

Habilitationsschrift
zur Erlangung der
Venia Legendi

**Erzeugung intensiver hochpolarisierter
Elektronenstrahlen mit hoher
Symmetrie unter Helizitätswechsel**

Kurt Aulenbacher

6. Juli 2007

Gutachter der Habilitationsschrift:

Prof. Dr. Yuri Mamaev; Sankt Petersburg State Technical University

Prof. Dr. Dr h.c. mult. Achim Richter; Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr. Erhard Steffens; Universität Erlangen

Datum des Kolloquiums: 14. 2. 2007

Datum der Antrittsvorlesung: 2.5.2007

Berichte aus der Physik

Kurt Aulenbacher

**Erzeugung intensiver hochpolarisierter
Elektronenstrahlen mit hoher Symmetrie
unter Helizitätswechsel**

D 77 (Habil.-Schr. Universität Mainz)

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Mainz, Univ., Habil.-Schr., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6429-1

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Solche und dergleichen Grillen trieben sie um, und es wäre auch gar possierlich anzuschauen gewesen, dafern man nur gewusst hätte, dass es ein gutes Ende nehmen und ohne Schaden abgehen würde.

Grimmelshausen

Mit Photokathoden auf der Basis von III/V Halbleitern können spinpolarisierte Elektronenstrahlen erzeugt werden. Obwohl noch weitere Vorzüge, wie z.B. die fast beliebig wählbare Zeitstruktur des Strahls hinzutreten, wurden solche „Photoquellen“ nach ihrer Einführung Mitte der siebziger Jahre am SLAC [1] zunächst nur für wenige Experimente an Elektronenbeschleunigern eingesetzt. Dafür gab es folgende Beweggründe: Bei den damals üblichen „Einarmmessungen“ - Streuung von Elektronenstrahlen an unpolarisierten Targets mit Nachweis nur eines gestreuten Teilchens - sind spinabhängige Effekte in der Regel paritätsverletzender Natur [1],[2],[3]. Viele der interessierenden Effekte in der Elektronenstreuung sind jedoch paritätserhaltend, so dass ein polarisierter Strahl für die meisten Experimente der Kern- und Nukleonenphysik keinen Vorteil darstellte. Weiterhin gestaltete sich der Einsatz der empfindlichen Photokathoden in der eher rauen Umgebung eines Elektronenbeschleunigers problematisch. Zuweilen konnte trotz großem Aufwand nicht die für Elektronenstreuexperimente notwendige stabile Betriebsweise der Quelle erzielt werden. Daher hatten Photoquellen nahezu das Ansehen einer aufwändigen Kuriosität mit beschränktem Anwendungsbereich.

Einige Zeit später wurden c.w.-Elektronenbeschleuniger verfügbar, die gegenüber den älteren, gepulsten Maschinen bessere Betriebsbedingungen bieten. Verschiedene Realisierungskonzepte wie Elektronen-Stretcherringe mit langsamer Extraktion (Universität Bonn), supraleitende Rezirkulatoren (Universität Darmstadt) und normalleitende Rennbahnmikrotrone (Universität Mainz) wurden erfolgreich realisiert. In unserem Institut in Mainz wurde der Aufbau der Rennbahnmikrotronkaskade „MAMI B“ mit 850 MeV Elektronenenergie 1991 abgeschlossen.

Die c.w.-Beschleuniger erlauben unter anderem komplexe Koinzidenzexperimente, die zuvor aufgrund der Untergrundverhältnisse so gut wie ausgeschlossen waren. Bei solchen Messungen können auch paritätserhaltende spinabhängige Observablen auftreten. Theoretische Analysen ließen darauf hoffen, dass „Doppelpolarisationsexperimente“ (bei-

spielsweise die Streuung polarisierter Elektronen an einem polarisierten Target) der Schlüssel zur Messung wichtiger Messgrößen wie dem elektrischen Formfaktor des Neutrons sein könnten [4]. Daher lebte das Interesse an spinpolarisierten Elektronenstrahlen auf, aber auch die Anforderungen an die Elektronenquelle wurden drastisch erhöht. Dies manifestierte sich z.B. in einer im Verhältnis zu den vorhergehenden Experimenten um Größenordnungen höheren geforderten Strahlbrillanz und bedeutend verlängerten Experimentierzeiten. Um diesen Anforderungen an MAMI dauerhaft gerecht zu werden, wurde 1992 die „B2-Kollaboration“ gegründet. Diese Arbeitsgruppe wurde bis zu seiner Pensionierung im Jahr 1998 von Professor Erwin Reichert geleitet und steht seither unter meiner Leitung.

Bis Ende der neunziger Jahre konnten mit Hilfe des spinpolarisierten Strahls wegweisende Experimente zum elektrischen Formfaktor des Neutrons am MAMI Elektronenbeschleuniger abgeschlossen werden [5],[6],[7]. Seither wurde die Photoquelle auch für eine Vielzahl weiterer Doppelpolarisationsexperimente, wie z.B. die Überprüfung der Gerassimov-Drell-Hearn Summenregel [8] oder die Vermessung der Verhältnisse von Multipolmomenten bei der Anregung der Delta-Resonanz [9], genutzt. Die größten Anforderungen an die Photoquelle wurden (und werden) jedoch von einem etwa 1995 konzipierten Experiment definiert, das die präzise Vermessung der Paritätsverletzung in der elastischen Elektronenstreuung am Proton zum Ziel hat. Dieses Projekt trägt die Bezeichnung „A4“.

Es zeigte sich bald, dass viele der zur damaligen Zeit verfügbaren Kenngrößen der polarisierten Elektronenquelle erneut um Größenordnungen verbessert werden mussten, um das A4-Experiment mit Aussicht auf Erfolg durchzuführen. So war es unter anderem erforderlich die Strahlintensität und die damit verknüpfte Kathodenlebensdauer nochmals zu verzehnfachen und gleichzeitig die Emissionsasymmetrie beim Umschalten der Elektronenstrahlhelizität um etwa das Hundertfache zu reduzieren.

Im Rahmen der hier vorliegenden Habilitationsschrift versuche ich aufzuzeigen, wie die Zusammenhänge zwischen der Physik der Photoquelle und den erzielbaren Strahlparametern beschaffen sind. Durch die hier präsentierten Arbeiten konnten einerseits einige der grundlegenden Mechanismen aufgeklärt werden, die z.B. die Strahlpolarisation und die Symmetrie unter Helizitätswechsel begrenzen. Zugleich setzten uns andere Entwicklungsarbeiten in den Stand, die geforderte Strahlintensität zu erreichen. Die erste Runde der A4-Experimente ist inzwischen erfolgreich abgeschlossen [10],[11],[12].

Dabei ist die Darstellung folgendermaßen gegliedert: Das erste Kapitel stellt die Installation der Quelle am MAMI-Beschleuniger vor und erklärt die Bedingungen, unter denen es möglich wurde, praktisch alle an der Quelle produzierten Elektronen zum Experiment zu transportieren und dabei trotzdem ausgezeichnete Emittanzwerte und Strahlstabilität zu erzielen. Die notorische Problematik der begrenzten Lebensdauer der Photokathode konnte nicht nur entschärft, sondern die beteiligten Prozesse zum Teil aufgeklärt werden, so dass sich zum heutigen Zeitpunkt weitere Entwicklungspotentiale abzeichnen. Im darauf folgenden Kapitel werden Untersuchungen vorgestellt, die sich mit der Depolarisation des Elektronenensembles bei der Photoemission aus den an MAMI verwendeten III/V Heterostrukturen befassen. Das dritte Kapitel beschreibt die Kontrolle der Symmetrie der Strahlparameter beim Helizitätswechsel des Elektronenstrahls.

Um die vorliegende Schrift für einen möglichst weiten Leserkreis zugänglich zu machen habe ich außerdem ergänzende Hintergrundinformationen und Details in drei Anhängen zusammengestellt, auf die am geeigneten Ort verwiesen wird.

An dieser Stelle möchte ich allen jenen danken, die mich bei meinen Arbeiten so ausdauernd und wohlwollend unterstützt haben. Dazu gehören meine Mentoren Herr Professor Dietrich von Harrach und Herr Professor Karl Schilcher sowie insbesondere Herr Professor Erwin Reichert.

Als Mitglieder der Arbeitsgruppe B2, die mit ihren Arbeiten den Grundstein für viele der hier präsentierten Ergebnisse gelegt haben, dürfen bei dieser Danksagung nicht unerwähnt bleiben: Dr. Michael Steigerwald, Dr. Valeri Tioukine, die Diplomphysiker Gerhard Arz, Roman Barday, Roman Bolenz, Jörg Schuler, Markus Wiessner, Monika Weis, Konrad Winkler und Christian Zalto.

Die Arbeitsgruppe B2 kann nicht ohne eine harmonische Zusammenarbeit mit der MAMI-Beschleunigerabteilung (B1) existieren. Daher möchte ich mich beim Betriebsleiter von MAMI, Herrn Dr. Karl-Heinz Kaiser für die vielen Jahre der vertrauensvollen und erfolgreichen Zusammenarbeit bedanken. Dieser Dank gilt in gleicher Weise allen anderen Mitgliedern der Beschleunigerabteilung.

Richard „Ritchie“ Herr - der langjährige technische Generalmanager des Instituts für Kernphysik - ist eine Ausnahmeerscheinung. Ohne seine Fähigkeiten und seinen Einsatz wäre so manche Messung (nicht nur bei B2!) unterblieben; ohne seinen Humor wäre mancher Rückschlag noch schwerer zu überwinden gewesen. Ihm gehört mein besonderer Dank.

Im Laufe meiner Arbeiten haben ich mit vielen anderen Mitgliedern des Instituts für Kernphysik zusammen gearbeitet, sei es aus den Forschungskollaborationen, den verschiedenen Werkstätten oder der Verwaltung. Ich bin ihnen allen zu Dank verpflichtet, denn immer wieder bin ich zuvorkommend und mit großem Einsatz und Verständnis für meine Probleme unterstützt worden.

Die deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt die hier präsentierten Arbeiten durch Personal- und Sachmittel im Rahmen des SFB 443 „Vielkörperstruktur stark wechselwirkender Systeme“. Die Entwicklung der Photokathoden für MAMI im Rahmen einer Kollaboration mit der Sankt Petersburg Technical University wurde von der europäischen Union innerhalb des INTAS Projektes 99-00125 gefördert.

Meiner Freundin Dorothe Dalheimer danke ich von ganzen Herzen für die unendliche Geduld mit den Grillen, die mich untreiben.

Inhaltsverzeichnis

1. Die Quelle spinpolarisierter Elektronen am MAMI-Beschleuniger	1
1.1. Der MAMI-Beschleunigerkomplex	1
1.2. Die Entwicklung der polarisierten Elektronenquelle	3
1.3. Das Injektionsproblem	4
1.3.1. Anforderungen an die Elektronenoptik	5
1.3.2. Eigenschaften der Elektronenquelle	5
1.3.3. Die kompakte Injektion	6
1.3.4. Spintuning durch Energievariation	10
1.3.5. Verbessertes Spintuning: Der Wienfilter	12
1.3.6. Polarisationsmessung	19
1.3.7. Vermessung der Spinpolarisation durch Mottstreuung	20
1.4. Das Transmissionsproblem	23
1.4.1. Aufbau und Funktionsweise des Chopper/Buncher-Systems	24
1.4.2. Bunchersystem	27
1.4.3. Der Synchrolaser	29
1.4.4. Experimentierbetrieb mit dem Synchro-Laser	40
1.4.5. Experimentelle Untersuchung höchster Bunchladungen	40
1.4.6. Betriebsbedingungen: Ein Resumée	42
1.5. Das Lebensdauerproblem	42
1.5.1. Verfügbarkeit	42
1.5.2. Einwirkung von Molekülen aus der Gasphase	44
1.5.3. Lebensdauerproblematik: Phänomenologischer Ansatz	46
1.5.4. Lebensdauer unter verschiedenen Betriebsbedingungen	47
1.5.5. Transmissionsverluste	53
1.5.6. Schädigungen durch Transmissionsverlust	54
1.5.7. Die Maskentechnik	57
1.5.8. Entwicklung des Qualitätsfaktors	61
1.5.9. Entwicklungspotentiale der Photoquelle	62
1.6. Zusammenfassung	63
2. Depolarisationseffekte bei der Photoemission aus NEA-Photokathoden	65
2.1. Spinpolarisation und Quantenausbeute von Strained-Layer- und Superlattice Kathoden	66
2.2. Depolarisation: Untersuchung durch Kurzzeitspektroskopie	72
2.2.1. Streuprozesse im Leitungsband	72
2.2.2. Experimenteller Aufbau zur Kurzzeitspektroskopie	73

2.2.3.	Apparative und physikalische Begrenzungen	75
2.3.	Impulsantwort als Funktion der Dicke der aktiven Zone	79
2.3.1.	Durchführung des Experiments	79
2.3.2.	Experimentelle Resultate	81
2.3.3.	Analyse der Daten unter der Annahme von Diffusion	83
2.3.4.	Verbesserte Modellierung durch Random-Walk	85
2.3.5.	Berechnung der mittleren Aufenthaltszeit im Halbleiterkristall	91
2.3.6.	Depolarisation im Kristallgitter der Strained-Layer-Kathode	92
2.4.	Spezielle Depolarisationseffekte	95
2.4.1.	Depolarisation bei Strained-Layer-Kathoden	95
2.4.2.	Depolarisation beim Superlattice	97
2.4.3.	Polarisationsoptimiertes Superlattice	99
3.	Strahlsymmetrie unter Helizitätswechsel	102
3.1.	Probleme der Messung extrem kleiner Streuasymmetrien	102
3.1.1.	Spinabhängige Observablen	102
3.1.2.	Eine kurze Beschreibung des A4-Experiments	103
3.1.3.	„Falsche“ Asymmetrien	104
3.2.	Die Rolle der Polarisationsoptik im A4-Experiment	106
3.2.1.	Helizitätsabhängige Experimentsteuerung	106
3.2.2.	Grundtatsachen der helizitätsabhängigen Datenerfassung	108
3.2.3.	Aufbau der Polarisationsoptik	108
3.2.4.	Nicht-ideale Optiken als Erzeuger helizitätskorrelierter Asymmetrien	110
3.3.	Die inhomogene Strain-Relaxation	111
3.3.1.	Physikalischer Hintergrund	111
3.3.2.	Alternative Materialien zu uniaxial deformiertem GaAs	115
3.4.	Stromasymmetrie	116
3.4.1.	Stokes Parameter und Müller Matrizen	116
3.4.2.	Beschreibung nicht-idealer Optik im Stokes/Müller Formalismus	117
3.4.3.	Experimentelles Resultat	120
3.4.4.	Stabilität der Kompensation	121
3.5.	Asymmetrien der Strahlage und Strahlform	123
3.5.1.	Interferenzeffekte	124
3.5.2.	Ortsaufgelöste Messung der Intensitätsasymmetrie	126
3.5.3.	Auswirkungen piezomechanischer Effekte	127
3.6.	Strahlfluktuationen am A4-Experiment	128
3.6.1.	Transformation in Strahlparameter am Target	128
3.6.2.	Stabilisierung von Strahlparametern	130
3.7.	Resultate und Zusammenfassung	134
A.	Erzeugung spinpolarisierter Elektronenstrahlen aus NEA-Photokathoden	139
A.1.	Erzeugung von Spinpolarisation durch Photoabsorption in Halbleitern	139
A.1.1.	Vorbemerkung	139
A.1.2.	Kristallklassen	139

A.1.3. Wellenfunktionen im Halbleiter I: Konsequenzen der Translationsinvarianz	141
A.1.4. Wellenfunktionen im Halbleiter II: Raumgruppensymmetrie und Auswahlregeln	144
A.1.5. Absorptionskoeffizient	148
A.2. Strukturen mit reduzierter Symmetrie	151
A.2.1. Uniaxial deformierte Kathoden	151
A.2.2. Strained-Layer-Kathoden	153
A.2.3. Superlattice Photokathoden	155
A.2.4. Technische Aspekte der Kathodenherstellung	157
A.3. Dotierungseffekte.	160
A.3.1. Einfluss der Dotierung auf Leitfähigkeit und Lage des Fermi-Niveaus	161
A.3.2. Unerwünschte Nebeneffekte der Dotierung	163
A.3.3. Modulationsdotierung	165
A.4. Halbleiterlaser: Ein weiteres Beispiel für Heterostrukturen	166
A.4.1. Details zum Betrieb des MAMI Master Oszillator Lasers	169
A.5. Wechselwirkungen im Leitungsband	170
A.5.1. Phononen-Wechselwirkung	170
A.5.2. Effekt der Dotierung	172
A.5.3. Ladungsträgerlebensdauer im Kristall	172
A.6. Aktivierung von Halbleitern zur negativen Elektronenaffinität	174
A.6.1. Elementares Modell der Herstellung von NEA	174
A.6.2. NEA-Herstellung in der Praxis	177
A.6.3. Weitere physikalische Aspekte von NEA-Oberflächen	179
B. Spezielle elektronenoptische Aspekte der MAMI-Photoquelle	182
B.1. Stromdichteverteilungen, Raumladungseffekte	182
B.1.1. Stromdichteverteilung an der Kathode	182
B.1.2. Oberflächenladungseffekte	184
B.1.3. Raumladungseffekte	186
B.2. Strahltransport	188
B.2.1. Lineare Strahloptik mit Quadrupolen großer Apertur	189
B.2.2. Arbeitsprinzip des Buncher Systems von MAMI	192
B.2.3. Buncher System mit vergrößertem Einfangbereich: „2f-Buncher“	194
C. Lichttransmission durch nicht perfekte Polarisationsoptiken	196
C.1. Eigenschaften von KD*P als elektrooptischer Modulator	196
C.1.1. 'Piezomechanische' Effekte	197
C.2. Der Einfluss optischer Imperfektionen auf den Helizitätswechsel	198
C.2.1. Stokes-Müller-Formalismus	198
C.2.2. Polarisationstransport mit realen optischen Komponenten	199