmen und ihre eigenen Dienste nur einer Instanz der direkt darüberliegenden Schicht $N + 1$ anbieten. Eine Instanz kommuniziert logisch mit einer Partnerinstanz¹⁹, d.h. einer Instanz gleicher Ebene in einem entfernten System. Die Kommunikation zwischen Partnerinstanzen wird durch Protokolle geregelt.

Die Abbildung 2.8 zeigt die allgemein verwendete Einteilung der Netzwerkkommunikation in Schichten bzw. Ebenen und die Abbildung auf die im Steuerungssystem verwendeten Schichten. Die Protokollebene des Nachrichtenübermittlungssystems besitzt durch die Trennung keine Informationen über die Nachrichtenverarbeitung des Experimentsteuerungssystems und der auf dieser Ebene zur Kommunikation verwendeten Datenstrukturen. Auf die komplette Differenzierung aller Schichten wurde zugunsten einer einfachen und effizienten Handhabung verzichtet. Die Trennung der wichtigsten Ebenen ermöglicht den Einsatz des Messagesystems auch für andere Aufgaben. Ein Beispiel wäre der Einsatz im Rahmen der Datenerfassung zur Übertragung der Informationen des Kontrollflusses. Die Trennung in verschiedene Ebenen erlaubt andererseits auch den Austausch des verwendeten Messagesystems MUPIX gegen andere Nachrichtenübermittlungssysteme gleicher Basisfunktionalität (z. B. PVM²⁰, MPI²¹, CORBA²², ...).

Für den Einsatz mehrerer Rechner mit unterschiedlicher Architektur müssen die auszutauschenden Daten in einer eindeutigen Darstellung, d. h. in einem gemeinsamen Format kodiert werden. Für das Steuerungssystem wurde zuerst die Kodierung der Datenstrukturen in Form von Zeichenketten gewählt. Hierzu werden alle Informationen in sogenannten *strings* übertragen. Dies bietet vor allem in der Programmentwicklungsphase deutliche Vorteile, da die ausgetauschten Nachrichten direkt lesbar sind. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in der mangelnden Effizienz und der Fehleranfälligkeit bei der Interpretation der Daten. Daher wurde beim Übergang auf das Nachrichtenübermittlungssystem MUPIX das dort verwendete Standardverfahren XDR²³ übernommen. Es spezifiziert eine gemeinsame maschinenunabhängige und netzwerkweite Form der Datenkodierung. In-

¹⁶Satz von Regelungen für den Austausch von Informationen

¹⁷open system interconnection

¹⁸Einzel adressierbare, mit speziellen Werten belegte, von einer abstrakten Klasse abgeleitete, logische Einheit

¹⁹peer entity

²⁰parallel virtual machines

²¹message passing interface

²²common object request broker architecture

²³external data representation

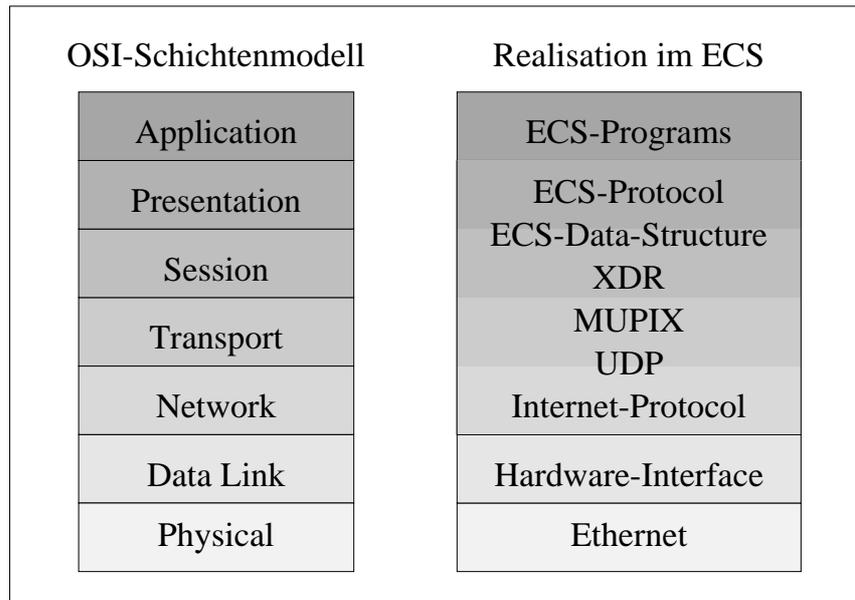


Abb. 2.8: Struktur der verschiedenen Ebenen des Experimentsteuerungssystems im Vergleich zum OSI-Schichtenmodell

zwischen sind noch effizientere Methoden zur Netzwerkdatenkodierung (RMR²⁴) entwickelt worden. Sie beruhen auf der Tatsache, daß beim XDR jede Nachricht unabhängig von den Architekturen der beteiligten Rechner immer sowohl beim Senden als auch beim Empfangen einer Nachricht kodiert werden muß. Bei der RMR-Methode kodiert der Absender nicht die Nachricht, sondern er kennzeichnet lediglich die Form der Daten durch einen Schlüssel, der seiner Architektur entspricht. Im schlechtesten Fall muß der Empfänger der Nachricht die Daten konvertieren, im bestem Fall (bei gleicher Architektur von Sender und Empfänger) ist keine Umwandlung notwendig. Der Nachteil dieser Methode ist, daß alle Rechner die Umwandlungsmethoden aller beteiligten Architekturen besitzen müssen. Dies bedeutet erheblichen Aufwand, wenn eine neue Architektur zum Netzwerk hinzugefügt wird (z.B. 64-Bit Struktur der DEC-Alpha-Rechner). Daher wird im Rahmen des Steuerungssystems weiterhin das XDR-Verfahren eingesetzt. Es hat einen relativ einfachen Übergang auf die neue DEC-Alpha-Architektur ermöglicht.

Oberhalb der Protokollebene des MUPIX liegt eine weitere logische Ebene, welche alle steuerungsspezifischen Informationen enthält. Diese Daten gliedern sich in zwei Teilbereiche. Zum einen in die erweiterten Adressierungsinformationen des Steuerungssystems [Kund-92] und zum anderen in die übermittelten Dateninhalte. Der Austausch von Nachrichten besteht im Experimentsteuerungssystem normalerweise aus einem Zyklus von Anfragen eines Klienten und den entsprechenden Antworten des angesprochenen Servers. Die zum Nachrichtenaustausch verwendete Struktur besitzt folgende Komponenten:

- eine eindeutige Auftragsnummer anhand derer eine empfangene Antwort dem ursprünglichen Auftrag zugeordnet werden kann

²⁴receiver makes it right

- den Nachrichtentyp (Auftrag bzw. Antwort)
- die Kodierung der Zugriffsberechtigungen des Absenders der Nachricht auf das adressierte Objekt
- das adressierte Feld des angesprochenen Objektes
- die Art der Aktion, die das adressierte Feld ausführen soll
- die Datentypklasse. Zur Zeit werden zwei Klassen unterstützt:
 - *MSG_aKDBorder* für Datenbankanfragen
 - *MSG_aBasicData* für den Nachrichtenaustausch der Objekte untereinander. Der Basisdatentyp *aBasicData* ist ein generischer Datentyp, der bei der Kommunikation der Objekte untereinander verwendet wird. Die spezielle Datenstruktur der Geräte-Handler wird erst auf der Anwenderebene spezifiziert (überladen). Hierdurch ist es möglich, die Daten für die Transportebene des Experimentkontrollsystems transparent zu halten. Diese Ebene benutzt lediglich Standardfunktionen, die auf dem allgemeinen Datentyp *aBasicData* basieren. Die Funktionen ermöglichen zusätzlich das Erzeugen und das Vernichten von Objekten aus abgeleiteten Klassen der Basisklasse *aBasicData*. Sie erlauben die Zuweisung des Inhaltes an andere Objekte und die Verpackung in das einheitliche Format zum Netzwerktransport. Hierdurch ist es möglich, obwohl jedes Objekt auf einem dem speziellen Problem angepaßten Datenformat arbeitet, dennoch ein gemeinsames Rahmenprogramm zu verwenden.
- die Namen von Absender und Adressat sind nicht mehr in der Datenstruktur enthalten, da diese Informationen bereits durch das Nachrichtenübermittlungssystem transportiert werden.

Kommunikationsrahmen

Wesentliche Teile der Auftragsbearbeitung der einzelnen Steuerungsobjekte sind sehr ähnlich. Um diese Routineaufgaben zu erledigen und den Programmierer von den speziellen Details des Protokolls zu entlasten, ist ein allgemeiner Rahmen für Geräte-Handler entwickelt und erstellt worden. Die Abbildung 2.9 zeigt die einzelnen Schritte der Auftragsverarbeitung innerhalb des Kommunikationsrahmens. Er enthält die Funktionen auf Server-(Empfänger-)Seite. Das Protokoll auf der Klienten-(Absender-)Seite wird in der Bibliothek *libECS* speziell in der Funktion *ecs_work()* abgehandelt. Die Bearbeitung innerhalb des Kommunikationsrahmens erfolgt nach einem festen Schema. Erhält ein Geräte-Handler den Auftrag, den Zustand eines Feldes zu ändern, z.B. einen neuen Wert einzustellen, prüft er zuerst, ob der Absender des Auftrags berechtigt ist, diesen Auftrag zu erteilen. Falls die Berechtigung gültig ist, wird der Auftrag an das entsprechende Feld des adressierten Objektes weitergeleitet. Anschließend werden die spezifischen Daten des Auftrags an die angewählte Aktion innerhalb des Feldes weitergegeben. Dort wird die eigentliche Änderung des Zustandes vorgenommen. Nur an dieser Stelle werden gerätespezifische Routinen in den Geräte-Handler

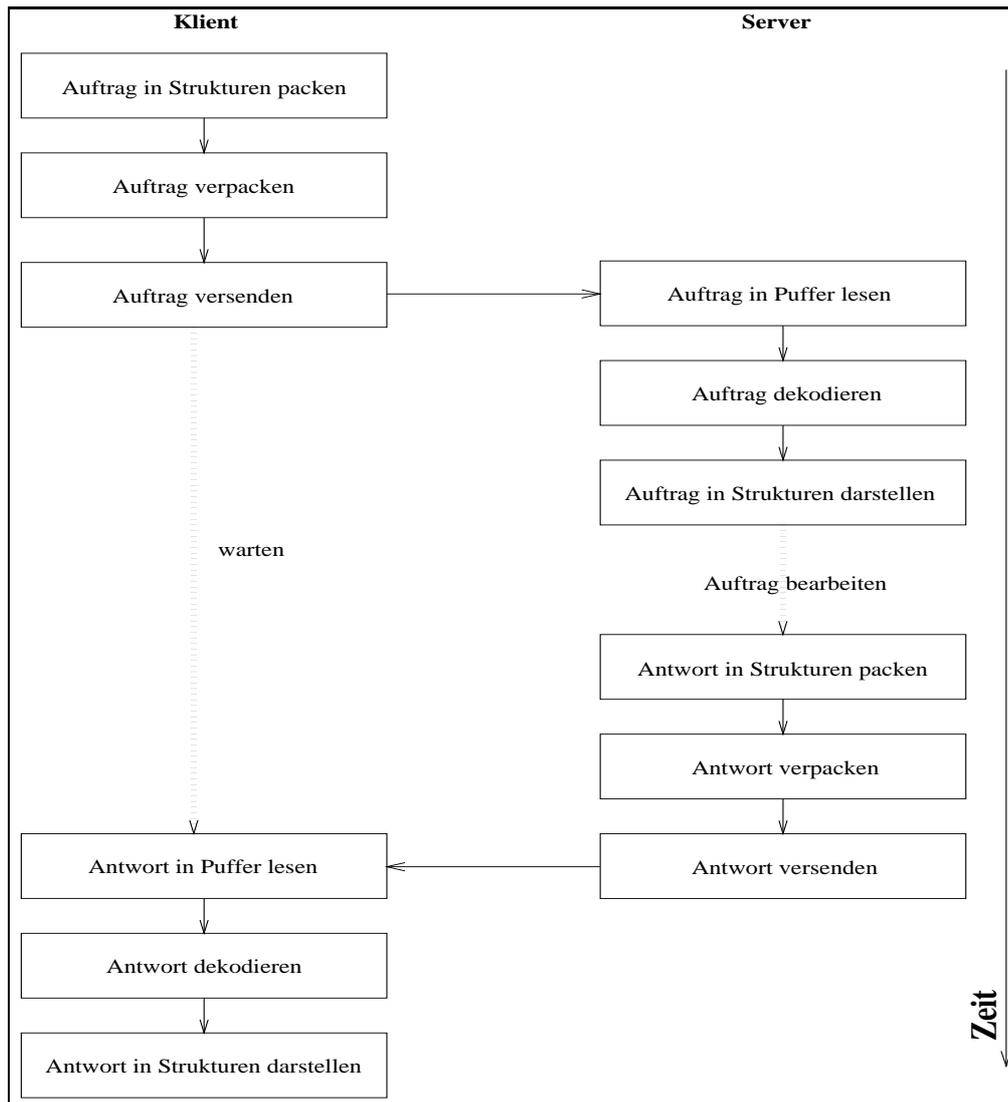


Abb. 2.9: Auftragsbearbeitung im Experimentsteuersystem

eingebunden. Daher reduziert sich die Erstellung von neuen Geräte-Handlern durch die Verwendung des gemeinsamen Kommunikationsrahmens auf die Programmierung einiger, gerätespezifischer Funktionen.

Nachdem der Auftrag erfolgreich ausgeführt, d.h. der Zustand gemäß des Auftrags verändert wurde, wird der neue Zustand als Antwort/Quittung an den Klienten zurückgeschickt. Außer der bisher beschriebenen Form der synchronen Auftragsbearbeitung gibt es zusätzlich die Möglichkeit, einen Auftrag asynchron bearbeiten zu lassen und nicht auf seine Erledigung zu warten.

Sicherung der Kommunikation

Das Ethernet-Netzwerk der Steuerungsrechner ist offen für alle Rechner innerhalb des Internetnetzwerks. Dies wird durch das vom Nachrichtenübermittlungssystem verwendete Internetprotokoll UDP ermöglicht. Dadurch können Prozesse des Steuerungssystems auf allen Rechnersystemen gestartet werden, die über

ausführbare Versionen des entsprechenden Programms verfügen. Damit wird es möglich, den Zustand der Spektrometeranlage von jedem Rechner innerhalb des Netzwerks aus zu überwachen und zu kontrollieren.

Ein Nachteil des offenen Konzepts ist die mögliche Beeinträchtigung der Betriebssicherheit des Steuerungssystems. Diesem ist durch ein umfangreiches und weiter ausbaubares Sicherheitssystem Rechnung getragen worden. Zur Zeit basiert der Schutz auf dem Authentisierungsmechanismus der beteiligten Rechner. Die Maschinen werden gemäß der Zugänglichkeit ihres Aufstellungsortes und der Sicherheit ihres Betriebssystems klassifiziert.

Eine grundlegende Voraussetzung für den Schutz innerhalb des Steuerungssystems ist der gesicherte Betrieb der Datenbank. Hierzu muß sie unbedingt auf einem geschützten Rechnersystem betrieben werden. Das Datenbanksystem verwaltet eine Liste aller zugelassenen Benutzer einschließlich der ihnen zugewiesenen Sicherheitsstufe. Zusätzlich ist jedes einzelne Objekt innerhalb des Experimentsteuerungssystems entsprechend seiner Sicherheitsanforderungen klassifiziert. Bei jedem Zugriff prüft das angesprochene Objekt die aktuell benötigte Autorisierungsstufe des Klienten für Zustandsänderungen am adressierten Serverobjekt.

Die verwendeten Schutzmechanismen des Steuerungssystems können bei Bedarf erheblich erweitert werden:

- durch zusätzlichen Einsatz moderner Hardware, sogenannter Ethernet-Brücken²⁵ oder intelligenter Router. Sie blockieren alle Nachrichtenpakete auf dem Netzwerk, die nicht von vorher festgelegten Absendern stammen. Dies bedeutet letztendlich den Aufbau eines eigenen Steuerungs- und Datenerfassungsnetzes, das nur genau an einer Stelle mit dem übrigen Netzwerk verbunden ist.
- durch einen zusätzlichen Softwareschutz innerhalb des Nachrichtenübermittlungssystems MUPIX. Ein erster Schritt wäre die Aufteilung des Steuerungssystems in verschiedene unabhängige Adressierungsbereiche (z.B für *spec*, *specb*, ...) durch Nutzung der verschiedenen Domänen innerhalb des MUPIX.
- durch den Einsatz eines professionellen Sicherheitssystems. Hierfür sind innerhalb des Experimentsteuerungssystems Vorbereitungen getroffen worden.

Der Einsatz der zusätzlichen Softwareschutzmechanismen würde jedoch die Verarbeitungsgeschwindigkeit erheblich reduzieren, daher wurde vorerst auf ihren Einsatz verzichtet.

Eine weitere Art der Kommunikationssicherung ist die Fehlerbehandlung. Die Fehlererkennung beruht auf zwei verschiedenen Quittungsebenen. Die erste Ebene liefert das verwendete Nachrichtenübermittlungssystem. Falls eine Nachricht innerhalb eines einstellbaren Zeitintervalls nicht zustellbar ist liefert der entsprechende Funktionsaufruf eine Fehlermeldung. Die zweite Quittungsebene liegt innerhalb der Funktionen des Steuerungssystems. Hier wird eine gesicherte Nachrichtenübertragung durch mehrfache Wiederholung der Kommunikation sichergestellt. Zur Sicherstellung der genau einmaligen Übertragung enthalten die Nach-

²⁵bridges

richten eine eindeutige Auftragsnummer zur Identifikation von Doppelübertragungen. Nachdem ein Auftrag ausgeführt worden ist sendet der entsprechende Server die Antwort an den Klienten unter der gleichen Auftragsnummer zurück. Durch diese Form der asynchronen Bearbeitung ist das System sehr robust gegen zeitweilige Ausfälle/Störungen einzelner Komponenten. Es kann falls notwendig durch den Neustart eines entsprechenden Servers für die Klienten–Applikation völlig transparent weiterarbeiten.

2.4 Datenbank

Der zentrale Bestandteil des Experimentsteuerungssystems ist die Datenbank. Ihre Hauptaufgabe liegt in der schnellen und netzwerkweiten Bereitstellung der gesamten Initialisierungsinformationen für alle Objekte der Spektrometeranlage. Hierzu gehören alle variablen Parameter des Experimentsteuerungssystems. Dies reicht von einfachen Zahlen wie den Basisadressen der VMEbus–Module bis hin zu komplexen Strukturen wie etwa den Darstellungsparametern der graphischen Benutzeroberfläche.

Während des Betriebs des Steuerungssystems erhalten die einzelnen Komponenten ihre gesamte zur Kommunikation untereinander benötigte Adressierungsinformation sowie die aktuellen Betriebsparameter der Spektrometeranlage aus der Datenbank. Zusätzlich werden die Protokolle des Status–Servers über alle Zustandsänderungen der gesamten Spektrometeranlage dauerhaft in der Datenbank abgelegt.

2.4.1 Anforderungen

Aufgrund der unterschiedlichen Aufgaben der Datenbank ergeben sich zum Teil widersprechende Anforderungen. Diese lauten:

- instantane Bearbeitung vieler Datenbank Anfragen
- einfache und komfortable Konfiguration und Pflege der Datenbestände
- Portierbarkeit auf alle gängigen Betriebssysteme, insbesondere auch auf die VMEbus–Rechner
- freie Definition der zu speichernden Daten und Datentypen bis hin zu Binärdateien
- einfache Erweiterbarkeit
- Bereitstellung einer interaktiven, menügesteuerten Benutzerschnittstelle
- Programmschnittstelle mit SQL–Bibliothek
- Anbindung an das Nachrichtenübermittlungssystem MUIPX
- Aufbau in Klienten/Server–Architektur
- automatische Verteilung des Datenbestandes auf die angeschlossenen Rechner

Diese Forderungen lassen sich praktisch nur mit einer Datenbank erfüllen, die im Quelltext vorliegt. Zum Zeitpunkt des Aufbaus des Steuerungssystems existierten nur wenige, zumeist semiprofessionelle Datenbanken im Quelltext. Sie entsprachen den Anforderungen nur zu einem geringen Teil. Durch ihre umfangreichen Funktionen läßt sich allerdings relativ schnell ein kleines Datenbanksystem zusammenstellen. Die Probleme beginnen jedoch bereits beim transparenten Netzwerkzugriff der Steuerungsprozesse auf die Datenbank. Einfache Punkt-zu-Punkt Verbindungen zu einem einzigen Datenbankprozeß sind aufgrund der großen Zahl von Geräte-Handlern nicht möglich. Eine Lösung wäre eine auf die verschiedenen Rechner verteilte Datenbank. Sie bereitet jedoch bei den einfachen Datenbanken Probleme mit der Datenkohärenz²⁶. Der Anpassungsaufwand der kommerziellen Datenbanken an das Steuerungssystem ist relativ hoch. Die betrachteten Datenbanken sind auch nach Anpassungen nicht in der Lage, die aufgezählten Anforderungen zu erfüllen.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept erarbeitet, das langfristig die Möglichkeit bietet, alle Anforderungen abzudecken und gleichzeitig die wichtigsten Eigenschaften bereits nach kurzer Entwicklungszeit zur Verfügung zu stellen. Die Idee beruht auf der Kombination einer einfachen und schnellen Eigenbaudatenbank als Frontend²⁷ in Verbindung mit einer in Zukunft zu implementierenden kommerziellen, relationalen²⁸ und menügesteuerten Datenbank (z.B. Sybase, Oracle, ...) im Hintergrund. Die Eigenbaudatenbank bildet die Schnittstelle zu den Programmen des Steuerungssystems, die relationale Datenbank die Schnittstelle zum Anwender. Nach Abschluß der Experimentkonfiguration werden aus der Hintergrunddatenbank automatisch einfache Tabellen generiert und in die Frontenddatenbank geladen.

Eine weitere Komponente des Datenbanksystems ist der zentrale Status-Server [Kram-95]. Er erhält alle Zustandsänderungen der einzelnen Komponenten des Steuerungssystems und stellt den aktuellen Zustand jedes einzelnen Gerätes zur Verfügung. Gleichzeitig werden die Informationen in der Frontenddatenbank abgelegt. Sobald eine entsprechende Hintergrunddatenbank installiert ist, wird dort die permanente Speicherung der Zustände erfolgen.

2.4.2 Frontenddatenbank

Die wesentlichen Anforderungen an die Frontenddatenbank waren schnelle und zuverlässige Verfügbarkeit, hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, einfacher Aufbau, gute Portabilität und optimale Anpassung an die Bedürfnisse des Experimentsteuerungssystems.

Eine Möglichkeit diese Forderungen effizient zu verwirklichen, ist die Verwendung des Dateisystems als Datenbank. Dies bringt vor allem in der Entwicklungsphase erhebliche Vorteile. So war es von Anfang an möglich, die Prozesse mit

²⁶Alle Komponenten der Datenbank liefern zur gleichen Zeit im gesamten Netzwerk die gleichen Daten

²⁷Direkte Interprozeß-Schnittstelle

²⁸Daten und ihre Beziehungen werden innerhalb der Datenbank in Form von Relationen abgespeichert

Schreib/Lese-Operationen direkt auf die Initialisierungs- bzw. Konfigurationsdateien zugreifen zu lassen. Hierzu wurde eine Funktionsbibliothek erstellt. Die Programme lesen mit ihrer Hilfe die benötigten Informationen direkt aus den entsprechenden Verzeichnissen. Dies hat die Konsequenz, daß sich alle Prozesse lokal auf dem Steuerungsrechner mit dem Datenbankdateisystem befinden müssen. Da diese Einschränkung für ein dezentrales Steuerungssystem nicht akzeptabel ist, wurde nach netzwerkweiten Zugriffsmöglichkeiten gesucht. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten diese Restriktion aufzuheben:

- Das Dateisystem wird netzwerkweit zur Verfügung gestellt (NFS)²⁹. Dies ist insbesondere während der Softwareentwicklung sehr hilfreich, da Tests ohne die Einwirkung anderer Prozesse (z.B. Datenbankserver) durchgeführt werden können. Der Nachteil dieser Methode liegt in der schwierigen Behandlung auftretender Störungen innerhalb des Netzwerkdateisystems, da sie für das Steuerungsprogramm nicht sichtbar sind. Zudem war zum damaligen Zeitpunkt der Einsatz des Netzwerkdateisystems auf den verwendeten OS9-VMEbus- und VMS-Rechnern noch nicht möglich.
- Die Daten werden netzwerkweit durch ein spezielles Programm innerhalb des Netzwerkes verteilt. Zu diesem Zweck wird für alle nicht auf dem zentralen Steuerungsrechner laufenden Prozesse ein Datenbankserver bereitgestellt.

Die Datenbank wurde entsprechend der zweiten Möglichkeit aufgebaut. Sie teilt sich basierend auf dem Klienten/Server-Modell³⁰ in zwei Komponenten. Zum einen dem zentralen Datenbankserver, der alle Datenbank Anfragen der einzelnen Prozesse erhält. Er beantwortet die Anfragen, nachdem er die entsprechenden Informationen aus dem Dateisystem gelesen hat. Zum anderen dem Klienten-Teil, der in Form von Bibliotheksroutinen realisiert wurde. Der Datenbankzugriff erfolgt für den Anwender transparent, d. h. er bemerkt nichts von der Teilung der Aufgaben zwischen Klienten und Server. Dieser Ansatz ermöglicht eine optimale Auslastung des Steuerungssystems bei Datenbank Anfragen. Alle rechenintensiven Operationen werden auf Klienten-Seite durchgeführt. Sie entlasten dadurch den Datenbankserver und führen zu einer hohen Reaktionsgeschwindigkeit. Ein weiterer Vorzug besteht darin, Daten lokal auf der Klienten-Seite zwischenspeichern³¹ zu können, um die Anzahl der expliziten Datenbankzugriffe zu reduzieren. Durch dieses flexible Konzept ist die Datenbank zu keinem Zeitpunkt ein Engpaß innerhalb des Experimentsteuerungssystems. Im Anhang findet sich eine Beschreibung der Datenbank und ihrer Bibliotheksroutinen.

Aufbauend auf dem Klienten/Server-Prinzip können durch den Einsatz des Nachrichtenübermittlungspaketes MUIX zur lokalen und netzwerkweiten Kommunikation die verschiedenen Steuerungsprogramme wahlfrei auf verschiedenen Rechnerarchitekturen und Betriebssystemen eingesetzt werden.

Die logischen Namen innerhalb des Steuerungssystems basieren im wesentlichen auf der Struktur der erstellten Frontenddatenbank. Die Informationen bezüglich

²⁹network file system

³⁰Ein allgemeiner Ansatz zur Ressourcenverwaltung in einer Multiprozeßumgebung. Der Server stellt eine bestimmte Resource zur Verfügung, die von Klienten nachgefragt wird

³¹Cache = schneller Zwischenspeicher, der im allgemeinen zur Reduktion der Festplattenzugriffe dient

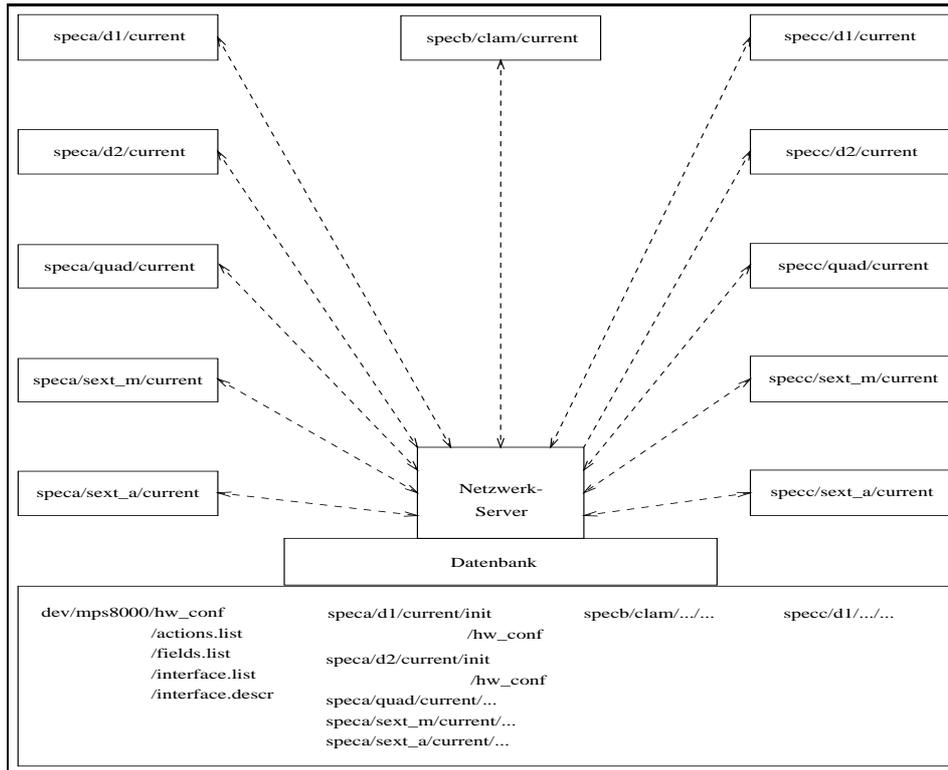


Abb. 2.10: Aufbau und Struktur der Frontenddatenbank am Beispiel der Elektromagneten der Spektrometeranlage mit den eingesetzten Netzgeräten vom Typ MPS8000

eines logischen Gerätes sind in der Datenbank unter dem jeweiligen Dateinamen abgespeichert. Wie Abbildung 2.10 zeigt sind z. B. die Initialisierungsdaten für das Netzgerät *specca/magnet/quad/current* in dem Dateiknoten unter dem Namen *specca/magnet/quad/current* abgelegt. Für den schnelleren Zugriff gliedert sich die Information in mehrere Standarddateien:

- **init**
 - Adressierungsinformation für das Nachrichtenübermittlungssystem
 - Daten zur automatischen Selbstüberwachung der Geräte
- **hw_conf**
 - gerätespezifische Konstanten (Ganze Zahlen, Gleitkommazahlen, Zeichenketten)
 - daraus abgeleitete, höhere Datenstrukturen
- **interface.list**
 - standardisierte Beschreibung der Softwareschnittstelle zur Interaktion mit dem Geräte-Handler
- **interface.descr**
 - Konfigurationsdaten der Benutzerschnittstelle zur interaktiven Gerätebedienung

Die Dateien sind nicht notwendigerweise für jedes einzelne Gerät/Objekt (Instanz) vorhanden. Sie müssen jedoch mindestens einmal für jede Gerätegattung

(Klasse), im obigen Beispiel MPS8000, vorhanden sein. Die Datenbank versucht, zuerst die spezifischen Informationen unter dem logischen Namen eines Gerätes zu finden. Falls dies nicht gelingt, werden die voreingestellten Werte³² der Gerätegattung verwendet. Unter der Gerätegattung existieren zwei weitere Dateien *actions.list* und *fields.list*. Sie beinhalten Tabellen zur Umsetzung der adressierten Aktionen und Felder in die klassenspezifische, interne Darstellung. Dadurch ist die gesamte Kommunikationsschnittstelle der Geräte-Handler über die Datenbank verfügbar. Die Gesamtheit aller Dateien, die eine Klasse beschreiben, wird Klassenbeschreibungsdatei genannt. Sie definiert komplett die Schnittstellen der abgeleiteten Objekte. Zur Zeit existiert eine Kopie der Klassenbeschreibungsdatei in Form von *include*-Dateien im Stammverzeichnis des entsprechenden Geräte-Handlers. Dies bedeutet, daß diese beiden Beschreibungsarten konsistent gepflegt werden müssen. Diese Aufgabe wird künftig von der im folgenden Abschnitt beschriebenen Hintergrunddatenbank automatisch erledigt werden.

Die Verwendung des Dateisystems erleichtert nicht nur die Strukturierung der Daten sondern ermöglicht auf UNIX-Systemen hohe Zugriffsgeschwindigkeiten, da das Betriebssystem einen Teil des Arbeitsspeichers zur Pufferung der Dateisystemzugriffe bereithält. Auf diese Weise werden die häufig verwendeten Daten insbesondere die Informationen über die Struktur des Dateisystems bereits im Hauptspeicher resident gehalten. Dies reduziert die Zugriffszeit um bis zu drei Größenordnungen (von ca. 10 ms für Festplattenzugriffe auf 100 μ S für interne Speicherzugriffe).

Die Repräsentation der Daten im Dateisystem erfolgt in Form von Zeichenketten. Dies ist insbesondere in der Entwicklungsphase sehr vorteilhaft, da die Daten mit jedem beliebigen Editor³³ bearbeitet werden können. Andererseits wirkt sich dies nachteilig auf das Datenbanksystem aus, da es keine aktive Kontrolle über die einzelnen Änderungen in den Datenbankdateien besitzt. Hierzu wäre eine spezielle Benutzeroberfläche zur Sicherstellung von konsistenten Änderungen notwendig. Ein weiteres Problem von hierarchisch strukturierten Datenbanken wie der verwendeten Frontenddatenbank ist die unvermeidliche Redundanz von Informationen innerhalb der baumartigen Struktur. Dies erfordert umfangreiche Konsistenzprüfungen bei der Wartung und Pflege der Datenbestände. Ein weiterer Nachteil einer hierarchischen Datenbank ist die prinzipielle Beschränkung auf $1 \rightarrow n$ Beziehungen. Dies grenzt die freie Strukturierbarkeit der Daten und ihrer Beziehungen innerhalb des Steuerungssystems ein.

Auf die Lösung der aufgezeigten Nachteile innerhalb der Struktur der Frontenddatenbank wurde verzichtet, da diese Probleme wesentlich besser im Rahmen einer kommerziellen Hintergrunddatenbank gelöst werden können.

2.4.3 Hintergrunddatenbank

Die logische Konsequenz aus dem oben gesagten ist die Einführung einer kompletten, mit allen Hilfsprogrammen zum einfachen und sicheren Betrieb ausgestat-

³²defaults

³³Standardprogramm zur Bearbeitung von Texten

teten, relationalen SQL³⁴-Datenbank. Sie wird für alle Anwendungen eingesetzt, die keine besonderen Anforderungen in Bezug auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit stellen. Sie verwaltet alle Daten und ihre Verknüpfungen untereinander in Form strukturierter Tabellen. Hierdurch ergibt sich eine flexible Struktur ohne Redundanzen.

Datenbankunabhängige Datenmodellierung

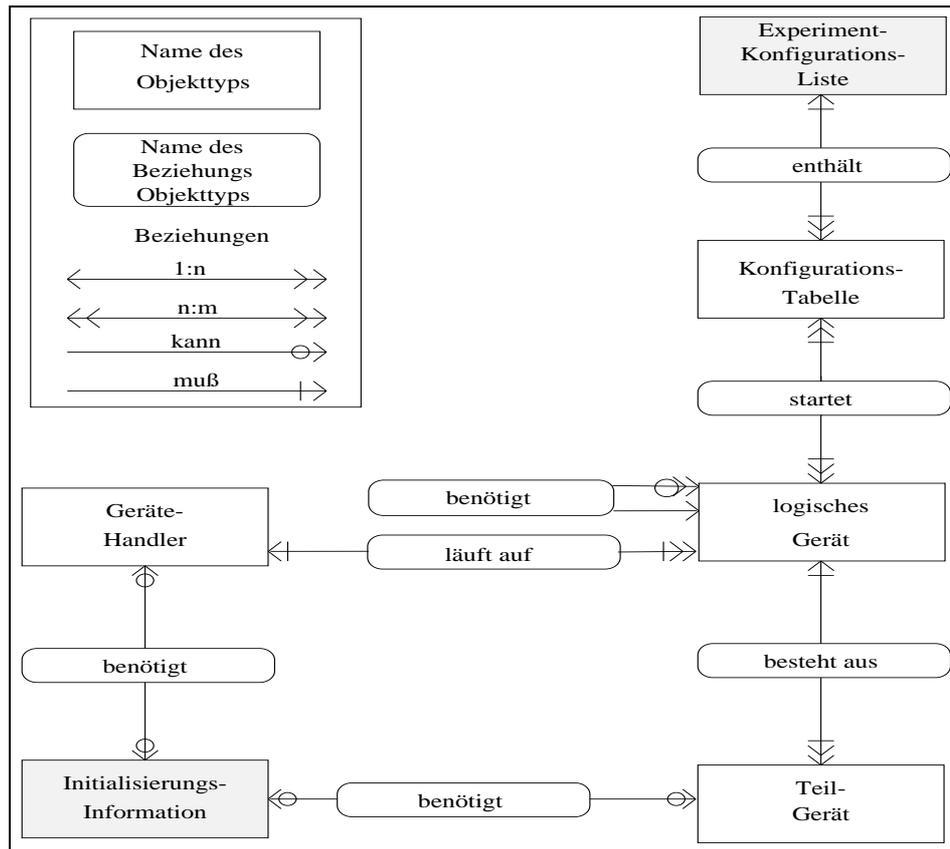


Abb. 2.11: Datenmodellierung des Experimentkontrollsystems im Entity-Relationship-Modell

Für relationale Datenbanken sind allgemeine Methoden zur abstrakten Beschreibung der Datenbankinhalte entwickelt worden. Die häufigste Form der semantischen Datenmodellierung ist das Entity-Relationship-Modell. Es ist datenbankunabhängig und beschreibt die Verknüpfungen (Relationship) zwischen wohlunterscheidbaren Objekten (Entity) mit ihren definierten Eigenschaften (Attributen). Eine Erläuterung dieses Modells findet sich im Anhang C.2. Die Strukturierung des Experimentkontrollsystems in diesem Datenmodell zeigt Abbildung 2.11. Die Daten des Steuerungssystems lassen sich grob in zwei Teile gliedern. Der untere Teil stellt die Abhängigkeit der einzelnen Geräte-Handler von ihrer Initialisierungsinformation dar. Der obere Teil erläutert die Informationszusammenhänge zwischen den zu startenden Prozessen über die Experimentkonfigurationsliste.

³⁴structured query language

Id	Gerätename	Programm	Rechner	Pfad	Parameter
1	dev/adc/3	tvm740	floor	/usr/local/a1/bin	-n -e -l 0
2	dev/current/1	mps8000	a1c/speca	/usr/local/a1/bin	-n -e -l 0
3	dev/current/2	mps8000	a1c/speca	/usr/local/a1/bin	-n -e -l 0
4	dev/magnet/3	magnet	a1c/speca	/usr/local/a1/bin	-n -e -l 0
5	dev/magnet/5	magnet	a1c/specb	/usr/local/a1/bin	-n -e -l 0
6

Tab. 2.1: Auszug der Konfigurationstabelle mit den zugehörigen Attributen

Jeder rechteckige Kasten entspricht einem Objekt, jede ovale Umrandung einer Relation. Die Objekte bestehen aus einer Tabelle mit zugeordneten Attributen. Ein Beispiel hierfür ist der Auszug aus der Konfigurationstabelle 2.1.

SQL-Datenbank INGRES

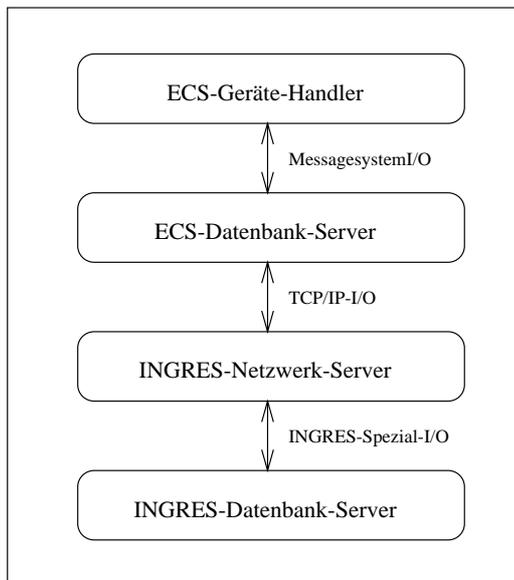


Abb. 2.12: Netzwerkanbindung der relationalen Datenbank INGRES an die Programme der Experimentsteuerung

Für die Experimentsteuerung ist der Einsatz der relationalen Datenbank INGRES unter dem Betriebssystem ULTRIX untersucht worden. Abbildung 2.12 zeigt die interne Prozessstruktur zum netzwerkweiten Zugriff auf die Dateninhalte der relationalen Datenbank. INGRES bietet eine Schnittstelle zur Programmiersprache C, das sogenannte *embedded SQL*. Hierdurch können SQL-Befehle nicht nur interaktiv sondern auch aus einem Programm heraus ausgeführt werden. Zusätzlich enthält das INGRES-Softwarepaket Programme zur Generierung von C-Datenstrukturen aus den internen Tabellen der SQL-Datenbank. Dies ermöglicht den Einsatz des Datenbanksystems für das Experimentsteuerungssystem. Daher wurde IN-

GRES auch für den direkten Zugriff der Steuerungsprozesse als Frontenddatenbank eingesetzt. Die Tests zeigten die prinzipielle Verwendbarkeit eines kommerziellen Datenbanksystems mit C-Programmschnittstelle. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Datenbank war aufgrund ihrer komplexen Struktur jedoch relativ gering. Im Mittel vergingen zwischen einer Datenbankanfrage und der Antwort mehr als 100 ms. Die Ursache für die langsame Bearbeitung von Anfragen liegt in der historisch gewachsenen, ungünstigen Aufteilung der Datenbankverarbeitung auf verschiedene Prozesse. Auch die Tests von INGRES als Hintergrunddatenbank haben ergeben, daß sie zur konsistenten Wartung und Pflege

der Datenbestände nicht sinnvoll eingesetzt werden kann. INGRES besitzt wie die Frontenddatenbank keinen Maskengenerator zur sicheren und kontrollierten Änderung von Datenbankeinträgen. Der relativ kleine Flexibilitäts- und Sicherheitsgewinn durch den Einsatz der relationalen Datenbank INGRES rechtfertigt nicht den notwendigen Umstellungsaufwand. Daher wurde die Verwendung von INGRES als Hintergrunddatenbank eingestellt. Zur Zeit werden Untersuchungen zum Einsatz des kommerziellen SQL-Datenbanksystems *Sybase* als Hintergrunddatenbank durchgeführt.

2.4.4 Status-Server-Datenbank

Die aktuellen Zustände des Experimentsteuerungssystems werden von einem zentralen Status-Server³⁵ verwaltet. Das Programmpaket besteht aus dem Server und den zugehörigen Klienten [Kram-95] einschließlich einer Funktionsbibliothek zur Erstellung weiterer, eigener Klienten. Alle Objekte innerhalb des Experimentsteuerungssystems melden über die Funktionsbibliothek ihre Zustandsänderungen an den zentralen Server. Dieser hält den jeweils letzten Zustand der verschiedenen Felder innerhalb eines Objektes fest. Der zentrale Prozeß bietet verschiedene Möglichkeiten des Zugriffs auf die Zustände der einzelnen Objekte. Die Programme *opterm* und *opconsole* liefern die Zustandsänderungen ausgewählter Objekte bzw. Alarme und Fehler. Abbildung 2.13 zeigt die Interaktion des Steuerungssystems mit dem Status-Server *opcon*. Gleichzeitig können weitere Prozesse über die Bibliotheksroutinen auf die verschiedenen Zustände des Steuerungssystems zugreifen. Hiervon machen insbesondere die Benutzeroberflächen *opdisp* und *xopdisp* [Stef-93] intensiv Gebrauch.

Alle Programme melden sich beim Status-Server über Bibliotheksfunktionen mit einem speziellen Bezeichner³⁶ an, der in kodierter Form die Namen der Objekte enthält, über deren Zustandsänderungen das entsprechende Programm informiert werden will. Der Status-Server führt intern eine Liste der Anmeldungen und verteilt beim Ankommen neuer Statusmeldungen diese Information an die entsprechenden Programme. Die Informationsübermittlung an die einzelnen Programme erfolgt asynchron zu den internen Abläufen innerhalb der Prozesse. Zu diesem Zweck ist ein Notifier³⁷-Mechanismus [KrMe-92] erstellt worden. Er beruht auf einer zentralen Funktion, welche die gesamte Eingabe eines Programmes verwaltet. Die möglichen Eingabekanäle der Benutzeroberflächen sind zur Zeit Benutzereingaben über die Tastatur, Zustandsmeldungen vom Status-Server und eingehende Antworten auf Anfragen an Objekte über das Nachrichtenübermittlungssystem. Der Anwender meldet bei dem Notifier-Mechanismus eigene Funktionen an. Diese werden beim Eintreten eines entsprechenden Ereignisses auf dem zugehörigen Eingabekanal aktiviert. Durch diese Methode ist es möglich, auf mehreren Eingabekanälen gleichzeitig zu warten, ohne daß sich die verschiedenen Kanäle gegenseitig blockieren. Letztendlich beruht dieser Mechanismus auf dem Standard-UNIX-Betriebssystemaufruf *select*. Er überprüft auf unterster Ebene

³⁵Name: Opcon

³⁶regular expression

³⁷Methode zur Benachrichtigung über eingehende Zustandsänderungen

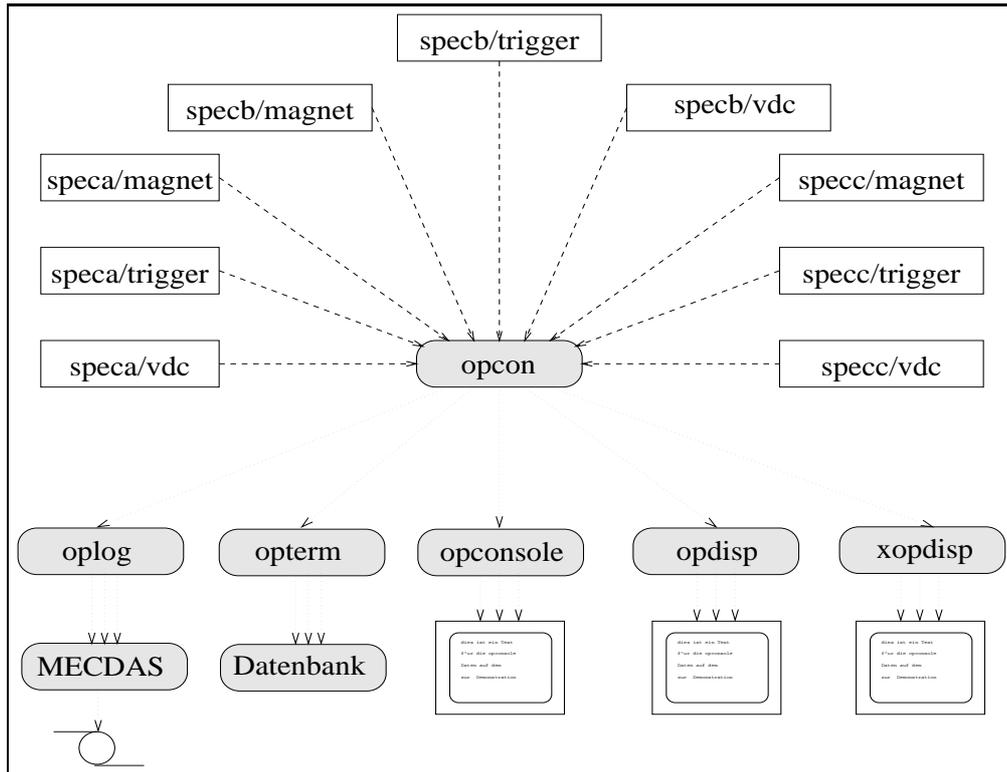


Abb. 2.13: Struktur des Status-Server-Systems mit den wichtigsten Standardkunden (in der unteren Bildhälfte) zur Ausgabe der Statusinformationen und den verschiedenen Gruppen von Geräte-Handlern (in der oberen Bildhälfte), die die Zustandsänderungen melden

mehrere Eingabekanäle auf das Vorhandensein von Daten.

Der Status-Server hält intern nur den jeweils letzten Zustand. Daher ist es für eine vollständige, sequentielle Archivierung aller Zustandsänderungen notwendig, diese an anderer Stelle zu speichern. Aus diesem Grund werden alle Zustandsänderungen innerhalb des Steuerungssystems in einer Datei des Frontenddatenbanksystems protokolliert. Abbildung 2.14 zeigt die Struktur der Protokolldatei; ein einzelner Eintrag besteht aus: Uhrzeit, Datum, Name des Objektes, Feld innerhalb des Objektes, Typ der Nachricht (OK, WARNING, ALARM, ...), Datentyp und dem aktuellen Wert des Zustandes.

In dieser Datei werden während des Meßbetriebs sehr viele Informationen abgelegt. Um den dafür nötigen Speicherplatz gering zu halten, wird die Datei regelmäßig abgeschlossen und anschließend komprimiert. Damit hierbei keine Zustandsinformationen verloren gehen, wird zuvor ein neuer Prozeß zur Archivierung der Zustandsänderungen gestartet. Dies kann periodisch durch das Betriebssystem gesteuert werden.

Zusätzlich werden Prozesse zur Darstellung der aktuellen Zustände des Steuerungssystems auf sogenannten Statusmonitoren gestartet. Sie erlauben den Experimentatoren einen schnellen Überblick über die gesamte Spektrometeranlage. In Zukunft sollen alle Statusinformationen zusätzlich in die relationale Datenbank eingetragen werden. Dies wird die effiziente Speicherung sowie den intelligenten Zugriff auf die Daten ermöglichen. Intelligent bedeutet in diesem Zusammenhang,

04:20:12	07.07	specca/magnet/cplate/water/flow	3	1	6	1083
04:20:25	07.07	specca/magnet/d1	6	1	11	1.48759
04:20:28	07.07	specca/magnet/d2	6	1	11	1.48893
04:20:30	07.07	specca/magnet/quad	6	1	11	0.52431
04:20:38	07.07	specb/magnet/d1	6	1	11	1.22222
04:20:39	07.07	specca/magnet/sext/m/water/flow	3	1	6	699
04:20:49	07.07	specca/magnet/d2/hall	3	1	11	-1.48659
04:21:00	07.07	specca/angle	35	1	14	35.0032
04:21:03	07.07	specc/magnet/sext	6	1	11	0.21758
04:21:08	07.07	specc/magnet/sext/a/water/flow	3	1	6	136
04:21:09	07.07	specc/magnet/sext/m/current	30	1	4	281.469
04:21:10	07.07	specc/magnet/quad/current	30	1	4	510.993
04:21:10	07.07	specc/magnet/sext/a/current	30	1	4	51.854
04:21:15	07.07	specc/magnet/sext/m/water/flow	3	1	6	671
04:21:16	07.07	specca/magnet/sext/a/water/temp	3	1	14	33.2208
04:21:20	07.07	specb/magnet/d1/hall	3	1	1	1.04162
04:21:20	07.07	specca/magnet/d1/current	30	1	4	1226.92
04:21:23	07.07	specca/magnet/d2/current	30	1	4	1217.48
04:21:25	07.07	specca/magnet/quad/current	30	1	4	611.297
04:21:25	07.07	specca/magnet/sext/a/current	30	1	4	75.7508
04:21:25	07.07	specca/magnet/sext/m/current	30	1	4	428.904
04:21:34	07.07	specc/magnet/d1/hall	3	1	11	-0.96226

Abb.2.14: Ausschnitt aus der Protokolldatei für Zustandsänderungen in der Frontend-datenbank

daß die Daten unter sehr komplexen Bedingungen gesucht und verknüpft werden können.

Neben der Speicherung in den Datenbanksystemen werden alle Zustandsänderungen während einer Messung mit den Experimentdaten abgespeichert. Dies erlaubt bei der Analyse der Meßdaten mögliche Änderungen der Betriebsparameter der Spektrometeranlage zu berücksichtigen. Die Meßdaten können in der Analyse entsprechend modifiziert und anschließend korrigiert abgespeichert werden.

Kapitel 3

Programme des Steuerungssystems

Zur Steuerung der Geräte des Experimentkontrollsystems sind spezielle Computerschnittstellen bereitgestellt und umfangreiche Programmpakete entwickelt worden. Das Ziel der Entwicklung war die optimale Anpassung der Hard- und Software an die Bedürfnisse der Dreispektrometeranlage und ihrer Benutzer.

Zielsetzung bei der Programmentwicklung war die flexible und gleichzeitig effiziente Abbildung der Geräte und ihrer physikalischen Eigenschaften auf logische Programmstrukturen. Der verwendete objektorientierte Ansatz im Softwaredesign erfordert als ersten Schritt die Klassifizierung der einzelnen Geräte nach ihren Eigenschaften. Anschließend werden die wesentlichen Eigenschaften und Funktionalitäten einer Gerätegattung in einer Basisklasse modelliert. Die besonderen Eigenschaften eines Gerätes werden in einer von der Basisklasse abgeleiteten gerätespezifischen Klasse verankert. Die einzelnen Instanzen der gerätespezifischen Klassen enthalten variable Eigenschaften, die während der Erzeugung der Objekte aus der Datenbank über Tabellen zugeordnet werden. Damit können experimentspezifische Objekte durch spezielle Eich Tabellen und Datenbankeinträge generiert werden. Zusätzlich erlaubt dieses Verfahren auch Objekte mit ähnlichen, aber leicht unterschiedlichen Eigenschaften (z. B. Sextupol- und Quadrupolmagnete), aus einer gemeinsamen Klasse heraus zu erzeugen.

Ziel des objektorientierten Programmieransatzes ist die konsequente Erweiterung der modularen Programmierung durch die methodische Unterstützung der Modellierung von Beziehungen zwischen Objekten (Assoziation¹, Aggregation² und Vererbung³) durch den Compiler. Die konsequente Kapselung der einzelnen Objekte und der kontrollierte Zugriff auf den Zustand eines Objektes über vorbestimmte Methoden ermöglicht ein vorhersagbares Verhalten der Objekte.

Die Abbildung der Objektstrukturen auf Prozesse und Rechnersysteme erfolgt in der Designphase aufgrund der speziellen Anforderungen der einzelnen Teilsysteme an bestimmte Ressourcen (Rechenleistung, Hardwareschnittstellen, Speicher). Bei zeitkritischen Transaktionen wird versucht sie in einem einzigen Prozeß zu modellieren. Bei vielen Objekten ist es über Einträge in der Datenbank möglich, sie entweder als eigenen Prozeß oder als eine von mehreren Instanzen einer Klasse in einem Prozeß zu generieren. Die erste Methode hat den Vorteil, daß alle Objekte unabhängig voneinander existieren und das Gesamtsystem gegen Störungen einzelner Objekte unanfällig ist. Zusätzlich können im Rahmen des Multitasking-Betriebssystems alle Objekte gleichzeitig agieren. In dieser Variante ist der Ressourcenverbrauch deutlich höher, da jede Instanz einer Klasse in einem eigenen

¹Gruppe von Eigenschaften mit gemeinsamer Struktur und Semantik

²Eine spezielle Form der Assoziation, bei der Teile eines Ganzen mit dem Ganzen in Beziehung gebracht werden

³Generalisierung/Spezialisierung gliedert Klassen aufgrund ihrer strukturellen Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede

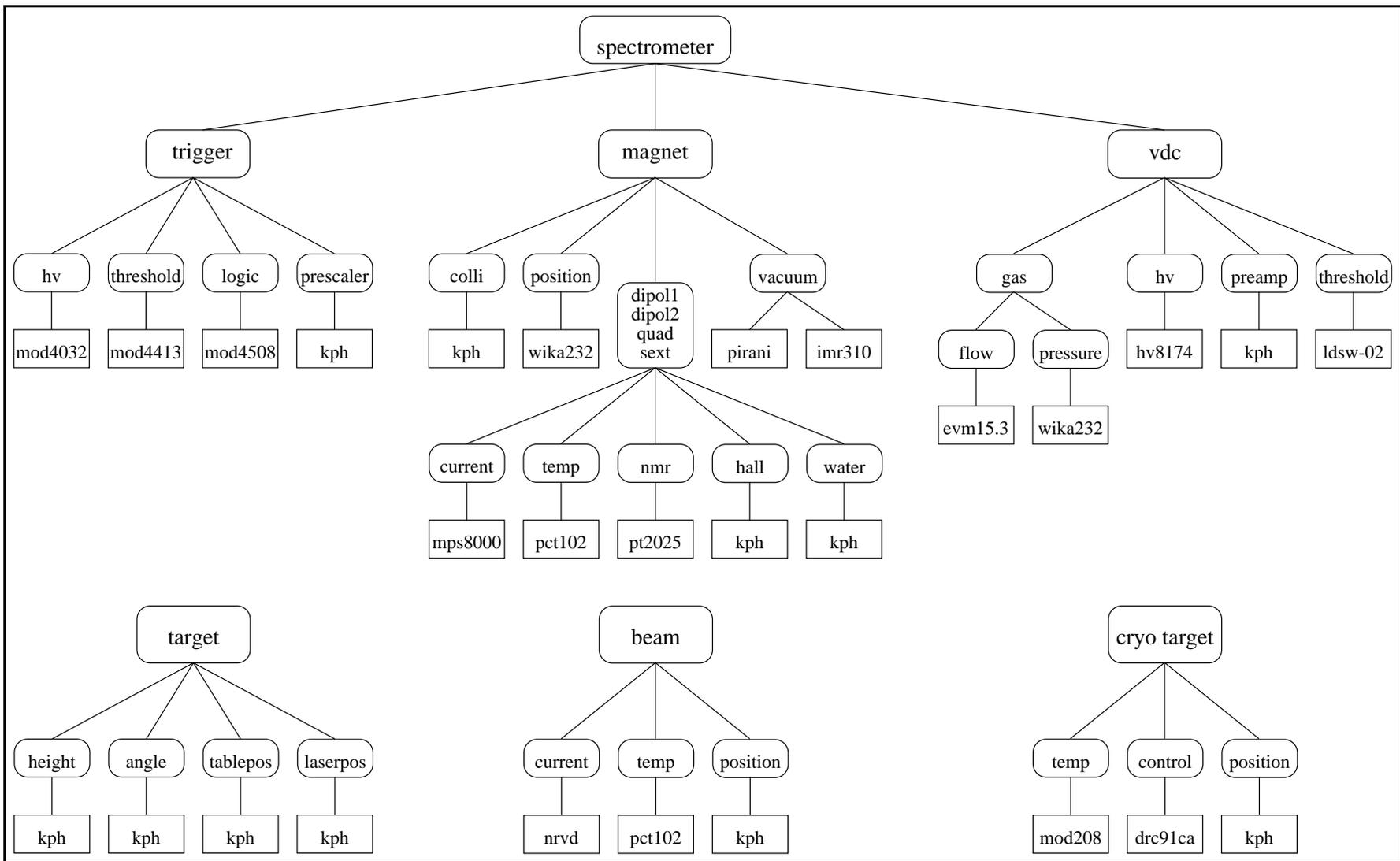


Abb. 3.1: Struktur der Dreispektrometeranlage mit den zugehörigen Geräten

Prozeß existiert. Dieser offensichtliche Nachteil wird in modernen Betriebssystemen durch die gemeinsame Verwendung von Programmteilen im Speicher⁴ praktisch kompensiert.

Die gesamte Software ist bis auf einige ältere Teile, die noch als C-Source vorliegen, in der Programmiersprache C++ erstellt worden. Auf spezielle Funktionen/Systemaufrufe wurde soweit es ging verzichtet. Dadurch ist die Portierung des Steuerungssystems auf weitere UNIX-Plattformen relativ einfach, sofern das Nachrichtenübermittlungssystem MUPIX auf der Zielplattform verfügbar ist.

Abbildung 3.1 zeigt die Baumstruktur der Dreispektrometeranlage mit den zugehörigen Geräten. Der Teilbaum *Spektrometer* existiert in ähnlicher Form für jedes der drei Magnetspektrometer A, B und C.

3.1 Magnetoptische Elemente

Für Präzisionsexperimente an der Dreispektrometeranlage müssen die Elektromagnete in definierter und reproduzierbarer Art und Weise eingestellt werden. Hierzu müssen insgesamt elf große Stromnetzgeräte gesteuert werden. Tabelle 3.1 zeigt eine Aufstellung der Hardwarekomponenten der Magnetspektrometeranlage. Die Einstellung der Magnetfelder erfordert äußerst genaue Messungen von Strom und Magnetfeld. Der größte Teil der elektrischen Leistung wird in Wärme umgesetzt. Daher müssen Temperatur und Kühlung der Magnete sowie der Netzgeräte ständig gemessen und überwacht werden. Um die geforderte Auflösung von

Objekt	A	B	C	Aktion	Gerät/Hersteller	Schnittstelle
Dipolfeld	2	1	2	steuern	MPS8000/Danfysik	V24
Dipolfeld	8	4	8	messen	PT2025/Metrolab	V24
Feldkompensation	0	1	0	einstellen	Eigenbau/KPH	Digital-Bus
Dipolfeld	2	1	2	messen	Hall/KPH	Analog
Quadrupolfeld	1	0	1	steuern	MPS8000/Danfysik	V24
Quadrupolfeld	1	0	1	messen	Hall/KPH	Analog
Sextupolfeld	2	0	2	steuern	MPS8000/Danfysik	V24
Sextupolfeld	1	0	1	messen	Hall/KPH	Analog
Kollimator	1	4	1	steuern	Eigenbau	Digital-Bus
MagTemp	4	2	4	überwachen	PCT102/Ti	Analog
Kühlwasser	6	2	6	überwachen	Eigenbau	V24
SpekPosition	1	1	1	messen	WCS1/Stahl	V24
Vakuum	1	1	1	überwachen	Pirani	Analog
Vakuum	1	1	1	überwachen	IMR310	Analog

Tab. 3.1: Art und Anzahl der wichtigsten Geräte mit dem Aufstellungsort innerhalb der Spektrometeranlage und ihre Aufgaben und Schnittstellen innerhalb des Experimentkontrollsystems

$\leq 10^{-4}$ zu erreichen ist es notwendig, den Zustand der Elektromagnete sehr genau zu kennen. Bei großen Elektromagneten müssen spezielle Prozeduren eingehalten

⁴shared code

werden, damit das Magnetfeld während einer Meßperiode stabil auf dem eingestellten Feldwert steht und unabhängig von der Vorgeschichte des Magneten ist. Zu diesem Zweck ist ein umfangreiches Programmpaket entwickelt worden, das es jedem Anwender ermöglicht, die Spektrometer allein durch die Angabe des Sollimpulses einzustellen. Die Software erlaubt die Einstellung der Magnetfelder auf unterschiedliche Art und Weise. Alle Magnetfeldänderungen erfolgen mit gleicher Geschwindigkeit. Die Feldänderungen werden durch sukzessive Vorgabe neuer Stellwerte an die Stromnetzgeräte vorgenommen. Eine vereinfachte Darstellung der Zustände bei der Magnetfeldeinstellung zeigt Abbildung 3.2.

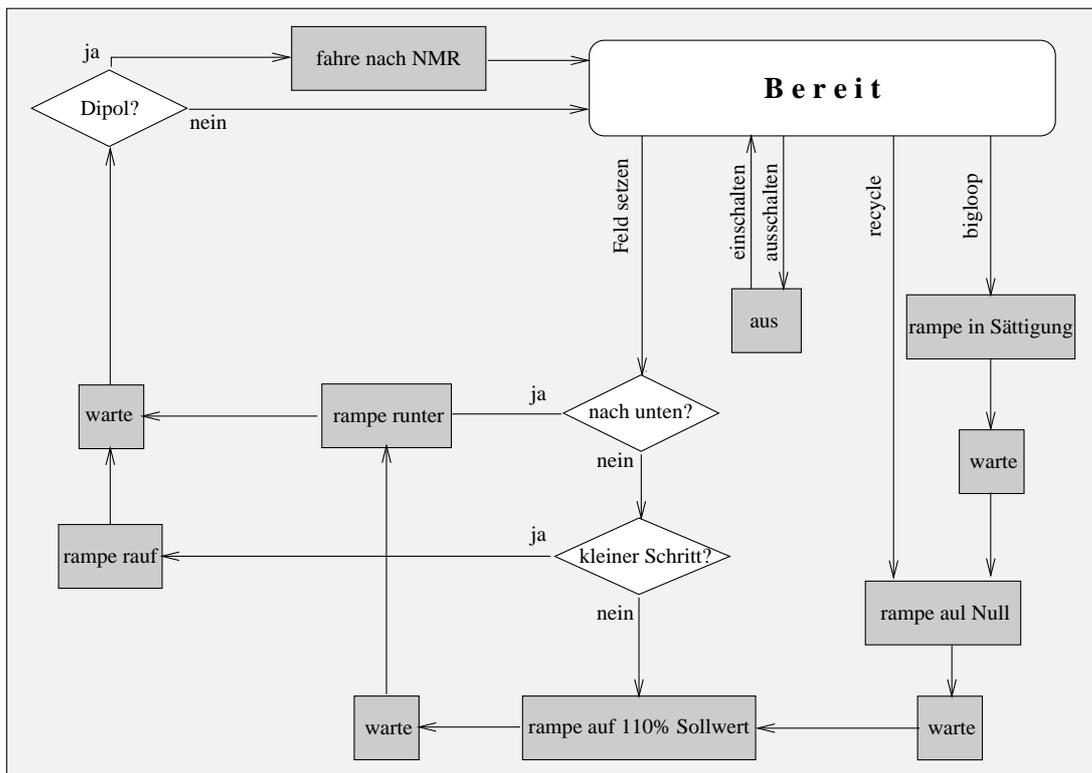


Abb. 3.2: Darstellung der Zustände und ihrer Übergänge für einen Magnet-Handler. Die dunkel unterlegten Rechtecke stellen Zwischenzustände aus dem und in den Grundzustand *Bereit* dar. Die Rauten bilden Verzweigungspunkte, welche Entscheidungen in Abhängigkeit vom Magnettyp oder der Größe der Zustandsänderung symbolisieren

Die wichtigsten Regeln bei der Spektrometerfeldeinstellung lauten:

- Felder werden immer von einem höheren Feldwert kommend eingestellt, damit sich der Magnet auf dem oberen Ast der Hysteresisschleife befindet. Kleine Feldänderungen werden direkt ausgeführt, größere Felderhöhungen von mehr als 3% erfolgen durch Überhöhung des Feldes auf 110% mit anschließender Reduktion auf den Sollwert.
- nach drei größeren Feldänderungen werden die Magnete in einer Schleife über

den Feldwert Null auf das neue Magnetfeld eingestellt⁵

- eine große Schleife⁶ muß durchlaufen werden, wenn der Zustand des Magneten:
 - unbekannt ist
 - nach dem Ausfall eines Stromnetzgerätes undefiniert ist
 - nach der Umpolung undefiniert ist

Die Kurven in Abbildung 3.3 zeigen die gemessenen Ströme der Magnetnetzgeräte der beiden Dipol- und des Quadrupolmagneten von Spektrometer C beim Durchlaufen einer großen Schleife. Hierbei werden die Magnete zuerst in die Sättigung gefahren. Dort verbleiben sie für einen individuell einstellbaren Zeitraum. Anschließend werden sie auf den Feldwert Null eingestellt. Nach einer definierten Ruhephase werden die Magnete auf das gewünschte Feld mit einer zusätzlichen Zwischenstufe bei 110% des einzustellenden Feldwertes gefahren.

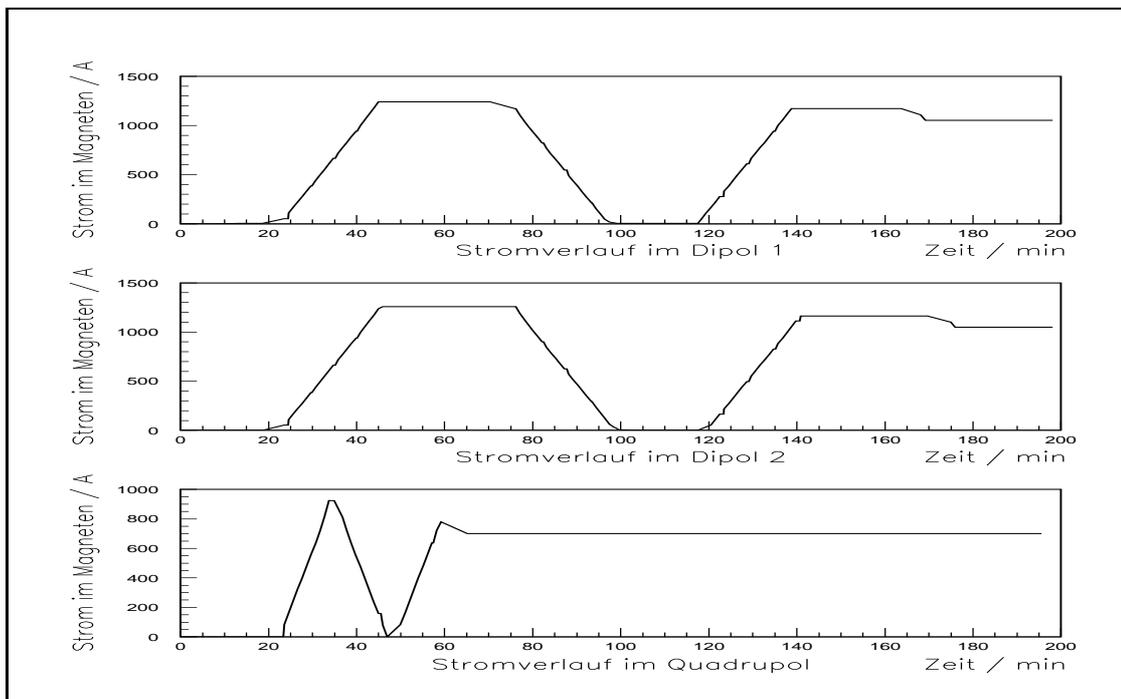


Abb. 3.3: Zeitverlauf der Stromänderungen für Dipole und Quadrupol von Spektrometer C beim Durchlaufen einer großen Schleife. Die langen Zeiten für Feldänderungen sind zum Abklingen der induzierten Wirbelströme notwendig

Nach jeder einzelnen Aktion werden einstellbare Ruhephasen zum definierten Abklingen der Wirbelströme durchlaufen. Die geforderte Genauigkeit macht die Magnetfелеinstellung zu einer zeitaufwendigen Prozedur. Die Zeiten zur Spektrometereinstellung variieren von einer viertel Stunde für kleine Feldänderungen

⁵ „recyclen“

⁶ „big loop“

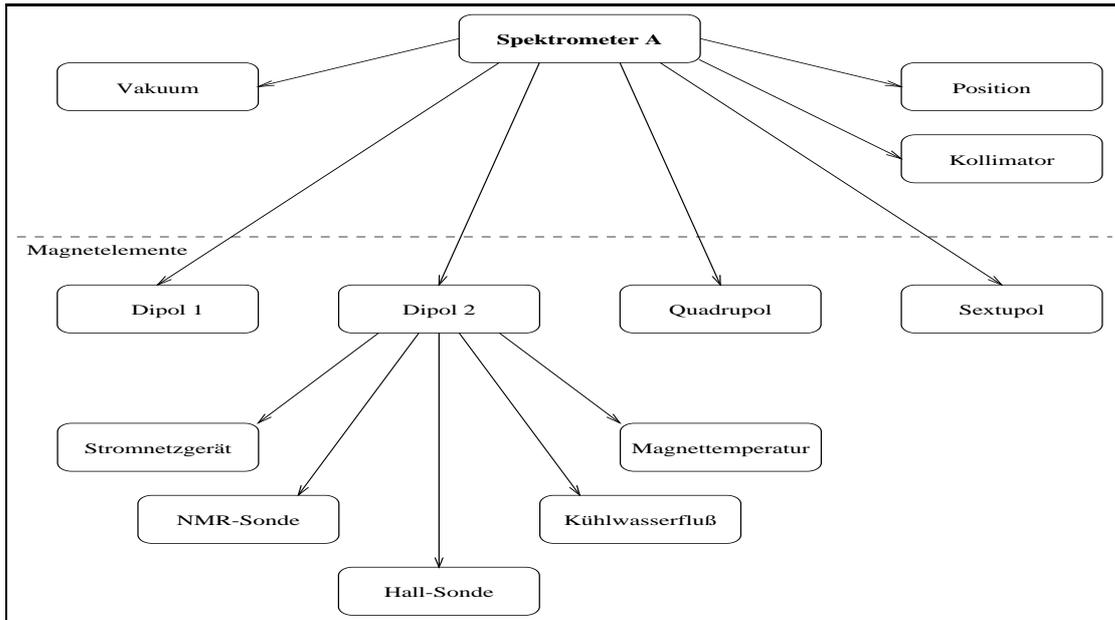


Abb. 3.4: Komponenten des Magnetspektrometers A

bis hin zu zweieinhalb Stunden für eine große Schleife. Für die gesamte Spektrometeranlage bedeutet dies, daß bei Einstellung einer neuen Kinematik bis zu neun Magnetfelder gleichzeitig geändert werden müssen.

Die Entwicklung der Software erfolgte Zug um Zug mit der Inbetriebnahme der drei Magnetspektrometer. Nachdem die Entwicklung der Methoden und die Anpassung der Parameter zur Einstellung des Magnetspektrometers A weitgehend abgeschlossen waren, wurde das Softwaresystem im Rahmen des notwendigen „Re-Design“⁷ komplett mit Methoden der objektorientierten Programmierung und mit Techniken der Programmiersprache C++ erstellt. Durch die konsequente Einführung von Klassen und der auf ihnen operierenden Methoden konnte das System deutlich vereinfacht und die Wartbarkeit verbessert werden. Die einzelnen Objekte innerhalb der Spektrometeranlage werden von grundlegenden Klassen abgeleitet. Die Abbildung 3.4 zeigt am Beispiel von Spektrometer A die verschiedenen Softwarekomponenten der Experimentsteuerung und ihre Gruppierung in kleine hierarchische Einheiten. Diese hängen wiederum mit anderen Objekten der gleichen Stufe von einem Objekt der nächsthöheren Ebene ab. Die Abbildung zeigt die grundlegenden Objekte von Spektrometer A, die beiden anderen Spektrometer sind analog gegliedert. Die zentrale Komponente der Spektrometersteuerung ist das Programm *spec*. Es bildet die Schnittstelle zur Einstellung der Spektrometer durch den Anwender. Das Programm errechnet für einen gegebenen Sollimpuls mit den Methoden einer spektrometerspezifischen Klassenbibliothek [Kram-95] die einzelnen Magnetfelder und überwacht deren korrekte Einstellung. Zusätzlich erlaubt es, das Spektrometer mit einem Befehl ein-⁸ und auszuschalten.

⁷Methode der Softwareentwicklung, welche die Notwendigkeit einer grundlegenden Überarbeitung von komplexen Programmsystemen in verschiedenen Zyklen innerhalb der Entwicklungsphase beschreibt

⁸Das ferngesteuerte Einschalten der Netzgeräte ist z. Z. aus Sicherheitsgründen gesperrt

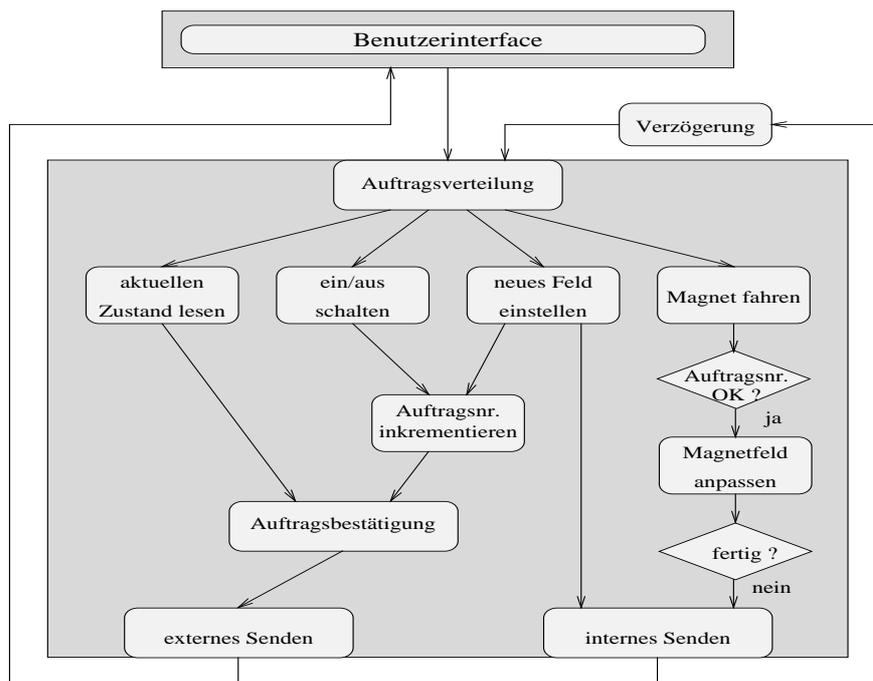


Abb. 3.5: Auftragsbearbeitung innerhalb eines Magnet-Handlers durch Zerlegung in Unterzustände; die Zustandsübergänge werden durch internes Senden induziert

Dem Programm *spec* sind bei einem QSDD⁹-Spektrometer vier Magnet-Handler untergeordnet, die jeweils einen Spektrometermagnet steuern und überwachen. Jeder Magnet-Handler besitzt die oben erwähnten Methoden zur präzisen Magnetfeldeinstellung. Er ist eine der komplexesten Strukturen innerhalb der Spektrometersteuerung, da er viele Aufgaben quasi gleichzeitig erledigen muß. Aus diesem Grund wurde der Magnet-Handler als Zustandsmaschine aufgebaut. Alle Zustandsänderungen und -übergänge erfolgen über die Versendung interner Nachrichten. Abbildung 3.5 zeigt einen kleinen Ausschnitt der inneren Struktur eines Magnet-Handlers. Eine zentrale Auftragsverteilungsroutine erhält alle eintreffenden Nachrichten und verteilt sie an die adressierten Untereinheiten (Felder). Das Einstellen eines neuen Magnetfeldes wird in viele kleine Magnetfeldeinstellungen mit anschließenden Pausen zerlegt. Die Pausen werden durch definierbare Verzögerungen bei der Zustellung der internen Nachrichten erzeugt. Das Programm unterscheidet beim Eintreffen der Nachrichten nicht mehr zwischen solchen, die von außen oder von innen kommen. Der große Vorteil ist nun, daß die Prozesse nicht mehr in einem Zustand verharren müssen bis die Magnetfeldeinstellung vollzogen ist, sondern sofort wieder bereit sind neue Anfragen zu bearbeiten. Hierdurch ist es möglich, jederzeit Informationen über den gegenwärtigen Zustand des Magneten zu erhalten oder dem Magnet-Handler einen neuen Auftrag zu erteilen. Jedem Auftrag zur Zustandsänderung wird eine eindeutige Auftragsnummer zugeordnet. Bei jedem neuen Auftrag wird der Auftragszähler inkrementiert und alle älteren Aufträge verlieren ihre Gültigkeit. Dies ist insbesondere für die langen Ruhephasen der Magnete wichtig, da Aufträge, die durch das Ver-

⁹QSDD: Quadrupol-Sextupol-Dipol-Dipol

senden von Nachrichten erteilt werden, nicht aktiv gelöscht werden können. Die Aufträge werden ungültig, wenn ihre Auftragsnummer nicht mehr mit der aktuellen Auftragsnummer übereinstimmt. Sie werden beim Erreichen des nächsten Zwischenzustandes nicht mehr ausgeführt.

Jeder Magnet-Handler kontrolliert in der Regel ein Magnetnetzgerät. Bei den Sextupol-Magneten werden durch den Magnet-Handler zwei Netzgeräte in einem fest vorgegebenen Verhältnis zueinander gesteuert.

3.2 Detektorsysteme

Die Detektorsysteme der Spektrometeranlage gliedern sich in die Bereiche Triggerdetektoren und Driftkammern. Für jedes der beiden Systeme sind umfangreiche Geräte-Handler zur Steuerung und Überwachung der zugehörigen Detektoren entwickelt worden. Tabelle 3.2 zeigt eine Übersicht der Geräte zur Steuerung der Spektrometerdetektoren.

Objekt	A	B	C	Aktion	Gerät/Hersteller	Schnittstelle
Gasfluß	3	3	3	steuern	EVM15.3/Brooks	Analog
Flaschendruck	3	3	3	überwachen	WIKA232/Wiegand	Digital
VDC-HV	2	2	2	steuern	HV8174/Novelec	Analog
VDC-HV Reset	1	1	1	einstellen	HV8174/Novelec	Digital
VDC-HV Strom	2	2	2	überwachen	HV8174/Novelec	Analog
VDC-Diskr.	2	2	2	steuern	LDS-W-02/Lambda	Analog
VorVerstSpVsg.	9	9	9	überwachen	Eigenbau/KPH	Digital
TriggerHV	2	1	2	steuern	HV4032A/LRS	CAMAC
TriggerDiskr.	4	3	4	steuern	4413/LRS	CAMAC
TriggerLogik	2	2	2	steuern	4508/LRS	CAMAC
PreScaler	1	1	1	steuern	Eigenbau	CAMAC
Č-HV	1	1	1	steuern	HV4032A/LRS	CAMAC
Č-Diskr	1	1	1	steuern	4413/LRS	CAMAC

Tab. 3.2: Art und Anzahl der wichtigsten Geräte zur Steuerung der Detektorsysteme mit ihrer Schnittstelle und Funktion innerhalb der Spektrometeranlage

Triggerdetektoren

Für den Betrieb der Triggerdetektoren werden die Hochspannungsversorgungen der Photomultiplier, die Diskriminatoren, die Logik zur Ereignisdefinition sowie die variablen Untersetzer zur Anpassung der unterschiedlichen Raten an den Meßbereich der Zähler gesteuert und überwacht.

Die Spannungsversorgung der Photomultiplier erfolgt über das Programm *mod4032a*. Es erlaubt die Ansteuerung von bis zu 16 Hochspannungseinheiten *LeCroy4032a* mit jeweils 32 Kanälen. Die einzelnen Hochspannungskanäle werden entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu einer Detektorguppe (z.B. Č-HV) zu

logischen Gruppen zusammengefaßt. Jede logische Gruppe kann durch einen einzigen Befehl ein- und ausgeschaltet werden oder mit vordefinierten Werten aus der Datenbank geladen bzw. mit aktuellen Werten in der Datenbank abgespeichert werden. Die Geschwindigkeit für Spannungsänderungen ist für jede Gruppe separat definierbar. Durch die Trennung in logische und physikalische Kanäle lassen sich beim Ausfall von Spannungsversorgungskanälen Ersatzkanäle einbinden ohne die logischen Gruppen verändern zu müssen. Dies erfolgt durch einfache Änderung der Zuordnungstabelle in der Datenbank. Ein Hochspannungsversorgungsüberrahmen kann nur im ganzen ein- oder ausgeschaltet werden. Dies entspricht in der Regel nicht der Definition der logischen Gruppen. Daher werden die Photomultiplier einer logischen Gruppe als Ersatz für das Ausschalten auf den Spannungswert Null eingestellt. Zuvor speichert der Geräte-Handler die zuletzt eingestellten Werte intern ab und reproduziert die zuvor eingestellten Spannungen beim Einschalten der entsprechenden logischen Gruppe.

Damit die einzelnen Hochspannungsversorgungsüberrahmen auch wirklich ausgeschaltet werden können, besitzt ein Geräte-Handler neben den verschiedenen logischen Gruppen genau eine physikalische Gruppe pro Überrahmen. Mit diesen Gruppen können ganze Überrahmen ein- und ausgeschaltet oder auf direktem Wege physikalische Kanäle angesprochen werden. Dies ist insbesondere für Arbeiten an den angeschlossenen Geräten unbedingt erforderlich. Innerhalb der maximal 512 Hochspannungskanäle können bis zu 64 logische Gruppen gebildet werden.

Die Ansteuerung der CAMAC-Diskriminatoren *LeCroy4413* der Triggerdetektoren erfolgt über das Programm *mod4413*. Es erlaubt die Einstellung der Diskriminatorschwellen und die periodische Überwachung von bis zu 64 Diskriminatorobjekten des o.g. Typs mit jeweils 16 Kanälen. Bei der periodischen Überwachung werden die aktuell eingestellten Diskriminatorschwellen mit den intern abgespeicherten Einstellwerten verglichen. Abweichungen werden als Alarmer an den zentralen Status-Server gemeldet. Falls der Geräte-Handler erst nachträglich gestartet wird und keine Einstellwerte zum Vergleich besitzt, gibt er eine entsprechende Warnung an den Status-Server.

Die programmierbare Logik der Triggerdetektoren vom Typ CAMAC-PLU¹⁰ *LeCroy4508* besteht intern aus zwei 16 x 16 Tabellen. Sie werden mit einem Befehl aus der Datenbank geladen und in der Datenbank gespeichert. Sie erzeugen in Abhängigkeit von der Tabellendefinition für jedes Bit-Muster am Eingang ein entsprechendes Bit-Muster am Ausgang. Der Zustand der programmierbaren Logikmodule wird analog zu den Diskriminatoren in einstellbaren Zeitintervallen durch den Vergleich der aktuellen Parameter mit den intern abgespeicherten Werten überwacht und protokolliert. Differenzen werden wiederum als Alarmer bzw. Warnungen an den Status-Server gemeldet.

Die Zähler der Triggerdetektoren werden über einstellbare Untersetzer angesteuert. Jeder der 16 Kanäle pro Modul kann über einen eindeutigen logischen Namen innerhalb des Programms *vucam*¹¹ adressiert, eingestellt bzw. ausgelesen werden. Der Zustand jedes Untersetzerobjektes wird automatisch in einstellbaren Zeitin-

¹⁰programmable logic unit

¹¹Variabler Untersetzer für CAMAC

tervallen überwacht und protokolliert.

Die Steuerung der drei Gas-Tscherenkow-Detektoren erfolgt mit den gleichen Programmen, die auch die übrigen Triggerdetektoren kontrollieren.

Driftkammern

Das Driftkammersystem besteht aus zwei Doppeldriftkammern. Zum Betrieb der Driftkammern müssen die Spannungen und Ströme sowie die Gasflüsse jeder einzelnen Kammer gesteuert und überwacht werden.

Zur Zeit wird die Hochspannungsversorgung der Driftkammern durch Objekte, die direkt auf den Schnittstellenumsetzern basieren, geregelt und überwacht (siehe Abschnitt 3.6). Es existiert pro Kanal je ein Objekt zur Messung und Einstellung der Kammerspannung sowie zur Messung des Kammerstromes. Das Hochspannungssteuerungsgerät schaltet nach Überschreitung des maximalen Stromes die Spannungsversorgung ab. Das Zurücksetzen in den Grundzustand erfolgt durch ein eigenes, logisches Objekt, das auf einem Kanal eines Digital-Eingabe/Ausgabe-Moduls basiert.

Die Steuerung der Gasversorgung der Driftkammern erfolgt nach einem ähnlichen Prinzip wie die Hochspannungsversorgung. Hier steuern und überwachen die einzelnen Objekte drei Gasflußregler für Helium, Argon und alkoholversetztes Argon. Zusätzlich sind Objekte zur Überwachung der Gasvorräte vorgesehen. Sie werden im Moment noch nicht eingesetzt, da die Meßgeräte zur Erfassung der noch vorhandenen Gasmenge nicht präzise genug arbeiten. Zur Zeit ist ein Geräte-Handler zur koordinierten Überwachung aller Komponenten der Driftkammersysteme in Arbeit. Er wird dann auch die gemessenen Gasflüsse akkumulieren und dadurch eine genaue Kenntnis der Gasvorräte ermöglichen.

3.3 Targets

Für die Spektrometeranlage stehen vier verschiedene Targetsysteme zur Verfügung. Tabelle 3.3 zeigt eine Übersicht der Geräte zur Targetsteuerung.

Das erste Targetsystem ist die einfache Targetleiter. Sie besteht aus mehreren, leiterartig übereinander angeordneten Feststofftargets, die in Höhe und Winkel eingestellt werden können. Die Bewegung des Targets wird durch ein System hintereinander angeordneter Software- und Hardware-Endschalter begrenzt. Im Rahmen einer Diplomarbeit [Mart-93] wurde der erste Geräte-Handler zur Steuerung des Targets über ein Digital-Eingabe/Ausgabe-Modul und den 32-Bit-Bus entwickelt. Um die Zuverlässigkeit und Präzision der Targeteinstellung weiter zu erhöhen, wurde die Ansteuerung der Targetelektronik verbessert. Im Zuge dieser Umstellung konnten gleichzeitig die langen 64-adrigen Kabel zum Target durch einen Mikrokontroller mit Feldbusanschluß ersetzt werden. Sowohl die Ansteuerung der neuen Targetelektronik als auch die Zentrierung des Targettisches über dem Drehpunkt der Spektrometeranlage erfolgt gegenwärtig noch über interaktive Programme [Posp-96], da der Ausbau zu Geräte-Handlern aufgrund der sehr begrenzten Personalressourcen bisher noch nicht möglich war.

Objekt	Anzahl	Aktion	Gerät/Hersteller	Schnittstelle
Targethöhe	1	steuern	Eigenbau/KPH	Digital-Bus
Targetwinkel	1	steuern	Eigenbau/KPH	Digital-Bus
Targettisch	1	steuern	Eigenbau/KPH	V24
TargetLaserPos	1	überwachen	Eigenbau/KPH	Digital
KryoTargetContr	2	steuern	drc91ca/Cryotronics	V24
KryoTargetTemp	2	überwachen	mod208/LakeShore	V24
KryoTargetPos	1	steuern	Eigenbau/KPH	Digital-Bus

Tab. 3.3: Art und Anzahl der Geräte zur Targetsteuerung mit ihren Funktionen und Schnittstellen

Das zweite Targetsystem ist das sogenannte Wasserfalltarget. Die beim Feststofftarget verwendete Targetleiter wird hier durch eine verkürzte Targetleiter ersetzt. Dadurch können weiterhin bis zu drei Feststofftargets in den Elektronenstrahl gefahren werden. Zusätzlich kann ein spezielles Target eingebaut werden, bei dem ein dünner Wasserfilm [Wolf-96] durch die Oberflächenspannung zwischen zwei Fäden in einer Wasserstoffatmosphäre aufgespannt wird. Durch die großen Massenunterschiede zwischen Wasserstoff und Sauerstoff kann durch entsprechende Rückstoßkorrekturen eine Trennung der beiden Anteile vorgenommen werden. Die Targets können entsprechend dem Verfahren für Feststofftargets im Elektronenstrahl positioniert werden.

Das Kryotargetsystem [SchH-94] wird mit einem speziellen Deckel für die Streukammer in Verbindung mit der verkürzten Feststofftargetleiter verwendet. Die Bewegungen der Targetzelle innerhalb der Streukammer erfolgen durch eine spezielle Elektronik über den parallelen Bus durch einen Mikrokontroller vom Typ SML. Hierbei garantiert ein System von gekoppelten Endschaltern, daß sich die verschiedenen Targets nicht berühren können. Die Funktionen des Kryotargets werden durch drei Geräte-Handler gesteuert und überwacht. Die zentrale Temperaturkontrolle wird vom Programm *drc91ca* ausgeübt, das zusammen mit einem Kontroller vom Typ *DRC91CA* den Geräte-Handler bildet. Er kontrolliert und regelt eigenständig die Temperatur des Targets nach den vorgegebenen Parametern. Das Programm überwacht die wesentlichen Funktionen des Kontrollers, der über einen eigenen Mikroprozessor die eigentliche Regelung übernimmt. Zwei Geräte-Handler vom Typ *d1000* und *mod208* überwachen und protokollieren über separate Meßfühler den Druck und die Temperatur des Kryotargetsystems an mehreren Punkten. Die erste Version des Geräte-Handlers zur Steuerung des *DRC91CA* wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Hake-93] erstellt. Sie konnte jedoch nicht mehr am Kryotargetsystem getestet werden. Daher mußten die Tests und die Verbesserung des Geräte-Handlers in dieser Arbeit erfolgen. Dies war sehr aufwendig, da die Geräte teilweise herstellerbedingte Fehlfunktionen aufwiesen. Die Geräte-Handler zur Kryotargetsteuerung protokollieren alle Zustandsänderungen des Kryotargetsystems, so daß diese Aufgabe für den Benutzer entfällt. Gleichzeitig wird die Betriebssicherheit des Targetsystems durch automatische Alarme bei Veränderungen am Kryosystem wesentlich erhöht.

3.4 Strahlmonitore

Zur präzisen Vermessung der Stromstärke des Elektronenstrahls sind in der Strahlführung zwei spezielle Meßgeräte eingebaut worden. Tabelle 3.4 zeigt eine Übersicht der Geräte zur Messung des Strahlstroms. Der Controller *NRVD* ermittelt die in den Resonatoren der Meßgeräte abgegebene Leistung. Der Geräte-Handler *powmeter* rechnet die gemessene Leistung in den entsprechenden Strahlstrom um und protokolliert ihn. Zusätzlich integriert der Handler den Strom einer Meßperiode zwischen dem Start und dem Stopp der Messung. Er liefert am Ende der Meßperiode die integrierte Ladung zur Luminositätsbestimmung zurück. Der Handler ermöglicht einen Nullabgleich der Resonatoren in Strahlpausen. Da die Größe des Resonators und damit die Resonanzfrequenz temperaturabhängig ist, wird die Temperatur der Resonatoren protokolliert. Hierdurch kann der Strahlstrom nachträglich, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, korrigiert werden.

Zusätzlich besitzen die Resonatoren die Möglichkeit, die Position des Elektronenstrahls zu vermessen. Hierzu werden bei jeder Strahllagemessung Amplitude und Phase, bei sehr kleinen Signalpegeln mit Hilfe einer Zwischenfrequenz über spezielle Mischer, phasenempfindlich gleichgerichtet und über zwei Analog-Digital-Wandler-Kanäle ausgelesen. Mit dieser Information kann die Strahllage rekonstruiert werden.

Objekt	Anzahl	Aktion	Gerät/Hersteller	Schnittstelle
Resonatorleistung	2	messen	NRVD/Rhode	IEC-BUS
Resonatortemperatur	2	überwachen	PCT102/Ti	Analog
Strahllage	4	überwachen	Eigenbau	Analog

Tab. 3.4: Geräte zur Strahlüberwachung des A1-Strahlführungssystems mit Funktionen und Schnittstellen

3.5 Prozeßverwaltung

Das Steuerungssystem besteht aus einer Vielzahl von Prozessen, die entsprechend dem gewählten Experiment gestartet und gestoppt werden müssen. Zu diesem Zweck ist als Teil einer Diplomarbeit [Mart-93] ein Subsystem zum Starten, Überwachen und Stoppen der Prozesse des Steuerungssystems entwickelt und implementiert worden.

Die erste Stufe zum Systemstart besteht aus einer Ablaufdatei, die durch den Befehl *Start_ECS* aktiviert wird. Auf dieser Ebene werden die Basisprozesse des Steuerungssystems über Standardroutinen des Betriebssystems gestartet. Der erste Prozeß (*nameserver*) bildet die Grundlage der namensbasierten Kommunikation innerhalb des Steuerungssystems. Als weitere Komponenten werden die Frontenddatenbank und der Status-Server mit den Prozessen zur Online-Überwachung aktiviert. Zum Abschluß der ersten Stufe folgen die Programme zur Prozeßverwaltung.

In der zweiten Stufe werden die Prozesse unter Kontrolle des Prozeßverwaltungssystems gestartet. Die Abbildung 3.6 zeigt den zentralen Prozeßserver und seine

Verbindungen zu den Prozeßklienten auf den unterschiedlichen Steuerungsrechnern. Er erhält von der Datenbank alle Informationen über die einzelnen Steuerungsprozesse und ihre Abhängigkeiten untereinander und koordiniert das Starten und Stoppen der einzelnen Prozeßgruppen. Das Starten der Prozesse auf den verschiedenen Steuerungsrechnern (a1c, floor, speca, ...) erfolgt durch entsprechende Prozeßklienten auf den einzelnen Rechnern. Die Prozeßklienten erzeugen die

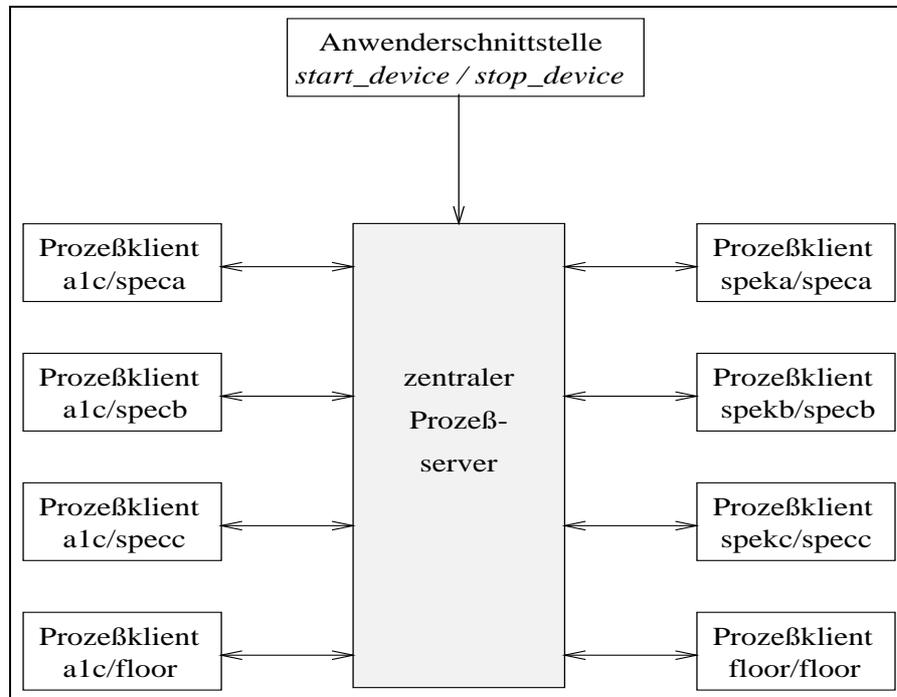


Abb. 3.6: Aufbau der Prozeßverwaltung der Dreispektrometeranlage mit dem zentralen Prozeßserver. Auf der Workstation a1c werden Prozeßklienten unter den verschiedenen Benutzern (*speca*, *specb*, ...) gestartet. Sie verwalten die spektrometerspezifischen hardwareunabhängigen Prozesse. Die Frontendrechner besitzen unter der korrespondierenden Benutzerumgebung nur die spektrometerspezifischen Prozeßklienten zur Kontrolle der hardwareabhängigen Steuerungsprozesse

einzelnen Steuerungsprozesse als Tochterprozesse durch Verdopplung des eigenen Prozesses. Anschließend überlädt der Tochterprozeß den eigenen Prozeß durch das auszuführende Programm. Hierdurch behalten die Prozeßklienten die Kontrolle über die gestarteten Prozesse und werden durch das Betriebssystem über das unbeabsichtigte Beenden ihrer Tochterprozesse durch Signale informiert. Zusätzlich können die Prozeßklienten durch Signale das Beenden eines Tochterprozesses forcieren, falls dies über das Nachrichtenübermittlungssystem nicht mehr möglich sein sollte.

Die Schnittstelle zur Prozeßsteuerung durch den Anwender ist absichtlich sehr einfach gehalten. Der Experimentator muß lediglich die Namen der Detektorsysteme kennen, die er starten möchte. Durch den Befehl *start_device speca/magnet* werden z.B. alle Prozesse der angewählten Detektorgruppe gestartet, mit dem Befehl *stop_device speca/magnet* werden diese Prozesse wieder gestoppt. Falls alle Prozesse des Spektrometers A auf einmal gestartet werden sollen, kann dies

durch den Befehl *start_device specca* erreicht werden. Im Fehlerfall werden Prozesse nicht automatisch neu gestartet, da die Steuerungsprozesse sehr robust geworden sind und die Ursache für die unbeabsichtigte Beendigung oft ein Hardwaredefekt oder ein Netzwerkproblem ist. Insbesondere bei der Vielzahl von unterschiedlichen Netzwerkfehlern könnte ein automatischer Neustart von Prozessen zu unvorhersehbaren Resultaten führen. Daher werden Fehlerbedingungen z.Z. nach Möglichkeit innerhalb der Geräte-Handler behandelt, gleichzeitig werden die Experimentatoren über Meldungen an den Status-Server alarmiert.

3.6 Schnittstellenumsetzer

Die Grundlage der Kommunikation mit den Geräten des Steuerungssystems ist die Entwicklung von Schnittstellenumsetzern. Sie sind in der ersten Phase der Entwicklung des Steuerungssystems für die Erprobung und erste direkte Ansteuerung der Geräte erstellt worden. Hierzu sind alle Geräte des Steuerungssystems entsprechend ihrer Schnittstelle zur Rechneransteuerung klassifiziert worden. Bei einigen Geräten konnte die Schnittstelle zur Steuerungshardware noch ausgewählt werden. Die Auswahl ist nach der zu erwartenden Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb und dem Grad ihrer Standardisierung erfolgt. Dies ist besonders im Hinblick auf die Ersatzteilbeschaffung wichtig, um die Funktionsfähigkeit der Anlage in den nächsten Jahren sicherzustellen. Gleichzeitig ist versucht worden, die Anzahl unterschiedlicher Schnittstellenarten gering zu halten. Die Schnittstellen lassen sich in drei Gruppen aufteilen:

- Digitale Ein-/Ausgabe
- Wandler für analoge Ein-/Ausgabe
- Bussysteme zur Datenübermittlung

Schnittstelle	Typ	Anzahl	Gerät	Programm
Analog	ADC	32	TVM740	tvm740
Analog	ADC	16	MPV907	mpv907
Analog	DAC	16	MPV904	mpv904
Digital	I/O	40/32	TVM744	tvm744
Digital	I/O	32/32	DIGI200	digi200
Digital	I/O	32/32	SML	sml
CAMAC	Bus ¹²	16	CBD	camdrvr
V24	Bus	16	ETS16DA	v24handler
IEC	Bus	1	GPIB232CT	gpib232ct

Tab. 3.5: Schnittstellenumsetzer des Experimentkontrollsystems

Die Programme zum Betrieb der Schnittstellen mußten schon in der Entwicklungsphase den einfachen und transparenten Zugriff auf die zu steuernden Geräte ermöglichen. Durch die einfache Struktur der Kommunikationsschnittstelle dieser Programme kann der Anwender selbst zusätzliche Geräte anschließen und betreiben. Bei den meisten Geräten ist die Wahl der Schnittstelle jedoch nicht mehr

möglich gewesen.

Ein Schnittstellenumsetzer besteht aus einer aufeinander abgestimmten Kombination von Hard- und Softwarekomponenten, die dem Experimentkontrollsystem den standardisierten und transparenten Gerätezugriff ermöglicht. Die Kommunikation der Steuerungsprozesse mit den Schnittstellenwandlern muß nicht notwendigerweise über das Nachrichtenübermittlungssystem erfolgen. Die Methoden zur Hardwareansteuerung können entweder direkt als Unterprogrammaufruf oder über eine Interfaceklasse netzwerkweit aktiviert werden. Die Aufteilung der logischen Ebenen von Schnittstellenumsetzern und Geräte-Handlern auf Prozesse erfolgt entsprechend der jeweiligen Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit und den direkten Hardwarezugriff.

Die Tabelle 3.5 zeigt die Schnittstellenumsetzer des Experimentkontrollsystems. Abbildung 3.7 zeigt die über mehrere Rechner verteilte Struktur des Steuerungs-

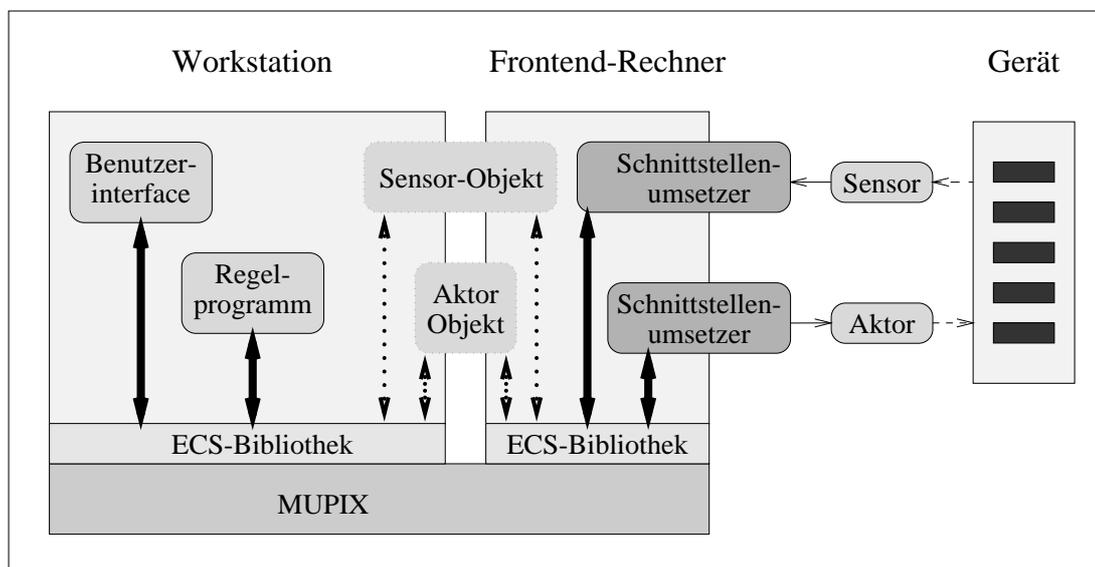


Abb. 3.7: Struktur der Aufteilung des Steuerungssystems auf verschiedene Rechner mit den auf Schnittstellenumsetzern basierenden Sensor-/Aktorobjekten. Die Schnittstellenumsetzer mit direktem Hardwarezugriff befinden sich auf den Frontendrechnern. Die Sensor-/Aktorobjekte sind entsprechend der benötigten Rechenleistung bzw. der Anforderungen an intensive Kommunikation über die Workstations bzw. Frontendsysteme verteilt

systems mit den Schnittstellenumsetzern auf den Frontendrechnern.

Analog-Digital-Konverter

Der VMEbus-ADC¹³ *TVM740* wandelt zusammen mit dem Programm *tvm740* die analogen Signale an den Eingängen in Digitalwerte um, die innerhalb des Steuerungssystems weiterverarbeitet werden können. Alle 32 Eingangskanäle können einzeln über das Nachrichtensystem adressiert und gelesen werden.

¹³analog digital converter

Zusätzlich erlaubt der Schnittstellenumsetzer die Erzeugung von einfachen Sensorobjekten¹⁴, welche die an die einzelnen ADC-Kanäle angeschlossenen Sensoren repräsentieren. Dies kann z.B. ein temperaturempfindlicher Widerstand zur Messung der Spulentemperatur eines Spektrometermagneten sein. Über die Datenbank erhält das Sensorobjekt alle notwendigen Informationen, von der Kennlinie zur Umsetzung der analogen Eingangsspannung in die Temperatur bis zur Dimension der gemessenen Größe. Es können bis zu 32 unterschiedliche Sensorobjekte je Schnittstellenumsetzer erzeugt werden. Jedes Objekt überwacht sich selbst in frei definierbaren Intervallen und meldet Abweichungen, die außerhalb einer einstellbaren Schwankungsbreite vom festgesetzten Sollwert liegen, eigenständig an den zentralen Status-Server.

Auch für die älteren VMEbus-ADCs vom Typ *MPV907* wurde ein Programm zur Ansteuerung erstellt. Der ADC besitzt jedoch nur 16 Kanäle und keinen programmierbaren Eingangsverstärker zur Messung kleiner Spannungen, er wird daher praktisch nicht mehr eingesetzt.

Alle zur Zeit erhältlichen VMEbus-ADCs sind für die Messung von Gleichspannungspegeln ungeeignet¹⁵, da ihre Integrationszeit üblicherweise bei einigen μ s liegt. Zur Elimination von niederfrequenten Störsignalen werden die Eingänge der ADCs daher mit Integrationsgliedern beschaltet.

Digital-Analog-Konverter

Der VMEbus-DAC¹⁶ *MPV904* wandelt zusammen mit dem Programm *mpv904* die Digitalwerte des Steuerungssystems in analoge Spannungssignale am Ausgang des Moduls um. Es können analog zu den ADCs bis zu 16 unabhängige Aktorobjekte¹⁷ definiert werden. Sie arbeiten in den logischen Einheiten der angeschlossenen Geräte. Dies ermöglicht dem Steuerungssystem direkt mit den angeschlossenen Geräten in den physikalisch relevanten Einheiten zu kommunizieren (z.B. Kammerspannungen im kV-Bereich) und nicht mit den realen Spannungen am Ausgang des Digital-Analog-Wandlers von ± 10 Volt.

Digital-Eingabe/Ausgabe-Module

Eine besondere Rolle kommt der digitalen Ein- und Ausgabe innerhalb des Steuerungssystems zu. Sie ermöglicht das Setzen bzw. Lesen von binären Zuständen wie z.B. das Ein- und Ausschalten von Geräten. Für diese Ein-/Ausgabekanäle können analog zu den anderen Schnittstellenumsetzern Sensor- bzw. Aktorobjekte erzeugt werden. Durch die Erweiterung der einzelnen Kanäle zu Objekten innerhalb des Steuerungssystems (beim *TVM744* 40 Eingangs- und 32 Ausgangskanäle) kann jeder Kanal netzwerkweit unter dem eindeutigen logischen Namen des Objektes angesprochen werden.

¹⁴Objekt zur Erfassung eines externen Zustandes

¹⁵Zur Zeit wird ein spezieller VMEbus-ADC im Institut entwickelt

¹⁶digital analog converter

¹⁷Objekt zur Veränderung eines externen Zustandes

Eine weitere Aufgabe der Digital-Eingabe/Ausgabe-Module ist die standardisierte Kommunikation mit allen speziell für die Spektrometeranlage entwickelten Geräten. Aufgrund mangelnder kommerziell verfügbarer Alternativen ist ein digitaler 32 Bit-Bus zur Kontrolle und Ansteuerung der neuen Geräte entwickelt worden. Zum damaligen Zeitpunkt war der Einsatz von dezentralen Mikroprozessoren in Verbindung mit einem Feldbus¹⁸ noch nicht ausreichend entwickelt und standardisiert. Die Tabelle 3.8 zeigt die Struktur des parallelen Busses, der vorerst für den Einsatz von bis zu acht Endgeräten ausgelegt ist.

Leistungsnummer	Funktion	Zielgerät
32	Quittung	Multiplexer
31 - 25	Adresse	Multiplexer
24 - 18	Steuerung	Endgerät
17	Quittung	Endgerät
16 - 1	Daten	Endgerät

Abb. 3.8: Struktur des parallelen Busses

ein speziell entwickeltes Modul verwendet, das die Datenleitungen entsprechend des Zustandes der sieben Adreßleitungen durchschaltet und solange stabil hält bis die Quittungsleitung deaktiviert wird. Die gewählte Struktur des parallelen Busses bietet den Vorteil, Endgeräte auch direkt an das Digital-Eingabe/Ausgabe-Modul anschließen zu können. Hierzu werden die obersten acht Signalleitungen ausgeblendet. Das Zeitverhalten des digitalen Busses ist asynchron ausgelegt, damit verschiedene Digital-Eingabe/Ausgabe-Module mit unterschiedlich schnellen Endgeräten kombiniert werden können. Dazu müssen alle Aktionen durch Setzen oder Zurücknehmen von Signalen auf Quittungsleitungen initiiert bzw. abgeschlossen werden. Für den reibungslosen Betrieb ist es notwendig, alle Pegel an den Ausgängen der Digital-Eingabe/Ausgabe-Module und der Endgeräte in elektronischen Bauteilen zwischenzuspeichern. Da der Schnittstellenumschalter im Multiplexbetrieb auch als Buskontroller fungiert, kann er nicht gleichzeitig alle Ausgänge der Endgeräte überwachen. Zur effizienten Kommunikation mit den Endgeräten ist es teilweise notwendig, Gruppen von Befehlen zusammenzufassen und als Sequenz durch den Multiplexer zu schicken. Zu diesem Zweck ist die Software im Rahmen einer Diplomarbeit [Mart-93] funktionell und strukturell erweitert worden.

Auch für das ältere VMEbus-Digital-Eingabe/Ausgabe-Modul *DIGI200* wurde ein ähnliches Programm zur Ansteuerung entwickelt. Dieses Modul besitzt jedoch keine optogekoppelten Ein- und Ausgänge. Daher ergaben sich Probleme bei langen Signalkabeln und den daraus resultierenden Potentialdifferenzen. Aus diesem Grund wird dieser Modultyp nicht mehr eingesetzt.

Die Ansteuerung der Endgeräte (z. B. Targetelektronik in der Streukammer) von den VMEbus-Rechnern aus (in diesem Beispiel Floor-System) erfordert bis zu 30 Meter lange Kabel, die zusammen mindestens 64 einzelne Adern besitzen müssen. Die langen und empfindlichen Kabel sowie die Steckverbindungen werden im Steuerungssystem daher zunehmend durch preiswerte Mikrokontroller mit digitalen Ein- und Ausgängen ersetzt. Sie werden direkt neben oder in einem

¹⁸Ein Feldbus ermöglicht die einfache und robuste Verbindung von Sensoren, Aktoren und Mikrocontrollern mit Steuerungsrechnern

Aufgrund des Adreßraumes können maximal 2^7 Endgeräte gleichzeitig betrieben werden. Die Daten werden in einem Multiplexmode übertragen, so daß mit mehreren Endgeräten quasi gleichzeitig kommuniziert werden kann. Hierzu wird

Endgerät eingesetzt und über einen seriellen Feldbus mit nur vier Drähten angesteuert. Das zur Zeit eingesetzte System SML¹⁹ besteht aus einem kleinen Controllermodul, an das verschiedene Ein-/Ausgabemodule angeschlossen werden können. Zum Betrieb des parallelen Busses werden jeweils zwei optogekoppelte Digital-Eingabe/Ausgabe-Module mit je 16 Kanälen mit dem Controller verbunden. Durch den galvanisch entkoppelten RS422-Feldbus können über eine einzige 4-Drahtleitung bis zu 32 Mikrocontroller adressiert werden. Dies bringt erhebliche Vorteile bei der Installation und Betriebssicherheit des Systems. Die Anbindung des Feldbusses an das Steuerungssystem erfolgt über einen RS232 \iff RS422-Wandler. Für die digitale Ein-/Ausgabe wurde der SML zum Schnittstellenwandler ausgebaut und besitzt die gleiche Soft- und Hardwarechnittstelle wie die Kombination *TVM744/tvm744*. Daher ist ein sukzessiver Umstieg auf die Mikrocontroller möglich. Für den SML-Kontroller stehen auch ADC-, DAC- und Relais-Schnittstellen zur Verfügung.

CAMAC

Wesentliche Teile der Spektrometeranlage, insbesondere die Geräte der Triggerdetektoren werden über CAMAC angesteuert. Die Steuerung besitzt jedoch nicht den alleinigen Zugriff auf den CAMAC-Bus. Ein weiteres Element mit direktem CAMAC-Zugriff ist die Meßdatenerfassung. Im Gegensatz zum Experimentsteuerungssystem muß die Meßdatenverarbeitung extrem schnell auf externe Ereignisse reagieren, um Totzeitverluste zu vermeiden. Die CAMAC-Zugriffe der Datenerfassung werden daher von einer zweiten VMEbus-CPU durchgeführt.

Für den CAMAC-Zugriff des Steuerungssystems wurde ein Schnittstellenumsetzer entwickelt. Er besteht aus einem VMEbus-CAMAC-Modul vom Typ CBD²⁰ und dem zugehörigen Softwaremodul *camdrv*. Zusammen mit der erstellten Funktionsbibliothek können CAMAC-Zugriffe netzwerkweit von jedem autorisierten Programm ausgeführt werden. Dadurch müssen nicht mehr alle Programme mit CAMAC-Zugriff auf den Frontendrechnern mit dem stark begrenzten Hauptspeicher gestartet werden. Der Schnittstellenumsetzer ermöglicht die Ausnutzung der vollen CAMAC-Funktionalität mit bis zu acht Verzweigungen²¹ und jeweils acht Überrahmen²² pro Verzweigung. Das VMEbus-Modul wird mittels *memory mapped I/O* angesprochen, d.h. es werden Teile des Adreßraumes des VMEbusses auf CAMAC-Aktionen abgebildet. Das Modul benötigt für jeden benutzten Überrahmen lediglich 64 kByte virtuellen Speicher. Ein Zugriff gliedert sich in zwei Teile: die eigentliche Aktion und die anschließende Überprüfung des Zugriffsstatus, welche Aufschluß über den Erfolg einer CAMAC-Aktion gibt. Da beide Teile eines Zugriffs fest zusammengehören, darf keine Unterbrechung durch andere Aktionen auf dem CAMAC-Interface erfolgen. Eine Folge von Anweisungen, die nicht unterbrochen werden darf, nennt man *atomar*. Die einfachste Möglichkeit Aktionen atomar zu gestalten, ist sie von einem einzigen Prozeß

¹⁹serial module linkage

²⁰camac branch driver der Firma CES (creative electronic systems)

²¹branches

²²crates

sequentiell ausführen zu lassen. Bei mehreren Prozessen in einem Multitasking-Betriebssystem kann nicht garantiert werden, daß bei vielen Zugriffen auf das CAMAC-Interface die zusammengehörenden Aktionen nicht durch einen Prozeßwechsel unterbrochen werden. Die Folge davon wäre, daß Statusinformationen falsch zugeordnet und mögliche Fehler dem falschen Gerät gemeldet würden. Zum anderen wird das Statuswort nicht nur zur Fehleranzeige sondern auch als Kennung für den Abschluß verschiedener Aktionen verwendet. Aufgrund dieser Zuordnungsproblematik ist eine definierte Zustands- und Fehlerbehandlung nicht mehr möglich. Daher darf es pro CAMAC-Interface nur einen aktiven Prozeß geben, der auf das Modul zugreift.

Bei der Steuerung der Photomultiplier-Spannungsversorgungen ergeben sich innerhalb kurzer Zeit eine große Anzahl von Zugriffen. Um die Effizienz der CAMAC-Verarbeitung zu erhöhen, sind Teile der Spannungsversorgungssteuerung als eigener Prozeß auf den Frontendrechnern realisiert worden. Damit die Zugriffe zwischen dem CAMAC-Handler und der Spannungsversorgungssteuerung weiterhin atomar bleiben, müssen die beiden Prozesse synchronisiert werden. Die Synchronisation erfolgt über fest definierte Aktionen auf gemeinsamen Speicher-

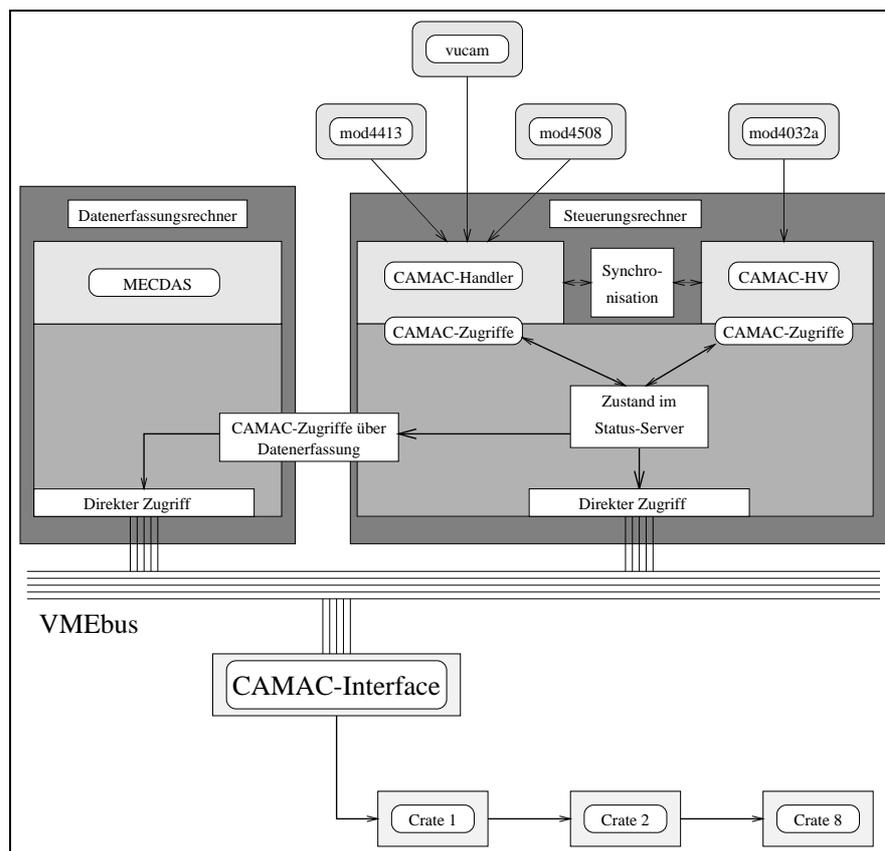


Abb. 3.9: VMEbus-CAMAC-Zugriff

zellen²³. Durch die gewählte Struktur der CAMAC-Bearbeitung sind Konflikte beim Zugriff innerhalb des Steuerungssystems ausgeschlossen. Ein Problem hingegen ist die Synchronisation der Zugriffe von Datenerfassung

²³Semaphoren Mechanismus

und Steuerungssystem. Die Zugriffe erfolgen wie oben geschildert asynchron durch zwei verschiedene CPUs. Beide Softwaresysteme besitzen sehr unterschiedliche Anforderungen an die Zugriffs- und Reaktionsgeschwindigkeit. Gegenwärtig werden daher zur Synchronisation alle Zugriffe der Experimentsteuerung über die CPU der Datenerfassung abgewickelt. Hierzu wird bei jedem Zugriff eine Bibliotheksroutine der Datenerfassung aufgerufen, die über einen gemeinsam adressierbaren Speicherbereich mit dem Datenerfassungsrechner kommuniziert. Da der Datenerfassungsrechner nur von der Initialisierung einer Meßperiode bis zu deren Terminierung zur Verfügung steht, muß die Experimentsteuerung außerhalb dieser Zeit auf den direkten CAMAC-Zugriff zurückschalten. Die Steuerung dieses Vorgangs erfolgt über die Änderung einer Zustandsvariablen innerhalb des Status-Servers. Ein Problem in diesem Zusammenhang ist, daß der Zustand der Datenerfassung nicht dauerhaft²⁴ verfügbar ist und auch nicht aktiv abgefragt werden kann. Daher muß sich die Zustandslogik der Experimentsteuerung darauf verlassen, daß sich die Datenerfassung noch im zuletzt gemeldeten Zustand befindet. Ein weiteres Problem liegt in der Art der Bearbeitung der CAMAC-Zugriffe durch die Meßdatenerfassung. Eine Bearbeitung der Steuerungszugriffe erfolgt nur, wenn der Datenerfassungsrechner keine anderen Aufgaben hat. Dies hat zur Konsequenz, daß je nach Auslastung des Datenerfassungsrechners über längere Zeiten keine Steuerungszugriffe erfolgen können. An dieser Stelle muß die Datenerfassungssoftware [Kryg-96] dahingehend erweitert werden, daß eine definierte Bearbeitungszeit garantiert werden kann, wenn das bisherige Konzept weiterverfolgt werden soll. Abbildung 3.9 zeigt das Zusammenspiel der oben beschriebenen Komponenten für den koordinierten CAMAC-Zugriff.

Weitere Möglichkeiten der Synchronisation der CAMAC-Zugriffe, die wesentlich auf Hardwaremodifikationen des CES-CAMAC-Interface beruhen, werden im Abschnitt 3.8 diskutiert.

Serielle Schnittstelle (RS232/V24)

Viele Geräte der Steuerung verfügen über lokale Mikroprozessoren, welche die eigenen Basisfunktionen steuern. Sie kommunizieren in der Regel über serielle Schnittstellen mit ihrer Außenwelt. Zur Integration dieser Mikroprozessoren in das Steuerungssystem ist ein Schnittstellenumsetzer erstellt worden. Er ermöglicht den transparenten und netzwerkweiten Zugriff auf die seriellen Daten. Als Hardwarekomponente werden 16-Port-Terminalserver eingesetzt. Sie wurden ausgewählt, da sie einen eigenen Mikroprozessor besitzen und somit unabhängig im Ethernet-Netzwerk betrieben werden können. Sie bieten die Möglichkeit, jeden Port des Terminalservers über ein standardisiertes Protokoll²⁵ von jedem Rechner aus anzusprechen. Auf der Grundlage dieses Protokolls wurde eine Funktionsbibliothek zum einfachen Zugriff auf die angeschlossenen Mikroprozessoren erstellt. Beim Betrieb unterschiedlich schneller Endgeräte mit verschiedenen seriellen Protokollen stellte sich heraus, daß die Programmierung der Geräte durch die Erweiterung der Bibliothek erheblich vereinfacht werden kann. Im Rahmen einer

²⁴persistent

²⁵TCP/IP

Diplomarbeit [Hake-93] wurde der *v24handler* erstellt. Er ermöglicht den asynchronen Zugriff auf die zu steuernden Geräte. Vor allem die Behandlung von Alarmen und die Reaktion auf Protokollfehler konnte deutlich verbessert werden. Darüber hinaus wurde der *v24handler* im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Verarbeitung binärer Daten erweitert. Dies ist unter anderem für die Ansteuerung der dezentralen Mikroprozessoren notwendig geworden.

IECbus

Der IECbus ist ein standardisierter, paralleler Bus, der zur Ansteuerung hochwertiger Labormeißgeräte entwickelt wurde. Zur einfachen Bedienung der dezentral angeordneten Steuerungsgeräte wurden Schnittstellenumsetzer vom Typ *GPIB232ct* ausgewählt. In Verbindung mit der erstellten Funktionsbibliothek erlauben sie den transparenten Zugriff auf IECbus-Geräte über eine serielle Schnittstelle.

3.7 Benutzeroberflächen

Ein wichtiges Element des Steuerungssystems sind die Benutzeroberflächen. Sie ermöglichen die Interaktion des Benutzers mit den Objekten des Experimentsteuerungssystems. Zur Kommunikation benötigen die Benutzeroberflächen lediglich den logischen Namen des zu steuernden Objektes. Alle weiteren Informationen zur Objektansteuerung und Adressierung beziehen sie aus der Datenbank. Die periodischen Zustandsinformationen der Spektrometeranlage erhalten die Benutzeroberflächen über den zentralen Status-Server *opcon*. Sie melden sich mit dem Namen und Feld des darzustellenden Objektes über Bibliotheksroutinen beim Status-Server an und erhalten sofort den zuletzt gemeldeten Zustand des angewählten Objektes. Sobald der Status-Server neue Zustandsänderungen des spezifizierten Objektes erhält, verteilt er sie an die Benutzeroberflächen, die dieses Objekt angewählt haben. Es existieren zur Zeit zwei verschiedene Arten von Benutzeroberflächen.

Graphische Benutzeroberfläche

Die Abbildung 3.10 zeigt die Darstellung der Bedienoberfläche für *specamagnet*. Die Oberfläche wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Stef-93] unter X11/Motif erstellt und wird lediglich durch die Anpassung von Datenbankeinträgen gewartet. Alle unterlegten Felder in der Abbildung können mit der Maus angeklickt werden. Daraufhin erscheint ein spezielles Menü für das angewählte Gerät. In Abbildung 3.11 ist eine solche Dialogbox zur Steuerung des Magnetspektrometers A dargestellt. Die einzelnen Aktionen können in der Bedienleiste unter *Actions* ausgewählt werden. Im Beispiel sind die wichtigsten Aktionen eingeschaltet worden. Das gesamte Spektrometer kann mit der Aktion *Off* ausgeschaltet werden. Mit der Aktion *Recycle central momentum* wird das Spektrometer auf einen neuen Impuls eingestellt, wobei entsprechende Prozeduren, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben,

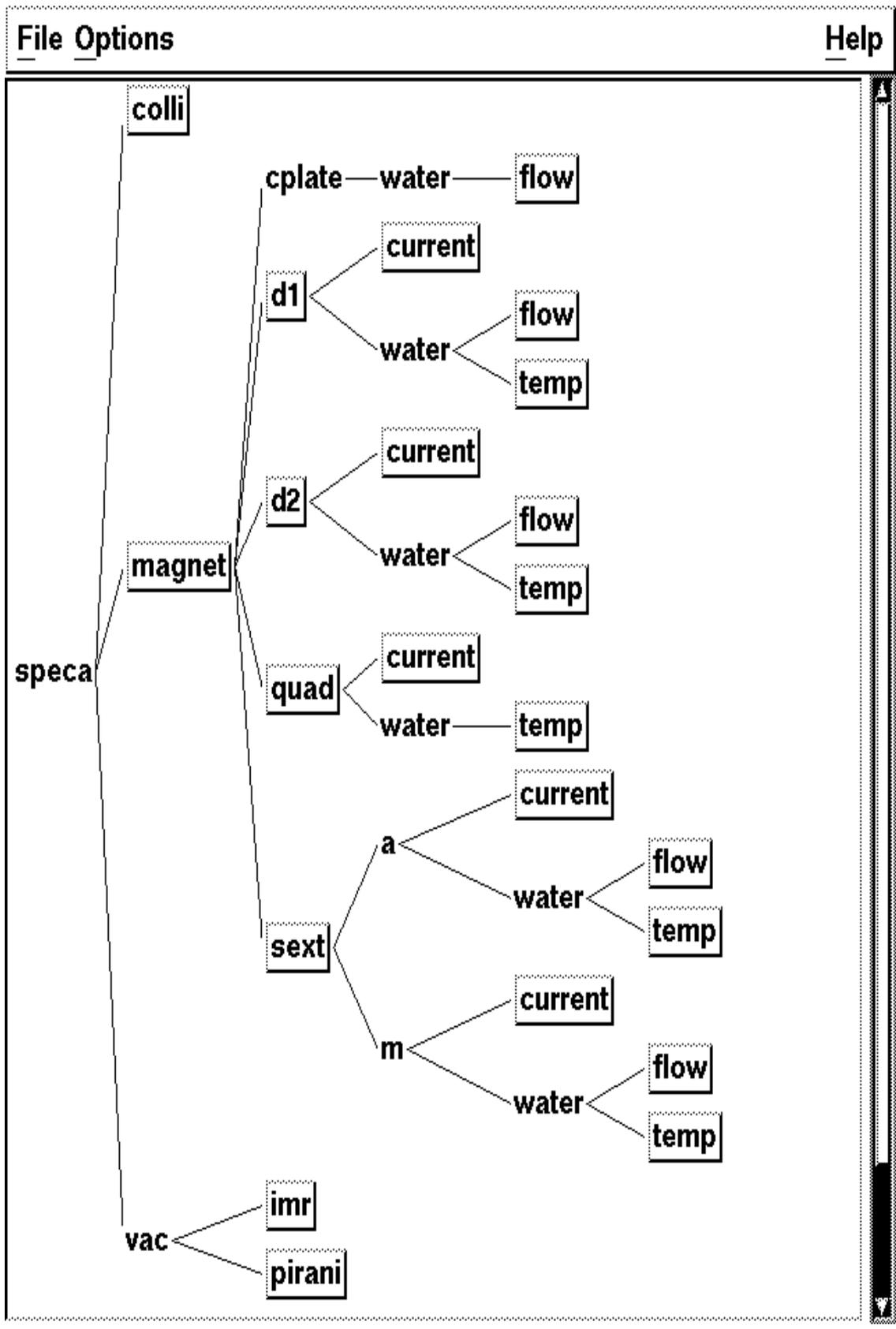


Abb. 3.10: Baumstruktur des Magnetspektrometers A als Grundlage für die Bedienung durch die graphische Bedienoberfläche

für jeden der Spektrometermagnete durchlaufen werden. Gleichzeitig kann sich der Anwender in dem Menü über den Zustand des gesamten Spektrometers informieren.

Zeichenorientierte Benutzeroberfläche

Die Zustandsinformationen des Status-Servers bilden die Grundlage der zeichenorientierten Benutzeroberfläche *opdisp*. Sie basiert auf der Darstellung der Zustände in einem Textfenster oder Terminal über eine Bibliothek zur Verwaltung virtueller Textbildschirme (*curses*).

Die Benutzeroberfläche wird auf zwei verschiedene Arten verwendet:

- Die interaktive Verwendung des Programms mit der menügesteuerten Auswahl des darzustellenden Bildschirms.
- Die Verwendung als Hintergrundprogramm zur Ausgabe auf einen beliebigen Textmonitor innerhalb des Steuerungssystems. Hierzu sind in der Datenbank verschiedene Zustandsinformationen der Spektrometeranlage zu logischen Gruppen zusammengefaßt. Die Darstellung der logischen Gruppen wird über Tabellen mit mehreren Statusmonitoren verknüpft. Über die Prozeßverwaltung können mit dem Befehl *start_device opdisp* Standarddarstellungen aktiviert und beendet werden. Diese Bildschirme bieten die Möglichkeit, einen schnellen Überblick über den Gesamtzustand des Systems zu gewinnen. Die Abbildung 3.12 zeigt den entsprechenden Bildschirm für das Magnetsystem von Spektrometer A. Für die logische Beschreibung des Bildaufbaus ist eine einfache Beschreibungssprache entwickelt worden. Dadurch kann der Anwender die für ihn interessanten Informationen frei zusammenstellen.

Das Programm *adjust* bietet eine weitere Möglichkeit, mit Objekten des Steuerungssystems zu kommunizieren. Die Abbildung 3.13 zeigt ein Beispiel für die auf jedem Textterminal mögliche, interaktive Benutzung. In diesem Beispiel wird es über *adjust -i specb/magnet* zur Steuerung des Magnetsystems von Spektrometer B aktiviert. Alle möglichen Interaktionen mit dem Spektrometerobjekt erfolgen über die gleichen in der Datenbank abgelegten Benutzerschnittstellenspezifikationen, die auch die graphische Benutzeroberfläche verwendet. Daher kann das Programm *adjust* mit jedem Objekt innerhalb des Steuerungssystems zusammenarbeiten. Eine zweite Möglichkeit ist die nicht interaktive Verwendung von *adjust* zur Kommunikation mit den Objekten des Steuerungssystems. Ein einziger Befehl der Form *adjust -a SET -o CENT_MOM specb/magnet 335.0* ermöglicht, das Spektrometer B auf einen Zentralimpuls von 335 MeV/c einzustellen. Diese Art der Objektansteuerung über Befehle auf der Ebene des Kommandointerpreters erlaubt die Zusammenstellung komplexer Ablaufdateien²⁶ mit einer Vielzahl solcher Befehle. Dies findet insbesondere in der Entwicklungs- und Erprobungsphase neuer Geräte Anwendung, wenn die Reihenfolge von Befehlen getestet oder Spezialfälle bearbeitet werden sollen. Durch die intensive Verwendung von Ablaufdateien entsteht ein hoher Ressourcenverbrauch, da das Programm *adjust*

²⁶shell scripts

File	Actions		Help
Switch on/off:			
	On	Off	
Show on/off:			
16:54:03	09.12.94	ON	Update
Set central momentum:			
0.00 MeV/c ...	<input type="text"/>	MeV/c ... 660.00 MeV/c	Set
Recycle central momentum:			
0.00 MeV/c ...	<input type="text"/>	MeV/c ... 660.00 MeV/c	Set
Show central momentum:			
15:19:59	09.12.94	426.05 MeV/c	Update
Shut spectrometer down			
Get ready status:			
16:54:05	09.12.94	OFF	Update
Show dipol1 field:			
16:53:13	09.12.94	0.96896 T	Update
Show dipol2 field:			
16:53:13	09.12.94	0.96949 T	Update
Show quadrupol field:			
16:52:02	09.12.94	0.33311 T	Update
Show sextupol field:			
16:53:17	09.12.94	0.21414 T	Update

Abb. 3.11: Einstellung des Magnetspektrometers A über die graphische Bedienoberfläche

Magnet_Spektrometer_A						
	spec/magnet			spec/magnet		
d1	0.96890 T	05:21	sext	0.21414 T	05:21	
d1/hall	0.965 T	05:20	sext/m/current	279.31 A	05:19	
d1/nmr	0.96890 T	05:20	sext/m/water/flow	687.0 l/h	05:19	
d1/current	781.9 A	05:19	sext/m/water/temp	37.668 deg	05:20	
d1/water/flow	6107.0 l/h	05:19				
d1/water/temp	20.861 deg	05:20	sext/a/current	49.33 A	05:19	
			sext/a/water/flow	193.0 l/h	05:21	
			sext/a/water/temp	28.050 deg	05:21	
	spec/magnet			spec/magnet		
d2	0.96906 T	05:23				
d2/hall	0.979 T	05:18				
d2/nmr	0.96906 T	05:23	quad	0.33311 T	05:21	
d2/current	781.94 A	05:19	quad/current	384.87 A	05:19	
d2/water/flow	6816.0 l/h	05:20	quad/water/flow	2213.0 l/h	05:21	
d2/water/temp	20.469 deg	05:14	quad/water/temp	35.57 deg	05:19	

Abb. 3.12: Typische Ausgabe eines Programms, das den Status ausgewählter Geräte auf einem Terminalbildschirm im Meßraum anzeigt

specb/magnet				
Quit		0	INIT	TRUE
ONOFF_S	SET	1	READY	FALSE
ONOFF_I	GET	2	OFF	FALSE
CENT_MOM	SET	3	ERROR	FALSE
CENT_MOM	GET	4	SHUTDOWN	FALSE
RECYCLE	SET	5	CYCLE	FALSE
SHUTDOWN	SET	6	RECYCLE	FALSE
READY	GET	7		
STATUS	GET	8		
FIELD_S	GET	9		
>>>	8			

Abb.3.13: Interaktive Einstellung des Magnetspektrometers B mit einem Textterminal über das Programm *adjust*

wiederholt gestartet und initialisiert werden muß. Daher ist das Programm dahingehend erweitert worden, eine Anzahl von Befehlen aus einer Datei einzulesen und nacheinander abzarbeiten.

Die Programmierung mittels Ablaufdateien kann immer nur eine vorübergehende Lösung sein bis ein übergeordnetes Steuerungsobjekt erstellt wird. In Ablaufdateien ist eine Reaktion auf Fehlerzustände und ihre spezifische Behandlung nicht möglich. Zudem ist die Bearbeitung über den Kommandointerpreter vergleichsweise langsam und unkomfortabel.

Zur Darstellung von Betriebsstörungen und Alarmen wird das Programm *opconsole* [Kram-95] verwendet. Es informiert in der Standardkonfiguration des Steuerungssystems automatisch durch einen Monitor mit einem akustischen Signal über alle Sondermeldungen. Das Programm erhält die Informationen direkt vom Status-Server. Zusätzlich werden die Informationen in einer Protokolldatei ge-

speichert. Ein typischer Auszug aus dieser Datei zeigt die Abbildung 3.14. Die verschiedenen Arten von Meldungen können selektiv dargestellt werden. Auf diese Weise ist es möglich, kleinere Störungen zu unterdrücken und nur wichtige Alarme zu melden.

```

WARNING speca/magnet/quad/current 0 15:17:19 08.03.94 :
    error turn current off, current is off !!!

FAILURE dev/camac/camac2/mod4032a 0 18:07:24 11.03.94 :
    dev/camac/camac2/mod4032a(lam_and_data_processing):
    Parity error in main frame 61

ALARM speca/vdc/hv2/cathode/u/get 3 07:01:22 16.03.94 :
    1.74507 below threshold 5800

FAILURE dev/nmr/nmr1 0 09:29:04 16.03.94 :
    specb/magnet/d1/nmr: can't find resonance

ALARM dev/current/2 0 15:07:28 17.03.94 :
    interlock occured 440271 (hex): !...!!!...!.....!....!

```

Abb.3.14: Typische Ausgabe von Sondermeldungen mit dem Programm *opconsole* auf einem Terminal

3.8 Ausblick

Die entwickelten Konzepte zur standardisierten Erstellung von Geräte-Handlern und die Basissoftware zur Kommunikation und Statusbehandlung haben sich beim Aufbau und der Inbetriebnahme der Dreispektrometeranlage bewährt. Die erstellten Geräte-Handler und Schnittstellenumsetzer zur Steuerung und Überwachung der Spektrometeranlage sind bei der Durchführung der ersten Experimente erfolgreich eingesetzt worden.

Es bleiben jedoch einige Punkte offen, die bisher noch nicht bearbeitet werden konnten. Die notwendigen Anpassungen, die sich durch den Betrieb der Anlage ergeben haben, sind im Rahmen dieser Arbeit sofort vorgenommen worden. Einige Systeme mußten kurzfristig verfügbar sein. Daher sind sie teilweise durch Übergangslösungen, wie z. B. durch den Einsatz von Ablaufdateien, zur Verfügung gestellt worden. Sie sollten längerfristig durch intelligente und robuste Geräte-Handler ersetzt werden.

Die ausstehenden Aufgaben konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr alle vollständig durchgeführt werden, da der Aufbau, die Durchführung und die Auswertung des in Kapitel 5 beschriebenen Experiments zum Test des Steuerungssystems erheblich mehr Zeit als geplant erforderten. Im folgenden werden die wichtigsten Punkte für die künftige Erweiterung des Steuerungssystems erläutert und die entwickelten Lösungsstrategien aufgezeigt:

1. Erweiterung des Steuerungssystems durch:

- Programmierung weiterer Geräte-Handler auf Basis der erstellten Rahmensoftware zur Steuerung neuer Hardware (Polarimeter, usw.).
- Einführung einer gemeinsamen, professionellen Datenbank für den Experimentierbetrieb und die Analyse der Experimentdaten.
Bei der Erstellung, Erweiterung und Pflege der Frontenddatenbank wurde darauf geachtet, daß alle Anpassungen von Tabellen und Schnittstellen im Hinblick auf die spätere Anbindung an eine moderne, relationale Datenbank erfolgen. Sie würde die Verwendung standardisierter Datenbankentwurfstechniken zur redundanzfreien Speicherung der Daten bei gleichzeitig effizientem Zugriff auf die einzelnen Daten unter komplexen Suchkriterien erlauben. Diese Datenbank muß insbesondere die Belange von Datenerfassung und Analyse berücksichtigen, da ein gemeinsamer, konsistenter Datenbestand unabdingbar ist. Mittel- bzw. längerfristig kann auf eine derartige Datenbank nicht verzichtet werden. Sie sollte die Möglichkeit der automatisierten Eingabemenüerstellung mit Prüfung des Wertebereiches der Eingabedaten bieten. Weiterhin sollte die Datenbank eine Schnittstelle zu C++ besitzen, damit die Zustände der Steuerungsobjekte permanent abgelegt werden können. Die Objekte werden dadurch dauerhaft verfügbar. Durch den konsequenten Einsatz dieser Möglichkeit könnte auf einfache Art und Weise der gesamte Zustand des Steuerungssystems gesichert und zu einem beliebigen, späteren Zeitpunkt wieder hergestellt werden.
- Aufbau eines Geräte-Handlers zum Betrieb der Driftkammern.
Er könnte die Steuerung und Überwachung der Diskriminatorschwellen sowie die Strom- und Gasversorgungen der Driftkammern koordinieren. Zusätzlich würde er die Geschwindigkeit der Hochspannungsänderungen über Software regeln und damit die Driftkammer schonen. Gleichzeitig könnten die Gasflüsse akkumuliert und so der Gasvorrat präzise überwacht werden.
- Ansteuerung der Triggerdetektoren durch einen Geräte-Handler.
Die existierenden Ablaufdateien sollten durch einen Geräte-Handler ersetzt werden.
- Überwachung der Funktionsfähigkeit der NIM-, CAMAC- und FASTBUS-Netzgeräte.
Zur Zeit können Fehler in den Netzgeräten nur indirekt anhand der Experimentdaten festgestellt werden.
- Anbindung an das Beschleunigersteuerungssystem.
Diese Erweiterung würde die Integration der aktuellen Beschleunigerparameter in die Experimentdaten erlauben.
- Schnittstellen zum Datenerfassungssystem.
Für den Zugriff auf die Zustände und Parameter des Datenerfassungssystems müßte eine Schnittstelle zum Nachrichtenübermittlungssystem existieren. Darauf aufbauend könnte ein Geräte-Handler den Zustand der Datenerfassung innerhalb des Steuerungssystems repräsentieren und die gesamte Kommunikation abwickeln.

2. Modifikationen des Steuerungssystems durch:

- Entkopplung von Datenerfassung und Experimentsteuerung beim CAMAC-Zugriff.

Zur Zeit wird die in Abschnitt 3.6 beschriebene Softwaresynchronisation eingesetzt. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Datenerfassungsprozesse auf den Frontendrechnern anfällig gegen Hardwarestörungen und Fehlbedienungen sind. In diesen Fällen wird der komplette CAMAC-Zugriff der Steuerung gestört.

Die einfachste Lösung wären getrennte CAMAC-Überrahmen, die über unterschiedliche VMEbus-CAMAC-Interfaces angesprochen werden. Dies ist aufgrund des hohen finanziellen Aufwandes und der beengten Platzverhältnisse auf den Spektrometern nicht zu verwirklichen.

Die Erweiterung und Verbesserung der verwendeten Softwaresynchronisation ist ohne massive Eingriffe in die Struktur der Datenerfassung nicht möglich. Die Softwaresynchronisation kann auf lange Sicht die Probleme lediglich reduzieren, da der grundsätzliche Zielkonflikt weiter besteht. Daher zielt die Entwicklung zur Zeit auf eine Erweiterung der Hardware mit kleinen Änderungen an der Software des Steuerungssystems. Die Idee liegt in der Modifikation der für die Experimentverriegelung verwendeten CAMAC- μ -Busy-Module²⁷. Durch Hinzufügen eines speziellen Befehls²⁸ könnte der Interrupt²⁹ der Datenerfassung gesperrt werden, falls zu diesem Zeitpunkt keine Interruptverarbeitung stattfindet. Im Fall der erfolgreichen Sperrung würde eine CAMAC-Sequenz der Steuerung abgearbeitet und anschließend die Blockade des Interrupts aufgehoben werden. Ein zwischenzeitlich auftretender Interrupt würde gespeichert und nach Beendigung der CAMAC-Sequenz an den Datenerfassungsrechner weitergeleitet werden. Ein Testmodul befindet sich zur Zeit in der Planung.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Spiegelung der Zugriffe auf das CAMAC-Interface in rechnerspezifische Adreßbereiche. Dies impliziert jedoch auch die Vervielfältigung des Statusregisters für jeden Rechner. Gleichzeitig würde der VMEbus-Adreßraum durch die Belegung von 4 MByte pro Rechner deutlich eingeschränkt.

Es zeigt sich, daß dieses Problem spezifisch für Multiprozessoranwendungen auf dem VMEbus ist und eigentlich nur durch ein entsprechend konzipiertes CAMAC-Interface gelöst werden kann. Eine Möglichkeit wäre der Anschluß zusätzlicher Hardwareregister für jeden beteiligten Rechner. Eine weitere Möglichkeit ist die Modifikation der Zugriffe auf 32 Bit Datenworte. Das Ergebnis jeder Leseoperation könnte den Zugriffsstatus enthalten. Problematisch würden jedoch weiterhin Schreiboperationen auf das CAMAC-Interface bleiben.

- Aufbau eines Gerätetreibers zur Targetsteuerung.

Zur Zeit existieren drei verschiedene interaktive Programme [Posp-96] zur

²⁷Regelt durch sehr schnelle Elektronik die Freigabe bzw. Sperrung der Experimentelektronik bei gleichzeitiger Messung der entstehenden Totzeiten

²⁸test and set

²⁹Unterbrechungsanforderung an den Datenerfassungsrechner zur Ereignisauslese

Ansteuerung der Targethardware. Ihnen fehlen wesentliche Eigenschaften von Geräte-Handlern des Steuerungssystems (Datenbankinitialisierung, Protokollierung der Zustandsänderungen, Ansteuerung über die Benutzerschnittstellen). Sie erlauben keine koordinierte Steuerung des Kryotargets und des verkürzten Feststofftargets. Aus diesen Gründen ist die Entwicklung der Programme zu einem Target-Handler erforderlich. In diesem Rahmen sollte auch die Steuerung der XY-Position des Targettisches erfolgen.

- Verbesserung des Zugriffs auf die Photomultiplier-Spannungsversorgungen. Die Betriebssicherheit der Spannungsversorgungen läßt sich durch die oben beschriebenen Maßnahmen zur Verbesserung des CAMAC-Zugriffs erhöhen. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit könnte durch den parallelen Zugriff auf die Übertakten über mehrere, serielle Verbindungen gesteigert werden.
- Erweiterung der graphischen Benutzeroberfläche. Sie sollte zur Verbesserung der Überwachungsmöglichkeiten eine Darstellung des zeitlichen Verlaufs von Zustandsänderungen erhalten. Zusätzlich sollte eine Möglichkeit zur Einstellung von Kollimator- und Targetposition mit optischer Rückkopplung an der graphischen Benutzeroberfläche geschaffen werden.
- Ausbau des Überwachungssystems. Das System zur Kontrolle und Analyse des Zustandes von Experimentsteuerung und Datenerfassung sollte ausgebaut werden, damit die Spektrometeranlage komplett ohne Experten betrieben werden kann.
- Verwendung spezieller ADCs zur Messung von Gleichspannungspegeln. Die verwendeten schnellen VMEbus-ADCs sollten durch spezielle ADCs zur Messung von Gleichspannungspegeln ersetzt werden, da diese einen sehr hohen Störabstand zur Unterdrückung von Wechsellspannungssignalen besitzen.
- Einsatz dezentraler Mikroprozessoren. Für Meß- und Regelungsaufgaben sollten Mikroprozessoren direkt an den einzelnen Geräten eingesetzt werden. Dies würde die Meßgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der Geräte steigern.
- Ausbau der Prozeßverwaltung. Die Software zum Starten und Stoppen der Prozesse des Experimentsteuerungssystems sollte zur schnellen Zustandsdiagnostik der Spektrometeranlage um ein System zur Analyse der aktuell gestarteten Prozesse erweitert werden.
- Integration der Beamschanner-Software [Scha-95]. Die Qualität des Elektronenstrahls könnte durch das Programm automatisch analysiert und überwacht werden.

Unabhängig von der Erweiterung bzw. Modifikation des Experimentsteuerungssystems sind Wartungs- und Pflegemaßnahmen erforderlich. Diese beziehen sich insbesondere auf die Datenbankinhalte. Alle Änderungen am Steuerungssystem

müssen bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtsystem überwacht werden, da noch keine Konsistenzprüfung der Datenbankeinträge durch eine professionelle Hintergrunddatenbank erfolgt.

Kapitel 4

Datenerfassungssystem

Für die Experimente an der Dreispektrometeranlage sind im Rahmen dieser Arbeit in enger Zusammenarbeit mit [Kryg-96] die Grundlagen für ein allgemeines Datenerfassungssystem erarbeitet worden. In der ersten Stufe ist ein an der speziellen Struktur der Spektrometeranlage orientiertes Protokoll zur eindeutigen Beschreibung von Experimentaufbau und Ereignisdaten entwickelt worden. Das Protokoll ist in einer ersten Implementation zusammen mit den zugehörigen Methoden zur netzwerkweiten Interprozeßkommunikation erstellt und an die vorhandenen Analysewerkzeuge angepaßt worden. Nach dem erfolgreichen Abschluß der ersten Phase eines Datenerfassungssystems für Einarm-Experimente verschob sich der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf die Entwicklung des dringend notwendigen Experimentkontrollsystems. Die wesentlichen Strukturen und Eigenschaften des Datenerfassungssystems MECDAS¹, die in dieser Zeit entwickelt wurden, werden in diesem Kapitel zusammengefaßt. Sie bilden auch heute noch die Basis des Datenerfassungssystems. Es wurde erstmals 1988 mit einem VMEbus-System in Verbindung mit CAMAC und FASTBUS [Kund-88] am Elektronenbeschleuniger MAMI eingesetzt.

Den Abschluß dieses Kapitels bildet eine kurze Zusammenfassung der Erweiterungen der gegenwärtigen Version des Datenerfassungssystems.

4.1 Grundlagen und Anforderungen

Bei kernphysikalischen Experimenten fallen in kurzer Zeit sehr große Datenmengen an. Zu ihrer Erfassung und weiteren Verarbeitung werden leistungsfähige Rechner mit direkter Schnittstelle zur Meßelektronik benötigt. Sie müssen schnell und flexibel auf externe Ereignisse reagieren und die Ereignisdaten aufnehmen. Die Speicherung der Daten kann auf magnetischen oder optischen Medien erfolgen.

Die Entwicklung leistungsfähiger Mikroprozessoren bietet die Möglichkeit, die Datenerfassung von einem zentralen Prozeßrechner auf dezentrale VMEbus-Rechner zu verlagern. Die ausgesuchten VMEbus-Rechner besitzen UNIX bzw. UNIX-ähnliche Betriebssysteme. Da das Datenerfassungssystem auf äußere Ereignisse in Echtzeit reagieren muß, wurde das Betriebssystem OS9 mit der Programmiersprache C und einigen Assemblererweiterungen verwendet.

¹Mainz Experiment Control and Data Acquisition System

4.2 Konzepte und Eigenschaften

Die Echtzeitverarbeitung unter OS9 erfolgt durch die Erstellung von speziellen Datenerfassungstreibern, die in das Betriebssystem eingebunden werden. Sie bestehen aus zwei Teilen, die asynchron voneinander eine gemeinsame Aufgabe bearbeiten. Die Interrupt-Service-Routine sorgt für die schnelle Reaktion auf externe Ereignisse mit kurzen Antwortzeiten ($\sim 200\mu s$ für eine 68020 CPU) und steuert die komplette Datenerfassung. Sie übernimmt das Einlesen der Meßdaten, die Pufferung der Daten in größeren Blöcken zur effizienten Weiterverarbeitung und die Experimentverriegelung. Der eigentliche Treiberteil reagiert synchron auf Anfragen von Anwenderprozessen und liefert die zu großen Puffer gepackten Experimentdaten der Datenarchivierung und der Onlineanalyse. Die Interruptreaktionszeit kann durch Verlagerung der Interrupt-Service-Routine auf eine eigene VMEbus-CPU ohne Betriebssystem auf unter $20\mu s$ reduziert werden. Die Ausführungszeit der Routine geht direkt in die Totzeit des Experimentes ein. Daher muß eine eventuell notwendige Kompression und Kodierung der Daten asynchron zur Datenerfassung auf Anwenderebene durchgeführt werden. Der Transport der Daten erfolgt über das Ethernet-Netzwerk oder über spezielle optische Verbindungen zum *event-builder*.

Ein wesentlicher Teil des Datenerfassungssystems beruht auf der entwickelten Experimentbeschreibung. Sie erlaubt die automatisierte Erzeugung der Datenerfassungsprogramme und die Kodierung der Experimentdaten in ein einheitliches Format. Für komplexe Spezialanwendungen besteht die Möglichkeit, optimierte Routinen in das System einzubinden. Die Experimentkonfiguration wird zusätzlich zu den Meßdaten gespeichert und steht in der späteren Analyse zur Verfügung.

Die Grundlage des Datenerfassungssystems bilden die verwendeten Strukturen und Algorithmen zur Datenkodierung und zum Datentransport. Das Datenformat basiert analog zur Experimentsteuerung auf der hierarchischen Struktur der Spektrometeranlage. Sie erlaubt die eindeutige und effiziente Adressierung einzelner Elemente und Substrukturen der Experimentkonfiguration in schwach gefüllten Ereignissen (z. B. wenn nur wenige der ca. 500 Drähte einer Driftkammer angesprochen haben), wie sie für die Spektrometeranlage typisch sind. Ein besonderes Augenmerk muß hierbei auf die Netzwerkkodierung der Daten zur Interaktion von Rechnern mit unterschiedlicher Architektur und Speicherorganisation gerichtet werden. Die Kodierung und Dekodierung der Daten erfolgt automatisch auf der Basis der Experimentkonfiguration.

4.3 Anwendungen

Das Datenerfassungssystem wurde erstmals bei Experimenten mit energiemarkierten Photonen am Beschleuniger MAMI A eingesetzt. Aufbauend auf guten Erfahrungen wurde das System ständig erweitert und verbessert. Bei den ersten Detektortests an der neuen Beschleunigerstufe MAMI B wurden die existierenden Analysepakete CAROLA [Klei-87] und GOOSY² [Esse-88] an das Datener-

²GSI online offline system

fassungssystem angepaßt. Die Kommunikation der Analyseprogramme auf den VAX/VMS-Rechnern mit den Datenerfassungsrechnern erfolgte anfangs über Ethernet ohne zusätzliches Softwareprotokoll. Der Verzicht war notwendig, da für die OS9-VMEbus-Rechner keine Implementation des TCP/IP³-Protokolls verfügbar war. Auch das zeitweilig verwendete Protokoll OS9-Net besaß keine Mechanismen zur Sicherung des Datentransports. Daher wurde der Übergang auf eine Lösung mit zwei VMEbus-CPU's, UNIX-*frontend* (einschließlich TCP/IP) und Echtzeit-CPU ohne Betriebssystem realisiert.

4.4 Stand und Ausblick

Das Datenerfassungssystem ist kontinuierlich entwickelt worden und hat die erfolgreiche Durchführung größerer Dreifachkoinzidenzexperimente ermöglicht. Die weitere Verwendung von älteren Hardware- und Softwarestrukturen macht gegenwärtig die Anpassung der Datenerfassung an neue Experimente aufwendig und schwierig. Der konsequente Übergang zu einer objektorientierten Modellierung der Datenerfassung könnte die Hardwareabhängigkeit reduzieren und die Komplexität für den Anwender deutlich verringern. Gleichzeitig könnte die Effizienz der Datenverarbeitung durch spezielle Methoden für zeitkritische Applikationen weiter gesteigert werden.

³transport control protocol / internet protocol

Kapitel 5

Messung von $^{12}\text{C}(e, e'x)$ mit der BGO–Kristallkugel

5.1 Physikalische Motivation

In den letzten Jahren sind verschiedene Messungen von $^{12}\text{C}(e, e'p)$ am MIT in Bates [Lour-86, Bagh-89, Wein-90] und am NIKHEF [Zond-92, Kest-95] durchgeführt worden. Sie zeigen erste Hinweise auf die korrelierte Emission mehrerer Nukleonen. Aufgrund der beschränkten apparativen Voraussetzungen konnten jedoch nur Teilaspekte untersucht werden. Daher ist Ende 1992 mit der Spektrometeranlage und einer BGO–Kristallkugel mit der Vermessung der Multihadron–Endzustände von $e^- \rightarrow ^{12}\text{C}$ an MAMI begonnen worden. Das Magnetspektrometer A dient zum Nachweis des gestreuten Elektrons, der BGO–Detektor zur koinzidenten Vermessung der entstehenden hadronischen Reaktionsprodukte in einem sehr großen Teil des geometrischen Phasenraums (annähernd 4π). Die Messungen sind gleichzeitig als Übersichtsexperiment für künftige Messungen mit drei Magnetspektrometern geplant. Zusätzlich sollen die Experimente mit der BGO–Kristallkugel die Entwicklung und Verbesserung der Methoden zur Messung der Strahlparameter bei kleinen Energien vorantreiben.

In einer ersten Strahlzeit sind Daten für drei Strahlenergien (495 MeV, 705 MeV, 855 MeV) bei verschiedenen Impulsüberträgen aufgenommen worden. In einer zweiten Strahlzeit sind bei 705 MeV Strahlenergie zusätzliche Bereiche des Energieübertrages vermessen worden, sodaß nun der komplette Bereich des Energieübertrages von 50 MeV - 500 MeV gemessen worden ist. Besonderer Wert ist auf den kinematischen Bereich des quasielastischen Peaks, der Dip–Region und der Δ –Resonanz gelegt worden; hier ist weitere Statistik zur Analyse der Hadronenwinkelverteilung in der BGO–Kristallkugel gesammelt worden.

Aus heutiger Sicht beruht der quasielastische Peak auf der Ein–Nukleon–Emission ohne resonanten Zwischenzustand. Sein Maximum liegt etwa bei einem Energieübertrag von $\omega = -q^2/2m$. Dies beruht auf der Annahme, daß der Kern aus wechselwirkungsfreien Teilchen besteht, die sich in Ruhe befinden. Betrachtet man das Nukleon sowohl im Anfangs– als auch im Endzustand auf der Massenschale ($p^2 = m^2$), so läßt sich die Energie–Impulsbilanz für den quasifreien „knock–out“ eines Nukleons aus dem Kern herleiten. Dies zeigt, daß das Schalenmodell mit unabhängigen Teilchen für diesen Bereich sehr gut geeignet ist. Für den Streuvorgang bedeutet dies, daß das virtuelle Photon an einem einzelnen Nukleon ankoppelt und seinen Impuls und seine Energie überträgt. Berücksichtigt man die Fermi–Bewegung der Nukleonen im Kern, so läßt sich auch die Breite des Peaks erklären. Für höhere Energieüberträge ($\omega > m_\pi$) ist es möglich, reelle Pionen entweder durch Streuung am Nukleon oder aus dem Zerfall der Δ –Resonanz

zu erzeugen. Beide Produktionsmechanismen ergeben eine breite Verteilung. Den Bereich des Energieübertrages zwischen dem quasielastischen Peak und der Δ -Resonanz, der in den einfachsten Modellen der Überlappung der beiden Verteilungen zugeschrieben wird, nennt man die Dip-Region. In komplexeren Modellen wird der Wirkungsquerschnitt in der Dip-Region durch die gleichzeitige Emission mehrerer Nukleonen erklärt.

Im folgenden werden die ersten Resultate der zweiten Strahlzeit am ^{12}C vorgestellt. Besonderer Wert wird auf die Untersuchung der Ein-Nukleon-Emission im quasielastischen Bereich gelegt. Hier wird das oben beschriebene einfache Modell mit den Messungen des vollen geometrischen Phasenraums verglichen und analysiert. Zusätzlich wird der gesamte Energieübertragungsbereich in mehreren Schritten zwischen 50 MeV und 500 MeV auf Einzel- bzw. Mehrfach-Emission von geladenen Hadronen untersucht. Eine detaillierte Analyse der gesamten Messungen wird in einer Arbeit, die sich ausschließlich mit dem BGO-Detektor beschäftigt [Edel-96], durchgeführt. Die vorliegende Arbeit ist stärker auf den Aufbau der Detektorelektronik und die Einbindung in das Experimentsteuersystem der Spektrometeranlage ausgerichtet. Zu Beginn dieses Kapitels folgt eine kurze Einführung in den Formalismus der $(e, e'p)$ -Streuung. Im Abschnitt 5.1.1 werden die kinematischen Variablen des Streuvorgangs dargestellt. Darauf aufbauend beschreibt Abschnitt 5.1.2 den zugehörigen Wirkungsquerschnitt.

5.1.1 Kinematik

Der Ausdruck $A(e, e'p)$ beschreibt die Streuung eines Elektrons an einem Kern, der aus A -Nukleonen besteht, bei der ein Proton aus dem Kern ausgeschleudert wird. Über den Zustand des verbleibenden Systems aus $(A - 1)$ -Nukleonen wird dabei keine Aussage gemacht. Das Diagramm in Abbildung 5.1 stellt den Vorgang in 1. Bornscher Näherung (Austausch eines virtuellen Photons) dar. Alle ein- und auslaufenden Teilchen werden durch ihre Viererimpulse charakterisiert.

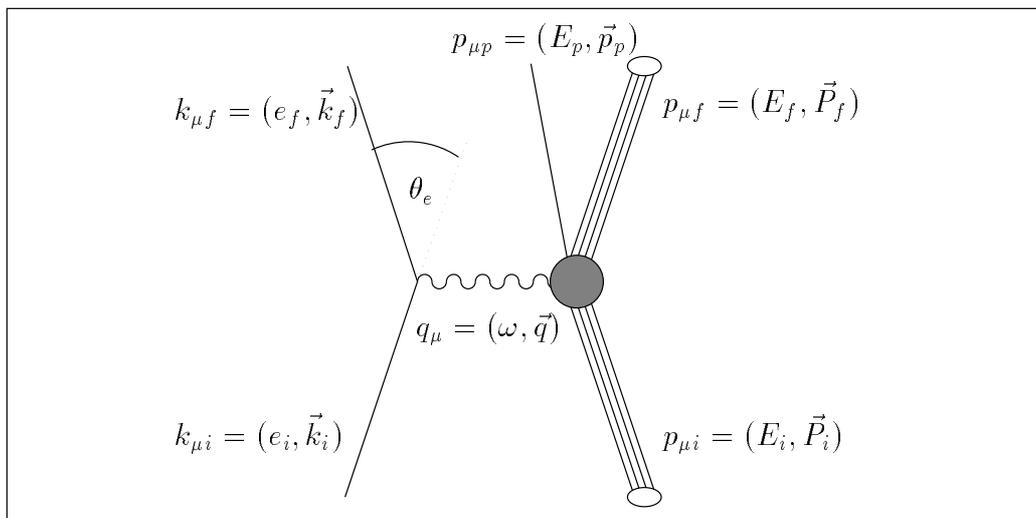


Abb. 5.1: Kinematik der Reaktion $A(e, e'p)$ in der Streuebene

Das einlaufende Elektron hat die Energie e_i und den Impuls \vec{k}_i , das auslaufende Elektron die Energie e_f und den Impuls \vec{k}_f . Die Differenz $e_i - e_f$ ist der Energieübertrag ω und die Differenz $\vec{k}_i - \vec{k}_f$ der Impulsübertrag \vec{q} auf den Kern. Zusammen bilden Energie- und Impulsübertrag den Viererimpuls (ω, \vec{q}) des mit dem Kern ausgetauschten virtuellen Photons. Ruht der Kern vor der Reaktion, so kann sein Viererimpuls (E_i, \vec{P}_i) im Laborsystem als $(M_i, 0)$ geschrieben werden, wobei M_i die Ruhemasse des Kerns ist. Energie und Impuls des Restsystems und des herausgeschlagenen Protons werden durch die Viererimpulse (E_f, \vec{P}_f) und (E_p, \vec{p}_p) beschrieben. Mit Hilfe der kinetischen Energien T_f des Restsystems und T_p des Protons läßt sich die *missing energy* definieren:

$$E_m = \omega - T_f - T_p \quad , \quad (5.1)$$

d.h. E_m ist die Differenz zwischen der übertragenen Energie und der Summe der kinetischen Energien von Restsystem und herausgeschlagenem Proton. E_m besteht aus der Separationsenergie des Protons und einer möglichen Anregungsenergie des Restkerns, die auch im Kontinuum liegen kann. Der Dreierimpuls

$$\vec{p}_m = \vec{q} - \vec{p} = \vec{P}_f \quad (5.2)$$

wird *missing momentum* genannt. In der PWIA (*plane wave impulse approximation*) wird die Endzustandswechselwirkung des auslaufenden Protons mit dem Restsystem vernachlässigt. Dann ist \vec{p}_m mit dem negativen Impuls des Protons vor dem Stoß identisch. Eine exaktere Beschreibung des Streuvorgangs bietet die DWIA (*distorted wave impulse approximation*). Hier wird die Wechselwirkung des auslaufenden Protons mit dem Restkern berücksichtigt. Die komplette Beschreibung der $(e, e'p)$ -Reaktion einschließlich der Verzerrung der Elektronenwellenfunktion im Coulomb-Potential des Kerns ermöglicht die CDWBA (*complete distorted wave born approximation*). In Abbildung 5.2 ist die Kinematik eines $(e, e'p)$ -Experimentes dargestellt. Der Elektronenstreuwinkel θ_e ist der Winkel zwischen \vec{k}_i und \vec{k}_f . Die Richtung des Protonimpulses \vec{p}_p wird mit Hilfe der Winkel θ_{pq} und ϕ_p beschrieben. Dabei ist θ_{pq} der Winkel zwischen \vec{p}_p und dem Impulsübertrag \vec{q} . ϕ_p bezeichnet den Winkel zwischen der von \vec{k}_i und \vec{k}_f aufgespannten Streuebene und der von \vec{p}_p und \vec{q} aufgespannten Reaktionsebene. Fallen beide Ebenen nicht zusammen, d.h. $\phi_p \neq 0$ und $\phi_p \neq \pi$, so spricht man von einer *out-of-plane*-Kinematik. Als *parallele* Kinematik wird der Spezialfall bezeichnet, in dem \vec{p}_p parallel zu \vec{q} ($\theta_{pq} = 0$) ist.

5.1.2 Koinzidenzwirkungsquerschnitt

Der differentielle Wirkungsquerschnitt der $(e, e'p)$ -Reaktion kann in der PWIA in folgender Form geschrieben werden:

$$\frac{d^6 \sigma}{d\Omega_e d|\vec{k}_f| d\Omega_p d|\vec{p}_p|} = k \sigma_M (v_L W_L + v_T W_T + v_{LT} W_{LT} \cos \phi_p + v_{TT} W_{TT} \cos 2\phi_p) \quad . \quad (5.3)$$

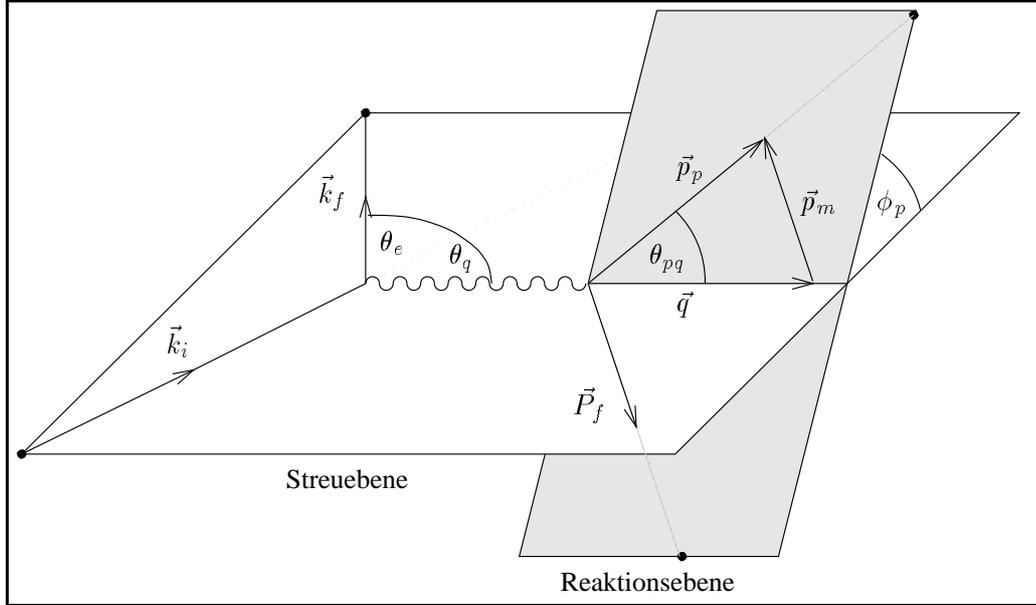


Abb. 5.2: Kinematik der $(e, e'p)$ -Reaktion. Die Dreier-Vektoren \vec{k}_i und \vec{k}_f spannen die Streuebene auf, die Vektoren \vec{p}_p und \vec{q} die Reaktionsebene

Dabei ist σ_M der Wirkungsquerschnitt für Elektronenstreuung an der Punktladung e .

$$\sigma_M = \left(\frac{\alpha \cos \frac{\theta_e}{2}}{2e_i \sin^2 \frac{\theta_e}{2}} \right)^2 \quad (5.4)$$

α ist die Feinstrukturkonstante ($\alpha \approx \frac{1}{137}$). Der Vorfaktor k steht für:

$$k = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{m_p |\vec{p}|^2}{E_p}. \quad (5.5)$$

Die Vorfaktoren der vier Summanden werden als *Lepton-Funktionen* bezeichnet und lassen sich allein aus den kinematischen Größen für das Elektron bestimmen:

$$\begin{aligned} v_L &= \left(\frac{Q^2}{\vec{q}^2} \right)^2, \\ v_T &= \frac{1}{2} \left(\frac{Q^2}{\vec{q}^2} \right) + \tan^2 \frac{\theta_e}{2}, \\ v_{LT} &= \left(\frac{Q^2}{\vec{q}^2} \right) \sqrt{\frac{Q^2}{\vec{q}^2} + \tan^2 \frac{\theta_e}{2}}, \\ v_{TT} &= \frac{1}{2} \left(\frac{Q^2}{\vec{q}^2} \right), \end{aligned} \quad (5.6)$$

mit $Q^2 = -q^2 = |\vec{q}|^2 - \omega^2$. Die gesuchten physikalischen Informationen über den Atomkern sind in den *Strukturfunktionen* W_L , W_T , W_{LT} und W_{TT} enthalten. Die Indizes geben die Komponenten des Kernübergangstroms an, die mit der jeweiligen Strukturfunktion verknüpft sind. T bedeutet transversal und L longitudinal

zur Richtung von \vec{q} . Die Strukturfunktionen sind abhängig von den Koordinaten

$$(|\vec{q}|, \omega, \theta_{pq}, E_m) , \quad (5.7)$$

und nicht von ϕ_p, e_i oder θ_e wie der Wirkungsquerschnitt. Daher können durch Messung der Wirkungsquerschnitte bei verschiedenen Kinematiken mit konstant gehaltenen Koordinaten (5.7) die Strukturfunktionen separiert werden.

5.2 Experimentaufbau

Der Aufbau des BGO-Experimentes besteht aus zwei Komponenten:

- dem QSDD-Spektrometer mit einer Raumwinkel-Akzeptanz von 28 msr und einer Impuls-Akzeptanz von 20% zum Nachweis der gestreuten Elektronen
- der BGO-Kristallkugel [Morr-92] mit einer Raumwinkel-Akzeptanz von 85% des vollen Raumwinkels zur Vermessung der hadronischen Reaktionsprodukte

5.2.1 Target

Die Abbildung 5.3 zeigt die Anordnung der einzelnen Detektorsysteme. Von links kommend trifft der Elektronenstrahl im Zentrum des BGO-Detektors auf ein Kohlenstofftarget. Der Primärstrahl wird nach der Wechselwirkung mit dem Target nach rechts zum Strahlfänger abgeleitet. Das Target befindet sich innerhalb eines Aluminiumrohres mit 2 mm Wandstärke, das gleichzeitig als Targetkammer und Strahlführungsrohr fungiert. Der auf das 10 mg/cm^2 Kohlenstofftarget einfallende, monoenergetische Elektronenstrahl besitzt eine Energie von 705 MeV. Der

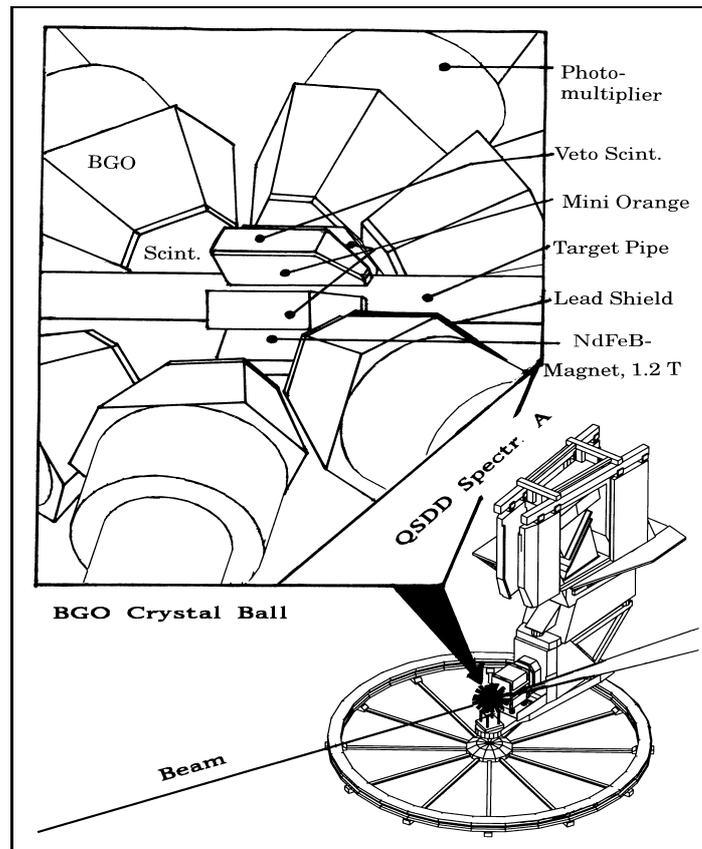


Abb. 5.3: Experimentaufbau mit Magnetspektrometer A und BGO-Kristallkugel

Strahlstrom betrug im Durchschnitt ca. 30 nA. Dies führt zu einer mittleren Luminosität¹ von $1.25 \cdot 10^{32}$ Nukleonen/cm²/sec. Da die BGO-Detektoren nur 6 cm vom Target entfernt angeordnet sind, ist es notwendig, die Detektoren in Strahlrichtung gegen Untergrundreaktionen und deren Reaktionsprodukte zu schützen. Der wesentliche Beitrag zum Untergrund besteht aus Møller-Elektronen. Sie entstehen durch Streuung der einlaufenden Elektronen an den Hüllenelektronen des Targetmaterials. Die vorderen Detektoren werden durch ein in Richtung des auslaufenden Elektronenstrahls fokussierendes Magnetfeld vor den Møller-Elektronen geschützt. Die Konstruktion ist durch Simulationen [Edel-96] mit dem GEANT-Programmpaket optimiert worden. Sie besteht aus sechs NdFeB-Permanentmagneten, die außen auf das Aluminiumstrahlrohr aufgeklebt worden sind. Die einzelnen Magnete haben die Form von Orangenstücken (Abb. 5.3) und erzeugen innerhalb der Targetanordnung ein Magnetfeld von $B = 0.6$ T. Die Simulationsrechnungen zeigen eine Reduktion der Untergrundrate in den vorderen Detektoren um den Faktor 20. Auf den Außenseiten der Magnete sind Plastikszintillatoren angebracht. Sie erzeugen ein Vetosignal für jedes geladene Teilchen, das den Magneten durchquert hat. Hierdurch kann wirksam eine Fehlinterpretation der BGO-Detektorsignale vermieden werden. Die Magnete reduzieren andererseits den Phasenraum der auslaufenden Hadronen in der vorderen Hemisphäre um 50%. Dies wird jedoch durch die höheren Luminositäten mehr als kompensiert.

Zur weiteren Reduktion des niederenergetischen Untergrundes sind die inneren BGO-Kristalle gegen die Strahlführung durch Bleiplatten abgeschirmt worden.

5.2.2 Elektronenspektrometer

Die Abbildung 5.4 zeigt das Magnetspektrometer A mit seinen Detektorsystemen. Sie bestehen vor allem aus zwei Doppeldriftkammern, die zusammen mit den zeitdefinierenden Triggerdetektoren Durchstoßort und -winkel der geladenen Teilchen durch die Bildebene bestimmen. Aus dieser Information kann der Impuls sowie der horizontale und vertikale Streuwinkel der einfallenden Teilchen berechnet werden. Eine zusätzliche Aufgabe der Triggerdetektoren ist die Teilchenidentifikation. Die Triggerdetektoren sind ebenfalls in zwei Ebenen aufgeteilt. Die erste Ebene dient der Messung des Energieverlustes, die zweite der Messung des Durchgangszeitpunktes (Flugzeitmessung). Beide Ebenen sind in dispersiver Richtung 15-fach segmentiert. Das Szintillationslicht wird an beiden Seiten eines Segmentes von je einem Photomultiplier aufgenommen und verstärkt. Jedes Spektrometer besitzt zusätzlich einen Gas-Tscherenkow-Detektor zur Identifikation von Elektronen. Durch die hohe Nachweiswahrscheinlichkeit des Tscherenkow-Detektors von über 99% für Elektronen/Positronen ist es sogar möglich, ihn im Vetobetrieb zur Identifikation geladener Pionen zu verwenden. Schwerere Teilchen können bereits durch ihren spezifischen Energieverlust in den Plastikszintillatoren des Spektrometers unterschieden werden.

¹Dieser Begriff ist zuerst im Falle der Kollision von Teilchenstrahlen geprägt worden und wird zunehmend auch in der Physik der Elektronenstreuung mit festen Targets eingesetzt

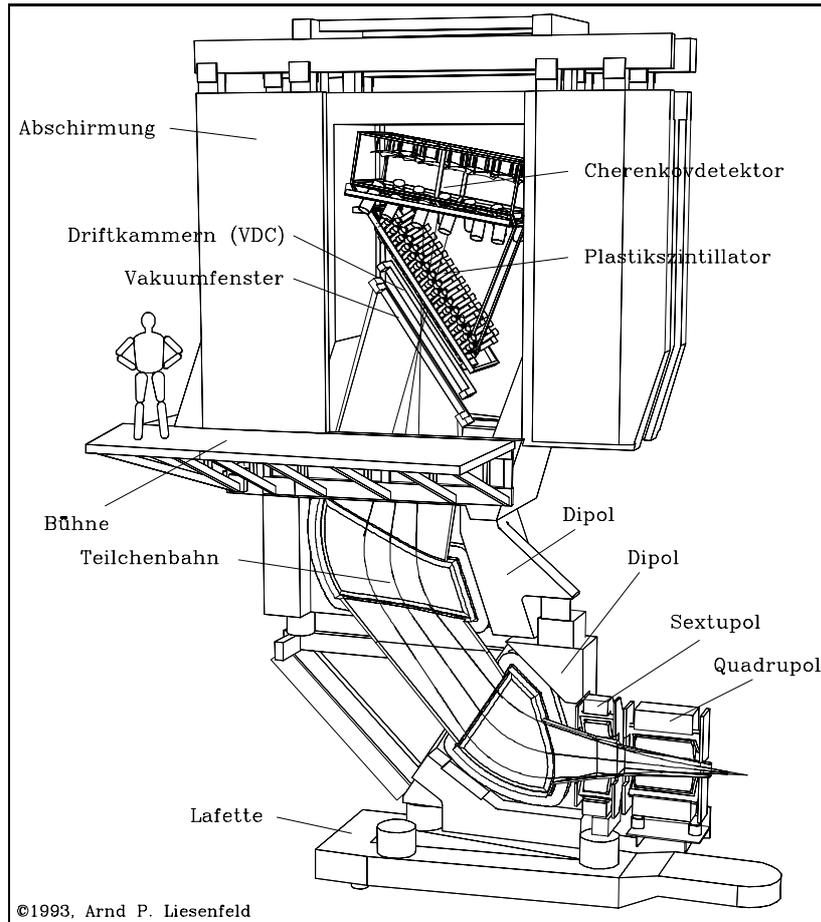


Abb. 5.4: Schnitt durch Spektrometer A, Seitenansicht [Lies-95]

5.2.3 BGO–Kristallkugel

Der komplette 4π -Detektor in Abbildung 5.5 besteht aus 32 einzelnen BGO-Kristallen. Die Strahlführung erfordert die Entfernung von je einem Detektorelement am vorderen und hinteren Ende der Kugel. Zusätzlich mußten ein bzw. zwei Kristalle im Akzeptanzbereich des Magnetspektrometers zur Messung der gestreuten Elektronen ausgespart werden. Abbildung 5.6 zeigt den Aufbau eines einzelnen Detektors. Er besteht aus zwei Komponenten: einem schnellen, 3 mm dicken Plastikszintillator (NE102A) zur Messung des Energieverlustes der geladenen Teilchen und zur Bestimmung des Reaktionszeitpunktes. Der zweite, größere Teil besteht aus einem Wismut–Germanium–Oxid–Kristall ($Bi_4Ge_3O_{12}$). Er besitzt aufgrund seiner hohen Dichte von $7,13 \text{ g/cm}^3$ eine Strahlungslänge von 1,12 cm. Daher kann er trotz seiner geringen Länge von 5,6 cm Protonen mit einer kinetischen Energie bis zu 185 MeV stoppen. Über den differentiellen Energieverlust im Plastikszintillator und die Energiedeposition im BGO-Kristall lassen sich Protonen und Deuteronen im Energiebereich von 25 MeV bis 400 MeV sowie Pionen und neutrale Teilchen nachweisen. Die Effizienz des Neutronennachweises steigt von 1% bei 70 MeV bis auf 20% für Energien größer als 150 MeV an. Die Effizienz des Photonennachweises ist hoch ($> 95\%$ für Photonen über 15 MeV [Korn-88]). Eine Trennung von Photonen und Neutronen ist über die

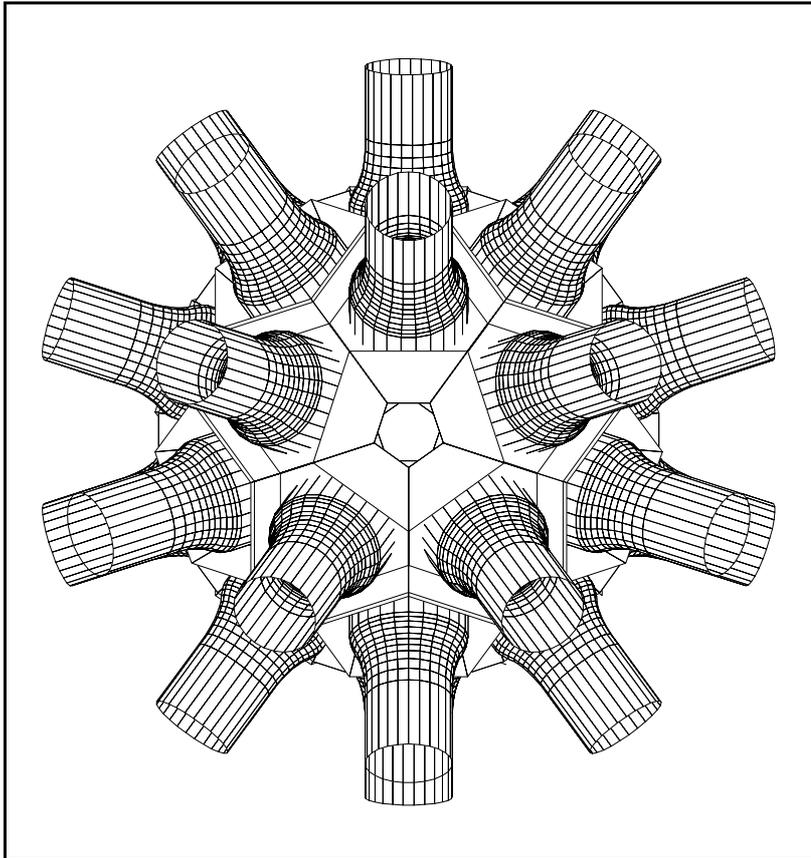


Abb. 5.5:
Aufbau des BGO-
Detektors einschließlich der zugehörigen Photomultiplier

Flugzeit nicht möglich. Geladene Pionen lassen sich wegen ihrer gering ausgeprägten Signatur nur sehr schwer vom Untergrund separieren. Sie werden bereits bei kinetischen Energien von 80 MeV nicht mehr vollständig innerhalb des BGO-Kristalls gestoppt und hinterlassen in der Plastikszintillatorkomponente ein nahezu energieunabhängiges Signal. Die Energieauflösung betrug aufgrund der hohen Zählratenbelastung der Detektoren (maximal 180 kHz), für Protonen und Deuteronen mit kinetischen Energien zwischen 100 MeV und 185 MeV nur etwa 6%. Ab 185 MeV verschlechtert sich die Energieauflösung für Protonen, da sie nicht mehr ihre gesamte Energie im Kristall deponieren können. Das Ausgangssignal der Plastik-BGO-Phoswich-Detektoren besteht aus zwei Komponenten. Das erste, schnelle Signal mit einer Länge von $\tau \sim 2.7 \text{ ns}$ wird beim Durchtritt von geladenen Teilchen durch den Plastikszintillator erzeugt. Das zweite, langsamere Signal ($\tau \sim 350 \text{ ns}$) entsteht durch den Energieverlust der einfallenden Teilchen im BGO-Kristall. Beide Signalkomponenten werden über eine gemeinsame Photokathode mit anschließendem 3" Photomultiplier verstärkt und anschließend in drei verschiedenen Analog-Digital-Umsetzern vermessen. Das schnelle Plastiksignal und die Anstiegsflanke des langsameren BGO-Signals werden über einen Zeitraum von 85 ns integriert und bilden die sogenannte kurze Komponente. Der relativ lange Integrationszeitraum ist aufgrund der zeitlichen Schwankungen zwischen den BGO-Detektoren, dem Spektrometer und dem Lasersignal notwendig. Das gesamte BGO-Signal wird über einen Zeitraum von 580 ns akkumuliert. Die Detektorsignale unterscheiden sich lediglich in der Anstiegszeit der Signale durch die unterschiedlichen Szintillatormaterialien. Abbildung 5.7 zeigt die

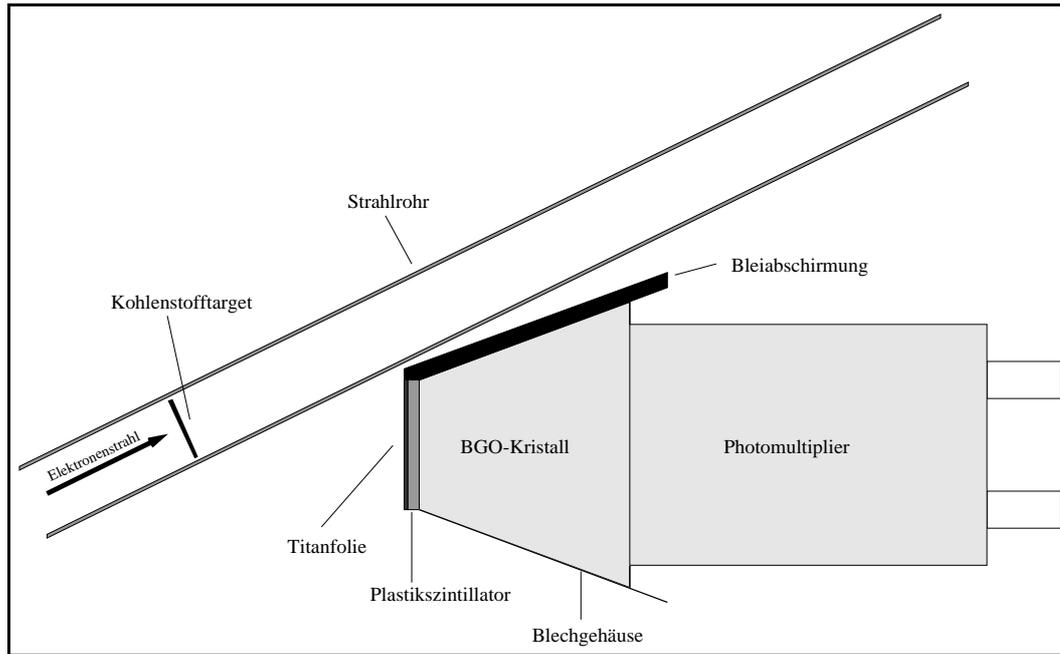


Abb. 5.6: Aufbau eines Plastik-BGO-Phoswich-Detektors und Position eines Vorwärtsdetektors relativ zum Target

zeitliche Korrelation der Analog-Digital-Umsetzer zueinander. Der dritte ADC-Kanal mit einem Zeitfenster von $2.7 \mu s$ ermöglicht die Erkennung von zeitlich dicht zusammenfallenden Mehrfachtreffern in einem einzelnen BGO-Kristall. Die Kenntnis von Mehrfachtreffern ist bei höheren Luminositäten wegen der langen Abklingzeit der BGO-Komponente notwendig (pile up).

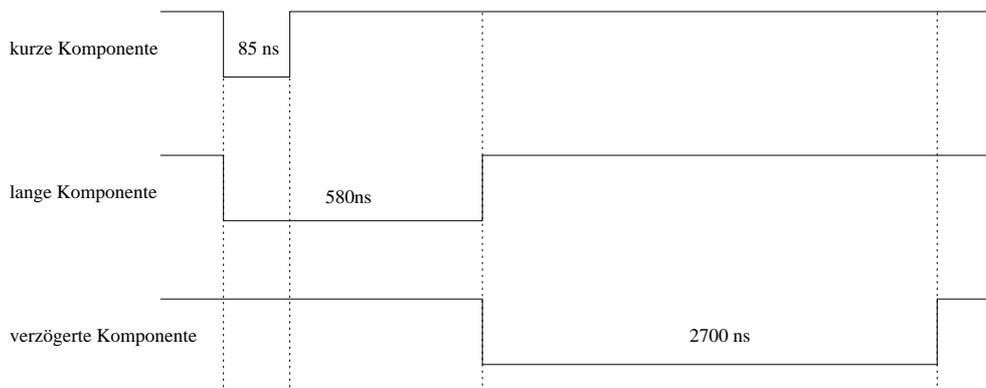


Abb. 5.7: Integrationszeitpunkt und -dauer der verschiedenen Signalkomponenten der BGO-Kristalle

5.2.4 Meßelektronik und Datenerfassung

Die Abbildung 5.8 zeigt den Aufbau der verwendeten Meßelektronik. Die Anordnung war durch die hohe Anzahl von Kanälen sehr aufwendig. Die logische

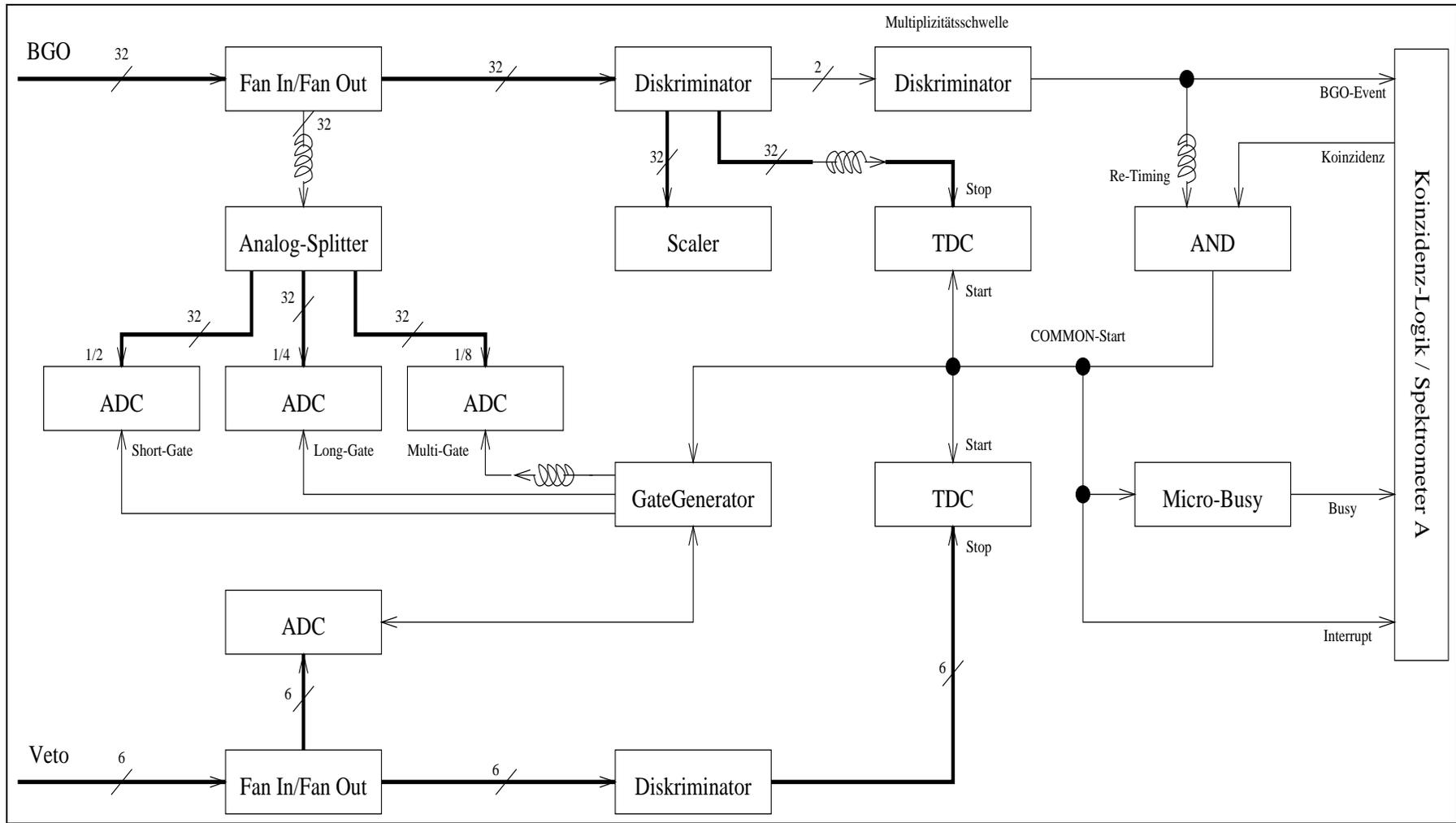


Abb. 5.8: Meßelektronik der BGO-Kristallkugel
74

Struktur bleibt durch die klare Gliederung überschaubar. Jedes der 30 Detektorsignale wird verdoppelt² und in je einen Zweig mit Energie- und Zeitinformationen aufgespalten.

Die Zeitinformation wird durch 30 schnelle LE-Diskriminatorskanäle³ gewonnen. Diese im Vergleich zu Constant-Fraction-Diskriminatoren relativ einfachen Diskriminatoren reichen aus, da die Zeitinformation für geladene Teilchen von der Plastikkomponente der Phoswich-Detektoren stammt und eine sehr hohe Anstiegsgeschwindigkeit besitzt. Zudem wird für jeden einzelnen Kanal die Energieinformation aufgezeichnet, sodaß der amplitudenabhängige Triggerzeitpunkt nachträglich korrigiert werden kann. Aufgrund der hohen Zählraten im BGO wird der Startimpuls der TDCs⁴ aus der Koinzidenz mit dem Magnetspektrometer erzeugt⁵. Dies hat jedoch den Nachteil, daß alle 30 Zeitsignale verzögert werden müssen, damit sie sicher nach dem Start eintreffen. Wegen der komplexen Koinzidenzelektronik, der großen Entfernung des BGOs von der Spektrometerelektronik und der starken zeitlichen Schwankung der BGO-Detektorsignale ist eine Verzögerung von über 300 ns für jeden der 30 Kanäle erforderlich. Zur Vermeidung weiterer zeitlicher Schwankungen durch aktive Einheiten erfolgt die Verzögerung passiv mittels paarweise verdrehtem, 32-adrigem Flachbandkabel. Die Diskriminatoren werden gleichzeitig zur Erfassung der freien Rate der Einzel-detektoren in Zählern⁶ verwendet. Jedes Diskriminatorsmodul besitzt zusätzlich einen Summenausgang, der für jeden der bis zu 16 angesprochenen Kanäle einen Gleichspannungspegel von 50 mV erzeugt. Die Summe aller Pegel wird auf einen weiteren Diskriminator geleitet. Über die Einstellung dieser Multiplizitätsschwelle ist es möglich, das Triggersignal entsprechend der Anzahl der angesprochenen Detektoren im BGO zu wählen. Dieses Signal ist das sogenannte *BGO-Event* und besitzt mit der gewählten Einstellung der Multiplizitätsschwelle das Zeitverhalten des ersten angesprochenen BGO-Detektors. Dieser Puls wird zur Koinzidenzelektronik auf das Spektrometer übertragen und mit dem Signal der dortigen Triggerdetektoren verglichen. Im Falle einer Koinzidenz wird das Zeitverhalten des Ausgangssignals vom Triggerzeitpunkt des Spektrometers bestimmt. Anschließend wird das Koinzidenzsignal zur BGO-Elektronik zurückgeführt und mit dem Zeitverhalten des schnellsten BGO-Detektors überlagert⁷. Diese feste Kopplung der Zeitfenster der ADCs mit den analogen Eingangsimpulsen der BGO-Detektoren ist notwendig, damit die in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Entkopplung der Detektorkomponenten durchgeführt werden kann. Eine ausführliche Darstellung der Trigger- und Koinzidenzlogik des Magnetspektrometers findet sich bei [Rich-95]. Auch die Energieinformation wird passiv⁸ verzögert und anschließend durch einen Splitter im Verhältnis 4 : 2 : 1 aufgeteilt und drei verschiedenen ADC-Gruppen zugeleitet. Das Teilungsverhältnis ist umgekehrt proportional zur Länge der Inte-

²Linear FanIn/FanOut

³leading edge discriminator, LeCroy4413, 16 Kanal, 150 MHz

⁴time to digital converter

⁵common start mode

⁶100 MHz KPH-Eigenbau

⁷retiming

⁸RG 58 Kabel

grationszeit der FERAs⁹ gewählt. Hierdurch wird die zu integrierende Ladungsmenge an den Konversionsbereich der Analog-Digital-Umsetzer angepaßt.

Zur Vermeidung von Ereignisverlusten sind die sechs Vetodetektoren hinter der Permanentmagnetanordnung nicht direkt im Trigger. Ihre Daten werden jedoch bei jedem Ereignis aufgenommen und stehen in der Analyse zur Verfügung. Jedes Ereignis enthält Informationen über die Energiedeposition in jedem einzelnen Vetodetektor sowie die Zeitinformation der Vetodetektoren relativ zur BGO-Kristallkugel.

Das in Kapitel 4 beschriebene Datenerfassungssystem ist in zwei Stufen an die Anforderungen des BGO-Experimentes angepaßt worden. Für die ersten Messungen Ende 1992 wurde die Datenerfassung mit einem einzigen VMEbus-System ausgelesen. Die beiden CAMAC-Überrahmen der BGO-Elektronik wurden über ein 25 Meter langes Spezialekabel mit der Spektrometerelektronik verbunden. Der Vorteil dieser Anordnung lag im einfachen und sicheren Aufbau, da auf ein externes Programm zur Rekonstruktion der Ereignisse (Eventbuilder) verzichtet werden konnte. Der Nachteil war die daraus resultierende, geringe Datenerfassungsgeschwindigkeit.

Daher wurde für die zweite Meßperiode der Aufbau modifiziert. Die Detektorgruppen von Spektrometer und BGO wurden nun durch eigene VMEbus-Systeme parallel ausgelesen und in einem Eventbuilder zusammengefaßt. Das Programm befand sich auf einem Arbeitsplatzrechner und erhielt die Daten über das Ethernet-Netzwerk. Anschließend sortierte es sie nach Einzel- und Koinzidenzereignissen und speicherte sie zur späteren Analyse ab.

Die Einzelrate des Spektrometers wurde untersetzt, um die daraus resultierende Belastung für die Datenerfassung gering zu halten. Auf die Messung der Einzelrate im BGO (> 1.3 MHz) wurde komplett verzichtet.

Die große Zahl auszulesender ADC- und TDC-Kanäle des BGOs belastete die Datenerfassung ganz erheblich. Zur Reduzierung der Datenmenge wurde eine spezielle Eigenschaft der ADC-Module genutzt. Die FERAs erlauben die automatische, kanalweise Subtraktion von einstellbaren Schwellenwerten¹⁰. Diese wurden vor dem Experiment ohne Elektronenstrahl bestimmt und anschließend in den Speicher der FERA-Module geschrieben. Durch diese Maßnahme war es möglich, nur Daten von Detektoren aufzunehmen, die ein Signal von einem echten Ereignis registrierten. Um kleine Schwankungen der Schwellenwerte zu unterdrücken, wurde zusätzlich ein kleiner, konstanter Schwellenwert von allen Kanälen abgezogen. Hierdurch war es möglich, die Anzahl der ansprechenden Kanäle wesentlich zu verringern. In der Analyse der BGO-Daten wurden die zuviel abgezogenen Schwellenwerte dem Ausgangssignal wieder hinzugerechnet.

Auch die Zeitmessungen wurden mit Hilfe dieser ADCs realisiert. Hierzu wurden Zeitdifferenzsignale in speziellen Wandlern in Ladungssignale konvertiert. Da die Zeitmessung mit einem gemeinsamen Startsignal begann, haben alle Kanäle, die kein Stoppsignal erhielten, den maximalen Kanalinhalt (Überlauf) als Wert. In diesem Fall wurde die Eigenschaft der ADCs genutzt, übergelaufene Kanäle¹¹ automatisch zu unterdrücken.

⁹fast encoding and readout ADC vom Typ LeCroy4300B

¹⁰offset subtraction

¹¹overflow

Durch die Summe der beschriebenen Maßnahmen konnte die Anzahl der ausgelesenen ADC-Kanäle von 120 auf durchschnittlich 8 bis 12 Kanäle pro Ereignis reduziert werden. Da die Datenerfassung nur Werte mit einer Datenwortbreite von 16-Bit erfassen konnte, mußten alle 30 Zähler zur Messung der freien Rate der Einzeldetektoren bei jedem Ereignis ausgelesen werden.

5.2.5 Meßprogramm

In einer Strahlzeit von zwei Wochen wurde fast der gesamte Bereich des Energieübertrags von 50 MeV bis 500 MeV mit einer Strahlenergie von 705 MeV aufgenommen. Alle Messungen in Tabelle 5.1 wurden mit einem 10 mg/cm^2 Kohlenstofftarget durchgeführt. Dies hat sich als Kompromiß zwischen hoher Luminosität und geringer Untergrundbelastung herausgestellt. Im Experiment werden ω , Q , $|\vec{q}|$ und ϵ_T aus den Meßgrößen $|\vec{k}_i|$, $|\vec{k}_f|$ und θ_e berechnet:

$$|\vec{q}|^2 = |\vec{k}_i|^2 + |\vec{k}_f|^2 - 2|\vec{k}_i||\vec{k}_f|\cos\theta_e, \quad (5.8)$$

$$Q^2 = 4|\vec{k}_i||\vec{k}_f|\sin^2\frac{\theta_e}{2}, \quad (5.9)$$

$$(\epsilon_T)^{-1} = 1 + 2\left(\frac{|\vec{q}|^2}{Q^2}\right)\tan^2\left(\frac{\theta_e}{2}\right). \quad (5.10)$$

Schwerpunkt der Messungen in der zweiten Strahlzeit war die Untersuchung der Bereiche Dip (Kinematik 2) und Delta (Kinematik 4). Die anderen Kinematiken wurden zur Anbindung der Bereiche untereinander und zum Test der Randbereiche aufgenommen.

Nr.	$\omega(\text{MeV})$	$ \vec{q} (\text{MeV}/c)$	$Q^2(\text{GeV}/c)^2$	ϵ_T
1	[30, 161]	[409.3, 400.1]	[0.167, 0.134]	[0.838, 0.814]
2	[174, 277]	[401.4, 426.9]	[0.131, 0.106]	[0.809, 0.751]
3	[266, 351]	[423.0, 459.0]	[0.108, 0.087]	[0.760, 0.684]
4	[340, 411]	[453.5, 491.5]	[0.090, 0.072]	[0.695, 0.610]
5	[401, 460]	[485.5, 521.7]	[0.075, 0.060]	[0.624, 0.537]
6	[453, 501]	[516.9, 549.5]	[0.062, 0.050]	[0.549, 0.464]

Tab. 5.1: Kinematiken der 93-er BGO-Strahlzeiten. Die Strahlenergie \vec{k}_i betrug 705 MeV, der Spektrometerwinkel θ_e war 34.4° . ω bezeichnet den Energieübertrag, $|\vec{q}|$ den Betrag des Impulstransfers, Q^2 das negative Quadrat des Viererimpulsübertrags, ϵ_T die transversale Polarisierung des virtuellen Photons

5.3 Eichmessungen $H(e, e'p)$

5.3.1 Entkopplung der Plastik-BGO-Detektorspektren

Durch den speziellen Aufbau der Phoswich-Detektoren, d.h. die gleichzeitige Auslese des Plastik- und des BGO-Detektors über einen gemeinsamen Photomultiplier, enthält der ADC-Zweig mit der kurzen Integrationszeit (*fast gate*) auch

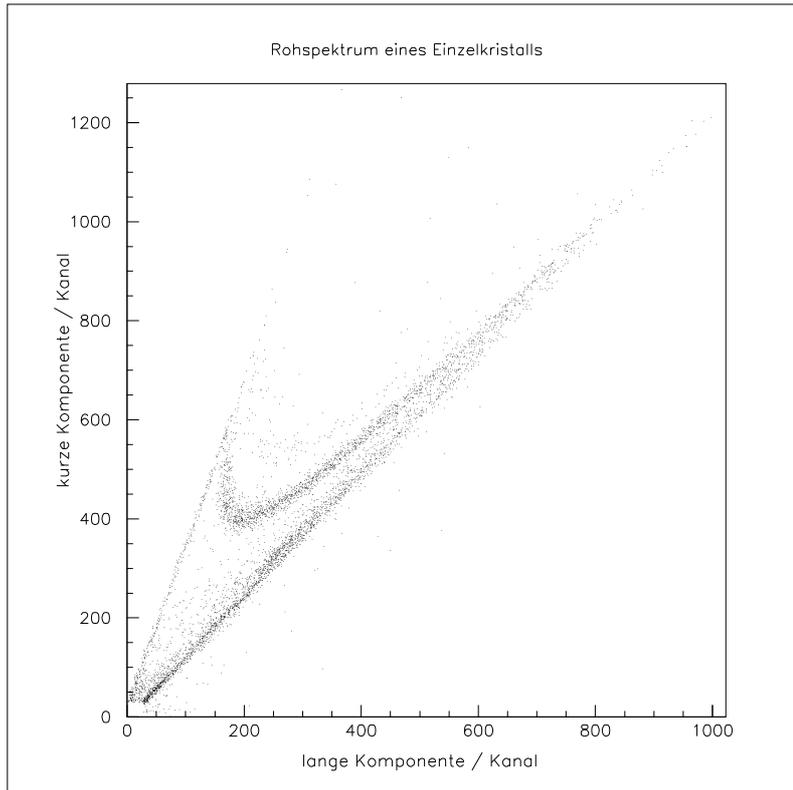


Abb. 5.9:
Rohspektrum ei-
nes Plastik-BGO-
Phoswich-Detektors

einen Teil der Information des langsamen ADC-Zweiges (*slow gate*) sowie umgekehrt. Um die beiden Komponenten zu trennen, muß das zweidimensionale Spektrum von *slow gate* gegen *fast gate* entkoppelt werden. Gesucht ist daher eine Transformation in ein Koordinatensystem, in welchem beide Signale unabhängig voneinander werden. Eine solche Transformation ist die Überführung des schiefwinkligen in ein orthogonales Koordinatensystem. Abbildung 5.9 zeigt ein Rohspektrum vor der Entkopplung der verschiedenen Signalkomponenten. Die untere Gerade zeigt Teilchen, die nur ein Signal im BGO-Kristall erzeugt haben. Dies sind neutrale Teilchen wie γ , n und π^0 , die im Plastikszintillator praktisch kein Signal hinterlassen. Dagegen wird die obere Gerade von Teilchen gebildet, die im Plastikszintillator gestoppt wurden und dadurch nur dort ein Signal hervorgerufen haben. Alle Teilchen auf beiden Linien deponieren jeweils nur in einem der Detektormaterialien Energie und besitzen im entkoppelten Spektrum nur eine Komponente des entsprechenden Detektors. Die gesuchte Abbildung muß daher diese Linien auf die Koordinatenachsen des orthogonalen Bezugssystems überführen. Die Transformation läßt sich im allgemeinen Fall auf eine Translation des Koordinatenursprungs mit anschließender Drehung der Koordinatenachsen zerlegen. In Abbildung 5.10 ist die verwendete Methode zur Entkopplung schematisch dargestellt. Als erstes werden je zwei Punkte auf der Linie der im Szintillator gestoppten Teilchen $((dEx_1, dEy_1), (dEx_2, dEy_2))$ und auf der Linie der neutralen Teilchen $((Ex_1, Ey_1), (Ex_2, Ey_2))$ ausgewählt. Für diese Punkte werden die Geradengleichungen aufgestellt:

$$a_1 = \frac{Ey_2 - Ey_1}{Ex_2 - Ex_1}$$

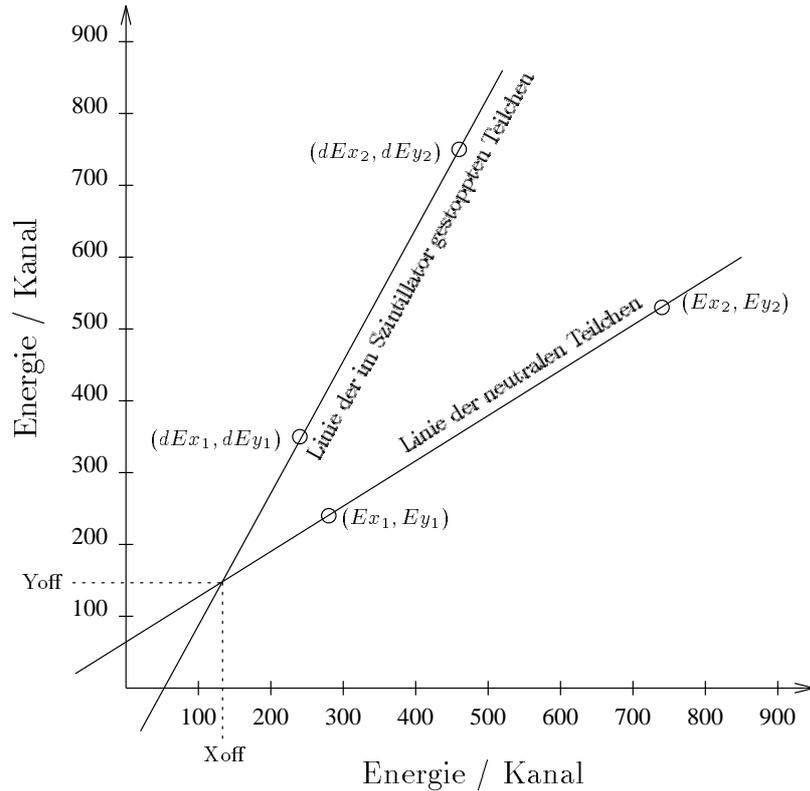


Abb. 5.10: Definition der Achsen des schiefwinkligen Koordinatensystems in den Koordinaten des entkoppelten Systems

$$\begin{aligned}
 a_2 &= \frac{dEy_2 - dEy_1}{dEx_2 - dEx_1} \\
 b_1 &= -a_1 * Ex_1 + Ey_1 \\
 b_2 &= -a_2 * dEx_1 + dEy_1
 \end{aligned}$$

Der Schnittpunkt (X_{off}, Y_{off}) der beiden Geraden markiert den Ursprung des schiefwinkligen Koordinatensystems. Er wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 X_{off} &= \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1} \\
 Y_{off} &= a_1 * Ex_1 + b_1
 \end{aligned}$$

In Abbildung 5.11 ist eine Translation um die berechneten Achsenabschnitte (X_{off}, Y_{off}) durchgeführt worden, die den Ursprung der Koordinatensysteme ineinander überführt. Ein beliebiger Punkt (X', Y') im schiefwinkligen Koordinatensystem wird in den Punkt (X'', Y'') gemäß den folgenden Gleichungen transformiert:

$$\begin{aligned}
 Y'' &= (Y' - Y_{off}) - (X' - X_{off}) * a_1 \\
 X'' &= -(Y' - Y_{off}) * 1/a_2 + (X' - X_{off})
 \end{aligned}$$

Die Abbildung zeigt die Wirkung der Abbildungsgleichungen. Durch den Punkt

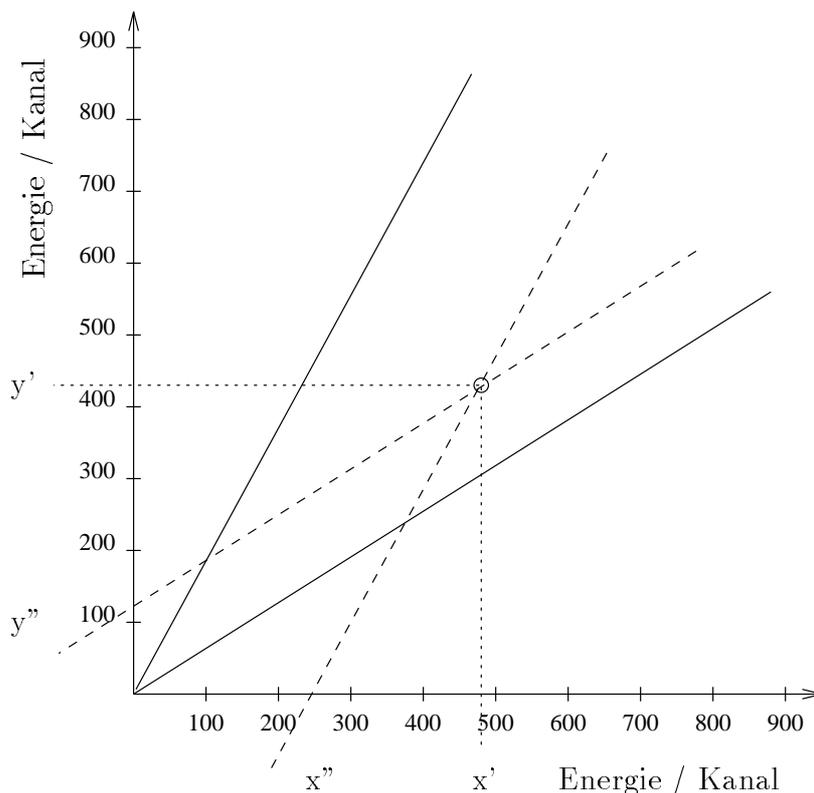


Abb. 5.11: Geometrische Darstellung der verwendeten Transformation in das rechtwinklige Koordinatensystem

(X', Y') werden Parallelen zu den Achsen des schiefwinkligen Koordinatensystems gelegt. Der Schnittpunkt mit den Koordinatenachsen des orthogonalen Koordinatensystems bestimmt die neuen Koordinaten (X'', Y'') im entkoppelten System. Diese Transformation wird bei jedem Ereignis für jeden angesprochenen BGO-Detektor ausgeführt. Die Parameter der Entkopplung müssen für jeden einzelnen Detektor mit hoher Präzision bestimmt werden, da alle weiteren Analysen des BGO-Detektors von der Güte der Entkopplung abhängen. Die Parameter werden bei konstanter Hochspannungsversorgung der Photomultiplier vor allem durch Lage und Intensität des Elektronenstrahls beeinflusst. Die starke Abhängigkeit der BGO-Detektoren vom Elektronenstrahl ergibt sich aus dem sehr geringen Abstand der Detektoren vom Target (6 cm) und der daraus resultierenden hohen Untergrundbelastung. Die Photomultiplier besitzen unter diesen Betriebsbedingungen eine strahlstromabhängige Grundlast. Eine weitere Reduktion der Untergrundbelastung war wegen der benötigten Luminosität trotz Verwendung noch dünnerer Targets ($300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) nicht möglich. Daher mußten alle Entfaltungsparemeter nach jeder Strahlkalibration überprüft und angepaßt werden. Das gleiche gilt für die in Abschnitt 5.3.2 beschriebene Energiekalibration. Ein entfaltetes BGO-Spektrum zeigt Abbildung 5.12. Klar erkennbar ist die „bananenförmige“ Linie der Protonen. Direkt über ihr verläuft ein Band von Deuteronen, das in dieser Kinematik nicht sehr stark ausgeprägt ist. Parallel zur Abszisse zeigen sich die neutralen Teilchen, dies sind im wesentlichen n , γ und π^0 . Die Verdichtung über Kanal 170 ist eine Signatur für geladene Pionen.

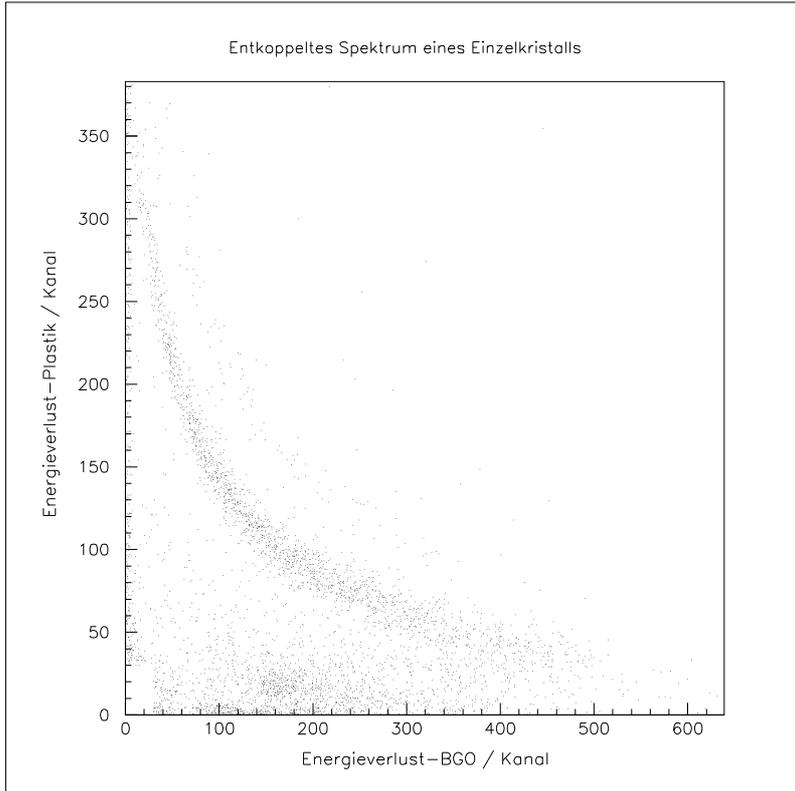


Abb. 5.12:
Entkoppeltes ADC-
Spektrum eines Plastik-
BGO-Phoswich-Detek-
tors

5.3.2 Energiekalibration

Die Analyse der BGO-Detektordaten erfolgt in mehreren Stufen. Der erste Schritt besteht in der Berechnung des spezifischen Energieverlustes der geladenen Teilchen auf ihrem Weg vom Target bis in den Detektor. Die Programme wurden auf der Basis von Energieverlustformeln [Leo-94] entwickelt. Für den BGO-Kristall wurden hierzu die spezifischen Materialkonstanten abgeleitet

$\Theta_p(^{\circ})$	$E_{out}(MeV)$	$E_p(MeV)$
52.5	567.0	138.0
66.4	648.0	57.0
76.0	705.0	0.0

Abb. 5.13: Kinematik der Eichstrahlzeit. Die Strahlenergie E_{in} betrug 705 MeV, der Spektrometerwinkel Θ_e war 28°

und in die Programme integriert. Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung des 2 mm starken Aluminiumstrahlrohrs, der 6 cm Luft zwischen Strahlrohr und Detektor sowie des $40 \mu\text{m}$ dicken Eintrittsfensters an der Stirnseite der BGO-Dektoren. Anschließend akkumuliert das Programm die spezifischen Energieverluste im 3 mm dicken Plastiksintillator und im 5,6 cm langen BGO-Kristall. Abbildung 5.14 zeigt die berechneten Energieverluste im Plastiksintillator und im BGO-Kristall für Deuteronen (0–180 MeV), Protonen (0–250 MeV) und geladene Pionen (50–300 MeV). Nicht berücksichtigt wurden Kernreaktionen im Detektormaterial, die vor allem den Nachweis der Pionen reduzieren. Diese Berechnungen bilden zusammen mit den Eichmessungen die Grundlage für die Energieeichung der einzelnen BGO-Kristalle. Zur Energieeichung der Detektoren ist der BGO in seine Einzeldetektoren zerlegt worden. Jeder einzelne Detektor ist bei einer Strahlenergie von 705 MeV in elastischer $H(e, e'p)$ -Kinematik ($\Theta_e = 28^{\circ}$)

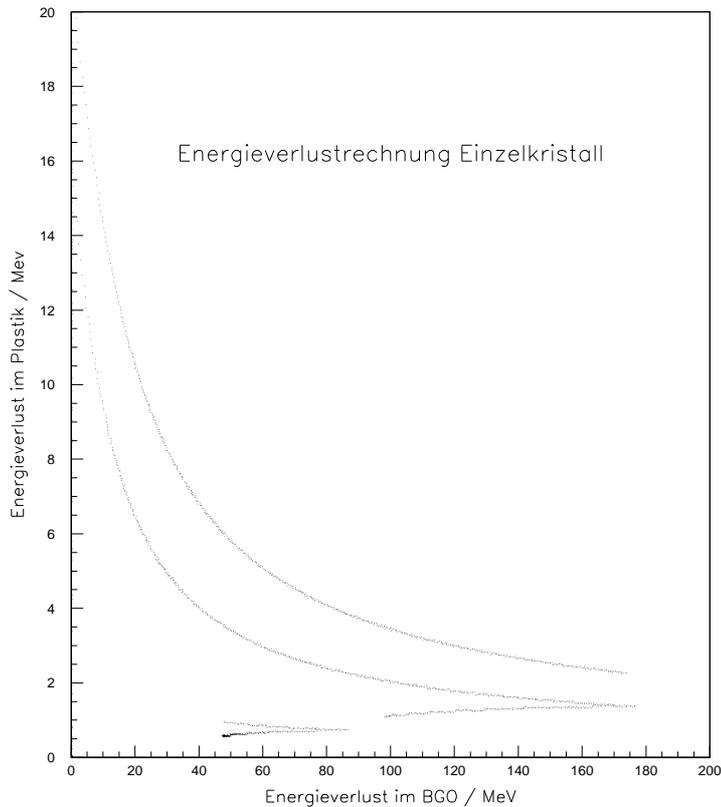


Abb. 5.14:
Rechnungen zum
Energieverlust in
der BGO-Detektor-
anordnung. Von oben
nach unten sind
die Energieverlu-
ste von Deuteron-
en, Protonen und
geladenen Pionen
aufgetragen

gemäß Abb. 5.13 vermessen worden. Als Target wurden die Wasserstoffatome einer Plastikfolie verwendet. Da die Kinematik vollständig bestimmt ist, ist zu jedem koinzident gemessenen Elektron die Energie des zugehörigen Protons bekannt. Das Magnetspektrometer kann durch seine große Raumwinkelakzeptanz Elektronenstreuwinkel von $\pm 4^\circ$ messen. In Abbildung 5.15 ist im oberen Bild der Energieverlust im BGO-Kristall gegen die Variation des Elektronenstreuwinkels aufgetragen. Durch die Kinematik ist eine feste Abhängigkeit vorgegeben. Die eingezeichnete Linie zeigt für verschiedene Elektronenstreuwinkel den berechneten Energieverlust im BGO-Kristall. Die Verstärkungsfaktoren der BGO-Detektoren sind in der Analyse an die Berechnungen angepaßt worden.

Kleine Elektronenstreuwinkel entsprechen hohen Elektronenenergien und damit niedrigen Protonenenergien. Bei niedrigen Protonenenergien wird die Energieauflösung des BGO-Detektors (6% zwischen 100 MeV und 180 MeV) zunehmend schlechter, entsprechend wird das gemessene Spektrum an dieser Stelle breit.

Das untere Bild in Abbildung 5.15 zeigt die analoge Darstellung für den Energieverlust im Plastikszintillator. Der Kurvenverlauf ist zu dem im BGO-Kristall gemessenen gegenläufig, da Protonen niedrigerer Energie einen höheren differentiellen Energieverlust im Szintillator erleiden.

Die Messungen sind sehr zeitaufwendig, da sie für jeden Detektor einzeln durchgeführt werden müssen. Eine einzelne Messung dauert bei der gewählten Luminosität etwa fünfzehn Minuten. Die Luminosität ist während des Experimentes entsprechend der zu erwartenden Zählraten eingestellt worden. Nach Abschluß

H(e,e'p)

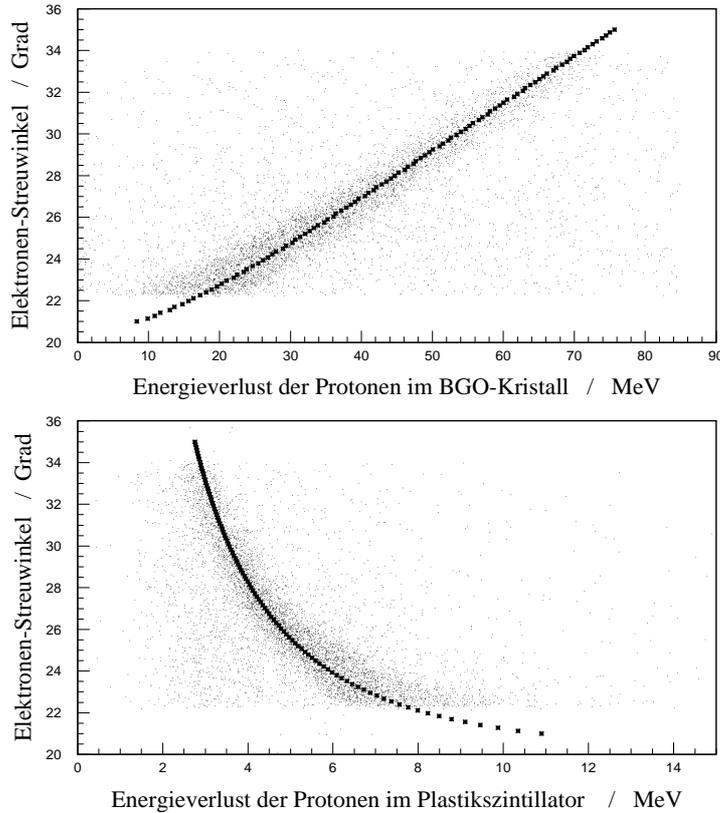


Abb. 5.15:
Variation des Elektronenstreuwinkels in elastischer Kinematik gegen den gemessenen Energieverlust im BGO-Kristall (oberes Bild) und im Plastikszintillator (unteres Bild)

der Messung ist der kalibrierte Detektor abgebaut und durch den nächsten BGO-Kristall ersetzt worden. Aufgrund der begrenzten Strahlzeit sind nur die Detektoren, die auch im späteren Experiment in Richtung des Impulsübertrags bevorzugt hohe Protonenenergien messen, zusätzlich bei hohen Protonenenergien kalibriert worden. Hierzu wurde wieder die elastische Streuung am Wasserstoff verwendet. Die Abb. 5.16 zeigt die Parameter der dort verwendeten Kinematik.

Die Verstärkung jedes Einzeldetektors wird durch die Einkopplung der Lichtimpulse eines Stickstofflasers überwacht. Das Problem ist die optische Ankopplung an den BGO-Kristall. Da die Detektoren mehrfach bewegt werden mußten, ist die Möglichkeit einer Änderung der Lichtsammlung durch Änderung der Ankopplung gegeben. Daher ist besondere Sorgfalt auf die Fixierung der Lichtleiter an den BGO-Detektoren gelegt worden. Eine weitere Schwierigkeit ist die geringe Langzeitstabilität des verwendeten UV-Lasers. Sie kann jedoch mit Hilfe der Plastikszintillatoren des Spektrometers durch Vergleich mit der Höhenstrahlung überwacht werden. Ungeachtet dieser Probleme bietet die Lasereinkopplung die Möglichkeit, kurzfristige Einflüsse auf die Verstärkung der

$\Theta_p()$	$E_{out}(MeV)$	$E_p(MeV)$
41.0	467.0	238.0
47.0	534.0	171.0
52.8	601.0	104.0

Abb. 5.16: Kinematik der Eichstrahlzeit. Die Strahlenergie E_{in} betrug 705 MeV, der Spektrometereinkel Θ_e war 58°

Detektoren zu erkennen und zu korrigieren. Die absolute Anbindung der Kohlenstoffmessungen an die Eichmessungen ist aufgrund der oben geschilderten Problematik nicht bei allen 30 Detektoren gelungen. Daher sind bei diesen Detektoren zusätzliche Korrekturen [Yada-96] auf der Basis der Analyse von BGO-Daten aus früheren Messungen an anderen Beschleunigern hinzugezogen worden.

5.4 Luminositätsmessung

Der Elektronenstrahl wird mit zwei Hochfrequenz-Lage- und -Strommonitoren vor der Streukammer der Spektrometeranlage vermessen. Für die Bestimmung der Luminosität ist die genaue Kenntnis der Stromstärke des Elektronenstrahls erforderlich. Zu diesem Zweck werden die Resonatoren auf die Frequenz des Elektronenstrahls (2.5 GHz) abgestimmt. Für die Messung der Stromstärke muß ein Resonanzmode im Intensitätsresonator (TM_{010}) angeregt werden, in dem das Ausgangssignal proportional zur Stromstärke und unabhängig von Abweichungen der Strahlposition bezüglich der Resonatorachse ist.

Die Resonanzfrequenz der Monitore ist temperaturabhängig, für die verwendeten Aluminiumresonatoren [Mitt-92] variiert sie um $-59\text{ kHz}/^\circ\text{C}$. Die Monitore sind daher über den Kühlwasserkreislauf des Beschleunigers auf konstanter Temperatur gehalten worden, um Einflüsse der schwankenden Umgebungstemperatur zu vermeiden. Zusätzlich wird beim Betrieb der Intensitätsmonitore die Resonatortemperatur gemessen und über das Experimentkontrollsystem aufgezeichnet.

Bei der Auswertung der BGO-Messungen zeigten die gemessenen Strahlströme starke Schwankungen. Diese beruhen, wie die Analyse der aufgezeichneten Meßwerte ergab, auf Änderungen der Resonatortemperatur, die wiederum auf Schwankungen der Kühlwassertemperatur des Beschleunigers zurückzuführen ist. Die Kontrolle des Kühlwasseranschlusses der Kavitäten hat ergeben, daß sie irrtümlicherweise an das Ende der Kühlung der Beschleunigersektion angeschlossen worden waren. Daher haben sich Änderungen in der Belastung des Beschleunigers in den Kavitäten als starke Schwankungen der Resonatortemperatur und damit auch der Resonanzfrequenz bemerkbar gemacht. Als Konsequenz hieraus ist für die Resonatoren ein eigener, stabilisierter Kühlwasserkreislauf aufgebaut worden.

Durch die gleichzeitige Messung der Resonatortemperatur und des Strahlstroms über das Experimentkontrollsystem ist in der Analyse eine nachträgliche Korrektur der gemessenen Ströme möglich. Abbildung 5.17 zeigt in den beiden oberen Diagrammen die gemessenen Größen Temperatur und Strom. Mit diesen Informationen kann die Temperaturabhängigkeit der Strommessung korrigiert werden. Zur Absolutbestimmung der Ströme ist zusätzlich eine regelmäßige Kalibration der gemessenen Resonatorströme notwendig. Dies geschieht mit Hilfe einer Förstersonde, die über einen Ferritmonitor das Magnetfeld des cw¹²-Stroms bestimmt. Sie ermöglicht es, den Strom mit einer absoluten Genauigkeit von $\pm 100\text{ nA}$ zu messen und kann daher bei höheren Strömen ($I > 10\ \mu\text{A}$) sehr gut zur Eichung der anderen Strommonitore verwendet werden. Da bei den BGO-Messungen der Strahlstrom für eine präzise Bestimmung mit der Försterson-

¹²continuous wave

de zu gering war, sind regelmäßig spezielle Kalibrationsmessungen bei hohen Strahlströmen durchgeführt worden. Mit diesen zusätzlichen Informationen ist es möglich, auch den Absolutwert der über die Kavitäten gemessenen Ströme nachträglich zu korrigieren. Die komplette Korrektur zeigt die unterste Kurve in Abbildung 5.17. Die verbleibende Welligkeit kann über den zusätzlichen Photoeffektmonitor korrigiert werden, soweit es sich nicht um wirkliche Schwankungen des Strahlstroms handelt. Der Photoeffektmonitor mißt den Strahlstrom auf der Basis des durch das Synchrotronlicht hervorgerufenen Photoeffektes. Er zeigt eine sehr gute Linearität und Auflösung zur relativen Bestimmung des Strahlstroms, wohingegen die Langzeitstabilität aufgrund von Alterungseffekten ungenügend ist. Daher ist zur exakten Messung, der beim BGO-Experiment verwendeten kleinen Ströme, die gleichzeitige Auswertung aller drei Monitorsysteme notwendig.

Die regelmäßige Anpassung der Stromnormierung der Hochfrequenzkavitäten

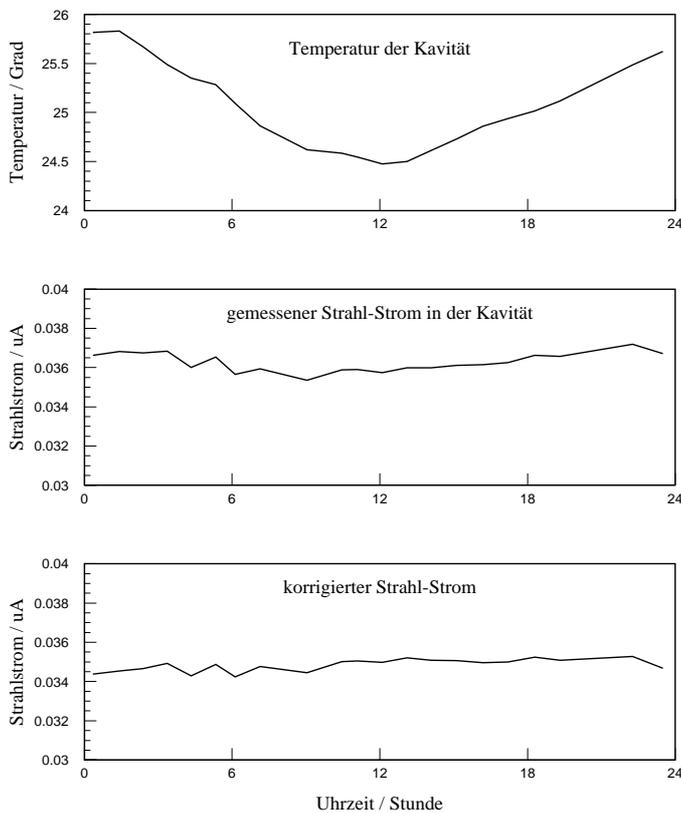


Abb. 5.17:
Korrektur der Temperaturabhängigkeit der Strahlstrommessung mit Hochfrequenzintensitätsmonitoren

an die Förstersonde war notwendig, da sich die Abstimmung der Kavitäten auf die Resonanzfrequenz zum damaligen Zeitpunkt als nicht präzise genug erwies. Dies erschwert auch die Korrektur der Temperaturabhängigkeit der Strahlstrommessung über die Kavitäten. Zusätzlich waren die zur Temperaturmessung eingesetzten Halbleiterelemente aufgrund ihres geringen Abstandes zum Strahlrohr einer starken Alterung durch ionisierende Strahlung ausgesetzt. Inzwischen sind Maßnahmen zur Verbesserung der Stabilität der Strahlstrommessung mit den Hochfrequenzkavitäten eingeleitet worden [Scha-95]. Die Halbleiterthermo-

elemente sind durch strahlungsresistente Platinthermoelemente ersetzt worden. Die Temperaturstabilisierung der Kavitäten ist durch ein autarkes Kühl- bzw. Heizsystem deutlich verbessert worden. Die Abstimmung der Resonanzfrequenz auf die neue Kühlwassertemperatur ist nach den gemachten Erfahrungen nun sehr präzise durchgeführt worden.

Die exakte Bestimmung der Luminosität ist zur korrekten Ermittlung des $^{12}\text{C}(e, e')$ -Wirkungsquerschnitts unabdingbar. Sie ist das Produkt aus der Zahl der einlaufenden Elektronen pro Zeiteinheit und der Zahl der Targetkerne pro Flächeneinheit. Üblicherweise werden zu diesem Zweck die Targetdicke und der Strahlstrom gemessen und daraus die Luminosität berechnet. Im Falle der BGO-Messungen ist die Vermessung der Dicke und der Homogenität des verwendeten Targets (10 mg/cm^2) aufgrund der geringen Massenbelegung eine zusätzliche Fehlerquelle. Die präzise Messung des geringen Strahlstroms bei den BGO-Strahlzeiten ist wie oben beschrieben mit großen Korrekturen verbunden. Die korrelierte Verwendung der verschiedenen Strom- und Temperaturmonitore ergibt in der Summe eine Erhöhung der Fehler in der Strahlstrombestimmung. Daher sind Alternativen zur Luminositätsbestimmung untersucht worden.

Die freie Zählrate im Magnetspektrometer ist bei der Verwendung dünner Targets in guter Näherung proportional zur Luminosität. Sie kann dadurch direkt zur Bestimmung der Wirkungsquerschnitte herangezogen werden. Die Luminositätsbestimmung über die Normierung der Einzelzählraten hat den Vorteil, daß sie direkt die benötigten Größen (Strom, Targetdicke) integriert und damit Schwankungen von Strahlstrom und Targetdicke automatisch einschließt. Daher sind während der gesamten BGO-Strahlzeit zusätzlich zu den Koinzidenzen zwischen dem Magnetspektrometer und dem BGO-Detektor auch die Einzelereignisse im Magnetspektrometer zur späteren Luminositätsbestimmung mitgemessen worden. Nach Abschluß der BGO-Strahlzeit sind spezielle Messungen zur präzisen ($< 5\%$) Kalibration der Einzelzählraten im Magnetspektrometer durchgeführt worden. Die Einzelzählrate im Spektrometer besteht bei den geringen Strahlströmen, wie sie in der Produktionsstrahlzeit verwendet wurden, auch aus einem großen Anteil von Höhenstrahlungsereignissen. Diese lassen sich jedoch sicher über den Tscherenkow-Detektor identifizieren und korrigieren. Die Gesamtrate der Einzelereignisse war mit etwa 70 Hz für die Datenerfassung zu hoch, daher wurden die Einzelereignisse mit einem Untersetzungsverhältnis von 1 : 10 aufgezeichnet. Die Bestimmung der Experimentdauer erfolgte sehr genau über die Zählung der Signale eines Zeitgebers, der intern mit einer Frequenz von 10 MHz und extern mit 10 KHz arbeitet.

Die Kalibrationsmessungen am inklusiven $^{12}\text{C}(e, e')$ -Spektrum sind entsprechend der Spektrometerfeldeinstellungen aus Tabelle 5.1 bei exakt gleichen Spektrometerparametern (Spektrometerwinkel, Kollimator, Driftkammerspannung, etc.) und Strahlparametern (Energie, Strahlfleck, etc.) durchgeführt worden. Lediglich der Strahlstrom ist auf $30 \mu\text{A}$ erhöht worden und kann mit der Förstersonde einfach und präzise vermessen werden. Der Fehler in der Strommessung mit dieser Sonde resultiert aus einer systematisch bedingten Drift des Strommonitors von maximal 100 nA über längere Meßzeiten. Bei jeder Strahlstromabschaltung rekaliibriert sich die Förstersonde, sodaß für die Strommessung ein Fehler von $\pm 50 \text{ nA}$ angenommen wird. Zusätzlich ist ein dickeres, gut vermessenes 65 mg/cm^2 Tar-

get [Offe-93] verwendet worden, hier beläuft sich der Fehler in der Targetdickenbestimmung auf weniger als $\pm 1 \text{ mg/cm}^2$.

Die resultierende Luminosität in der Kalibrationsstrahlzeit ist entsprechend hoch gewesen und mußte je nach Magnetfeldeinstellung durch eine Einzelereignisuntersetzung zwischen 1:500 und 1:1000 auf etwa 50 Hz Datenerfassungsrate begrenzt werden. Die Einstellung der Untersetzungsverhältnisse erfolgte während kurzer Testmessungen direkt über das Experimentkontrollsystem. Die Untersetzung wurde so gewählt, daß die Totzeit weniger als 20% der Meßzeit beträgt. Dies erlaubt in der Analyse eine sichere Totzeitkorrektur. Weitere Änderungen an der Meßelektronik des BGO-Experimentes mußten nicht vorgenommen werden, da dort bereits die Einzelereignisse zur Normierung in der Koinzidenzelektronik berücksichtigt worden sind.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

5.5.1 Messung der inklusiven Reaktion $^{12}\text{C}(e, e')$

Die Spektren des Energieübertrags sind für die verschiedenen Magnetfeldeinstellungen bei einer Strahlenergie von $E_{\text{Beam}} = 705 \text{ MeV}$ und einem Spektrometerwinkel von $\theta_e = 34.4^\circ$ gemessen worden. Anschließend sind die Einzelspektren unter Berücksichtigung der jeweiligen Untersetzungsfaktoren für Einzelereignisse zu dem in Abbildung 5.18 gezeigten differentiellen Wirkungsquerschnitt mit Energieüberträgen von 50 MeV bis 500 MeV zusammengesetzt worden. Die Messung der inklusiven $^{12}\text{C}(e, e')$ -Spektren erfolgte unter Einbeziehung des Tscherenkow-Detektors. Dadurch konnte der bei Einarmmessungen immer vorhandene Untergrund der Höhenstrahlung wirksam unterdrückt werden. Auffallend ist der Anstieg des Wirkungsquerschnitts im Bereich $\omega > 400 \text{ MeV}$. Zur weiteren Untersuchung der Energieübertrag-Spektren werden zunächst die notwendigen Strahlungskorrekturen durchgeführt.

Strahlungskorrekturen

Die Strahlungskorrekturen ermöglichen es, die gewonnenen Spektren des Energieübertrags ω mit anderen Messungen und Rechnungen zu vergleichen. Die Korrekturen entstehen vor allem durch die zusätzliche elektromagnetische Wechselwirkung der ein- oder auslaufenden Elektronen mit dem Target. Diese Effekte sind durch die Quantenelektrodynamik wohl beschrieben und können sehr genau berechnet werden. Sie berücksichtigen, daß sich der Impuls und damit für ein hochrelativistisches Elektron in guter Näherung in gleichem Maße die Energie des detektierten Elektrons durch die zusätzliche Abstrahlung von reellen Photonen verringert. Dies führt zu Spektren des Energieübertrags ω , in denen die Peaks zu höherem Energieübertrag hin verbreitert sind. Aufgabe der Strahlungskorrekturen ist es, die fehlende Stärke aus der Schulter der Verteilung abzuziehen und wieder dem ursprünglichen Peak zuzuordnen. Das Korrekturverfahren hängt stark von der Breite des zur Mittelung gewählten Energieintervalls ab. Bei relativ

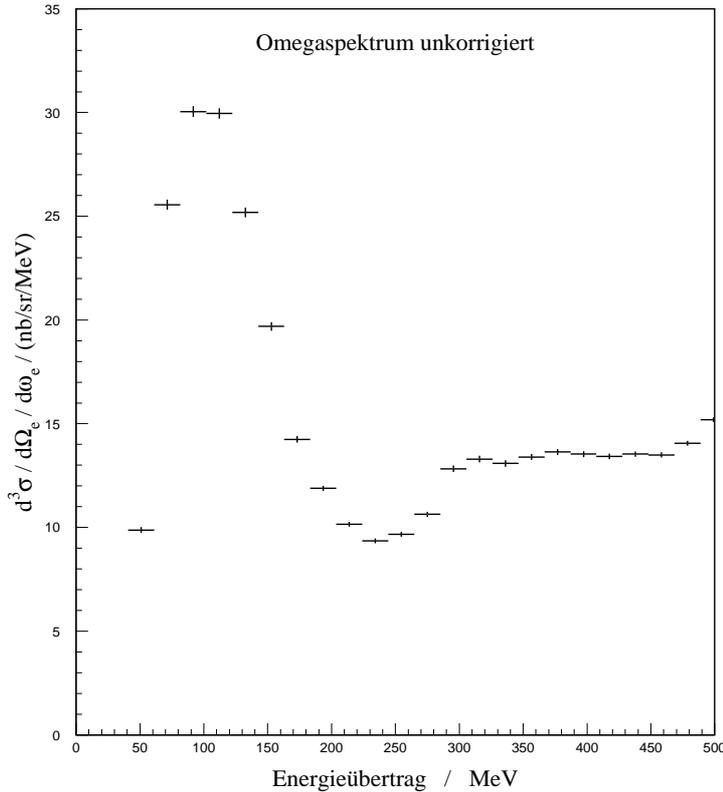


Abb. 5.18:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e')$ ohne Strahlungskorrekturen, der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

großen Energieintervallen (5 - 10 MeV) liegt die durch Bremsstrahlung modifizierte Energie meist im gleichen Intervall wie die ursprüngliche Energie. Für die oben beschriebene Experimentieranordnung mit einem dünnen 10 mg/cm^2 Target ergeben sich größere Beiträge zur Strahlungskorrektur nur aufgrund der *inneren Bremsstrahlung*. Sie beschreibt die Abstrahlung eines realen Photons im elektromagnetischen Feld des gleichen Kerns, der mit dem virtuellen Photon wechselwirkt. Die Auswirkungen auf die Energieübertragungsspektren sind bei einer Kanalbreite von 5 MeV relativ gering, da die Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Bremsstrahlungsquants nur für die Emission kleiner Photonenergien sehr hoch ist. Die Abbildung 5.19 zeigt die Beiträge der Schwingerkorrekturen von realen und virtuellen Photonen zum Prozeß der *internen Bremsstrahlung* schematisch in Feynman-Diagrammen. Die Korrekturen für die Abstrahlung eines realen Photons vor (a) der Streuung beziehungsweise nach (b) der Streuung werden als gleich groß angenommen, so daß einfach die Quadratwurzel des Korrekturfaktors für jeden einzelnen Ast angesetzt wird. Der Fehler am Korrekturfaktor, der durch diese Vereinfachung entsteht, beträgt weniger als ein halbes Prozent. Die Vertexkorrektur (c) und die Vakuumpolarisation (d) sind Effekte, die durch virtuelle Photonen hinzukommen. Die Stärke (N_{exp}) für einen Peak in einem bestimmten Integrationsintervall hängt von der Stärke (N_0) ab, die sich ergäbe, wenn keine Strahlungsverluste auftreten würden.

$$N_0 = C(\Delta E_m) N_{exp}(\Delta E_m)$$

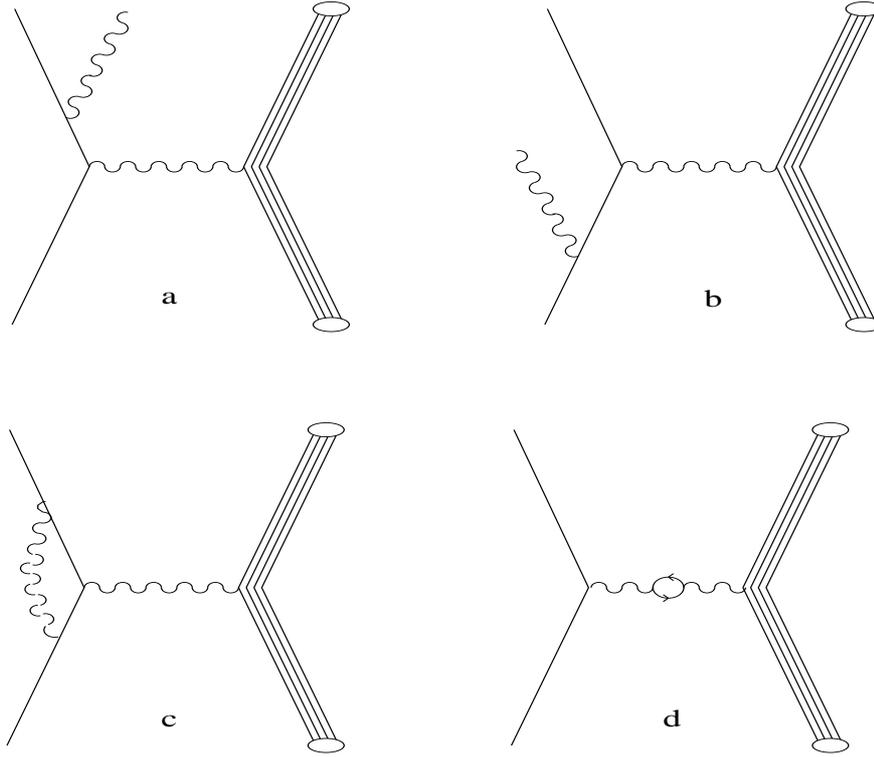


Abb. 5.19: Struktur der Reaktionen, die Beiträge zu Strahlungskorrekturen durch Abstrahlung eines reellen Photons vor (a) beziehungsweise nach (b) der Streuung (Infrarotbeiträge) sowie durch Vertexkorrektur (c) und Vakuumpolarisation (d) liefern

ΔE_m ist die Abschneidekante des Energieintervalls, d. h. die Energiedifferenz zwischen der Peakposition und der oberen Integrationsgrenze, C ist der Korrekturfaktor. Er ergibt sich für die interne Bremsstrahlung zu [Penn-77]:

$$C_{Schwinger} = \frac{e^{\delta_{reell}}}{1 + \delta_{virtuell}}$$

$$\delta_{reell} = \frac{\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{E(E - \omega)b}{\eta^2 \Delta E_m^2}\right) \ln \frac{-q_\mu^2}{m_e^2 - 1}$$

$$b = 1 + \frac{2\omega}{M} \sin^2(\theta_e/2)$$

$$\eta = 1 + \frac{2E}{M} \sin^2(\theta_e/2)$$

$$q_\mu^2 = \omega^2 - q^2$$

$$\delta_{virtuell} = \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{13}{6} \left(\ln\left(-\frac{q_\mu^2}{m_e^2}\right) - 1 \right) - \frac{17}{18} - \frac{\pi^2}{6} + L_2(\cos^2(\theta_e/2)) - \frac{1}{2} \ln^2\left(\frac{E}{E - \omega}\right) \right)$$

$$L_2(x) = \int_0^x \frac{-\ln|1-y|}{y} dy$$

Die Energie des einlaufenden Elektrons wird mit E , der Energieübertrag mit ω und der Impulsübertrag mit q bezeichnet. $L_2(x)$ ist die Spencefunktion [Mits-49],

sie wird üblicherweise durch $L_2(x) = \sum(\frac{x^i}{i^2})$ für $|x| < 1$ genähert. Als weitere mögliche Strahlungskorrekturen kommen *externe Bremsstrahlung* [Frie-75] und Energieverlust-*straggling* durch Ionisationseffekte im Detektormaterial in Betracht. Die externe Bremsstrahlung ist bei dünnen Targets relativ unwahrscheinlich, da ein Elektron mit einem Kern wechselwirken und im Feld eines anderen Kerns Bremsstrahlungsquanten erzeugen müßte. Noch unwahrscheinlicher ist im dünnen Target der Energieverlust des hochenergetischen Elektrons durch Ionisation (*Landau-Straggling*). Daher ergeben sich für diese beiden Gattungen von Strahlungskorrekturen nur sehr kleine Beiträge.

Die genannten Korrekturen berechnen die fehlende Stärke in einem beliebigen Energieintervall, korrigieren deren Inhalt und reduzieren alle höheren Energieüberträge anteilig um die Korrektur. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß nur Beiträge gemessener Kanäle korrigiert werden können. Daher müssen Beiträge nicht gemessener Energiebereiche ggf. separat korrigiert werden. Nach Anwendung der beschriebenen Strahlungskorrekturen auf die Spektren zeigte sich, daß die Überhöhung des Wirkungsquerschnitts für Energieüberträge im Bereich von $\omega > 400$ MeV nicht wesentlich reduziert wurde. Dies ist wahrscheinlich auf den Einfluß der nicht gemessenen Teile des Spektrums zurückzuführen.

Strahlungskorrektur des elastischen Peaks

Die Überhöhung resultiert möglicherweise aus Strahlungsverlusten von elastisch am Kern ($\omega \simeq 0$) gestreuten Elektronen durch Bremsstrahlung. Dies legen Messungen in ähnlicher $^{12}C(e, e')$ -Kinematik bei einer Strahlenergie von $E_{Beam} = 680$ MeV und einem Spektrometerwinkel von $\theta_e = 36^\circ$ in Saclay nahe [Barr-83]. Der Beitrag des elastischen Peaks ($\omega = 0$) zu Kanälen mit hohem Energieverlust ($\omega \geq 400$ MeV) ist nicht offensichtlich. Die Wahrscheinlichkeit für die Abstrahlung eines reellen Photons mit Energien zwischen 300 MeV und 500 MeV ist gegenüber kleinen Energien stark reduziert. Dennoch ist die Bremsstrahlung der elastisch gestreuten Elektronen die Ursache der Überhöhung. Dies soll die folgende kurze Ableitung verdeutlichen.

Ausgehend von der Wechselwirkung des Elektrons als Mott-Streuung in relativistischer Näherung mit $\hbar \equiv c \equiv 1$:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} = \frac{4Z^2 e^4 E^2}{q^4} \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

sind bei Vernachlässigung des Rückstoßes bei der elastischen Streuung an einem Kern die Energie des Elektrons und der Betrag des Impulses vor und nach der Wechselwirkung gleich:

$$E = E', |p| = |p'|.$$

Der Betrag des Impulsübertrags q ist dann $|q| = 2|p| \sin \frac{\theta}{2}$. In der Näherung $E = |p|$ für hochrelativistische Elektronen erhält man die folgende Form der Mott-Streufornel:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} = \frac{Z^2 e^4 \cos^2 \frac{\theta}{2}}{4E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Damit ergibt sich für die elastische Streuung eines Elektrons an einem Kern eine Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts $\sim \frac{1}{E^2}$. Nach der Abstrahlung eines hochenergetischen reellen Photons besitzt das einlaufende Elektron eine Energie von

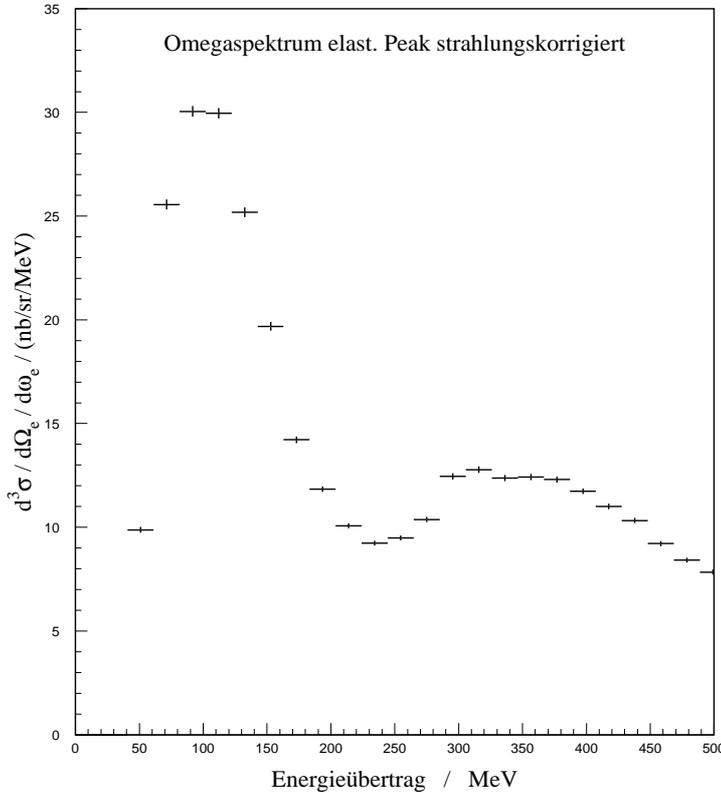


Abb. 5.20:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e')$ mit Strahlungskorrekturen für den elastischen Peak ($\omega \sim 0$), der mittlere Spektrometerwinkel θ betrug 33.4° , die Strahlenergie lag bei 705 MeV

$E = E_{Beam} - E_{Photon}$. Dies bedeutet in unserem Fall bei einem Energieübertrag von 500 MeV eine verbleibende Elektronenenergie von nur noch 205 MeV. Da der Wirkungsquerschnitt umgekehrt proportional zum Quadrat der Energie ansteigt, wird dieser Beitrag zum Wirkungsquerschnitt $^{12}\text{C}(e, e')$ für $\omega \rightarrow E_{Beam}$ immer größer.

Zur Korrektur dieses Effekts wurde der theoretische Wirkungsquerschnitt für die elastische Streuung von Elektronen am Kohlenstoff in den Akzeptanzen des Spektrometers in der Kinematik des BGO-Experimentes mit dem Programm "drepha" [Scha-95] berechnet. Anschließend wurde das berechnete Spektrum mit dem Bremsstrahlungsspektrum für reelle Photonen [Schi-51], die in Richtung des auslaufenden Elektrons emittiert werden, gefaltet. Es zeigte sich, daß die Korrekturen qualitativ die Form des Energieübertragungsspektrums richtig korrigieren, jedoch quantitativ nicht ausreichend sind. Der Grund hierfür liegt in der impliziten Annahme der Abstrahlung der reellen Photonen in Flugrichtung der ein- und auslaufenden Elektronen, der sogenannten *peaking approximation*. Diese Annahme ist nach [MoTs-69] jedoch nur bis zu Energien des abgestrahlten reellen Photons gültig, die $\frac{2}{3}$ der ursprünglichen Energie des Elektrons nicht übersteigen. Falls die Energie des abgestrahlten Photons darüber liegt, kann der Fehler bei der Korrektur des Wirkungsquerschnitts 30%–40% betragen. Dies zeigen Ver-

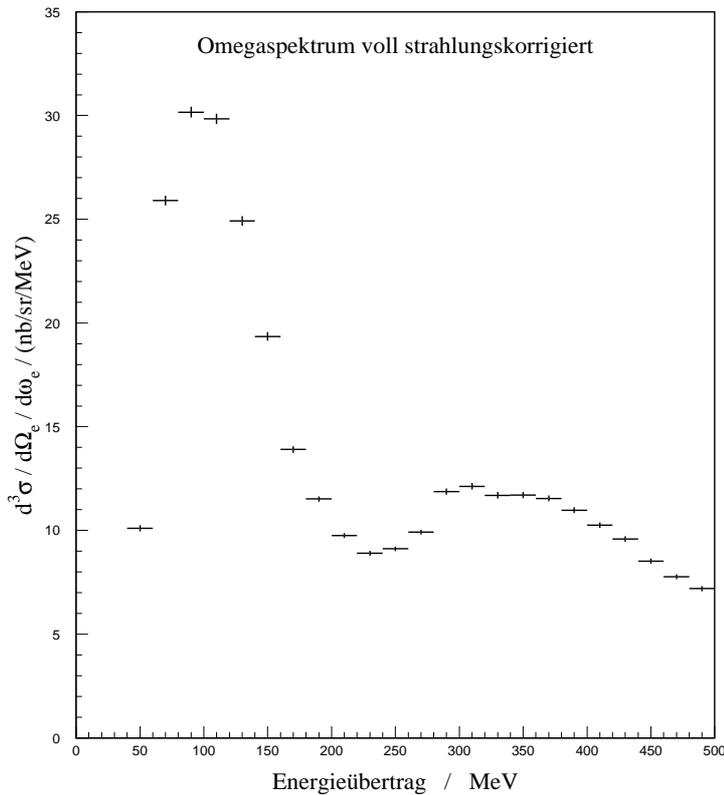


Abb. 5.21:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e')$ mit kompletten Strahlungskorrekturen, der mittlere Spektrometervinkel θ betrug 33.4° , die Strahlenergie lag bei 705 MeV

gleiche mit exakten Rechnungen für den Strahlenschwanz des elastischen Peaks. Daher ist für die endgültige Korrektur das Programm “RaTa” basierend auf den Formeln von [MoTs-69] zur Berechnung der Strahlungsverluste von elastisch gestreuten Elektronen verwendet worden. Mit dem Programm sind die Beiträge der Bremsstrahlung in der BGO-Kinematik für gemessene Energieübertragungsspektren ermittelt worden. Die errechneten Inhalte sind anschließend Kanal für Kanal von den gemessenen Spektren subtrahiert worden.

Die Abbildung 5.20 zeigt das korrigierte Energieübertragungsspektrum für $^{12}\text{C}(e, e')$. Die Skalierung der Meßdaten im Bereich zwischen 278 MeV und 350 MeV aus der ersten Eichstrahlzeit mußte an die benachbarten Bereiche angepaßt werden, da in dieser Strahlzeit noch keine automatische Kontrolle der Umsetzungs-faktoren der Einzelraten durch das Steuerungssystem erfolgte. Die Strahlungskorrekturen aus Abschnitt 5.5.1 ergaben, wie Abbildung 5.21 zeigt, nur relativ kleine Änderungen durch Verringerung des Wirkungsquerschnitts im Bereich hoher Energieüberträge ($\omega > 400$ MeV) und eine leichte Erhöhung im quasielastischen Bereich. Beim Vergleich der gemessenen Wirkungsquerschnitte mit anderen gemessenen oder gerechneten Energieübertragungsspektren muß der großen Raumwinkelakzeptanz des Magnetspektrometers Rechnung getragen werden. Die Akzeptanz im Streuwinkel betrug bei den Messungen $\pm 75\text{mrad}$, dies entspricht $\pm 4.3^\circ$. Damit integriert das Spektrometer den $^{12}\text{C}(e, e')$ -Wirkungsquerschnitt zwischen 30.1° und 38.7° . Der Mittelwert entspricht wegen des Abfalls des Wirkungsquerschnitts einem mittleren Streuwinkel von 33.5° . Dies wird in Abbildung 5.22 bestätigt. Sie

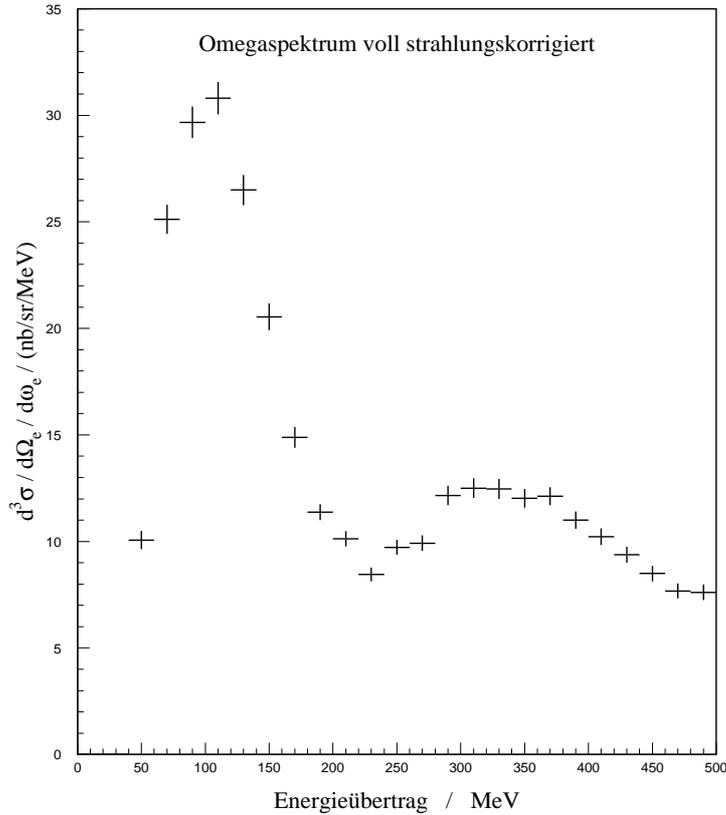


Abb. 5.22:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e')$ mit kompletten Strahlungskorrekturen, der Winkel θ ist auf Winkel zwischen 31.4° und 34.4° eingeschränkt, die Strahlenergie betrug 705 MeV

zeigt ein entsprechendes Spektrum, bei dem zur Bestätigung dieser Annahme die Winkelakzeptanz des Spektrometers zwischen 31.4° und 34.4° eingeschränkt wurde.

5.5.2 Messung der semi-exklusiven Reaktionen $^{12}\text{C}(e, e'x)$

Die Reaktionen $^{12}\text{C}(e, e'p)$, $^{12}\text{C}(e, e'pp)$

Ein Ziel der Messungen mit dem BGO war die Untersuchung der Antwortfunktion des Atomkerns auf die Anregung mit virtuellen Photonen bei verschiedenen Energieüberträgen. Hierbei spielt die Untersuchung der verschiedenen Zerfallskanäle eine entscheidene Rolle. Der BGO-Detektor ist von seiner Konstruktion her besonders geeignet, schwere geladene Teilchen zu messen. Dies sind vor allem Protonen und Deuteronen, mit Einschränkungen auch positiv und negativ geladene Pionen. Neutrale Teilchen sind von Gammaquanten nicht zu unterscheiden, da sie im Plastikszintillator praktisch kein Signal hinterlassen.

Abbildung 5.23 zeigt den Wirkungsquerschnitt für die Emission von genau *einem* Proton in die BGO-Kristallkugel für Energieüberträge von 50 MeV bis 500 MeV. Eine Korrektur auf den begrenzten Raumwinkel der Kristallkugel ist ohne die Annahme spezieller Kernmodelle nicht möglich. Daher wurde in dieser ersten Analyse der Daten darauf verzichtet. Eine umfassende Phasenraumdiskussion

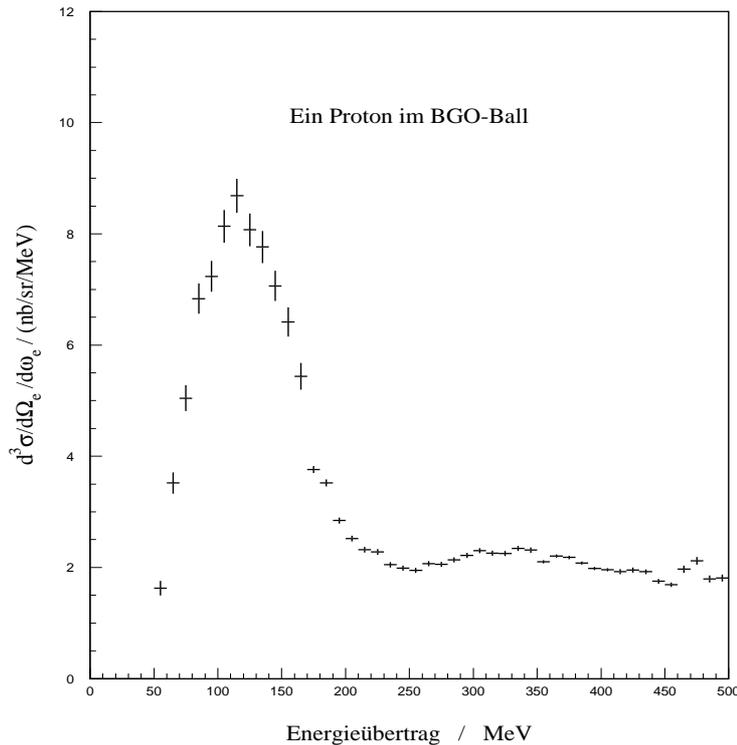


Abb. 5.23:
Wirkungsquerschnitt
der Reaktion $^{12}\text{C}(e, e'p)$
für genau *ein* nach-
gewiesenes Proton
als Funktion des Ener-
gieübertrags, der Spek-
trometerwinkel θ lag
bei 34.4° , die Strahl-
energie betrug 705 MeV

wird zur Zeit im Rahmen der Arbeit [Edel-96] durchgeführt. Die Notwendigkeit einer exakten Phasenraumanalyse legt die starke Winkelabhängigkeit des Impulsübertrags in Abbildung 5.24 nahe. Hier ist der Winkel Θ_q zwischen dem einlaufenden Elektron und der Richtung des Impulsübertrags in der Streuebene aus Abbildung 5.2 gegen den Energieübertrag dargestellt. Problematisch ist die begrenzte Detektorakzeptanz in Vorwärtsrichtung. Die äußerste Kante des BGOs endet bei 22° . Daher liegt die Richtung des Impulsübertragsvektors bei hohen Energieüberträgen (> 400 MeV) nicht mehr innerhalb der Akzeptanz der Kristallkugel. Diese kinematische Überlegung besitzt nicht notwendigerweise einen direkten Einfluß auf den Wirkungsquerschnitt bei höheren Energieüberträgen. Jedoch bereits bei kleineren Energieüberträgen werden Korrekturen zu den gemessenen Spektren notwendig, da die Nukleonen im Kern bereits vor der Reaktion einen Anfangsimpuls besitzen (im Fermi-Gas-Modell im Kohlenstoffkern einen mittleren Impuls von ~ 226 MeV/c). Dadurch ist der Impulsvektor des auslaufenden Protons in der Reaktion $^{12}\text{C}(e, e'p)$ nicht auf einen einzigen Punkt fokussiert, sondern ergibt im Fermi-Gas-Modell eine Kreisscheibe auf der Kristallkugeloberfläche.

Die Energieabhängigkeit der Wahrscheinlichkeit des Protonennachweises wurde Ereignis für Ereignis mit der folgenden Formel [Rans-93] korrigiert:

$$W(p) = 0.94 e^{\frac{-(E_p - 50)}{400}}$$

Sie berücksichtigt gleichzeitig die nicht sensitive Zone der Metallumhüllung zwischen den BGO-Kristallen. Die Energieakzeptanz der BGO-Detektoren reicht

für Protonen von 10 MeV bis zu etwa 400 MeV. Energien über 180 MeV werden, wie in Abbildung 5.14 dargestellt, nur durch den differentiellen Energieverlust im Plastiksziintillator von den kleineren Protonenenergien unterschieden. So erzeugen Protonen mit einer kinetischen Energie von 146 MeV oder 190 MeV das gleiche Signal in der BGO-Komponente. Sie unterscheiden sich lediglich um 0.25 MeV Energiedeposition in der Plastikkomponente. Daher wird die Identifikation der hochenergetischen Protonen bei steigender Zählratenbelastung zunehmend unsicherer, da die Identifikation wie oben dargestellt praktisch nur auf der ΔE -Komponente beruht. In dieser ersten Analyse blieben daher alle Protonenenergien größer 185 MeV unberücksichtigt. Vor diesem Schnitt in der Energieakzeptanz der BGO-Detektoren wurde für jedes Ereignis der Energieverlust der gemessenen Protonen auf ihrem Weg vom Target zum Detektor berechnet und korrigiert. Die minimale kinetische Energie von Protonen, die in dieser Anordnung den Detektor erreichen, liegt bei etwa 21 MeV. Diese Protonen werden in der ΔE -Komponente gestoppt und sind nicht im BGO-Kristall nachweisbar. Hierdurch sind sie von geladenen Pionen und Deuteronen, die nur Energie im Plastiksziintillator abgegeben haben, nicht zu unterscheiden. Daher wurde die untere Energieschwelle zur Identifikation von Protonen auf 30 MeV festgesetzt, dort hinterlassen sie ein Signal in der BGO-Komponente und sind eindeutig identifizierbar.

Die gleichen Korrekturen wurden auch für die gemessenen Deuteronen durch-

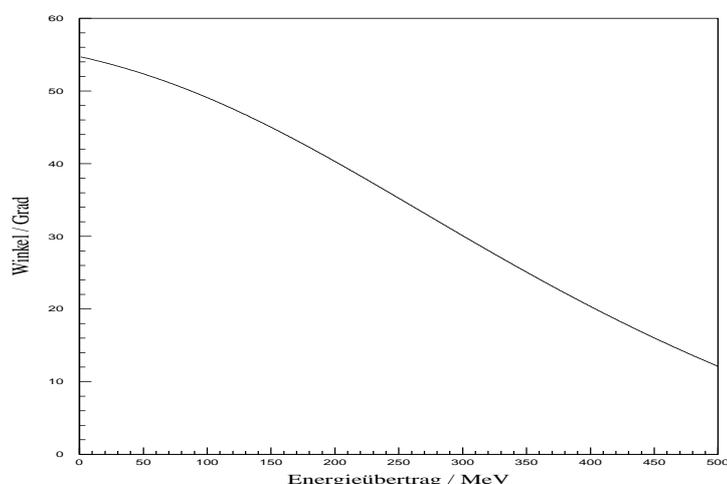


Abb. 5.24: zeigt die starke Winkelabhängigkeit des Impulsübertrages

geführt. Die untere Schwelle der akzeptierten Deuteronenenergien wurde auf 40 MeV gesetzt. Die Lage des quasielastischen Peaks im Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e'p)$ in Abbildung 5.23 liegt bei $\omega \approx |\vec{q}|^2/(2M_N) + E_b$. E_b bezeichnet die mittlere Bindungsenergie der Nukleonen im Kern, M_N die Masse eines Nukleons. ω ist der Energieübertrag des virtuellen Photons an den Kern bei dem Impuls \vec{q} . Der quasielastische Peak in Abbildung 5.21 sollte im wesentlichen durch die Streuung an den einzelnen, bei hohen Impulsüberträgen quasifreien Nukleonen im Kernverband zustandekommen. Die aus dem Kernverband herausgeschlagenen Protonen des $^{12}\text{C}(e, e'p)$ -Spektrums der Abbildung 5.23 sollten an gleicher Stelle das inklusive Spektrum reproduzieren. Beim Vergleich der Abbildungen zeigt sich, daß die Protonen im Wirkungsquerschnitt von $^{12}\text{C}(e, e'p)$ im quasielasti-

schen Bereich nur 30% des inklusiven Wirkungsquerschnitts liefern. Die Differenz kann durch eine Reihe von Korrekturen deutlich reduziert werden:

- Die Raumwinkelakzeptanz der BGO-Detektoren wird im quasielastischen Bereich durch die Permanentmagnetanordnung auf $\pm 15^\circ$ in ϕ -Richtung eingeschränkt. Dies bedeutet bei einem Impuls von 400 MeV im Fermi-Gas-Modell eine Reduktion des Raumwinkels um 34% für den Nachweis von Nukleonen.
- Die auf Energien bis 185 MeV eingeschränkte Energieakzeptanz der BGO-Detektoren reduziert die Nachweiswahrscheinlichkeit für Protonen um weniger als 10%.
- Etwa 12% des inklusiven Wirkungsquerschnitts der Reaktion $^{12}\text{C}(e, e')$ im quasielastischen Bereich beruht auf der Reaktion $^{12}\text{C}(e, e'n)$. Dies ergeben Abschätzungen des longitudinalen und transversalen Anteils am Wirkungsquerschnitt durch Extrapolation auf diesen kinematischen Bereich mit der Methode des *y-scaling* [Finn-84].
- Etwa 1,5% des Wirkungsquerschnitts beruhen nach den in Abbildung G.4 gezeigten Messungen auf Reaktionen des Typs $^{12}\text{C}(e, e'd)$.

Hierdurch reduziert sich der erwartete Wirkungsquerschnitt von 30 nb auf etwa 15,5 nb, d. h. es fehlen im quasielastischen Peak noch etwa 40%.

Die Position der Permanentmagnetanordnung relativ zur Streuebene ist aufgrund ihres Einflusses auf Raumwinkelakzeptanz vor Beginn der Experimentes präzise justiert worden.

Ein Teil der Protonen könnte durch zufällige Koinzidenzen der gestreuten Elektronen im Spektrometer mit anderen niederenergetischen Teilchen¹³ in der Plastik- oder der BGO-Komponente in ihrer Signatur verfälscht worden sein. Insbesondere die Plastikkomponente der Phoswich-Detektoren reagiert bei der Protonenidentifikation auf kleine zusätzliche Energien unterhalb der Diskriminatorschwelle sehr empfindlich. Kleine Energieänderungen im Plastiksintillator können die Protonenidentifikation im Bereich kleiner ΔE -Signale, die zu Protonen mit Energien größer als 185 MeV gehören und nicht mehr im BGO gestoppt werden, verwerfen. Die freie Rate von Ereignissen über der Diskriminatorschwelle lag in den Frontdetektoren bei 180 kHz. Die Gesamtrate einschließlich der Anteile unterhalb der Schwelle dürfte deutlich höher gelegen haben. Die ΔE -Spektren (z.B. Abb. 5.12) zeigen, daß ein stärkerer Beitrag nur im oben geschilderten Bereich von Protonenenergien größer als 185 MeV zu erkennen ist. Dort könnten kleine Signale unterhalb der Schwelle die Protonenidentifikation verwerfen. Eine Abschätzung auf der Basis der Zeitfensterlängen und der Raten im BGO-Detektor ergibt einen Korrekturfaktor von weniger als 10%.

Daher verbleibt ein Anteil von über 30% des inklusiven Wirkungsquerschnitts im quasielastischen Bereich, der im Rahmen dieser Messungen nicht allein durch Einzelnukleonemissionen erklärt werden kann. Rechnungen [Rans-95] zur *final state interaction* (FSI) zeigen im quasielastischen Bereich lediglich eine Reduktion der zu erwartenden Protonen durch Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung um etwa 10%.

¹³pile up

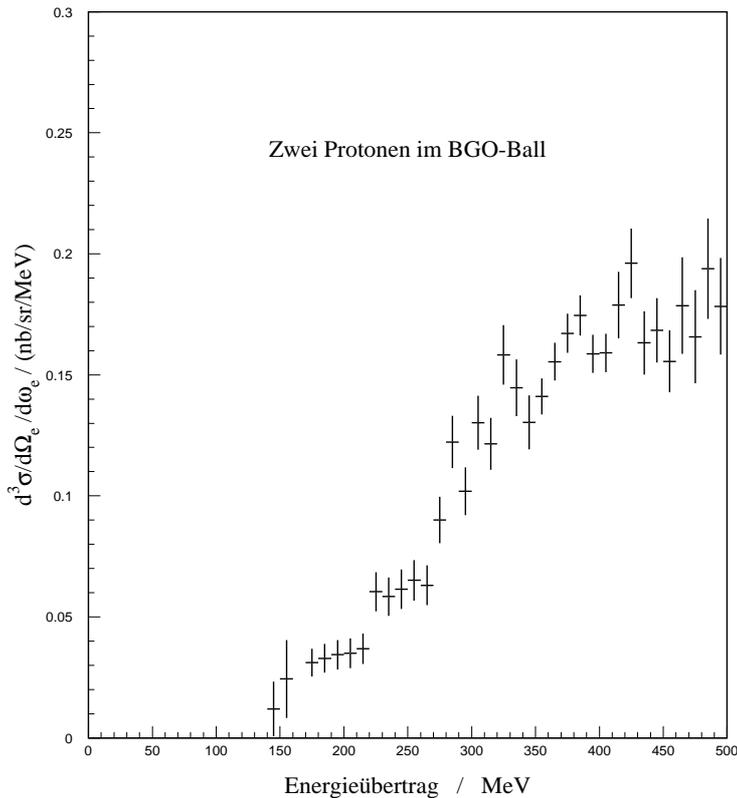


Abb. 5.25:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e'pp)$ in der Akzeptanz des BGO-Detektors, der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

Der Wirkungsquerschnitt in Abbildung 5.25 steigt ab etwa 150 MeV an und scheint bei etwa 400 MeV Energieübertrag ein Maximum zu erreichen. Wie erwartet ergab die Messung von $^{12}\text{C}(e, e'pp)$ eine Unterdrückung des quasielastischen Peaks. Da der Wirkungsquerschnitt an dieser Stelle nicht vollständig Null ist, deutet dies auf einen nicht resonanten Untergrund für zwei Protonereignisse hin. Dieser Untergrund dürfte im wesentlichen durch $(n \rightarrow p)$ Ladungsaustausch aus der Reaktion $^{12}\text{C}(e, e'pn)$ hervorgerufen werden.

Fehlende Energie

Eine andere Methode der Untersuchung des Kohlenstoffkerns liegt in der Messung der fehlenden Energie (*missing energy*). Man definiert die *missing energy* für ein koinzidentes Ereignis als die Differenz der Energie des einlaufenden Elektrons (E_{in}) abzüglich der Endenergie des gestreuten Elektrons (E_{out}) und der gemessenen Hadronen (T_p). Für ein nachgewiesenes Proton lautet die Formel:

$$E_{miss} = E_{in} - E_{out} - T_p$$

Die folgenden Spektren sind mit einer Phasenraumsimulation bezüglich der Energie- und Raumwinkelakzeptanzen korrigiert worden. Die Simulation basiert auf vereinfachenden Annahmen über der geometrischen Form der BGO-Detektorkugel und der räumlichen Anordnung der Permanentmagnete [Edel-96].

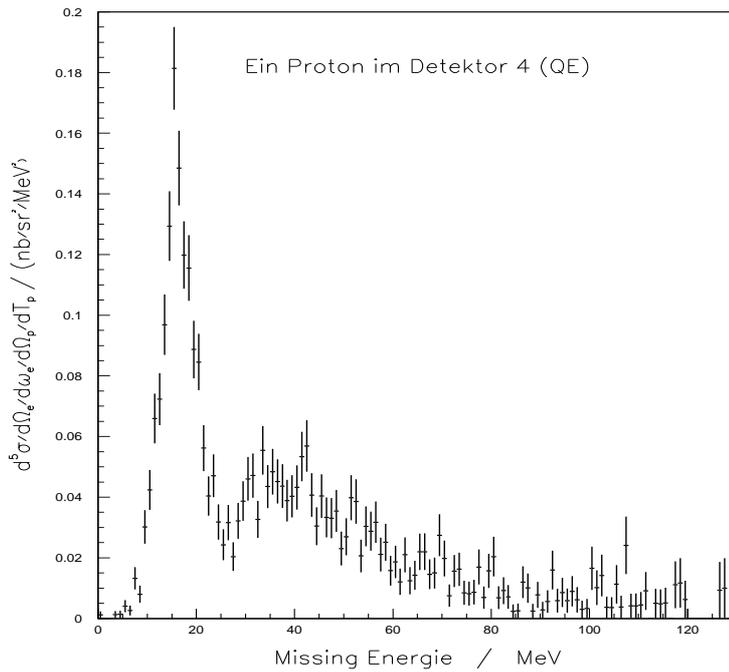


Abb. 5.26:
missing energy im
quasielastischen Be-
reich ($50 < \omega < 160$) für $^{12}\text{C}(e, e'p)$
im Detektor Nr. 4,
der mittlere Spek-
trometerwinkel θ lag
bei 31.4° , die Strahl-
energie betrug 705 MeV

Zusätzlich werden die Schwellen und die begrenzte Energieakzeptanz der BGO-Kristalle berücksichtigt. Die Simulation wird zur Zeit durch GEANT-Rechnungen hinsichtlich des Energieverlustes, der Schauerentwicklung innerhalb der Detektoren sowie der exakten Anordnung der Detektoren im Raum verbessert.

Die Strahlungskorrekturen der gemessenen *missing energy*-Spektren konnten

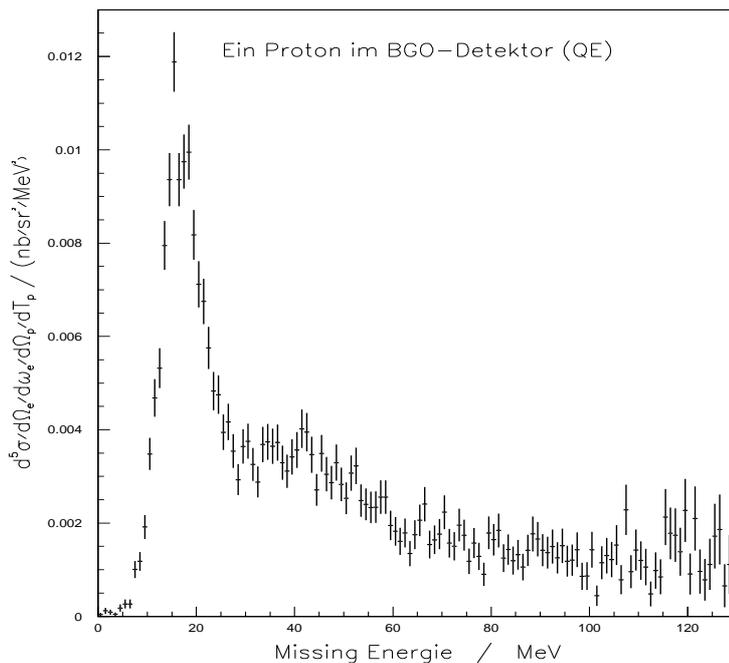


Abb. 5.27:
Mittlere *missing ener-
gy* im quasielasti-
schen Bereich ($50 < \omega < 160$) für $^{12}\text{C}(e, e'p)$,
der mittlere Spek-
trometerwinkel θ lag
bei 31.4° , die Strahl-
energie betrug 705 MeV

nicht durchgeführt werden, da durch die geringe Winkelauflösung des BGO-Detektors der Impuls der Hadronen praktisch unbekannt ist. Andere Messungen [Kest-95, Lour-86] zeigen, daß der Einfluß der Strahlungskorrekturen auf die *missing energy*-Spektren relativ gering ist. Größere Korrekturen ergeben sich lediglich für den Peak bei 16 MeV. Dies bewirkt im Gegenzug eine entsprechende Abschwächung der Beiträge zum Kontinuum bei höheren Energien. Die Abbildung 5.27 zeigt die mittlere *missing energy* für die Emission eines Protons im quasielastischen Bereich ($50 \text{ MeV} < \omega < 160 \text{ MeV}$) in den BGO. Zu erkennen ist der relativ schmale Peak bei 16 MeV, der dem Herausschlagen eines Protons aus der $1p_{3/2}$ -Schale entspricht.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Zielsetzung dieser Arbeit war die Entwicklung der Datenverarbeitung für die Dreispektrometeranlage der A1-Kollaboration. Die Aufgabe bestand vor allem in der Konzeption, dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Experimentsteuerungssystems.

Die dezentrale Struktur der Spektrometeranlage und der Einsatz moderner VMEbus-Rechner machten ein neues Datenerfassungssystem für die geplanten Dreifachkoinzidenzexperimente erforderlich. Nachdem die Grundlagen des Datenerfassungssystems MECDAS entwickelt und in ersten Experimenten erfolgreich getestet worden waren, wurde aufgrund der Komplexität der Spektrometeranlage die Notwendigkeit eines Experimentkontrollsystems deutlich. Die Aufgabe des Steuerungssystems liegt in der präzisen und reproduzierbaren Einstellung jedes einzelnen Parameters sowie der gleichzeitigen Überwachung aller Zustandsänderungen der Spektrometeranlage. Die verzweigte Struktur der Anlage legte den Aufbau des Steuerungssystems in Klienten/Server-Architektur nahe. Dazu wurden VMEbus-CPU's als Frontendrechner zum direkten Hardwarezugriff in Kombination mit schnellen Hintergrundrechnern eingesetzt. Die heterogene Rechneranordnung erforderte ein netzwerkweites Nachrichtenübermittlungssystem zur Kommunikation der einzelnen Steuerungsobjekte und eine schnelle Datenbank zu ihrer Initialisierung. Nach der Auswahl der benötigten Schnittstellen zur Ansteuerung der Hardware wurden Schnittstellenumsetzer zum standardisierten Zugriff des Steuerungssystems auf die einzelnen Geräte entwickelt. Darauf aufbauend konnten mit den Methoden der objektorientierten Programmierung schrittweise parallel arbeitende Geräte-Handler für komplexe Regel- und Einstellvorgänge der unterschiedlichen Gerätegruppen erstellt werden. Zum kontrollierten Starten und Stoppen der Prozesse wurde ein datenbankbasierendes Prozeßverwaltungssystem integriert. Als Benutzerschnittstellen zu den Geräte-Handlern wurden graphische Benutzeroberflächen zur intuitiven Bedienung an Arbeitsplatzrechnern und zeichenorientierte Benutzeroberflächen zur Bedienung an Textterminals erstellt. Vom zentralen Status-Server werden die aktuellen Zustandsinformationen den Benutzeroberflächen und Statusmonitoren zur Darstellung, der Datenerfassung und Datenbank zur Speicherung zur Verfügung gestellt.

Das Steuerungssystem wird zur Durchführung aller kernphysikalischen Experimente an der Spektrometeranlage verwendet. Das erste Experiment war die Messung der Multihadron-Produktion an ^{12}C mit einer BGO-Kristallkugel. Hierzu mußte die gesamte BGO-Detektorelektronik aufgebaut und an die Spektrometeranlage angepaßt werden. Anschließend wurden die einzelnen BGO-Detektoren in elastischer Kinematik am Wasserstoff bei einer Elektronenstrahlenergie von 705 MeV geeicht. Danach folgten die eigentlichen Messungen bei einem Spektrometerwinkel von $34,4^\circ$ und einem maximalen Strahlstrom von 40 nA. Aufgrund

der großen Impulsakzeptanz des Spektrometers A ($\pm 10\%$ relativ zum Zentralimpuls) konnte der gesamte Bereich des Energieübertrages an den Kohlenstoffkern zwischen $\omega = 50$ MeV und $\omega = 500$ MeV in sechs überlappenden Einstellungen untersucht werden.

Die Auswertung zeigt die inklusiven und semi-exklusiven Wirkungsquerschnitte für $^{12}\text{C}(e, e'X)$ ($X = p, pp$) innerhalb der geometrischen Akzeptanzen der BGO-Kristallkugel. Zum Test der Methoden zur Energiekalibration sind zusätzlich *missing energy*-Spektren aus dem quasielastischen Bereich analysiert worden.

Besonders bei der Anbindung der unterschiedlichen kinematischen Bereiche konnte durch das dafür entwickelte Experimentsteuerungssystem eine hohe Präzision erreicht werden. Gleichzeitig wurde die exzellente Strahlqualität des Elektrodendauerstrichbeschleunigers MAMI demonstriert. Allerdings wurden die BGO-Detektoren aufgrund ihrer geringen Targetentfernung (6 cm) durch niederenergetischen Untergrund bis an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit belastet. Alles in allem zeigte sich, daß trotz komplizierter Meßapparatur mit Hilfe des Experimentsteuerungssystems eine einfache Handhabung und ein kontinuierlicher Betrieb über längere Meßperioden möglich ist.

Literaturverzeichnis

- [Bagh-89] Baghaei, H. et al., Phys. Rev. C39, (1989) 177
- [Barr-83] Barreau, P. et al., Nucl. Phys. A402, (1983) 515-540
- [Booc-91] Booch, Grady *Object oriented design with applications*. The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., Redwood USA, 1991
- [Brun-88] Brun, R. et al., *PAW Physic Analysis Workstation*, Cern Computer Center, 1988
- [Corb-91] Corbin, John R., *The Art of Distributed Applications*, Springer-Verlag, New York, 1991
- [Dist-90] Distler, M. O. *Aufbau und Test einer vertikalen Driftkammer*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1990
- [Edel-96] Edelhoff, R., Dissertation in Vorbereitung, Inst. f. Kernphysik, Universität Mainz
- [ErWe-88] Ericson, T. and Weise, W. *Pions and Nuclei*, Clarendon Press, Oxford 1988
- [Esse-88] Essel, H.G., *GOOSY Data Aquisition and Analysis*, GSI, Darmstadt 1988
- [Finn-84] Finn et al., Phys. Rev. C 29.6, (1984) 2230
- [Frie-75] Friedrich, J., NIM 129, (1975) 550
- [Hake-93] Hake, A., *Softwarewerkzeuge zur Steuerung an MAMI-Experimenten*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1993
- [Herm-76] Herminghaus, H. et al., *The design of a cascaded 800 MeV Normal Conduction CW Race Track Microtron*, Nucl. Instr. Meth. 138, 1976
- [Kest-95] Kester, L. et al., Phys. Rev. Letters 74, (1995) 1712
- [Klei-87] Klein, S., *CAROLA (camac routines for offline analysis)*, Institut für Kernphysik Mainz, 1987
- [Korn-88] Korn, M. *Eine BGO-Detektoranordnung für $(e, e'\gamma)$ -Messungen in der Dipol-Riesenresonanz von ^{12}C* , Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1988
- [KPH-93] Geiges, R., A. Hake, V. Kunde, C. Martin, St.Steffens, *Beschreibung der Datenbankstrukturen für das ECS*, 1993
- [Kram-91] Kramer, H., *WILLIX — Using and Programming*, Interner Report EDV/KPH Mainz, 1991
- [Kram-92] Kramer, H., *Das NMR-System der Spektrometer*, Jahresbericht 1990/91 Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1992

- [Kram-95] Kramer, H., *Grundlagen für das Steuerungs- und Überwachungssystem der Drei-Spektrometer-Anlage am Elektronenbeschleuniger MAMI*, Inst. f. Kernphysik, Universität Mainz, 1995
- [KrMe-92] Kramer, H., K. Merle, *MUPIX — a Portable Message-System for Distributed Experiment Control Systems*, Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy Physics'92, Annecy, France
- [Kryg-96] Krygier, K.W., Dissertation in Vorbereitung, Inst. f. Kernphysik, Universität Mainz
- [Kund-88] Kunde, V., *Aufbau eines Datenerfassungssystems für Vielparameterexperimente und dessen Erprobung an MAMI-A*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1988
- [Kund-91] Kunde, V., *Die Hardware des Experiment-Kontroll-Systems*, Interner Report A1-EDV, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1991
- [Kund-92] Kunde, V., *Experiment Control System (ECS), Version 1.2*, Interner Report EDV/KPH, 1992
- [Leo-94] Leo, W.R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer Verlag, 1994
- [Lipp-91] Lippman, S., *C++ Primer 2nd Edition*, Addison-Wesley, 1991
- [Lour-86] Lourie, R.M. et al., Phys. Lett. 56, (1986) 2364
- [Mart-93] Martin, C., *Implementation und Test der A1-Targetsystemsoftware und Integration ins Gesamtsystem für die Kontrolle von (e, e'p)-Messungen*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1993
- [Mitt-49] Mitchell, K., Phil. Mag 40, (1949) 351
- [Mitt-92] Mittwich, D., *Entwicklung und Erprobung eines Hochfrequenzmonitors zur Messung der Intensität und Lage eines 855 MeV Elektronenstrahls*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1992
- [Morr-92] Morris, Ch., *Private Mitteilung*, 1992
- [MoTs-69] MO, L.W., Y.S. TSAI, *Radiative Corrections to Elastic and Inelastic ep and μp Scattering*, Rev of Mod. Phys. 41.1, (1969) 205
- [Offe-93] Offermann, E., *Private Mitteilung*, 1993
- [Penn-77] Penner, S., *Nuclear structure physics, Proceedings of the 18th Scottish University Summer School in Physics 1977*, edited by S.J. Hall and J.M. Irvine
- [Posp-96] Pospischil, T., Dissertation in Vorbereitung, Institut für Kernphysik, Universität Mainz

- [Rans-90] Ransome, R.D. et al., Phys. Rev. Lett. 64, (1990) 372 and Phys. Rev. C42, (1990) 1500
- [Rans-93] Ransome, R.D., *Private Mitteilung*, 1993
- [Rans-95] Ransome, R.D., *Private Mitteilung*, 1995
- [RaTa-80] RadiativeTail, *Program for the radiative tail corrections to the electron-scattering cross section*, University of Virginia, 1980, based on Rev of Mod. Phys. 41.1, (1969), EQ. B.5
- [Rich-95] Richter, A., *Trennung des longitudinalen, transversalen und longitudinal-transversal interferierenden Anteils des Wirkungsquerschnitts der Reaktion $H(e, e' \pi^+)$ in der Nähe der Pionschwelle*. Dissertation, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1995
- [Scha-95] Schardt, S. *Aufbau und Erprobung der Drei-Spektrometer-Anordnung für Koinzidenzexperimente mit Elektronen am 855 MeV-Elektronenbeschleuniger MAMI*, Dissertation, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1995
- [Schi-51] Schiff, L.I., *Bremsstrahl Formel*, Phys. Rev. 83, (1951) 252
- [SchH-94] Schilling, H.G., Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1994
- [Stef-93] Steffens, S., *Entwicklung und Erprobung einer „X-Window“-Benutzeroberfläche zur rechnergesteuerten und -kontrollierten Durchführung von Koinzidenzexperimenten an MAMI*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1993
- [Tvm-93] Kramer, H., C. Martin, *Tvm744++ - Treibersoftware*, Interner Report A1-EDV, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1993
- [Wein-90] Weinstein, L.B. et al., Phys. Lett. 64, (1990) 1646
- [Wein-94] Weinstein, L.B., G.A. Warren Phys. Rev. C 50, (1994) 350
- [Wolf-96] Wolf, S., Dissertation in Vorbereitung, Institut für Kernphysik, Universität Mainz
- [Yada-96] Yadav, M., Dissertation in Vorbereitung
- [Zond-92] Zondervan, A., *Two-nucleon correlation processes studied with the reactions $^{12}\text{C}(e, e'p)$ and $^{12}\text{C}(e, e'pp)$* , Dissertation, NIKHEF-K, 1992

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gesamtansicht der Dreispektrometeranlage	5
2.2	zeigt die spiegelsymmetrische Abbildung der Hardwarestrukturen durch die Softwarekomponenten auf das Steuerungssystem	9
2.3	Rechnerkonfiguration des Steuerungssystems	11
2.4	Struktur der Magnetobjekte mit den zugehörigen Feldern	12
2.5	Struktur des Experimentsteuerungssystems mit Hardwaregeräten und den korrespondierenden Softwarekomponenten (Geräte-Handler)	13
2.6	Struktur einer typischen Regelung im Experimentsteuerungssystem . . .	14
2.7	Beispiel für die logische Adressierung über strukturierte Namen innerhalb des Experimentsteuerungssystems	16
2.8	Struktur der verschiedenen Ebenen des Experimentsteuerungssystems im Vergleich zum OSI-Schichtenmodell	18
2.9	Auftragsbearbeitung im Experimentsteuerungssystem	20
2.10	Aufbau und Struktur der Frontenddatenbank am Beispiel der Elektromagneten der Spektrometeranlage mit den eingesetzten Netzgeräten vom Typ MPS8000	25
2.11	Datenmodellierung des Experimentkontrollsystems im Entity-Relationship-Modell	27
2.12	Netzwerkanbindung der relationalen Datenbank INGRES an die Programme der Experimentsteuerung	28
2.13	Struktur des Status-Server-Systems mit den wichtigsten Standardklienten (in der unteren Bildhälfte) zur Ausgabe der Statusinformationen und den verschiedenen Gruppen von Geräte-Handlern (in der oberen Bildhälfte), die die Zustandsänderungen melden	30
3.1	Struktur der Dreispektrometeranlage mit den zugehörigen Geräten . . .	33
3.2	Darstellung der Zustände und ihrer Übergänge für einen Magnet-Handler. Die dunkel unterlegten Rechtecke stellen Zwischenzustände aus dem und in den Grundzustand <i>Bereit</i> dar. Die Rauten bilden Verzweigungspunkte, welche Entscheidungen in Abhängigkeit vom Magnettyp oder der Größe der Zustandsänderung symbolisieren	35
3.3	Zeitverlauf der Stromänderungen für Dipole und Quadrupol von Spektrometer C beim Durchlaufen einer großen Schleife. Die langen Zeiten für Feldänderungen sind zum Abklingen der induzierten Wirbelströme notwendig	36
3.4	Komponenten des Magnetspektrometers A	37
3.5	Auftragsbearbeitung innerhalb eines Magnet-Handlers durch Zerlegung in Unterzustände; die Zustandsübergänge werden durch internes Senden induziert	38

3.6	Aufbau der Prozeßverwaltung der Dreispektrometeranlage mit dem zentralen Prozeßserver. Auf der Workstation a1c werden Prozeßklienten unter den verschiedenen Benutzern (<i>specca</i> , <i>specb</i> , ...) gestartet. Sie verwalten die spektrometerspezifischen hardwareunabhängigen Prozesse. Die Frontendrechner besitzen unter der korrespondierenden Benutzerumgebung nur die spektrometerspezifischen Prozeßklienten zur Kontrolle der hardwareabhängigen Steuerungsprozesse	44
3.7	Struktur der Aufteilung des Steuerungssystems auf verschiedene Rechner mit den auf Schnittstellenumsetzern basierenden Sensor-/Aktorobjekten. Die Schnittstellenumsetzer mit direktem Hardwarezugriff befinden sich auf den Frontendrechnern. Die Sensor-/Aktorobjekte sind entsprechend der benötigten Rechenleistung bzw. der Anforderungen an intensive Kommunikation über die Workstations bzw. Frontendsysteme verteilt	46
3.8	Struktur des parallelen Busses	48
3.9	VMEbus-CAMAC-Zugriff	50
3.10	Baumstruktur des Magnetspektrometers A als Grundlage für die Bedienung durch die graphische Bedienoberfläche	53
3.11	Einstellung des Magnetspektrometers A über die graphische Bedienoberfläche	55
5.1	Kinematik der Reaktion $A(e, e'p)$ in der Streuebene	66
5.2	Kinematik der $(e, e'p)$ -Reaktion. Die Dreier-Vektoren \vec{k}_i und \vec{k}_f spannen die Streuebene auf, die Vektoren \vec{p}_p und \vec{q} die Reaktionsebene	68
5.3	Experimentaufbau mit Magnetspektrometer A und BGO-Kristallkugel	69
5.4	Schnitt durch Spektrometer A, Seitenansicht [Lies-95]	71
5.6	Aufbau eines Plastik-BGO-Phoswich-Detektors und Position eines Vorwärtsdetektors relativ zum Target	73
5.7	Integrationszeitpunkt und -dauer der verschiedenen Signalkomponenten der BGO-Kristalle	73
5.8	Meßelektronik der BGO-Kristallkugel	74
5.10	Definition der Achsen des schiefwinkligen Koordinatensystems in den Koordinaten des entkoppelten Systems	79
5.11	Geometrische Darstellung der verwendeten Transformation in das rechtwinklige Koordinatensystem	80
5.13	Kinematik der Eichstrahlzeit. Die Strahlenergie E_{in} betrug 705 MeV, der Spektrometerwinkel Θ_e war 28°	81
5.16	Kinematik der Eichstrahlzeit. Die Strahlenergie E_{in} betrug 705 MeV, der Spektrometerwinkel Θ_e war 58°	83
5.19	Struktur der Reaktionen, die Beiträge zu Strahlungskorrekturen durch Abstrahlung eines reellen Photons vor (a) beziehungsweise nach (b) der Streuung (Infrarotbeiträge) sowie durch Vertexkorrektur (c) und Vakuum-polarisation (d) liefern	89
C.1	Darstellung der Zahl „1“ im Speicher einer DEC-Workstation mit DECMIPS-Architektur und nach dem Transport über ein Netzwerk im Speicher eines VMEbus-Rechners mit M68K-Architektur	117

C.2 Definition der verwendeten Symbole im Entity–Relationship–Modell . . . 119

Tabellenverzeichnis

2.1	Auszug der Konfigurationstabelle mit den zugehörigen Attributen	28
3.1	Art und Anzahl der wichtigsten Geräte mit dem Aufstellungsort innerhalb der Spektrometeranlage und ihre Aufgaben und Schnittstellen innerhalb des Experimentkontrollsystems	34
3.2	Art und Anzahl der wichtigsten Geräte zur Steuerung der Detektorsysteme mit ihrer Schnittstelle und Funktion innerhalb der Spektrometeranlage	39
3.3	Art und Anzahl der Geräte zur Targetsteuerung mit ihren Funktionen und Schnittstellen	42
3.4	Geräte zur Strahlüberwachung des A1-Strahlführungssystems mit Funktionen und Schnittstellen	43
3.5	Schnittstellenumsetzer des Experimentkontrollsystems	45
5.1	Kinematiken der 93-er BGO-Strahlzeiten. Die Strahlenergie \vec{k}_i betrug 705 MeV, der Spektrometerwinkel θ_e war 34.4 °. ω bezeichnet den Energieübertrag, $ \vec{q} $ den Betrag des Impulstransfers, Q^2 das negative Quadrat des Viererimpulsübertrags, ϵ_T die transversale Polarisation des virtuellen Photons	77
C.1	Der Kopf des Steuerungsprotokolls	116
C.2	Datenteil einer Nachricht	116

Anhang A

Start des Steuerungssystems

Die grundlegenden Aufrufe zum Start des Experimentsteuerungssystems liegen in Form von „shellscripts“ vor. Sie sind notwendig, um die Basisprozesse zu aktivieren. Das zentrale Skript liegt im Verzeichnis */users/kpha1/trigger/shellscripts*.

Start der zentralen Prozesse:

Als Benutzer *trigger* wird das Skript

- *shellscripts/Start_ECS*

ausgeführt.

Das Skript benötigt zur Ausführung folgende Standardbetriebsmittel:

- eine funktionierende TCP/IP-Verbindung vom zentralen Steuerungsrechner zu allen aktiven Rechnern des Steuerungssystems,
- eine Verbindung zum NFS¹-Server zum Laden der Steuerungsprogramme.

Durch das Skript werden die zentralen Prozesse zur Kommunikation innerhalb der Steuerung und das Datenbanksystem aktiviert. Die Datenbank enthält alle weiteren Informationen zum Start und zum Betrieb der Experimentsteuerung. Die einzelnen Komponenten des Steuerungssystems werden anschließend innerhalb des Steuerungssystems durch den zentralen Prozeß-Handler und die Klienten auf den einzelnen Rechnern des Steuerungssystems (*alc*, *speka*, *spekb*, *spekc*, *floor*) gestartet.

Alle hardwareunabhängigen Prozesse sollten nicht auf den Frontendrechner, sondern auf dem zentralen Steuerungsrechner (zur Zeit *alc*) oder einer anderen Workstation gestartet werden.

Folgende Prozesse müssen nach dem Ausführen des Skripts auf dem zentralen Steuerungsrechner vorhanden sein:

Prozeß	Bedeutung
<i>namserv</i>	Kommunikationsserver
<i>opcon</i>	Zentraler Status-Server
<i>dbinit</i>	Datenbankprozeß
<i>proc_server</i>	Zentraler Prozeßserver
<i>opterm</i>	Ausgabe der Prozeßstatusmeldungen
<i>opconsole</i>	Ausgabe der Prozeßfehlermeldungen

Zusätzlich muß für jedes aktivierte Subsystem ein Prozeß *proc_client* aktiv sein, der die entsprechenden Prozesse dieser Gruppe startet und überwacht.

Nachdem das Basissystem bereit ist, können die spezifischen Gerätetreiber akti-

¹network file system

viert werden. Sie werden als Benutzer *trigger* mittels des Befehls *start_device ...* aktiviert.

1. *spec*a/magnet, *spec*a/vdc, *spec*a/trigger, *spec*a/vac, *spec*a/colli
2. *spec*b/magnet, *spec*b/vdc, *spec*b/trigger, *spec*b/vac, *spec*b/colli
3. *spec*c/magnet, *spec*c/vdc, *spec*c/trigger, *spec*c/vac, *spec*c/colli
4. *target*, *target/cryo*
5. *beam/current*, *opdisp*

Durch das Starten der Prozesse über den Prozeßserver wird das Mehrfachstarten von Programmen verhindert. Daher kann im Falle eines Programmabsturzes die entsprechende Komponente des Steuerungssystems einfach neu gestartet werden. Ein wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang sind die Probleme mit dem CAMAC-Zugriff über die Datenerfassung. Während der Meßruns kann die Funktionsfähigkeit des Steuerungssystems nur bei einwandfreier Synchronisation der CAMAC-Zugriffe garantiert werden. Dies bedeutet insbesondere, daß Probleme des Datenerfassungsprozesses auf dem Frontendrechner die Steuerung behindern können.

Falls einzelne Komponenten des Steuerungssystems deaktiviert werden sollen, erfolgt dies analog zu *start_device ...* durch *stop_device* Das Basissystem der Steuerung sollte immer aktiv sein und muß am Ende der Messungen nicht gestoppt werden. Zur Vermeidung von Alarmen durch abgeschaltete Geräte sollten jedoch die Ruheparameter der Spektrometeranlage eingestellt werden. Hierdurch ist es möglich, die Anlage dauernd zu überwachen und die Zustände in der Datenbank zu archivieren. Das Stoppen des gesamten Steuerungssystems vor dem Ausschalten der Rechner erfolgt über das Skript *Stop_ECS* auf der *alc*.

Interaktiver Zugriff auf das Steuerungssystem

xopdisp

Für die graphische Bedienoberfläche *xopdisp* existieren in der Datenbank vordefinierte Listen, die zur Steuerung und Überwachung einzelner Gerätegruppen dienen. Sie werden über den Aufruf *xopdisp-device <listen_name>* oder als Benutzer *trigger* über vordefinierte Maustasten aufgerufen. Die folgende Tabelle zeigt die zur Zeit bereits erstellten Menüs:

Menü-Name	Bedeutung
speca	komplette Struktur des Spektrometers A
speca/magnet	Struktur des Magnetsystems
speca/trigger	Struktur des Triggerdetektorsystems
speca/vdc	Struktur der Driftkammersteuerung
specb	komplette Struktur des Spektrometers B
specb/magnet	Struktur des Magnetsystems
specb/trigger	Struktur des Triggerdetektorsystems
specb/vdc	Struktur der Driftkammersteuerung
specc	komplette Struktur des Spektrometers C
specc/magnet	Struktur des Magnetsystems
specc/trigger	Struktur des Triggerdetektorsystems
specc/vdc	Struktur der Driftkammersteuerung

Zugriff auf den Status-Server

Ein zentraler Prozeß des Steuerungssystems ist der Status-Server *opcon*. Die Benutzeroberflächen erhalten von ihm alle Zustandsänderungen der Geräte des Experimentsteuerungssystems. Erläuterungen zum *opcon* sind in der Dokumentation *WILLIX* zu finden. Der Zugriff auf den Status-Server kann durch jeden eingetragenen Nutzer des Steuerungssystems (z.B. als Benutzer *trigger*) erfolgen, hierzu sind die Programme *opconsole* und *opterm* erstellt worden. Sie geben ihre Meldungen auf Textbildschirme aus; natürlich kann ihre Ausgabe auch in eine Datei umgeleitet werden. Das Programm *opconsole* druckt alle Sondermeldungen des Steuerungssystems, die der Status-Server *opcon* erhält, wohingegen das Programm *opterm* alle regulären Statusmeldungen anzeigt. Über den letzten Parameter von *opterm* kann ein spezieller Teil der Statusmeldungen herausgefiltert werden, *.** z. B. bedeutet, daß alle Statusmeldungen angezeigt werden sollen. Die Syntax der Programme lautet:

```
opconsole -d <domain name>
```

```
opterm -d <domain name> ".*"
```

Die Ausgaben des Programms *opconsole* erscheinen in folgender Syntax:

```
<Meldung> <Treiber-Name> <Selector> /* <Kommentar> */ <Uhrzeit>  
      <Datum> <Aktion> <Wert(e)>
```

Anhang B

Struktur der Datenbank

config/init File

Die Adressierungsinformation für das Messagesystem sind in den Files *config* und *init* enthalten.

Im File *config* sind alle aktuell vorhandenen, logischen Geräte eingetragen, die zu diesem physikalischen Prozeß gehören.

```
#
#       Tvm740 on Top of Spektrometer B
#
specb/vdc/hv1/potwire/u/get
#       channel 1
specb/vdc/hv1/potwire/i/get
#       channel 2
specb/vdc/hv1/cathode/u/get
#       channel 3
specb/vdc/hv1/cathode/i/get
#       channel 4
specb/vdc/preamp/threshold/get
#       channel 5
specb/vac1
#       channel 7
specb/vac2
#       channel 8
specb/vdc/gas/ar/flow/get
#       channel 9
specb/vdc/gas/iso/flow/get
#       channel 10
specb/vdc/gas/aralc/flow/get
#       channel 9
specb/vdc/gas/iso/flow/get
#       channel 10
specb/vdc/gas/aralc/flow/get
#       channel 11
specb/vdc/hv2/potwire/u/get
#       channel 13
specb/vdc/hv2/potwire/i/get
#       channel 14
specb/vdc/hv2/cathode/u/get
#       channel 15
```

```
specb/vdc/hv2/cathode/i/get
#                channel 16
```

Jeder Eintrag (d.h. jede Zeile) im *config*-File entspricht einem logischen Gerät, wobei Zeilen, die mit einem „#“ beginnen Kommentare beinhalten und überlesen werden. Für jeden Eintrag versucht die Datenbank, eine Datei *init* im angegebenen Verzeichnis zu lesen. Die *init* Datei besitzt folgende Struktur:

- sie kann wiederum beliebig viele Zeilen Kommentar (# am Zeilenanfang) enthalten
- sie enthält Zuordnungsblöcke, die mit dem Schlüsselwort BEGINREC am Zeilenanfang beginnen. Sie werden abgeschlossen mit ENDREC und dürfen nicht von Kommentaren (#) unterbrochen werden.

Die einzelnen Komponenten der Struktur werden in beliebiger Reihenfolge eingelesen. Am Zeilenanfang steht das Schlüsselwort, z.B. MSGNAME, dann der Wert dieser Variablen. Anschließend kann ein beliebiger Kommentar folgen (dritte und weitere Komponenten der Zeile).

```
BEGINREC
SUBADDR 3                /* sub address */
ACTION  READ             /* action */
FIELD   BIT              /* fieldName */
VALUE   0.0              /* value */
PREC    100.0            /* precision in % */
MIN     0.0              /* min value */
MAX     1.0              /* max value */
SCALE   1.0              /* scaling factor */
SECLVL  0                /* security level */
DIM     [boolean]        /* dimension of value */
MSGNAME specb/vdc/gas/ar/pr/get /* message system name */
LOGNAME dev/digi/digi2   /* path of the physical device */
POLL    60
SNDNAME logger
ENDREC
```

Werden bestimmte Werte in der *init* Datei nicht gesetzt oder ist keine *init* Datei in dem von der *config* Datei spezifizierten Verzeichnis, so werden die numerischen Felder standardmäßig auf -1, bzw. bei Zeichenketten auf leere Zeichenketten, gesetzt. Es gibt zwei Ausnahmen:

- falls die Variable MSGNAME nicht gesetzt ist, wird sie auf den Namen des Verzeichnisses eingestellt, in welchem sich die *init* Datei befindet.
- falls die Variable SECLVL nicht gesetzt wird, wird sie automatisch auf 5 eingestellt.

Anhang C

Protokoll des Steuerungssystems

C.1 Aufbau des Protokolls

Beschreibung der Datenstrukturen des Protokolls

Im Steuerungssystem wird eine Nachricht in zwei Teile gegliedert. Den ersten Teil bildet der Kopf der Nachricht, er besteht aus einer einfachen Struktur (siehe Tabelle C.1), die Informationen über die Nachricht enthält. Der zweite Teil beschreibt die Daten. In der Struktur wird die Gesamtlänge der Nachricht eingetragen. Dies ermöglicht bei Aufspaltung der Nachricht in mehrere Pakete zu kontrollieren, ob die gesamte Nachricht eingetroffen ist. Die Struktur enthält zudem ein Feld, in dem der Typ des verwendeten Protokolls eingetragen wird, um so die Nutzung verschiedener Steuerungsprotokolle mit diesem Protokollkopf zu ermöglichen. Dies könnte bei späteren Erweiterungen des Systems notwendig werden. Ein weiterer Eintrag in dieser Struktur ist die Auftragsnummer, anhand derer eine eindeutige Zuordnung zwischen Auftrag und Antwort möglich ist. Andere Parameter zur Charakterisierung der Nachricht als Auftrag, Antwort oder Fehlermeldung können als Flaggen mitgeschickt werden. Mit diesen Flaggen kann aber auch mitgeteilt werden, ob eine Antwort auf einen Auftrag erwartet wird oder nicht. Der Datenteil der Protokollstruktur besteht aus dem Feld des Absenders, dem Feld des Empfängers der Nachricht, der Sicherheitstufe des Absenders der Nachricht, einer Information, ob die Daten im maschinenunabhängigen Format verpackt sind, und einer Struktur, welche die eigentlichen Daten der Nachricht enthält (siehe Tabelle C.2). Die eigentliche Datenstruktur beinhaltet als letzten Teil der Adressierungsinformation die Aktion. Sie definiert, welche Funktion angesprochen wird um den Auftrag auszuführen. Weiterhin wird in dieser Struktur eine Information über die verwendete Datentypklasse der Nachricht gespeichert. Es gibt zwei Datentypklassen: für Datenbankanfragen wird eine Nachricht der Klasse `MSG_aKDBorder` verwendet; der Datentyp `MSG_aBasicData`, dessen Basisdatentyp `aBasicData` ist, wird beim Austausch von Nachrichten zwischen Gerätetreibern verwendet.

Die maschinenunabhängige Verpackung der Daten

Auf den verschiedenen Rechnerarchitekturen werden unter Umständen die gleichen Datentypen unterschiedlich dargestellt. So wird die Zahl „1“ auf einem Rechner mit *little endian*-Architektur¹ [Corb-91] (z.B. eine DEC-Workstation) in ei-

¹Die kleinste Speicheradresse enthält das niederwertigste Byte einer Integer-Zahl

Gesamtlänge der Nachricht									
eindeutige Auftragsnummer									
S	N	A	P	E	B	ST	C	T	(unbenutzt)
verwendeter Protokolltyp								Maximale Wartezeit	

Tab. C.1: Der Kopf des Steuerungsprotokolls

Dabei bedeuten die Flaggen:

- S MSG_SENDAKN : es wird eine Antwort auf den Auftrag erwartet
- N MSG_NOACKN : es wird keine Auftragsbestätigung erwartet
- A MSG_ACKN : Nachricht ist eine Antwort auf einen Auftrag
- P MSG_PREACKN : Nachricht, daß die Antwort später kommt
- E MSG_ERROR : Benachrichtigung über einen bei der Auftragsbearbeitung aufgetretenen Fehler
- B MSG_BUSY : Zur Zeit mit einem anderen Auftrag beschäftigt
- ST MSG_STOP : Auftrag zum Stoppen des Prozesses
- C MSG_CONT : Auftrag zur Reaktivierung eines gestoppten Prozesses
- T MSG_TIMER : Nachricht stammt von einem Timer

Feld des Absenders	Selektor des Adressaten
Sicherheitsstufe	Nachricht verpacken oder nicht
Struktur mit den eigentlichen Daten der Nachricht	

Tab. C.2: Datenteil einer Nachricht

ner Byte-Folge dargestellt, die auf einem Rechner mit *big endian*-Architektur² (Motorola M68K-Prozessoren, wie sie in den VMEbus-Systemen eingesetzt werden) als $2^{24} = 16777216$ interpretiert wird (siehe Abbildung C.1). Die Steuerungsdaten müssen daher zum Versenden in ein maschinenunabhängiges Format kodiert werden. Nur so ist sichergestellt, daß die Daten auf den verschiedenen, zur Kontrolle der Experimente eingesetzten, Rechnerarchitekturen identisch sind. Die Verpackung der Daten folgt mittels XDR, wie bereits im Abschnitt 2.4.4 eingeführt, dem Standard der *external data representation*, der eine einheitliche Darstellung der Daten und eine Sprache, mit der auch komplexe Datenstrukturen in einheitlicher Weise beschrieben werden können, festlegt [Corb-91]. Der XDR-Standard setzt voraus, daß Bytes transportiert werden können. Er legt eine bestimmte Byte-Anordnung (*big endian*), eine Darstellung für Gleitkommazahlen (nach IEEE) und einige weitere Darstellungen fest. Ein Programm, das auf einem beliebigen Rechner abläuft, kann mit der Verpackung der lokalen Daten nach dem XDR-Standard maschinenunabhängige Daten erzeugen, die von einem beliebigen, anderen Programm auf dem gleichen oder einem anderen Rechner ge-

²Die kleinste Speicheradresse enthält das höchstwertige Byte eines Integers

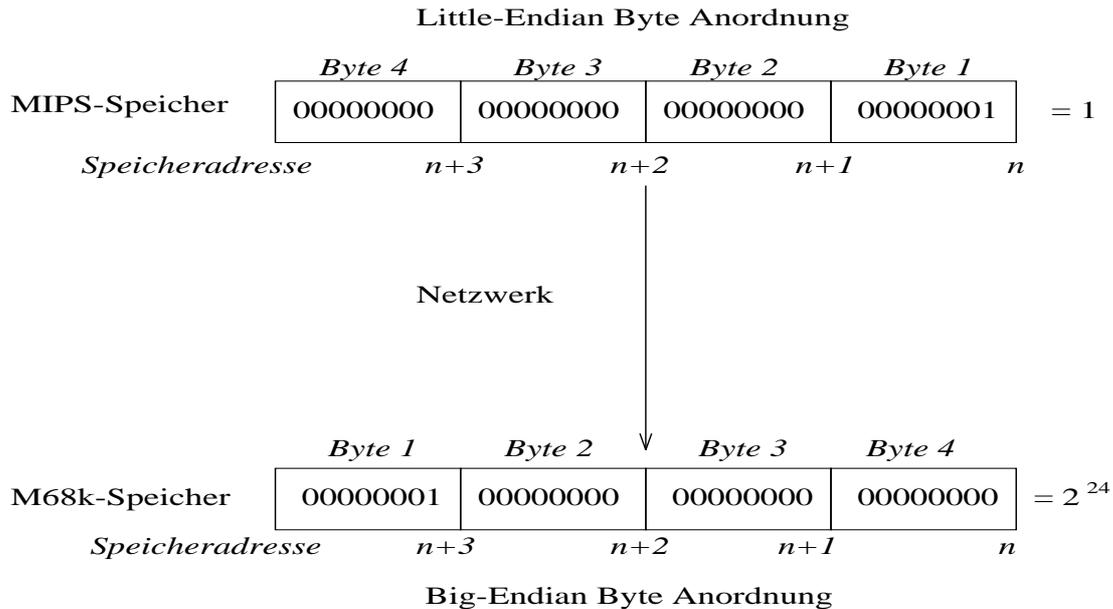


Abb. C.1: Darstellung der Zahl „1“ im Speicher einer DEC-Workstation mit DEC-MIPS-Architektur und nach dem Transport über ein Netzwerk im Speicher eines VMEbus-Rechners mit M68K-Architektur

lesen und dekodiert werden können. Die Festlegung des XDR-Standards erfolgte in Anlehnung an die in den Netzwerkprotokollen (TCP/IP, UDP/IP, Ethernet) festgelegten Standards. Der Vorteil der Benutzung eines solchen Standards liegt darin, daß neue Programme, die auf einem anderen Rechner oder mit einem anderen Compiler erzeugt wurden, nur diesen Standard kennen müssen, um mit den anderen Programmen Daten austauschen zu können. Hierzu werden Routinen für die Grunddatentypen benutzt, die nur einmal für einen Rechnertyp geschrieben werden müssen. Der Nachteil besteht darin, daß Programme, die auf Rechnern des gleichen Typs oder sogar auf demselben Rechner Daten austauschen, überflüssigen Verpackungsaufwand haben. Die für die Dekodierung aufzuwendende Zeit ist jedoch speziell bei Netzwerkbetrieb vernachlässigbar; die meiste Zeit wird benötigt, um die Daten durch die verschiedenen Netzwerkprotokollschichten zu transportieren. Die im XDR definierten Datentypen sind ein vielfaches von vier Bytes, d.h. alle zu kodierenden Daten müssen auf eine Blockgröße von vier Bytes angepaßt werden, indem sie eventuell mit Null-Bytes aufgefüllt werden. Diese Blockgröße ist sehr effektiv, da fast alle Rechnerarchitekturen intern diese Blockgröße benutzen. Die Blockgröße ist ein Kompromiß für bestmöglichen Datendurchsatz auf allen Architekturen ohne übermäßig viel Speicher zu verbrauchen. Die Routinen zum Verpacken der Basisdatentypen (ganze Zahl, Gleitkommazahl, Zeichen, etc.) stehen als Bibliothek zur Verfügung. Aus diesen Verpackungsroutinen wurden die Funktionen zum Kodieren der spezifischen Daten der Experimentsteuerung und der Protokollstrukturen des Experimentsteuerungssystems aufgebaut. Die Funktionen zum Verpacken der Datentypen, deren Basisdatentyp *aBasicData* ist, sind bereits bei der Kommunikation mit dem *opcon* verwendet worden und werden auch zur Interprozeßkommunikation eingesetzt. Die gesamte Struktur für einen Auftrag wird mit der neu entwickelten

Funktion *ecsMsg_code_prot()* in einen Datenpuffer verpackt. Diese Funktion kann aber auch einen Datenpuffer in die Auftragsstrukturen dekodieren. Sie stellt damit die oberste Ebene der Verpackungsroutinen dar und verbirgt die Details der Kodierung vollständig.

Senden und Empfangen von Nachrichten im Steuerungssystem

Mit der Funktion *mpx_open()*, die vom Message-Passing-System zur Verfügung gestellt wird, teilt ein Prozeß die Bereitschaft mit an der Kommunikation im Messagesystem teilzunehmen. Hierzu meldet er sich beim Nameserver des Messagesystems an, der alle miteinander kommunizierenden Prozesse kennen muß. Der gesamte Vorgang des Versendens eines Auftrags und des Empfangens der Antwort auf einen Auftrag wird in der Funktion *ecsMsg_work()* zusammengefaßt. Sie stellt einen *Remote Procedure Call*³ dar. In dieser Funktion werden die Adressinformationen und die Daten eines Auftrags in die Protokollstrukturen einsortiert. Der Auftrag wird mit der Funktion *ecsMsg_send()* verschickt, welche die Funktionen *ecsMsg_code_prot()* zum Verpacken der Nachricht und *mpx_sendto()* zum Senden der Nachricht aufruft. Anschließend wird in dieser Funktion in einer Schleife, in der Nachrichten mit der falschen Auftragsnummer abgewiesen werden, auf die Antwort des Auftrages gewartet. Die Antwort wird mit der Funktion *mpx_recvfrom()* empfangen, anschließend durch Aufruf der Funktion *ecsMsg_code_prot()* ausgepackt und schließlich von der Funktion *ecsMsg_recv()* in Form der verwendeten Protokollstrukturen zur Verfügung gestellt. Auf der Empfängerseite wird der Auftrag mit der Funktion *ecsMsg_get_work()* empfangen, die die Funktion *ecsMsg_recv()* aufruft und den Auftrag durch Aufruf der Funktion *ecsMsg_code_prot()* auspackt. Die Antwort wird durch *ecsMsg_ackn_work()* verschickt, nachdem der Auftrag abgearbeitet wurde. Der Ablauf des Versendens eines Auftrags mit der Funktion *ecsMsg_work()*, Empfang des Auftrags und das Zurücksenden der Antwort mit der Funktion *ecsMsg_ackn_work()* ist in Kapitel 2, Abbildung 2.9 skizziert. Die Funktionen zum Versenden und Empfangen einer Nachricht wurden so aufgeteilt, daß damit spezielle Anforderungen, wie sie z.B. bei der Benutzung im *xopdisp* entstanden sind, erfüllt werden können. Zum Beispiel verbindet die Sendefunktion *ecsMsg_send()* das Verpacken einer Nachricht in ein maschinenunabhängiges Format durch den Aufruf der Funktion *ecsMsg_code_prot()* mit dem Versenden der Nachricht im Message-Passing-System durch Aufruf der Funktion *mpx_sendto()*. Die Empfangsroutine *ecsMsg_recv()* liest eine Nachricht mit Hilfe der Funktion *mpx_recvfrom()* in einen Nachrichten-Puffer und ruft anschließend die Funktion *ecsMsg_code_prot()* zum Dekodieren auf. Die Funktionen *ecsMsg_work()* und *ecsMsg_send_work()* zum Verschicken eines Auftrags und die Funktion *ecsMsg_ackn_work* zum Senden einer Antwort benutzen die Funktion *ecsMsg_send()*. Die Dokumentation ist auch „online“ verfügbar und enthält eine kurze Beschreibung der Funktionen, die zur

³Aufruf einer Funktion, die sich nicht im Adreßraum des aufrufenden Prozesses befindet [Corb-91]

Umsetzung der älteren Protokollstrukturen entwickelt wurden. Mit Hilfe dieser Funktionen war es möglich, die existierenden Gerätetreiber ohne wesentliche Änderungen weiterhin zu verwenden.

C.2 Entity–Relationship–Modell

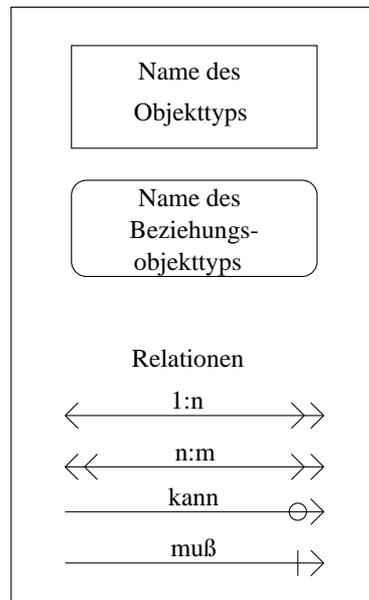


Abb. C.2: Definition der verwendeten Symbole im Entity–Relationship–Modell

Begriffsbestimmung der Beschreibung eines Datenmodells mit Objekttypen (Datentypen) und Beziehungen im Entity–Relationship–Modell.

- **Objekt:**
Konkrete Daten in einer durch den Objekttyp definierten Struktur
- **Objekttyp:**
Definiert eine Klasse gleichartiger Daten (Objekte). Er definiert für diese eine einheitliche Struktur und legt durch seine Einbettung in ein Entity–Relationship–Modell deren mögliche Verknüpfungen mit anderen Daten fest
- **Beziehung:**
Repräsentiert die in einem Datenmodell erlaubten Zusammenhänge zwischen Objekten
- **Beziehungsart:**
Legt für beide an einer Beziehung beteiligten Objekttypen fest,
 - mit wieviel anderen Objekten ein Objekt verknüpft sein kann (1:1, 1:N, N:M)
 - ob ein Objekt überhaupt mit einem anderen verknüpft sein muß (Optionalität)
- **Beziehungsobjekttyp:**
Repräsentiert eine Beziehung zwischen zwei Objekttypen, die

- beidseitig optional oder
- eine N:M Beziehung ist
- Attribute:
Dienen der Identifizierung, der Charakterisierung und der Klassifizierung von Objekten
- Entity-Relationship-Modell:
Ist die modellhafte und anwendungsorientierte Darstellung der Objekte der Realität mit ihren Beziehungen und Eigenschaften. Ein Entity-Relationship-Modell wird in folgenden Beschreibungsebenen dargestellt:
 - Entity-Relationship-Diagramm (graphische Darstellung der Objekttypen eines Datenmodells und ihre Beziehungen zueinander)
 - Definition von Objekttypen und ihren Beziehungen
 - Definition der inneren Struktur (Attribute) von Objekttypen

Anhang D

Schnittstellenumsetzer

D.1 Allgemeine Struktur

Schnittstellenumsetzer sind Treiberprogramme mit direktem Hardwarezugriff. Sie bilden die standardisierte Schnittstelle zwischen dem Steuerungssystem und den zu steuernden Geräten. Die Hardwarezugriffe erfolgen auf zwei verschiedene Arten:

- VMEbus-Ein/Ausgabekarten auf den Frontendrechnern
- V24-Terminalserver mittels remote *telnet*

Die Datenbankinitialisierung der Geräte-Handler

Die Grundinitialisierungsinformationen (z.B. über die Hardware, benutzte Device-treiber, spezielle Konfigurationen u.ä.) sind im Datenbankrecord `hw_conf` beschrieben. Im Datenbankrecord `<dev/driver/driver1/config>` der physikalischen Treiber werden die Namen der jeweiligen logischen Gerätetreiber gesetzt, welche der Prozeß zur Laufzeit repräsentieren soll. Die folgenden Informationen sind im Datenbankrecord `< Instanzname > /init` zusammengefaßt.

MakroName	Wertebereich	Erläuterung	Status
SECLVL	0 - 9	Sicherheitslevel für den Zugriff	default = 5
SUBADDR	0 - 255	interne Gerätenummer	optional
MIN	Double	Erlaubter Minimalwert	optional
MAX	Double	Erlaubter Maximalwert	optional
DIM	String	Dimension der Geräteeinheit (z.B mV)	optional
MSGNAME	String	Instanzname	dir name
SNDNAME	String	Name des zentralen Datenloggers	default logger
LOGNAME	String	logischer Name des Treiberprogramms	optional
POLL	-1, 1 - 3600	Pollfrequenz der Applikation	optional

Die Treiberprogramme müssen nicht explizit initialisiert werden, da dies automatisch beim ersten Zugriff erfolgt. Falls nach dem Start eines Treiberprogramms die Initialisierungsinformation in der Datenbank geändert wird, muß die entsprechende Instanz neu geladen werden. Dies erreicht man durch `adjust -o PROCESS -a TERM <name>`, hierdurch löscht die entsprechende Instanz ihre internen Tabellen und initialisiert sich beim nächsten Zugriff neu.

D.2 ADC–Schnittstellenumsetzer

TVM740

Das Programm in Abschnitt F.3 erlaubt die Ansteuerung eines ADC–Moduls vom Typ TVM740. Das ADC–Modul ermöglicht die Messung von bis zu 32 bipolaren, differentiellen Spannungssignalen im Bereich von -10 bis $+10$ Volt. Die Grundeinstellung des VMEbus–Moduls erfolgt mittels Jumpers auf der VMEbus–Karte [Kund-91].

Benutzerschnittstellenspezifikation:

Feld	Aktion	in–Datentyp	out–Datentyp
PHYSVALUE	GET	aBasicData	aPhysicalData
PHYSVALUE	MINVALSET	aPhysicalData	aBasicData
PHYSVALUE	MAXVALSET	aPhysicalData	aBasicData
PHYSVALUE	RANGECHECK	aBasicData	aSwitch

Übersetzungstabelle			
Felder		Aktionen	
Name	Wert	Name	Wert
PHYSVALUE	3	GET	2
		MINVALSET	4
		MAXVALSET	5
		RANGECHECK	6

Schnittstellenspezifikation für den interaktiven Zugriff:

Feld	Aktion	Text	Darstellungstyp
PHYSVALUE	GET	show_physvalue	aPhysDataDispWidget
PHYSVALUE	MINVALSET	set_min_alarm_value	aPhyDataWidget
PHYSVALUE	MAXVALSET	set_max_alarm_value	aPhyDataWidget
PHYSVALUE	RANGECHECK	test_alarm	aOnOffDisplayWidget

MakroName	Wert
DEVICE.LEN	1
DEVICE.INCREMENT	1.0
DEVICE.NUMDIGITS	5
DEVICE.PRECISION	3

Die Datenbankinitialisierung

MakroName	Datentyp	Wert	Erklärung
IOSEGSIZE	int	2048	Größe des VMEbus-Adreßraumes
PHYSADDR	hex	FFFF0400	VMEbus-Adresse
BIPOLAR	int	1	bipolare Signale
LSB	double	9.6	Wert des least signifikant bit (mV)
AVERAGE	int	16	Anzahl der Messungen für Mittelwert
GAIN	int	0	Verstärkung des Eingangssignals

Die Funktionsweise

Der Geräte-Handler *tvm740* besteht aus zwei Teilen:

1. dem Schnittstellenumschalter. Er öffnet beim ersten ADC-Zugriff auf dem VMEbus ein Fenster der Größe IOSEGSIZE beginnend an der Adresse PHYSADDR. Die Kommunikation des Prozesses mit dem ADC erfolgt über die Programmierung von vier Ein-/Ausgabekontrollern auf dem TVM740-Modul. In der Startphase des Handlers werden zusätzlich alle Hardware-Kontroller initialisiert. Beim Lesezugriff auf einen ADC-Kanal wird ein relativ komplexer Vorgang angestoßen. Zuerst wird der entsprechende Kontroller mit der angesprochenen Kanalnummer, der Verstärkung GAIN und der zugehörigen Ausleseverzögerung geladen. Danach wird die Messung gestartet, der Handler wartet auf das Ende der Umwandlung. Anschließend wird der gemessene Wert aus dem Kontroller gelesen und zwischengespeichert. Der gesamte Vorgang wird AVERAGE-Mal wiederholt und gemittelt. Dies ist erforderlich, da der ADC sehr schnell konvertiert (ca. $1\mu\text{S}$) und die zu messenden Gleichspannungen meist eine überlagerte Wechselspannung (Brumm) besitzen. Diese Maßnahme reicht allerdings nicht in allen Fällen aus, sodaß es empfehlenswert ist, am Eingang des ADCs mit geeigneter Zeitkonstante zu integrieren (Kondensator). Das ADC-Modul erlaubt zusätzlich die Überwachung der Funktionalität des ADCs. So können auf den Kanälen 32 bis 38 Referenzspannungen und die Modultemperatur ausgelesen werden (F.3, [Kund-92]). Der ADC-Kanal 32 ist auf den logischen Kanal 39 umgelegt worden.
2. dem Geräte-Handler. Er erlaubt bis zu 32 eigenständigen Objekten den direkten Zugriff und die Kontrolle jeweils eines Kanals des Schnittstellenumschalters. Jedes dieser Objekte kann datenbankgesteuert den Zustand eines Gerätes anhand des ausgelesenen Gerätezustandes bewerten und gegebenenfalls einen Alarm an die Zustandsdatenbank melden. Der Alarm wird ausgelöst, wenn der MIN-Wert unter- bzw. der MAX-Wert überschritten wird. Der aktuelle Zustandswert ergibt sich als Funktion der am ADC anliegenden Spannung, wobei die Funktion ein Polynom bis zum Grade fünfzehn sein kann. Hierdurch ist es möglich, die Geräte direkt im physikalisch relevanten Bereich anzusprechen. Die Benutzerschnittstelle des *tvm740* erlaubt die nachträgliche Anpassung der MIN- und MAX-Werte (MINVALSET, MAXVALSET)

jedes einzelnen Kanals. Zusätzlich zur periodischen Überprüfung des IST-Wertes, kann die Überprüfung der einzelnen Objekte auch asynchron durch interaktiven Zugriff erfolgen (RANGECHECK).

D.3 Digital-Eingabe/Ausgabe-Schnittstenumsetzer

TVM744

Das Programm *tvm744* erlaubt die Ansteuerung des VMEbus Digital-Eingabe/Ausgabe-Moduls vom Typ TVM744. Das Modul ermöglicht, das Einlesen von 40 und das Setzen von 32 binären Zuständen.

Benutzerschnittstellenspezifikation:

Feld	Aktion	in-Datentyp	out-Datentyp
BIT	GET	aInstruction	aInstruction
BIT	SET	aInstruction	aInstruction
WORD	GET	aInstruction	aInstruction
WORD	SET	aInstruction	aInstruction

Übersetzungstabelle			
Felder		Aktionen	
Name	Wert	Name	Wert
BIT	16	GET	2
WORD	17	SET	3

Die Datenbankinitialisierung:

MakroName	DataType	Wert	Erklärung
IOSEGSIZE	int	4096	Größe des Adreßraumes
PHYSADDR	hex	FFFF0800	VMEbus-Adresse

Die Funktionsweise

Die Module werden im activ-low Mode betrieben, d.h. ein gesetzter Kanal entspricht null Volt, andernfalls liegen fünf Volt an. Entsprechendes gilt für die Eingänge. Die Grundeinstellung des VMEbus-Moduls erfolgt mittels Jumpers auf der VMEbus-Karte [Kund-91]. Alle 40 Eingänge sind optogekoppelt und in Vierergruppen galvanisch getrennt. Auch die 32 Ausgänge sind optogekoppelt und liegen geräteseitig auf einem Potential.

Der Schnittstenumsetzer öffnet beim ersten Zugriff auf einen der Ein-/Ausgabe-Kanäle auf dem VMEbus ein Fenster der Größe IOSEGSIZE an der Adresse PHYSADDR. Die Kommunikation des Prozesses mit dem VMEbus-Modul erfolgt

über die Programmierung von vier Ein-/Ausgabekontrollern auf dem TVM744-Modul. Beim ersten Zugriff auf einen Eingabe/Ausgabe-Kanal werden die Controller initialisiert. Die Einstellung mehrerer Kanäle erfolgt sequentiell durch Programmierung der entsprechenden Controller. Der WORD-Zugriff wird durch 16-maligen BIT-Zugriff simuliert. Dies hat Konsequenzen für die Nutzung des Moduls als Treiber eines parallelen Busses, die einzelnen Ports werden von Kanal 1 bis 16 beim ersten WORD und von Kanal 17 bis 32 beim zweiten WORD geschaltet. Da die einzelnen Bits nicht gleichzeitig anstehen, ist es unumgänglich auf dem Bus ein Protokoll einzuhalten. Durch die Verwendung eines *data ready* oder *strobe* Bits wird den angesteuerten Geräten signalisiert, daß die anliegenden Daten auf dem Bus gültig sind. Der parallele Zugriff ist durch die notwendige Sequentialisierung relativ langsam. Um dies zu kompensieren, speichert der Schnittstellenumsetzer den letzten Zustand jedes einzelnen Kanals. Der Ausgangspegel wird nur geschaltet, wenn der einzustellende Wert ungleich dem eingestellten Zustand ist. Dies bedeutet, daß das Modul nur für pegelsensitive Geräte einsetzbar ist. Die Software kann aber sehr leicht auch auf die Verwendbarkeit für flankensensitive Schnittstellen erweitert werden.

SML

Das Programm *sml* erlaubt die Ansteuerung von bis zu 31 Mikrocontrollern vom Typ SML¹. Mit bis zu acht Digital-Eingabe/Ausgabe-Modulen ermöglicht ein Controller das Setzen und Einlesen von jeweils bis zu 64 binären Zuständen.

Benutzerschnittstellenspezifikation:

Feld	Aktion	in-Datentyp	out-Datentyp
BIT	GET	aIntChannel	aIntChannel
BIT	SET	aIntChannel	aBasicData
BYTE	GET	aIntChannel	aIntChannel
BYTE	SET	aIntChannel	aBasicData
WORD	GET	aIntChannel	aIntChannel
WORD	SET	aIntChannel	aBasicData
LONGWORD	GET	aIntChannel	aIntChannel
LONGWORD	SET	aIntChannel	aBasicData

Übersetzungstabelle			
Felder		Aktionen	
Name	Wert	Name	Wert
BIT	16	GET	2
BYTE	38	SET	3
WORD	17		
LONGWORD	39		

¹Serial Modul Link

Die Datenbankinitialisierung

MakroName	DataType	Wert	Erklärung
PORTNUMBER	int	3002	Portnummer des Terminalservers
HOSTNAME	string	skpale	Internetname des Terminalservers
INPUT_CHAN	int	4	Anzahl der 8-Bit breiten Digitaleingänge
OUTPUT_CHAN	int	4	Anzahl der 8-Bit breiten Digitalausgänge
RELAIS_CHAN	int	0	Anzahl der Relaisausgänge
CONTR_NUMBER	int	8	Nummer des SML-Kontrollers

D.4 DAC-Schnittstellenumsetzer

MPV904

Das Programm erlaubt die Ansteuerung eines DAC-Moduls vom Typ MPV904. Die Module können in verschiedenen Modes betrieben werden (Jumperstellung: siehe [Kund-91]). Damit mehrere, verschiedene Applikationen nebeneinander auf dem DAC laufen können, liegt die Ausgangsspannung im Bereich von 0 – 10 Volt. Das Benutzerinterface dieses Treiberprogramms ermöglicht folgende Zugriffe:

Feld	Aktion	Erläuterung
PHYSVALUE	SET	Setzen eines Kanals
PROCESS	INIT	Initialisierung der Instanz
PROCESS	TERM	Deinitialisierung der Instanz

Die Grundinitialisierungsinformation (z.B. Hardware) wird im Datenbankrecord hw_conf beschrieben:

MakroName	DataType	Wert	Erläuterung
IOEGSIZE	int	4096	Größe des I/O-Segments
PHYSADDR	hex	FFFF0000	VMEbus Basisadresse
FULL_RANGE	double	10.0	maximaler Bereich
NEG_FULL_SCALE	double	-5.0	untere Grenze

D.5 CAMAC–Schnittstellenumsetzer

CAMDRVR

Das Programm erlaubt die CAMAC–Ansteuerung über ein CES–Interface (z.Z. ist lediglich der indirekte Zugriff von anderen Programmen implementiert).

Das Benutzerinterface dieses Treiberprogramms ermöglicht folgende Zugriffe:

Feld	Aktion	Erläuterung
PHYSVALUE	SET	Setzen eines CamacRequests
PHYSVALUE	GET	Lesen eines CamacRequest
PROCESS	INIT	Initialisierung der Instanz
PROCESS	TERM	Deinitialisierung der Instanz

Die Grundinitialisierungsinformation (z.B. Hardware) wird im Datenbankrecord `hw_conf` beschrieben:

MakroName	DataType	Wert	Erläuterung
IOSEGSIZE	hex	00010000	Größe des I/O–Segments
PHYSADDR	hex	FF800000	VMEbus Basisadresse

Anhang E

Geräte–Treiber

Sie können auf jedem an das Steuerungssystem angeschlossenen Rechner laufen. Die Grundinitialisierungsinformation (z.B. Hardware) wird im File hw_conf beschrieben.

E.1 Magnet

MAGNET

Das Programm erlaubt die Ansteuerung eines Sextupol-/Quadrupol-/Dipol-Magneten. Es erwartet standardmäßig (d.h. in der Datenbank konfigurierbar), daß folgende Handler aktiv sind:

Instanzname	Devicetype
<name>/current	(MPS8000)
<name>/hall	(HALL)
<name>/water	(WATER)

Das Benutzerinterface dieses Handlerprogramms ermöglicht folgende Zugriffe:

Feld	Aktion	Erläuterung
ONOFF_SOLL	SET	Einschalten des Magneten (Strom)
ONOFF_IST	GET	Lesen des Einschaltzustandes (Ist) des Magneten
Feld_SOLL	SET	Setzen des Magnetfeld Sollwertes (+Einstellung)
Feld_SOLL	GET	Lesen des Magnetfeld Sollwertes
Feld_IST	GET	Lesen des Magnetfeld Istwertes (über Strom)
HALL_IST	GET	Lesen des Magnetfeld Istwertes (über Hallsonde)
NMR_IST	GET	Lesen des Magnetfeld Istwertes (über Nmrsonde)
STATUS	GET	Lesen des Magnetstatus
PROCESS	INIT	Initialisierung der Instanz
PROCESS	TERM	Deinitialisierung der Instanz

PT2025

Ein thermischer Leistungsmesser ¹ ermöglicht die Messung des Strahlstroms mittels zweier Hochfrequenzlage- und Strommonitore [Mitt-92], die fest in der A1-Beamline installiert sind. Die Aufgabe der Monitore besteht in der Messung der Intensität und Lage des Elektronenstrahls. Zu diesem Zweck werden die Resonatoren auf die Bunchfrequenz des Elektronenstrahls abgestimmt, wobei der Mode

¹NRVD Rohde & Schwarz

so gewählt ist, daß die ausgekoppelte Leistung unabhängig vom Strahlort ist. Die Monitore werden mit Hilfe eines separaten Kühlwasserkreislaufs auf konstanter Temperatur gehalten, da die Resonanzfrequenz stark ($-59 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$) von der Temperatur abhängig ist. Zusätzlich wird die Temperatur des Resonators über einen Platinmeßwiderstand auf $\pm 0.1^\circ\text{C}$ genau gemessen. Dadurch kann gegebenenfalls die gemessene Leistung temperaturkorrigiert werden.

Der Geräte-Handler zur Strahlstrommessung erlaubt zum einen den direkten Zugriff auf die Einzelkavitäten, wobei der Leistungsmesser intern über zehn Sekunden integriert und mittelt. Der Handler *powmeter* liest die Leistung der Resonatoren aus und errechnet anhand einer gemessenen Kurve (in der Datenbank unter `beam/current[1,2]/hw_conf`) den aktuellen Strahlstrom. Zum anderen erlaubt das Programm den Zugriff auf die seit dem letzten Software-Reset gemittelten Ströme.

Der Zugriff auf den Leistungsmesser erfolgt über RS232 mittels *v24handler* [Hake-93] auf einen RS232 nach IECbus Umsetzer². Zur Ansteuerung des Umsetzers wurde die Bibliothek *GPIB232CT* erstellt, die den einfachen Zugriff auf den IECbus über einen solchen Controller erlaubt. Der Zugriff auf den Leistungsmesser und damit auf den Strahlstrom erfolgt für den Geräte-Handler transparent.

Die Leistungsmerkmale sind:

- automatische Messung des relativen Strahlstroms mit zwei Kavitäten
- interne Integration des Stroms über einen beliebigen Zeitraum
- konfigurierbar über die Datenbank des ECS
- Ansteuerung über das Messagesystem
- interaktive Bedienung über alle Steuerungsinterfaces
- kann als Hintergrundprozeß *daemon* gestartet werden

E.2 Trigger

MOD4413

Das Programm erlaubt die Ansteuerung eines LeCroy 4413 Camac-ECL-Diskriminators. Es erwartet standardmäßig, daß der Camac-Driver aktiv ist.

Das Benutzerinterface dieses Handlerprogramms ermöglicht folgende Zugriffe:

²GPIB232CT National Instruments

Feld	Aktion	Erläuterung
REMOTE	SET	Gerät remote schalten
LOCAL	SET	Gerät local schalten
TEST	SET	Testimpulse erzeugen
MASK	SET	Maske der benutzten Kanäle setzen
MASK	GET	Maske der benutzten Kanäle lesen
THRESHOLD	SET	Setzen der Schwelle
THRESHOLD	SET	Lesen der Schwelle
PROCESS	INIT	Initialisierung der Instanz
PROCESS	TERM	Deinitialisierung der Instanz

MOD4508

Das Programm erlaubt die Ansteuerung einer LeCroy4508 Camac-PLU (programmable logical unit). Es erwartet standardmäßig, daß der Camac-Driver aktiv ist.

Das Benutzerinterface dieses Handlerprogramms ermöglicht folgende Zugriffe:

Feld	Aktion	Erläuterung
RAM	SET	Lookup Tabelle setzen
RAM	GET	Lookup Tabelle lesen
LATCH	GET	Lesen des Latch Eingangs
PROCESS	INIT	Initialisierung der Instanz
PROCESS	TERM	Deinitialisierung der Instanz

MOD4032a

Das Programm erlaubt die Ansteuerung von bis zu 16 Hochspannungsüberrahmen über das Camac-Interface Mod2132. Das Benutzerinterface dieses Handlerprogramms ermöglicht folgende Zugriffe:

Feld	Aktion	Erläuterung
ON_OFF	SET	HV einschalten
PHYSVALUE	GET	Spannungen einlesen
PHYSVALUE	SET	Spannungen einstellen
PRESET	GET	Preset-Spannungen einlesen
PRESET	SET	Preset-Spannungen einstellen
PROCESS	STATUS	Lesen des Status
PROCESS	INIT	Initialisierung der Instanz
PROCESS	TERM	Deinitialisierung der Instanz

Dieses Interface existiert für jede im Datenbankrecord *config* eingetragene Instanz des Gerätes. Weiterhin existieren für jede Instanz zwei Initialisierungsdatenbankrecords. Diese werden mit dem Programm *edit* erstellt bzw. modifiziert.

Die Schlüssel sind:

<InstanzName>	value	Default	aChannelArray
<InstanzName>	value	Soll	aChannelArray

Die Anzahl der Elemente des Datentyps muß mit dem Makro

MakroName	Datentyp	Wert
DATALEN	int	32

in dem Datenbankrecord <speka/trigger/hv/hw_conf> übereinstimmen.

Folgende Makros müssen in dem Datenbankrecord des Treiberprozesses (dies ist der Pfad, mit welchem das Programm gestartet wurde) <dev/hv/hv?/hw_conf> gesetzt sein.

MakroName	DatenTyp	Wert	Erläuterung
SLAVENAME	string	camwritel	msgname des Slave-Prozesses
BRANCH	int	1	Branch-Nummer des Le_Croy 2132
CRATE	int	1	Crate-Nummer des Le_Croy 2132
LOCATION	int	20	Stations-Nummer des Le_Croy 2132

Der Treiber erwartet standardmäßig, daß der Camac-Driver (SLAVENAME) aktiv ist. Die Zuordnung der internen logischen Kanälen (von 1 bis n, ohne Zwischenräume) zu den externen Kanalnummern erfolgt im Datenbankrecord <dev/hv/hv?/?/mod4032a>. Auch hier muß die Anzahl der Einträge mit DATALEN übereinstimmen. Die Struktur ist:

| log. Kanal | FrameNumber | phys. Kanal |

Das Programm-Modul besteht aus verschiedenen Segmenten:

- dem physikalischen Interface
 - 1. logischer Kanal (ab Kanal 1 aufsteigend)
 - Frame Nummer (z.B. 16)
 - physikalischer Kanal (ab Kanal 0 aufsteigend)
- dem physikalischen Hochspannungsversorgungsgerät, das logisch aus dem File mod4032a gebildet wird. In ihm wird die Hochspannungsänderungsgeschwindigkeit (RAMP 1 entspricht 500V/s) der Hochspannungsversorgung und die Zuordnung von logischen zu physikalischen Kanälen vorgenommen. Es können bis zu 16 Hochspannungsversorgungsübernahmen direkt angesprochen werden, wobei für jeden verwendeten Übernahmen (rückwärts von 16 bis 1) ein Datenbankrecord im *init*-File existieren muß. Als Objekttypen stehen ON_OFF, PHYSVALUE UND PRESET, sowie die Aktionen READ und WRITE zur Verfügung.

- dem logischen Interface
 - das logische Hochspannungsversorgungsgerät wird analog zum physikalischen Gerät gebildet (File mod4032a), es können (bis zu 8) logische Gruppen angesprochen werden. Es gibt die Objekttypen ON_OFF, PHYSVALUE UND PRESET, sowie die Aktionen READ und WRITE. Für jede Gruppe muß ein Datenbankrecord im *init*-File der entsprechenden (z.B. specb/trigger/hv) Directory existieren.

E.3 Driftkammer

Wire

Initialisierung

MakroName	Typ	Erläuterung
RAMPSPEED	int	Rampgeschwindigkeit in Volt pro Sekunde
GETCURRENT	string	MSG Name zur Messung des Driftkammerstroms
GETVOLTAGE	string	MSG Name zur Messung der Driftkammerspannung
SETVOLTAGE	string	MSG Name zur Einstellung der Driftkammerspannung

Anhang F

Konfiguration des ECS

Das Steuerungssystem benötigt mindestens drei Prozesse, wobei diese zentral für die gesamte Steuerung dauernd verfügbar sein müssen.

- Der Prozeß *namserv* ist für ein Steuerungssystem eindeutig. Er ermöglicht die Basiskommunikation der Steuerungsprozesse. Dem Prozeß wird als Parameter die sogenannte Domain mitgegeben, für welche er den Messagesystemservice anbietet. Er muß zentral auf einem dauernd verfügbaren Rechner gestartet werden.
- Der *dbinit* Prozeß muß in der *root directory* der Datenbank gestartet werden. Von dort liefert er den Steuerungsprogrammen auf Anfrage Initialisierungsinformationen.
- Der *opcon* Prozeß erhält alle Statusmeldungen und ermöglicht das Monitoring des Steuerungssystems.

F.1 Unterstützte Hardware

Analog-Digital-Wandler TVM740

- Standardeinstellung des ADC-Moduls (Anhang F.3)
- nicht belegte Eingänge müssen auf ein definiertes Potential gelegt werden (differentielle Eingänge), da sonst ein zufälliger Wert ausgelesen wird
- Auflösung 12 Bit (0 - 4096)
- Modul-Konfiguration (in Datenbankdatei hw_conf)

MakroName	Default-Wert	Erläuterung
PHYSADDR	0xFFFF0400	VMEbus Basisadresse
IOSEGSIZE	2048	Größe des I/O-Segmentes
LSB	4.8	<i>least significant</i> Byte (4.8 mV)
BIPOLAR	0	ADC-Bipolar (1 == TRUE)

- Verstärkungen (nominell) 1/10/16.66/50/166.666/666.666

SubAktion	Verstärkung
0	1.0
1-11	10.0
12	16.666
13	50.0
14	166.666
15	666.666

- Interrupt-Level, default ist kein Interrupt, d.h. bei P1 und P2 sind alle Brücken gezogen
- Bereich 10V oder 20V (Brücke P3)
- Statuslevel D15 (Brücke P4)
- Bipolar/Unipolar (Brücke P5)
- Address modifier unmodifiziert (Brücke P6)

SubAdresse	Aktion
1-31	ADC-Kanäle 1 - 31
32	Temperatur 10mV/C (P7)
33	Masse
34	Vref1 (10V)
35	Vref2 (1V)
36	Vref3 (0.1V)
37	Vref4 (0.01V)
38	Vref5 (0.001V)
39	ADC-Kanal 32

Analog-Digital-Wandler MPV907

- Standardeinstellung des ADC-Moduls (Anhang F.3)

MakroName	Default-Wert	Erläuterung
PHYSADDR	0xFFF00200	VMEbus Basisadresse
IOSEGSIZE	2048	Größe des I/O-Segmentes

Digital-Analog-Wandler MPV904

- Standardeinstellung des DAC-Moduls (Anhang F.3)
- Basisadresse 0xFFF00000 (Jumper J1,J2,J3 default)
- AM Code Response 3D oder 39 (J4 beide gezogen)
- Auflösung 12 Bit (0 - 4096)
- Bipolar $-5V/ +5V$ (J5 1,3,5 gezogen, 2,4 gesteckt)
- DAC-Kanäle 0 - 15 Subadressen 0 - 15
- Modul-Konfiguration (in Datenbankdatei hw_conf)

MakroName	Default-Wert	Erläuterung
PHYSADDR	0xFFF00000	VMEbus Basisadresse
IOSEGSIZE	2048	Größe des I/O-Segmentes
NEG_FULL_SCALE	$-5V$	kleinster einstellbarer Wert
FULL_RANGE	10V	maximaler Bereich

Digital-Input/Output TVM744

- Standardeinstellung des Digital I/O-Moduls (Anhang F.3)
- Modul-Hardware-Konfiguration (in Datenbankdatei hw_conf)

MakroName	Default-Wert	Erläuterung
PHYSADDR	0xFFF08000	VMEbus Basisadresse
IOSEGSIZE	4096	Größe des I/O-Segmentes

Jumper	Wert	Name	Bedeutung
P1 - P10	gezogen	Eingabe Konfiguration	AM Codes 29 und 2D
P11		Adressierungsmodus	
P12, P13		Interruptstufe	
P14 - P16		Eingangsverzögerung	
P17		Basisadresse	
P18		watchdog	

Digital-Input/Output Digi200

- Standardeinstellung des DIGI200-Moduls (Anhang F.3)
- Modul-Konfiguration (in Datenbankdatei hw_conf)

MakroName	Default-Wert	Erläuterung
PHYSADDR	0xFFF08000	VMEbus Basisadresse
IOSEGSIZE	2048	Größe des I/O-Segmentes

Hochspannungsversorgung LeCroy4032a

- Zugriffsmöglichkeiten auf die Hochspannungsversorgung über CAMAC (Anhang F.3)
- Die Hochspannungsversorgungen können zu einer Daisy-Chain zusammengeschaltet werden, wobei die letzte Hochspannungseinheit terminiert werden muß und die Nummer 16 besitzt. Die anderen Einheiten werden absteigend nummeriert von 15 bis 1
- Die Hochspannungsversorgung wird durch den Datenbankeintrag ACTION (ON / OFF) ein- bzw. ausgeschaltet (im File „init“)
- Die aktuelle Nummer des Überrahmens wird im Datenbankwert SUBVAL spezifiziert (im File „init“)
- Die Kanalnummer wird im Datenbankwert SUBADDR eingetragen (im File „init“). Sie kann überschrieben werden durch `adjust -s <channel> <logname> [<value>]`.

Rampgeschwindigkeit	Kanalinhalt
1000 V/sec	0
500 V/sec	1
250 V/sec	2
125.5 V/sec	3
62.5 V/sec	4
31 V/sec	5
16 V/sec	6
8 V/sec	7
4 V/sec	8

Wert	Aktion	Erläuterung
0	PRESET	Die Voreinstellungen werden geändert
1	TRUEVAL	Die wirklichen Spannungen werden modifiziert
2	RAMP	Änderung der Rampgeschwindigkeit

Diskriminator LeCroy4413

- Zugriffsmöglichkeiten auf das CAMAC-Modul (Anhang F.3)

SubAdresse	Aktion	Erläuterung
0	GETTHRESHOLD	Lesen der Schwelle
1	SETTHRESHOLD	Setzen der Schwelle
2	GETMASK	Lesen der Maske
3	SETMASK	Setzen der Maske
4	REMOTE	Aktivieren der rechnergestützten Verarbeitung
5	LOCAL	Deaktivieren der rechnergestützten Verarbeitung
6	TEST	Erzeuge Testimpuls

Stromversorgung MPS8000

- Standardeinstellung des MPS8000–Stromnetzgerätes (Anhang F.3)
- Modul–Konfiguration (in Datenbankdatei hw_conf)

MakroName	Default–Wert	Erläuterung
HOSTNAME	skpmzr/skpmzs skpmzx	Network Name des Servers
PORTNUMBER	2001 - 2016	TCP/IP Port des Servers
NOMINALCURRENT	100.0	Nominalstrom
MPSSUBADDR	0 - 15	Subadresse (15)

Wasserüberwachungsmikroprozessor

- Standardeinstellung des Mikroprozessors (Anhang F.3)
- Wasseruhrkonfiguration (in Datenbankdatei init)

MakroName	Default–Wert	Erläuterung
SUBADDR	1 - 15	Wasseruhrnummer
ACTION	READ	Messung des aktuellen Flusses
SUBACT	1, 2, 3, 6, 10	Typ 1.5, 2.5, 3.5, 6, 10 [qm/h]
MIN	0 - 30000	minimaler Fluß in Liter / Stunde
MAX	0 - 30000	maximaler Fluß in Liter / Stunde
DIM	l/h	Liter / Stunde
SECLVL	0 - 9	Sicherheitslevel
MSGNAME	[string]	Messagesystem–Name
LOGNAME	[string]	MSG–Name des Geräte–Händlers

- Modul–Konfiguration (in Datenbankdatei hw_conf)

MakroName	Default–Wert	Erläuterung
HOSTNAME	skpmzr/skpmzs skpmzx	Netzwerk Name des Terminalservers
PORTNUMBER	2001 - 2016	TCP/IP Port Nummer des Servers

Terminalserver ETS-16DA

- Der Kontroll-Port für Server-Messages ist Port Nummer 1
- Die Ports Nummer 1 und 2 müssen auf „access local“ gesetzt werden und können dann für den Anschluß von Terminals verwendet werden.
- Die Ports 3 - 16 müssen auf access „remote gesetzt“ werden.
- Port 3 (E6), Port 4 (E5)
- FLOOR SKPA1A (134.93.133.48) 00-80-A3-01-05-FD
- SPEKB SKPA1B (134.93.133.49) 00-80-A3-01-06-35
- SPEKC SKPA1C (134.93.133.50) 00-80-A3-01-09-2F
- SKPA1D (134.93.133.51) 00-80-A3-01-0B-69
- SPEKA SKPA1E (134.93.133.52) 00-80-A3-01-06-04
- aktuelle Software Release 2.1 (TSCODE1621.SYS/VMS)
- Befehls-Sequenz zur kompletten Neuinstallation (Anlage F.3)
 - SET PRIVILEGED <CR> <PASSWORD>
 - SET SERVER SOFTWARE TSCODE1621.SYS
 - SET SERVER NAME <NAME>
 - SET SERVER IPADDRESS <ADDRESS>
 - SET SERVER INCOMING TELNET INCOMING PASSWORD
 - SET SERVER LOGIN PASSWORD
 - SET SERVER GROUPS 13-19 ENABLED
 - SET SERVER SUBNET 255.255.0.0
 - SET SERVER NAMESERVER 134.93.132.1 (ASTERIX.KPH)
 - SET SERVER LOADHOST 134.93.132.1 (ASTERIX.KPH)
 - SET SERVER SECONDARY 134.93.133.1 (A1.KPH)
 - SET SERVER GATEWAY 134.93.178.127 (DONALD.ZDV)
 - SET PORT ALL FLOW XON
 - SET PORT ALL AUTHORIZED GROUPS 13-19 ENABLED
 - SET PORT ALL GROUPS 13-19 (old == all) ENABLED
 - SET PORT 5-16 ACCESS REMOTE
 - SET IPSECURITY 134.93.133.1 (A1)
 - SET IPSECURITY 134.93.133.2 (FLOOR)
 - SET IPSECURITY 134.93.133.3 (SPEKA)

- SET IPSECURITY 134.93.133.4 (SPEKB)
- SET IPSECURITY 134.93.133.5 (SPEKC)
- SET IPSECURITY 134.93.132.193 (APOLLO)
- SAVE SERVER
- SAVE PORT ALL
- SAVE IPSECURITY

F.2 Anschlußbelegung

Floor-System

V24

ServerPort	Kabelnummer	Bezeichnung
16	0	Wasserwächter
15	1	Dipol B
14	2	Dipol A1
13	3	Dipol A2
12	4	Sextupol A Main
11	5	Quadrupol A
10	6	Sextupol A Aux
9	7	Sextupol C Aux
8	8	Sextupol C Main
7	9	Quadrupol C
6	10	Dipol C2
5	11	Dipol C1
4	-	E5
3	-	E6
2	-	Local
1	-	Local

F.3 Modulreferenzliste

Modul Name	Seriennummer	Standort	Datum	Test
MPV904	(Eltec 066532) X11882	SpekA	17/7/91	V.Kunde
TVM740	0572791	SpekA	17/7/91	V.Kunde
TVM744	0454290	SpekA	2/6/92	V.Kunde
MPV904	X04901 15/89	SpekB	17/7/91	V.Kunde
TVM740	0102890	SpekB	17/7/91	V.Kunde
TVM744	0582791	SpekB	17/7/91	V.Kunde
MPV904		SpekC		
TVM740		SpekC		
TVM744		SpekC		
MPV904		Floor		
TVM740		Floor		
TVM744		Floor		
MPV904		Apollo		
TVM740		Apollo		
TVM744	0401792	Apollo		

- TECINT TVM740 32 channel differential ADC module User's Guide *revision .03 31/01/91.*
- TECINT TVM744 opto coupled digital I/O module User's Guide *revision .03 31/01/91.*
- MPV904 module User's Guide .
- MPV907 module User's Guide .
- DIGI200 module User's Guide .
- LeCroy 4413 module User's Guide .
- LeCroy 4032a module User's Guide .
- MPS8000 module User's Guide .
- Wassermikoprozessor module User's Guide.
- ETS16Da module User's Guide.

Anhang G

BGO–Spektren

G.1 Spektren des Energieübertrags

Die Abbildung G.1 zeigt das Energieübertragungsspektrum für genau *ein* identifiziertes Proton in der hinteren Hemisphäre im BGO–Detektor. Im Gegensatz dazu

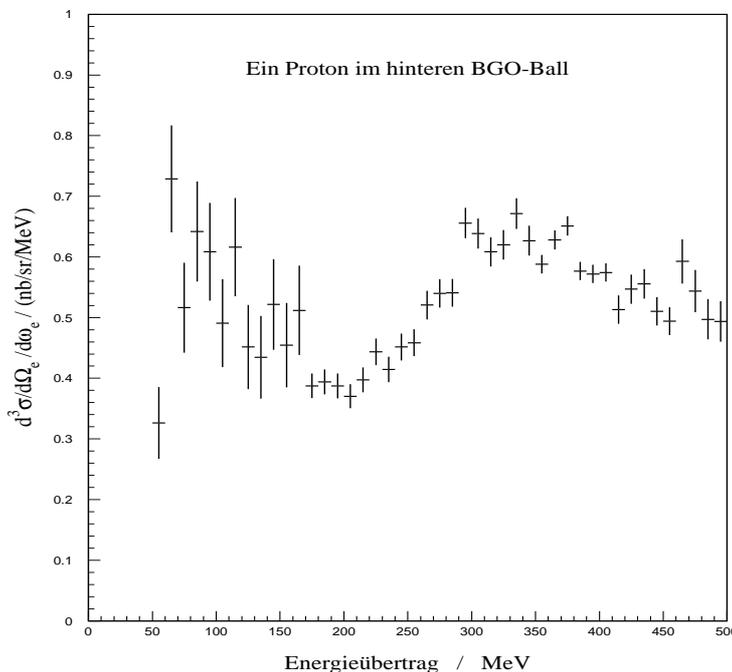


Abb. G.1:
Wirkungsquerschnitt $^{12}\text{C}(e, e'p)$ für den Nachweis von genau einem Proton in der hinteren Hemisphäre des BGOs, der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

zeigt Abbildung G.2 das Energieübertragungsspektrum für genau *drei* identifizierte Protonen im BGO. Hier ist der quasielastische Peak vollständig unterdrückt. Der Wirkungsquerschnitt steigt ab etwa 250 MeV an und scheint sein Maximum jenseits des gemessenen Energieübertrags von 500 MeV zu erreichen, wobei zu beachten ist, daß keine Strahlungskorrekturen vorgenommen wurden. Die Information über den Impuls der gemessenen Protonen ist aufgrund der sehr begrenzten Winkelauflösung zu gering. Abbildung G.3 zeigt den Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e'p\pi^\pm)$. Aufgrund der limitierten Energieauflösung der BGO–Detektoren für geladene Pionen sind keine Effizienzkorrekturen vorgenommen worden. Beim Vergleich der Daten für ein Proton und ein Pion im Endzustand mit den Daten für zwei Protonen im Endzustand, zeigt Abbildung 5.25 eine Verschiebung der Schwelle für die Reaktion $^{12}\text{C}(e, e'p\pi^\pm)$ um etwa 140 MeV. Dies läßt sich durch die zusätzlich benötigte Energie zur Erzeugung eines Pions im Ausgangskanal erklären.

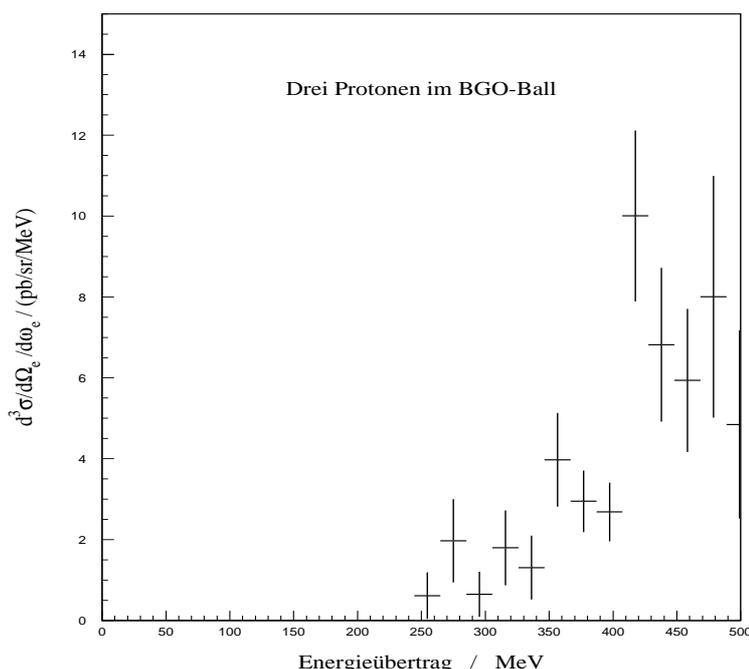


Abb. G.2:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e'ppp)$ in der Akzeptanz des BGO-Detektors, der mittlere Spektromerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

Die Reaktionen $^{12}\text{C}(e, e'd)$ und $^{12}\text{C}(e, e'd\pi^\pm)$

Abbildung G.4 zeigt ein Spektrum des Energieübertrags unter der Bedingung, daß genau *ein* Deuteron innerhalb der BGO-Kristallkugel gemessen wurde. Die kinetische Energie der Deuteronen muß im BGO-Detektor oberhalb einer Schwelle von 40 MeV liegen, damit sie in den BGO-Kristallen sicher nachgewiesen werden kann.

Das Deuteronspektrum reproduziert das freie Energieübertragungsspektrum, wobei Dip-Region und Δ -Resonanz deutlich ausgeprägt sind. Der quasielastische Bereich ist jedoch stark unterdrückt. Interessant ist die Lage des Schwerpunktes des quasielastischen Peaks, er liegt bei etwa 100 MeV. Wäre er das Ergebnis der Streuung eines virtuellen Photons mit einem Quasi-Deuteron im Kern, müßte er bei $|q|^2/2M_d \approx 43.7$ MeV liegen. Daher ist der Peak bei 100 MeV wahrscheinlich nur der Ausläufer der Fermi-Verteilung der Deuteronen im quasielastischen Bereich. Er entsteht durch die Energieschwelle bei der Deuteronidentifikation. Erst Deuteronen mit einer kinetischen Energie von mehr als 37 MeV erzeugen ein Signal im BGO-Kristall. Die Messungen könnten mit der Dreispektrometeranlage in einer Trippelkoinzidenz mit durchgeflanschem Mangetspektrometer zur Deuteronmessung verifiziert werden. Eine andere Erklärung wäre, daß die quasifreie Streuung an einem Nukleon stattfindet und über eine Endzustandswechselwirkung ein zweites Nukleon (im Falle eines auslaufenden Protons ein Neutron) aufnimmt¹.

Die Abbildung G.5 zeigt den Wirkungsquerschnitt für die Messung eines Deuterons und eines Pions im BGO. Der Verlauf ähnelt der Messung von einem Proton

¹pick up Reaktion

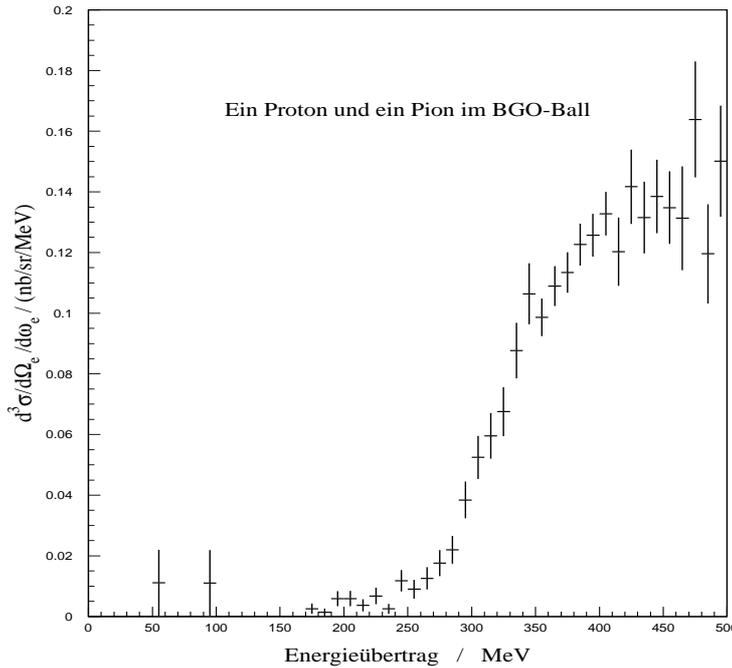


Abb. G.3:
Wirkungsquerschnitt
für $^{12}\text{C}(e, e'p\pi^\pm)$, der
mittlere Spektrome-
terwinkel θ lag bei
 31.4° , die Strahl-
energie betrug 705 MeV

und einem Pion im Endzustand wie in Abbildung G.3. Der Wirkungsquerschnitt ist jedoch eine Größenordnung geringer.

G.2 Fehlende Energie

Der breitere Peak im *missing energy*-Spektrum bei 35 MeV entspricht im Schalenmodell dem Herausschlagen eines Protons aus der $1s_{1/2}$ -Schale des ^{12}C Kerns. Der zu höheren fehlenden Energien lang auslaufende Schwanz beruht im wesentlichen auf Multihadronemission [Wein-94]. Im Gegensatz dazu beruht die Emission eines Protons im Δ -Bereich oberhalb von 140 MeV wesentlich auf der Pionproduktion. Die Abbildung G.7 zeigt ein *missing energy*-Spektrum für die Emission eines Deuterons im quasielastischen Bereich. Trotz der relativ schlechten Statistik ist ein Peak bei 30 MeV erkennbar. Er liegt an der Schwelle für das Herausschlagen von zwei Nukleonen und gehört offensichtlich zur Summe der Bindungsenergien eines aus den p-Schalen herausgeschlagenen (n, p) Paares (Quasi-Deuteron) beim Übergang in den ^{10}B Grundzustand. Die weiteren, möglichen Kombinationen von (p, s)-Schalen und (s, s)-Schalen sind im Rahmen der vorliegenden Statistik nicht aufzulösen. Die Abbildung G.8 zeigt das *missing energy*-Spektrum für die Emission eines Deuterons im Δ -Bereich in den BGO.

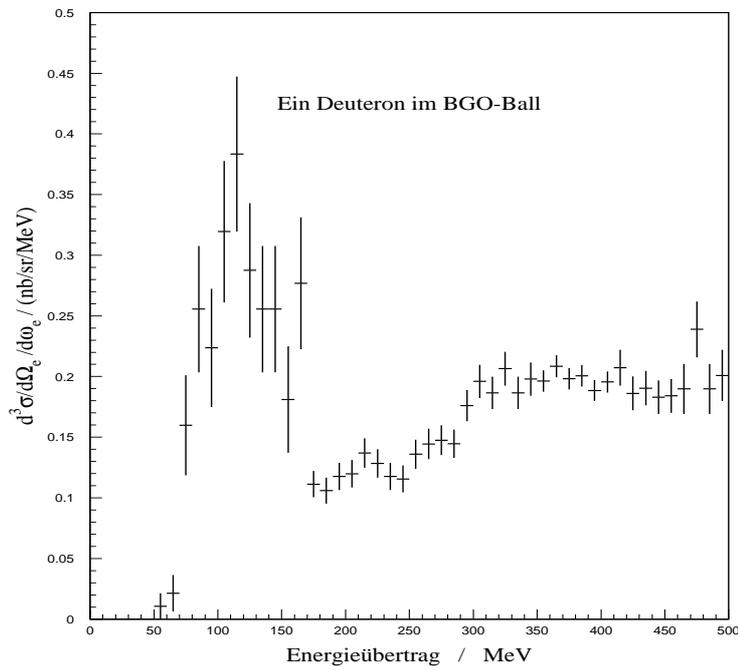


Abb. G.4:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e'd)$ in der Akzeptanz des BGO-Detektors, der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

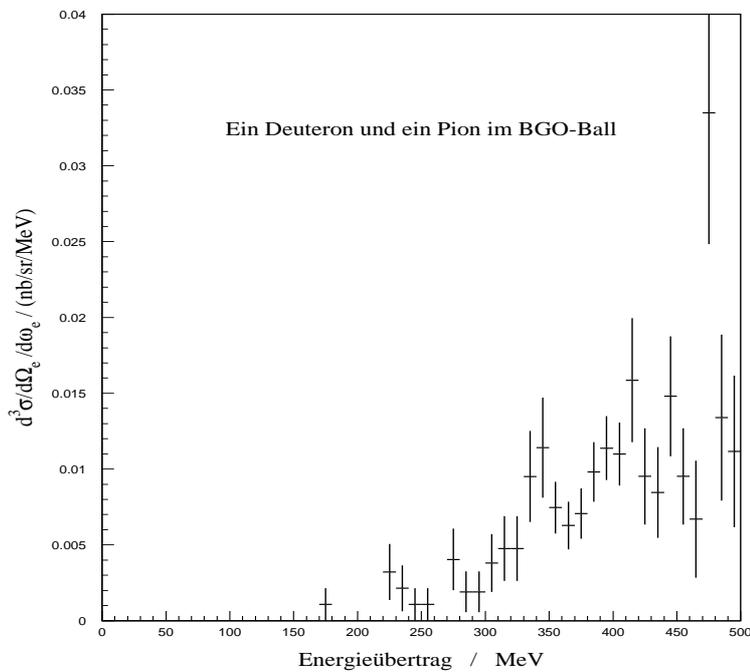


Abb. G.5:
Wirkungsquerschnitt für $^{12}\text{C}(e, e'd\pi^\pm)$ in der Akzeptanz des BGO-Detektors, der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

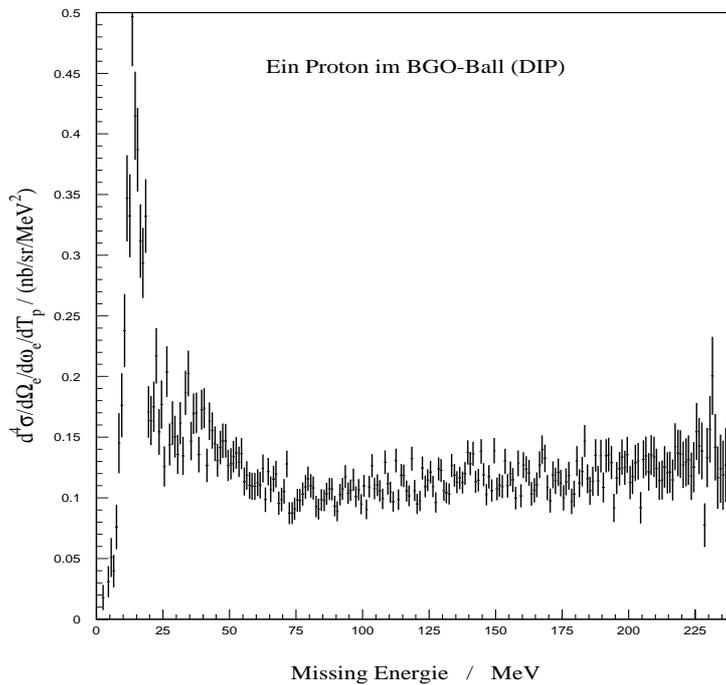


Abb. G.6:
Mittlere *missing energy* im Dip-Bereich ($188 < \omega < 277$) für $^{12}\text{C}(e, e'p)$, der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

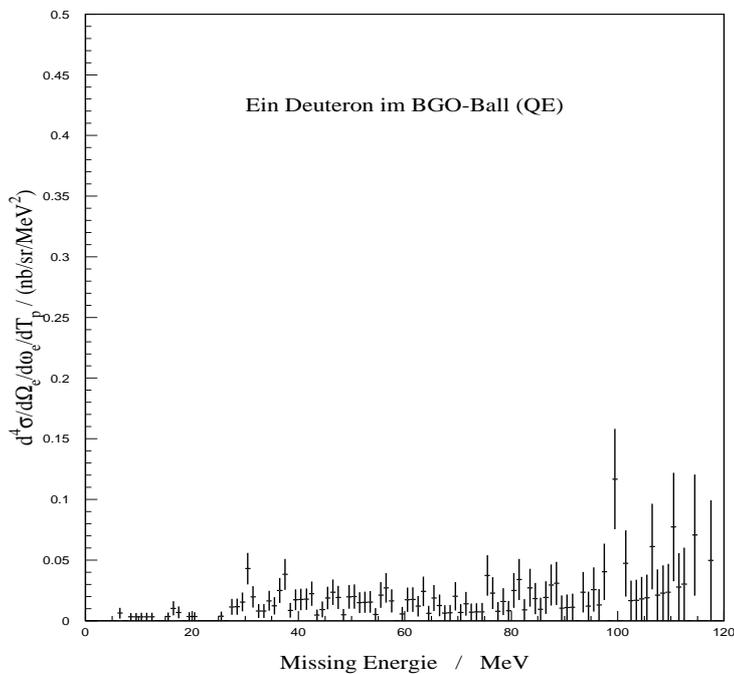


Abb. G.7:
Mittlere *missing energy* für $^{12}\text{C}(e, e'd)$ im quasielastischen Bereich ($50 < \omega < 160$), der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

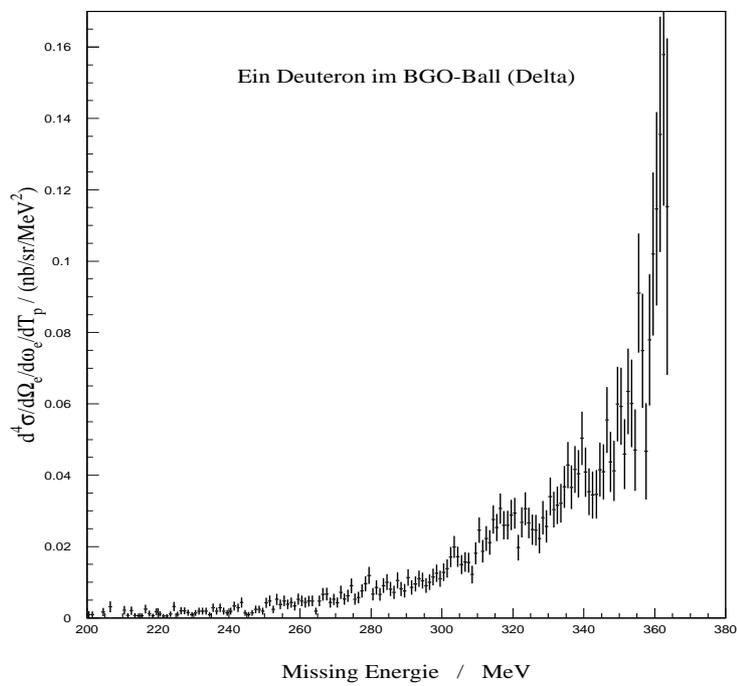


Abb. G.8:
Mittlere *missing energy* für $^{12}\text{C}(e, e'd)$ im Δ -Bereich ($350 < \omega < 410$), der mittlere Spektrometerwinkel θ lag bei 31.4° , die Strahlenergie betrug 705 MeV

Anhang H

Glossar

Aktor Ein Aktor erlaubt die Veränderung eines physikalischen Zustandes.

Feldbus Ein Feldbus ermöglicht die einfache und robuste Verbindung von Sensoren, Aktoren und Mikrocontrollern mit Steuerungsrechnern.

Klasse Eine Klasse legt die typischen Merkmale und Zustände einer Menge gleichartiger Objekte fest. Sie stellt die Methoden zur Erzeugung, zur Manipulation der Merkmale und Zustände des Objektes sowie zur Vernichtung des erzeugten Objektes zur Verfügung.

Objekt Ein Objekt läßt sich durch typische Eigenschaften und Verhaltensweisen charakterisieren. Es besitzt einen Zustand und eine Identität und wird zur Laufzeit eines Prozesses erzeugt bzw. bei dauerhaften (persistenten) Objekten aus einer Datenbank geladen. Ein aus einer Klasse abgeleitetes Objekt wird *Instanz* genannt.

RS422 Norm für eine 4-Drahtverbindung (ähnlich RS232(V24)) mit differentieller Übertragung der Spannungssignale zur Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit.

Schnittstellenumsetzer Ein Schnittstellenumsetzer ist eine Kombination aus Hard- und Software, welche die Änderung und Überwachung eines physikalischen Zustandes innerhalb des Steuerungssystems ermöglicht.

Sensor Ein Sensor erlaubt die Messung des Ist-Zustandes einer physikalischen Größe.

Shellscript Ein Shellscript ist feste Folge von Anweisungen, die von einem Kommandointerpreter abgearbeitet werden kann.

transparenter Zugriff Ein transparenter Zugriff ist ein Zugriff auf ein Gerät über einen Schnittstellenumsetzer, der die speziellen Eigenschaften des Umsetzers verdeckt und nur das zu steuernde Gerät mit seinen Eigenschaften abbildet.

Anhang I

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Th. Walcher für die Möglichkeit der Durchführung und sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit bedanken.

Herrn Prof. Dr. K. Merle gilt mein Dank für sein lebhaftes Interesse am Steuerungssystem und der Möglichkeit ein eigenständiges System aufzubauen.

Herrn Dr. G. Rosner gilt mein besonderer Dank für die fortwährende Betreuung des BGO-Experimentes und die vielen Diskussionen, Anregungen und Hilfestellungen bei kleinen und großen Problemen.

Den Herren Dr. E. Offermann und Dr. W. Boeglin danke ich für die stete Diskussionsbereitschaft bei den Detailproblemen der Experimentauswertung.

Danken möchte ich allen Kollegen der A1-Kollaboration für die Unterstützung bei der Durchführung des Experimentes und die Geduld beim Auftreten kleinerer Probleme beim Betrieb des Steuerungssystems.

Besonders herzlich möchte ich mich bei Herrn Dr. H. Kramer bedanken, der durch seine konsequente und einfühlsame Art, die Konzeption des Steuerungssystems in seiner Richtung und Ausprägung wesentlich mitgestaltete.

Nicht zu vergessen sind die Mitglieder der A2-Kollaboration, die mir Wohnrecht gewährt haben.

Vielen Dank auch an meine Frau und meine Eltern, die stets mit viel Verständnis alle Einschränkungen und Belastungen ertragen haben und mich immer wieder motiviert und mir geholfen haben.

Lebenslauf

Name: Volker Friedel Kunde

Geburtsdatum: 04. März 1961

Geburtsort: Mainz

Staatsangehörigkeit: deutsch

Familienstand: verheiratet

Wohnort: Mozartstraße 36a in 55271 Stackeden

Schulbildung: 1967 - 1971 Grundschule in Gonsenheim
1971 - 1980 Gymnasium Theresianum, Mainz
1980 Abitur am Gymnasium Theresianum, Mainz

Wehrdienst: 1980 - 1981 Ableistung des Grundwehrdienstes in Hannover

Studium: 1981 - 1988 Physikstudium an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
1988 Abschluß des Physikstudiums mit Diplom
Thema der Diplomarbeit:
Aufbau eines Datenerfassungssystems für
Vielparameterexperimente und dessen Erprobung an MAMI-A
seit 1988 Doktorand am
Institut für Kernphysik in Mainz