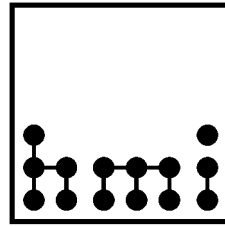


Entwicklung eines neuartigen Niederdruck–Detektors
mit hoher Orts– und Flugzeitauflösung
zum Nachweis thermischer Neutronen



Im Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin eingereichte
Dissertation

von

Christian Schulz

Dezember 1999

1. Gutachter: Prof. Dr. Wolfram von Oertzen

2. Gutachter: Prof. Dr. Michael Steiner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Konverter und Detektoren für Neutronenstreuexperimente	5
2.1	Neutronenkonverter	5
2.1.1	Gasförmige Konverter	6
2.1.2	Festkörperkonverter	8
2.2	Detektoren ohne Flugzeitauflösung	11
2.3	Szintillationsdetektoren	12
2.4	Halbleiterdetektoren	13
2.5	Hochdruck-Gasdetektoren	15
2.5.1	Mikrostreifengaskammern für minimalionisierende Teilchen	16
2.5.2	Andere Mikrostrukturgasdetektoren	18
2.5.3	^3He -Mikrostreifengaskammern für Neutronen	19
2.6	Niederdruck-Gasdetektoren	20
2.7	Der neuartige Neutronendetektor im Überblick	22
3	Optimierung des Neutronenkonverters	25
3.1	Folienkonverter aus ^{157}Gd	25
3.1.1	Berechnung der Konversionselektronenemission in ^{157}Gd	26
3.1.2	Energie und Austrittswahrscheinlichkeit der Elektronen	27
3.1.3	Bestimmung der optimalen Schichtdicke	30
3.2	Erzeugung von Sekundärelektronen	33
3.2.1	Elektronenaffinität bei CsI	34
3.2.2	Sekundärelektronenausbeute	35
3.2.3	Einfluß des Substrates	37
3.2.4	Veränderungen durch Wasseraufnahme	39
3.3	Erhöhung der Sekundärelektronenausbeute	41
3.3.1	Erhöhung der SE-Ausbeute durch ein elektrisches Feld	41
3.3.2	Optimierung des Extraktionsgitters	42
3.3.3	Poröses CsI	45
3.3.4	Säulenartiges CsI	48
3.4	Herstellung des Neutronenkonverters	49
3.4.1	Aufbringen von Gd-Schichten auf Aramidfolien	49
3.4.2	Aufdampfen von CsI-Schichten und SEM-Untersuchungen	51
3.4.3	Das Sekundärelektronenspektrometer	54
4	Der Mikrostreifendetektor	57
4.1	Aufbau des Mikrostreifendetektors	57
4.2	Optimierung der Gasverstärkung	58
4.2.1	Berechnung des elektrischen Feldes	61
4.2.2	Einfluß der DLC-Schicht	63
4.2.3	Die Zweistufen-Gasverstärkung	66
4.3	Optimierung der Mikrostreifengeometrie	70
4.4	Technische Realisierung des Mikrostreifendetektors	75
4.4.1	Die erste Metallschicht	75

4.4.2	Die unteren $M\Omega$ -Widerstandsstreifen	77
4.4.3	Die Isolationsschicht	80
4.4.4	Die DLC-Schicht	82
4.4.5	Die zweite Metallschicht	82
4.4.6	Die oberen $M\Omega$ -Streifen	84
4.5	Testmessungen an den Mikrostreifendetektorplatten	87
5	Optimierung der Signalauslese mit Verzögerungsleitungen	91
5.1	Signalausbreitung auf dem Mikrostreifendetektor	91
5.2	Theoretische Grundlagen der Verzögerungsleitungen	96
5.3	Simulation einer m-abgeleiteten Verzögerungsleitung	100
5.4	Verringerung von differentiellen Nichtlinearitäten	103
5.4.1	Kapazitiv überbrückte Verzögerungsleitungen	105
5.5	Entkopplung der Verzögerungsleitung vom Mikrostreifendetektor	108
5.6	Berechnung der Ortsauflösung	112
5.6.1	Simulation der differentiellen Nichtlinearitäten	112
5.6.2	Begrenzung der Ortsauflösung durch elektronisches Rauschen	114
6	Signalverarbeitung und Datenaufnahmesystem	117
6.1	Signalverarbeitung	117
6.2	Zählratenkapazität	119
6.3	Das Datenaufnahmesystem	121
6.3.1	Funktion des F1 TDC-Chips	123
6.3.2	Umrechnung der Daten mit dem DSP	124
6.3.3	Bestimmung der Totzeit	124
7	Zusammenfassung	127
	Literaturverzeichnis	131

7 Zusammenfassung

Diese Arbeit ist Teil eines Projektes, in dem ein völlig neuartiger Neutronendetektor entwickelt wird. Dieser verwendet $^{157}\text{Gd}/\text{CsI}$ -Zweischichtenkonverter als dünne Schichten von optimierter Dicke beidseitig einer dünnen Trägerfolie. Neutronenkonverter aus $^{\text{nat}}\text{Gd}/\text{CsI}$ mit optimierter Struktur wurden in dieser Arbeit hergestellt und verschieden strukturierte CsI-Schichten mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Der Konverter ist zentrales Element und gemeinsame Driftkathode auf negativem Potential einer Niederdruck-Doppel-Mikrostreifenplatten-Anordnung, wobei die beiden Mikrostreifenplatten-Ebenen mit jeweils vier Platten pro Ebene den aktiven Gasraum nach außen abschließen. Dieser ist mit 20 hPa Isobutan gefüllt. Die neuartigen Mikrostreifen-Strukturen sind in mehreren dünnen Schichten auf einem soliden Glasträger aufgebaut und erlauben, zwei orthogonale Ortskoordinaten mit $100 - 300 \mu\text{m}$ Ortsauflösung (FWHM) zu messen sowie die Flugzeit thermischer Neutronen mit weniger als 4 ns Zeitauflösung zu bestimmen. Alle Elektroden wurden in dieser Arbeit erstmals anhand von vollständigen Modellrechnungen für den Niederdruckbetrieb optimiert, wobei für die zweite Ortskoordinate (orthogonal zur Richtung der Streifen der oberen Mikrostreifenebene) neuartige Elektrodenstrukturen gefunden wurden, die höhere und schnellere Signale liefern.

Die gesamte Nachweistechnik, vom Einfang der Neutronen im ^{157}Gd über die Austrittswahrscheinlichkeit der emittierten Konversionselektronen und dem anschließenden zweistufigen Gasverstärkungsprozeß bis hin zu den influenzierten Signalen, deren Ausbreitung auf den Mikrostreifenplatten und ihrer Auslese mit Verzögerungsleitungen, wurde in dieser Arbeit erstmals vollständig modelliert und optimiert. Für die Datenaufnahme und Auswertung wurde ferner eine neue PCI-Bus-Karte entwickelt, die durch Verwendung sehr schneller hochauflösender Mehrfach-Ereignis-(Multi-Hit)-TDC-Chips ohne Totzeit, eines sehr großen Histogrammspeichers und eines ultraschnellen digitalen Signalprozessors (DSP) eine sehr hohe Zählratenkapazität ermöglicht. Die wichtigsten Detektorparameter sind in Tabelle 7.1 zusammengestellt:

Gesamtfläche:	$57 \times 57 \text{ cm}^2$
Aktive Fläche:	$50.8 \times 50.8 \text{ cm}^2$
Ortsauflösung:	$100 - 300 \mu\text{m}$ FWHM
Flugzeitauflösung:	$< 4 \text{ ns}$ ($\lambda = 1.81 \text{ \AA}$)
Zählratenkapazität:	$\approx 10^7$ Ereignisse/Sekunde
Nachweiseffizienz	bei 100% ^{157}Gd
$\lambda = 1.81 \text{ \AA}$:	61%
$\lambda = 5.8 \text{ \AA}$:	75%
$\lambda = 11.0 \text{ \AA}$:	80%

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Detektorparameter. Dabei ist λ die Neutronenwellenlänge.

Aus von Hargrove et al. gemessenen Werten für die Austrittswahrscheinlichkeit der Konversionselektronen in ^{nat}Gd wurde die Wahrscheinlichkeit berechnet, daß bei der Abregung des ^{158}Gd (nach dem Neutroneneinfang) mindestens ein Konversionselektron erzeugt wird. Dieser neue und genaue Wert beträgt $87.3 \pm 2.5 \%$, und dies ist auch die maximal mögliche Nachweiswahrscheinlichkeit dieses Detektortyps.

Die Optimierung der ^{157}Gd -Schichtdicke ergab für thermische Neutronen bei zu 100% angereichertem ^{157}Gd eine Austrittswahrscheinlichkeit der Konversionselektronen pro eingefangenen Neutron von 61%. Bei einem Anreicherungsgrad von 89.4% (dieses Material ist vorhanden) wurde eine Austrittswahrscheinlichkeit von 59% ermittelt. Für subthermische Neutronen steigt die Austrittswahrscheinlichkeit an und erreicht bei einer Neutronenwellenlänge von 11 Å einen Wert von 80%.

Die nach dem Neutroneneinfang im ^{157}Gd emittierten Konversionselektronen setzen in der auf dem Gd befindlichen CsI-Schicht Sekundärelektronen frei. Die Dicke und Struktur der CsI-Schicht wurde so optimiert, daß eine möglichst große Anzahl von Sekundärelektronen in den Gasraum freigesetzt wird. Diese optimierte CsI-Schicht hat eine Struktur mit hohem Aspekt-Verhältnis, die sich bei größeren Schichtdicken zu einer Struktur mit säulenartigen Mikrokristallen entwickelt (vgl. Abbildungen 3.23 bis 3.25 und 3.27) und eine Dicke von ca. 5 – 10 μm . Zur Erhöhung der Sekundärelektronenausbeute wird zusätzlich ein Extraktionsgitter verwendet, das an der Konverteroberfläche eine Extraktionsfeldstärke von 10 – 15 kV/cm erzeugt. Die Verteilungsfunktion der emittierten Sekundärelektronenzahlen soll künftig bei der weiteren Konverteroptimierung (hinsichtlich der Dicke und Struktur der CsI-Schicht) mit einem im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Sekundärelektronenspektrometer gemessen werden. Für die mittlere Sekundärelektronenausbeute nicht strukturierter (d.h. nicht optimierter) CsI-Schichten ergeben sich aus Modellrechnungen 10 – 20 Sekundärelektronen. Zuverlässige Meßwerte hierzu fehlen bisher. Der Aufbau des Mikrostreifen-detektors wurde so optimiert, daß selbst ein einzelnes freigesetztes Sekundärelektron durch den Gasverstärkungsprozeß an der Mikrostreifenplatte nachgewiesen werden kann. Bei derartig niedrig gesetzten Schwellen wird jedoch die Empfindlichkeit gegenüber Photonen und damit der Untergrund in den Neutronenspektren erhöht.

Die zweistufige Gasverstärkung zwischen Konverter und Mikrostreifenplatte wurde berechnet; sie kann mehr als 10^7 betragen. Die durch die Elektronenlawinen auf den Streifen-elektroden influenzierten Signale wurden zur Optimierung der Elektrodenstruktur verwendet. Diese Optimierung hängt wesentlich von der gegenseitigen Influenz von Spiegelladungen der Signalladungen auf den Elektroden ab. Letztere wurden nach dem "Weighting Field Concept" [Wal78, Gat82] berechnet. Dabei wird auf den Pad-Streifen der unteren Metallschicht ca. 2/3 der Anodenladung influenziert. Die auf die Streifen in beiden Metallebenen influenzierten Pulse habe eine Halbwertsbreite von ca. 5 ns. Da die Elektronenlawine aufgrund der Diffusion eine Breite von ca. 0.9 mm hat, influenziert sie Ladungen auf ca. 3 – 5 Anoden- bzw. Pad-Streifen der zweiten Ortsebene, so daß die Ortskoordinaten durch Interpolation genauer als der Abstand der Streifen gemessen werden können.

Diese influenzierten Signale werden über Verzögerungsleitungen ausgelesen. Die Signaltransmission auf den Streifen und in den Verzögerungsleitungen wurde berechnet; diese wurden so optimiert, daß das Signal auf der Leitung möglichst wenig verändert wird. Die bei dieser Auslesemethode entstehenden differentiellen Nichtlinearitäten und die zu erwartenden Ortsauflösungen wurden simuliert. Dabei wurde eine differentielle Nichtlinearität von 40 μm und eine Ortsauflösung von ca. 100 – 300 μm FWHM ermittelt.

Für die Messung der Signale wurde ein neues Datenaufnahmesystem auf der Basis von 8-Kanal-TDC-Chips, die Mehrfachereignisse auswerten können und keine Totzeit haben, entwickelt. Deren Zeitauflösung beträgt 120 ps. Mit Hilfe eines Vorteilerprinzips (Prescaler) können auch sehr lange Neutronenflugzeiten gemessen werden. Die Flugzeitauflösung des De-

tektors ist durch die Dicke der Konverterfolie für thermische Neutronen ($\lambda = 1.81 \text{ \AA}$) auf weniger als 4 ns FWHM begrenzt. Durch dieses Datenaufnahmesystem wird es möglich, auch dann die Signale auf einer Verzögerungsleitung dem richtigen Ereignis zuzuordnen, wenn sich die Signale von mehreren Ereignissen auf dieser Leitung überkreuzen. Bei dem für einen großflächigen Detektor erforderlichen Ausbau mit vier PCI-Bus-Karten beträgt die erreichbare Zählratenkapazität maximal ca. 10^7 Ereignisse pro Sekunde.

Der Aufbau des neuartigen Detektors basiert auf einem Mehrschichtensystem auf großflächigen Glasplatten. Dessen Entwicklung erfolgt in Kollaboration mit dem Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik in Braunschweig, der schweizer Firma IMT und dem Institut for Physics of Microstructures der russischen Akademie der Wissenschaften in Nischni Nowgorod. Der Stand und die Probleme der Schichtentwicklung wurden in Abschnitt 4.4 behandelt.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Gott danken, ohne dessen Hilfe ich es nicht geschafft hätte.

Die vorliegende Arbeit wurde in Arbeitsgruppe von Prof. W. von Oertzen am Hahn–Meitner–Institut in Berlin durchgeführt. Für die Schaffung der nötigen Voraussetzungen zur Durchführung der Arbeit und den “Blick über den Tellerrand” der Detektorentwicklung bin ich ihm sehr dankbar.

Recht herzlich bedanken möchte ich mich auch für die sehr gute Betreuung während der gesamten Zeit durch Dr. B. Gebauer. Die vielen und hilfreichen Diskussionen über den weiteren Fortgang der Arbeit haben viel zu deren Gelingen beigetragen. Seine große Erfahrung bei der Detektorentwicklung hat meinen Wissensstand auf diesem Gebiet sehr erweitert.

Für seine Hilfe bei der Erstellung der Konstruktionszeichnungen und die vielen wertvollen Ratschläge und Tips möchte ich mich bei Dr. Thomas Wilpert bedanken.

Dr. Nikolay Chkhalo danke ich für seinen Beitrag bei der Herstellung der Gadolinium– und Cäsiumjodid–Schichten, sowie für seine Beteiligung beim Umbau der Aufdampfapparatur.

Für die Unterstützung bei der Entwicklung der Impedanzwandlerschaltung möchte ich Herrn U. Möller und Herrn G. Richter herzlich danken.

Für die Einweihung in die Geheimnisse der Rasterelektronenmikroskopie gebührt mein Dank Herrn M. Wilhelm, ohne dessen Unterstützung diese Untersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Den anderen Mitgliedern der Arbeitsgruppe Dr. H.G. Bohlen, Dr. Severin Thummerer, Dr. Abel Blazevic, Dr. Martin Wilpert und Boris Hermann danke ich für die gute Zusammenarbeit und die erbaulichen Gespräche während der Teerunde.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Freunden, deren aufmunternde Unterstützung mir in schwierigen Zeiten Kraft gegeben hat.

Allen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben und die hier nicht namentlich erwähnt sind, sei ebenfalls recht herzlich gedankt.

Lebenslauf

Name:	Christian Schulz
Adresse:	Billerbecker Weg 63
Geburtstag und -ort:	14.01.1967 in Berlin
Familienstand:	ledig
Schulbildung:	
1973 – 1979	Alfred-Brehm-Grundschule
1979 - 1985	Bertha-von-Suttner-Oberschule
12.85	Abschluß Abitur
Berufsausbildung:	
02.86 - 01.88	Ausbildung zum Bankkaufmann bei der Berliner Sparkasse
Berufstätigkeit:	
01.88 - 08.88	Angestellter der Berliner Sparkasse
Studium:	
10.88 - 10.95	Physikstudium an der Technischen Universität Berlin
Wahlfächer:	Kern- und Elementarteilchenphysik, Festkörperphysik
Diplom 10.95:	Abschluß: Dipl. Phys., Note: "sehr gut"
Studienarbeit:	
11.93 - 04.94	Simulationsrechnungen zur Optimierung von Bragg-Kurven-Ionisationskammern, Hahn-Meitner-Institut, Berlin
Diplomarbeit:	
05.94 - 05.95	Untersuchungen zur Optimierung von schnellen, großflächigen Bragg-Ionisationskammern, Hahn-Meitner-Institut
seit 15.04.96	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Hahn-Meitner-Institut