

Ein rechnergestütztes Steuer- und Kontrollsystem für den HADES-RICH

Diplomarbeit
von
Christian Wallner

Fakultät für Physik der Technischen Universität München
Physik-Department E12
Dezember 1999

Zusammenfassung

Das Dielektronenspektrometer HADES (**H**igh **A**cceptance **D**i**E**lectron **S**pectrometer) ist ein neues Instrument, das zur Untersuchung von Hadroneneigenschaften in Kernmaterie eingesetzt werden soll. Experimentell werden dafür e^+e^- -Paarzerfälle in Proton-, Pion- und Schwerioneninduzierten Reaktionen beobachtet. Die wesentliche Aufgabe der bei diesen Messungen erforderlichen untergrundfreien Leptonidentifikation wird dabei ein am Physikdepartment E12 der TU München gebauter, hadronenblinder RICH-Detektor (**R**ing **I**maging **C**Herenkov) übernehmen.

Für die Gewährleistung eines störungsfreien Experimentbetriebs müssen alle zeitlich veränderlichen Betriebsparameter von einem rechnergestützten Steuer- und Kontrollsystem überwacht und dokumentiert werden. Diese Betriebsparameter reichen dabei von konventionellen Strom- und Spannungsmessungen bis hin zur Überwachung der VUV-Transmission in Gasen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Steuer- und Kontrollsystem entwickelt und realisiert, dessen Kommunikationsinfrastruktur auf dem in der Kfz-Industrie verwendeten CAN-Bus basiert. Für Standardsteueraufgaben (Strom- und Temperaturmessungen,...) können kommerziell erhältliche, CAN Bus konforme Komponenten und Module verwendet werden. Für die spezielle, und den RICH wichtige Anwendung der VUV-Transmissionsmessung wurde eigens ein neuer CAN-Kontroller (EPC 167) konzipiert und entwickelt. Dieser ist darüberhinaus auch für verschiedenste Steuer-, Meß- und Regelaufgaben einsetzbar und gewährleistet deren einfache und stabile Anbindung an das gemeinsame Kommunikationssystem. Für die wichtigen Transmissionsmessungen im VUV-Wellenlängenbereich (120 nm - 250 nm) wurde ein neues Meßverfahren entwickelt und in das Gasversorgungssystem des Detektors integriert. Es basiert auf der Auslese einer mit dem Wellenlängenkonverter Natriumsalicylat beschichteten CCD, die an der Stelle des Austrittsspalts in einem VUV-Gittermonochromator eingebaut ist. Das Verfahren erlaubt schnelle ($\tau < 1$ s) und wiederholte Messungen der Gasreinheit an Ein- und Auslaß des RICH sowie die Ansteuerung und Auslese über den CAN-Kontroller.

Das gesamte System konnte erfolgreich am Detektor während einer ersten Teststrahlzeit eingesetzt werden und erlaubte bereits eine Beurteilung der Gasreinigung in den ersten Tagen des Experimentbetriebs.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
1 Einführung	1
2 Der RICH Detektor	5
2.1 Grundlagen	5
2.2 Aufbau des Detektors	6
2.3 Erfassung der RICH-Betriebsparameter	10
3 Das Steuer- und Kontrollsystem des RICH	13
3.1 Anforderungen an das Kontrollsystem	14
3.2 Vergleich verschiedener Feldbussysteme	15
3.3 CAN-Bus im HADES-Steuerungssystem	17
3.3.1 CAN- Bitübertragungsschicht	18
3.3.2 CAN-Datenformate	18
3.3.3 CAN-Fehlerbehandlung	20
3.3.4 Höhere Protokolle-CANopen	21
3.3.5 Rechneranbindung des CAN-Busses	22
3.4 Benutzerschnittstelle des Steuer- und Kontrollsystems	22
3.5 Einsatz des Kontrollsystems am RICH	23
3.5.1 Spannungsversorgungen	24
3.5.2 Gasversorgungssystem	25
4 Automatisierte Gastransmissionsmessung	31
4.1 Grundlegende Überlegungen	32
4.1.1 Absorption in Gasen	32
4.1.2 Methoden zur Messung von Gasverunreinigungen	33
4.2 Aufbau des RICH-Gastransmissionsmonitors	34
4.2.1 Lichtquelle, Testvolumen und Monochromator	34
4.2.2 Der VUV-Nachweis	37
4.3 Testmessungen und Ergebnisse	39
4.3.1 Durchführung der Messungen	39

4.3.2	Transmissionsmessungen am Radiatorvolumen	42
4.3.3	Transmission des Detektorgases	45
4.4	Automatisierung der Messung	45
5	Der EPC 167 CAN-Kontroller	47
5.1	Leistungsmerkmale und Aufbau	47
5.2	Inbetriebnahme und Softwareentwicklung	50
5.2.1	Erforderliche Basisroutinen	51
5.2.2	Programme für den Transmissionsmonitor	51
6	Ausblick	55
A	Anhang	57
A.1	Das OSI-Modell	57
A.2	Schaltplan des EPC 167	59
B	Ausleseroutinen des Transmissionmonitors	65
	Literaturverzeichnis	71

Abbildungsverzeichnis

1.1	Funktion des $\langle q\bar{q} \rangle$ -Erwartungswertes in Abhängigkeit von Temperatur und Dichte	2
1.2	Schnitt durch das HADES Spektrometer	4
2.1	Schematischer Aufbau des HADES RICH	7
2.2	Transmission einer der 64 CaF_2 -Kristalle	9
2.3	Schematischer Aufbau der Photonendetektoren	10
3.1	Konzeptionelle Darstellung des RICH Steuerungssystems	14
3.2	Der “wired and”-Mechanismus	19
3.3	Das CAN Datenformat	19
3.4	Hardwarearchitektur eines verteilten EPICS-Systems	24
3.5	Schematische Darstellung des HADES-RICH Gasversorgungssystems	27
3.6	Die C_4F_{10} -Dampfdruckkurve	28
4.1	Absorptionskurve von Wasserdampf und molekularem Sauerstoff . . .	33
4.2	Optisches System des RICH-Gas-Transparenz-Monitors	35
4.3	Emissionsspektrum einer Deuteriumlampe	36
4.4	Quanteneffizienz von Natriumsalicylat in Abhängigkeit der Schichtdicke	39
4.5	Fluoreszenzspektrum von Natriumsalicylat	40
4.6	Relative Sensitivität der CCD in Abhängigkeit der Wellenlänge . . .	40
4.7	Abhängigkeit der relativen Quanteneffizienz von Natriumsalicylat vom Alter	41
4.8	Rohspektrum einer einzelnen CCD-Stickstoffmissionsmessung	43
4.9	Relative Transmission von Stickstoff aus dem Radiator	44
4.10	Gemessene Lichtintensitäten für vorgereinigte C_4F_{10} Proben am Eingang und am Ausgang des Radiators	44
4.11	Relative Transmission von C_4F_{10}	45
4.12	Relative Transmission von CH_4	46
5.1	Blockschaltbild des EPC167CAN-Kontrollers	48
5.2	Foto des EPC 167	48
5.3	Methan-Transmissionsspektrum aufgenommen mit dem EPC 167 . .	53

A.1	Die sieben Schichten des OSI-Modells	58
A.2	Parameterspeicher des EPC 167	59
A.2	Prozessoranschluß des EPC 167	60
A.3	Belegungsplan der VG-Leiste	61
A.4	Anschluß des RS 232 Transceiver-Bausteins	62
A.5	Stromversorgung des EPC 167	63
A.6	CAN-Schnittstelle des EPC 167	64

Kapitel 1

Einführung

Zur Zeit wird bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt im Rahmen einer internationalen Kollaboration das Dileptonenspektrometer HADES (**H**igh **A**ccptance **D**i**E**lectron **S**pectrometer) aufgebaut. Das neue Instrument ist ein hochauflösendes Spektrometer der zweiten Generation zur Untersuchung der Eigenschaften von Hadronen in Kernmaterie und befindet sich derzeit in der Inbetriebnahmephase. Mit ersten Experimenten soll in wenigen Monaten begonnen werden.

Physikalische Motivation

Die einzigartigen Eigenschaften des HADES Spektrometers erlauben experimentellen Zugang zu einer ganzen Fülle physikalischer Fragestellungen, die sich mit den grundlegenden Eigenschaften von Hadronen befassen. Einen Schwerpunkt zur Untersuchung der Hadronen (Baryonen und Mesonen) werden dabei die leichten kurzlebigen Vektormesonen ρ , ω und φ bilden (vgl. Tabelle 1.1). Im Folgenden sollen hieraus exemplarisch zwei Fragestellungen kurz dargestellt werden.

Eine wesentliche Größe zur Beschreibung der internen Struktur endlich ausgehnter Teilchen stellen die elektrischen und magnetischen Formfaktoren dar. Aus ihrer Kenntnis kann auf die innere Verteilung elektrischer Ladungen und magnetischer Momente geschlossen werden. Während für stabile Teilchen wie Protonen oder Neutronen Streuexperimente mit Elektronen- oder Photonenstrahlen durchgeführt werden können, werden kurzlebige Teilchen z. B. in Annihilationsprozessen ($\pi^+ + \pi^-$ in Schwerionenkollisionen oder $e^+ + e^-$ in Speicherringen) erzeugt und ihre Zerfälle untersucht. Elektronenpaar-Spektroskopie mit HADES erlaubt es unter anderem, die zum Teil nur ungenau bekannten Formfaktoren im Massenbereich bis $1 \text{ GeV}/c^2$ zu studieren. Besonderes Augenmerk soll dabei auf eine Neubestimmung des Formfaktors des ω -Mesons gelegt werden, da die bisher vorliegenden Daten [1] im Widerspruch zum ansonsten sehr erfolgreichen Vektor-Meson-Dominanzmodell

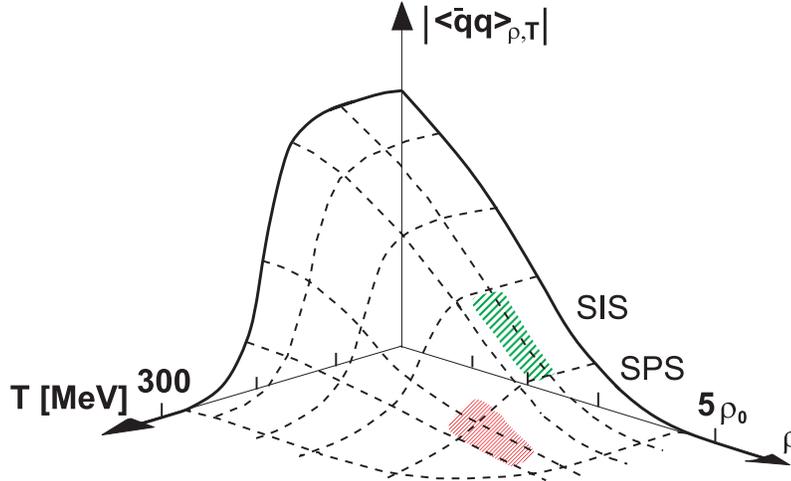


Abbildung 1.1: Funktion des $\langle q\bar{q} \rangle$ -Erwartungswertes in Abhängigkeit von Temperatur und Dichte [2]

stehen. ω -Mesonen können bei der GSI sowohl in Schwerionenreaktionen als auch in elementaren Reaktionen ($\pi+p$, $p+p$) erzeugt werden und ihre Dalitz-Zerfälle ($\omega \rightarrow \pi_0 + e^+e^-$) mit HADES exklusiv (zum Teil mit zusätzlichen Detektoren) mit hoher Statistik vermessen werden. Aus der Form des e^+e^- -Spektrums kann dann auf den Formfaktor geschlossen werden.

Ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet sind die Eigenschaften von Hadronen in Kernmaterie. Auf der Quantenchromodynamik (QCD) basierende Modelle sagen die Restauration der chiralen Symmetrie [3, 4] mit zunehmender Dichte und Temperatur voraus, wie in Abbildung 1.1 dargestellt.

Dieser Effekt soll auf die Masse von leichten Vektormesonen wie ρ und ω , die sich in einem solchen Medium befinden, signifikanten Einfluß haben. Theorien [5, 6, 7] sagen bereits bei normaler Kerndichte und $T \simeq 0$ eine Verringerung der Vektormesonmasse von 15 - 20% voraus. Ähnliche Ergebnisse folgen auch aus Berechnungen, die auf den Summenregeln der QCD beruhen [8]. Experimentell können derartige "In-Medium-Modifikationen" der Vektormesonmasse durch Spektroskopie der Zerfallsprodukte des jeweiligen Mesons und deren invarianter Masse bestimmt werden. Ein besonders geeigneter Zerfallskanal des Mesons ist hierbei der reine Zweikörperzerfall in ein e^+ und ein e^- , da diese im Ausgangskanal der Reaktion nicht der starken Wechselwirkung unterliegen.

Die Produktion der Vektormesonen in Kernmaterie ist sowohl durch die Erzeugung an gebundenen Protonen (z.B. $\pi^- + \frac{A}{Z}X \rightarrow \omega + \frac{A-1}{Z-1}X + n$ [9, 10]) als auch in Schwerionenkollisionen möglich. Das ω -Meson ist dabei nicht gebunden und propagiert durch den Kern. Während mit der erstgenannten Reaktion die Modifikation der Mesonenmasse bei normaler Kerndichte untersucht werden kann, erreicht man bei der zweiten das 2-3 fache normaler Kerndichte und erwartet dementsprechend

Meson	$m \left[\frac{\text{MeV}}{c^2} \right]$	$\sigma \left[\frac{\text{MeV}}{c^2} \right]$	$\tau \left[\frac{\text{fm}}{c} \right]$	dominanter Zerfall	e^+e^- Verzweigungsverhältnis
ρ	768	152	1.3	$\pi\pi$	$4.4 \cdot 10^{-5}$
ω	782	8.43	24.4	$\pi^+\pi^-\pi^0$	$7.2 \cdot 10^{-5}$
ϕ	1019	4.43	44.4	K^+K^-	$3.1 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 1.1: Fundamentale Eigenschaften leichter Vektormesonen

eine stärkere Reduktion der Mesonenmasse [11]. Hierbei beruht die Produktion von leichten Vektormesonen auf Mehrfachstoßprozessen, die hauptsächlich in der Hochdichtephase (fireball) der Kollision wahrscheinlich sind [12]. Wegen der geringen Lebensdauer des ρ -Vektormesons (vgl. Tabelle 1.1) zerfallen diese auch im Bereich der maximal erreichten Kerndichte (Ausdehnung $10 \frac{\text{fm}}{c}$). Auf Grund der vollständigen Erfassung des Viererimpulses der Dileptonen durch das HADES Spektrometer ist wegen $\|P_\rho\| = \|P_{e^-} + P_{e^+}\|$ auch deren invariante Masse bekannt

$$M_{inv} = \|P\| = \sqrt{(E_{e^+} + E_{e^-})^2 - (\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-})^2} \quad (1.1)$$

wobei für Leptonenenergien von einigen hundert MeV die Ruhemasse des Elektrons vernachlässigt werden kann [13]. Unter Zuhilfenahme des Öffnungswinkels der Leptonenpaare im Laborsystem und deren Impulsen ergibt sich für deren invariante Masse:

$$M_{inv} \simeq 2 \sin\left(\frac{\alpha_{e^+e^-}}{2}\right) \cdot \sqrt{p_{e^+} \cdot p_{e^-}} \quad (1.2)$$

Übersicht über das HADES Spektrometer

Das im Vergleich zu den dominanten hadronischen Zerfallskanälen geringe Verzweigungsverhältnisses in Dileptonen (vgl. Tabelle 1.1) stellt hohe Anforderungen an das Spektrometer. HADES ist ein Magnetspektrometer, das um einen supraleitenden Magneten, der ein toroidales Feld von bis zu 3.5 T erzeugt, aufgebaut ist. Das Spektrometer ist in Abbildung 1.2 schematisch im Querschnitt gezeigt und in mehreren Arbeiten im Detail beschrieben [13, 14]. Die Messung von Ort und Winkel vor und nach der Impulsänderung durch das Magnetfeld erfolgt mit je zwei Ebenen von Minidriftkammern (MDC). Als Elektronenpaar-Spektrometer erfordert HADES eine eindeutige Identifikation von Leptonen, welche durch den zentralen ringabbildenden Čerenkovdetektor (RICH) und das außen befindliche **M**ultiplicity **E**lectron **T**rigger **A**rray (META) erreicht wird, das sich aus einer Flugzeitwand (TOF) und einem Preshower-Detektor zusammensetzt. Um eine möglichst hohe Akzeptanz für Leptonenpaare zu erreichen, muß ein großer Raumwinkel abgedeckt werden. Da die Reaktionsprodukte aus kinematischen Gründen bevorzugt unter Vorwärtswinkeln im

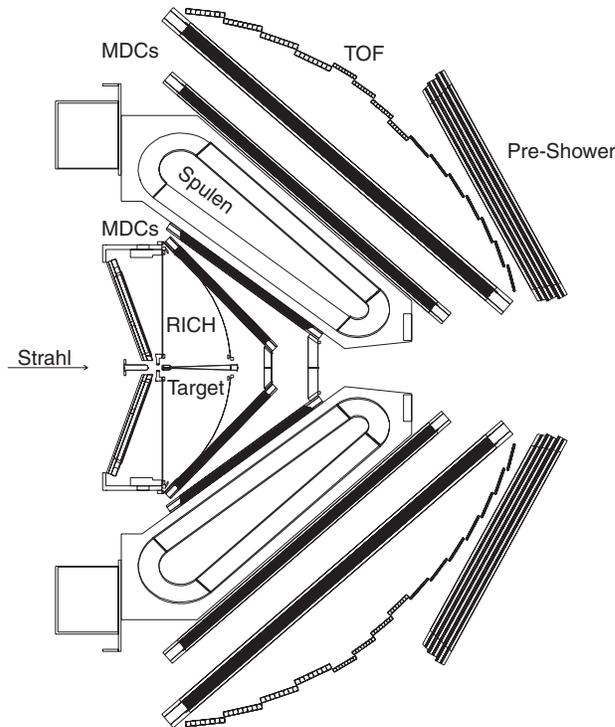


Abbildung 1.2: Schematischer Schnitt durch das HADES Spektrometer

Laborsystem emittiert werden, deckt die gezeigte Anordnung, die einen Polarwinkel von $16^\circ - 85^\circ$ einschließt, im Schwerpunktsystem einen großen Raumwinkelbereich ab. Die geometrische Akzeptanz beträgt für Elektron-Positron Paare mit invarianter Masse zwischen $200 \text{ MeV}/c^2$ und $1 \text{ GeV}/c^2$ im Mittel 40 % [15]. Weitere wichtige Eigenschaften sind eine hohe Massenauflösung $\Delta M_{inv}/M_{inv} \simeq 1\%$ (σ) und eine Ratenfestigkeit, die auch die Beobachtung von Zerfallskanälen mit einem sehr geringen Verzweungsverhältnis erlauben.

Der RICH-Detektor wird zur Unterscheidung relativistischer Elektronen und Positronen von anderen geladenen Teilchen eingesetzt (siehe Abbildung 1.2) und erzeugt ein Triggersignal zur Auslese nur der Ereignisse, die ein Leptonenpaar enthalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Steuer- und Kontrollsystem für diesen Detektor aufgebaut. Auf den Aufbau des RICH und dessen Funktionsweise wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Kapitel 2

Der RICH Detektor

Das gesamte Konzept des HADES Spektrometers wird durch die hohen Reaktionsraten im Target und die hohen Multiplizitäten geladener Teilchen in Schwerionenkollisionen (bis zu 200 in Au + Au) begründet. Dies bedingt eine außerordentlich effiziente Trennung zwischen e^+e^- auf der einen und dem gesamten hadronischen Untergrund, der mehr als 99 % der Teilchenrate ausmacht, auf der anderen Seite. Ähnlich wie in vielen Experimenten der Teilchenphysik nutzt man auch hier die Vorteile von Čerenkovzählern, die gerade in den Geschwindigkeitsbereichen der Teilchen, die hier untersucht werden sollen, zum Tragen kommen. Im Gegensatz zu den sonst auch verwendeten Flugzeitmessungen (TOF) bieten Čerenkovzähler eine kompaktere Möglichkeit, höchste Geschwindigkeitsauflösung in einem relativ breiten Impulsbereich zu realisieren. Zusätzlich kann der Zähler aber auch so entworfen werden, daß er für den größten Teil des Untergrundes praktisch blind ist und somit die gelieferte Information bereits wirksam vorgefiltert und damit auch stark reduziert werden kann. Im folgenden Kapitel soll nun zunächst kurz auf die physikalischen Grundlagen von Čerenkovdetektoren eingegangen und im weiteren die einzelnen Komponenten des HADES-RICH bezüglich ihrer Anforderungen an die zum Betrieb notwendigen Parameter diskutiert werden.

2.1 Grundlagen

Das Prinzip der Messungen von Teilchengeschwindigkeiten mit Hilfe des Čerenkov Effektes beruht auf den von Čerenkov in den Jahren 1934 bis 1944 durchgeführten Untersuchungen [16]. Ähnlich wie hinter einer Schallquelle, die sich schneller als der Schall bewegt, der “Machsche Kegel” entsteht, erzeugt ein geladenes Teilchen einen Kegel elektromagnetischer Strahlung, wenn es sich schneller als das Licht im umgebenden Medium bewegt. Eine theoretische Erklärung auf Basis der klassischen Elektrodynamik fanden 1937 Tamm und Frank [17]. Wenn die Teilchengeschwindigkeit größer wird als die Lichtgeschwindigkeit im umgebenden Medium, existiert

genau eine Richtung Θ_C bezüglich der Teilchenspur, für die alle emittierten Kugelwellen konstruktiv interferieren. Aufgrund der Rotationsymmetrie um die Trajektorie erfolgt die Emission der Čerenkovstrahlung von jedem Punkt der Teilchenspur in einen Kegelmantel, dessen halber Öffnungswinkel Θ_C gemäß Gleichung (2.1) von der Teilchengeschwindigkeit v_p und dem Brechungsindex $n(\lambda)$ des Mediums abhängt [18].

$$\cos(\Theta_C) = \frac{1}{\beta \cdot n(\lambda)} \quad (2.1)$$

mit $\beta = v_p/c$ und $n(\lambda)$ Brechungsindex des Mediums. Lichtemission findet also erst ab einer Grenzgeschwindigkeit β_{thr} statt. Für sie gilt:

$$\beta_{thr} = \frac{1}{n} \quad \text{und} \quad \gamma_{thr} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_{thr}^2}} \quad (2.2)$$

Für die Anzahl der nachgewiesenen Photonen gilt die Beziehung (2.3), wobei Z_{eff} die effektive Teilchenladung ist und N_0 als Maß für die Nachweiseffizienz des gesamten Detektors bei einer Dicke des Radiators Δd von entscheidender Bedeutung ist [19].

$$N_{det}^{Ph} \approx N_0 \cdot Z_{eff}^2 \cdot \Delta d \cdot \overline{\sin^2(\Theta_C)} \quad (2.3)$$

Man erhält $\overline{\sin^2(\Theta_C)}$ als gewichtetes Mittel der auftretenden Čerenkovwinkel. Die Kennzahl N_0 beinhaltet alle für die Nachweiseffizienz wesentlichen Detektorparameter.

$$N_0 = \frac{370}{(eV \cdot cm)} \cdot \int_{\Delta E} \prod_i \epsilon_i \cdot dE \quad (2.4)$$

Das zugängliche Energieintervall der Čerenkovphotonen erstreckt sich dabei oft bis zu $E_{ph} = 8.5$ eV, das heißt bis in den Wellenlängenbereich des Vakuum-Ultraviolett. Als Beispiele für die Parameter ϵ_i sind Faktoren wie optische Transmissionen, Reflektivitäten, geometrische Effekte und vor allem auch die Effizienz des verwendeten Photonendetektors zu nennen. Daher wird N_0 oft auch als Gütefaktor eines Čerenkovdetektors bezeichnet.

2.2 Aufbau des Detektors

Abbildung 2.1 zeigt, wie der RICH Detektor innerhalb der HADES Konfiguration als innerste Komponente das Target umschließt. Ein im Radiatorvolumen entstehender Čerenkovlichtkegel wird durch einen sphärischen Spiegel in Rückwärtsrichtung auf den Photonendetektor in einen Ring fokussiert und nachgewiesen. Dazu besteht der Detektor im wesentlichen aus vier Hauptkomponenten: Radiator, Spiegel, Fenster und Photonendetektor. Um die nachfolgende Impulsmessung möglichst nicht zu beeinflussen, sollte der Detektor alle im Target entstandenen Reaktionsprodukte

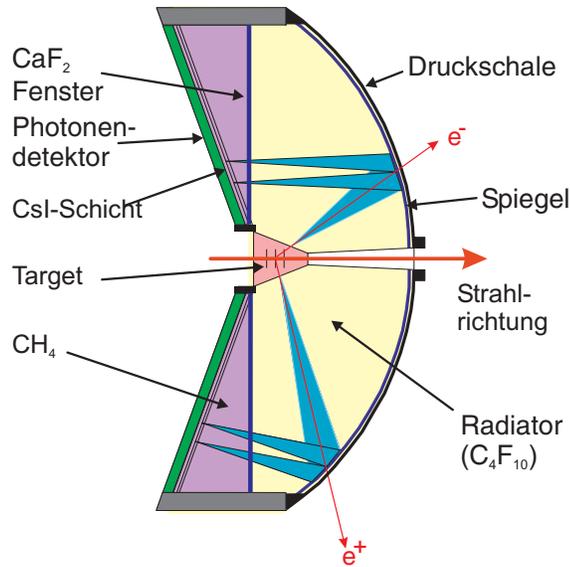


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des HADES RICH

möglichst ungestört passieren lassen, aber nur im Fall der sehr schnellen Leptonen ein Signal produzieren. Die von den Teilchen durchdrungenen Materieschichten sollten also im Idealfall “masselos” sein und “unendliche Strahlungslängen” besitzen. Andererseits ist klar, daß alle anderen Detektoren mit der Länge des RICH Radiators mitskaliert werden müssen. Um die Kosten zu minimieren, muß der RICH auf die unbedingt notwendige Größe reduziert werden. Gleichung (2.3) zeigt, daß damit aber die zur Verfügung stehende Menge an Čerenkovlicht begrenzt wird und somit eine Optimierung zwischen Signifikanz der Čerenkovringe und den RICH-Dimensionen notwendig ist. Da man hier in der Konzeptionsphase des Projektes bis an die Grenze des praktisch erreichbaren ($N_0 \sim 110$) gegangen ist, müssen die einzelnen Parameter ϵ_i optimale Werte einhalten.

Neben den bereits in der Konstruktionsphase des RICH-Detektors festgelegten grundlegenden Eigenschaften wie optische Abbildung, mechanischer Aufbau und Polarwinkelakzeptanz gibt es auch einige zeitlich veränderliche Parameter, welche entscheidenden Einfluß auf die Funktion und die Gesamtleistung des Detektors haben. Diese umfassen die VUV-Transmission der Betriebsgase, die Betriebszustände des Gassystems (Drücke, Temperaturen) und des Photonendetektors (Anodenspannungen, Ströme) ebenso wie den Zustand der Auslesestromversorgungen.

Zur Erläuterung sollen im Folgenden die wesentlichen Detektorkomponenten und Kontrollaufgaben kurz beschrieben werden.

Radiator

Als Radiator wird gasförmiges C_4F_{10} benutzt. Dieses besitzt eine Čerenkovschwelle von $\gamma_{thr} = 18$ (vgl. Gl. 2.2). Weiterhin besitzt dieses Gas eine gute Transparenz im Vakuum-Ultravioletten (VUV) Wellenlängenbereich, eine vernachlässigbare Lumineszenzanregbarkeit durch geladene Teilchen [20] und eine geeignete Strahlungslänge. Begrenzt wird das Radiatorvolumen nach außen durch eine CFK-Druckschale (Dicke 0.4 mm), welche dem prinzipiellen Anspruch einer masselosen Wand annähernd gerecht wird.

Das Design und die Bauweise des Radiatorvolumens stellt große und zum Funktionieren des RICH wichtige Anforderungen an die Betriebsparameter. Zum einen besitzt die Transmission des Radiatorgases signifikanten Einfluß auf die Nachweiseffizienz von Čerenkovringen und erfordert somit eine ständige Überwachung. Zum anderen ist es auf Grund der fast "masselosen" Konstruktion der Druckschale auch notwendig, den Arbeitsdruck innerhalb der Druckschale zu limitieren, um eine Zerstörung des Radiatorsystems zu vermeiden. Der Arbeitsdruck soll im Bereich 1000 - 1300 hPa frei einstellbar sein.

Spiegel

Der RICH-Spiegel muß im wesentlichen drei Kriterien erfüllen. Zunächst muß er eine hohe Reflektivität im VUV Bereich aufweisen, was eine mittlere Mikrorauhigkeit der Oberfläche von 1 - 2 nm erfordert. Weiterhin muß er hinreichend große Strahlungslängen aufweisen, damit durch Kleinwinkelstreuung die Leptonen nicht zu stark von ihrer Trajektorie abgelenkt werden. Zum anderen muß er formstabil sein, um in der Fokalebene ein ausreichend scharfes Abbild der Čerenkovringe zu ermöglichen.

Um alle diese Bedingungen zu erfüllen, wurde in Zusammenarbeit mit der Industrie ein neuartiges Spiegelsystem aus 18 Einzelspiegeln entwickelt, die aus glasartigem Kohlenstoff (Sigradur G) hergestellt, poliert und zugeschnitten werden. Die hohe Reflektivität im VUV Bereich wird erreicht durch eine dünne Al-Bedampfung unter Hochvakuumbedingungen und eine MgF_2 Vergütung. Eine Dokumentation dieser RICH-Komponente ist zur Zeit in Vorbereitung.

Fenster

Die Trennung zwischen Radiator- und Detektorvolumen erfolgt mittels eines VUV-transmittiven Fensters aus CaF_2 . Es besteht aus 64 hexagonalen Kristallen mit jeweils 20 cm Umkreisdurchmesser und einer Dicke von 5 mm, die zu einem großen Fenster gefügt wurden. Der Gesamtdurchmesser des Fensters beträgt 1.5 m. Die Kristalle wurden einzeln auf ihre Transmissionseigenschaften geprüft (vgl. Abbildung 2.2) und die jeweiligen Ergebnisse werden zur Auswertung der Experimentdaten in

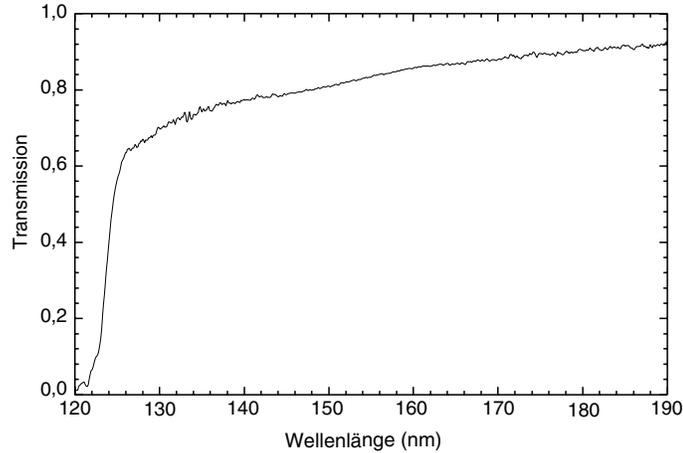


Abbildung 2.2: Transmission einer von insgesamt 64 CaF_2 -Kristallscheiben, die zum RICH-Fenster zusammengefügt wurden.

die Analyse miteingebunden.

Um die Zerstörung des empfindlichen Fensters zu vermeiden, muß gewährleistet werden, daß Druckdifferenzen größer als 5 hPa [21] zwischen Radiator- und Photonen-Detektorvolumen auf keinen Fall auftreten. Eine entsprechende Überwachung und Steuerung ist ebenfalls Teilaufgabe eines Kontrollsystems, damit rechtzeitig zu große Differenzen erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Darüberhinaus müssen auch Oszillationen des Druckunterschieds, die schon bei kleineren Druckunterschieden zur Zerstörung des Fensters führen können, regelungstechnisch unter Kontrolle gebracht werden.

Photonendetektor

Zum Nachweis der Photonen werden ortsempfindliche Vieldrahtproportionalkammern (MWPC, multi wire proportional chamber) mit einer hochsegmentierten Pad-Kathode benutzt. Als Photokonverter wird dabei Cäsiumjodid (CsI) verwendet. Dies bietet im Gegensatz zu den sonst verwendeten gasförmigen Photokonvertern (TMAE, TEA) den Vorteil, daß die Photoelektronen nur von einer definierten Fläche emittiert werden und der Driftweg zu den Anodendrähten gering ist (vgl. Abbildung 2.3). So erhält man ein paralaxenfreies Abbild und behält auch die scharfe Zeitbeziehung zwischen Photon und Signal am Detektor, kann also hohe Ereignisraten verkraften [19].

Generell läßt sich die Funktionsweise eines solchen Zählers in folgender Art und Weise charakterisieren:

Ein Čerenkovphoton tritt durch das Fenster in das Detektorvolumen, passiert die drei Drahtebenen (vgl. Abbildung 2.3) und trifft auf die Padebene. Dort löst es ein Elektron aus (Wahrscheinlichkeit $QE_{CsI}(\lambda)$), welches durch die angelegte elektrische

Sensoren in diese umwandeln. Die zuverlässige Vermessung der Gastransmission im VUV-Wellenlängenbereich auf Verunreinigungen von wenigen ppm erfordert jedoch den Aufbau einer speziellen Anordnung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher ein Datenerfassungssystem (“slow control”) zur Überwachung der RICH Detektorparameter unter Einschluß einer “online” Transmissionsmessung entwickelt und aufgebaut.

Im Folgenden wird zunächst auf das Gesamtkonzept für die Erfassung der grundlegenden Meßgrößen am Gesamtsystem und speziell am RICH eingegangen. In Kapitel 4 wird der Aufbau eines automatisierten Systems zur Gastransmissionsmessung und dessen Anbindung an das Gesamtsystem beschrieben.

Kapitel 3

Das Steuer- und Kontrollsystem des RICH

Zweck dieses Systems ist es, die im vorangegangenen Kapitel genannten, zeitlich langsam veränderlichen Betriebsparameter des RICH zu kontrollieren und aufzuzeichnen. Zusätzlich ist in einigen Fällen auch ein steuernder Zugriff auf einzelne Subsysteme notwendig. Das Datenaufnahmesystem des RICH [22], dessen primäre Aufgabe die Verarbeitung der im RICH erzeugten Ereignisdaten ist, eignet sich aus folgenden Gründen hierfür nicht:

- Das Datenaufnahmesystem ist auf die Verarbeitung von Ereignisdaten mit einer Rate bis 100 kHz angelegt. Bei langsam veränderlichen Parametern ist die statistisch verteilte, triggerorientierte Auslese ungeeignet und führt zu unnötig großen Datenmengen.
- Die verwendeten Datenformate orientieren sich an der Gesamt-Ereignisstruktur von HADES. Diese Struktur ist nicht für die Aufnahme von Parametern aus dem Steuer- und Kontrollsystem ausgelegt.
- Die zeitliche Abfolge der Messungen erfordert keine Synchronisation mit dem Ereignis-Trigger oder anderen Detektorsystemen. Vielmehr orientiert sich der Ablauf an den Betriebszyklen, zum Beispiel des Gassystems.
- Aufgrund des Umfangs der Datenaufnahmeelektronik ist es nur schwer möglich, nach der Aufbauphase auf einfache Weise zusätzliche Datenquellen (Sensoren) zu integrieren. Gerade dies kann aber zur Optimierung des Steuer- und Kontrollsystems notwendig sein.
- Durch die Verwendung von leistungsstarken Komponenten für das Datenaufnahmesystem (DAQ)(VME basierte Prozeßrechner, ATM basierender Datentransport) sind diese im oberen Preissegment angesiedelt. Derart leistungs-

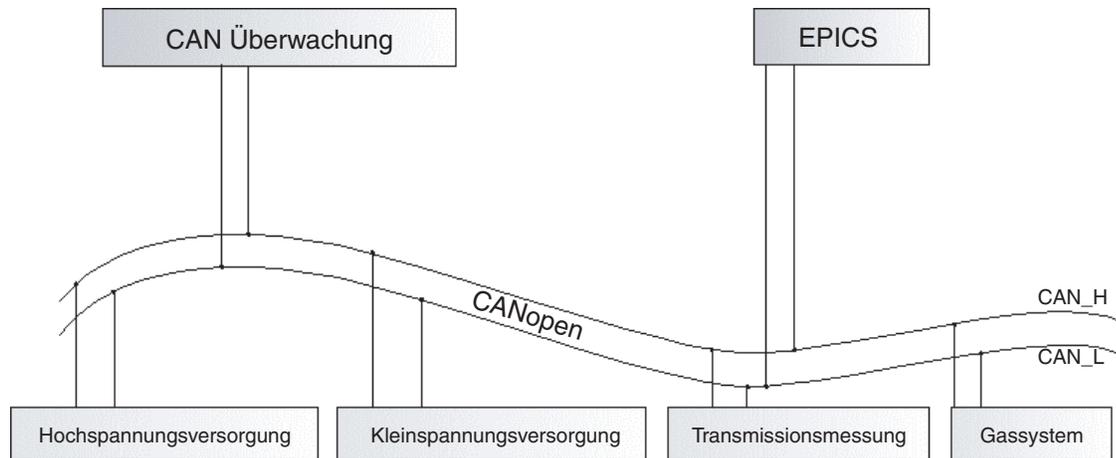


Abbildung 3.1: Konzeptionelle Darstellung des RICH Steuerungssystems. Die eingetragenen Steuerungskomponenten werden in den folgenden Abschnitten und Kapiteln ausführlich beschrieben.

fähige und damit teure Baugruppen sind für das Kontrollsystem nicht erforderlich

- Durch die anwenderspezifische Entwicklung der DAQ-Elektronik gestaltet sich die Anbindung kommerzieller Sensoren in vielen Fällen schwierig.

In weniger komplexen Experimenten ist es daher auch heute noch üblich, die gewünschten Parameter manuell durch eine sorgfältige Protokollführung für die spätere Datenauswertung aufzuzeichnen. Bei einem so umfangreichen Experiment wie HADES ist dies schon wegen der großen Zahl von Parametern nicht mehr praktikabel. Der stetige Fortschritt der Elektronik und Meßtechnik in den letzten Jahren hat dazu geführt, daß ein Großteil der Steuerungsaufgaben von einfachen rechnergestützten Systemen erledigt werden kann. Infolgedessen ist es sinnvoll, auch die Kontroll- und Aufzeichnungsaufgaben für den HADES RICH mit solchen Systemen abzuwickeln.

3.1 Anforderungen an das Kontrollsystem

Nachdem ein derartiges System für alle Detektorsysteme benötigt und aufgebaut wird, erscheint es sinnvoll, eine Integration zumindest auf einer von der Hardware abstrahierten Ebene anzustreben. Zusätzlich ist es vorteilhaft, sich auch hardwareseitig auf gemeinsame Schnittstellen zu einigen, die nach Möglichkeit bereits standardisiert sind. Im einzelnen können hierbei folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Kommerzielle Verfügbarkeit
- Kosten

- Erweiterbarkeit
- Echtzeitanforderungen
- Fehlertoleranz
- geringe Störanfälligkeit
- Dezentralität

Ein Großteil dieser Anforderungen tritt auch in Anwendungen der Industrieautomatisierung von Fertigungs- und Produktionsanlagen auf. Daher sind viele sog. Feldbussysteme kommerziell verfügbar, welche je nach Anwendung und Auslegung den oben genannten Kriterien in unterschiedlicher Weise gerecht werden. Die Notwendigkeit einer gemeinsamen Schnittstelle für alle Steuer- und Kontrollsysteme bei HADES bedingt die Auswahl eines dieser Feldbussysteme.

3.2 Vergleich verschiedener Feldbussysteme

Feldbusse sind eine spezielle Art von lokalen Netzwerken (LAN) und wurden zum Zweck der Datenaufnahme und der Ansteuerung von Sensoren und Regelgliedern entwickelt. Im Gegensatz zu "konventionellen" Netzwerken, wie zum Beispiel "Ethernet", sind Feldbusse für den Austausch von kurzen Status- und Kommando-Nachrichten optimiert. Derzeit existieren mehrere Standards, welche auf spezielle industrielle Anforderungen hin entwickelt wurden. Der folgende Abschnitt soll die Entscheidung der HADES-Kollaboration für einen speziellen Feldbus anhand ihrer unterschiedlichen Leistungsmerkmale erläutern.

FILBUS

Der FILBUS wurde für komplexe I/O-Systeme entwickelt, welche auf dem Prinzip der Dezentralität und Multimaster-Kommunikation beruhen. Grundlegende Funktionen wie Verzögerung, Pulszähler oder das Senden und Empfangen von Nachrichten zu und von anderen Netzwerkknoten ist bereits in die einzelnen Module implementiert. Die grundlegenden Eigenschaften sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

BITBUS

Dieser von Intel entwickelte Feldbus bietet die Möglichkeit, verteilte I/O-Systeme in Multibussysteme einzubinden. Gegenwärtig ist dies eines der weitverbreitetsten und ausgereiftesten Netzwerksysteme. BITBUS erlaubt es, Programme über das Netzwerk zu laden und in den einzelnen, verteilten Netzknoten auszuführen. Er wird durch die in Tabelle 3.1 zusammengefaßten Leistungsmerkmale charakterisiert.

Feldbussystem	FILBUS	BITBUS	WorldFIB
Übertragungsrate	375 kBits/s	375 kBits/s	1 MBit/s
Max. Netzwerkknotenanzahl m. Repeater	250	250	256
Max. Netzwerkknotenanzahl o. Repeater	32	32	64
Max. Übertragungsstrecke m. Repeater	13.2 km	13.2 km	10 km
Max. Übertragungsstrecke o. Repeater	1.2 km	1.2 km	2 km
Buszugang	Master / Slave	Master / Slave	Busarbiter
Kabel	Twisted Pair	Twisted Pair	Twisted Pair
Datenmenge	1 bis 256 Bytes	1 bis 13 Bytes oder 52 Bytes	1 bis 128 Bytes
Hauptvorteile	Ereignisgesteuerte I/Os Software in einzelnen Modulen	große Anzahl von Anwendungen programmierbare Netzwerkknoten	verteilte Datenbank deterministisches Verhalten
Hauptanwendungen	Verteilte I/O-Systeme Datenaufnahme	Intelligente I/O-Systeme Prozeß-Steuerung	Echtzeitanwendungen Prozeßautomatisierung
Feldbussystem	PROFIBUS	CAN-Bus	
Übertragungsrate	500 kBits/s	bis zu 1 MBits/s	
Max. Knotenzahl m. Repeater	127	127	
Max. Knotenzahl o. Repeater	32		
Max. Übertragungsstrecke m. Repeater	10 km	50 m (bei 1 MBit/s)	
Max. Übertragungsstrecke o. Repeater	1.2 km	500 m (bei 125 kBits/s)	
Buszugang	Token Passing	CSMA (Carrier Sense, Multiple Access)	
Kabel	Twisted Pair	Twisted Pair	
Datenmenge	250 Bytes	0 bis 8 Bytes	
Hauptvorteile	Schnelle Daten Übertragung	Hohe Effizienz bei kurzen Botschaften preisgünstig	
Hauptanwendungen	Implementierung System-Programmierbarer Steuerungen Industrieautomatisierung	Automobilindustrie	

Tabelle 3.1: Leistungsmerkmale der verschiedenen Bussysteme. Beim CAN-Bus bleibt anzumerken, daß keine Repeater für stärkere und längere Netzwerke vorgesehen sind.

WorldFIB

Einen anderen Ansatz macht der FIB-Feldbus, der ein vollkommen deterministisches und stabiles Muster für Prozeßvariable (diese werden von Sensoren erzeugt und von Regelgliedern umgesetzt) und Nachrichten wie zum Beispiel Konfigurationen und Kommandos garantiert. Der Buszugang wird über einen sogenannten "Busarbitrator" gewährt. Dieser sendet eine Kennung an alle Netzknoten und triggert somit das Modul, welches die zugehörige Variable erzeugt, seinen gegenwärtigen Wert auf das Netzwerk zu legen. Somit ist gewährleistet, daß alle Knoten, die diesen Wert benötigen, ihn gleichzeitig erhalten. Das Konzept beruht auf dezentralen Datenbanken dieser Variablen in den einzelnen Modulen und erreicht somit Echtzeitanwendbarkeit. FIB besitzt die in Tabelle 3.1 aufgeführten Eckdaten.

PROFIBUS

Dieser Feldbus wurde für die Kommunikation zwischen Computern und Speicher programmierbaren Steuerungen (SPS) entwickelt. Er basiert auf einem echtzeitfähigen asynchronen Token-Ring-Prinzip. Der PROFIBUS kann sowohl in einem Multimasterbetrieb wie auch als echtes Master-Slave System arbeiten. Die im OSI-Modell festgelegten Netzwerkschichten (vgl. in A.1 1., 2. und 3.) wurden bereits standardisiert und sind wie in Tabelle 3.1 spezifiziert.

CAN-Bus

Das Controller Area Network (CAN) ist ein schneller serieller Feldbus, der zur effizienten und verlässlichen Kommunikation zwischen Sensoren und Regelgliedern benützt wird. Eigentlich zur Vereinfachung der Verkabelung in Automobilen gedacht, hat dieser Feldbus auf Grund seiner einzigartigen Leistungsmerkmale auch in der Industrieautomatisierung Einzug gehalten. Besonders herausragende Merkmale sind:

- jeder Netzknoten erhält Zugang zum Bus, wenn dieser frei ist
- kein Verlust von Daten durch Kollisionsvermeidung
- unterschiedliche Priorisierung von Nachrichten
- Multimastersystem mit "peer-to-peer" Kommunikation
- automatisches Erkennen und Signalisieren von Fehlern
- automatische Wiederholung von Botschaften im Fehlerfall

Die Leistungskennzahlen des CAN-Busses sind ebenfalls in Tabelle 3.1 aufgeführt.

3.3 CAN-Bus im HADES-Steuerungssystem

Auf Grund der außerordentlichen Leistungsmerkmale wie Priorisierbarkeit der Nachrichten erscheint der CAN-Bus für die von HADES geforderte Funktionalität am

besten geeignet. Das Konzept des RICH Steuerungssystems ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. Im Folgenden wird nun genauer auf den CAN-Standard (ISO11898) eingegangen.

3.3.1 CAN- Bitübertragungsschicht

Diese im OSI-Modell niedrigste Netzwerkschicht (vgl. Anhang A.1) spezifiziert die physikalischen und elektrischen Eigenschaften des Busses und der Hardware, die den Inhalt von Nachrichten in elektrische Signale umwandelt und umgekehrt.

Die physikalische Verbindung zwischen den einzelnen Netzwerkknoten werden im CAN-Bus über verdrehte Doppeladern (“twisted pair”) hergestellt, wobei die Signale durch die Differenz zwischen zwei Potentialen repräsentiert werden. Diese beiden Signale (CAN_H, CAN_L) besitzen im Ruhezustand des Busses ein Potential von 2.5 V. Eine “1” wird durch ein höheres Potential von CAN_H repräsentiert, eine “0” durch ein höheres Potential von CAN_L. Somit behält das CAN-Netzwerk seine Funktionalität, selbst wenn nur eine der beiden Signalleitungen funktionstüchtig ist.

Die maximale Rate eines CAN-Netzwerkes liegt bei 1 MBit/s und wird mit zunehmender Netzwerklänge immer geringer (vgl. Tabelle 3.1).

Eine Besonderheit ist die Priorisierbarkeit von Nachrichten und das Prinzip der Vermeidung von Datenverlusten. Die grundlegenden Voraussetzungen hierfür werden schon in der untersten Netzwerkschicht durch den sogenannten “wired-and” Mechanismus (siehe Abbildung 3.2) gelegt. Dieser bewirkt, daß jeder dominante Zustand “0” den rezessiven Zustand “1” am Bus überschreibt. Wird von der Bitübertragungsschicht eines Knotens ein Signal “0” am Bus detektiert, obwohl er eine “1” gesendet hat, stellt dieser das Senden der Nachricht sofort ein und geht in den Empfangsmodus. Erst bei freiem Bus wird erneut versucht diese Nachricht abzusetzen.

3.3.2 CAN-Datenformate

Das CAN-Protokoll unterstützt zwei Datenformate von CAN-Botschaften, die sich essentiell nur in der Länge der zugehörigen Kennungen (“identifier”) am Anfang (“header”) einer CAN-Botschaft unterscheiden. Im Standardformat hat der Identifier eine Länge von 11 Bit, im erweiterten Format (“extended”) 29 Bit. Allgemein besteht eine CAN-Nachricht aus sieben Hauptfeldern wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Ein Datenpaket (“frame”) beginnt immer mit einem Startbit, das anzeigt, daß eine Nachricht an dieser Stelle beginnt. Der nächste Block regelt die Arbitrierung am Bus. Hierin enthalten ist der Identifier, der die Priorität der gesamten Botschaft festlegt und das RTR-Bit (“remote transmission request”), das angibt, ob es sich um eine Datenübermittlung oder um eine Datenanforderung handelt. Das Kontrollfeld beinhaltet zwei dominante Bits (r0 und r1) für zukünftige Anwendungen und Informationen über die Anzahl der Datenbytes im Datenfeld (DLC - data

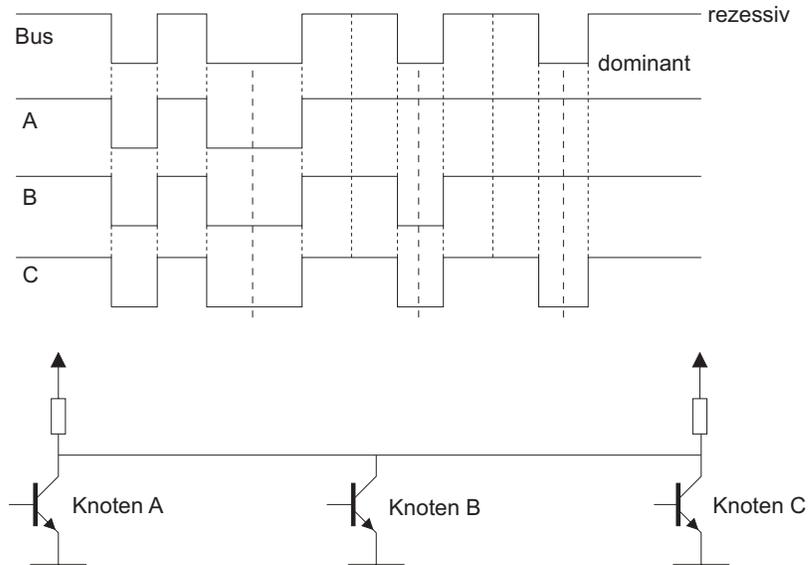


Abbildung 3.2: Struktur des "wired and"-Mechanismus. Die Abbildung zeigt die Lösung von Zugangskonflikten auf dem CAN-Bus. Der Netzwerkknoten, der die dominanteste Bitsequenz auf das Netzwerk zu legen versucht, bestimmt auch die auf dem Bus übertragene Sequenz.

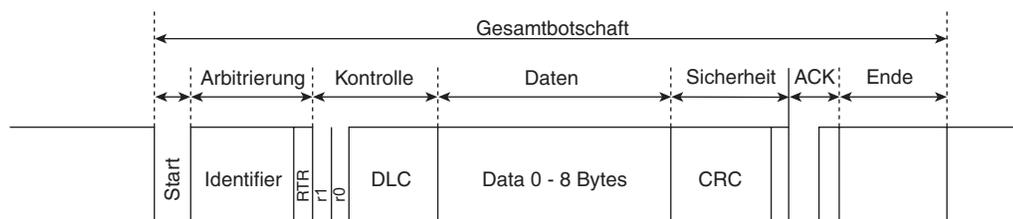


Abbildung 3.3: Struktur eines Standard CAN-Datenformates

length code). Die Übertragungssicherheit wird mit dem sogenannten “CRC-Block” garantiert, der bei der Fehlerbehandlung näher betrachtet wird. Darauf folgt ein Bestätigungsfeld (“acknowledge”), das durch zwei Begrenzerbits vom Rest des Bitfeldes abgekoppelt ist und zuletzt ein Bitfeld aus sieben rezessiven Bits, welches das Ende der Nachricht anzeigt (“end of frame”).

3.3.3 CAN-Fehlerbehandlung

In der CAN-Spezifikation sind fünf Mechanismen zur Fehlerbehandlung implementiert. Die erste Art der Fehlerbehandlung setzt auf der Ebene der Botschaften an. Jede Botschaft enthält einen 15 Bit breiten CRC-Block, der vom Sender in Abhängigkeit vom Inhalt der Nachricht generiert wird. Alle Empfänger, die diese Nachricht empfangen, berechnen den Inhalt des Blocks auf die gleiche Weise und zeigen jegliche Art von Übertragungsfehlern an (“CRC error”). Ein weiterer Mechanismus, der auf dieser Ebene Fehler erkennt und anzeigt, ist die Überprüfung des Datenformats. Sind vordefinierte Bitwerte nicht an der Stelle zu finden, an der sie sein sollten, wird ein sogenannter “Frame-Error” ausgelöst. Als letztes Mittel zur Fehlerbehandlung auf Nachrichten-Ebene ist der sogenannte “acknowledgement error check” implementiert (ACK). Hier wird geprüft, ob das Bestätigungs-Bit am Ende einer CAN-Botschaft empfangen worden ist.

Eine zweite Ebene, die zum Testen der Übertragungssicherheit benutzt wird, sind die einzelnen gesendeten Bits jeder Botschaft. Zum einen wird geprüft, ob die empfangenen Bits mit dem gegenwärtigen Buspotential übereinstimmen (“bit error”) und zum anderen wird das Verfahren des “bit stuffing” angewendet. Werden fünf Bits gleichen Zustands vom Sender auf den Bus gelegt, dann fügt dieser selbstständig ein Bit des entgegengesetzten Zustands ein. Dieses Zusatzbit wird dann wieder vom Empfänger gelöscht. Detektiert ein Netzwerkknoten sechs aufeinanderfolgende Bits gleichen Potentials, dann wird “stuff error” ausgegeben.

Das Prinzip der Fehlerbeschränkung ist ebenfalls einzigartig im CAN-Bus. Es wird so eine Möglichkeit garantiert, prinzipielle und dauerhafte Fehler von einmaligen Störungen zu unterscheiden. Bei wiederholtem Auftreten von Fehlern werden von CAN drei unterschiedliche Arten von Fehler-Zuständen für Netzwerkknoten definiert. Bei geringer Fehlerzahl (127 oder weniger) befindet sich der Knoten im aktiven Fehlermodus (“error active mode”); dieser entspricht dem normalen Arbeitszustand. Werden weiterhin Fehler angezeigt, wird der angeschlossene Controller in den passiven Fehlermodus (“error passive mode”) gesetzt, dabei kann der Netzwerkknoten immer noch senden und empfangen, muß aber bei jeder Nachricht ein Fehlerdatenpaket (“passiv error frame”) auf den Bus legen. Werden noch weitere Fehler bei diesem Knoten detektiert, wird er vom Netzwerk genommen (“bus off mode”). Dem Controller ist es nicht mehr möglich Nachrichten zu empfangen oder zu senden. Dadurch wird der Busverkehr nicht weiter belastet. Erst wenn der Knoten wieder zurückgesetzt wird, kann er erneut seine Arbeit aufnehmen.

Nachricht	resultierende Identifier
NMT	000h
Synchronisation	080h
Zeitsignal	100h
Alarm	081-0FFh
PDO 1 (senden)	181-1FFh
PDO 1 (empfangen)	201-27Fh
PDO 2 (senden)	281-2FFh
PDO 2 (empfangen)	301-37Fh
SDO (senden)	581-5FFh
SDO (empfangen)	601-67Fh
Knotenüberwachung	701-77Fh

Tabelle 3.2: Vordefinierte Identifier-Belegung im CANopen-Protokoll. Die Priorität der Nachrichten nimmt dabei von oben nach unten ab.

CAN arbeitet somit bei der Fehlererkennung sehr gründlich. Fehler, die an allen Netzwerkknoten auftreten, werden zu 100% detektiert. Bei lokalen Einzelbitfehlern liegt die Wahrscheinlichkeit eines nichtdetektierten Fehlers bei ca. $3 \cdot 10^{-5}$.

3.3.4 Höhere Protokolle-CANopen

Viele CAN-Anwendungen benötigen noch weitere Funktionalitäten, die über die Basisfunktionen der Sicherungsschicht hinausgehen. In der sogenannten Anwendungsschicht (vgl. Schichten im OSI-Modell Anhang A.1) sind weitere Funktionalitäten implementiert. Aus diesen Gründen wurden von verschiedenen Organisationen sogenannte “higher layer protocols” entwickelt, die sich aber nicht wesentlich unterscheiden. Auf Grund der Verbreitung und Verfügbarkeit im europäischen Raum fiel die Wahl auf das sogenannte CANopen-Protokoll. Dieses regelt die Priorität der Netzwerkbotschaften (siehe Tabelle 3.2) und schafft auch eine weitverbreitete und leicht zu implementierende Schnittstelle zu kommerziell erwerbbaaren Produkten. Die signifikantesten Merkmale sollen hier im Folgenden kurz dargestellt werden.

Generell sieht CANopen die Nutzung zweier Kommunikationsarten mit unterschiedlichen Eigenschaften vor. Echtzeitdaten werden mit **Prozeß Daten Objekten** (PDO) übertragen, für Parameter- und Programmübertragungen werden **Service Daten Objekte** (SDO) gebildet. Form und Inhalt der per Prozeß Daten Objekt übertragenen Daten werden mit Hilfe der Service Daten Objekte vereinbart. In der Regel findet dies beim Initialisieren des Busses statt. Auf diese Art lassen sich mehrere Variable (z.B. Sollwert, Statuswort und lokale Eingangswerte) zu einem Telegramm kombinieren. Zwischen dem “Konfigurationsmaster” und den angeschlossenen Geräten wird mindestens ein Servicedatenkanal ausgebildet.

Weiterhin stellt dieses Protokoll Dienste, die von verteilten Steueraufgaben benötigt werden, zur Verfügung. Netzwerkmanagement wie Knoteninitialisierung (NMT), Bestimmung des Betriebszustands (ein/aus, “pre-operational”, ...), und die dynamische Verteilung von Identifiern (DBT) sind darin vorgesehen wie auch die Überwachung der Netzwerkknoten (Nodeguarding). CANopen ermöglicht somit eine Autokonfiguration des Netzwerkes und Zugriff auf alle Geräteparameter. Zusätzlich erlaubt dieses Protokoll zyklischen und ereignisgesteuerten Prozeßdatenverkehr und die Synchronisation von Geräten. Auf Grund dieser Möglichkeiten läßt sich eine überschaubare Netzwerkstruktur generieren, die bei Implementierung und Wartung des Systems eine große Erleichterung darstellt.

3.3.5 Rechneranbindung des CAN-Busses

Die Anbindung eines Rechners an das Steuer- und Kontrollsystem ist bei der Projektierung des Systems wie auch zur Visualisierung der relevanten Daten unumgänglich. Hierfür gibt es einen mobilen CAN-Netzwerkknoten (CAN-Dongle), der die physikalische Ankopplung eines PC an das Netzwerk via paralleler Druckerschnittstelle übernimmt. Diese Schnittstelle besitzt volle CAN-Funktionalität und erlaubt Datenübertragungen bis zu einer Rate von 500 kBits/s.

Die Verarbeitung dieser CAN-Daten wird von einem kommerziellen Software-Paket names CANalyzer übernommen, welches seinen eigentlichen Ursprung in der Automobilindustrie hat. Mit diesem ist es möglich, alle busrelevanten Daten wie Busstatistik und Buslast zu überwachen und generell die Kommunikation über den CAN-Bus zu kontrollieren. Dabei besteht auch die Option, hexadezimal gesendete Datenpakete in textueller Form darzustellen und Fehler in den Übertragungssequenzen zu lokalisieren. Zusätzlich handelt es sich bei dieser Software auch um ein vollständiges Programmiersystem, welches die Einbindung virtueller Netzwerkknoten in ein reales Netzwerk erlaubt wie auch die komplette Simulation komplexer Netzwerkarchitekturen. Zu diesem Zweck ist die C ähnliche Programmiersprache CAPL (**CAN Access Programming Language**) implementiert. Eine weitere Fähigkeit dieses Programmes besteht darin, unbekannte CAN-Systeme einzulesen und so die Netzwerkarchitektur dieser Systeme zu bestimmen.

Über die normierten Gerätebeschreibungsformate EDS (Electronic Data Sheets) und DCF (Device Configuration File) ist Datenaustausch mit jeder Software gewährleistet, die konform zum CANopen Standard ist.

3.4 Benutzerschnittstelle des Steuer- und Kontrollsystems

Eine entscheidende Aufgabe des Steuer- und Kontrollsystems ist die Visualisierung der relevanten Daten und Meßwerte. Für diesen Zweck wurde das bereits in mehre-

ren Großexperimenten erfolgreich eingesetzte Softwarepaket EPICS (**E**xperimental **P**hysics and **I**ndustrial **C**ontrol **S**ystem) ausgewählt. Bei EPICS handelt es sich um ein frei verfügbares Kontrollprogramm, das von der Beschleuniger-Technologie-Gruppe in Los Alamos und der Advanced Photon Source in Argonne entwickelt wurde. Es kann Systeme von bis zu 100 Überrahmen (crates), 30 Arbeitsplatzrechner (workstations) und mehr als 30000 Kanäle organisieren und verwalten. Es arbeitet dabei als vollständig verteiltes System, welches keine zentralen Geräte oder Softwareeinheiten benötigt. Die Struktur eines solchen Systems ist in Abbildung 3.4 gezeigt.

Die "Hardware-Architektur" ist in zwei Ebenen organisiert. "Frontend"-Maschinen kommunizieren mit Operator-Workstations über Standard-Netzwerke wie Ethernet. Die Frontend-Maschinen stellen dabei die Schnittstelle zwischen den lokalen I/O-Subsystemen (vgl. Abbildung 3.4) und den übergeordneten Arbeitsplatzrechnern dar. Diese Schnittstellen können als Gateway zu anderen EPICS-Systemen oder zu externen Einrichtungen wie Datenbanken genutzt werden.

Kontrollprozesse, die in den "Frontend"-Maschinen ablaufen, werden "Prozeßdatenbanken" genannt und bestehen aus sogenannten "Records". Ein Record kann als Objekt betrachtet werden, das sich aus Parametersätzen und zugehörigen Funktionen zusammensetzt. Die Softwarearchitektur beruht auf den "client server" Prinzip und gewährleistet Lese- und Schreibzugriff zwischen zwei beliebigen Netzknoten im Kontrollsystem.

Die graphischen Benutzeroberflächen laufen auf den Workstations. Über einen Display-Manager wird der Zugriff auf das Kontrollsystem ermöglicht. Er gewährleistet unterschiedliche und für die Anwendung wichtige Dienste, wie zum Beispiel die Handhabung von Alarmzuständen (Alarm Handler - ALH) oder ein Programm zur Speicherung und Wiederherstellung von Netzkonfigurationen ("back up and restore tool"). Die graphischen Benutzeroberflächen für die einzelnen Detektorgruppen können so mit Reglern, Schaltern und Meßanzeigen (mit physikalischen Einheiten) ausgestattet werden. Der Vielfalt von Oberflächen sind dabei keine Grenzen gesetzt. Auch der Zugriff auf systemrelevante Parametersätze in Datenbanken kann über dieses Interface vollzogen werden.

3.5 Einsatz des Kontrollsystems am RICH

Der Betrieb des RICH erfordert die Bereitstellung von gereinigtem Radiator- und Detektorgas wie auch der Versorgungsspannungen für Detektoren und Ausleseelektronik. Diese Komponenten und ihre Anforderungen an das Steuerungssystem sollen nun im Folgenden dargestellt und erklärt werden.

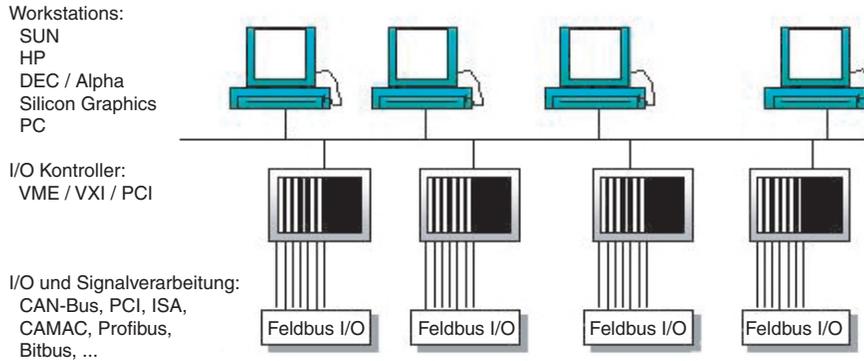


Abbildung 3.4: Hardwarearchitektur eines verteilten EPICS-Systems

3.5.1 Spannungsversorgungen

Alle in der RICH-Betriebsumgebung integrierten Spannungsversorgungen sollen in das Steuer- und Kontrollsystem eingebunden sein, wobei das Ein- und Ausschalten und das Überwachen der einzelnen Spannungen zu den generellen Aufgaben dieses Systems gehören wird. Zur Vermeidung von Ausfällen der Spannungsversorgungen ist die Messung der Temperatur in den einzelnen Netzteilen ebenfalls Bestandteil des Steuerungssystems. Bei einer Abweichung von den geforderten Sollwerten kann das System mit Alarmmeldungen auf solche Zustände reagieren. Im einzelnen sollen nun die zum Betrieb des RICH benötigten Spannungsversorgungen kurz beschrieben werden.

Hochspannungsversorgungen

Die Vieldrahtkammern benötigen für jedes der sechs Segmente zwei Hochspannungsversorgungen. Die eine besitzt die Aufgabe, die Anodendrähte (vgl. Abbildung 2.3) auf ein positives Potential von ca. 2.5 kV zu legen. Dabei muß die Spannung auf ca. ± 1 V stabil gehalten werden, also muß eine Auflösung von 12 Bit durch ein Überwachungssystem gewährleistet werden. Eine Änderung der Spannung um ca. 70 V bedeutet eine Verdoppelung der Gasverstärkung. Die Überwachung bietet weiterhin Schutz gegen Durchzündungen ("spark"), das die Zerstörung der Drähte verursachen und durch zu starken Sekundärphotonenfluß zu vorzeitigem Altern der Photokathode führen kann. Weiterhin ist es für den stabilen Betrieb der Drahtkammer notwendig, auch die zugehörigen Ströme zu messen (dynamischer Bereich: einige nA - μ A; Auflösung $\simeq 1$ nA (12 Bit)), um eine Zerstörung der Zähler zum Beispiel durch geladene Teilchen eines fehlgeleiteten Teilchenstrahls zu verhindern. Die andere Hochspannungsquelle ist für die Versorgung der Gateebenen (siehe Abbildung 2.3) verantwortlich. Eine besondere Aufgabe, die das Kontrollsystem speziell

bei Hochspannungsversorgungen übernehmen wird, ist die Einstellung sowie das langsame An- und Abfahren der benötigten Betriebsspannungen, um die Zähler für den Betrieb geeignet konditionieren zu können.

Insgesamt ist das Hochspannungssteuermodul für den Betrieb und die Überwachung von 12 Hochspannungsversorgungen, das heißt die Messung und Regelung von 12 Spannungen, 6 Strömen und 12 Temperaturen verantwortlich. Die Datenerfassung soll für jeden einzelnen Strahlpuls (“spill”) durchgeführt werden, um jeweils die entsprechende Gasverstärkung in den Zählern zu bestimmen. Die Pulsdauer des “langsam” extrahierten Strahls am Schwerionensynchrotron SIS der GSI variiert typischerweise zwischen 1-10s bei einem Pulsabstand von ca. 5s. Somit ist eine Messung der Spannungen und Ströme einmal in der Sekunde ausreichend.

Die Hochspannungen werden durch kommerzielle Hochspannungsmodule (CAEN) geliefert, die ihrerseits über den RICH CAN Controller ausgelesen und angesteuert werden.

Kleinspannungsversorgungen

Auch bei den Kleinspannungsversorgungen besteht die Notwendigkeit, die erzeugten Spannungen zu überwachen. Sie werden benötigt, um die für die Auslese nötigen Frontendmodule zu betreiben. Diese selbst gebauten Netzteile erzeugen die Spannungen ($\pm 5\text{ V}$, $\pm 3.3\text{ V}$) für jedes Detektorsegment und müssen einzeln überwacht werden, da sie bei Strahlbetrieb nicht zugänglich sind.

Die zweite Komponente des Kleinspannungskontrollsystems ist die Versorgung der Readout-Controller durch die VME-Crates und insbesondere der VME Auslese-Module (vgl. Kap.5 [33]). Dieses System erfordert ebenfalls die Möglichkeit zur Messung der Spannungen jeweils für die einzelnen Segmente.

Die Steuerung und Überwachung der insgesamt 33 Spannungen und 9 Temperaturen aus 9 Einzelnetzteilen wird zur Minimierung des Aufwandes sinnvollerweise in einer an den CAN-Bus angeschlossenen Überwachungseinheit zusammengefaßt. Diese weist ihrerseits teilweise potentialgetrennte Verbindungen zu den Einzelnetzteilen auf. Diese Lösung ist auch von der Kostenseite her deutlich günstiger als jedes der Netzteile mit einer CAN-Schnittstelle und einem eigenen Mikrocontroller auszurüsten.

Da weder die Hochspannungs- noch die Kleinspannungsversorgungen über eine geeignete Schnittstelle verfügen, wurde für die geschilderte Anwendung eine spezielle Kontrolleinheit mit CAN Schnittstelle entwickelt und aufgebaut. Diese Kontrolleinheit wird in Kapitel 5 vorgestellt .

3.5.2 Gasversorgungssystem

Unerlässlich für den Betrieb des RICH ist ein System, welches die Gasversorgung von Radiator und Detektoren übernimmt. Aus generellen Designgründen wie die

geringe Massenbelegung der Druckschale sind die folgenden Randbedingungen vom RICH-Gasversorgungssystem zu erfüllen:

- Stabilisierung und Regelung des Arbeitsdruckes im Bereich $1000 \text{ hPa} \leq p_{abs} \leq 1300 \text{ hPa}$
- Gewährleistung ausreichender Transmission in Radiator- und Detektorgas durch Sicherstellung der maximalen Verunreinigungen bei $\text{O}_2 < 1 \text{ ppm}$ und $\text{H}_2\text{O} < 1 \text{ ppm}$
- Einhaltung eines Differenzdrucks von maximal 5 hPa zwischen Detektor- und Radiatorvolumen, wobei besonders Druckdifferenz-Oszillationen zwischen diesen beiden Volumina vermieden werden müssen
- Bereitstellung eines stabilen und konstanten Gasflusses von ca. 700 l/h im Radiator und 350 l/h im Detektor
- Unabhängigkeit und Stabilität der Funktionsweise des Steuerungssystems

Funktionsweise des RICH-Gasversorgungssystems

Das Konzept des Gasversorgungssystems zeigt eine klare Zweiteilung in Detektor- und Radiatorversorgung, wie in Abbildung 3.5 deutlich zu erkennen ist.

Für die Versorgung der Photonendetektoren wird Methan unter einem Druck von 1000 hPa bis 1300 hPa durch das Detektorvolumen gespült (Ventil 73). Damit die geforderten Reinheitskriterien erfüllt sind, befinden sich vor den Einlässen der Detektoren zwei Gasreinigungskartuschen (Ventil 75, 76, 77). Hierbei handelt es sich zum einen um ein Molekularsieb (MS), welches Wasser aus dem Gas entfernt, und zum anderen um eine sauerstoffaffine Substanz (CU), welche über Redoxreaktionen dem Gas molekularen Sauerstoff entzieht. Das Gas wird hinter den Detektoren nach Durchlaufen einiger Sicherheitsmaßnahmen (53, 61, 62, 54, 60) wie Absolutdrucksensor (52) und Differenzdruckschalter (50, 51) über ein Rückschlagventil (84) in die Abluft abgegeben. Die zum Spülen notwendige Druckdifferenz wird von einem Kompressor (82) vor der Abluft erzeugt.

Der Radiator wird in einem geschlossenen Kreislauf mit Gas versorgt, um eine ausreichende Reinheit des Betriebsgases zu gewährleisten und die laufenden Kosten des Betriebs gering zu halten. Die wesentlichen Bestandteile des Versorgungskreises sind drei Reinigungsstufen. Vor- und Endreinigung (siehe Abbildung 3.5 Ventile 7, 8, 9 und 36, 37, 38) funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie im Methanversorgungsteil. Die hohe Kondensationstemperatur (siehe Abbildung 3.6) des C_4F_{10} erlaubt es, die Reinheit des im Radiator befindlichen Gasgemisches weiter zu erhöhen, indem man aus dem Radiatorgas das C_4F_{10} auskondensiert (5) und das verbliebene Gas abbläst (14, 15, 16). Das C_4F_{10} wird dem Radiator durch Verdampfen wieder zugeführt. Elementare Wichtigkeit in diesem Kreis besitzt die Druckminderung und

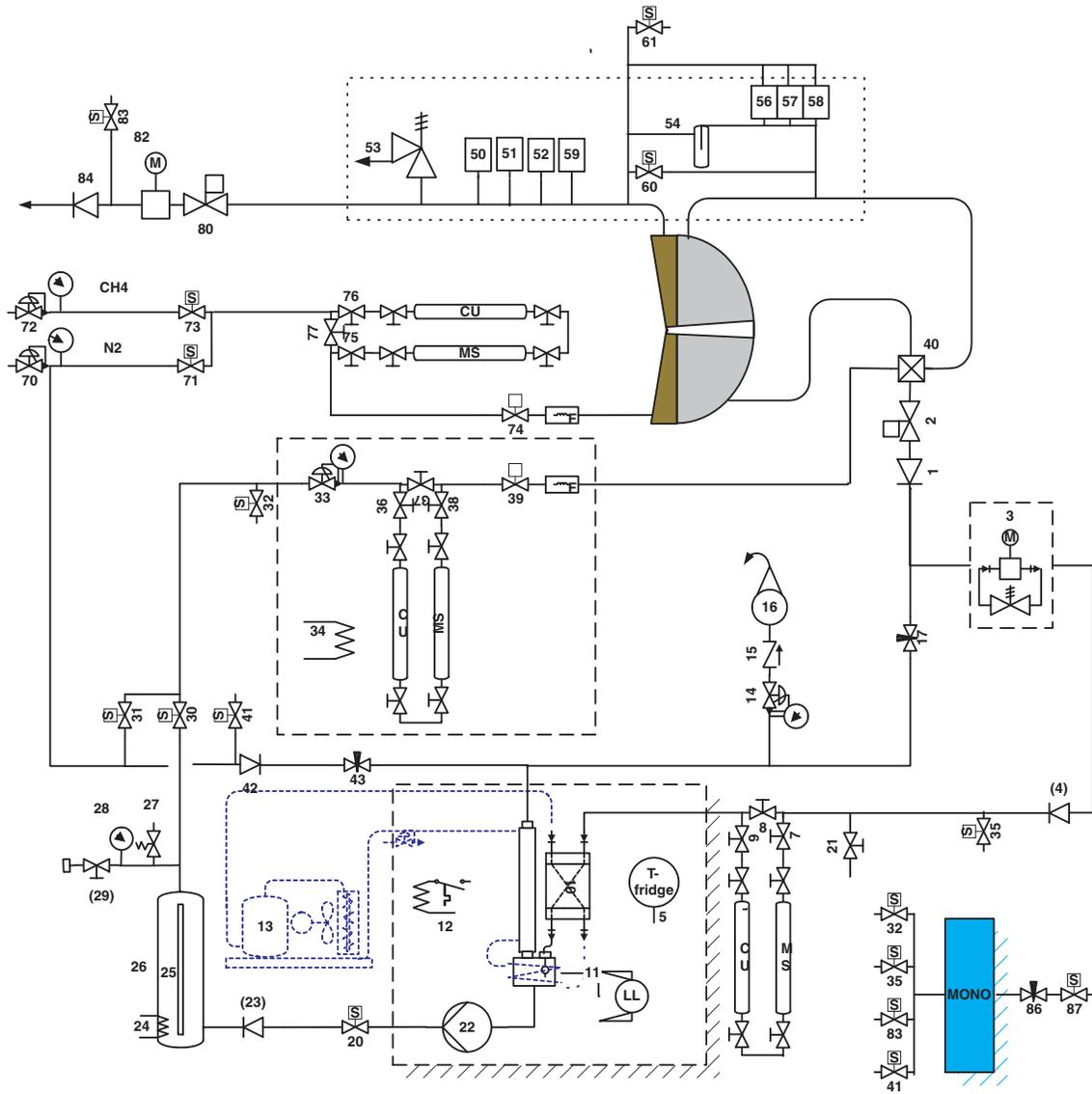


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des HADES-RICH Gasversorgungssystems

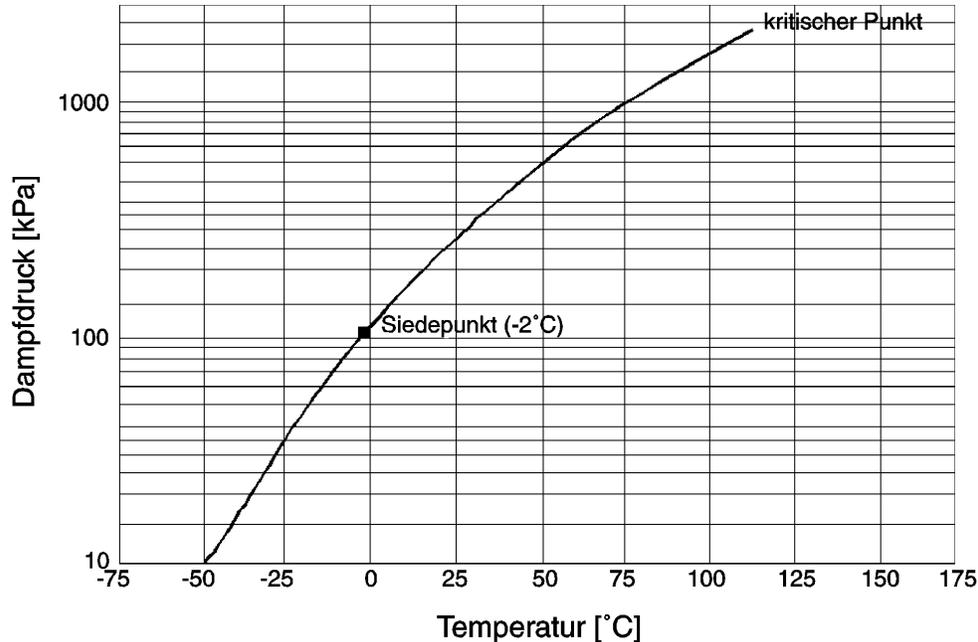


Abbildung 3.6: Die C₄F₁₀-Dampfdruckkurve (Daten von der Hersteller-Firma 3M)

-regelung vor dem Radiatoreingang, da der zur Reinigung benutzte Phasenübergang des C₄F₁₀ bei Temperaturschwankungen im Vorratsbehälter zu sprunghaftem Volumenanstieg führen kann. Zur Vermeidung unerwünschter Verflüssigung durch die Druckerhöhung im Kompressor zirkuliert das C₄F₁₀ mit trockenem Stickstoff durch Kompressor und Vorreinigungsstufe. Im Betrieb durchläuft das Gas die Reinigungsstufen kontinuierlich und die Gasqualität nähert sich im Radiatorsystem den geforderten Reinheitsanforderungen. Dies konnte durch Testmessungen bestätigt werden (siehe Kapitel 4.11).

Betriebszustände des Gasversorgungssystems

Zur Gewährleistung stabiler Druckverhältnisse im RICH sind für Betriebs- sowie Ein- und Abschaltungsphasen unterschiedliche Betriebszustände vorgesehen.

1. Spülzyklus

Dies ist der einfachste der vorhandenen Betriebszustände. Er gewährleistet eine Reinigung des Gesamtsystems oder der Einzelkreise mit einem geeigneten Spülgas wie zum Beispiel Stickstoff (Ventil 71 und 31 geöffnet). Dieser Zustand ist vor und nach den Strahlzeitphasen ständig aktiv.

2. Befüllzyklus

Während für den Betrieb der Detektoren das Gassystem am Einlaß nur von

Stickstoff auf Methan (Ventil 73) umgestellt werden muß, ist es im Radiatorkreis notwendig, den im Detektor befindlichen Stickstoff durch Zuführung von C_4F_{10} aus dem temperaturstabilisierten Vorratsgefäß (26) zu verdrängen. Zurückkommendes C_4F_{10} wird in einer $-25^\circ C$ kalten Falle kondensiert während der Stickstoff über 2 bar Überdruck einfach abgeblasen wird (14, 15, 16)

3. Betriebszyklus

Hierbei handelt es sich um den Standardbetriebsmodus bei laufenden Messungen. Der Unterschied zu dem bereits beschriebenen Befüllzyklus ist, daß in diesem Modus die Elemente zur Gasreinigung in den zirkulierenden Gasstrom geschaltet werden.

4. Rückgewinnungszyklus

Dieser Betriebsmodus stellt den Übergang zwischen Normalbetrieb und Spülzyklus dar. Die Stickstoffzufuhr (31) wird dazu eingeschaltet, das Verdampfen des Radiatorgases eingestellt (24) und die Flußrichtung im Detektor über ein Vierwegeventil (40) umgekehrt. Das schwere Gas C_4F_{10} wird unten aus dem Radiatorvolumen gedrückt, verflüssigt und im Vorratsbehälter gesammelt bis sich nur noch Stickstoff im Kreislauf befindet.

Steuerung des Gasversorgungssystems

Die hierbei anfallenden Steuerungsaufgaben übernimmt eine Speicher programmierbare Steuerung (SPS) der Firma Phytex (IGAS-Station), die sowohl Kommunikation über serielle Schnittstelle wie auch CAN-Bus erlaubt. Die Modularität der Steuerung ermöglicht die Abstimmung auf die Gassystem-Sensoren und Steuerglieder. Weiterhin wird so die Erweiterbarkeit für zukünftige Anforderungen garantiert. Ein 16 bit Mikrokontroller (80C166) macht diese Steuerung echtzeitfähig und durch seine große Speicherkapazität unabhängig von anderen Komponenten im Steuerungs- und Kontrollsystem.

Die Programmierung der Steuerung erfolgt in einer Textform (ST - structured text) nach IEC 1131-3. Dies garantiert die Portabilität der Software auf andere Steuerungen und erhöht mit strukturierter Programmierung die Übersichtlichkeit und Stabilität der Software.

Kapitel 4

Automatisierte Gastransmissionsmessung

Die Gesamteffizienz für den Nachweis von Čerenkovphotonen (vgl. Beziehung (2.4)) im HADES RICH läßt sich in der Form

$$\epsilon_{Gesamt} = R_{Sp} \cdot T_{Rad} \cdot T_{Fenster} \cdot T_{Det} \cdot QE_{CsI} \cdot \epsilon_{se} \quad (4.1)$$

darstellen, wobei die folgenden Parameter in diese Gleichung eingehen:

R_{Sp} - Reflektivität des Spiegels

T_{Rad} - Transmission des Radiatorgases C_4F_{10}

$T_{Fenster}$ - Transmission der CaF_2 -Fensterkristalle

T_{Det} - Transmission des Detektorgases CH_4

QE_{CsI} - Quanteneffizienz der CsI-Photokathode

ϵ_{se} - Nachweiseffizienz der Photoelektronen

Die Transmission des Radiatorgases wie auch des Detektorgases hat neben anderen Parametern signifikanten Einfluß auf die Nachweiswahrscheinlichkeit von Čerenkovringen. In der HADES Geometrie werden bei dem angestrebten $N_0 \sim 110$ je nach Teilchenpolarwinkel zwischen 12 und 20 Photonen je Ring nachgewiesen. Simulationen [23] sowie Experimente mit dem Prototypdetektor [24] haben gezeigt, daß Ringe mit weniger als 11 Photonen nicht eindeutig erkannt und vom Untergrund unterschieden werden können. Insbesondere für den besonders wichtigen Vorwärtswinkelbereich ($\Theta < 45^\circ$) ergeben sich daher nicht akzeptable Unsicherheiten bei der Identifizierungseffizienz für Elektron- Positron Paare. Damit erhalten die Transmissionsmessungen elementare Bedeutung bei der Auswertung der Experimentdaten. Mit Hilfe der Transmission kann man auch Aussagen über die Dichtigkeit des RICH und des

Gassystems treffen, da Lecks auf Grund nachlassender Transmission im Bereich um 160 nm erkannt und lokalisiert werden können. Somit besitzt eine ständig aktualisierte Messung der Gastransmission ganz besondere Wichtigkeit. Wegen dieses Stellenwerts wurde bereits zu Beginn des HADES Projekts ein Transmissionsmonitor von J. Lehnert (Universität Gießen) aufgebaut und in Betrieb genommen [25]. Das verwendete Verfahren eignete sich jedoch nicht für ein automatisches Überwachungssystem. Deshalb wurde unter Verwendung der wertvollen Erfahrungen mit diesem Gerät eine neue Meßanordnung aufgebaut und in Betrieb genommen.

4.1 Grundlegende Überlegungen

Um das geeignete Verfahren zur Messung der Transmissionen in Radiator und Detektor auszuwählen, sollen im Folgenden zunächst Charakteristika der auftretenden Transparenzverluste aufgezeigt und mögliche Meßverfahren diskutiert werden.

4.1.1 Absorption in Gasen

Die Lichtabsorption in Gasen wird beschrieben durch die wellenlängenabhängige Intensitätsverteilung

$$I(\lambda) = I_0 \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot p \cdot d), \quad (4.2)$$

die durch die Größen I_0 - eingestrahlt Intensität, λ - Wellenlänge, α - Absorptionskoeffizient, p - Druck und d - durchstrahlte Dicke bestimmt wird. Verunreinigtes Gas kann man auch als Gemisch mehrerer Gase betrachten. In diesem Fall gilt die Gleichung (4.2) in der Form

$$I(\lambda) = I_0 \cdot \exp(-\alpha_1(\lambda) \cdot p_1 \cdot d) \cdot \dots \cdot \exp(-\alpha_n(\lambda) \cdot p_n \cdot d) \quad (4.3)$$

wobei n die Anzahl und p_n die Partialdrücke der Gase im Gemisch angibt.

Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 160$ nm und der maximalen zurückzulegenden Strecke der Photonen im Radiator (76 cm [26]) entspricht eine Transmission von 95% einem Wasserdampf-Partialdruck ($\alpha_{(160\text{ nm})} \approx 100 \text{ cm}^{-1}$) von 0.67 Pa (genähert als ideales Gas).

Das im RICH verwendete Detektorgas Methan zeigt bei 143 nm eine Abschneidekante und ist für größere Wellenlängen weitgehend transparent [27]. Eine ähnliche Transmission besitzt auch das Radiatorgas (C_4F_{10}), dessen Abschneidekante bei 144 nm liegt. Zu niedrigeren Energien hin sind einzelne kleinere Absorptionsbänder zu erkennen, die auf Verunreinigungen des Gases zurückgeführt werden können. Hauptverantwortlich für mögliche Intensitätsverluste im RICH sind Beimischungen von Sauerstoff und Wasserdampf [25], deren Absorptionsverhalten im Folgenden charakterisiert wird. Bei eingestrahlt Wellenlängen im Bereich 125 nm - 175 nm dissoziiert molekularer Sauerstoff, was zu deutlichen Absorptionen mit Maximum

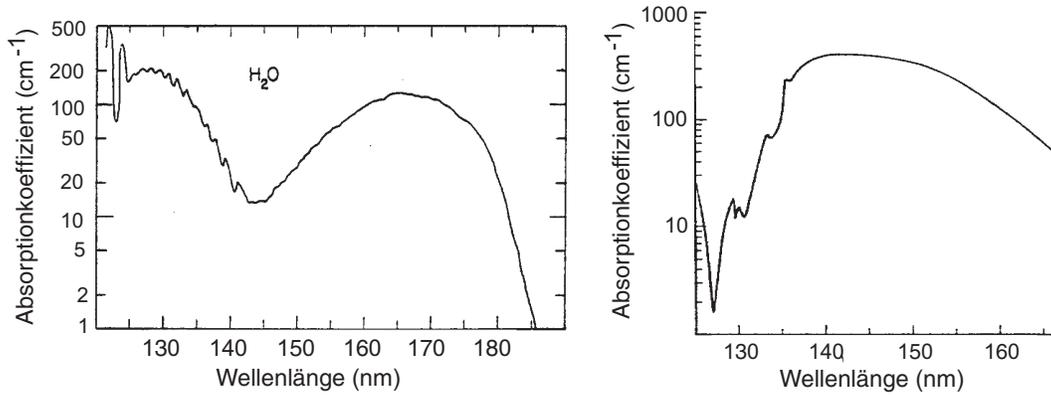


Abbildung 4.1: Absorptionskurve von Wasserdampf (links) [28] und molekularem Sauerstoff (rechts) [29]

bei 145 nm führt. Wasserdampf zeigt ebenfalls ein breites Absorptionskontinuum (145 nm - 186 nm) mit dem Maximalwert bei 166 nm (vgl. Abbildung 4.1).

Verunreinigungen sind sowohl in den zugeführten Gasen zu finden, können aber auch durch minimale Lecks im Gasversorgungssystem ins Radiator- bzw. Detektorvolumen gelangen. Weiterhin muß besonderes Augenmerk auf die Reinigung des gesamten Systems vor Inbetriebnahme gelegt werden, um auf und aus den Oberflächen austretendes Wasser zu entfernen. Dies erreicht man mit dauerhaftem Spülen, indem man mit trockenem Stickstoff (Qualität 5.0; Reinheit: 99.999%) die Wasserkonzentration ständig stark verdünnt. Das System wird durch Stickstoff nicht erneut "verunreinigt", da er im entscheidenden Wellenlängenbereich keine nennenswerten Absorptionen besitzt [27].

4.1.2 Methoden zur Messung von Gasverunreinigungen

Zunächst besteht die Möglichkeit mit massenspektrographischen Analysen die Gaszusammensetzung zu bestimmen und dann indirekt die VUV-Transparenz zu berechnen. Diese Methode bietet den Vorteil, unerwartete Verunreinigungen identifizieren zu können. Schwierigkeiten ergeben sich allerdings durch die Tatsache, daß durch die zur Massenseparation notwendige Ionisierung des zu messenden Gases (z.B. bei C₄F₁₀) auch alle denkbaren molekularen Fragmente erzeugt werden, welche bei der Analyse rekonstruiert werden müssen.

Interferometrische Methoden können ebenfalls zur Bestimmung der Gastransmission eingesetzt werden. Hierbei wird aus der Änderung des Brechungsindex, im Vergleich zu reinen Gasen, auf die Zusammensetzung des gemessenen Gases geschlossen. Diese Art der Messung bietet die höchste Genauigkeit, läßt aber keinen eindeutigen Schluß auf die Art der Verunreinigung zu. Die Messungen werden dazu bei Wellenlängen durchgeführt, bei denen sich die Brechungsindizes der im Gemisch

enthaltenen Gase am meisten unterscheiden. Wegen mangelnder Verfügbarkeit geeigneter kohärenter Lichtquellen im VUV-Bereich ist dieses Verfahren für den RICH nicht geeignet.

Auch die Messung von Elektronendriftzeiten in kleinen Testkammern kann Aufschluß über die Änderung der Zusammensetzung von Gasgemischen durch Verunreinigungen geben. Die unterschiedlichen Elektronegativitäten verschiedener Gase beeinflussen die Elektronendriftzeit durch die Kammer auf verschiedene Weise und geben somit Aufschluß über die Art und Menge der Verunreinigungen. Eine Meßanordnung dieser Art wurde bereits bei den Zeit-Projektionskammern des NA49-Experiments eingerichtet [30]. Die Anwendbarkeit dieses Prinzips hängt im einzelnen immer von den verwendeten Gasen und den zugehörigen Driftzeiten ab.

Die bisher erwähnten Verfahren erlauben die Bestimmung der Gastransmission nur indirekt über die Messung der Gaszusammensetzung und einer rechnerischen Extrapolation.

Direkte Transmissionsmessungen erlauben es dagegen, die gesuchte Größe ohne Umwege und inklusive aller vorhandenen Verunreinigungen zu messen. Diese Methode bietet Vorteile hinsichtlich des geringeren experimentellen Aufwands und der leichteren Integrierbarkeit in ein RICH-Steuer- und Kontrollsystem. Eine Identifikation von unbekanntem Verunreinigungen läßt diese Methode allerdings nicht zu. Weiterführende Untersuchungen (siehe oben) können aber mit Hilfe von entnommenen Proben in den jeweiligen Labors vorgenommen werden. Auf Grund der bereits mit solchen Messungen gemachten Erfahrungen [25] wurde die Entscheidung für ein Meßprinzip dieser Art getroffen.

4.2 Aufbau des RICH-Gastransmissionsmonitors

Im Folgenden soll der Aufbau einer vollautomatisierten Gastransmissionsmessung in ein Steuer- und Kontrollsystem dargestellt werden. Die Anbindung an das existierende Gassystem und die Einbindung in das Steuer- und Kontrollsystem wird ebenfalls diskutiert.

4.2.1 Lichtquelle, Testvolumen und Monochromator

In Abbildung 4.2 ist der gesamte optische Aufbau des Transmissionsmonitors abgebildet, dessen Komponenten im Folgenden beschrieben werden.

Lichtquelle

Als Lichtquelle wird eine Deuteriumlampe verwendet, die VUV-Licht über den gesamten relevanten Wellenlängenbereich emittiert. Bei Messungen sind die folgenden Eigenschaften derartiger Lampen zu berücksichtigen:

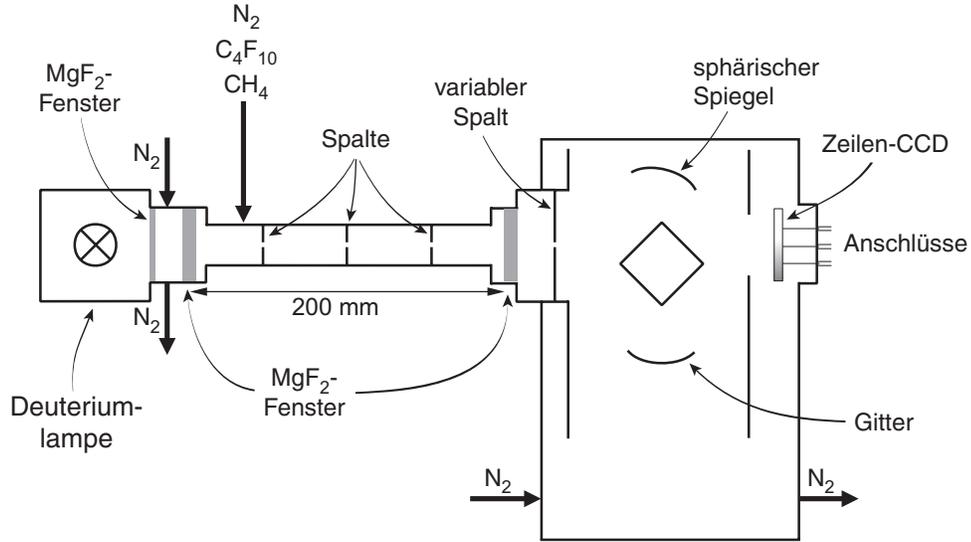


Abbildung 4.2: Optisches System des RICH-Gas-Transparenz-Monitors.

1. Mit zunehmender Betriebsdauer nimmt deren Emission im VUV-Bereich ab. Grund hierfür ist die nachlassende Transmission des MgF_2 -Fensters. So ergibt sich als typischer Wert ein Transparenzverlust von ca. 50 % nach 300 Betriebsstunden (Angaben des Lampenherstellers L.O.T.). Daraus folgt die Notwendigkeit einer schnellen Messung, da so die absolute Lebensdauer der Deuteriumlampe deutlich verlängert werden kann.
2. Das Emissionsspektrum einer Deuteriumlampe zeigt große Intensitätsunterschiede im interessanten Wellenlängenbereich von 120 nm bis 250 nm, wie in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Dauer der Messungen wird dadurch bestimmt, daß auch in Bereichen minimaler Intensität noch eine ausreichende, statistisch signifikante Menge an Photonen nachgewiesen werden kann.

Testvolumen

Als Testvolumen dient ein 200 mm langes Edelstahlrohr, welches von den angrenzenden Volumina (Lampe, Monochromator) durch 3 mm dicke MgF_2 -Fenster getrennt wird. Bei der Konzeption wurde besonders auf ein kleines Gasvolumen im Testrohr geachtet ($V_{Test} = 35.4 \text{ cm}^3$), um schnelles Wechseln des Testgases zu ermöglichen. Weiterhin wurde das Rohr so konstruiert, daß eine dauerhafte Spülung des angrenzenden Lampenvolumens ermöglicht wird. Dadurch wird die Verschmutzung an Lampenaustritts- und Testrohereintrittsfenster minimiert. Um auf eine zum RICH vergleichbare Absorptionslänge zu kommen, wird das Testrohr mit bis zu 2000 hPa Überdruck befüllt. Dadurch wird auch mit keinerlei Verschmutzungen im Monochromatorvolumen durch Testgas zu rechnen sein.

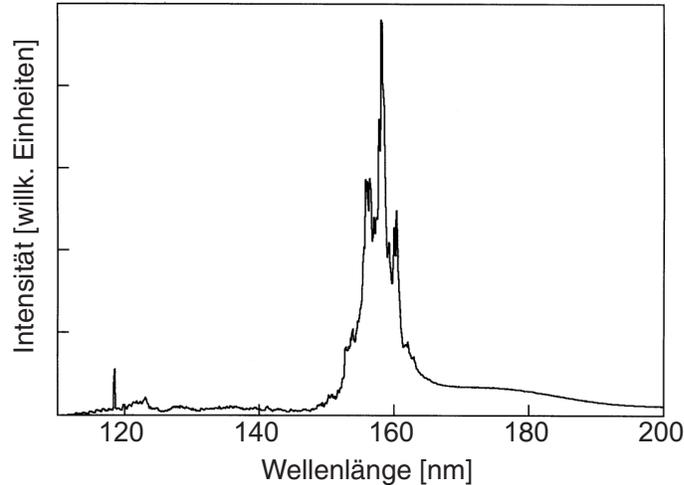


Abbildung 4.3: Emissionsspektrum einer Deuteriumlampe [31]

Zur Streulichtunterdrückung kann zusätzlich ein Blendensystem in das Testvolumen gebracht werden.

Monochromator und Gehäuse

Bei dem vorliegenden Monochromator handelt es sich um einen Gitter-Monochromator [32] in Ebert-Fastie-Anordnung mit Strahlumlenkung. Die Wellenlängenselektion wird mit einem 1200 Striche/mm - Gitter erreicht, dessen Effizienz annähernd konstant bei 40% über dem relevanten Wellenlängenbereich liegt. Zur Streulichtunterdrückung und Begrenzung der Lichtmenge ist am Eintritt in x- und y-Richtung ein variabler Eintrittsspalt angebracht. Dieser dient als Gegenstandsschlitz für die gesamte Monochromatoroptik und bestimmt auch das Auflösungsvermögen des Gerätes (5 nm/mm).

Der Monochromator befindet sich bei den Messungen in einem Kasten aus schwarz eloxiertem Aluminium, der permanent mit trockenem Stickstoff gespült wird. Dadurch werden Verschmutzungen der optischen Oberflächen vermieden.

Anbindung an das Gasversorgungssystem

Wie aus Abbildung 3.5 ersichtlich kann das Testvolumen des Transmissionsmonitors mit den Gasen CH_4 (Ventil 83 aus Abbildung 3.5), C_4F_{10} und Stickstoff (Ventil 85) als Referenzgas befüllt werden, wobei der bestehende Druck in diesem Volumen im Bereich 1000 hPa - 3000 hPa variiert werden kann.

Es besteht die Möglichkeit, das C_4F_{10} vor (Ventil 35) und nach dem Radiator (Ventil 32) auf seine Transmission zu untersuchen. Das bietet den Vorteil, daß eine Beurteilung des Reinigungsverfahrens und der zeitlichen Änderung der Reinigungswirkung durchgeführt werden kann und daß die Quellen etwaiger Verunreinigungen

lokalisiert werden können. Weiterhin kann zusätzlich der Verschmutzungseintrag im Radiatorvolumen abgeschätzt und überwacht werden.

4.2.2 Der VUV-Nachweis

Üblicherweise wird das sehr kurzwellige Licht im VUV-Bereich mit einem geeigneten Photomultiplier (oder Photodiode) am Austrittsspalt des Monochromators nachgewiesen. Zur Veränderung der Wellenlänge wird dann einfach die Neigung des Gitters verändert. Wegen der zeitlichen Schwankung der Lampenintensität müßte die Messung für eine Gasprobe bei jeder Wellenlängeneinstellung unmittelbar mit einer Vakuummessung verglichen werden. Dieses Verfahren wurde auch bei dem Transmissionsmonitor von Herrn J. Lehnert [25] verwendet. Wenn wie bei diesem Monitor der gesamte Aufbau in einem evakuierten Gefäß untergebracht ist, ergeben sich Probleme bei der Handhabung der bewegten Teile. Die Notwendigkeit zum Durchfahren des gesamten relevanten Wellenlängenbereichs mit Hilfe eines Schrittmotors führt durch Wärmeentwicklung am Motor zu Verschlechterung des umgebenden Vakuums und auch zu thermischen Problemen im Betrieb. Weiterhin führen große Gasvolumina und die zeitliche Abfolge der Messungen zu einer langen Gesamtmeßdauer. Um die angesprochenen Nachteile zu umgehen, wurde die übliche sequentielle Auslese mit drehbarem Gitter und ortsfester Schlitz-Detektor Anordnung durch ein feststehendes Gitter und einen ortsempfindlichen Lichtdetektor ersetzt. An Stelle des Monochromator-Austrittsschlitzes wurde ein großflächiger CCD-Detektor mit Natriumsalicylat Beschichtung in den Strahlengang montiert. Da dieses Ausleseverfahren bisher unüblich war, sollen die einzelnen Komponenten im Folgenden näher erläutert werden.

Lichtnachweis mit Zeilen-CCDs

Bei CCDs (Charge-Coupled-Devices) handelt es sich um eng nebeneinander angeordnete MOS-Dioden. Die relevante Information wird bei diesen von der Menge der gespeicherten elektrischen Ladung repräsentiert und nicht wie bei konventionellen elektrischen Bauelementen in Form von Strömen oder Spannungen. Bei Betrieb mit geeigneten Auslese- und Gateimpulsen werden die MOS-Dioden im Zustand tiefer Ladungsverarmung betrieben. Dadurch wird die Speicherung und der Transport der Ladungspakete über das Halbleitersubstrat in geeigneter Weise ermöglicht [33]. Die Erzeugung frei beweglicher Ladungen im Halbleitersubstrat der CCD durch Photonen wird im wesentlichen durch die Photonenenergie sowie durch Absorptions- und Rekombinationseffekte bestimmt.

Zunächst muß die Energie des eingestrahnten Photons ausreichen, um Ladungsträger aus dem Valenzband ins Leitungsband zu heben ($E_{Phot} \geq E_{gap}$).

Zu kleineren Wellenlängen hin hängt der erzeugte Photostrom stark vom Verlauf des materialtypischen Absorptionskoeffizienten ab. Dieser kann bei kurzen Wel-

lenlängen sehr große Werte ($\geq 10^5 \text{ cm}^{-1}$) annehmen, was zur Absorption der Strahlung nahe an der Oberfläche führt. In diesem Bereich ist die Rekombinationszeit von Ladungsträgern so gering, daß sie nicht gespeichert werden können. Somit gibt es eine Wellenlänge, bei welcher der erzeugte Photostrom im allgemeinen Untergrundrauschen bzw. Dunkelstrom der CCD verschwindet. Selbst wenn die Integrationszeit bei der Auslese beliebig groß gewählt wird, kann man kein signifikantes Signal mehr isolieren.

Die von uns benutzte Zeilen-CCD (Sony ILX 511) ist eigentlich für den Einsatz in Barcode-Handscannern und optischen Meßinstrumenten konzipiert und zeichnet sich durch die folgenden Merkmale [34] aus: Sie besitzt 2048 Pixel ($14 \mu\text{m}$ Breite, $200 \mu\text{m}$ Höhe), hat einen eingebauten Timing-Generator sowie einen "sample-and-hold" Schaltkreis und kann mit einer maximalen Taktfrequenz von 2 MHz ausgelesen werden.

Bei angelegter Betriebsspannung sind für die Auslese von außen nur zwei Signale notwendig. Das erste Signal ist ein Gateimpuls, der die gespeicherte Ladung festhält und anzeigt, daß in Kürze ein Auslesezyklus beginnen wird. Das zweite Signal ist ein Clockimpuls, der dafür sorgt, daß die Ladungen nacheinander aus der CCD geschoben und als Spannungssignal ausgelesen werden können.

Die verwendete CCD wurde zunächst in München an einem Vakuummonochromator auf ihre VUV-Sensitivität hin getestet. Die Messungen wurden an entfernten CCDs (Transmission von Quarzglas endet bei ca. 165 nm [27]) durchgeführt und zeigten im relevanten Wellenlängenbereich ($140 \text{ nm} - 220 \text{ nm}$) keine photoneninduzierten Ladungsänderungen.

Beschichtung der CCD mit Natriumsalicylat

Um die VUV-Sensitivität zu erhöhen, wurde eine Schicht des Wellenlängenkonverters Natriumsalicylat direkt auf die CCD-Zeile aufgebracht.

Das Salz Natriumsalicylat liegt in der Regel als feines Pulver vor, welches sowohl in Wasser wie auch in Methylalkohol gelöst werden kann. Bei der Beschichtung der CCD wurde in destilliertem Wasser eine hochgesättigte Lösung hergestellt und mit einem Pinsel direkt auf die CCD-Zeile aufgebracht und direkt im Anschluß daran mit einem kleinen Heißluftgebläse getrocknet. Dies gewährleistet eine homogene Schichtdicke. Die Benutzung von Wasser anstelle von Alkohol stellte sich als vorteilhaft heraus, da die größere Oberflächenspannung des Wassers die Begrenzung der Schicht auf die aktive Fläche der CCD erleichtert.

Die Quanteneffizienz von Natriumsalicylat hängt von der Dicke der aufgetragenen Schicht ab. Die optimale Schichtdicke liegt bei einer Oberflächendichte von 1 mg/cm^2 . Dieser Wert ist im Bereich von 58 nm bis 220 nm [35, 36] unabhängig von der Wellenlänge der eingestrahlten Photonen. Ein typischer Verlauf für die Abhängigkeit der Quanteneffizienz von der Schichtdicke ist in Abbildung 4.4 aufgetragen. Aus den Arbeiten von Thurnau [37], der erstmalig das Fluoreszenzspektrum

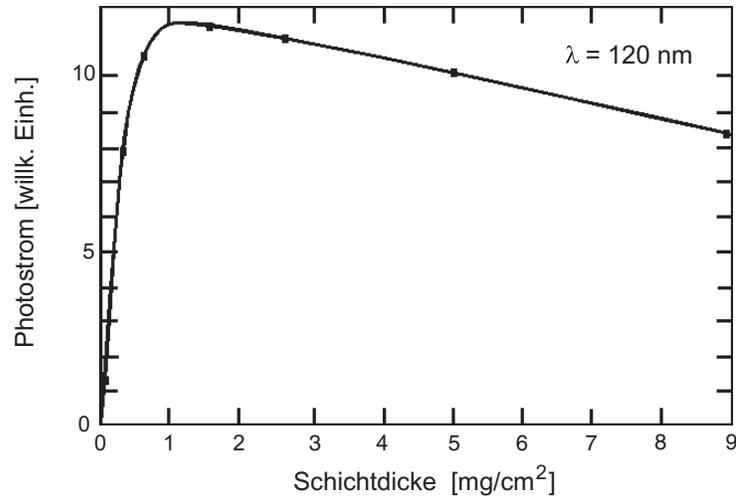


Abbildung 4.4: Quanteneffizienz von Natriumsalicylat in Abhängigkeit der Schichtdicke bei einer Anregungswellenlänge von 120 nm [35]

von Natriumsalicylat gemessen hat, geht hervor, daß das Emissionsspektrum (vgl. Abbildung 4.5) nahezu unabhängig von der Wellenlänge der anregenden Strahlung ist. Man erreicht so eine Verschiebung der nachzuweisenden VUV-Photonen in den sensitiven Bereich der CCD (vgl. Abbildung 4.6).

Ein bekanntes Problem bei Natriumsalicylat als Wellenlängenschieber ist, daß die Quanteneffizienz der Schichten mit zunehmendem Alter nachläßt. Dieser Effekt liegt für Proben mit einem Alter von 280 Stunden ca. 12% unter dem von neu präparierten (vgl. Abbildung 4.7) und stellt die einzige Einschränkung dieses Meßprinzips dar.

4.3 Testmessungen und Ergebnisse

4.3.1 Durchführung der Messungen

Erste Testmessungen im endgültigen Aufbau wurden während der HADES-Strahlzeit 9/99 durchgeführt. Zunächst wurde der vom Monochromator und der CCD maximal "abdeckbare" Wellenlängenbereich bestimmt. Als Lichtquelle wurde eine Laserdiode (670 nm) verwendet. Durch Änderung der Neigung des Gitters und durch Ablesen der Wellenlängenanzeige am Monochromator wurde die Breite des verfügbaren Bereichs vermessen. Es ergab sich eine Breite von 140 nm.

Die Wellenlängeneichung der im vorliegenden Aufbau aufgenommenen Spektren wurde anhand des Maximums des Emissionsspektrums der Deuteriumlampe ($\lambda_{\max} = 159.2 \text{ nm}$) und der scharfen Abschneidekante von Methan ($\lambda = 143 \text{ nm}$)

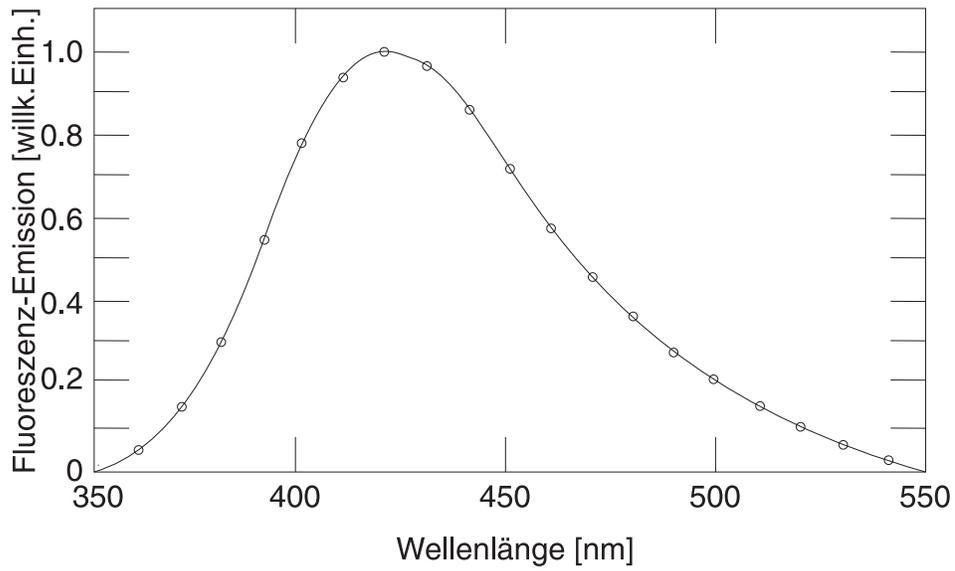


Abbildung 4.5: Fluoreszenzspektrum von Natriumsalicylat für Wellenlängen im Bereich 28 nm - 250 nm [38]

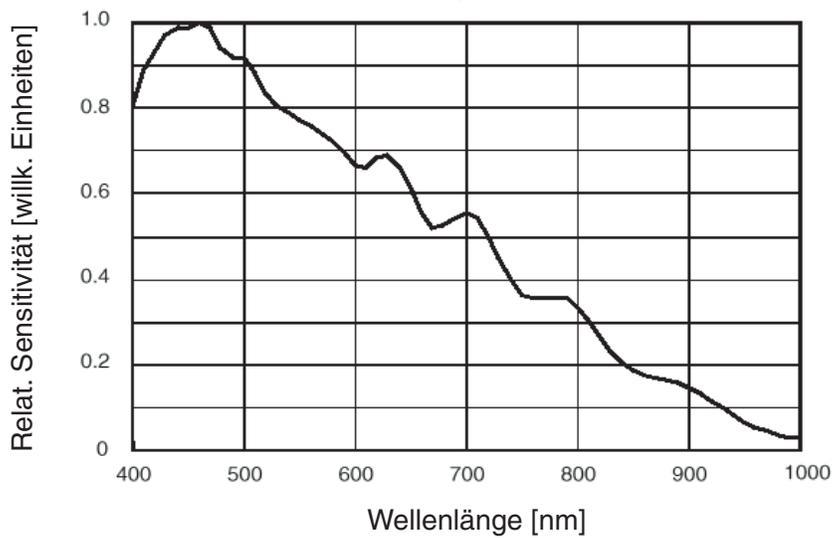


Abbildung 4.6: Relative Sensitivität der CCD (Sony ILX 511) in Abhängigkeit der Wellenlänge

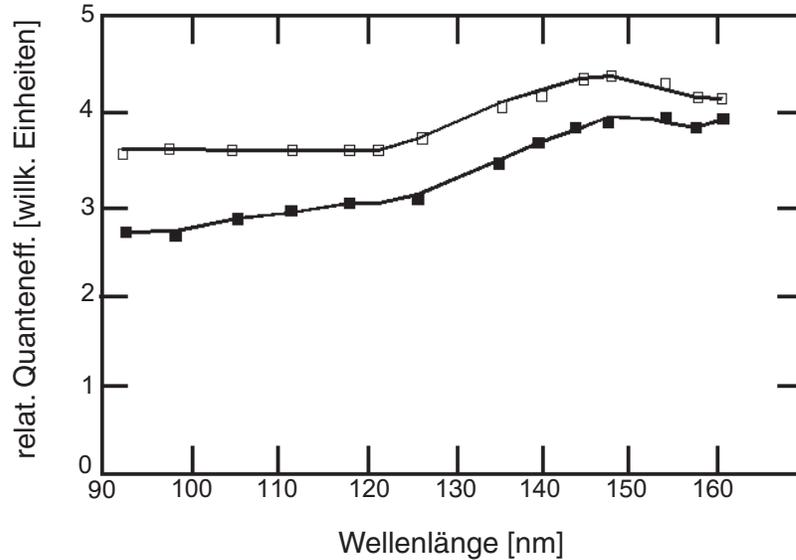


Abbildung 4.7: Relative Quanteneffizienz von Natriumsalicylat im Bereich 90 nm - 160 nm. Das Alter der oberen Kurve beträgt weniger als eine Stunde, die Messung darunter wurde an einer ca. 280 Stunden alten [39] Probe vorgenommen

durchgeführt.

Die Transmissionsmessungen an sich werden immer nach dem gleichen Muster durchgeführt. Zunächst wird eine Referenzmessung mit trockenem Stickstoff, der im relevanten Wellenlängenbereich keinerlei Absorption zeigt, durchgeführt. Danach wird das zu messende Gas in das Testvolumen eingeleitet. Auf Grund des geringen Volumens des Testrohrs reicht eine Spüldauer von 4 bis 5 Minuten aus, um das zu testende Gas in ausreichender Konzentration vorliegen zu haben. Für die Vergleichbarkeit mit den Referenzmessungen bleiben Parameter wie Belichtungszeit oder Gasdruck konstant. Durch den Vergleich mit unmittelbar vorher durchgeführten Referenzmessungen nehmen Varianzen der Lampenemission oder Veränderungen der Transmission der optischen Elemente der Anordnung nur geringen Einfluß auf die Ergebnisse der relativen Transmission der Testgase. Anzumerken ist, daß das Testvolumen während der Messungen im Durchfluß betrieben wird.

Die Auslese wurde während dieser Testmessungen wie folgt durchgeführt:

Die für die CCD-Auslese erforderlichen Signale (gate und clock) wurden mit Hilfe der parallelen Schnittstelle eines PC generiert. Die zu messende Ausgangsspannung der CCD wurde mit einem digitalen Speicheroszilloskop aufgenommen. Über die IEEE-Schnittstelle des Oszilloskopes wurden die Spektren zurück in den PC eingelesen. Probleme ergeben sich bei dieser Art der Datenaufnahme wegen der nicht ausreichenden Auflösung des Oszilloskopes und der langsamen Auslesegeschwindigkeit der CCD über den PC. Deshalb war die Statistik dieser Messungen insbesondere bei kurzen Wellenlängen beschränkt, da in einem sinnvollen zeitlichen

Rahmen die Messungen nur 15 mal hintereinander durchgeführt (Dauer ca. 2-3 Minuten) und aufakkumuliert werden konnten. Spektren, die man aus Messungen in diesem Aufbau erhält, sind typischerweise von einer Form wie sie in Abbildung 4.8 dargestellt sind. Die aufgenommenen Spektren spiegeln eine Faltung aus dem Spektrum der Deuteriumlampe (Abbildung 4.3) mit der Quanteneffizienz des Natriumsalicylates und der Nachweiseffizienz der vom Wellenlängenkonverter emittierten Strahlung durch die CCD (Abbildung 4.6) wieder.

Eine Schwierigkeit dieser Messungen tritt, durch mangelnde Statistik im Bereich kleiner eingestrahelter Lichtintensitäten auf. Das ist besonders bei Wellenlängen um 145 nm und 168 nm der Fall. Dies führt wie in den folgenden Transmissionsspektren zu erkennen ist zu einem Anstieg in der Transmission, was sich durch die Quotientenbildung aus Test- und Referenzmessung begründen läßt. Eine Erhöhung der Meßzeit (Integrationszeit an der CCD) führt allerdings nicht beliebig zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Auf Grund der großen Intensitätsunterschiede im Emissionsspektrum der Deuteriumlampe läuft die CCD an Stellen hoher Intensitäten (um 160 nm) voll (blooming) und die geometrische Auflösung der Aufnahme verschlechtert sich drastisch. Auch der generelle Versatz ("offset") der CCD Ausgangsspannung wird von diesem Phänomen deutlich beeinflußt und die Messungen verlieren vollkommen an Aussagekraft ("Offsetdrift"). Somit muß die Messungsauslese sehr schnell sein, um möglichst viele Messungen mit mittlerer Belichtungszeit durchführen zu können.

Ein generelles Problem dieser Messungen ist die Transmission des verwendeten Stickstoffs, da dieser für die Transmissionswerte der Testgase ebenfalls von entscheidender Wichtigkeit ist und somit eine stetige Überwachung des Wassergehalts erfordert.

Die relativen Transmissionskurven wurden dann für jedes Gas durch Division der gemessenen CCD Summenspektren durch das Referenzspektrum erzeugt. In den folgenden Abschnitten sollen nun die ersten Ergebnisse dieser Transmissionsmessungen dargestellt und diskutiert werden.

4.3.2 Transmissionsmessungen am Radiatorvolumen

Messungen mit Stickstoff

Auf Grund der Tatsache, daß die Einzelkomponenten des Radiatorvolumens (Druckschale, Fenster,...) bei der Herstellung und beim Zusammenbau des RICH der Umgebungsluft ausgesetzt waren, adsorbierte sich Wasser an den Oberflächen dieser Komponenten. Das Radiatorvolumen wurde auf Grund dieser bekannten Verunreinigungen mit Stickstoff gespült. Abbildung 4.9 zeigt die relative Transmission des aus dem Radiatorvolumen austretenden Stickstoffs, wodurch man eindeutig den aus Wasser im Gas resultierenden Einbruch der Transmission im Bereich von 165 nm identifizieren kann. Der zweite erkennbare Einbruch im Transmissionsspektrum, der sich als Schulter bei ca. 170 nm andeutet, läßt sich mit großer Wahrscheinlichkeit

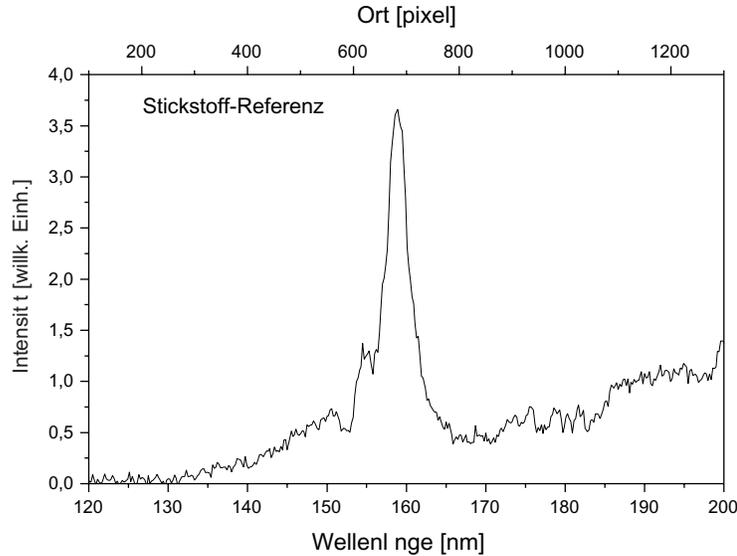


Abbildung 4.8: Rohspektrum einer einzelnen CCD-Stickstoffmessung (hier mit Stickstoff im Testvolumen). Die Ähnlichkeit mit dem Quellspektrum der Lampe (vgl. Abb. 4.3) ist deutlich erkennbar.

auf die mangelnde Intensität der Lampenstrahlung und auf die relativ schlechte Statistik dieser Messungen zurückführen (dieser Effekt tritt auch bei allen weiteren Messungen bei der gleichen Wellenlänge auf).

Messungen mit C_4F_{10}

Zunächst wurde die Transmission des vorgereinigten C_4F_{10} durch Probennahme sowohl am Eingang als auch am Ausgang des Radiators gemessen. Abbildung 4.10 zeigt die erhaltenen Intensitätsverteilungen die im Bereich um 160 nm bereits auf starke Verunreinigung hinweisen. Nach Befüllen des Systems mit C_4F_{10} zeigte sich beim Radiatorgas die in Abbildung 4.11 dargestellte relative Transmission. Diese Messungen zeigen bereits ein besseres Transmissionsverhalten als schon früher in München durchgeführte Messungen mit C_4F_{10} [40]. Auffallend sind zwei Stufen der Absorption, die in diesen Messungen auftreten. Eine erste Verschlechterung der Transmission tritt bei 197 nm auf, was auf die Anwesenheit von unerwünschten, schwereren Molekülen zurückgeführt wird. Diese Absorption wurde auch in früheren Messungen festgestellt. Ein noch deutlicherer Einbruch der Transmission ist im Bereich um 165 nm zu erkennen, der sich wieder auf die Anwesenheit von Wasser im Gas zurückführen läßt. Deutlich wird aber auch die schnelle zeitliche Verbesserung der Transmission, was sich auf die effiziente Säuberung des Gases durch die drei Reinigungsstufen im Radiatorgas-Versorgungskreis des Gassystems zurückführen läßt.

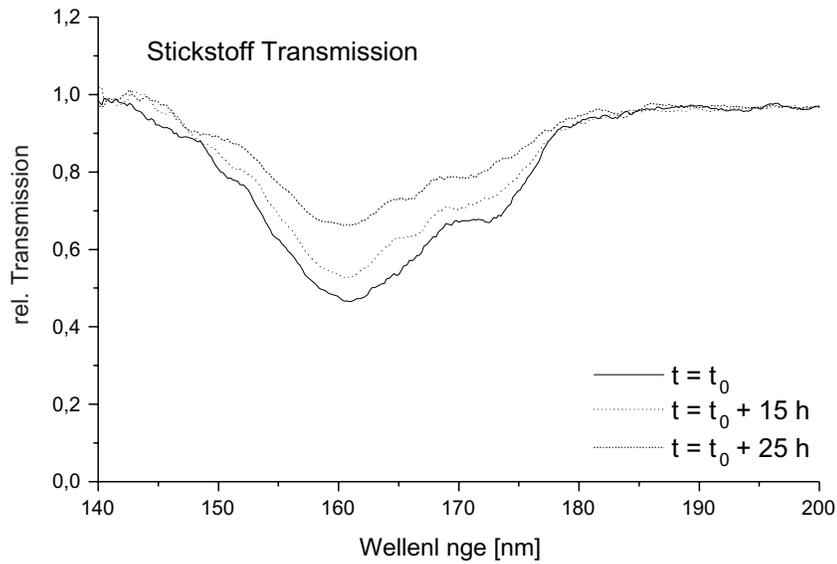


Abbildung 4.9: Relative Transmission des aus dem Radiator austretenden Spülgases Stickstoff für drei verschiedene Zeitpunkte nach der Befüllung. Zwischen der 2. und 3. Messung wurde der Gasdurchfluß durch das Radiatorvolumen erhöht.

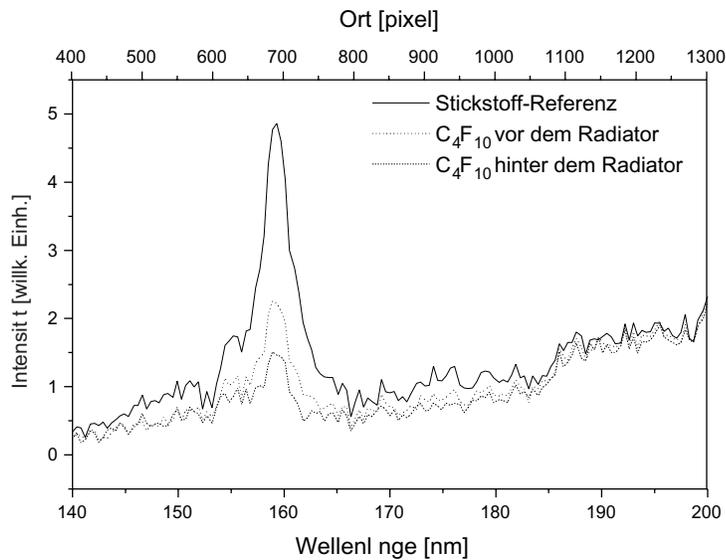


Abbildung 4.10: Gemessene Lichtintensitäten für vorgereinigte C_4F_{10} Proben am Eingang (punktuelle Linie) und am Ausgang (strichpunktuelle Linie) des Radiators. Die Messungen wurden zum Zeitpunkt der erstmaligen Radiatorbefüllung durchgeführt. Zum Vergleich ist die zugehörige Stickstoffreferenz (durchgezogene Linie) dargestellt.

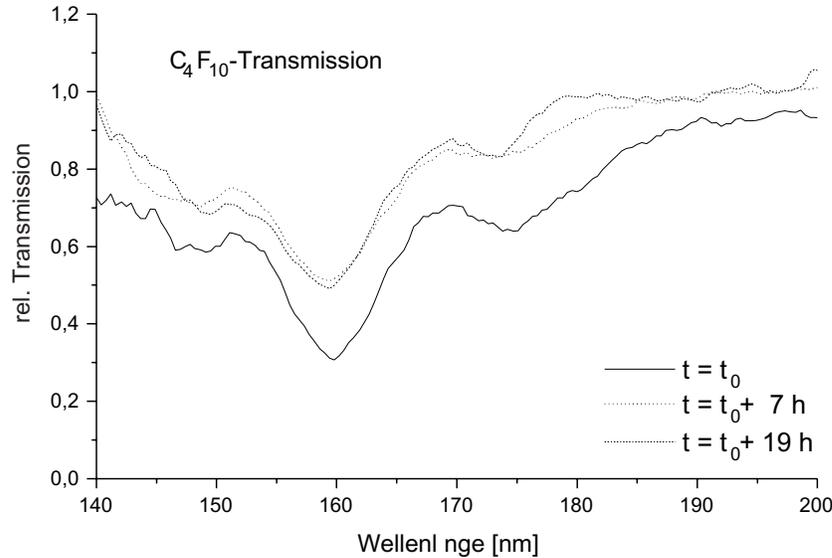


Abbildung 4.11: Relative Transmission von C_4F_{10} gemessen am Radiatorausgang. Die zeitliche Verbesserung der Transmission auf Grund des angewendeten Reinigungsverfahrens im Gasversorgungssystem ist deutlich erkennbar.

4.3.3 Transmission des Detektorgases

Für das Detektorgas wurden ebenfalls Messungen unmittelbar nach der Befüllung durchgeführt und nach 14 h sowie 24 h wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Das Detektorgas zeigte eine wesentlich bessere Transmission als das Radiatorgas. Begründet werden kann dies durch den Herstellungsprozeß der Detektormodule. Sie wurden in einer reinen Stickstoffatmosphäre zusammengebaut und in den RICH integriert. Methan war somit mit der zum endgültigen Spektrometerbetrieb erforderlichen Reinheit vorhanden. Dies zeigte sich in den Messungen. Nach dem ersten Befüllen des Systems traten kurzzeitig Verunreinigungen durch Wasser auf, die aber im Laufe von zwei Tagen aus dem System verschwanden. Messungen, die mit einem Hygrometer durchgeführt wurden, zeigten nach Befüllen 4 ppm Wasser in Methan, 2 Stunden später 3.5 ppm und zwei Tage später weniger als 1.8 ppm. Die Qualität der Messungen ist für Überwachungszwecke bereits in der beschriebenen Anordnung ausreichend.

4.4 Automatisierung der Messung

Für den endgültigen Betrieb des Transmissionsmonitors ist der folgende Ablauf geplant, welcher sowohl auf Anfrage durch einen Operateur oder auch zyklisch ablaufen kann.

Zwischen auszuführenden Messungen wird der Transmissionsmonitor mit Stick-

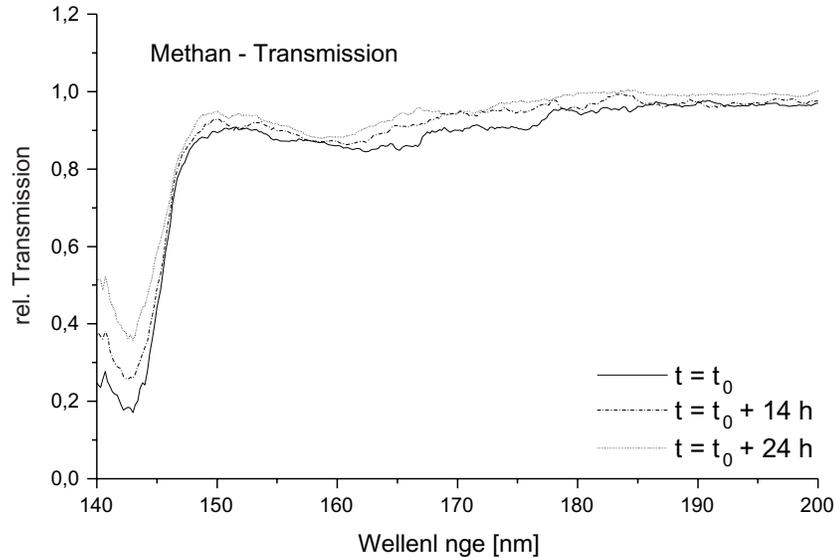


Abbildung 4.12: Relative Transmission von CH₄. Die zeitliche Verbesserung der Messungen ist dabei gut erkennbar.

stoff gespült, um eine ausreichende Sauberkeit für das System zu gewährleisten. Bei Anforderung einer neuen Messung wird eine einstellbare Anzahl von Referenzmessungen durchgeführt, aufakkumuliert und gespeichert. Im nächsten Schritt wird die Stickstoffzuleitung geschlossen und das zu messende Gas in das Testvolumen eingefüllt. Nach ausreichender Spülzeit werden dann wieder die gleiche Anzahl von Spektren für das Testgas aufgenommen, ebenfalls wieder aufakkumuliert und gespeichert. Sind die Messungen abgeschlossen, wird die Stickstoffzuleitung wieder geöffnet.

Die automatisierte Version einer Transmissionsmessung soll dann sowohl für Einzelmessungen (d.h. die Messung der Transmission nur eines Gases) oder für einen kompletten Satz an Transmissionsmessungen (Messung aller zugänglichen Gase) eine automatisierte Lösung anbieten.

Somit muß die angeschlossene Steuerungseinheit in der Lage sein, für die CCD geeignete Impulssequenzen zu erzeugen, die analogen Ausgabewerte der CCD zu digitalisieren, zu speichern und über eine größere Zahl von Einzelspektren zu mitteln. Die so gewonnenen Daten müssen dem RICH-Kontrollsystem zur Verfügung gestellt werden. Zu diesem Zweck ist eine CAN-Schnittstelle erforderlich, die auch zur Kommunikation mit der Steuerung des Gasversorgungssystems also zur Ventilsteuerung benutzt werden kann.

Der für diese Aufgabe entwickelte Einplatinencomputer, der EPC 167 CAN-Kontroller, wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Kapitel 5

Der EPC 167 CAN-Kontroller

Für die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Anwendungen (RICH-Betriebsparameter) wurde eine dedizierte CAN-Steuereinheit entwickelt und aufgebaut. Der Kontroller besitzt Master- bzw. Slave-Fähigkeiten, genügend Speicherplatz zur Bereitstellung der benötigten Service-Daten und die Fähigkeit zur Netzwerkkonfiguration. Weitere Designkriterien sind neben der stabil funktionierenden Stromversorgung eine hohe mechanische Festigkeit und minimale Abmessungen. Der CAN-Kontroller ist übersichtlich aufgebaut und auf Grund der “in-system”-Programmierbarkeit besonders servicefreundlich. Für die Aufnahme von Daten sowie für die Steuerung von Regelgliedern müssen digitale und analoge Ein- und Ausgänge verfügbar sein. Der Kostenfaktor wurde ebenfalls berücksichtigt. Die universelle Einsetzbarkeit des Kontrollers in CAN-Systeme ermöglicht auch die Anwendung für Steuerungsaufgaben in anderen HADES-Detektorgruppen.

5.1 Leistungsmerkmale und Aufbau

Der gesamte Aufbau des Kontrollers ist in Abbildung 5.1 schematisch und Abbildung 5.2 tatsächlich dargestellt. Anhand dieser Darstellungen wird deutlich, daß der Großteil der Anforderungen bereits mit einem Mikrokontrollerbauelement realisiert werden kann. Der wesentliche Aufbau des CAN-Kontrollers läßt sich in die folgenden drei Hauptkomponenten unterteilen: Mikrokontroller, Stromversorgung und Schnittstellen.

Mikrokontroller

Mit dem Mikrokontroller 80C167CR-16FM der Firma Infineon (früher Siemens-Halbleiter) steht dem CAN-Kontroller ein leistungsfähiger Baustein in SMD-Ausführung zur Verfügung. Dieser besitzt die folgenden Leistungsmerkmale (vgl. [41]):

- 2kByte XRAM

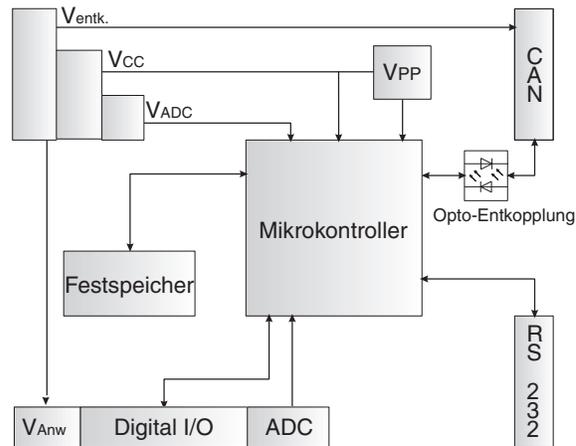


Abbildung 5.1: Blockschaltbild des EPC167CAN-Kontrollers. Die angegebenen Spannungen haben dabei die folgenden Bedeutungen: $V_{entk.}$ = entkoppelte Betriebsspannung der CAN-Schnittstelle, V_{CC} = Betriebsspannung des EPC 167, V_{ADC} = stabile Referenzspannung der ADCs und V_{PP} = Programmierspannung des Flashspeichers

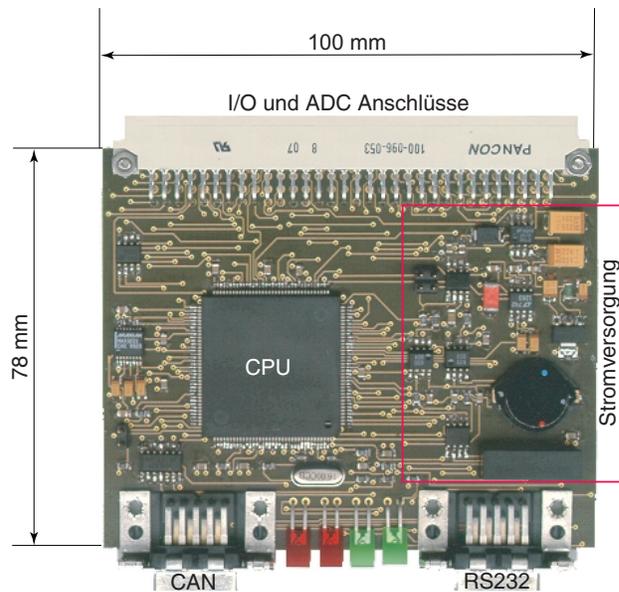


Abbildung 5.2: Foto des EPC 167

- 128 kByte Flash-Speicher für die Kontroller-Programmierung
- CAN-Modul
- 100 ns Minimalzeit für Befehlverarbeitung
- 16 x 10 ADC - Kanäle mit je 10 Bit Auflösung
- 20 MHz maximale Taktfrequenz
- synchroner serieller SPI-Kommunikationskanal zur unkomplizierten Zuschaltung weiterer Hardwarekomponenten (zum Beispiel EEPROMs, ADCs,...)
- 16 MByte Adreßbereich
- 111 individuell programmierbare I/O-Pins

Stromversorgung

Am Eingang der Spannungsversorgung wird mit dem Baustein LM2672-5.0 eine vorhandene Spannung im Bereich von 8 V bis 40 V konstant auf +5 V herabgesetzt. Mit diesem 1 A Schaltnetzteil, das annähernd verlustfrei die Versorgungsspannung (V_{CC}) erzeugt, erhält man große Flexibilität zum Anschalten des Kontrollers an vorhandene Netzteile. Zusätzlich ist ein zweiter Regelbaustein (TLE 4264 G) zur Erzeugung der +5 V ADC-Referenzspannung (V_{ADC}) für den Prozessor vorgesehen, der mit 150 mA belastet werden kann. Es handelt sich dabei um einen Linearregler, der für diese Anwendung auf Grund seiner störungsarmen Ausgangsspannung ausgewählt wurde. Die Spannungsversorgung wird mit einem Überwachungsbaustein (TL 7705) kontrolliert, welcher bei Unterschreiten einer Mindestversorgungsspannung ein Zurücksetzen der CPU auslöst. Dieser Zustand wird erst dann wieder aufgehoben, wenn eine ausreichend stabile Betriebsspannung vorliegt. So wird verhindert, daß bei Schwankungen der Betriebsspannung undefinierte Zustände des Kontrollers auftreten. Ein weiterer Spannungswandler, der ohne Induktivität funktioniert, erzeugt die für die Programmierung des internen Flash-Speichers notwendige Spannung (V_{PP}) von +12 V. Dieser kann mit Hilfe einer Kurzschlußbrücke angeschaltet werden.

Schnittstellen

Es steht eine RS 232 und eine CAN-Bus Schnittstelle zur Verfügung, sowie eine 96-polige VG-Leiste zum Anschluß der speziellen Anwendungen.

Die serielle Schnittstelle wird bei der Erstinbetriebnahme zum Programmieren und zur Kommunikation mit anderen Komponenten (z.B. PC) benutzt. Die Pegelanpassung zwischen Kontroller (TTL-Pegel) und dem seriellen Pegel (V.24 Standard) wird durch einen Umsetzerbaustein der Fa. Maxim (Max 3221 CAE) realisiert.

Das CAN-Bus Interface ist auf zwei Ebenen von der übrigen Platine entkoppelt. Die Signale sind über zwei Optokoppler (HCPL - 0600) vom Hauptsystem getrennt und die Versorgung des CAN-Bus-Treibers wird durch einen 1:1 DC-DC-Konverter (NMA 05) gewährleistet. Die physikalische Anbindung an den CAN-Bus wurde mittels eines Hochgeschwindigkeits-Sender-Empfängerbaustein (PCA 82C250 T) erreicht.

An der 96-poligen VG-Leiste können sämtliche für die speziellen Anwendungen benötigten Pins des Mikrokontrollers abgegriffen und benützt werden.

5.2 Inbetriebnahme und Softwareentwicklung

Der EPC 167 CAN wurde per Hand bestückt und elektrisch in Betrieb genommen. Um den Mikrokontroller in geeigneter Weise verwenden zu können, ist der erste Schritt die Kommunikation über dessen serielle Schnittstelle. Die Verbindungsbereitschaft wird dem Kontroller mitgeteilt, indem man die Hardware zurücksetzt und gleichzeitig einen der I/O-Pins auf Massepotential legt. Dann sendet man seriell ein "00"-Datenpaket an den Kontroller, das dieser mit einem "C5" beantwortet. Bei dieser ersten "Kontaktaufnahme" mit dem Prozessor ist es nicht nötig, auf eine spezielle Übertragungsgeschwindigkeit zu achten, da sich der Kontroller auf die gesendete Rate einstellt. In diesem Status kann dem Kontroller über eine Laderoutine (boot strap loader) ein Programm, welches zur Ausführung der jeweiligen Steuer-, Kontroll- und Kommunikationsaufgaben benötigt wird, in den elektrisch wiederbeschreibbaren und nichtflüchtigen Speicher (Flash-Speicher) geladen werden. Ist dieser Ladevorgang beendet, muß das Massepotential am speziellen I/O-Pin aufgehoben und der Mikrokontroller zurückgesetzt werden. Danach beginnt der Kontroller mit der Programmausführung.

Die Programmierung der eigentlichen Kontrollsoftware kann in Maschinensprache (Assembler) oder der Hochsprache C mittels C166 Cross Compiler der Fa. Tasking durchgeführt werden. Bei der Programmierung des Mikrokontrollers ist anzumerken, daß für diesen keinerlei "Betriebssystem" existiert. Im Gegensatz zu Programmiersystemen auf PCs kann das Mikrokontroller-System nicht auf bereits definierte Standardkomponenten wie Ausgabe, Eingabe oder Schnittstellen zurückgreifen. Somit ist es notwendig, jede auf dem Mikrokontroller implementierte Komponente (wie ADC, asynchroner/synchroner serieller Port, I/Os, Timer,...) zu initialisieren und die genauen Funktionalitäten festzulegen. Dies bietet aber den Vorteil, überflüssige Komponenten für den Betrieb der jeweiligen Anwendung wegzulassen.

5.2.1 Erforderliche Basisroutinen

Für die Entwicklung der vom EPC 167 benötigten Software sind generelle Programmerroutinen notwendig. Als erster Schritt wird eine Start-Datei (`start.asm`), die für alle Applikationen der 80C166 Prozessorfamilie gleich ist, in das zukünftige Projekt eingebunden. So werden bereits allgemeine Optionen für die Architektur des gesamten Projektes festgelegt. Darunter fällt die exakte Spezifikation des vorliegenden Prozessortyps (im Fall des EPC 167 ist dies eine *“extended architecture”*). Es wird festgelegt, ob Bitvariablen bereits bei Programmstart mit festen Werten initialisiert werden bzw. ob die zukünftige Anwendung mit Fließkomma-Arithmetik arbeiten kann. Sobald diese Routine geladen ist, wird in Abhängigkeit der angegebenen Prozessorarchitektur (*“extended”* oder *normal*) eine weitere Datei (`cstartx.asm` für den vorliegenden Prozessortyp) geladen. Diese initialisiert den Prozessor an sich und setzt ihn in den freien Modus (*“idle mode”*), sobald eine *“exit-Anweisung”* erfolgt. Der Sprung in die Hauptroutine (*“main(void)”*) der zukünftigen Anwendung wird ebenfalls mit dieser Datei vorbereitet. Für die Vereinfachung der Programmierung und den Zugriff auf Hardwarekomponenten werden die Register- und Bitnamen, basierend auf den Bezeichnungen im Prozessordatenblatt [41], durch die `reg167cr.def`-Datei festgelegt, die ebenfalls Teil des Projektes sein muß. Weiterhin wird das Laden der sogenannten `head.asm`-Datei durch `cstartx.asm` verlangt. Diese Datei definiert die Größe des Benutzer-Stacks (für die Kontrollsystemanwendungen sind 256 Datenwörter vollkommen ausreichend) und das zu verwendende Speicherverwaltungsmodell (Für den EPC 167 wird das *“small”*-Modell benutzt). Die Präzision, mit der Fließkomma-Operationen durchgeführt werden sollen, wird ebenfalls in dieser Routine festgelegt. Als letzte allgemein notwendige Datei wird, wieder durch einen Aufruf aus `cstartx.asm`, die Datei `_c_init.asm` geladen, die für die Initialisierung von Variablen im verfügbaren Speicherbereich und die Definition und Lage der Zeiger auf den Benutzer-Stack verantwortlich ist. Diese allgemeinen Einstellungen können in der vorliegenden Version 6.0 des Tasking C166 Cross Compilers entweder kommandozeilenorientiert in einem DOS-Fenster direkt eingegeben oder über eine graphische Benutzeroberfläche eingegeben werden [42]. Diese Einstellungen sind für alle im Rahmen des RICH Steuer- und Kontrollsystems benötigten Anwendungen gleich. Im Folgenden sollen nun die zusätzlichen Erweiterungen für die Programmierung einer speziellen Anwendung betrachtet werden.

5.2.2 Programme für den Transmissionsmonitor

Als erste und wichtigste Anwendung wurde für die VUV Transmissionsmessung (vgl. Kapitel 4) ein Programm zur CCD-Auslese und Datenübertragung über serielle Schnittstelle geschrieben.

Diese Programmierung gibt dem EPC 167 die Möglichkeit, geeignete Ausleseimpulse (ROG - *“read out gate”* und CLK - *“clock”*) an die CCD abzusetzen und den re-

sultierenden Spannungswert über den prozessoreigenen Analog-Digital-Wandler wieder einzulesen. Weiterhin ist eine serielle Monitor-Funktion zur Steuerung des Kontrollers implementiert, die kompatibel zu allen gängigen PC-Terminalprogrammen ist. Im Folgenden wird nun genauer auf die Programmierung dieser Routinen (tm.c, vgl. Anhang B) eingegangen.

Die ROG und CLK-Impulse werden mit der „_putbit“-Anweisung an entsprechenden Ausgangspins (bei „tm.c“ P3.0 und P3.1) des Mikrokontrollers erzeugt. Dabei wird bei jeder Messung nach dem folgenden Schema vorgegangen: Zuerst wird ein ROG-Impuls einstellbarer Dauer erzeugt, welcher der CCD anzeigt, daß eine Messung mit der eingestellten Belichtungszeit erfolgt. Danach werden mit den CLK-Impulsen die einzelnen Spannungswerte der entsprechenden Pixel aus der CCD gelesen, wobei die Werte der ersten 35 und der letzten 10 Impulse nicht gewandelt werden, da es sich dabei um sogenannte Dunkel- und „Dummy“-Pixel handelt, die keine signifikanten Informationen enthalten. Mit diesen Einstellungen können Auslesezeiten von nur 3 ms für die gesamte CCD erreicht werden.

Der nächste Schritt bei diesem Programm ist die Initialisierung des Analog-Digital-Wandlers und die Speicherung des Ergebnisses der Wandlung mit der Funktion „getadc (int ch)“ (vgl. Anhang B). Zur Reduktion der Datenmenge werden die Werte von jeweils zwei nebeneinanderliegenden Bildpunkten (pixel) addiert und der Durchschnitt daraus ermittelt. Die Qualität einer Aufnahme leidet nicht unter dieser Datenreduktion, da die Auflösung der CCD (Pixelbreite 14 μm ; Auflösung 0.1 nm/Pixel) die Auflösung des Monochromators (5 nm/mm) um ein Vielfaches übersteigt.

Die serielle Kommunikation wird mit den Bitfeldern SXCON_MODE, die den Betriebsmodus der Schnittstelle festlegt, und BAUDRATE, das die Übertragungsrate bestimmt, eingeleitet. Zur Programmierung einer funktionsfähigen seriellen Schnittstelle ist eine Initialisierungsfunktion („init_serio()“) und eine Wartefunktion („wait_char“) eingebunden. Sobald die Initialisierung der seriellen Schnittstelle abgeschlossen ist, kann man auch mit Hilfe der Bibliothek „stdio.h“ eine Standardausgabe definieren und den C-Befehl „printf“ zur Ausgabe von Zeichensätzen („strings“) benutzen. Die Steuerung dieser Messungen wurde mit einer Monitor-Funktion („monitor(void)“) erreicht, die die Möglichkeit bietet, aus mehreren unterschiedlichen Befehlen auszuwählen. Damit kann die Belichtungszeit ausgewählt, die Messungen ausgelesen und gespeichert sowie die Wandlungsergebnisse über serielle Schnittstelle an einen PC geschickt werden.

Ergebnisse

Der EPC 167 Kontroller und das im letzten Abschnitt beschriebene Programm konnten kürzlich im Rahmen einer Strahlzeit mit dem RICH Detektor bei der GSI erstmalig erfolgreich in Betrieb genommen werden. Dabei wurden die CCD-Pulshöhenverteilungen mit hoher Rate (beliebig bis 19200 baud, je nach Einstellung)

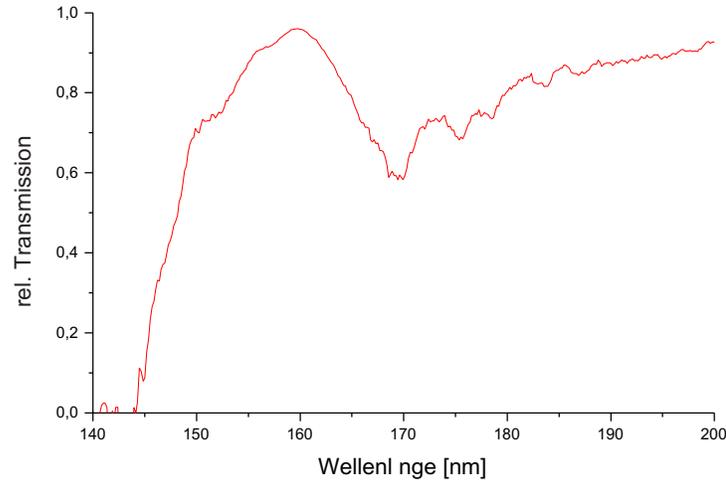


Abbildung 5.3: Erstes Transmissionsspektrum von Methan, das mit Hilfe des EPC 167 aufgenommen und übertragen wurde. Der Dip um 170 nm reflektiert dabei die geringe Auflösung des ADCs

übertragen. Eine Messung dauerte 3 ms und es wurden 64 Messungen durchgeführt, die als Summenspektrum zum angeschlossenen PC übertragen wurden. Anschließend wurden diese Rohspektren mit Hilfe des PC in Transmissionskurven umgerechnet. Ein beispielhaftes Spektrum ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Auffallend bei diesem Spektrum sind die großen Abweichungen von den früher durchgeführten “Oszilloskop-Messungen”, die sich auf mangelnde Auflösung der Ausleseelektronik zurückführen lassen. Grund hierfür ist die Tatsache, daß bei den vorliegenden Messungen die Ausgangssignale nicht optimal auf den Bereich des ADCs (0 V - 5 V) angepaßt wurden und somit nur eine maximale Auflösung von 4 - 5 Bit erreicht werden konnte. Trotzdem bestätigen bereits diese Messungen, daß das Hauptproblem der “Oszilloskop-Messungen”, zu geringe Statistik, durch diese Methode der Datenaufnahme deutlich verbessert werden konnte.

Kapitel 6

Ausblick

Mit der bisherigen Arbeit ist der Grundstein für eine vollständige Integration der RICH-Betriebsparameter in ein vollautomatisiertes, erweiterbares und fernsteuerbares Kontroll- und Steuersystem gelegt. Aller zum Aufbau eines derartigen Systems relevanten Designparameter wie Meßdatenerfassung, Meß- und Steuerdatenübermittlung sowie Benutzerschnittstellen wurden festgelegt und exakt spezifiziert. Für exakte Messungen mit dem Gastransmissionsmonitor ist es noch notwendig das CCD-Ausgangssignal ideal auf den 10 bit ADC des EPC 167 anzupassen. Im Rahmen des Steuersystems muß der EPC 167 noch auf die übrigen Anwendungen (Spannungen, Temperaturen, u.s.w) angepaßt und über die vorhandene CAN-Schnittstelle in das Kontrollsystem integriert werden. Die bereits über CAN-Bus konfigurierbare und kommunizierende Gassystem-Steuereinheit erwartet ebenfalls die Installation des RICH-Kontrollbusses.

Letztendlich wird dann ein Gesamt-HADES Kontrollsystem angestrebt, welches durch die graphische Benutzerschnittstellen der EPICS-Software von wenigen Operateuren überwacht und bedient werden kann. Die Einbindung aller HADES-Betriebsparameter in eine der Analyse zugänglichen Datenbank ist der abschließende Schritt bei dieser Entwicklung.

Mit den Arbeiten zu diesen Fragestellungen wird in Kürze begonnen.

Anhang A

Anhang

A.1 Das OSI-Modell

Das OSI-Modell (“open system interconnection”) definiert, wie die Kommunikation zwischen Computern an beliebigen Netzwerksystemen ablaufen soll. Dieses Modell definiert sieben unabhängige Schichten, die über wohldefinierte Schnittstellen miteinander kommunizieren (vgl. Abbildung A.1).

1. Bitübertragungsschicht - Beschäftigt sich mit der Übertragung der Bits in einen Übertragungskanal. Sie legt mechanische, elektrische und prozedurale Schnittstellen fest.
2. Sicherungsschicht - Diese Ebene gruppiert die zu übertragenden Bits in einem, je nach Netzwerk verschiedenen Schema. Zu diesem Schema zählen auch Prüfsummen, die von dieser Schicht eingefügt werden. So können bei der Bitübertragung Fehler erkannt und an höhere Ebenen weitergegeben werden.
3. Vermittlungsschicht - Die wichtigste Aufgabe ist die Bestimmung von Paketleitwegen vom Ursprungsort zum Bestimmungsort (routing).
4. Transportschicht - Sie besitzt die Aufgabe, Daten aus höheren Schichten zu übernehmen und, falls nötig, diese in geeignete Pakete zu zerlegen. Die Art der aus höheren Schichten zur verfügbaren Dienstleistungen wird ebenfalls durch diese Ebene bestimmt.
5. Sitzungsschicht - Diese erlaubt es dem Anwender, durch Sitzungen an verschiedenen Rechnern, Einfluß auf das laufende Netzwerk zu nehmen.
6. Darstellungsschicht - Diese Schicht beschäftigt sich mit Funktionen, die durch ihr häufiges Auftreten eine allgemeine Lösung erlauben, statt sie jedem Anwender erneut zur Lösung zu überlassen.



Abbildung A.1: Die sieben Schichten des OSI-Modells

7. Anwendungsschicht - Ihre Aufgabe ist die Bereitstellung von anwendungsorientierten Grunddiensten mit entsprechender Datenstruktur und Protokollen

A.2 Schaltplan des EPC 167

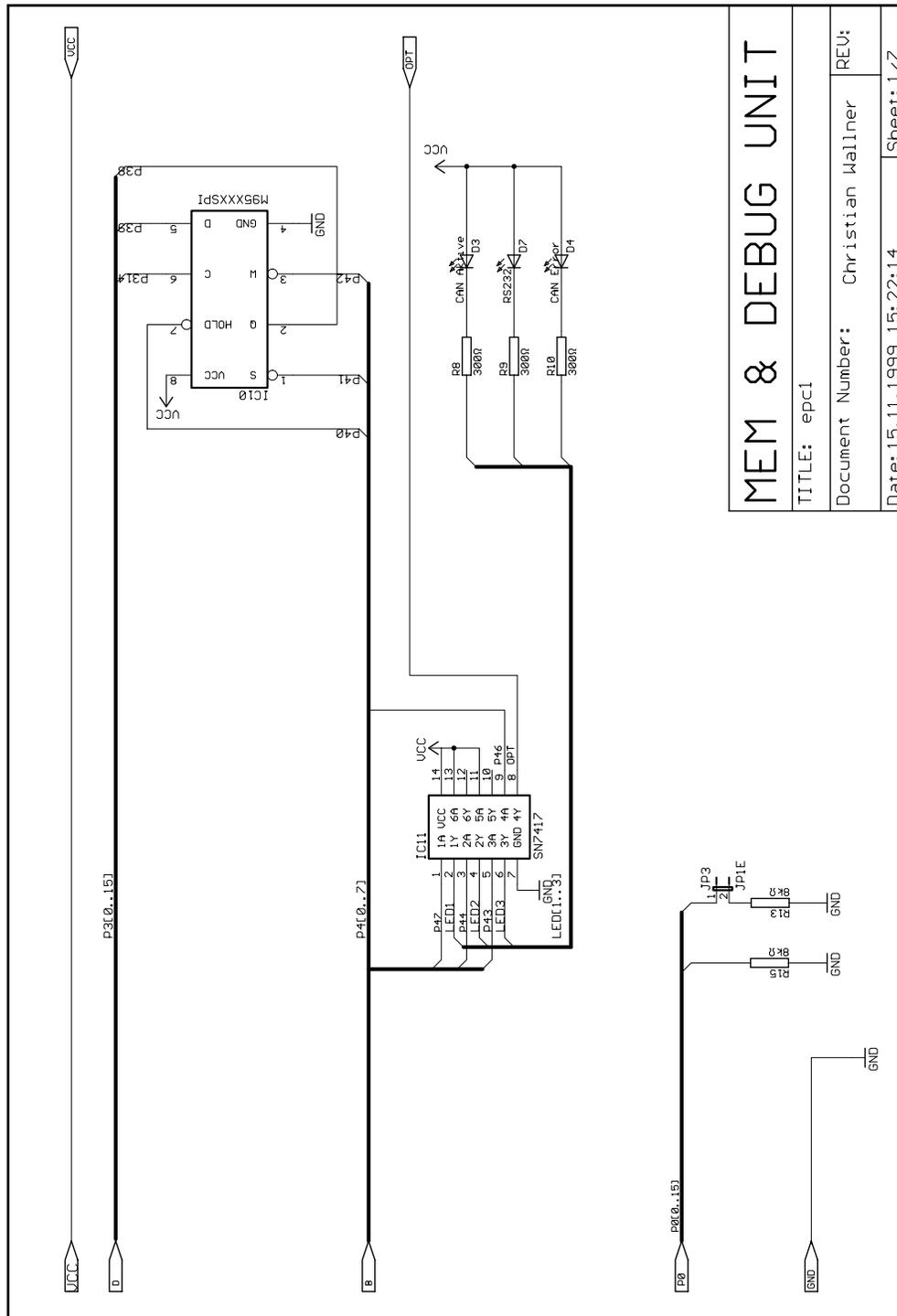


Abbildung A.2: A Parameterspeicher des EPC 167 und Treiber der LEDs

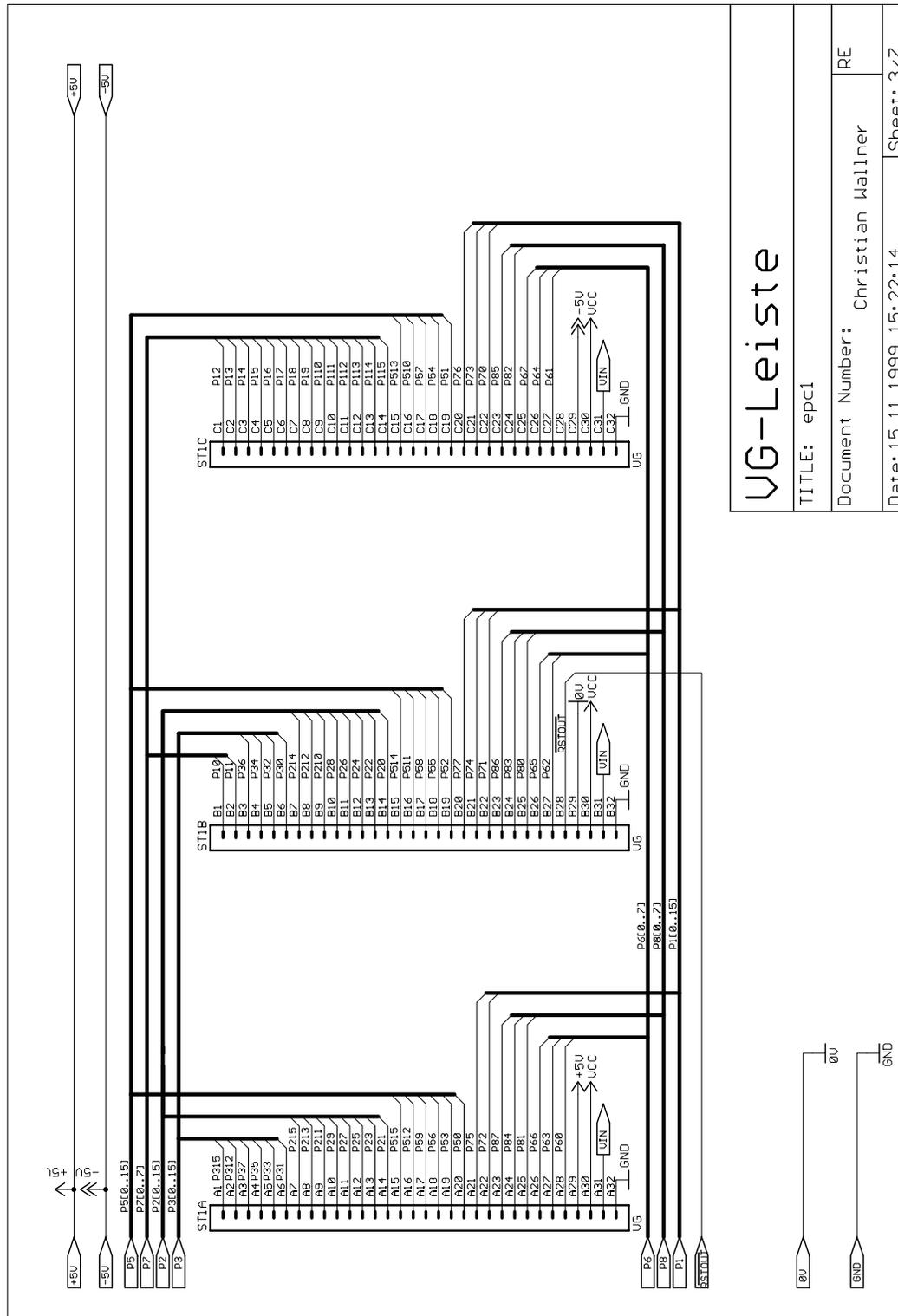


Abbildung A.3: Belegungsplan der VG-Leiste des EPC 167

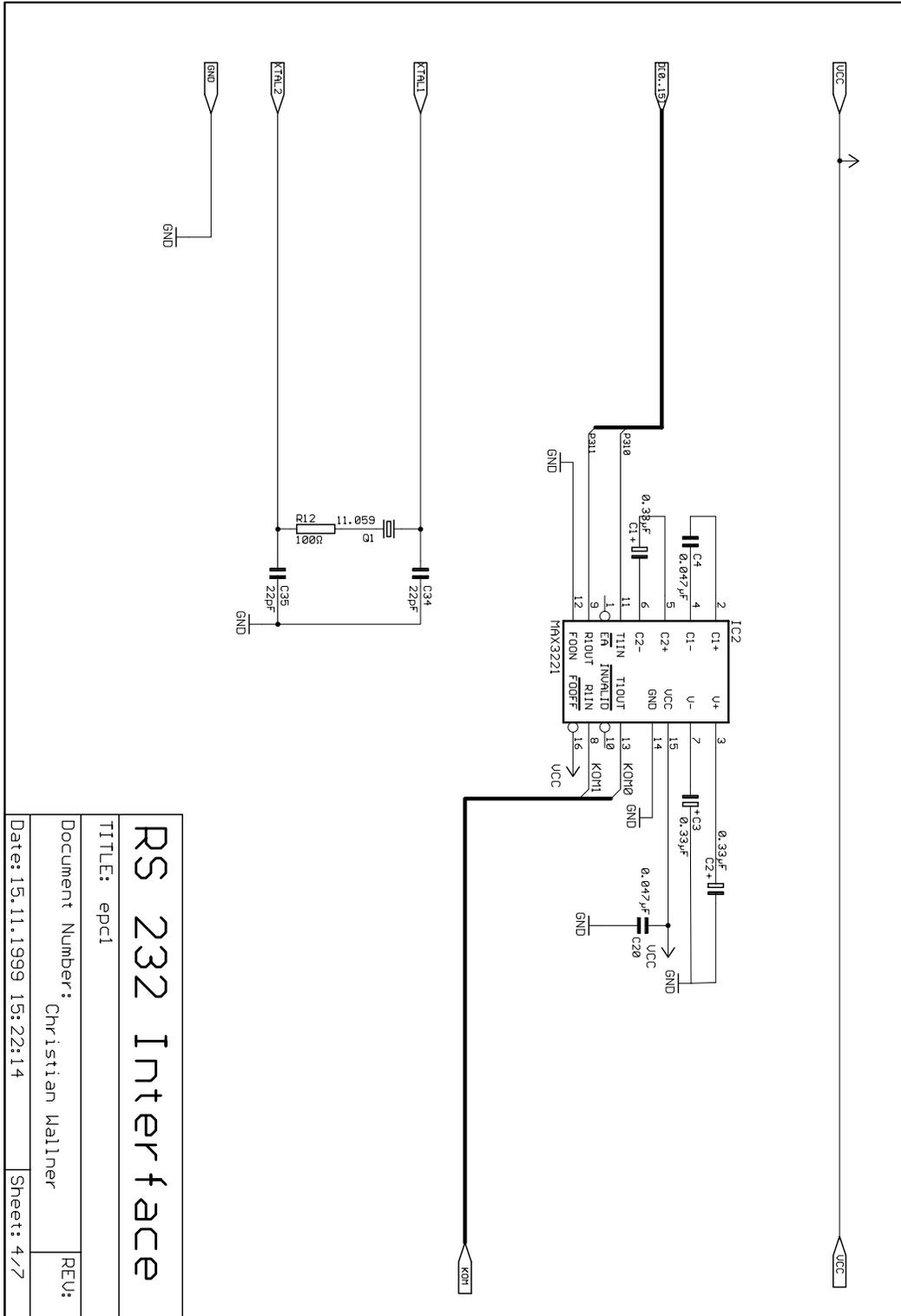


Abbildung A.4: Anschluß des RS 232 Transceiver-Bausteins, der die Umsetzung der TTL Pulse des Controllers zu seriellen Impulsen durchführt (und umgekehrt)

Anhang B

Ausleseroutinen des Transmissionmonitors

Die Routinen, die zur seriellen Auslese des EPC 167 notwendig sind, lassen sich in der folgenden Form schreiben:

```

/*****
**
** FILE      : serio.c
**
**          Christian Wallner & Anton Kastenmüller.
**          TU - München
**
**          *****/
#include <stdio.h>
#include <reg166.h>
#include "serio.h"
/* S0/1 port:
 * 8 bit, asynchronous operation, one stopbit,
 * receive enable, no parity/frame/overrun check
 * baud rate generator enable
 */
#define SXCON_MODE    0x8011
#define BAUDRATE      0x0032    /* 9600 Baud using 16 MHz */
void init_serio( void ){
    _bfd( DP3, MSK_TDX_RDX, DP3_TDX_RDX ); /* direction bits */
    _putbit( 1, P3, P3_TXD ); /* enable TXD0/TXD1 output */
    SXBG = BAUDRATE;
    SXTIC = 0; /* clear errorflags */
    SXRIC = 0;
    SXEIC = 0;
    SXTIR = 1;
    SXCON = SXCON_MODE;
}
/* Read character from serial channel */
int getch( void ){
```

```

    int c = 0x0100;
    if ( SXRIR )
    {
        c = SXRBUF & 0x00FF;
        SXRIR = 0;
    }
    return( c );
}
/* Return 1 if character available, otherwise 0 */
int kbhit( void )
{
    if ( SXRIR )
        return ( 1 );
    return ( 0 );
}
int waitch(){
    int c;
    do {
        c = getch();
    }
    while( c & 0x00FF);
    return( c );
}
/* Write character to serial channel */
int putch( int c ){
    while ( ! SXTIR )
        ;
    SXTIR = 0;
    SXTBUF = c;
    return ( c );
}

```

Der serielle Monitor, die Initialisierung des ADC und die Generierung der Impulssequenzen ROG und CLK sind im folgenden Programm-Code untergebracht:

```

/* _____ */
/* Programm zur Auslese der Sony ILX511-CCD
/* _____ */
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <reg167cr.h>
#ifdef SERIAL
#include "serio.h"
#endif
#pragma noclear
unsigned int cdbuf[1024] _at(0xE000);
#pragma clear
/* _____ */
/* delays erzeugt eine Verzoeigerung von n ms (Mit 16MHz XTAL)
/* _____ */
void delays(unsigned int n) {
    int count1;

```

```

int count2;
int dummy;
for (count1 = 0; count1 < n; count1++) {
    for(count2 = 0; count2 < 2000 ;count2++) {
        dummy = P3;
    }
}
/* _____ */
/* getadc liest einen Wert von Kanal ch [0..15] des ADC
/* _____ */
unsigned int getadc( int ch ) {
    ADCON = 0x0000 — (ch & 0x000F);
    ADST = 1;
    while (ADBSY) { }
    return(ADDAT & 0x03FF);
}
/* _____ */
/* readccd liest die CCD aus (store=1: Daten werden in ccdbuf abgelegt)
/* _____ */
void readccd ( int roptime, int storemode ) {
#define ROG P3,0
#define CLK P3,1
#define ACCUMULATE 1
#define OVERWRITE 2
int counter;
unsigned int adcval;
    DP3 = DP3 — 0x0003; /* ROG, Clk = output */
    _putbit( 1, ROG); _putbit( 1, CLK);
    _putbit( 0, ROG); /* ROG-Delay */
    delays(roptime);
    _putbit( 1, ROG);
    for(counter = 0; counter < 35; counter++) { /* Dummy-Pixel */
        _putbit( 0, CLK);
        _putbit( 1, CLK);
    }
    for(counter = 0; counter < 1024; counter++) {
        _putbit( 0, CLK);
        _putbit( 0, CLK);
        _putbit( 1, CLK);
        adcval = getadc(0x00);
        _putbit( 0, CLK);
        _putbit( 0, CLK);
        _putbit( 1, CLK);
        adcval = adcval + getadc(0x00);
        if (storemode == ACCUMULATE) {
            ccdbuf[counter] = ccdbuf[counter] + (adcval / 2);
        }
        if (storemode == OVERWRITE) {
            ccdbuf[counter] = ccdbuf[counter] + (adcval / 2);
        }
    }
}

```

```

    }
}
for(counter = 0; counter < 10; counter++) { /* Dummy-Pixel */
    _putbit( 0, CLK);
    _putbit( 1, CLK);
}
return;
}
/* _____ */
/* Monitor-Programm fuer RS232-Schnittstelle */
/* _____ */
void monitor( void ) {
#define BELL    0x0007
#define BS     0x0008
#define CR     0x000D
#define PROMPT "\nEPC:"
    char combuf[32];
    int  receiveChar;
    short bufpos, tpos;
    int  mcounter, rog;
    printf("\nEPC167CAN-Controller\n");
    printf(PROMPT);
    bufpos = 0; rog = 10;
    while (1) {
        receiveChar = waitch();
        if ((receiveChar & 0x00FF) == CR) {
            if (bufpos < 0) {
                switch (combuf[0]) {
                    case '?':{
                        printf(" Available Commands: ?,M,R,T");
                        break;
                    }
                    case 'T':{
                        rog = 0;
                        for (tpos = 1; tpos < bufpos; tpos++) {
                            rog = rog * 10 + (combuf[tpos] - 0x30);
                        }
                        break;
                    }
                    case 'M':{
                        printf(" CCD sample cycle started ROG=%d .... ",rog);
                        for (mcounter=0; mcounter<1024; mcounter++)
                            ccdbuf[mcounter] = 0;
                        for (mcounter=0; mcounter<4; mcounter++)
                            readccd(1,0);
                        for (mcounter=0; mcounter<64; mcounter++)
                            readccd(rog,ACCUMULATE);
                        for (mcounter=0; mcounter<1024; mcounter++)
                            ccdbuf[mcounter] = ccdbuf[mcounter] / 64;
                        printf(" finished");
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```
                break;
            }
        case 'R':{
            printf("\n");
            for (mcounter=0; mcounter<1024; mcounter++)
                printf("%d\n",ccdbuf[mcounter]);
            printf("\n");
            break;
        }
        default:{
            printf(" Error:Invalid Command");
            break;
        }
    }
    bufpos = 0;
}
printf(PROMPT);
}
else if ((receiveChar & 0x00FF) == BS) {
    if (bufpos > 0) {
        bufpos--;
        putch((short) BS);
    }
}
else {
    if (bufpos < 31) {
        combuf[bufpos] = (char) (receiveChar & 0x00FF);
        putch(receiveChar);
        bufpos++;
    }
    else {
        putch((short) BELL);
    }
}
}
}
void main( void ) {
    init_serio();
    monitor();
}
```


Literaturverzeichnis

- [1] L.G. Landsberg , Electromagnetic decay of light vector mesons, Phys. Rep. **128**,No. 6 (1985) 301
- [2] M. Lutz, S. Klimt und W. Weise, Nucl. Phys. **A542** (1992) 621
- [3] W. Cassing und E.L. Bratkovskaya, Phys. Rep. **308** (1999) 65
- [4] R. Rapp und J. Wambach, *Chiral symmetry restoration and dileptons in relativistic heavyion collisions*, to appear in Adv.Nuc.Phys.E, and hep-ph/9909229 (1999)
- [5] J. Engels, F.Karsch und K.Redlich, Nucl. Phys. **B435** (1995) 295
- [6] G. Brown, M.Rho, Phys. Ref. Lett. **66**, 2720 (1991)
- [7] T. Hatsuda, S.H.Lee, Phys. Rev. **C46** (1992) R34
- [8] Asakawa et al., Phys. Rev. **C46** (1992) R1159
- [9] W. Schön, H.Bokemeyer, W.Koenig, V.Metag, Acta Physica Polonica **B27** (1996)
- [10] W. Schön, J.Friese und W.Koenig, Proc. of the XXXVIII Int. Wintermeeting on Nucl. Phys., Bormio (1999)
- [11] W. Cassing et al., Phys.Rep. 188 (1990) 364
- [12] G. Wolf, G.Batko und U.Mosel, Nucl. Phys. **552** (1993) 547
- [13] H. Schön, *HADES Ein Dielektronenspektrometer hoher Akzeptanz für relativistische Schwerionenkollisionen*, Dissertation, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main (1995)
- [14] HADES collaboration, HADES: *Proposal for a High- Acceptance DiElectron Spectrometer* (1993)

- [15] R. Schicker et al., Acceptance and resolution simulation studies for the dielectron spectrometer HADES at GSI, Nucl. Instr. and Meth. **A380** (1996) 586
- [16] P.A. Čerenkov, Phys. Ref. **52** (1937) 378
- [17] I.E. Tamm und I.M. Frank, Doklady An. SSSR **14** (1937) 107
- [18] J.V. Jelley, *Cherenkov radiation and its applications*, Pergamon Press, London (1958)
- [19] R. Gernhäuser, *Ein ringabbildender Cherenkovdetektor zur Untersuchung schwerer Projektilfragmente*, Dissertation, Technische Universität München (1998)
- [20] R. Gernhäuser et al., Nucl.Instr. and Meth. **A371** (1996) 300
- [21] F. Sachsenhauser, private Mitteilung (1998)
- [22] M. Böhmer, *Das Auslesesystem für den Ringabbildenden Cherenkovdetektor im HADES Spektrometer*, Diplomarbeit, Technische Universität München (1999)
- [23] M. Münch, *Ein Datenaufnahmesystem mit Echtzeit-Bildverarbeitung für Ringabbildende Cherenkovdetektoren*, Diplomarbeit, Technische Universität München (1995)
- [24] A. Kastenmüller, vorauss.: *Der HADES RICH Detektor*, Dissertation, Technische Universität München (vorauss.: 2000)
- [25] J. Lehnert, *Entwicklung eines VUV-Transparenz-Monitors für Gas-Cherenkov-Radiatoren*, Diplomarbeit, Justus-Liebig-Universität Gießen (1995)
- [26] A. Kastenmüller, private Mitteilung (1999)
- [27] R. Gernhäuser, *Optische Transmission verschiedener Zählergase und Szintillatoren im Wellenlängenbereich 130 nm - 300 nm*, Interner Report, Technische Universität München (1993)
- [28] K. Watanabe und M. Zelikoff, J. Opt. Soc. Am**43**, 753 (1953)
- [29] R.E. Huffman, Can. J. Chem. **47**, 1823 (1969)
- [30] Ch. Markert, *Driftgeschwindigkeitsmessung zur Gasüberwachung im NA49-Experiment*, Diplomarbeit, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main (1995)
- [31] A. Ulrich, private Mitteilung, (1999)

-
- [32] Oriel Cooperation, *Grating Monochromator Modell 77250*, Datenblatt
 - [33] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons (1981)
 - [34] Sony, *ILX511 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W)*, Datenblatt
 - [35] M. Seya and F. Masuda, *Sci. Light* **12** (1963) 9
 - [36] R. Allison, J. Burns and A. J. Tuzzolino, *J. Opt. Soc. Am.* **54** (1964) 747
 - [37] D. H. Thurnau, *J. Opt. Soc. Am.* **46** (1956) 346
 - [38] E. C. Bruner, Jr., Dissertation, Universität von Colorado, Colorado (1964)
 - [39] J. A. R. Samson, *J. Opt. Soc. Am.* **54** (1964) 6
 - [40] R. Gernhäuser, private Mitteilung (1999)
 - [41] Siemens, *C167CR-16F Data Sheet 03.97 Advanced Information*, Datenblatt (1997)
 - [42] Tasking, *C166/ST10 C Cross-Compiler Users Guide*, Dokumentation (1998)

Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei allen bedanken, die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. H. J. Körner danke ich für das Interesse das er meiner Arbeit entgegengebracht hat. Ihm und Herrn Professor Dr. P. Kienle danke ich für die freundliche Aufnahme an ihrem Institut.

Jürgen Friese danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit und seiner Bereitschaft, sich jederzeit für Fragen und Anliegen Zeit zu nehmen.

Roman Gernhäuser möchte ich für seine kreativen Ideen und die Unterstützung während dieser Arbeit danken.

Anton Kastenmüller danke ich für die kompetente Beantwortung meiner Fragen aus dem Bereich der Elektronik, der Computerei und der Vermögensberatung. Seine Beiträge zu den Kaffeepausen waren jederzeit eine willkommene Abwechslung.

Karl Zeitelhack (General Zeitelplan) danke ich für die Unterstützung bei der Planung und der Konstruktion des Monochromatorgehäuses und seinen ausführlichen Erklärungen zu MS-Project.

Ralf Lang und Michael Klöckner aus der E12 Werkstatt danke ich für die prompte und präzise Fertigung vieler Bauteile, der Einführung in die Maschinenkunde und der Bereitstellung von ausreichend vielen Feuerzeugen.

Mein Mitstreiter Michael "gut Pin will Weile haben" Böhmer danke ich für die Erklärungen in Digitalelektronik. Unsere ausdauernden Squashpartien erlangten Kultstatus.

Für die Unterstützung bei physikalischen Fragestellungen und sonstigen Problemen danke ich der Interessengemeinschaft 3⁰⁰ Uhr, Walter Schön und Angelika Ehlhardt, die jederzeit zu Diskussionen und tatkräftiger Unterstützung bereit waren.

Patrick Reichart danke ich für die Hilfe bei der Bearbeitung der in dieser Arbeit vorliegenden Bilder.

Allen "E12er" danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit, das angenehme Arbeitsklima und das große Maß an Hilfsbereitschaft.

Weiterhin möchte ich der Aral-Tankstelle an der Verdistraße in Münschen danken, die durch ihre Öffnungszeiten zu meinem Hauptlebensmittellieferanten avancierte.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, ohne deren Hilfe und Geduld ein Studium der Physik an der Technischen Universität München nicht möglich gewesen wäre.