

Entwicklung eines automatischen Messsystems zur Qualitätskontrolle der Elektrodenmodule für das KATRIN Hauptspektrometer

von

Raphael Jöhren

Diplomarbeit in Physik

angefertigt im

Institut für Kernphysik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Westfälischen Wilhelms-Universität

Münster

im Dezember 2007

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Referent: Prof. Dr. Chr. Weinheimer

Korreferent: PD Dr. K. Reygers

Inhaltsverzeichnis

Motivation	1
Gliederung der Arbeit	3
1 Neutrinophysik	5
1.1 Postulat und Nachweis des Neutrinos	5
1.2 Das Solare Neutrinoproblem	7
1.3 Massive Neutrinos und Neutrinooszillation	11
1.4 Neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall	15
1.5 Kosmologie und Neutrinoastronomie	18
2 Das KATRIN Experiment	23
2.1 Neutrinomassenmessung über den Tritium- β -Zerfall	24
2.2 Funktionsprinzip des MAC-E-Filter	27
2.3 Ergebnisse des Mainzer und Troitsker Experiments	31
2.4 Experimenteller Aufbau des KATRIN Experiments	32
2.4.1 Die Tritiumquelle (WGTS)	33
2.4.2 Transportsektion (DPS2-F und CPS)	34
2.4.3 Vorspektrometer	35
2.4.4 Das Hauptspektrometer	36
2.4.5 Detektor	37
2.5 Untergrund	38

3 Die Drahtelektrode	41
3.1 Aufgaben der Drahtelektrode	42
3.2 Aufbau der Drahtelektrode	45
3.3 Bezeichnungssystem	50
3.4 Anforderungen an Produktion und Qualitätskontrolle	51
4 Aufbau der Qualitätskontrolle	55
4.1 Automatisierung eines 3D-Messtisches	56
4.1.1 Der Stiefelmayer-Messtisch Modell „System C“	56
4.1.2 Verwendete Motoren	61
4.1.3 Encoderelektronik der Messarme	64
4.1.4 Computersteuerung mit LabVIEW	68
4.2 Optische Sensoren	77
4.2.1 Kamera	78
4.2.2 Lasersensor	82
4.3 Genauigkeit der Kammvermessung	85
5 Qualitätskontrolle der Modulkomponenten	89
5.1 Auswertungsmethoden der Messergebnisse	89
5.2 Test verschiedener Schnittverfahren	90
5.3 QA der Muster verschiedener Lieferanten	91
5.4 Ausheizverhalten der Konuskämme und C-Profile	94
5.4.1 Der Vakuumofen	95
5.4.2 Ausheizverhalten der Konuskämme	96
5.4.3 Ausheizverhalten der C-Profile	98
5.5 Genauigkeit der Bohrungen	99
6 Vorbereitungen für die Massenproduktion	105
6.1 Reinraum	105
6.1.1 Das Lüftungssystem	107
6.1.2 Abschätzung der Reinraumklasse	109

6.1.3	Messung der Reinraumklasse	111
6.2	Vorbereitung der Produktion	112
6.2.1	Reinraumtauglichkeit der Messmaschine	113
6.2.2	Planung des Produktionsablaufs	114
6.2.3	Arbeitsstationen	115
6.3	Dokumentation der QA-Ergebnisse	118
7	Zusammenfassung	121
A	Drahtelektrode	123
A.1	Formentabelle der Komponenten der Drahtelektrode	123
B	ODE1 Quadraturdecoder	127
B.1	Schaltpläne OED1 Quadraturdecoder	127
B.2	Zuordnungstabellen	130
C	Datenblätter	133
C.1	Technische Daten der AVT Marlin F080C Kamera	133
D	Diagramme	135
D.1	Ausheiztests der C-Profil Streben	136
D.2	Ausheiztests der Kämme	137
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	147
	Literaturverzeichnis	149
	Danksagung	153

Motivation

Das Neutrino ist, seit es 1930 von Pauli postuliert und 1956 nachgewiesen wurde, Forschungsobjekt mehrerer Bereiche der Physik da seine Eigenschaften Aufschluss über einige zentrale Fragen bspw. der Kosmologie, Astrophysik und der Teilchenphysik geben können. Über die Detektion von Neutrinos können Informationen z.B. über Prozesse in der Sonne gewonnen werden. Supernovae setzen einen Großteil ihrer Energie in Form von Neutrinos frei und in der Neutrinoastronomie werden Neutrinos als Sonden verwendet, über deren Detektion Informationen über astronomische Objekte gewonnen werden können. Im Vordergrund der Untersuchung der Neutrinoeigenschaften steht mittlerweile die Bestimmung der Neutrinomasse. Neutrinos sind nach den Photonen die zweithäufigsten Teilchen im Universum. Neutrinos bilden dadurch abhängig von der Größenordnung ihrer Masse einen signifikanten Teil der sogenannten „Heißen Dunklen Materie“ und beeinflussen, ebenfalls abhängig von ihrer Masse, die Strukturbildung im Universum. Aus den Daten von Neutrino-Oszillationsexperimenten können die Quadrate der Neutrinomassenunterschiede bestimmt werden. Aus Experimenten zum neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfall sollen einerseits Informationen über den eventuellen Majorana-Charakter der Neutrinos erhalten werden und andererseits mit Hilfe von Kernstrukturdaten Rückschlüsse auf die Masse des Elektronneutrinos gezogen werden.

Eine modellunabhängige Methode die absolute Neutrinomasse zu bestimmen wird beim KATRIN¹ Experiment angewendet. Dieses soll die Masse des Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ anhand der Kinematik des Tritium- β -Zerfalls bestimmen, bzw. im schlechtesten Fall die Obergrenze für die Neutrinomasse um eine Größenordnung auf 0,2 eV (90% C.L.) reduzieren. Dazu wird mit Hilfe des weltweit größten nach dem Prinzip des MAC-E-Filters arbeitenden Spektrometers der Endpunkt des Tritium- β -Spektrums vermessen. Die Sensitivität des KATRIN-Experiments wird durch die zu erwartende Untergrundrate wesentlich beeinflusst. Ein großes Problem bei dieser Messung ist der im Hauptspektrometer des Experiments entstehende e^- -Untergrund. Durch kosmische Strahlung und im Material vorhandene radioaktive Isotope werden aus der Tankwand des Spektrometers Elektronen ausgelöst, die ins Innere des Spektrometers gelangen und die Zählrate am Detektor beeinflussen können. Um diese Untergrundelektronen abzuschirmen wird das KATRIN Hauptspektrometer von innen mit einer zweilagigen modularen Drahtelektrode ausgestattet, deren Funktionsprinzip bereits am Spektrometer des Mainzer Neutrinomassen-Experiments

¹Karlsruher Tritium Neutrino Experiment

erfolgreich getestet wurde [Fla04].

Für die Funktionalität der Elektrode ist eine sehr präzise Fertigung der Module und deren Komponenten notwendig. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Teil der Qualitätskontrolle für die Elektrodenmodule des KATRIN Hauptspektrometers entwickelt. Die vorliegende Arbeit befasst sich dabei unter anderem mit der Automatisierung eines 3D-Messtisches der in Verbindung mit einem LabVIEW-gesteuerten Kamerasystem zur Kontrolle der Haltestrukturen der Elektrodenmodule eingesetzt wird. Während der Entwicklung dieses Systems wurden bereits erste Messungen zur Qualitätsüberwachung an den Prototypen und Schnittmustern der Modulkomponenten durchgeführt. Für die Serienproduktion der Module im Reinraum des Instituts für Kernphysik der Universität Münster wurde ein Montageablauf erarbeitet und der Reinraum für die Produktion präpariert.

Gliederung der Arbeit:

- **Kapitel 1** gibt einen Kurzen Überblick über einige der bisherigen Entdeckungen und Experimente auf dem Gebiet der Neutrinophysik.
- In **Kapitel 2** wird das KATRIN Experiment vorgestellt. Dabei wird sowohl der Aufbau und die einzelnen Komponenten des Experiments beschrieben, als auch auf das Prinzip der Messung eingegangen. Zudem wird der β -Zerfall und das Prinzip des MAC-E-Filters als theoretische Grundlagen des KATRIN Experiments erläutert.
- **Kapitel 3** befasst sich mit dem Aufbau der Drahtelektrode des KATRIN Hauptspektrometers. Diese soll den Untergrund des Spektrometers um bis zu einen Faktor 100 reduzieren. Hier wird auf das Prinzip, das der Elektrode zugrunde liegt, eingegangen und die Anforderungen, die an das Material und die Präzision der Fertigung gestellt werden, aufgezeigt.
- In **Kapitel 4** wird der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit behandelt: Die Automatisierung des für die Qualitätskontrolle der Module und Modulkomponenten erworbenen 3D-Messsystems. Die Komponenten des automatisierten Systems werden vorgestellt und das Verfahren zur Qualitätskontrolle der Kämmen der Elektrodenmodule erläutert. Abschließend wird die Messung zur Bestimmung der Genauigkeit der Kammvermessung vorgestellt.
- **Kapitel 5** stellt erste Ergebnisse der Qualitätskontrolle der Messmaschine vor. Zur Überprüfung der Fertigungsgenauigkeit der Modulkomponenten wurden Schnittmuster der Kämmen auf ihre Übereinstimmung mit den CAD-Entwürfen geprüft. Zudem wurde das thermische Verhalten der Kämmen und der Verbindungsstreben (C-Profile) in mehreren Ausheizzyklen untersucht. Eine weitere Messreihe wurde zur Überprüfung der Bohrungspositionen durchgeführt, welche die Positionierungsgenauigkeit der Drähte wesentlich beeinflussen.
- In **Kapitel 6** werden die Vorbereitungen für die Serienproduktion der Elektrodenmodule im Reinraum des Instituts für Kernphysik beschrieben. Dazu wird kurz auf das Konzept des Reinraums und die Bestimmung der Reinraumklasse eingegangen und anschließend die zur Produktion der Elektrodenmodule entworfenen Arbeitsstationen vorgestellt.
- **Kapitel 7** gibt eine kurze Zusammenfassung über die vorliegende Arbeit.
- Im **Anhang** sind zusätzliche Schaltpläne, Graphen und Tabellen zu finden.

Kapitel 1

Neutrinophysik

Die folgende kurze Einführung in die Neutrinophysik soll einen Überblick über die Entwicklung dieses Gebiets geben und darstellen, welche Relevanz die Eigenschaften des Neutrinos für die Weiterentwicklung heutiger Modelle der Kern- und Teilchenphysik, der Kosmologie und Astrophysik haben. Dabei ist die Liste der angesprochenen Experimente und Ergebnisse nicht als vollständig zu betrachten. Sie ist eine persönliche Auswahl des Autors. Ein umfassenderes Bild wird z.B. in [Bah89], [Gru05], [Kla97], [Sch97] und [Zub04] gegeben.

1.1 Postulat und Nachweis des Neutrinos

Im Jahr 1914 fanden James Chadwick und Hans Geiger heraus, dass das β -Spektrum, im Gegensatz zum damals auch schon bekannten α -Spektrum, nicht diskret, sondern kontinuierlich ist. Da man annahm, dass es sich beim β -Zerfall (1.1) um einen Zwei-Körper-Zerfall handelt, schien diese Beobachtung dem Energieerhaltungssatz zu widersprechen.

Wolfgang Pauli postulierte daher 1930 ein drittes, am β -Zerfall beteiligtes, elektrisch ungeladenes Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen, das „Neutron“, das die fehlende Energie in Form von kinetischer Energie aufnimmt [Pau61].

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \tag{1.1}$$

Ein weiterer Grund für Paulis Hypothese war, neben der Rettung des Energieerhaltungssatzes, die Beibehaltung des Drehimpulssatzes und der damit verknüpften quantenmechanischen Spinstatistik. Mutter- und Tochterkern haben beim β -Zerfall beide die gleiche Nukleonenzahl und dadurch genügen sie vor und nach dem Zerfall der gleichen Spin-Statistik¹. Ohne ein weiteres am β -Zerfall beteiligtes Teilchen mit Spin $J = \frac{1}{2}$ kann wegen der Drehimpulserhaltung die Beibehaltung der Spin-Statistik nicht erklärt werden.

¹Bose-Einstein-Statistik, falls gerade Nukleonenzahl und damit ganzzahliger Spin, Fermi-Dirac-Statistik, falls ungerade Nukleonenzahl und halbzahliger Spin.

1933 formulierte Enrico Fermi erstmals eine mathematische Theorie des β -Zerfalls und gab dem von Pauli postulierten Teilchen nun den Namen „Neutrino“ (kleines Ungeladenes), da Chadwick ein Jahr zuvor das heute als Neutron bekannte Teilchen entdeckt hatte.

Erst 1956 wurde das Neutrino von Frederick Reines und Clyde Cowan [Rei56],[Rei59] nachgewiesen. Seit Anfang der 50er Jahre verwendeten sie in ihren Experimenten den Savannah River Kernreaktor als starke Neutrinoquelle. Aufgrund des Neutronenüberschusses sind die Spaltprodukte eines Reaktors β^- -Strahler, sie emittieren nach Gleichung (1.1) Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$. Diese wurden über den inversen β -Zerfall (1.2) nachgewiesen.



Abb. 1.1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau des Experiments von Reines und Cowan. Zwischen zwei Flüssig-Szintillatoren mit Photomultipliern ist ein mit Kadmium-Chlorid in wässriger Lösung gefüllter Behälter platziert. In diesem findet die Reaktion (1.2) an einem Proton der Lösung statt. Die Positronen der Reaktion annihilieren mit den Elektronen in der Lösung über $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ in zwei Photonen der Energie 0,511 MeV.² Diese werden in den Szintillationszählern nachgewiesen. Das Neutron wird nach wenigen μsec von einem Cd-Kern eingefangen, der dadurch in ein höheres Niveau angeregt wird. Durch γ -Emission geht der Cd-Kern wieder in seinen Grundzustand über, wobei die γ -Strahlung ebenfalls von den Szintillatoren detektiert wird. Man detektiert für die Reaktion (1.2) zwei um einige μsec verschobene Signale. Der aus diesem Experiment bestimmte Wirkungsquerschnitt für (1.2) ergab sich zu $\sigma = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2 = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-7} \text{ pb}$ [Rei59]. Dieser sehr kleine Wirkungsquerschnitt lässt sich heute leicht erklären. Da das Neutrino keine elektrische Ladung trägt, wechselwirkt es mit anderer Materie nur über die schwache Wechselwirkung. Die Austauscheteilchen W^\pm, Z^0 der schwachen Wechselwirkung haben mit $m_W = 80,4 \text{ GeV}$ und $m_{Z^0} = 91 \text{ GeV}$ sehr hohe Massen, wodurch nach der Unschärferelation die Reichweite der Wechselwirkung sehr klein ist.

Nach dem Nachweis des Neutrinos, das beim β -Zerfall (1.1) zusammen mit e^\pm entsteht, war bis Ende der 1950er Jahre nicht klar, ob dieses das gleiche Teilchen ist, das z.B. beim Zerfall der geladenen Pionen π^\pm (1.3) zusammen mit μ^\pm erzeugt wird.



Um dies herauszufinden schossen Lederman, Schwartz und Steinberger in ihrem Experiment Protonen auf ein Target und erzeugten so Kaonen und Pionen. Die Kaonen zerfallen im Flug hauptsächlich in Pionen, und diese in Myonen und Neutrinos. Die hadronische Komponente des Strahls wurde durch eine 13,5 m dicke Eisenabschirmung beseitigt. Hinter der Abschirmung lag nur noch ein aus Neutrinos bestehender Strahl vor, so dass ν -N-Streuung beobachtet wurde. Dabei ließen sich nur Endzustände mit Myonen und keine mit Elektronen finden. Die beim Pionenzерfall zusammen mit Myonen entstehenden Neutrinos können in Reaktionen nur wieder Myonen, aber keine Elektronen erzeugen. Damit war

²Wie in der Kern- und Teilchenphysik üblich ist $\hbar = c = 1$ gesetzt. Also $m_e = 511 \text{ keV}$ statt $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

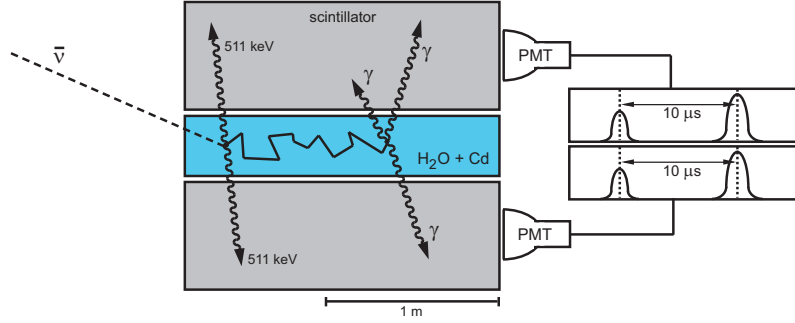


Abb. 1.1: **Schematischer Aufbau des Experiments von Reines und Cowan:** Zwischen zwei Flüssigszintillatoren ist ein mit Kadmium-Chlorid in wässriger Lösung gefüllter Behälter angebracht. In diesem findet die Reaktion (1.2) statt. Die bei der e^-e^+ -Annihilation und beim Neutron-Zerfall entstehenden γ s werden im Flüssigszintillator mit Photomultipliern nachgewiesen.

nachgewiesen, dass es ν_e gibt, die zu den Elektronen gehören, und ν_μ , die zu den Myonen gehören. 1975 wurde ein weiteres elektronartiges Teilchen entdeckt, das Tauon τ . Das mit dem Tauon assoziierte Tau-Neutrino ν_τ konnte erst im Jahr 2000 am DONUT-Experiment nachgewiesen werden. Diese Teilchen sind heute im Standardmodell der Elementarteilchenphysik in der Familienstruktur der Leptonen zusammengefasst. Jeder dieser Familien ist eine Quantenzahl L_i mit $i = e, \mu, \tau$ zugeordnet, die „Leptonenzahl“ genannt wird. Im Standardmodell gilt sowohl L_i als auch $L = \sum_{i=e,\mu,\tau} L_i$ als Erhaltungsgrößen. Neutrinooszillationen verletzen jedoch L_i und ein möglicher neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall sogar L_i und L (s. Kap. 1.3 u. 1.4). Durch eine Analyse der Zerfallsbreite des Z^0 -Bosons konnte die Anzahl von Neutrinoarten mit $m_\nu < \frac{m_{Z^0}}{2}$ zu $N_\nu = 2,984 \pm 0,008$ bestimmt werden [PDG04].

1.2 Das Solare Neutrino problem

Das Standard-Sonnenmodell (SSM), welches von J.N. Bahcall et al. entwickelt wurde, nimmt für den Mechanismus der Energieerzeugung in der Sonne die thermonukleare Fusion von Wasserstoff zu Helium an. Dies geschieht über einen mehrstufigen Prozess, der sich zusammenfassen lässt zu:



Von den freiwerdenden 26,73 MeV entfallen im Mittel $2\langle E_\nu \rangle = 0,59 \text{ MeV}$ auf die beiden ν_e . Es stehen demnach noch 26,14 MeV als „thermische Energie“, z.B. als Photonen, zur Verfügung, pro erzeugtem ν_e etwa 13 MeV. Damit lässt sich mit Hilfe der Solarkonstante $S = 8,5 \cdot 10^{11} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ der auf die Erde treffende solare ν_e -Fluss abschätzen zu [Sch97]:

$$\phi_\nu = \frac{S}{13 \text{ MeV}} = 6,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}. \quad (1.5)$$

Um das SSM und das darin enthaltene Modell der Energieerzeugung in der Sonne zu testen, begannen Ray Davis und seine Kollegen 1967 mit ihrem Experiment in der Homestake Mine in South Dakota (USA) in 1480 m Tiefe [Bah76]. In diesem Experiment wurden solare ν_e über die Reaktion



nachgewiesen, um die Vorhersagen des SSM bezüglich des ν_e -Flusses von der Sonne zu testen. Die Reaktion (1.6) hat eine Schwellenenergie von $E_S = 814$ keV. Der durch Gleichung (1.4) zusammengefasste mehrstufige Fusionsprozess in der Sonne wird auch *pp*-Zyklus genannt. Dieser Zyklus hat mehrere Nebenarme, in denen ν_e entstehen, die eine genügend hohe Energie besitzen, um die in Gleichung (1.6) dargestellte Reaktion zu ermöglichen. Für das Homestake-Experiment ist hauptsächlich ein Nebenarm des *pp*-Zyklus von Interesse, in dem ${}^8\text{B}$ entsteht. Die beim β -Zerfall des ${}^8\text{B}$ emittierten ν_e bilden den größten Teil des Neutrinoflusses von der Sonne im für die Reaktion (1.6) relevanten Energiebereich (s. Abb. 1.3).

Der Detektor des Experiments bestand aus 380 m^3 (615 t) Perchloräthylen (C_2Cl_4) in einem zylindrischen Tank. Die durch die Reaktion in Gleichung (1.6) im Tank entstandenen ${}^{37}\text{Ar}$ -Atome wurden mit Hilfe von Helium-Gas zu ca. 95% aus dem Tank ausgespült. Über die Zerfälle des extrahierten ${}^{37}\text{Ar}$ in einem Proportionalzähler wurde die Anzahl der ${}^{37}\text{Ar}$ -Kerne bestimmt, die der Anzahl der ν_e -Einfänge entspricht. In 108 Messläufen von 1970 bis 1994 ergab sich nach Abzug des Untergrundes ein Mittelwert der ν_e -Einfangrate R , angegeben in Einheiten von SNU^3 , von:

$$R_{exp} = (2,56 \pm 0,22) \text{ SNU}, \quad (1.7)$$

was $(0,482 \pm 0,042)$ ${}^{37}\text{Ar}$ -Atomen pro Tag entspricht. Das SSM hingegen sagt eine dreifach höhere Rate von etwa einem ${}^{37}\text{Ar}$ -Atom pro Tag vorher, was in SNU angegeben einer ν_e -Einfangrate von

$$R_{SSM, {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar}} = (8,0 \pm 3,0) \text{ SNU} \quad (3\sigma) \quad (1.8)$$

entspricht [Bah89]. Der ν_e -Fluss von der Sonne bestätigte die Hypothese der Energieerzeugung durch Kernfusion. Das Defizit gegenüber der Vorhersage des SSM bedurfte jedoch einer Erklärung. Weitere Experimente, wie GALLEX⁴ und SAGE⁵, bei denen die Neutrinos über die Reaktion



eingefangen und über einen Elektroneneinfang des ${}^{71}\text{Ge}$ über die Reaktion



³Solar Neutrino Unit, $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$ ν_e -Einfänge pro Sekunde pro Targetkern = ein ν_e -Einfang pro Sekunde pro 10^{36} Targetkerne [Sch97].

⁴Gallium Experiment

⁵Soviet-American Gallium Experiment

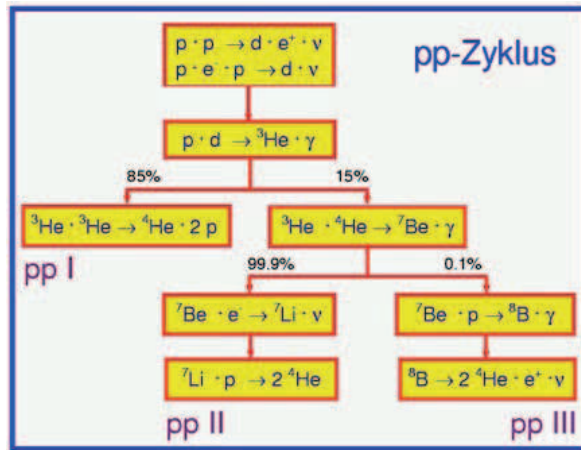


Abb. 1.2: Der pp -Zyklus. Der ${}^8\text{B}$ Nebenarm, dessen Neutrinos von R. Davis nachgewiesen wurden, macht nur 0,1% der pp -Kette aus. [Sch97]

nachgewiesen wurden, fanden ebenfalls ein Defizit an solaren Neutrinos gegenüber den vom SSM vorhergesagten Werten. Die Schwellenenergie dieser beiden Experimente lag bei $E_S \approx 0,2 \text{ MeV}$, so dass auch der größere Fluss der pp -Neutrinos detektiert werden konnte (s. Abb. 1.3). Die Mittelwerte der Erzeugungsraten $R_{exp,GALLEX}$ und $R_{exp,SAGE}$ stimmten im Rahmen der Fehler bei beiden Experimenten überein:

$$R_{exp,GALLEX} = \left(69, 7^{+7,8}_{-9,1}\right) \text{ SNU} \quad (1\sigma) \quad [\text{Ham96}] \quad (1.11)$$

$$R_{exp,SAGE} = \left(74^{+13+5}_{-12-7}\right) \text{ SNU} \quad (1\sigma) \quad [\text{Abd95}] \quad (1.12)$$

In (1.12) ist der erste Fehler statistisch und der zweite systematisch. Nach dem SSM ist jedoch eine Rate von

$$R_{SSM, {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge}} = \left(132^{+21}_{-17}\right) \text{ SNU} \quad (3\sigma) \quad (1.13)$$

zu erwarten.

Dieses in mehreren Experimenten gemessene Defizit an ν_e gegenüber der Theorie des SSM wird auch als „Problem der solaren Neutrinos“ (SNP) bezeichnet. Für dieses Problem wurden vielfältige Lösungen vorgeschlagen und diskutiert, die sich im wesentlichen in zwei Kategorien einteilen lassen [Sch97]:

- Astrophysikalische Effekte, wie z.B. Turbulenzen, Rotation des Sonnenkerns, Magnetfelder, kollektive Plasmaeffekte, u.ä., die das SSM nicht berücksichtigt, könnten den Neutrinofluss erniedrigen.
- Eigenschaften der Neutrinos, wie z.B. Neutrino-Oszillation im Vakuum oder in der Sonnenmaterie, $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$ Oszillation, ein magnetisches Moment des Neutrinos u.ä., wurden diskutiert.

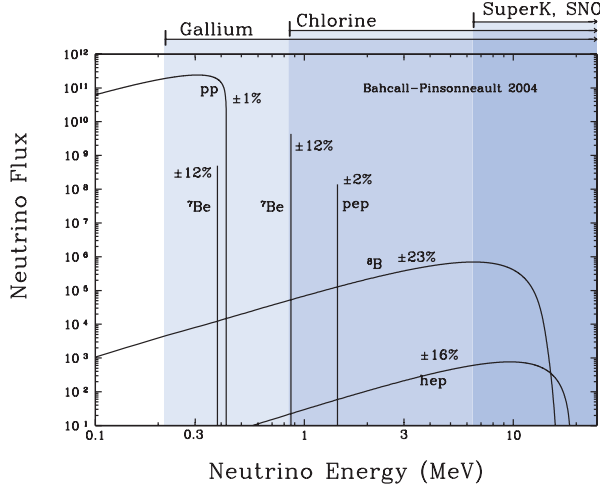


Abb. 1.3: **Spektrum der solaren Neutrinos.** Mit dem Chlor-Experiment von R. Davis konnten nur Neutrinos mit $E_\nu > 0,8$ MeV nachgewiesen werden. Die Nachweisschwelle der Gallium-Experimente lag dagegen bei $E_\nu > 0,2$ MeV, wodurch auch die pp -Neutrinos detektiert werden konnten. [Thu07]

Den endgültigen Aufschluss über das SNP brachte das 1999 in einer alten 2300 m tiefen Nickelmine in der Nähe von Sudbury, Ontario, Kanada in Betrieb genommene „Sudbury Neutrino Observatory (SNO)“. Das Experiment besteht aus einem kugelförmigen, mit 1000 t D_2O (schweres Wasser) gefülltem Tank aus Acrylglas. Um diesen Tank ist eine Edelstahlsphäre angebracht, deren Innenseite mit 9456 Photomultipliern bestückt ist. Die Sphäre und der Acrylglastank sind in ein mit 7000 t Wasser gefülltes Becken eingelassen, was den Detektortank gegen Radioaktivität aus den Felswänden und den Photomultipliern abschirmt. Der Detektor ist sensitiv auf alle drei Neutrino-Flavour ν_e, ν_μ, ν_τ , die über folgende Reaktionen nachgewiesen werden:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad (\text{CC, charged current}) \quad \phi_{CC} = \phi_e \quad (1.14)$$

$$\nu + d \rightarrow p + n + \nu \quad (\text{NC, neutral current}) \quad \phi_{NC} = \phi_e + \phi_{\mu\tau} \quad (1.15)$$

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^- \quad (\text{ES, elastic scattering}) \quad \phi_{ES} = \phi_e + 0,16\phi_{\mu\tau}. \quad (1.16)$$

Der Nachweis geschieht im Fall der CC- und ES-Reaktionen über Cherenkovstrahlung.

Über die Reaktionen der Gleichungen (1.15) und (1.16) können auch ν_μ und ν_τ detektiert werden. Dadurch lässt sich nachweisen, dass zwar wie beim Homestake-Experiment und bei GALLEX und SAGE der Fluss der Elektroneneutrinos ϕ_e geringer ausfällt, als nach dem SSM zu erwarten ist, gleichzeitig aber ein Fluss $\phi_{\mu\tau}$ von Myon- und Tauneutrinos auftritt. Dieser ist nach dem Standard-Sonnenmodell nicht zu erwarten, da in den Fusionsprozessen in der Sonne nur ν_e erzeugt werden. Der gesamte vom SNO-Experiment gemessene Neutrino-Fluss

$$\phi_{\nu, sB}^{\text{SNO}} = \phi_e + \phi_{\mu\tau} = 5,21 \pm 0,27(\text{stat}) \pm 0,38(\text{syst.}) \times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \quad [\text{Ahm02}] \quad (1.17)$$

stimmte hingegen sehr gut mit dem vom SSM vorhergesagten Fluss von

$$\phi_{\nu, sB}^{\text{SSM}} = 5,05^{+1,01}_{-0,81} \times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (1.18)$$

überein. Da Neutrino-Oszillationen diskutiert wurden, lag die Vermutung nahe, dass ein Teil der in der Sonne erzeugten ν_e sich bereits in der Sonne oder auf dem Weg zur Erde in ν_μ und ν_τ umwandeln. Abb. 1.4 zeigt die Ergebnisse des SNO-Experiments. Neutrino-Oszillation scheint somit das Problem der solaren Neutrinos zu lösen.

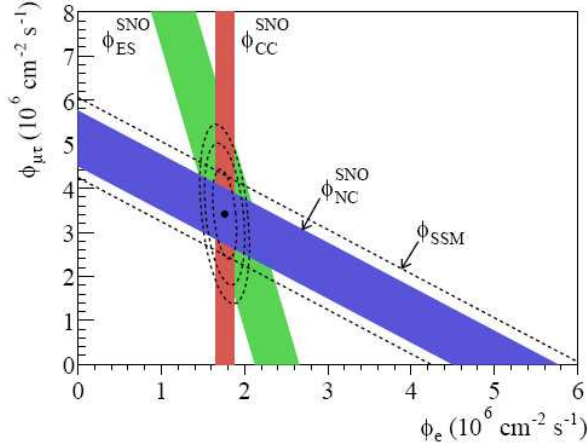


Abb. 1.4: **Resultate des SNO-Experiments.** Der vom SNO-Experiment gemessene totale ${}^8\text{B}$ -Neutrinofluss (Diagonale) stimmt sehr gut mit der Vorhersage des SSM überein. Der Fluss ϕ_{CC}^{SNO} der Elektroneneutrinos ergibt in Übereinstimmung mit dem Homestake-Experiment nur etwa 1/3 des Gesamtflusses. [Ahm02]

1.3 Massive Neutrinos und Neutrinooszillation

Die heute anerkannte Erklärung des SNP über Neutrino-Oszillationen warf vor allem die Frage auf, ob das Neutrino entgegen der Annahme der Standardmodells der Teilchenphysik eine von Null verschiedene Masse besitzt.

Wie C.S. Wu et al. 1957 in einem Experiment entdeckten, ist die Parität in der schwachen Wechselwirkung maximal verletzt. Wu und ihre Kollegen beobachteten den β -Zerfall von ${}^{60}\text{Co}$ -Kernen, die in einem Magnetfeld ausgerichtet waren. Die Winkelverteilung der Zerfallselektronen bezüglich des Kernspins von ${}^{60}\text{Co}$ und damit auch der Endzustand waren nicht, wie angenommen, symmetrisch. Daraus wurde gefolgert, dass an der schwachen Wechselwirkung nur linkshändige⁶Leptonen und rechtshändige Antileptonen teilnehmen. In der V-A Theorie der schwachen Wechselwirkung macht sich dies in den Vertexfaktoren bemerkbar, in denen die Projektion auf den linkshändigen Teil der Leptonen-Wellenfunktion, bzw. auf den rechtshändigen Teil der Antileptonen-Wellenfunktion steckt.

⁶Teilchen mit *Chiralität (Händigkeit)* -1 werden „linkshändig“ genannt. Bei „rechtshändigen“ Teilchen ist die Chiralität +1. Als Chiralität werden die Eigenwerte ± 1 zum Chiralitätsoperator γ_5 bezeichnet, welcher über die Händigkeitsprojektoren $P_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)$ und $P_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)$ die linkshändige (ψ_L), bzw. rechtshändige Komponente (ψ_R) aus einem Dirac-Spinor ψ herausprojiziert. Die *Helizität* ist eine Quantenzahl, die den Spin und den Impuls eines Teilchens in Beziehung setzt und dadurch den Drehsinn eines Partikels definiert. Es gilt: $H = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| \cdot |\vec{p}|}$. Sind Impuls \vec{p} und Spin \vec{s} antiparallel ausgerichtet, ergibt sich die Helizität -1, bei paralleler Ausrichtung +1. Im Fall masseloser Teilchen sind Chiralität und Helizität gleich.

Die Ergebnisse des Wu-Experiments scheinen auf masselose Neutrinos hinzudeuten. Auch im Standardmodell der Teilchenphysik sind Neutrinos masselos. Die Dirac-Massenterme \mathcal{L}_D des Standardmodells setzen links- und rechtshändige Wellenfunktionen ψ_L und ψ_R voraus:

$$\mathcal{L}_D = -m\psi\bar{\psi} = -m(\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L). \quad (1.19)$$

Goldhaber und seine Kollegen konnten 1958 zeigen, dass Neutrinos immer linkshändig und Antineutrinos immer rechtshändig vorkommen und demnach keine für eine nach Gleichung (1.19) notwendigen rechthändigen Neutrinoströme, bzw. linkshändigen Anti-Neutrinoströme existieren [Gol58].

Die mathematische Beschreibung der Neutrino-Oszillation zeigt jedoch, dass Flavour-Oszillationen nur bei massiven Neutrinos stattfinden können. Der Nachweis von Neutrinos geschieht in Experimenten grundsätzlich über die schwache Wechselwirkung. Die Neutrinos werden demnach in Flavoureigenzuständen ν_e, ν_μ, ν_τ der schwachen Wechselwirkung gemessen, die nicht mit den Masseneigenzuständen ν_1, ν_2, ν_3 übereinstimmen. Die Flavoureigenzustände bilden eine Orthonormalbasis des Flavourraums, die Masseneigenzustände eine Orthonormalbasis des Massenraums. Diese Basen können über eine unitäre Drehmatrix $U_{\alpha i}$ (auch Mischungsmatrix genannt) ineinander überführt werden. Ein Flavoureigenzustand ν_α ist demnach als Überlagerung aus den Masseigenzuständen ν_i zu verstehen:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle. \quad (1.20)$$

Dabei entwickeln sich die Masseneigenzustände $|\nu_i\rangle$ im Vakuum mit der Zeitabhängigkeit

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle, \quad (1.21)$$

wobei

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.22)$$

ist. Sind nicht alle m_i gleich, so führt dies zu einer unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung der Masseneigenzustände $|\nu_\alpha\rangle$, die sich in einer Phasenverschiebung zwischen den $|\nu_\alpha\rangle$ äußert. Nach Gleichung (1.20) wird so ein anfänglich reiner Flavoureigenzustand zu einer Mischung verschiedener Flavour. Im einfachen Fall einer Zwei-Neutrino Oszillation im Vakuum ist die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang von Flavour α zum Flavour β , wobei die Masseneigenzustände mit i und j gekennzeichnet sind, gegeben durch [Sch97]:

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2(2\theta_{ij}) \cdot \left(1, 27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] \cdot \frac{L[\text{km}]}{E_\nu[\text{GeV}]} \right). \quad (1.23)$$

Dabei ist θ_{ij} der Mischungswinkel der Flavour, $\Delta m_{ij}^2 = |m_i^2 - m_j^2|$ die Differenz der Massenquadrate der Masseneigenzustände und L die vom Neutrino zurückgelegte Weglänge. Mehrere Experimente wie z.B. Super-Kamiokande, KamLAND, K2K haben nach Neutrino-Oszillationen bei atmosphärischen (Super-K.) bzw. Reaktor-neutrinos (KamLAND, K2K) gesucht und sie nachgewiesen.

Noch bevor mit dem SNO-Experiment die Oszillation solarer Neutrinos bestätigt wurde, hatte das **Super-Kamiokande** Experiment die Oszillation atmosphärischer Neutrinos nachgewiesen. Der Super-Kamiokande Detektor befindet sich in ca. 1 km Tiefe in der Kamioka Mine in Japan. Er besteht aus einem zylindrischen Tank mit einem Durchmesser von ca. 40 m und einer Höhe von ca. 41 m, der insgesamt mit 50.000 m³ reinem Wasser gefüllt ist. Der Tank ist in zwei Bereiche unterteilt: Der äußere mit 18.000 t reinem Wasser gefüllte Bereich dient wie beim SNO-Experiment (s. vorheriges Kap.) der Abschirmung des inneren Bereichs gegen Radioaktivität im Gestein. Die Wände des inneren Bereichs, der mit 32.000 t reinem Wasser gefüllt ist, sind mit 11.200 Photomultipliern ausgestattet. Der Detektor sollte primär Myonen aus $\nu_\mu N$ -Ereignissen atmosphärischer Neutrinos über die Reaktionen

$$\nu_e + N_1 \rightarrow N_2 + e^- \quad (\text{CC}) \quad (1.24)$$

$$\nu_\mu + N_1 \rightarrow N_2 + \mu^- \quad (\text{CC}) \quad (1.25)$$

messen. Die entstehenden e^- und μ^- bewegen sich im Wasser mit Überlichtgeschwindigkeit und erzeugen so einen Cherenkov-Lichtkegel, über dessen Photomultiplier-Signatur sich die Art und die Richtung des verursachenden Teilchens rekonstruieren lässt. Atmosphärische Neutrinos entstehen in Teilenschauern in der Atmosphäre, die durch Kollisionen von Protonen der kosmischen Strahlung⁷ mit Stickstoff- oder Sauerstoffteilchen in der oberen Atmosphäre (in ca. 10-20 km Höhe) ausgelöst werden. Dabei entstehen hauptsächlich geladene Pionen π^\pm und Kaonen K^\pm , die über

$$\begin{aligned} \pi^+, K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ &\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^-, K^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ &\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \end{aligned}$$

in e^\pm und Neutrinos zerfallen. Dabei entstehen Myon- und Elektronneutrinos im Verhältnis $R = \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \approx 2$. Statt dieses Verhältnisses fand Super-Kamiokande ein zenitwinkelabhängiges Defizit von ν_μ und $\bar{\nu}_\mu$. Die Ergebnisse des Experiments sind in Abb. 1.5 zu sehen. $\cos\theta = 1$ entspricht den atmosphärischen Neutrinos, die von oben in den Detektor gelangt sind und nach ihrer Entstehung ca. 15 km zurückgelegt haben. Die Ereignisse unter $\cos\theta = -1$ wurden von Neutrinos ausgelöst, die von unten auf den Detektor getroffen sind und somit ca. 13.000 km durch die Erde zurückgelegt haben. Die Zählraten sind für von unten kommende Myon-Neutrinos deutlich niedriger als aufgrund von Monte-Carlo Simulationen (durchgezogene Linien in Abb. 1.5) zu erwarten ist. Die Messergebnisse für Elektron-Neutrinos hingegen verlaufen wie erwartet. Daher müssen sich die fehlenden $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ auf dem Weg durch die Erde in $\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$ umgewandelt haben. Aus den vom Super-Kamiokande Experiment gewonnenen Daten lässt sich die Energie der Neutrinos bestimmen, woraus sich mit Kenntnis der ungefähr zurückgelegten Weglänge des Neutrinos über Gleichung (1.23) die Differenz der Massenquadrate der und der Mischungswinkel

⁷Die kosmische Strahlung besteht zu 87% aus Protonen, 12% Alpha-Teilchen und 1% schweren Atomkernen. Einen geringen Anteil stellen Elektronen, Neutrinos und Gammastrahlung dar.

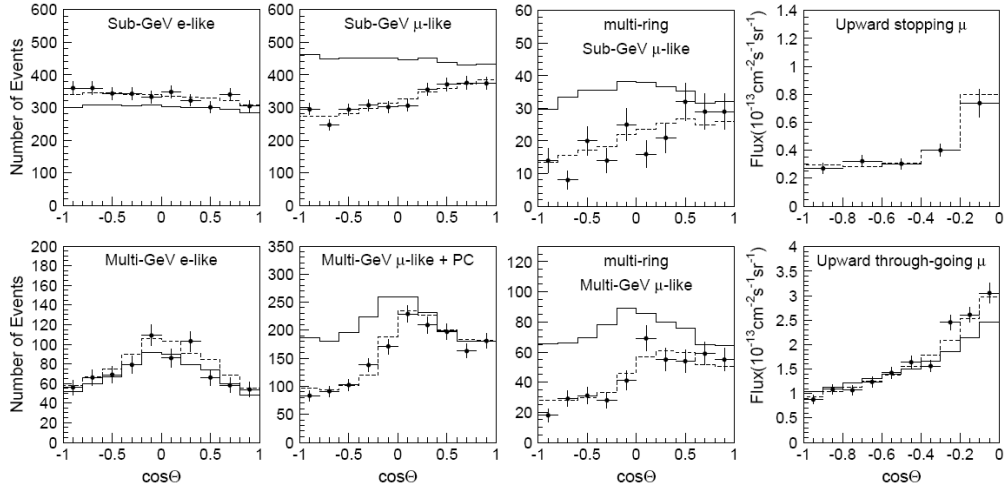


Abb. 1.5: **Ergebnisse des Super-Kamiokande Experiments:** Anzahl der Ereignisse in Abhängigkeit vom Zenitwinkel. Die Punkte geben die Messergebnisse an, während die durchgezogene Linie die Vorhersagen einer Monte-Carlo Simulation ohne Neutrino-Oszillation darstellen. Die gestrichelte Linie gibt den besten Fit an die Daten unter der Annahme von $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ -Oszillation an. [Ish04]

der beiden beteiligten Flavour bestimmen [Ash04]:

$$1,9 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 < \Delta m_{atm}^2 < 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad 90\% \text{ C.L.} \quad (1.26)$$

$$\sin^2(2\theta_{atm}) > 0,9 \quad 90\% \text{ C.L.} \quad (1.27)$$

KamLAND⁸ untersuchte im Jahr 2002 das Verschwinden von $\bar{\nu}_e$ -Reaktor-neutrinos, die von Reaktoren im Umkreis von 180 km um den Detektor emittiert wurden. Da die Energie der Reaktor-neutrinos in der selben Größenordnung wie die der solaren Neutrinos liegt, sollte KamLAND die Annahme verifizieren, dass materieverstärkter Neutrinooszillationen (MSW-Effekt⁹) und nicht Vakuumoszillation für das solare ν_e -Defizit verantwortlich ist. Eine Analyse der Daten des Experiments zusammen mit den Daten anderer Experimente mit solaren Neutrinos im Jahr 2004 ergab für Δm^2 mit der Annahme einer Zwei-Neutrino-Oszillation $\Delta m^2 = 7,9_{-0,5}^{+0,6} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ und $\tan^2 \theta = 0,40_{-0,07}^{+0,10}$ [Ara04]. Mit KamLAND kann die Hypothese der Vakuumoszillation, hervorgerufen durch Messunterschiede Δm_{ij}^2 , als bestätigt angesehen werden, da aufgrund der geringen Distanz zwischen Quelle und Detektor alle anderen Erklärungsversuche auszuschließen sind. Zudem wurde der MSW-Effekt als Ursache des Defizits solarer ν_e bestätigt.

Der MSW-Effekt (benannt nach Mikheyev, Smirnov und Wolfenstein) ist ein Resonanzeffekt in Materie, durch den die Wahrscheinlichkeiten für Flavourübergänge beträchtlich

⁸Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector

⁹s. z.B. [Sch97].

verstärkt werden. Dieser Effekt kommt durch die Wechselwirkung der Neutrinos mit den e^- der Sonnenmaterie zustande, der zu einer kohärenten Vorwärtsstreuung der Neutrinos führt. Dabei kann die Wechselwirkung mit den e^- im Fall der ν_μ, ν_τ nur über den Austausch von Z^0 -Bosonen stattfinden, während diese beim ν_e auch über W^+ -Austausch laufen kann. Dies führt zu einer unterschiedlichen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit für ν_e und ν_μ, ν_τ , die als unterschiedlicher Brechungsindex aufgefasst werden kann. So kommt es zu einer auf der Flugstrecke wachsenden Phasenverschiebung zwischen dem Flavourzustand ν_e und den Zuständen ν_μ, ν_τ , die von der lokalen Elektronendichte abhängt und die Oszillation zusätzlich beeinflusst. Da die Elektronendichte innerhalb der Sonne nicht konstant ist, kann es auf dem Weg vom Sonneninneren mit der Elektronendichte $N_{e,max}$ beim Durchqueren einer Schicht mit der kritischen Elektronendichte $N_{e,c}$ (mit $0 < N_{e,c} < N_{e,max}$) sogar zu einer resonanten Umwandlung von ν_e nach ν_μ, ν_τ kommen.

Das letzte der oben genannten Experimente ist das **K2K**¹⁰-Experiment. Dieses beobachtete ein energieabhängiges Verschwinden von Myon-Neutrinos eines Myon-Neutrino-Strahls, der vom KEK-Beschleuniger über eine Distanz von 250 km auf den Super-Kamiokande Detektor gerichtet wurde. Die ν_{mu} hatten eine Energie von 1,3 GeV, so dass das K2K-Experiment auf die $\frac{L}{E}$ -Region der atmosphärischen Neutrinos sensitiv war. Aus den K2K Messungen konnte Δm^2 zu $1,9 \cot 10^{-3} \text{ eV}^2 < \Delta m^2 < 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ bei einem Mischungswinkel von $\sin^2(2\theta) = 1,0$ mit 90% C.L. bestimmt werden [Ahn06].

1.4 Neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall

Schon früh stellte sich die Frage, ob das Neutrino, da es keine ladungsartigen Eigenschaften wie elektrische Ladung oder ein elektrisches bzw. magnetisches Moment hat, sein eigenes Antiteilchen ist. Eine Möglichkeit diese Frage zu klären ist die Suche nach einem möglichen neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfall ($0\nu\beta\beta$)

$$B(A, Z) \rightarrow C(A, Z + 2) + 2e^-, \quad (1.28)$$

bei dem gleichzeitig zwei Neutronen eines Kerns in zwei Protonen zerfallen und dabei zwei Elektronen emittiert werden. Im Gegensatz zum normalen Doppel-Beta-Zerfall¹¹ ($2\nu\beta\beta$), bei dem zusätzlich zwei Neutrinos freigesetzt werden, wird beim $0\nu\beta\beta$ das an einem der beiden Vertices entstandene Neutrino am anderen als Anti-Neutrino absorbiert. Dieser Zerfall kann nur dann auftreten, wenn das Neutrino ein Majorana-Teilchen ist, d.h. Teilchen und Antiteilchen identisch sind, zudem verletzt der $0\nu\beta\beta$ -Zerfall die Lep-

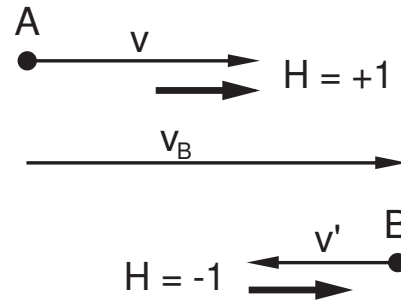


Abb. 1.6: Die Helizität eines Teilchens mit Masse hängt vom Bezugssystem ab (lange Pfeile: Flugrichtungen, dicke Pfeile: Spineinstellungen). [Sch97]

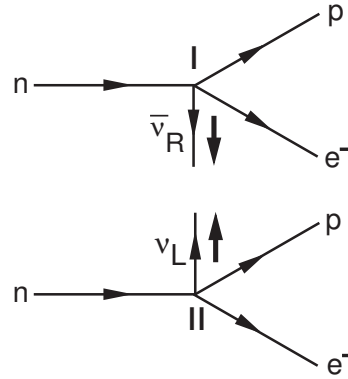


Abb. 1.7: **Neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall.** An Vertex I wird ein $\bar{\nu}_e$ emittiert, das an Vertex II als ν_e absorbiert wird.

tonenzahl um $\Delta L = 2$. Neben der Frage nach der Majorana-Natur des Neutrinos kann über den neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfall auch die absolute Neutrinomasse bestimmt werden, da für diesen Prozess eine rechtshändige Komponente des schwachen leptonischen Stroms existieren muss. Am oberen Vertex I in Abb. 1.7 wird ein rechtshändiges $\bar{\nu}_e$ emittiert, welches am unteren Vertex II nur als linkshändiges ν_e absorbiert werden kann. Auch wenn $\bar{\nu}_e = \nu_e$ ist, kann eine Helizitätsumkehr, wie sie im Fall des $0\nu\beta\beta$ notwendig ist, nur dann auftreten, wenn das Neutrino eine von Null verschiedene Masse hat. Nur für $m_\nu \neq 0$ lässt sich aufgrund von $v_\nu < c$ ein Bezugssystem B finden, das sich mit $v_B > v_\nu$ bewegt und in dem das Neutrino die umgekehrte Helizität hat (s. Abb. 1.6). Massebehaftete links- oder rechtshändige Teilchen haben daher mit einer Wahrscheinlichkeit von $W = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v}{c}\right)$ eine umgekehrte Helizität. Für das Neutrino gilt $W \approx \left(\frac{m_\nu}{2E_\nu}\right)^2$ [Sch97]. Massive Neutrinos haben demnach keine reine Helizität.

Der Doppel-Beta-Zerfall kann insbesondere bei β -stabilen Kernen stattfinden, falls:

1. Der Grundzustand des nächstgelegenen Tochterkerns ($A, Z+1$) höher liegt (d.h. eine größere Masse hat) als der Grundzustand des Mutterkerns (A, Z), so dass ein einfacher β -Zerfall energetisch nicht möglich ist.
2. Der Grundzustand oder ein angeregter Zustand des übernächsten Tochterkerns ($A, Z+2$) energetisch niedriger liegt als der Grundzustand des Mutterkerns.

Abb. 1.8 (b) verdeutlicht diese beiden Voraussetzungen, die dann vorliegen können, falls der Mutterkern ein gg-Kern¹², der Tochterkern ein uu-Kern und der übernächste Tochterkern wieder ein gg-Kern ist. In diesem Fall spaltet sich die Massenparabel aufgrund

¹⁰KEK to Kamioka

¹¹Der $2\nu\beta\beta$ wurde erstmals 1987 beobachtet [Ell87].

¹²Ein gg-Kern ist ein Kern mit gerader Neutronen- und Protonenzahl, dementsprechend hat ein uu-Kern eine ungerade Neutronen- und Protonenzahl. ug bzw. gu-Kerne haben eine ungerade bzw. gerade Neutronen- und eine gerade bzw. ungerade Protonenzahl.

des Paarungstermes in der Bethe-Weizsäcker-Formel in eine Parabel für gerade und eine für ungerade Kernladungszahl Z auf. Bei ug - und gu -Kernen ist dies nicht der Fall (s. Abb. 1.8 (a)). $0\nu\beta\beta$ -Experimente sind auf die effektive Neutrinomasse m_{ee} sensi-

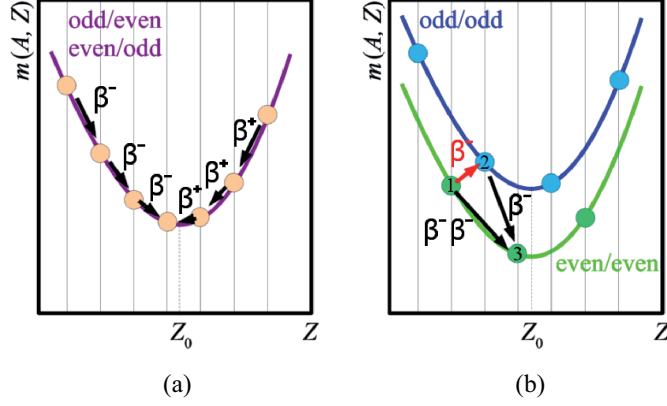


Abb. 1.8: **Massenparabel.** (a) Für ug - und gu -Kerne spaltet die Massenparabel nicht auf. Es können nur einfache β -Zerfälle zum stabilsten Zustand (= Scheitelpunkt der Parabel) auftreten. (b) In Fall von gg - oder uu -Kernen spaltet die Massenparabel auf, der nächstgelegene Zustand (2) liegt energetisch höher als (1), ein Zerfall ist daher nicht erlaubt. Erst der übernächste Zustand (3) liegt energetisch niedriger. Dieser kann über zwei gleichzeitig stattfindende β -Zerfälle erreicht werden. [Wik3]

tiv, die auch „Majorana-Masse“ genannt wird. Diese ergibt sich aus einer Summe der über die Mischungsmatrix U_{ei} zur Masse des Elektronneutrinos ν_e beitragenden Neutrino-Masseneigenzustände $|\nu_i\rangle$ mit den Eigenwerten m_{ν_i} :

$$m_{ee} = \left| \sum_i U_{ei} \cdot m_{\nu_i} \right|. \quad (1.29)$$

Die Heidelberg-Moskau Kollaboration hat in den Jahren von 1990 bis 2003 mit Detektoren aus 11 kg angereichertem ^{76}Ge nach einem $0\nu\beta\beta$ -Zerfall gesucht. Ein Teil der Kollaboration fand in der Analyse der Messergebnisse eine erhöhte Zählrate an der Position, an welcher die Linie des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls erwartet wird. Die Signifikanz beträgt $4,2\sigma$. Der 3σ Bereich der gefundenen effektiven Neutrinomasse wird mit $0,24 \text{ eV} < m_{ee} < 0,58 \text{ eV}$ angegeben [Kla04]. Dieses Ergebnis ist umstritten, da in der Umgebung der gefundenen Linie weitere nicht verstandene Zählraten, die sich vom Untergrund abheben, auftreten. Zudem ist die Bestimmung der Neutrinomasse über den $0\nu\beta\beta$ -Zerfall vom Kernmatrixelement abhängig, das nicht bekannt ist und je nach zugrundegelegtem Modell variiert. Nur weitere Experimente können hier Gewissheit bringen.

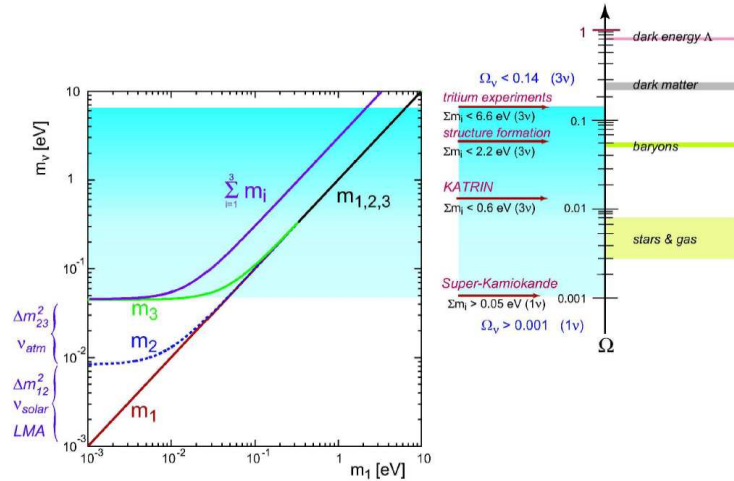


Abb. 1.9: **Beitrag der Neutrinos zu Ω .** Links ist die Masse der einzelnen Neutrinos in Abhängigkeit der Masse des leichtesten Masseeigenzustands m_1 dargestellt. Je nach Wert von m_1 spaltet sich das Massenspektrum durch die Differenzen der Masseneigenzustände Δm_{12}^2 und Δm_{23}^2 auf, oder ist degeneriert. Rechts ist der Beitrag der Neutrinos zu Ω dargestellt. Dabei hängt dieser Beitrag von der absoluten Neutrinomasse ab und liegt daher unter Berücksichtigung der aktuellen Grenzen bei $0,001 < \Omega_\nu < 0,14$. [KDR04]

1.5 Kosmologie und Neutrinoastronomie

Von besonderem Interesse ist die Neutrinomasse für die Kosmologie. Neutrinos sind mit 336 Neutrinos pro cm^3 nach den Photonen¹³ die zweithäufigsten Teilchen im Universum. Da massebehaftete Neutrinos einen Teil der Dunklen Materie bilden, trägt die Neutrinodichte Ω_ν einen Teil zur relativen Energiedichte Ω bei. Im rechten Teil von Abb. 1.9 ist der mögliche Beitrag von Ω_ν zu Ω in Abhängigkeit der absoluten Neutrinomasse zu sehen. Die Daten der bisherigen Experimente grenzen den Anteil der Neutrinos an Ω zur Zeit auf $0,001 < \Omega_\nu < 0,14$ ein. Im Gegensatz dazu liegt der Anteil der leuchtenden Materie (Sterne, Galaxien) nur bei etwa 0,6%, der der baryonischen Materie insgesamt nur bei 4%. 23% des Universums bestehen aus Dunkler Materie und 73% aus Dunkler Energie, deren Herkunft und Art bis heute nicht erklärt werden kann. Dunkle Materie wird in „heiße“ und „kalte“ Dunkle Materie unterteilt. Heiße Dunkle Materie (HDM), zu der auch die Neutrinos zählen, war zum Zeitpunkt ihrer Abkopplung von der restlichen Materie relativistisch. Bei den Neutrinos fand diese Abkopplung ca. 1 s nach dem Urknall bei einer Temperatur von ca. 10^{10} K statt, da zu diesem Zeitpunkt die Reaktionsraten der Neutrinos nicht mehr ausreichen, um ihr thermisches Gleichgewicht mit den anderen Teilchen aufrechtzuerhalten [Sch97]. Sie wechselwirkten nicht mehr mit anderen Teilchen und bilden seitdem ein anfangs relativistisch unabhängiges Gas, das sich immer weiter abkühlte und heute eine Temperatur von $T_{\nu 0} = 1,95$ K hat.

¹³Im heutigen Universum beträgt die Photonendichte 413 Photonen pro cm^3 .

Ω selbst wird durch den Quotienten aus tatsächlicher Dichte ρ und einer kritischen Dichte ρ_c beschrieben:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}. \quad (1.30)$$

Im Fall von $\rho < \rho_c$ ist das Universum „offen“, für $\rho > \rho_c$ „geschlossen“ und für $\rho = \rho_c$ „flach“. Neuere Ergebnisse der Fluktuationsmessung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR¹⁴) mit dem WMAP Satelliten und der Himmelsdurchmusterungen SDSS und 2dFGRS, die über die Rotverschiebung von Galaxien die Strukturbildung im Universum untersuchen, haben ergeben, dass auf das Universum der dritte Fall, $\rho = \rho_c$, zutrifft, das Universum demnach flach ist.

Neutrinos haben zudem einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung großräumiger Strukturen (LSS¹⁵) im Universum. Neutrinos beeinflussen abhängig von ihrer Masse das Wachstum von Strukturen im Universum, was die genannten Beobachtungen (WMAP, SDSS, 2dFGRS) sensitiv auf die Neutrinomasse macht. Aus einer kombinierten Analyse der WMAP, SDSS und weiterer Daten wurde eine Obergrenze für die Summe der Neutrinomassen von $\sum m_\nu \leq 0,6$ eV (95% C.L.) ermittelt, wobei dieses Ergebnis stark von der Analysemethode einiger der Daten abhängt [Goo06].

Am 23. Februar 1987 wurden von den Detektoren KamiokaNDE¹⁶ und IMB¹⁷ zusammen 19 Neutrinos innerhalb von 12,4 s nachgewiesen, die aus der Supernova SN1987A in der 50 kpc entfernten Großen Magellanschen Wolke stammten. Dies war der erste Nachweis von Neutrinos, die nicht terrestrischen oder solaren Ursprungs waren. Aus den gewonnenen Daten der SN1987A konnte die Obergrenze für die Neutrinomasse zu $m(\bar{\nu}_e) \leq 5,7$ eV bestimmt werden [PDG04].

Mit dem Nachweis der SN1987A-Neutrinos war die Neutrinoastronomie geboren. Im Gegensatz zur „klassischen“ Astronomie, in der Photonen oder geladene Teilchen als Sonden benutzt werden, verwendet die Neutrinoastronomie Neutrinos. Photonen von ca. 10 TeV werden zunehmend vom Infrarot-Hintergrund absorbiert und die geladene kosmische Strahlung enthält unterhalb einer Energie von 10^{18} eV so gut wie keine Richtungsinformation, da sie im galaktischen Magnetfeld stark abgelenkt werden. Die meisten Modelle der angenommenen Quellen dieser höchstenergetischen Teilchen¹⁸ setzen jedoch eine gleichzeitige Entstehung hochenergetischer Neutrinos voraus, die aufgrund geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit ungehindert zur Erde gelangen. Zudem werden sie durch ihre fehlende

¹⁴engl. **Cosmic Microwave Background Radiation**.

¹⁵engl. **Large Scale Structures**.

¹⁶**Kamioka Nucleon Decay Experiment**, Vorgängerexperiment von Super-Kamiokande.

¹⁷**Irvine Michigan Brookhaven Experiment**, ein ehemaliger Neutrinodetektor der Kollaborationsgruppen aus Irvine, Michigan und des Brookhaven Nationallabors.

¹⁸Quellen für hochenergetische Neutrinos sind extragalaktische Objekte wie etwa Aktive Galaktische Kerne (AGN) und die von ihnen ausgehenden Jets, oder auch Gamma Ray Bursts (GRB). Zu den galaktischen Kandidaten für Neutrinoproduktion zählen Supernova Remnants (SNR), Mikroquasare oder Doppelsternsysteme.

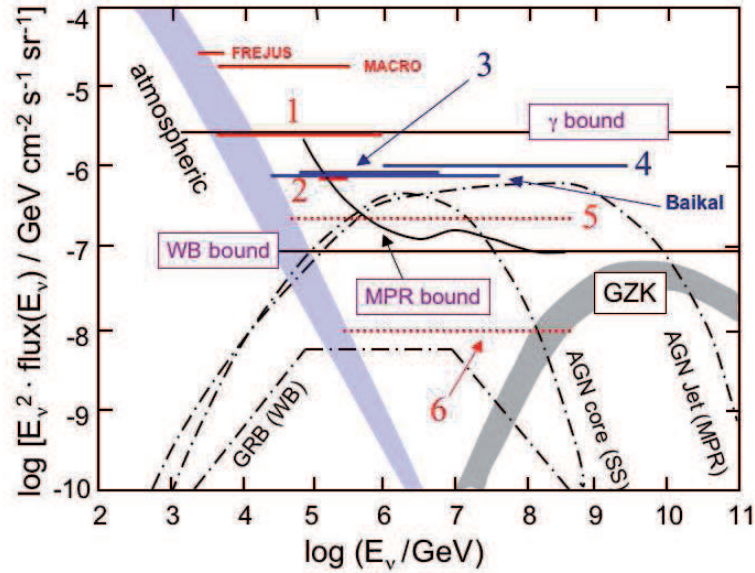


Abb. 1.10: **Obergrenzen des diffusen Neutrino fluxes.** Grenzen (1), (3) und (4) stammen aus verschiedenen unabhängigen Analysen der AMANDA-Daten. Grenze (2) und Sensitivitäten (5) und (6) sind vorläufige Ergebnisse. Ebenfalls dargestellt sind die Grenzen von Frejus und MACRO. [Toa06]

Ladung nicht von galaktischen Magnetfeldern beeinflusst und zeigen daher direkt auf ihre Quelle.

Einer der ersten Neutrinoexperimente, die zu diesem Zweck gebaut wurden, ist das AMANDA¹⁹-Experiment, das 1996 am Südpol in Betrieb genommen wurde. Es besteht aus 19 Strängen, die zwischen 1500 und 2000 Meter tief in die Eisdecke der Antarktis eingelassen sind. Sie bilden eine zylindrische Struktur von 200 m Durchmesser und 500 m Höhe. Jeder Strang ist mit 20 bis 42 optischen Modulen bestückt, die einen Abstand von 10-20 m zueinander haben. Ein optisches Modul besteht aus einem Photomultiplier, der in einer Glaskugel eingefasst ist, die dem Druck im Eis standhält. Die Signale der Photomultiplier werden für die Analyse über den Strang an die Oberfläche gesendet. AMANDA detektiert die Neutrinos wie der Super-Kamiokande Detektor über den Nachweis der in den Reaktionen mit Neutrinos entstehenden Teilchen über Cherenkov-Licht. Aus den vom AMANDA Detektor aufgenommenen Daten wurde u.a. eine Obergrenze für das Energiespektrum des diffusen Neutrino fluxes bestimmt. Dies geschah durch Messung des Energiespektrums der von unten kommenden Myonen. Abb. 1.10 zeigt die Obergrenzen und Sensitivitäten mehrerer unabhängiger Analysen zusammen mit den Vorhersagen verschiedener Modelle. Die Grenzen (1), (3) und (4) stammen aus verschiedenen Analysen der AMANDA-Daten. Grenze (2) und Sensitivitäten (5) und (6) sind vorläufige Ergebnisse [Toa06]. Das Ergebnis der Suche nach Neutrino-Punktquellen ist in Abb. 1.11 zu sehen. Aufgenommen

¹⁹ Antarctic Muon And Neutrino Detector Array

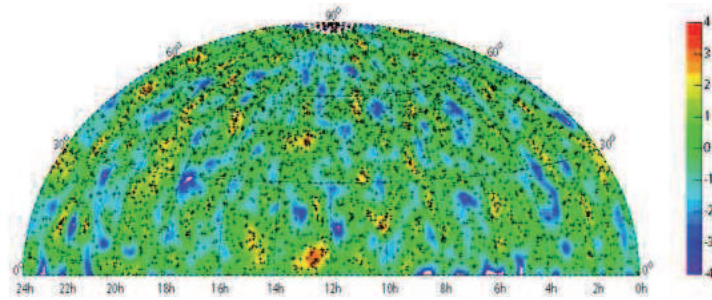


Abb. 1.11: **Der nördliche Himmel im Licht der Neutrinos.** Basierend auf 3329 Myon-Neutrino Ereignissen aufgenommen vom AMANDA-Detektor. Die Farben geben die Standardabweichungen von der erwarteten isotropen Verteilung an. [Toa06]

wurden 3329 Ereignisse in den Jahren 2000-2003. Die Daten wurden mit 33 bekannten astronomischen Quellen verglichen von denen der Krebsnebel mit 10 Ereignissen und einem erwarteten Untergrund von 5,4 Ereignissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 64% am deutlichsten auszumachen war [Toa06].

Weltweit werden derzeit mehrere bis zu 1 km^3 große Neutrinodetektoren aufgebaut, die in der Lage sein sollen, den gesamten Himmel im Licht der Neutrinos zu beobachten. Dazu gehören z.B. das IceCube Experiment und KM3NeT. IceCube ist das Nachfolge-Experiment von AMANDA, das sich seit 2005 am Südpol im Aufbau befindet und in das der bestehende AMANDA-Detektor integriert wird. IceCube soll wie AMANDA durch die Erde hindurch den nördlichen Himmel beobachten. Mit KM3NeT soll ein Tiefsee-Aufbau aus mehreren Strängen entstehen, die mit Photomultipliereinheiten ausgestattet sind, ähnlich wie AMANDA und IceCube. Anders als diese wird es am Grund des Mittelmeers aufgebaut werden, wo es sich die gleichen Detektionsmechanismen wie AMANDA und IceCube zunutze macht. KM3NeT ist aus drei einzelnen Projekten, NEMO, NESTOR und ANTARES hervorgegangen, die getrennt voneinander Tiefsee-Detektoren geplant hatten. Das Projekt ist noch in der Entwicklungsphase.

Kapitel 2

Das KATRIN Experiment

In diesem Kapitel wird das **K**arlsruher **T**ritium **N**eutrino Experiment beschrieben [KDR04]. Ziel dieses Experiments ist die Bestimmung der Masse des Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ aus der Kinematik des Tritium- β -Zerfalls (s. Abb. 2.1). Kann nach drei Jahren Messzeit keine Neutrinomasse nachgewiesen werden, wird die Massen-Obergrenze dadurch um eine Größenordnung auf 0,2 eV mit 95% C.L. reduziert. Bei einer Neutrinomasse von 0,3 eV ist ein Nachweis mit einer Signifikanz von 3σ und bei 0,35 eV mit 5σ möglich.

Die Bestimmung von $m_{\bar{\nu}_e}$ geschieht beim KATRIN Experiment über die Untersuchung des β -Zerfalls. Eine von Null verschiedene Neutrinomasse hat einen Einfluss auf den Verlauf des Betaspektrums im Endpunktsbereich. Abb. 2.2 zeigt den Effekt einer Neutrinomasse von $m_{\bar{\nu}_e} = 1$ eV auf den Endpunkt des Energiespektrums der β -Elektronen aus dem T_2 -Zerfall. In der Praxis wird $m_{\bar{\nu}_e}$ aus der Anpassung einer Modellfunktion an den Endpunktbereich des experimentell ermittelten Spektrums bestimmt. Dies wird in Kap. 2.1 näher erläutert. Ebenfalls näher erklärt werden soll das Prinzip des MAC-E-Filters¹, nach dem die Spektrometer des KATRIN Experiments arbeiten.

Die beim KATRIN Experiment verwendete Methode zur Bestimmung der Neutrinomasse anhand der Vermessung des β -Spektrums ist modellunabhängig und wird daher als direkte Neutrinomassenmessung bezeichnet. Diese Methode wurde auch schon bei den Vorgängerexperimenten zu KATRIN in Mainz und Troitsk² angewandt, auf deren Aufbau und Ergebnisse in Kap. 2.3 kurz eingegangen wird. Danach wird der experimentelle Aufbau von KATRIN dargestellt, wobei der Schwerpunkt auf dem Hauptspektrometer liegt, dessen innere Elektrode für diese Arbeit von besonderem Interesse ist. Der letzte Teil dieses Kapitels befasst sich mit dem im Hauptspektrometer zu erwartenden experimentellen Untergrund.

¹engl. **M**agnetic **A**diabatic **C**ollimation combined with an **E**lectrostatic Filter: Magnetisch-adiabatische Kollimation in Verbindung mit einem elektrostatischen Filter.

²Troitsk liegt ca. 20 km südwestlich von Moskau, Russland.

2.1 Neutrinomassenmessung über den Tritium- β -Zerfall

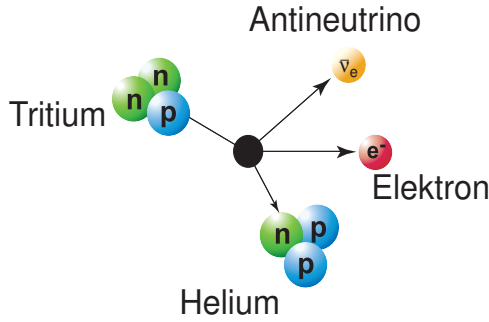


Abb. 2.1: **Tritium- β -Zerfall.** Tritium T zerfällt durch Umwandlung eines Neutrons n in ein Proton p unter Emission eines Elektrons e^- und eines Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ in Helium ${}^3\text{He}^+$.

Das KATRIN Experiment vermisst das β -Spektrum des Tritium-Zerfalls. Wie sich anhand der folgenden Betrachtung zeigen wird, ist Tritium für eine kinematische Bestimmung der Neutrinomasse besonders gut geeignet. Im folgenden wird dargestellt, wie anhand der gemessenen Zählraten auf die Neutrinomasse geschlossen werden kann. Dazu wird die Übergangsrate³ des β -Zerfalls hergeleitet, die von der Neutrinomasse m_ν abhängig ist.

Betrachtet wird β^- -Zerfall, bei dem ein Neutron unter Emission eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos in ein Proton umgewandelt wird:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (2.1)$$

Der β^- -Zerfall kann sowohl in einem gebundenen Kern, als auch beim freien Neutron stattfinden, da die Masse des Neutrons größer als die Summe der Massen des Protons, Elektrons und Neutrinos ist. Bei einem im Kern stattfindenden β^- -Zerfall wird ein Element X mit der Kernladungszahl Z und der Massenzahl A durch die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton in ein Element Y mit $Z+1$ und A umgewandelt:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (2.2)$$

Aufgrund der großen Masse des Kerns kann seine Rückstoßenergie bei der Betrachtung der Kinematik dieses Dreikörper-Zerfalls vernachlässigt werden. Für den Tritium-Zerfall (Abb. 2.1), der im KATRIN Experiment beobachtet wird lautet die Reaktionsgleichung:

$${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}^+ + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (2.3)$$

Die Massendifferenz der Kerne, bzw. die Differenz der Bindungsenergien, ergibt einen Energiebetrag, der mindestens der Summe der Ruhemassen von Elektron und Antineutrino entsprechen muss, damit ein Zerfall stattfindet, was bei Tritium gegeben ist:

$$\Delta E = [M({}^3_1\text{H}) - M({}^3_2\text{He}^+)] \cdot c^2 \geq (m_e + m_{\bar{\nu}}) \cdot c^2. \quad (2.4)$$

³Die Übergangsrate entspricht der Anzahl der pro Energieintervall und Zeiteinheit zerfallenden Kerne $\frac{d^2 N}{dE dt}$.

Die Übergangsrate lautet nach Fermis Goldener Regel:

$$\frac{d^2N}{dE dt} = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |M(E)|^2 \cdot \rho(E). \quad (2.5)$$

Dabei ist $\rho(E)$ die Dichte der Endzustände im Phasenraum und $|M(E)|$ das Übergangsmatrixelement, das als Produkt aus der leptonischen und hadronischen Komponente mit einem Vorfaktor geschrieben werden kann [Alt03]:

$$M = G_F \cdot \cos \theta_C \cdot M_{lep} \cdot M_{had}, \quad (2.6)$$

mit der Fermi-Kopplungskonstante G_F und dem Cabbibo-Winkel θ_C . Die leptonische Komponente des Übergangsmatrixelements kann weiter als

$$|M_{lep}^2| = \frac{1}{V^2} \cdot F(E_{kin}, Z + 1) \quad (2.7)$$

geschrieben werden. Die Fermifunktion $F(E_{kin}, Z + 1)$ beschreibt die Wechselwirkung zwischen dem emittierten Elektron und dem Kern und hängt von der kinetischen Energie des Elektrons und der Kernladungszahl des Tochterkerns ab. Aufgrund der nicht vorhandenen Wechselwirkung mit dem Kern ist die Fermifunktion im Fall des Neutrinos $F = 1$. Die hadronische Komponente, auch Kernmatrixelement genannt, ist beim Tritiumzerfall konstant [Alt03]:

$$|M_{had}^2| = 5,55. \quad (2.8)$$

Somit ist das $|M(E)|^2$ in Gleichung (2.5) näher beschrieben. Um einen Ausdruck der Übergangsrate für den Tritiumzerfall zu erhalten, muss noch $\rho(E)$ aus (2.5) näher bestimmt werden.

Im Impulsintervall $[p, p+dp]$ im Volumen V ist die Anzahl der Zustände dn gegeben durch:

$$dn = \frac{4\pi p^2 \cdot dp \cdot V}{h^3}. \quad (2.9)$$

Dabei stellt $4\pi p^2 \cdot dp$ das Volumen einer Kugelschale mit Radius p und Dicke dp und $\frac{h^3}{V}$ das von einem Zustand im Impulsraum eingenommene Volumen dar. Unter Verwendung der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad \Leftrightarrow \quad p dp = E dE \quad \text{mit } c \equiv 1 \quad (2.10)$$

kann Gleichung (2.9) folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$dn = \frac{4\pi p \cdot E dE \cdot V}{h^3} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{dn}{dE} = \frac{4\pi p \cdot E \cdot V}{h^3} = \frac{p \cdot E \cdot V}{2\pi^2 \hbar^3}. \quad (2.11)$$

Die Endzustandsdichte besteht aus zwei Komponenten:

$$\rho(E) = \frac{dn_e}{dE_e} \cdot \frac{dn_\nu}{dE_\nu} = \frac{p_e \cdot E_e \cdot p_\nu \cdot E_\nu \cdot V^2}{4\pi^4 \hbar^6}. \quad (2.12)$$

Dies kann mit $E_e + E_\nu = (E_{kin} + m_e) + E_\nu = E_0 + m_e = const.$ umgeschrieben werden (wobei $E_0 = E_{kin,e} + E_{kin,\nu+m_\nu}$ ist), so dass sich für die Endzustandsdichte $\rho(E)$ ergibt:

$$\rho(E) = \frac{p_e \cdot (E_{kin} + m_e) \cdot \sqrt{(E_0 - E_{kin})^2 - m_\nu^2} \cdot (E_0 - E_{kin}) \cdot V^2}{4\pi^4 \hbar^6} \quad (2.13)$$

Setzt man nun die Gleichungen (2.6), (2.7), (2.8) und (2.13) in Gleichung (2.5) ein, so ergibt sich für die Übergangsrates beim Tritium- β -Zerfall

$$\frac{d^2 N}{dE dt} = C(E_{kin}) \sqrt{(E_0 - E_{kin})^2 - m_\nu^2} \cdot \Theta(E_0 - E_{kin} - m_\nu), \quad (2.14)$$

mit

$$C(E_{kin}) = \frac{G_F^2 \cdot \cos^2 \theta_C}{2\pi^3 \hbar^7} \cdot |M_{had}^2| \cdot F(E_{kin}, Z + 1) (E_{kin} + m_e) p_e \cdot (E_0 - E_{kin}). \quad (2.15)$$

Durch die Stufenfunktion $\Theta(E_0 - E_{kin} - m_\nu)$ wird berücksichtigt, dass ein Neutrino nur dann erzeugt werden kann, wenn die zur Verfügung stehende Energie größer als die Ruhemasse des Neutrinos ist. Somit ist durch Gleichung (2.14) der Zusammenhang zwischen Neutrinomasse, kinetischer Energie der Elektronen und der Zählrate hergeleitet. Sie bildet die Grundlage für die kinematische Bestimmung der Neutrinomasse anhand des β -Zerfalls. Ein von Null verschiedenes m_ν beeinflusst die Form des Spektrums im Endpunktbereich,

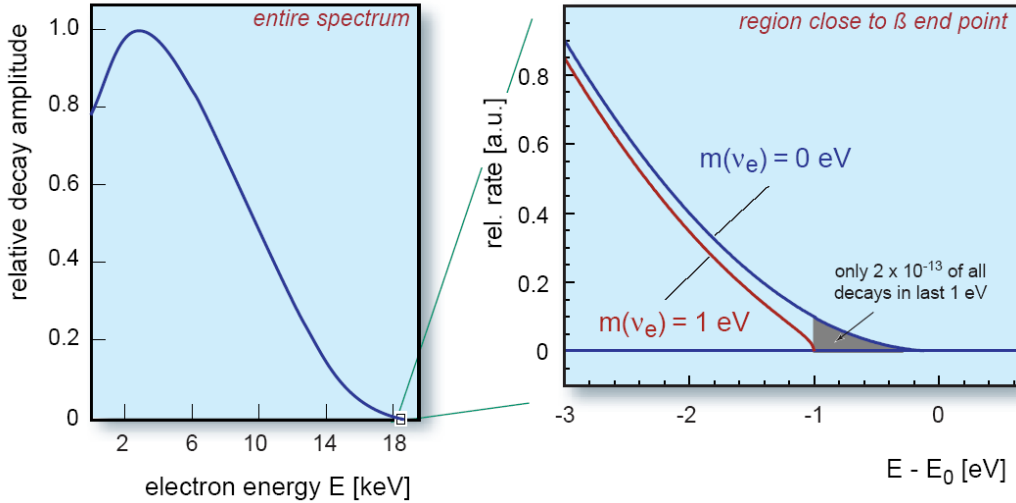


Abb. 2.2: **Energiespektrum des Tritium- β -Zerfalls.** Links ist das Energiespektrum des Tritium- β -Zerfalls dargestellt. Rechts ist die Endpunktregion des Energiespektrums dargestellt. Durch eine von Null verschiedene Neutrinomasse ändert sich die Form und der Endpunkt des Spektrums.[KDR04]

wie in Abb. 2.2 zu erkennen ist. Da $C(E_{kin})$ unabhängig von m_ν ist, hat die Neutrinomasse nur über den Phasenraumfaktor $\sqrt{(E_0 - E_{kin})^2 - m_\nu^2}$ Einfluss auf den Verlauf des Spektrums. Prinzipiell wäre es denkbar, die Neutrinomasse anhand der Verschiebung der

Endpunktposition des β -Spektrums zu bestimmen. Dies ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da die Zerfallsenergie E_0 , und somit der Endpunkt des Spektrums nicht exakt bekannt ist. Außerdem kann der Abfall der Zählrate bis auf Null, der den Endpunkt des Spektrums bestimmt, wegen experimenteller und systematischer Unsicherheiten nicht genau bestimmt werden. Zusätzlich zu der Verschiebung des Endpunkts tritt jedoch auch eine Veränderung der Form des Spektrums auf. In der Nähe des Endpunkts ändert sich die Krümmung der Kurve. Zudem hat sie über den gesamten Bereich von E einen Offset $\propto m_\nu$ (s. Abb. 2.2). Beim KATRIN Experiment wird daher der Verlauf des hochenergetischen Teils des Tritium- β -Spektrums sehr präzise vermessen und an die erhaltenen Daten eine Funktion angepasst, deren freie Parameter unter anderem E_0 und m_ν^2 sind, wobei m_ν^2 die eigentliche Observable des Experiments ist.

Tritium eignet sich für dieses Experiment aus mehreren Gründen besonders gut: Wie in Gleichung (2.14) zu erkennen ist, fällt die Funktion quadratisch mit $(E_0 - E_{kin})^2$ ab. Um eine möglichst hohe Zählrate im Endpunktbereich des Spektrums zu erhalten, sollte die Endpunktenergie E_0 möglichst klein sein. Tritium hat die zweitniedrigste Endpunktenergie aller β Quellen und ist im Vergleich mit ^{187}Re , welches das niedrigste E_0 hat, aufgrund der wesentlich kürzeren Lebensdauer von $t_{1/2}(T) = 12,3$ a im Gegensatz zu $t_{1/2}(^{187}\text{Re}) = 5 \cdot 10^{10}$ a und der damit verbundenen höheren spezifischen Zählrate im Endpunktbereich die bessere Wahl. Zudem hat Tritium eine kleine Kernladungszahl Z und eine einfache Elektronenkonfiguration. Dadurch ist die Wechselwirkung zwischen dem emittierten Elektron und dem zurückbleibenden Kern, beschrieben durch die Fermifunktion $F(E_{kin}, Z + 1)$ in Gleichung (2.15), klein und analytisch berechenbar. Zudem sind die elektronischen Endzustände ebenfalls berechenbar und das Kernmatrixelement $M_{had}(E)$ ist konstant.

2.2 Funktionsprinzip des MAC-E-Filter

In diesem Kapitel soll das Prinzip des MAC-E-Filters beschrieben werden, nach dem sowohl das Haupt-, als auch das Vorspektrometer und das Monitorspektrometer⁴ des KATRIN Experiments arbeiten. Der MAC-E-Filter wurde 1980 von P. Kruit und F.H. Read unter dem Namen SRS⁵ vorgestellt [Bea80],[Kru83]. Während der 1980er Jahre wurde dieser Spektromertyp in den Neutrinomassenexperimenten in Mainz und Troitsk (s. Kap. 2.3) unabhängig entwickelt. Aus den Erfahrungen der beiden Experimente wurde für das KATRIN Experiment ein verbesserter MAC-E-Filter mit einer wesentlich höheren Energieauflösung entwickelt. Abb. 2.3 zeigt schematisch den Aufbau eines MAC-E-Filters. Hauptkomponenten sind zwei Solenoide, die sich am Ein- und Ausgang des Spektrometers befinden und ein Magnetfeld erzeugen. Die Feldstärke B ist dabei innerhalb der Solenoiden maximal $B = B_{max}$ und fällt zur Mitte zwischen den beiden Spulen hin um mehrere

⁴Das modifizierte Spektrometer des Mainzer Neutrinomassen-Experiments (s. Kap. 2.3) dient im KATRIN Experiment als Monitorspektrometer. Es vermisst in Verbindung mit einem hochpräzisen Spannungsteiler [Thu07] die Position der K32-Linie der Konversionselektronen einer ^{83m}Kr -Kalibrationsquelle [Ost08] und überwacht so die Stabilität der Retardierungsspannung des Hauptspektrometers im ppm-Bereich.

⁵Solenoid Retardierungs-Spektrometer

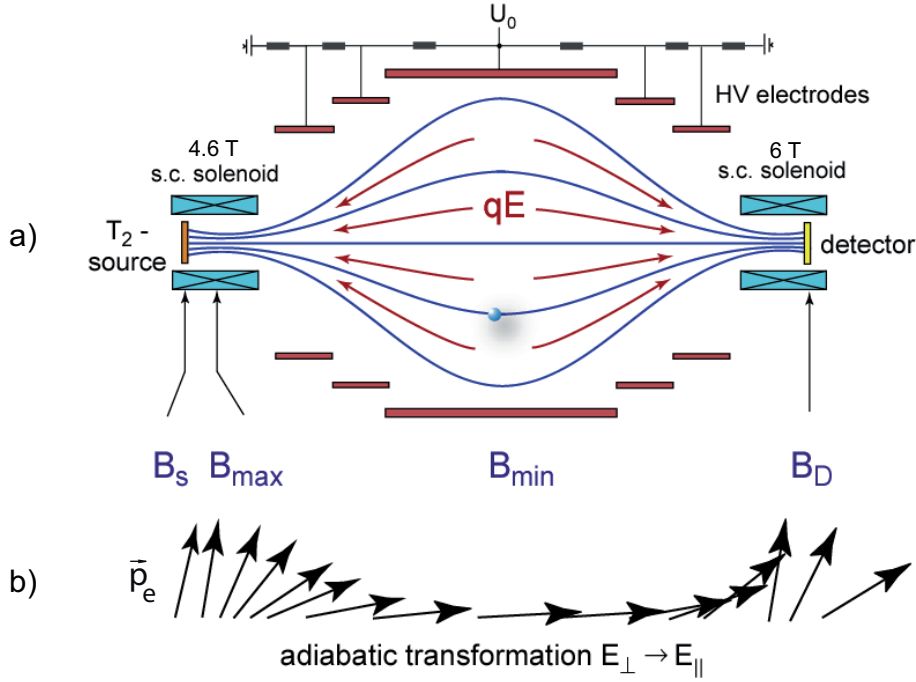


Abb. 2.3: Das Prinzip des MAC-E-Filters. a) Schematischer Aufbau des MAC-E-Filters. Die Solenoiden erzeugen das Magnetfeld. Im Spektrometer weitet sich der magnetische Flusschlauch auf, die Magnetfeldstärke nimmt zur Mitte des Spektrometers hin ab. Die Elektrodenanordnung erzeugt das elektrische Gegenfeld, das der Energieanalyse der Elektronen dient. b) Der Impuls der Elektronen wird zur Mitte des Spektrometers hin parallel zum Magnetfeld ausgerichtet und hat in der Analysierebene den geringsten transversalen Anteil.[KDR04]

Größenordnungen ab. Der Minimalwert $B = B_{min}$ wird in der sogenannten Analysierebene erreicht, wobei das Verhältnis der beiden Feldstärken beim KATRIN Experiment $\frac{B_{max}}{B_{min}} \approx 20.000$ ist. Elektronen, die von der Tritiumquelle links vom Solenoiden emittiert werden, werden entlang der magnetischen Feldlinien durch das Spektrometer geführt. Aufgrund der Lorentzkraft führen sie dabei eine Zyklotronbewegung um die magnetischen Feldlinien aus. Die kinetische Energie E_{kin} der Elektronen kann als Summe einer longitudinalen Komponente E_{\parallel} parallel zu den Feldlinien und einer transversalen Komponente E_{\perp} beschrieben werden:

$$E_{kin} = E_{\parallel} + E_{\perp} = E_{kin} \cdot \cos^2 \theta + E_{kin} \cdot \sin^2 \theta. \quad (2.16)$$

Dabei ist $\cos^2 \theta = \left(\frac{\vec{B} \cdot \vec{v}}{|\vec{B}| \cdot |\vec{v}|} \right)^2$ und θ gibt den Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor \vec{v} des Elektrons und der Magnetfeldlinie an. Durch die Zyklotronbewegung entlang der magnetischen Feldlinien besitzen die Elektronen ein magnetisches Bahnmoment μ . Da das Magnetfeld zwischen den beiden Solenoiden nicht konstant ist, wirkt eine Gradientenkraft

$$\vec{F}_{\nabla} = \nabla (\vec{\mu} \cdot \vec{B}). \quad (2.17)$$

Dadurch werden die Elektronen parallel zu den magnetischen Feldlinien in Richtung des Minimums der Feldstärke beschleunigt. Ist die Änderung des Magnetfelds pro Zyklotronumlauf klein genug, so geschieht dies adiabatisch und es gilt [Jac02]:

$$\oint \vec{p} \, d\vec{q} = \mu \cdot \gamma = \text{const.} \quad (\text{„adiabatische Invariante“}) \quad (2.18)$$

wobei $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E}{m}$ ist. Beim Tritium- β -Zerfall beträgt der γ -Faktor der Zerfallselektronen maximal $\gamma_{max} = 1,04$. Daher kann hier der nichtrelativistische Fall $\gamma \approx 1$ angenommen werden, wodurch μ zur Erhaltungsgröße wird:

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{const.} \quad (2.19)$$

Da μ Erhaltungsgröße ist, sich das Magnetfeld B jedoch ändert, muss sich E_{\perp} ebenfalls ändern, damit in Gleichung (2.19) der Quotient $\frac{E_{\perp}}{B}$ konstant bleibt. Gleichzeitig ist aber auch die Gesamtenergie des Elektrons erhalten. Im Fall eines abnehmenden Magnetfelds wird so die Transversalenergie E_{\perp} in Longitudinalenergie E_{\parallel} umgewandelt. Auf diese Weise wird, wie in Abb. 2.3 b) dargestellt, der Impuls \vec{p}_e eines Elektrons mit transversalem Anteil auf seinem Weg entlang der magnetischen Feldlinien parallel zu diesen ausgerichtet. Diese Ausrichtung ist in der Analysierebene maximal. Wenn bei einem Elektron aus dem Tritiumzerfall die gesamte mögliche Energie $E_{kin,max} = 18,6 \text{ keV}$ in der Transversalkomponente E_{\perp} vorliegt, kann diese aufgrund der beschriebenen Umwandlung in Longitudinalenergie E_{\parallel} in der Analysierebene A des KATRIN Hauptspektrometers maximal

$$\Delta E = E_{\perp,max,A} = E_{kin,max} \cdot \frac{B_{min}}{B_{max}} = 18,6 \text{ keV} \cdot \frac{1}{20000} \approx 0,93 \text{ eV} \quad (2.20)$$

betragen. Der maximale Wert $E_{\perp,max,A}$ in der Analysierebene ist gleichzusetzen mit der erreichbaren Energieauflösung des MAC-E-Filters: $\Delta E \approx 0,93 \text{ eV}$. Bisher werden alle Elektronen entlang der magnetischen Feldlinien ohne Selektion durch das MAC-E-Filter geleitet. Um eine Energieanalyse der Elektronen vornehmen zu können, müssen diese nach ihrer Energie selektiert werden. Zu diesem Zweck wird an den in Abb. 2.3 dargestellten zylindrischen Elektroden eine Retardierungsspannung U_0 angelegt, durch die ein elektrisches Gegenfeld erzeugt wird. Dieses Feld hat sein Maximum in der Mitte des Spektrometers, das im Idealfall in der gleichen Querschnittsebene wie das Minimum des Magnetfelds B_{min} liegt. Es bremst die von der Quelle kommenden Elektronen bis zur Analysierebene hin ab. Ist die Energie der Elektronen groß genug, um die elektrostatische Retardierungsspannung U_0 zu überwinden, werden diese in Richtung Detektor wieder beschleunigt, und mit ihrer ursprünglichen Energie detektiert. Dies ist der Fall, falls die longitudinale Komponente E_{\parallel} der Energie des Elektrons in jedem Bahnpunkt größer ist, als das dortige elektrische Potential. Es muss also gelten:

$$E_{\parallel}(\vec{r}) - qU(\vec{r}) = E_S - E_{\perp}(\vec{r}) - qU(\vec{r}) > 0 \quad (2.21)$$

Daraus ergibt sich mit Gleichung (2.16) die Transmissionsbedingung für die Mittelebene des Spektrometers in Abhängigkeit von Startwinkel θ_S der Elektronen:

$$(E_{\parallel})_A - qU_0 = E_S - \underbrace{E_S \cdot \sin^2 \theta_S \cdot \frac{B_{min}}{B_S}}_{(E_{\perp})_A} - qU_0 > 0. \quad (2.22)$$

mit $(E_{\parallel})_A$ Longitudinalenergie in der Analysierebene,
 $(E_{\perp})_A$ Transversalenergie in der Analysierebene,
 E_S kinetische Energie des Elektrons am Startort,
 B_S Magnetfeldstärke am Startort,
 B_{min} Magnetfeldstärke in der Analysierebene,
 θ_S Winkel zwischen Impulsrichtung des e^- und Magnetfeldlinien am Startort,
 U_0 maximal retardierendes Potential in der Analysierebene.

Es werden demnach alle Elektronen transmittiert, die unter einen Startwinkel

$$\theta \leq \theta_S = \arcsin \left(\sqrt{\frac{E_S - qU_0}{E_S} \cdot \frac{B_S}{B_{min}}} \right) \quad (2.23)$$

emittiert werden. Durch Gleichung (2.23) wird ein Kegel definiert, der die Raumwinkelakzeptanz $\Delta\Omega$ des Spektrometers darstellt. Es gilt:

$$\frac{\Delta\Omega}{2\pi} = 1 - \cos \theta_S, \quad (2.24)$$

wobei $\Delta\Omega$ die durch den Kegel in Gleichung 2.23 definierte Raumwinkelakzeptanz ist. Einsetzen von Gleichung (2.23) in (2.24) ergibt mit $\cos(\arcsin(\sqrt{x})) = \sqrt{1-x}$ einen Verlauf der Transmissionsfunktion, der in drei Abschnitte unterteilt ist.

$$T(E_S, U_0) = \begin{cases} 0 & \text{für } E_S < q U_0 \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{(E_S - q U_0) B_S}{E_S B_{min}}} & \text{für } E_S \left(1 - \frac{B_{min}}{B_S}\right) \leq q U_0 \leq E_S \\ 1 & \text{für } q U_0 \leq E_S \left(1 - \frac{B_{min}}{B_S}\right). \end{cases} \quad (2.25)$$

Die Transmissionsfunktion ist abhängig von der Energie der Elektronen E_S und der Retardierungsspannung U_0 in der Analysierebene. Sie ist analytisch berechenbar. Um das β -Spektrum zu vermessen wird die Retardierungsspannung in der Größenordnung der Energieauflösung ΔE schrittweise verändert und die Zählrate bestimmt. Das MAC-E-Filter arbeitet demnach als integrierender Hochpassfilter, der auf die Transversalenergie E_{\perp} nicht sensitiv ist. Für das KATRIN Experiment ist, wie in Kap. 2.1 erklärt, nur die Endpunktregion des Spektrums von Interesse.

Im realen Aufbau des Experiments wird die Transmission zusätzlich dadurch beschränkt, dass das Magnetfeld am Startort B_S nicht das maximale, in der Apparatur auftretende

Magnetfeld B_{max} ist. Das Feld B_{max} , welches nach Gleichung (2.20) die Energieauflösung definiert, wird von einem sogenannten „Pinch“-Magneten erzeugt und hat die Aufgabe, eine Startwinkelselektion der aus der Quelle kommenden Elektronen vorzunehmen. So kann die Detektion von Elektronen, die durch ihren großen Startwinkel eine längere Wegstrecke in der Quelle zurücklegen und so verstärkt an Streuprozessen teilnehmen, verhindert werden. Abb. 2.4 zeigt die für das KATRIN Hauptspektrometer berechnete Transmissionsfunktion, deren Filterschwelle nur Elektronen mit einem Startwinkel $< 50,77^\circ$ passieren können.

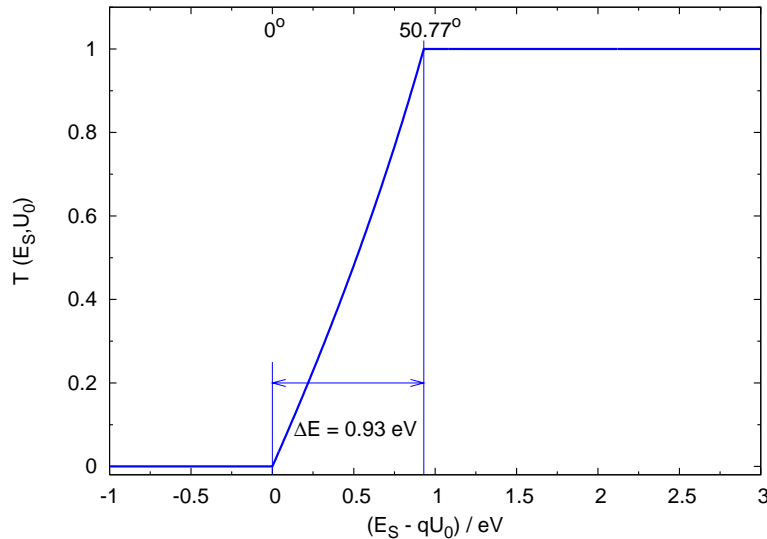


Abb. 2.4: **Transmissionsfunktion des KATRIN Hauptspektrometers.** Dargestellt ist der theoretische Verlauf der Transmissionsfunktion des Hauptspektrometers. An der geringen Breite des Anstiegs ist die hohe Energieauflösung zu erkennen (hier: $\Delta E = 0.93$ eV).

2.3 Ergebnisse des Mainzer und Troitsker Experiments

Die unabhängig voneinander durchgeführten Neutrinomassen-Experimente in Mainz und Troitsk gelten als Vorgängerexperimente zu KATRIN. Nachdem beide Experimente nach langjährigen erfolgreichen Messungen eingestellt wurden, weil die Grenze der Empfindlichkeit der Apparaturen erreicht worden war, wurde aus den Erfahrungen dieser Experimente ein neues Neutrinomassenexperiment – KATRIN – auf den Weg gebracht. Da das KATRIN Experiment die Obergrenze für die Neutrinomasse im Vergleich zu den Experimenten in Mainz und Troitsk um eine Größenordnung reduzieren soll, werden die beiden Experimente und ihre Ergebnisse hier kurz vorgestellt. Das Prinzip der Experimente ist das gleiche wie beim KATRIN Experiment. Die aus einer Tritiumquelle emittierten Zerfallselektronen werden magnetisch in ein MAC-E-Filter geführt, mit dem eine Energieanalyse des β -Spektrums durchgeführt wird. Dadurch kann, wie in Kap. 2.1 beschrieben, auf die Masse

des Elektron-Antineutrinos geschlossen werden.

Das **Troitsker** Experiment verwendete eine fensterlose gasförmige Tritiumquelle (WGTS⁶), wie sie auch beim KATRIN Experiment zum Einsatz kommt (s. Kap. 2.4.1). In ein 3 m langes Rohr, mit 5 cm Durchmesser, wurde Tritiumgas eingelassen, das in dem Rohr eine Gassäule mit einer Dichte von $\rho d \approx 10^{17} \frac{\text{Moleküle}}{\text{cm}^2}$ bildete. Um das Tritiumgas daran zu hindern ins Spektrometer zu gelangen wurde es durch eine differentielle Pumpstrecke mit mehreren Biegungen geleitet. Auch dieses Prinzip wird bei KATRIN übernommen (Kap. 2.4.2). Das Spektrometer des Troitsker Experiments, mit dem das Energiespektrum der Zerfallselektronen aufgenommen wurde, hat eine Länge von 7 m und einen Durchmesser von 1,5 m. Die gesamte Messdauer des Experiments belief sich auf etwa 200 Tage in den Jahren von 1994 bis 1999 und 2001. Während der Messungen wurde eine monoenergetische Linie im Energiespektrum beobachtet, die knapp unterhalb des Endpunkts lag. Die Position und die Amplitude dieser Linie, die als „Troitsk-Anomalie“ bezeichnet wird, variierte und war nach dem Einbau von Vakuumpumpen zwischen der Tritiumquelle und dem Spektrometer nicht mehr eindeutig auszumachen. Aus den aufgenommenen Daten konnte durch eine Analyse, welche die noch immer nicht verstandene Anomalie als zusätzliche Linie über dem β -Spektrum berücksichtigt, eine Obergrenze für die Neutrinomasse ermittelt werden [Lob03]:

$$m^2(\nu_e) = -2,3 \pm 2,5 \pm 2,0 \text{ eV}^2 \quad \Leftrightarrow \quad m(\nu_e) < 2,05 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.})$$

Im Gegensatz zum Experiment in Troitsk hat das **Mainzer** Neutrinomassenexperiment eine feste Tritiumquelle bestehend aus einem dünnen, auf Graphitsubstrat (HOPG⁷) aufgefrorenen Tritiumfilm. Nachteil dieses Quellentyps sind Verluste, hervorgerufen durch inelastische Streuung der Elektronen innerhalb des Tritiumfilms, die komplizierter sind als bei der gasförmigen Quelle des Troitsker Experiments. Auch beim Mainzer Experiment wurde ein MAC-E-Filter verwendet, dessen Abmessungen mit 4 m Länge und 1 m Durchmesser etwas kleiner sind, als die des Troitsker Gegenstücks. Das Mainzer Spektrometer, das eine Auflösung von 4,8 eV hat, wird beim KATRIN Experiment als Monitorspektrometer zur Überwachung der HV-Stabilität weiterverwendet [Hil07],[Ost08]. Aus den Ergebnissen der Messphasen von 1998 bis 2001 ließ sich ebenfalls eine Obergrenze für die Masse des Elektron-Antineutrinos bestimmen [Kra05]:

$$m^2(\nu_e) = -0,6 \pm 2,2 \pm 2,1 \text{ eV}^2 \quad \Leftrightarrow \quad m(\nu_e) < 2,3 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.})$$

2.4 Experimenteller Aufbau des KATRIN Experiments

Aus den beiden zuvor beschriebenen Experimenten hat sich zur Weiterführung der Neutrinomassen-Messungen eine internationale Kollaboration herausgebildet, die mit KATRIN das

⁶engl. **W**indowless **G**aseous **T**ritium **S**ource: fensterlose gasförmige Tritiumquelle.

⁷engl.: **H**ighly **O**riented **P**yrolytic **G**raphite: hochorientierter pyrolytischer Graphit.

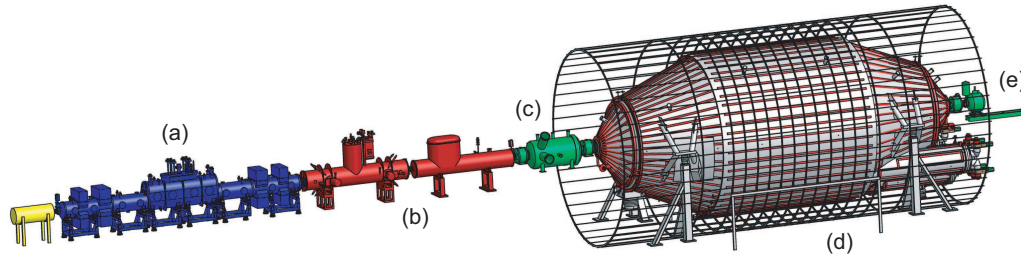


Abb. 2.5: **Aufbau des KATRIN Experiments.** Zu sehen sind die einzelnen Sektionen des Experiments: a) Gasförmige Tritiumquelle, b) Transport- und Pumpsektion, c) Vorspektrometer, d) Hauptspektrometer mit Luftspulen, e) Detektor.

Neutrinomassenexperiment der nächsten Generation durchführen wird. Das KATRIN Experiment wird am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) aufgebaut. Nur dort kann durch das Tritiumlabor Karlsruhe die nötige Menge Tritium mit der benötigten Isotopenreinheit von über 95% bereitgestellt werden. Zudem ist dort die notwendige Erfahrung im Umgang mit dem radioaktiven Tritiumgas vorhanden.

Das KATRIN Experiment kann, wie in Abb. 2.5 dargestellt, in mehrere Sektionen aufgeteilt werden: Die β -Teilchen des in der Quellsektion (WGTS) stattfindenden T_2 -Zerfalls werden von Magnetfeldern durch die Transportsektion bestehend aus einer differentiellen und einer kryogenen Pumpstrecke in die Spektrometeranordnung geleitet. In der Spektrometersektion findet die Energieanalyse der β -Teilchen statt, die am Detektor lediglich gezählt werden. Zum besseren Verständnis werden die einzelnen Komponenten des Experiments an dieser Stelle erläutert.

2.4.1 Die Tritiumquelle (WGTS)

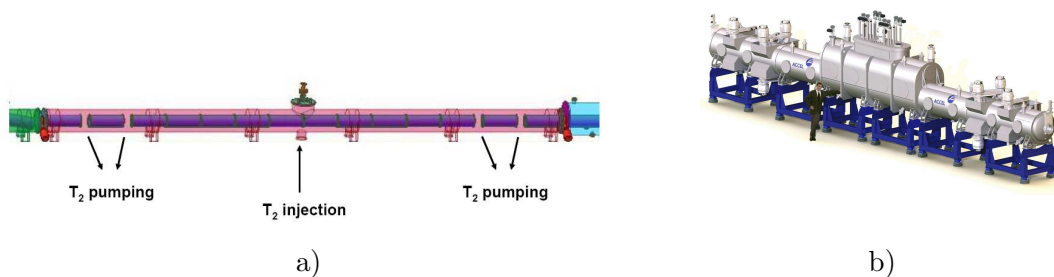


Abb. 2.6: **Die WGTS.** a) Schematische Darstellung [Hab06], b) 3D Grafik

In der Tritiumquelle (WGTS) findet der Zerfall des Tritiums statt, dessen Spektrum das KATRIN Experiment vermessen soll. Die WGTS besteht aus einem 10 m langen Kryostaten, der einen Innendurchmesser von 90 mm hat. In der Mitte des Kryostaten wird pro Sekunde ca. 5 Ci gasförmiges T_2 mit einem Druck von $3,4 \cdot 10^{-3}$ mbar eingelassen.

Bis zu den Enden der Quelle ist der Druck auf etwa $4 \cdot 10^{-5}$ mbar abgefallen. Um zu verhindern, dass das Tritiumgas die Quelle verläßt, wird es an beiden Seiten der WGTS von Turbomolekularpumpen abgepumpt und in einer Schleife wieder in die Quelle eingespeist. Die Aktivität der Tritiumquelle wird ca. 10^{11} Bq betragen. Die Anzahl der Zerfälle in der Quelle hängt stark von der Dichte der Gassäule ab. Um eine geeignete Tritiumdichte bei vorgegebenem Druck zu erhalten, wird der Kryostat auf einer Temperatur von 27 K gehalten, wobei die Schwankungen dieser Temperatur kleiner als 30 mK sein sollten. Die Quelle befindet sich innerhalb von supraleitenden Solenoiden, die zur Führung der Zerfallselektronen ein 3,6 T starkes Magnetfeld erzeugen.

2.4.2 Transportsektion (DPS2-F und CPS)

An die Tritiumquelle schließt sich die Transportsektion bestehend aus der differentiellen Pumpstrecke DPS2-F⁸ und der kryogenen Pumpstrecke CPS⁹ an. Die beiden Pumpstrecken haben die Aufgabe, aus der Quelle entwichenes Tritium daran zu hindern, in die Spektrometer zu gelangen. Besonders im Hauptspektrometer zerfallendes T_2 würde die Form des gemessenen Spektrums verfälschen. Hinter der Transportsektion soll der T_2 -Fluss maximal $10^{-14} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$ betragen, sodass der Tritium-Partialdruck p_{T_2} innerhalb der Spektrometer unter 10^{-20} mbar liegt. Dies entspricht einer Minderung von p_{T_2} um 17 Größenordnungen und stellt eine der großen technischen Herausforderungen des Experiments dar. Die Transportsektion enthält, wie die WGTS, eine Reihe supraleitenden Solenoiden, deren 5,6 T Felder die β -Elektronen adiabatisch in die Spektrometer führen. Die differentielle Pumpstrecke (DPS2-F) hat insgesamt vier Biegungen (s. Abb. 2.7) in

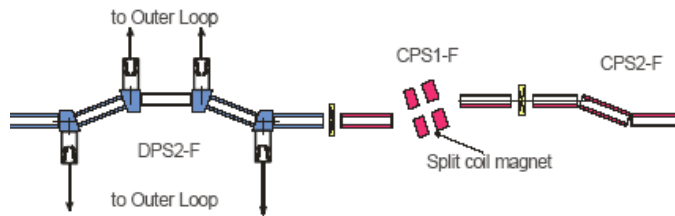


Abb. 2.7: **Transportsektion.** Schematische Darstellung. [Eic05]

denen Turbomolekularpumpen angebracht sind. Während die β -Elektronen aufgrund ihrer Ladung vom magnetischen Führungsfeld der Solenoiden durch die Biegungen geleitet werden, kann das neutrale T_2 den Biegungen nicht folgen und wird in den Ecken von den Pumpen abgesaugt. Ein Teil der T_2 -Moleküle wird die DPS2-F durch Stöße mit den Wänden trotzdem passieren. Dieser Teil gelangt in die kryogene Pumpstrecke CPS. Durch die gesamte differentielle Pumpstrecke, bestehend aus der DPS1-F und der DPS2-F, wird der Tritiumfluss um den Faktor $\lesssim 10^7$ reduziert.

⁸engl. **Differential Pumping Section 2 – Forward**: 2. vordere differentielle Pumpstrecke, die 1. differentielle Pumpstrecke (DPS1-F) befindet sich innerhalb der WGTS.

⁹engl. **Cryogenic Pumping Section**: kryogene Pumpstrecke.

Die CPS besteht ebenfalls aus vier Biegungen (Abb. 2.7), in deren Ecken sich allerdings keine Pumpen befinden. Stattdessen ist auf der $T = 4,5$ K kalten Oberfläche der CPS Argon-Frost kondensiert, was die effektive Oberfläche der CPS erhöht. Das Tritium wird auf dieser Oberfläche über Kryosorption sorbiert, was den Tritiumfluss um einen weiteren Faktor 10^7 mindert. Das Prinzip der CPS wurde bereits im Testaufbau TRAP (Tritium Argon Frost Pump) getestet [Stu07]. Problematisch ist die beim β -Zerfall von T_2 deponierte Energie, die zur Desorption des Tritiums von der Wand führt. Über diese Prozesse kann das Tritium die CPS passieren und in die Spektrometersektion gelangen. Tests haben jedoch ergeben, dass die Migrationsgeschwindigkeit des Tritiums geringer als $v_{migration} = 8,3$ cm/d ist [Stu07].

2.4.3 Vorspektrometer

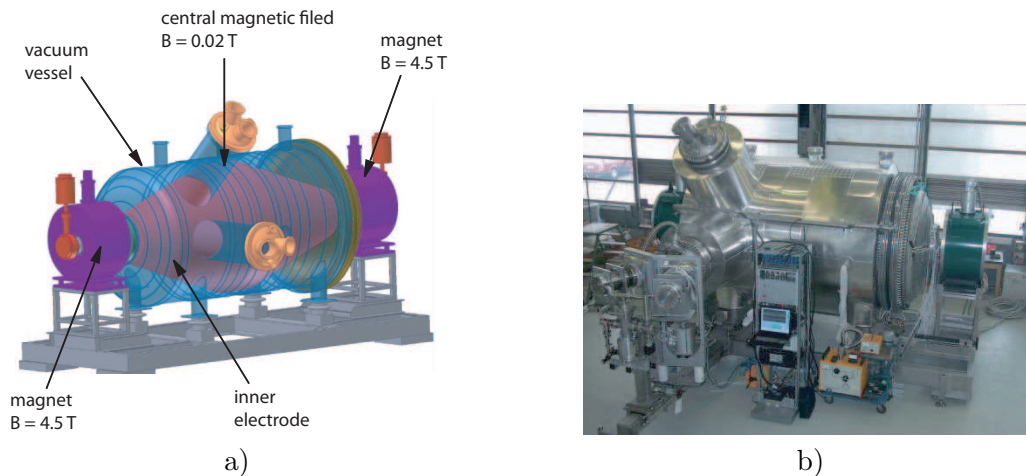


Abb. 2.8: **Das Vorspektrometer.** a) Schematische Darstellung, b) Aufnahme in der Testhalle am FZK.

Die sich an die Transportsektion anschließende Spektrometersektion besteht aus dem Vor- und dem Hauptspektrometer, die beide nach dem Prinzip des MAC-E-Filters arbeiten (Kap.2.2). Das Vorspektrometer ist 3,4 m lang und hat einen Durchmesser von 1,7 m (Abb. 2.8). Es dient der Filterung niederenergetischer Zerfallselektronen, da im Hauptspektrometer nur die höchstenergetischen β -Teilchen ankommen sollen, die für die Endpunktvermessung des Tritium- β -Spektrums relevant sind. Der gesamte Elektronenfluss von der Quelle beträgt am Eingang des Vorspektrometers ca. $10^{10} \frac{\text{Elektronen}}{\text{s}}$. Durch eine Retardierspannung von etwa 18,3 kV in der Analysierebene wird ein Großteil der Elektronen mit weniger Energie reflektiert und so herausgefiltert. Der Fluss der Elektronen ins Hauptspektrometer wird so um den Faktor 10^7 auf ca. 1000 Elektronen pro Sekunde reduziert.

Bei der Ionisation von Restgas im Spektrometer können Elektronen freigesetzt werden, die über mehrstufige Prozesse bis zum Detektor gelangen können und dort fälschlicherweise

als Tritium-Zerfallselektronen gezählt werden. Um diesen Effekt zu vermeiden muss in den beiden Spektrometern ein Druck von $p < 10^{-11}$ mbar herrschen. Um diesen Druck zu erreichen müssen die Spektrometer ausgeheizt werden. Dazu wurde am Vorspektrometer, das seit 2003 am FZK zur Verfügung steht, ein Heiz-Kühl-System getestet, das auch am Hauptspektrometer zum Einsatz kommt. Zudem wurden Tests zu Leck- und Ausgasraten durchgeführt und die Transmissionsfunktion des Vorspektrometers gemessen. Aufgrund von Problemen durch Auftreten von Penning-Entladungen am Vorspektrometer sind die Ergebnisse dieser Messungen nur vorläufig.

2.4.4 Das Hauptspektrometer

Aufgabe des Hauptspektrometers ist die Energieanalyse der höchstenergetischen Zerfallselektronen des in der WGTS stattfindenden Tritium- β -Zerfalls. Es arbeitet wie das Vorspektrometer, das im Vorfeld eine grobe Selektion der Elektronen durchführt, nach dem Prinzip des MAC-E-Filters.

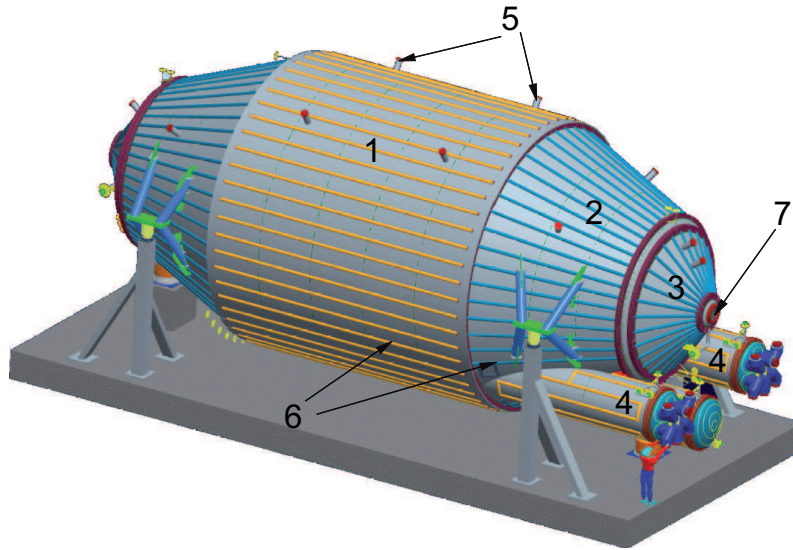


Abb. 2.9: CAD Grafik des Hauptspektrometers. 1) Zylindrischer Zentralteil des Spektrometers, 2) Flacher Konusbereich, 3) Steiler Konusbereich, 4) Pumpenschlüsse, 5) Vakuumdurchführungen für Hochspannung, 6) Heiz-/Kühl-Leitungen, 7) Flansch des Strahlengangs (detektorseitig). [Wol07]

Die Dimensionierung des Spektrometertanks ergab sich zum größten Teil aus den Anforderungen an das relative Auflösungsvermögen von $\frac{E}{\Delta E} = 20000$, das sich nach Gleichung (2.20) aus dem Verhältnis der Magnetfeldstärken B_{max} innerhalb der Strahlführung und B_{min} in der Analysierebene ergibt. Dieses Verhältnis kann durch eine technisch günstige Wahl der magnetischen Feldstärken mit

$$B_{min} = 3 \text{ Gau\ss} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ T}, \quad B_{max} = 6 \text{ T} \quad (2.26)$$

erreicht werden. Über das Verhältnis der Querschnittsflächen der Analysierebene A_{analys} und der effektiven Quellfläche $A_{source,eff}$,

$$\frac{A_{analys}}{A_{source,eff}} = \frac{B_{max}}{B_{min}} = 20000, \quad (2.27)$$

kann der nötige Durchmesser der Analysierebene d_{analys} bei gegebener Größe des Flussschlauchs im Solenodien berechnet werden:

$$d_{analys} = 2 \cdot \sqrt{A_{source,eff} \cdot \frac{20000}{\pi}}. \quad (2.28)$$

Die Zählrate hängt von der effektiven Quellfläche $A_{source,eff}$ ab, die aufgrund der ohnehin geringen Zählrate im Endpunktbereich des β -Zerfalls möglichst groß gewählt werden sollte. Dabei ist zu beachten, dass der Durchmesser des Spektrometertanks technisch realisierbar bleiben muss. Bei einer Fläche $A_{source,eff} = 32 \text{ cm}^2$ ergibt sich beispielsweise $d_{analys} = 9 \text{ m}$. Da der Flussschlauch nicht direkt auf der Spektrometerwand enden soll und zudem noch Platz für den Einbau einer inneren Drahtelektrode benötigt wird (s. Kap. 2.5), muss der Spektrometertank in diesem Fall einen Durchmesser von $d_{spec} \approx 10 \text{ m}$ haben, was an der Grenze des technisch Machbaren liegt.

Desweiteren war bei der Planung der Spektrometerabmessungen zu berücksichtigen, dass der Energietransfer von E_{\perp} nach E_{\parallel} der Elektronen adiabatisch verlaufen soll. Der Gradient der Magnetfeldstärke darf daher nicht zu groß sein, d.h. dass der Unterschied zwischen B_{max} und B_{min} auf eine genügend große Distanz verteilt werden muss. Dieses Kriterium sorgt für eine große Länge des Spektrometers.

Der Spektrometertank wurde von der Firma MAN-DWE in Deggendorf hergestellt und ist mit 10 m Durchmesser, 23 m Länge und ca. 200 t Gewicht das weltweit größte MAC-E-Filter. Aufgrund der Anforderungen an ein UHV und die hohe Auflösung ist der Tank aus nichtmagnetischem Edelstahl des Typs 1.4429, aus dem auch das Vorspektrometer gefertigt ist. Das Volumen des Spektrometers beträgt 1250 m^3 . In diesem wird mit 6 Turbomolekularpumpen, die zusammen ein Saugvermögen von ca. 10^5 l/s haben, und SAES NEG¹⁰ Getterpumpen ein Vakuum von 10^{-11} mbar erzeugt, was in einem Vakuumbehälter dieser Größenordnung weltweit einmalig ist. Um dieses Vakuum zu erreichen ist es notwendig, den Spektrometertank bei 350°C auszuheizen. Dazu ist der Tank von außen mit einem Leitungssystem für Heiz- und Kühlflüssigkeiten versehen, das in Abb. 2.9 und 2.10 als Rippen am Tank zu erkennen ist.

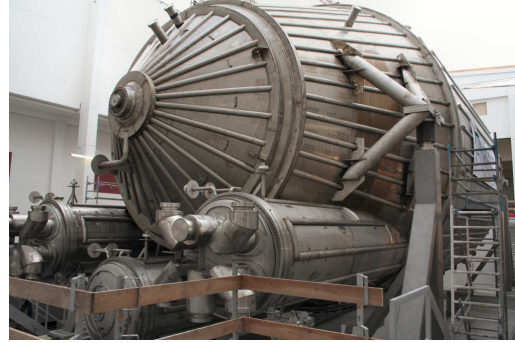
2.4.5 Detektor

Hinter dem Hauptspektrometer, auf das im nächsten Abschnitt genauer eingegangen wird, befindet sich der Detektor, der die transmittierten Elektronen zählt. Verwendet wird eine segmentierte Si-PIN-Diode, welche eine hohe Nachweiseffizienz für niederenergetische

¹⁰ engl. Non Evaporable Getter



a)



b)

Abb. 2.10: Das Hauptspektrometer. a) Das Hauptspektrometer beim Transport vom Rhein zum FZK, hier auf der Durchfahrt durch Leopoldshafen. b) Beim Einhub in die KATRIN Spektrometerhalle am FZK. Zu erkennen sind die Anschlüsse für die Turbomolekularpumpen und die Rippen des Heiz-/Kühlsystems.

Elektronen hat. Die Energieauflösung des Detektors liegt für 18,6 keV Elektronen bei $\Delta E \approx 1$ keV. Um eine möglichst hohe Ortsauflösung zu erreichen ist der Detektor in 148 Segmente aufgeteilt, die ähnlich den Feldern einer Dartscheibe angeordnet sind. Dadurch können Inhomogenitäten der magnetischen und elektrischen Felder in der Analysierebene bei der späteren Datenanalyse berücksichtigt werden [Val04],[Hug07].

2.5 Untergrund

An das KATRIN Experiment werden sehr hohe Anforderungen gestellt, damit es die angestrebte Sensitivität erreichen kann. Diese soll um für die Observable m_ν^2 einen Faktor 100 gegenüber den Experimenten in Mainz und Troitsk erhöht werden, bei gleich bleibender bzw. geringerer Untergrundrate von etwa 10 mHz. Dabei ist KATRIN in jeder Dimension etwa 10 mal größer. Um diese Empfindlichkeit zu erreichen ist es notwendig, alle Untergrundquellen, die auftreten können, so gut wie möglich zu beseitigen.

Der größte Teil des zu erwartenden Untergrunds entsteht dabei in den Spektrometern. Dabei spielen verschiedene Mechanismen eine Rolle, die dazu führen, dass Elektronen im Hauptspektrometer entstehen, die zum Detektor hin beschleunigt werden und dort als vermeintliche Zerfallselektronen aus der Tritiumquelle gezählt werden und so das Spektrum verfälschen. Hier sollen einige Untergrundquellen vorgestellt werden [Fla04],[Mue02].

- Gelangt Tritium aus der Quelle ins Hauptspektrometer, kann es dort zerfallen. Die dabei freigesetzten Elektronen können auf zwei Arten zum Untergrund beitragen. Sie können entweder direkt zum Detektor gelangen oder in Teilchenfallen gespeichert werden, wo sie durch Stoßionisation mit Restgas weitere Elektronen freisetzen können, welche evtl. auf den Detektor treffen können.

- Durch den Zerfall radioaktiver Isotope im Tankmaterial und Emission von Sekundärelektronen nach Durchgang kosmischer Strahlung¹¹ gelangen Elektronen ins Innere des Tanks. Diese können, wie im vorherigen Punkt, entweder direkt auf den Detektor beschleunigt werden, oder Restgas ionisieren.
- An lokalen Spitzen und Graten im Tankmaterial können Elektronen durch Feldemission aufgrund der angelegten Hochspannung aus der Tankoberfläche ins Spektrometerinnere freigesetzt werden.
- Durch die elektrischen und magnetischen Felder entstehen im Spektrometer Teilchenfallen, in denen sowohl Elektronen als auch Ionen gefangen werden können. Die gespeicherten Teilchen können durch Ionisation von Restgas zu einer Erhöhung der Untergrundzählrate beitragen.

Diese im Hauptspektrometer Untergrund erzeugenden Mechanismen können durch mehrere Maßnahmen kompensiert werden. In den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels wurden einige der Maßnahmen bereits erwähnt, sollen aber an dieser Stelle noch einmal übersichtlich dargestellt werden.

- Die Ionisation von Restgas kann durch ein möglichst hohes Vakuum minimiert werden. In den Spektrometern des KATRIN Experiments soll dies 10^{-11} mbar betragen (s. Kap. 2.4.4).
- Um eine Diffusion von T_2 in die Spektrometer zu verhindern, wird das Tritiumgas durch eine mehrstufige Pumpstrecke mit Turbomolekularpumpen in der DPS2-F und über Kryosorption in der CPS aus dem Strahlrohr entfernt (s. Kap. 2.4.2).
- Durch den Einbau einer inneren Elektrode können die in der Tankwand durch kosmische Strahlung und radioaktive Isotope entstehenden Elektronen abgeschirmt und auf die Tankwand zurückreflektiert werden. Die Elektrode kann außerdem durch Anlegen eines Dipolfeldes Teilchenfallen im Spektrometer leeren.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich ausführlich mit dem letzten aufgeführten Punkt, der zu einer hohen Untergrundreduktion führen soll: Der Drahtelektrode.¹²

¹¹Der Fluss kosmischer Myonen beträgt $\Phi \approx 10^2 \frac{\mu}{s \cdot m^2}$. Dadurch treffen bei einer Tankfläche $S_{vessel} = 690$ m² ca. 69000 $\frac{\mu}{s}$ auf den Tank.

¹²Wie in Kap. 3 beschrieben wird, dient die Drahtelektrode nicht allein der Untergrundreduktion. Sie wird u.a. ebenfalls zur Formung des E-Feldes verwendet, um eine optimale $E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$ Transformation zu erhalten.

Kapitel 3

Die Drahtelektrode

In diesem Kapitel wird das Konzept der inneren Drahtelektrode vorgestellt. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird beim KATRIN Experiment durch eine Präzisionsmessung des Verlaufs und des Endpunkts des Tritium β -Spektrums auf die Neutrinomasse geschlossen. Aufgrund der äußerst geringen Zählrate im Endpunktbereich ist diese Messung sehr empfindlich auf jede der in Kap. 2.5 erläuterten Untergrundquellen. Eine wichtige Untergrundquelle sind Elektronen, die aufgrund von kosmischer Strahlung oder radioaktiven Isotopen aus der Spektrometerwand emittiert werden. Diese Untergrundelektronen können durch die Installation einer Drahtelektrode, welche gegenüber der Tankwand auf negativem Potential liegt, unterdrückt werden. Durch Anlegen eines Dipolfeldes an die Elektrode können außerdem Teilchenfallen im Spektrometer geleert werden.

Die Elektrode besteht aus 248 Modulen, in denen insgesamt 8 t Edelstahl und 42,8 km Draht verbaut sind, und wird in geringem Abstand zur Tankwand im Hauptspektrometer montiert. Die Elektrode ist zweilagig aufgebaut, wobei die Drahtlagen auf verschiedenen Potentialen liegen und ist zudem in mehrere Segmente unterteilt, an die je nach Betriebsmodus verschiedene Potentialkonfigurationen angelegt werden. Während der Messphase des Experiments wird sie im Abschirm-Modus betrieben. Die Aufteilung der Module in zwei gegenüberliegende Segmente erlaubt in Messpausen einen Dipol-Modus. Damit die Elektrode nicht selbst wieder zu einer Quelle für Untergrundelektronen wird, ist die innere Drahtlage im Vergleich zur Spektrometeroberfläche nahezu masselos. Das Prinzip der Untergrundabschirmung durch eine Drahtelektrode ist am Mainzer Spektrometer bereits erfolgreich getestet worden.

Da die Observable beim KATRIN Experiment die quadratische Neutrinomasse m_ν^2 ist, muss die Sensitivität des Experiments im Vergleich zum Mainzer und Troitsker Experiment um einen Faktor 100 erhöht werden, um die gewünschte Verbesserung der Mainzer und Troitsker Ergebnisse für m_ν um einen Faktor 10 zu erreichen. Der Untergrund soll dabei auf dem gleichen Niveau wie beim Mainzer und Troitsker Experiment liegen (ca. 12 mHz), bei einem in jeder Dimension um den Faktor 10 größeren Versuchsaufbau und einer Zählrate der Zerfallselektronen im mHz-Bereich. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an das Design und die Fertigung der Drahtelektrode.

3.1 Aufgaben der Drahtelektrode

Die Drahtelektrode des Hauptspektrometers erfüllt verschiedene Aufgaben, die im folgenden kurz dargestellt werden.

Untergrundreduktion: Der Hauptuntergrund des KATRIN Experiments besteht aus Elektronen, die durch kosmische Strahlung oder radioaktive Isotope im Material des Tanks entstehen. Durch die magnetischen Felder erfährt ein Elektron, das durch einen dieser Prozesse aus der Tankoberfläche emittiert wird, eine Lorentz-Kraft, die das Elektron senkrecht zu den magnetischen Feldlinien auf eine Kreisbahn zwingt. Diese magnetische Abschirmung sorgt dafür, dass der Anteil der Elektronen, die ins Innere des Spektrometers gelangen, nur etwa 10^{-7} bis 10^{-5} beträgt. Die Hauptaufgabe der Drahtelektrode ist die Abschirmung des Spektrometerinneren gegen den verbliebenen Anteil der Elektronen, die die magnetische Abschirmung überwindet. Diese Elektronen können bei der äußerst geringen Zählrate der Tritium- β -Zerfallselektronen im letzten eV des Spektrums einen signifikanten Untergrund bilden, der das Ergebnis des Experiments stark beeinflussen kann.

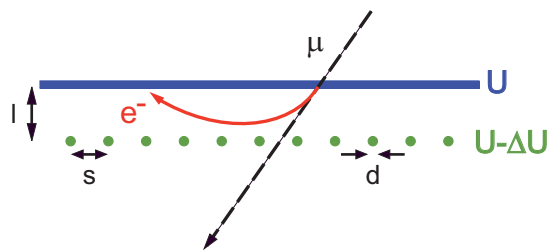


Abb. 3.1: **Prinzip der Untergrundreduktion durch eine Drahtelektrode.** Das aus der Tankwand austretende Elektron wird vom negativeren Potential der Drähte auf die Wand reflektiert. Dabei ist: l Abstand der Drähte zur Tankwand, s : Abstand zw. zwei Drähten, d : Drahtdurchmesser, $\Delta U > 0$: Potentialdifferenz zw. Drähten und Tankwand.

Das Prinzip der Untergrundreduktion ist in Abb. 3.1 dargestellt. Zwischen der Drahtelektrode und der Tankelektrode liegt eine Spannung $\Delta U > 0$ an, wobei die Drahtelektrode auf dem negativeren Potential liegt. Ein aus der Tankwand emittiertes Elektron wird so auf die Tankwand zurückreflektiert. Dieses Konzept erfordert eine nahezu masselose Innenelektrode, da sie sonst selbst zu einer Untergrundquelle werden würde. Im Fall einer Drahtelektrode ist dies mit der Forderung nach einem möglichst geringen Drahtdurchmesser d gegenüber dem Drahtabstand s gleichzusetzen. Da die innere Elektrode des KATRIN Experiments modular aufgebaut ist, bilden nicht nur die Drähte, sondern auch die Haltestrukturen weitere Quellen für Untergrundelektronen. Insbesondere wurde bei den Edelstahlbögen, in denen die Drähte mit kleinen Keramiken gehalten werden, durch eine kammartige Struktur (s. Abb. 3.5) ein Design verwirklicht, bei dem nur wenig Material nicht durch die innere Drahtlage abgeschirmt ist. Diese Methode wurde bereits erfolgreich am Mainzer Spektrometer getestet [Mue02],[Fla04].

Entleerung von Teilchenfallen: Wie erwähnt kann die Drahtelektrode auch im Dipol-Modus betrieben werden. Diese Betriebsart dient in Messpausen der Entleerung von Teil-

chenfallen, die durch die elektromagnetischen Felder erzeugt werden können. Dazu erzeugen die parallel zur Spektrometerachse in zwei gleich große Segmente aufgeteilten Module der Elektrode ein elektrisches Dipolfeld \vec{E} , mit dem über die sogenannte $\vec{E} \times \vec{B}$ -Drift im Fallenvolumen gespeicherte Teilchen entfernt werden können. Die $\vec{E} \times \vec{B}$ -Drift tritt bei der Bewegung geladener Teilchen in nicht parallelen elektrischen und magnetischen Feldern auf.

$$v_{drift} = c \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (3.1)$$

Die durch Gleichung (3.1) definierte Driftgeschwindigkeit ist dabei senkrecht zu den Feldern \vec{E} und \vec{B} . Sie sorgt für eine zusätzliche Bewegungskomponente der gespeicherten Teilchen, die, falls sie genügend groß ist, die Teilchen aus dem Spektrometerinneren entfernt.

Abschirmung des Tankpotentials: Die an der Drahtelektrode anliegende Spannung U_{wire} hat, von der Symmetrieachse des Spektrometers aus betrachtet, eine abschirmende Wirkung auf das am Spektrometertank anliegende Potential U_{vessel} . Daher wird sich in einigem Abstand zu diesen beiden Potentialen ein bis zur Tankmitte nahezu konstantes effektives Potential U_{eff} einstellen:

$$U_{eff} = U_{wire} + \frac{U_{vessel} - U_{wire}}{S}, \quad (3.2)$$

wobei der *Abschirmfaktor* S gegeben ist durch [Val04]:

$$A \approx 1 + \frac{2\pi l}{s \cdot \ln \frac{s}{\pi d}}. \quad (3.3)$$

Die Größe des Abschirmfaktors hängt dabei vom Drahtdurchmesser d , dem Abstand s der Drähte zueinander und dem Abstand zwischen den Drähten und der Tankwand ab.

Da das Analysierpotential U_{analys} dem effektiven Potential U_{eff} entspricht, sollte dieses Potential möglichst schwankungsfrei sein. Die Schwankungen von U_{analys} sind gegeben durch:

$$\Delta U_{analys} \equiv \Delta U_{eff} = \Delta U_{wire} \left(1 - \frac{1}{S}\right) + \frac{1}{S} \Delta U_{vessel}. \quad (3.4)$$

Dabei stellt hier besonders der Anteil ΔU_{vessel} eine erhebliche Schwankungsquelle dar, weil durch direkt an die Spektrometerhülle angeschlossene Instrumente und Vakuumpumpen ein starkes elektrisches Rauschen zu erwarten ist. Damit das effektive Potential dadurch möglichst wenig gestört wird, ist es nach Gleichung (3.4) notwendig, das Tankpotential möglichst stark abzuschirmen. Dies wird durch einen hohen Abschirmfaktor erreicht, der wie Gleichung (3.3) zeigt, durch einen großen Drahtdurchmesser, sowie einen möglichst großen Abstand zur Tankwand und einen kleinen Abstand der Drähte zueinander erreicht werden kann.

Vermeidung von Penningfallen: Durch ein entsprechendes geometrisches Design der Module der Drahtelektrode können Penningfallen, die sich in den Randbereichen des Spektrometers bilden können, vermieden werden. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Form der Module, die sich direkt in der Umgebung der Zugangsflansche des Strahlengangs befinden¹. Zudem kann auch die Einführung einer weiteren Elektrode zwischen der Erdelektrode (Ring 01) und dem Modulring 02 (ehem. Vollmetall-Elektrode, s. Abb. 3.4), einer sogenannten Penningelektrode, die Bildung von Fallen vermeiden, oder zumindest die Tiefe der Fallen unter einen kritischen Wert senken [Hug07].

Einstellung der optimalen Energietransformation: Ist die Elektrode in mehrere Abschnitte unterteilt, kann durch Anlegen verschiedener Potentiale an die einzelnen Sektionen das \vec{E} -Feld derart an das \vec{B} -Feld im Spektrometer angepasst werden, dass eine optimale $E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$ -Transformation möglich ist.

Die oben genannten Aufgaben stellen teilweise widersprüchliche Anforderungen an das Design der Drahtelektrode. Damit sie trotzdem alle Anforderungen erfüllt, besteht die Elektrode aus zwei Drahtlagen (s. Abb. 3.2). Die innere Drahtlage schirmt das Spektrometerinnere gegen Elektronen aus der Tankwand, der äußeren Drahtlage und einem Großteil der Haltestruktur ab. Durch einen möglichst kleinen Drahtdurchmesser kommt diese dem Ideal einer masselosen Elektrode nahe. Die äußere Drahtlage schirmt ebenfalls Elektronen aus der Tankwand ab. Mit ihrem größeren Drahtdurchmesser eignet sie sich auch zur Erzeugung der starken Dipolfelder zur Leerung von Teilchenfallen. Es zeigt sich, dass sich durch ein zweilagiges Elektrodensystem ein höherer Abschirmfaktor erzielen lässt, was der Forderung nach einer möglichst guten Abschirmung des Tankpotentials zugute kommt.

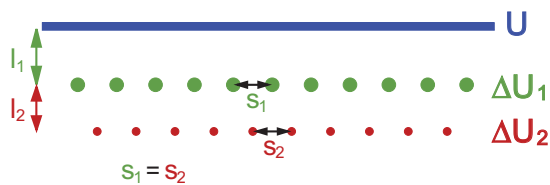


Abb. 3.2: **Zweilagige Drahtelektrode.** Schematische Darstellung einer zweilagigen Drahtelektrode mit um den halben Drahtabstand $\frac{d}{2}$ zueinander verschobenen Drahtlagen der Durchmesser d_1 und d_2 auf unterschiedlichen elektrischen Potentialen.

Der Tank liegt gegenüber den Drahtlagen auf positiverem Potential. Die Potentialdifferenz zwischen dem Tank und der äußeren Lage sei ΔU_1 . Die Spannungsdifferenz der beiden Drahtlagen sei ΔU_2 , wobei die innere Drahtlage gegenüber der äußeren auf negativerem Potential liegt. Nach Gleichung (3.2) lautet das effektive Potential, das sich schon in geringem Abstand zur äußeren Drahtlage einstellt:

$$U_{eff,outerlayer} = U_{outerlayer} + \frac{U_{vessel} - U_{outerlayer}}{S_1}. \quad (3.5)$$

¹Modulring 01, 02 und 03, s. Abb. 3.4

Durch den Einbau der zweiten Drahtlage wird das sich im Inneren des Spektrometers einstellende effektive Potential U_{eff} wie folgt beeinflusst:

$$U_{eff} = U_{innerlayer} + \frac{U_{eff,outerlayer} - U_{innerlayer}}{S_2}. \quad (3.6)$$

Setzt man die Gleichungen (3.6) und (3.5) ineinander ein, erhält man das resultierende effektive Potential U_{eff} im Inneren des Spektrometers in Abhängigkeit der Abschirmfaktoren S_1 und S_2 , sowie der an den Drahtlagen und an der Tankelektrode anliegenden Spannungen $U_{innerlayer}$, $U_{outerlayer}$ und U_{vessel} :

$$U_{eff} = U_{innerlayer} + \frac{1}{S_2} \cdot \left(U_{outerlayer} + \frac{U_{vessel} - U_{outerlayer}}{S_1} - U_{innerlayer} \right). \quad (3.7)$$

Falls beide Drahtlagen auf gleichem Potential $U_{electrode} = U_{innerlayer} = U_{outerlayer}$ liegen, vereinfacht sich Gleichung (3.7) zu

$$U_{eff} = U_{electrode} + \frac{U_{vessel} - U_{electrode}}{S}. \quad (3.8)$$

Dabei ist $S = S_1 \cdot S_2$ der gesamte elektrische Abschirmfaktor.

3.2 Aufbau der Drahtelektrode

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Elektrode beschrieben. Da der einzige Zugang zum bereits fertigen Spektrometertank die Pumpenschlüsse für die Vakuumpumpen sind, die einen Durchmesser von ca. 1700 mm haben, ist die innere Elektrode modular aufgebaut. Die modulare Bauweise ermöglicht zudem eine höhere Positionierungsgenauigkeit der ein-

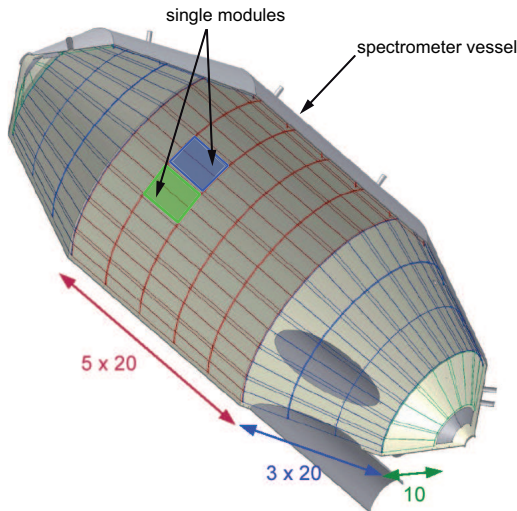


Abb. 3.3: Aufteilung der Drahtelektrode (1). Die Drahtelektrode ist modular aufgebaut und in Ringe und Module unterteilt. Im zylindrischen Teil des Spektrometers besteht sie aus fünf Ringen mit je 20 Modulen und im flachen konischen Teil auf jeder Seite aus drei Ringen mit 20 Modulen pro Ring. Für den steilen konischen Teil sind zwei Ringe geplant, die aus 10 bzw. 4 Modulen bestehen. Das endgültige Design steht hier jedoch noch nicht fest.

zelenen Drähte, die sich auf die Homogenität des Analysierpotentials auswirkt. Allerdings ist dadurch auch eine massivere Haltestruktur notwendig, deren Material ebenfalls wieder eine Quelle für Untergrundelektronen, erzeugt durch kosmische Strahlung und radioaktive Isotope, darstellt. Daher wurde die tragende Struktur derart entwickelt, dass möglichst wenig Material durch die innere Drahtlage unabgeschirmt bleibt, was sich insbesondere auf die Form der Halterung dieser Drähte auswirkt. Dieses sollte möglichst unmagnetisch sein, um das magnetische Führungsfeld nicht zu stören.

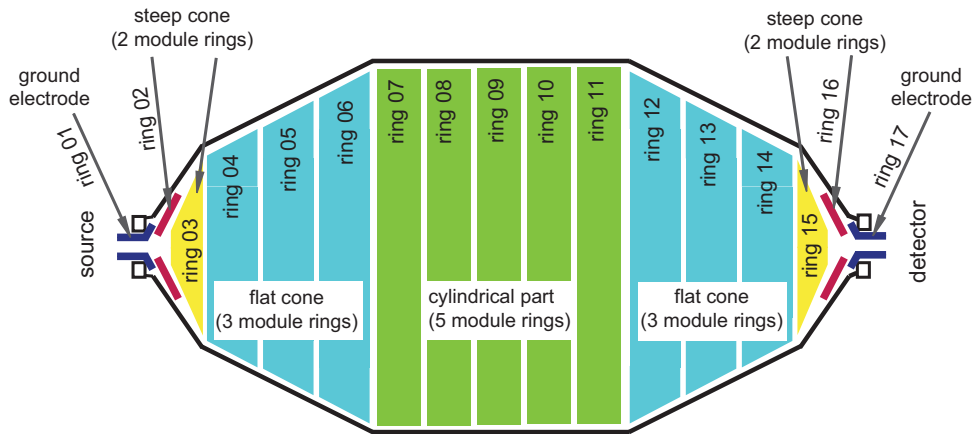


Abb. 3.4: **Aufteilung der Drahtelektrode (2)**. Die einzelnen Modulringe der Elektrode sind wie abgebildet nummeriert. Ring 02 und 16 sind die ehemalige Vollmetall-Elektrode, die durch die Einführung einer sog. Penning-Elektrode (nicht dargestellt) nun auch aus Drähten bestehen wird. Ring 01 und 17 sind Erdelektroden.

Ein Zylindermodul der Elektrode hat eine Größe von ca. $1500 \cdot 1800 \cdot 250 \text{ mm}^3$ und wiegt ca. 20 kg. Alle anderen Module haben ähnliche Maße. Dadurch kann ein Modul manuell von zwei Personen montiert werden. Abb. 3.5 zeigt den Prototyp² eines Zylindermoduls, Abb. 3.6 das finale Design. Die Module sind jeweils aus zwei kammartigen Strukturen, drei bzw. vier Edelstahlstreben mit C-Profil, 68 bis 120 Drähten in zwei Lagen und pro Draht zwei Keramikisolatoren aufgebaut³. Die „Kämme“ bilden zusammen mit den C-Profilen die tragende Grundstruktur eines Moduls. Sie bestehen aus Edelstahl des



Abb. 3.5: **Prototypmodul**. Das Bild zeigt ein Foto des von A. Gebel gebauten Prototypmoduls.

²Zur Entwicklung und Bau des Prototyps siehe [Geb07].

³Die Module im kleinsten Ring des flachen Konus (Ring 04) bestehen aus drei C-Profil Streben und 34 Drähten pro Lage, die Module des Rings 05 aus drei C-Profilen und 42 Drähten pro Lage, die Module des Rings 06 aus vier C-Profilen und 52 Drähten pro Lage und ein Zylindermodul besteht aus vier Streben und 60 Drähten pro Drahtlage.

Typs 1.4435. Die Drähte werden in den Keramikisolatoren (Friatec Degussit Al23) fixiert und zwischen den Kämmen aufgespannt. Die von der Tankmitte aus gesehen äußere der beiden Drahtlagen besteht aus 0,3 mm starkem Edelstahldraht des Typs 1.4404, die innere aus 0,2 mm starkem Draht aus dem gleichen Material, beide von der Firma Vogelsang geliefert. An die Drahtlagen werden verschiedene elektrische Potentiale gelegt, die das weiter außen liegende Tankpotential, sowie die Untergrundelektronen abschirmen sollen. Bei der 0,3 mm Lage sind dies $U_{0,3\text{mm}} = U_{\text{vessel}} - 100 \text{ V}$ und bei der 0,2 mm Lage $U_{0,2\text{mm}} = U_{\text{vessel}} - 200 \text{ V}$.

Die Keramikisolatoren, in denen die Drähte befestigt werden, haben einen Durchmesser von 2 mm. In der Mitte der Keramik ist ein Loch mit 0,5 mm Durchmesser, um das kreisförmig fünf weitere Löcher mit ebenfalls 0,4 mm Durchmesser angeordnet sind. Wie in Abb. 3.9 (a),(b) zu sehen ist, wird der Draht in der Keramik gehalten, indem er durch das mittlere Loch gefädelt, danach umgebogen und in eines der äußeren Löcher geschoben wird. Die Drähte sind im elastischen Bereich⁴ gespannt, die innere 0,2 mm dicke Lage

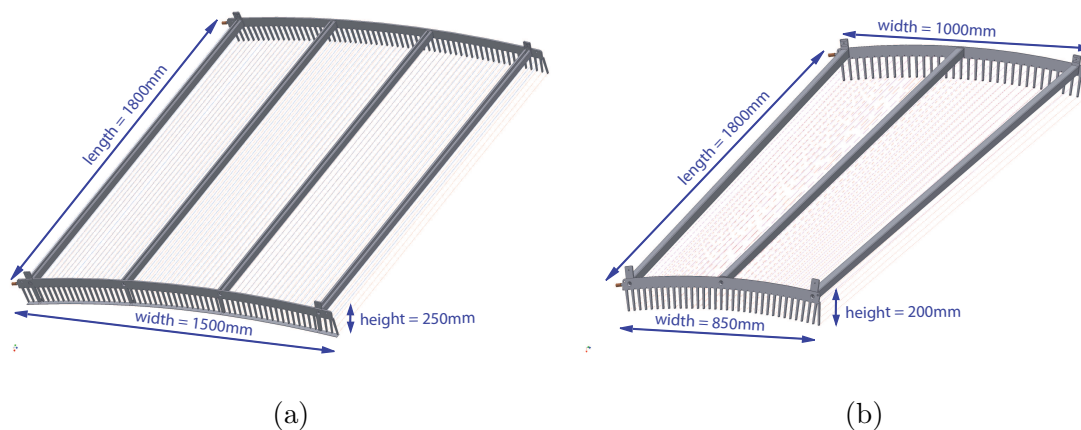


Abb. 3.6: **CAD Grafiken der Module.** (a) Aktuelles Design der Zylindermodule. Zu erkennen sind die vier breiten Zähne zur Befestigung der Abschirmbleche. (b) Design eines Konusmoduls des Rings 04.

mit 5 N, die äußere 0,3 mm dicke Lage mit 10 N. Beide Drahtlagen sind um den halben Drahtabstand $\frac{d}{2}$ (s. Abb. 3.7) gegeneinander verschoben und haben sowohl im Zylinderteil als auch im flachen Konus einen Abstand von 70 mm.

Trotz der Abschirmung durch die innere Drahtlage treten Inhomogenitäten des elektrischen Potentials U_{eff} entlang des Durchmessers des Spektrometers auf. In der Analysierebene stört schon ein kleiner Potentialdurchgriff die Homogenität des Analysierpotentials erheblich. Dieser Durchgriff der äußeren Potentiale, $U_{\text{outerlayer}} = U_{0,3\text{mm}}$ der äußeren Drahtlage und U_{vessel} des Tanks tritt besonders stark an Stellen auf, an denen diese Potentiale nicht von der inneren Drahtlage abgeschirmt werden. Dies ist zwischen zwei aneinandergrenzen-

⁴Der elastische Bereich endet beim 0,3 mm Draht bei etwa 28 N und beim 0,2 mm Draht bei etwa 13 N [Geb07].

Tabelle 3.1: Moduldaten

Aufbau der Drahtelektrode	248 Module in 15 Ringen
Aufbau eines Moduls	
2 Käbme (34 – 60 Zähne)	Material: Edelstahl 1.4435
68 – 120 Dräthe	Material: Edelstahl 1.4404
3 – 4 C-Profil Streben	Material: Edelstahl 1.4435
Zylinderteil	
Anzahl der Modulringe	5
Anzahl der Module pro Ring	20
Anzahl der Drahtlagen	2
Anzahl der Drähte pro Modul	120 (60 in jeder Lage)
Drahtdurchmesser der inneren Lage	0,2 mm
Drahtdurchmesser der äußeren Lage	0,3 mm
Abstand der Drahtlagen	70 mm
Maße der Module	ca. 1800 x 1500 x 250 mm ³
Flach konischer Teil	
Anzahl der Modulringe	3 auf jeder Seite des Spektrometers
Anzahl der Module pro Ring	20
Anzahl der Drahtlagen	2
Anzahl der Drähte pro Modul	68, 84, 104
Drahtdurchmesser der inneren Lage	0,2 mm
Drahtdurchmesser der äußeren Lage	0,3 mm
Abstand der Drahtlagen	70 mm
Maße der Module	ca. 1800 x 850 x 200 mm ³ bis ca. 1800 x 1500 x 250 mm ³
Steil konischer Teil	
Anzahl der Modulringe	2 auf jeder Seite des Spektrometers
Anzahl der Module pro Ring	10 im größeren, 4 im kleineren Ring
Anzahl der Drahtlagen	1
Anzahl der Drähte pro Modul	noch nicht festgelegt
Drahtdurchmesser	voraussichtlich 0,3 mm
Maße der Module	Design noch nicht abgeschlossen

den Modulringen der Fall. Um auch an diesen Stellen den Potentialdurchgriff zu minimieren wird an einem der Module ein Kompensationsblech montiert, das sich, betrachtet man den ganzen Modulring, wie ein Fassreifen über die Spalte zwischen den Modulringen zieht. Zudem schirmen die Potentialbleche, die auf dem gleichen Potential wie die 0,2 mm Drähte liegen auch das Potential der Kammspitzen ab. Die Bleche werden an einem der beiden

angrenzenden Käme an vier breiteren Zähnen montiert (s. Abb. 3.6 (a) und Abb. 3.8). Bei den Modulen der konischen Teile des Spektrometers ist diese zusätzliche Abschirmung nicht nötig, da hier der Potentialdurchgriff für die Funktion des Spektrometers weniger kritisch ist [Val08].



Abb. 3.7: **Drähte im Modul.** Zu erkennen sind die Keramikisolatoren, in denen die Drähte fixiert sind. Die beiden Drahtlagen sind um den halben Drahtabstand $\frac{d}{2}$ gegeneinander verschoben.

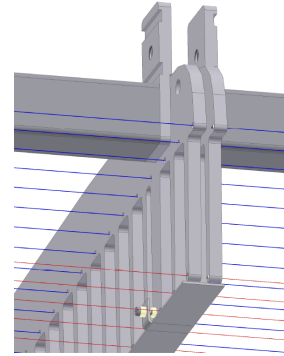
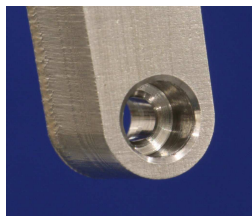
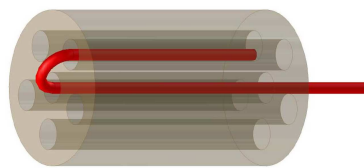


Abb. 3.8: **Modulübergang mit Abschirmblech.** An den Übergängen zweier Zylindermodulringe wird zur Abschirmung des Tank- und Kammpotentials ein Abschirmblech montiert, das auf $U_{innerlayer}$ liegt.

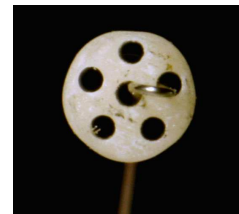
Abbildungen 3.3 und 3.4 zeigen die Aufteilung der Drahtelektrode im Hauptspektrometer. Insgesamt werden 248 Module, die in mehrere Ringe unterteilt sind, im KATRIN Hauptspektrometer montiert. Im Zylinderteil ist die Elektrode in fünf Ringe segmentiert, von denen jeder aus 20 Modulen besteht. Die sich an den zylindrischen Teil des Spektrometers anschließenden flachen Koni werden jeweils mit drei Ringen mit ebenfalls je 20 Modulen ausgestattet. Das Design der Module für den zylindrischen und den flach konischen Abschnitt ist abgeschlossen. Der steile Konus wird ebenfalls mit einer Drahtelektrode bestückt, die aus zwei Modulringen mit 4 (Ring 02 u. 16) bzw. 10 (Ring 03 u. 15) Modulen besteht. Insgesamt werden über 8 t Edelstahl in Form von 496 Kämmen, rund 800 C-Profilen und 42,8 km Draht, sowie ca. 48.000 Keramikisolatoren in das Hauptspektrometer eingebaut. Die Module werden mit jeweils vier Rollensegmenten ausgestattet, die eine



(a)



(b)



(c)

Abb. 3.9: **Bohrung und Keramik.** (a) Bohrung für die Keramikisolatoren, (b) CAD-Grafik der Fixierung eines Drahtes in einer Keramik, (c) Foto eines in eine Keramik eingefädelt Drahtes.

Montage der Module in einem dafür in den Spektrometertank eingebauten Schienensystem ermöglichen (s. Abb. 3.10). Die Rollensegmente werden am FZK nach der Lieferung der fertigen Module an speziellen Schnittstellen der C-Profile montiert, die gegen das am Schienensystem anliegende Tankpotential isoliert sind. Die elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Modulen erfolgt über spezielle Verbindungen [Pra09], deren Design zum Zeitpunkt dieser Diplomarbeit noch nicht abgeschlossen ist.

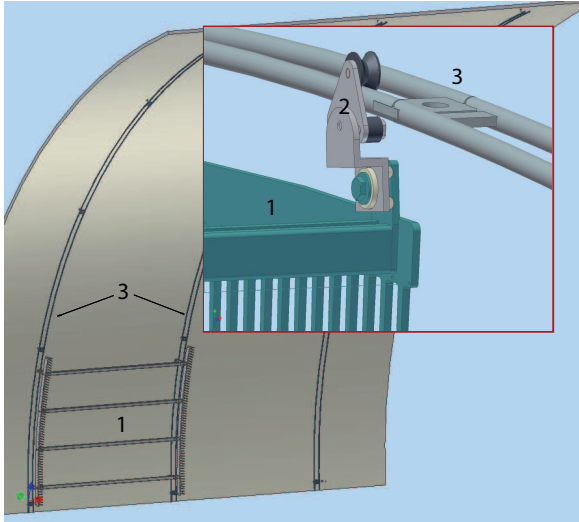


Abb. 3.10: **Das Schienensystem.** Die Grafik zeigt die geplante Anbringung der Elektrodenmodule im Hauptspektrometer. Es wird ein Schienensystem verwendet, bei dem die Module einzeln vom oberen Teil der Schienen nach unten abgelassen werden. Dargestellt sind: 1) Elektrodenmodul, 2) Rollensegment, 3) Führungsschienen.

3.3 Bezeichnungssystem

Innerhalb der KATRIN Kollaboration wurde ein Bezeichnungssystem entwickelt, das eine systematische Katalogisierung der einzelnen Komponenten des gesamten Experiments ermöglicht [Bor07]. Dieses Bezeichnungssystem soll hier, soweit es die zu fertigenden Elektrodenmodule betrifft, erläutert werden. Eine ausführliche Auflistung der einzelnen Bezeichnungen der Elektrodenkomponenten ist in Tabelle A.1 in Anhang A.1 zu finden. Diese beinhaltet auch die Formnummer der einzelnen Komponenten, die nur die verschiedenen zu fertigenden geometrischen Formen berücksichtigt, nicht aber die spätere Position im Spektrometer.

Eine Nummer des KATRIN Nummerierungsschemas setzt sich aus mehreren Blöcken zusammen, welche Informationen über die Projektuntergruppe, die Art des Bauteils und die Position im experimentellen Aufbau enthält. Die letzten beiden Zahlenblöcke stehen den Projektuntergruppen zur freien Verfügung. In Fall der Drahtelektrode setzt sich eine Nummer wie folgt zusammen:

$$434 - EEL - 3 - 0401 - 0525$$

Für die Komponenten der Drahtelektrode sind die ersten drei Blöcke dieser Nummer immer gleich. Sie stehen für:

- **434:** Innere Elektrode
- **EEL:** Steht für Electro-Static Electrode
- **3:** Gibt an, dass es sich um Komponenten handelt, die Kontakt zum inneren Volumen des Strahlengangs haben, in dem die Elektronen transportiert werden.

Die letzten beiden Blöcke beinhalten die Position der einzelnen Komponenten im Spektrometer und geben Aufschluss über die Art der Komponente. In diesem Beispiel ist:

- **0401:** Gibt die Position im Spektrometer an. Die ersten beiden Ziffern stehen für den Modulring innerhalb des Spektrometers. Die Ziffern 04 stehen in diesem Fall für den ersten Modulring im flachen Konus. Die Ziffern 01 geben die Position des Kamms im Modul an: 01 steht für den quellenseitigen Kamm, 12 für den detektorseitigen. Andere Ziffern bezeichnen verschiedene Komponenten des entsprechenden Moduls, z.B. steht 08 für die C-Profile. Die Endziffern 00 bezeichnen komplette Module.
- **0525:** Der letzte Zahlenblock enthält Informationen über das Bauteil. Ist die erste Ziffer eine 0 oder 1, so bezeichnet die Nummer eine Konstruktionszeichnung. Die zweite Ziffer (1-9) stuft in diesem Fall die Verwechslungsgefahr mit ähnlichen Teilen ein und die letzten beiden Ziffern geben die Fertigungsform des Bauteils an. Viele der Komponenten haben dieselbe Grundform und werden z.B. erst durch verschieden angeordnete Bohrungen zu spiegelverkehrten oder verschiedenen Bauteilen. Beispielsweise sind die Module des Rings 04 bis auf die Bohrungen mit denen in Ring 14 identisch. Beim Wasserstrahlschneiden werden für beide Ringe die gleichen Kammgrundformen geschnitten (in diesem Fall Form 25 und 26 für den kleinen und großen Kamm der Module). Alle Formnummern und die zugehörigen Beschreibungen sind in Tabelle A.1 und A.1 in Anhang A.1 zu finden.

Ist die erste Ziffer des letzten Blocks eine 5, so ist die folgende Nummer eine Seriennummer. Diese sind auf den Bauteilen zu finden, die einzeln einer Qualitätskontrolle unterzogen werden (z.B. auf den Kämmen). Sie ermöglichen eine eindeutige Zuordnung der Messergebnisse zu den einzelnen Komponenten. Die in Kap. 6.3 beschriebene Datenbank der QA-Ergebnisse ist nach diesen Nummern geordnet.

3.4 Anforderungen an Produktion und Qualitätskontrolle

Nachdem der Aufbau der Elektrode beschrieben wurde, soll nun auf die Anforderungen eingegangen werden, die an die Materialien und die Fertigungsgenauigkeit der Module gestellt werden. Diese Anforderungen ergeben sich aus Simulationen zum elektromagnetischen Design der Drahtelektrode [Val04],[Hug07] und aus der UHV-Kompatibilität. Es zeigt sich, dass die Fertigungsgenauigkeit der Elektrodenmodule hohen Standards genügen muss.

In Kap. 2.2 wurde erwähnt, dass das Minimum der Longitudinalenergie E_{\parallel} der transmittierten Zerfallselektronen in der Analysierebene des Spektrometers liegen soll. Wird ein Minimum der Longitudinalenergie E_{\parallel} schon vor der Analysierebene erreicht („frühe Retardierung“), verschlechtert sich die Energieauflösung des Spektrometers, da die Transformation der Transversalenergie E_{\perp} zu E_{\parallel} noch nicht abgeschlossen ist. Simulationen an einem vereinfachten Modell der Drahtelektrode haben gezeigt [Val08], dass dieser Effekt sehr stark von der Positionsgenauigkeit der Drähte und der Drahthalterstrukturen abhängt. Bereits geringe radiale Abweichungen der Drahtpositionen führen zu einem Minimum von E_{\parallel} vor der Analysierebene. Ziel ist es, dass der Verlust an Auflösung bedingt durch diesen Effekt bei maximal 40 meV liegt. Das korrespondiert mit einer Positionierungsgenauigkeit der Drähte von 0,2 mm und einem Durchhang, bedingt durch das Eigengewicht der Drähte, von weniger als 0,2 mm. Auch ein gleichmäßiger Abstand der Drahtlagen zueinander ist wichtig, da dieser Einfluss auf die Homogenität des Abschirmfaktors hat.

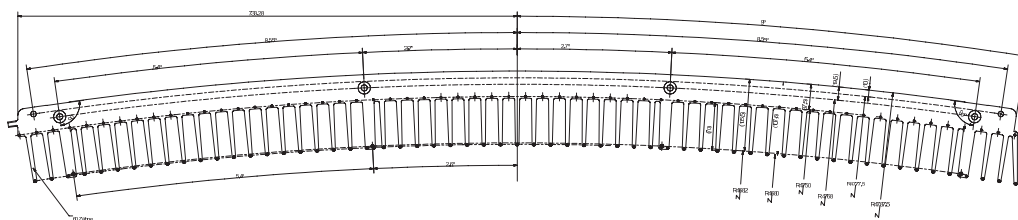


Abb. 3.11: Zylinderkamm (Technische Zeichnung).

Zum anderen bringt das im Hauptspektrometer zu erzeugende UHV hohe Anforderungen an die Vakuumtauglichkeit der zu verwendenden Materialien mit sich, zu denen besonders eine sehr geringe Ausgasrate von $< 2 \cdot 10^{-13} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ gehört [Wol07]. Zur Gewährleistung dieser Rate wird das KATRIN Hauptspektrometer mehrere Ausheizzyklen durchlaufen, um letztlich ein Vakuum im 10^{-11} mbar Bereich zu erreichen. Die Materialien müssen demnach alle ähnliche Ausdehnungskoeffizienten haben, damit die Gesamtgeometrie der Drahtelektrode nicht durch verschieden starke Ausdehnungen der Komponenten verändert wird. Insbesondere dürfen durch die Ausheizzyklen keine Schäden an der Elektrode entstehen. Daher müssen alle verwendeten Materialien Ausheiztests unterzogen werden, die sicherstellen, dass sie den Belastungen beim Erhitzen standhalten. Verschiedene Tests zum Ausheizverhalten der Drähte wurden im Rahmen der Diplomarbeiten von A. Gebel [Geb07] und M. Reinhardt [Rht07] durchgeführt. Bestandteil dieser Arbeit sind ähnliche Ausheiztests der Käme und der C-Profile, deren Ergebnisse in den Kapiteln 5.4.2 und 5.4.3 vorgestellt werden.

Wie schon beschrieben, soll die Drahtelektrode den Elektronenuntergrund des Tanks abschirmen. Durch radioaktive Einschlüsse im Material und kosmische Strahlung können auch die Elektrodenteile, die nicht abgeschirmt sind, Elektronen ins Spektrometerinnere emittieren. Aus diesem Grund müssen die verwendeten Stähle eine geringe Restradioaktivität aufweisen um diesen Effekt zu umgehen. Bezüglich der Drähte wurden ebenfalls im Rahmen der Diplomarbeiten von A. Gebel und M. Reinhardt Radioaktivitätsmessungen durchgeführt [Geb07],[Rht07]. Mit Hilfe eines Germanium-Detektors, der einen Durchmes-

ser von 5 cm und eine Länge von 4 cm hat und mit einer Sperrspannung von $U = 2000$ V betrieben wurde, ist das α -Spektrum der Drahtmaterialien im Bereich von 0 keV - 1800 keV vermessen worden. Die festgelegte Obergrenze für die Aktivität bestimmter Strahler des Spektrometermaterials liegt bei 0,4 Bq/kg für $^{137}_{55}\text{Cs}$ und 2 Bq/kg für $^{60}_{27}\text{Co}$ [Dra02]. Die gemessenen Obergrenzen der Aktivität des Drahtmaterials liegen unter den geforderten Grenzwerten [Rht07]:

	0,2 mm Draht (Vogelsang)	0,3 mm Draht (Vogelsang)
$A(^{137}_{55}\text{Cs}_{662\text{keV}})$	$0,030 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$	$0,016 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$
$A(^{60}_{27}\text{Co}_{1173\text{keV}})$	$0,036 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$	$0,060 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$
$A(^{60}_{27}\text{Co}_{1332\text{keV}})$	$0,103 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$	$0,019 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$

An kleinen Spitzen und Graten im Material der Elektrode ist die elektrische Feldstärke bei angelegter Hochspannung besonders hoch. Dadurch können an solchen Stellen Elektronen durch Feldemission erzeugt werden. Um dies zu vermeiden werden die Kämmen und die C-Profile, bevor sie zu Modulen zusammengesetzt werden, elektropoliert. Dieses Verfahren sorgt für eine sehr saubere und ebene Oberfläche der Materialien. Die Drähte wurden im Vorfeld mit einem Mikroskop auf nicht tolerierbare Unebenheiten geprüft. Die verwendeten Stähle müssen zudem möglichst unmagnetisch ($\mu_r \approx 1$) sein, damit sie die elektrischen und magnetischen Führungsfelder nicht beeinflussen. Der Stahl des Typs 1.4435, aus dem die Kämmen und C-Profile gefertigt werden hat eine Permeabilitätszahl von $\mu_r \approx 1,02$. Die Drähte sind aus Edelstahl des Typs 1.4404 mit einem $\mu_r \leq 1,2$ [Geb07],[Rht07]. Die bei den Drähten etwas höheren Werte mit $1,06 \lesssim \mu_r \lesssim 1,18$ sind bei insgesamt 25 kg Draht verglichen mit ca. 8 t Kammmaterial nicht problematisch.

Das folgende Kap. 4 beschäftigt sich mit dem Aufbau eines Systems zur Qualitätssicherung der Elektrodenmodule, das die Einhaltung der Präzisionsanforderungen während der Produktion überprüfen soll. Kap. 5 stellt erste Messergebnisse dieses Systems bezüglich der Fertigungsgenauigkeit der Modulkomponenten vor.

Kapitel 4

Aufbau der Qualitätskontrolle

In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Entwicklung der Qualitätskontrolle für die Elektrodenmodule des KATRIN Hauptspektrometers beschrieben. Ziel war es, ein System zu entwerfen und aufzubauen, welches die Elektrodenmodule für das Katrin Hauptspektrometer auf deren Fertigungsgenauigkeit prüft. Dazu gehören folgende Aufgaben:

- Tests in der Prototypenphase.
- Stichprobenartige Kontrollen der Bauteile zwischen den einzelnen Fertigungsschritten.
- Endkontrolle der gefertigten Module.
- Dokumentation der Ergebnisse der Qualitätskontrolle.

Ursprünglich war zusätzlich angedacht, dieses System auch für halbautomatische Produktionsschritte zu nutzen, dies wurde aber aufgrund der zu hohen Komplexität der Arbeitsschritte fallen gelassen. Die in 3.4 gestellten Anforderungen an die Drahtelektrode bestimmen gleichzeitig auch Anforderungen an das System, das deren Einhaltung bei der Modulproduktion sicherstellen soll. Da die Modulproduktion aufgrund der hohen Sauberkeitsanforderungen für das im Hauptspektrometer des KATRIN Experiments zu erzeugende UHV in einem Reinraum stattfindet, muss auch das System zur Qualitätskontrolle in diesem Reinraum aufgebaut sein. Aus diesen Punkten ergeben sich weitere Anforderungen an das System:

- Genügend hohe Auflösung um Vorgaben von $\pm 0,2$ mm Positionierungsgenauigkeit sicherstellen zu können.
- Reinraumtauglichkeit für Reinräume der Klasse 7.¹

¹s. Kap. 6.1

- Das Messsystem darf die Elektrodenkomponenten nicht verunreinigen oder beschädigen, eine Qualitätskontrolle sollte möglichst kontaktfrei durchgeführt werden.

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt auf der Automatisierung eines 3D-Messtisches mit einem LabVIEW-gesteuerten Kamerasystem. Weitere Aspekte der Qualitätssicherung werden in den Arbeiten von M. Reinhardt [Rht07] und M. Prall [Pra09] bearbeitet.

Ausgehend von einem gebrauchten, manuell betriebenen 3D-Messtisch der Firma Stiefelmayer wurde ein halbautomatisches Messsystem zur Qualitätskontrolle der zu produzierenden Elektrodenmodule für das KATRIN Hauptspektrometer aufgebaut. Die Qualitätskontrolle wird während der Produktion der Module die in Abschnitt 3.4 geforderte Positionierungsgenauigkeit der Drähte von $\pm 0,2$ mm sicherstellen. Zudem kann das Messsystem bei Bedarf während des Einbaus der Elektrode nach Karlsruhe transportiert werden, um die Module auf eventuelle transportbedingte Schäden zu überprüfen.

Die Qualitätskontrolle findet in zwei Schritten mit zwei verschiedenen Sensoren statt. Im ersten Schritt wird die Genauigkeit der Kammfertigung überprüft². Hierbei ist die genaue Positionierung der Bohrungen, welche die Keramikisolatoren halten, besonders wichtig. Diese werden mit Hilfe einer Kamera und Bilderkennungssoftware vermessen und mit den Sollpositionen der CAD-Zeichnungen verglichen. Auf den zweiten Schritt, die Qualitätskontrolle der fertigen Module, wird kurz in Abschnitt 4.2.2 eingegangen. Eine genauere Beschreibung wird in [Pra09] gegeben werden. Mit einem speziellen Lasersensor [Rht07] werden die Positionen der Drähte im fertigen Modul überprüft, sowie deren Durchgang unter ihrem Eigengewicht gemessen und die Drahtspannung bestimmt.

Im Folgenden wird die Automatisierung des Messtisches und der Ablauf der Qualitätskontrolle beschrieben.

4.1 Automatisierung eines 3D-Messtisches

4.1.1 Der Stiefelmayer-Messtisch Modell „System C“

Als Basis für die Qualitätskontrolle dient ein gebrauchter 3D-Messtisch des Typs „System C“ der Firma Stiefelmayer (Abb 4.1). Dieser besteht aus einer gegossenen Platte der Länge $l = 2500$ mm, Breite $b = 1250$ mm und Dicke $d = 350$ mm, an der seitlich eine Schiene mit beweglichen Messarmen angebracht ist. Die Platte hat ein Gewicht von ca. 2000 kg. Sie steht auf sechs höhenverstellbaren Füßen, mit denen die Fläche des Tisches waagrecht ausgerichtet werden kann. Die Halterung mit den senkrecht und parallel zur Tischebene liegenden y- und z-Armen wiegt ca. 200 kg und ist in einer Führungsschiene entlang der Längsseite des Tisches verschiebbar, die die x-Achse des Koordinatensystems der Maschine bildet. Die y-Achse ist in einer Führung gelagert, die senkrecht zur Tischebene verschoben

²Der Aufbau der Module und die Geometrie der Komponenten wird in Kap. 3.2 erläutert.



Abb. 4.1: Der Stiefelmayer-Messtisch vor dem Umbau.

werden kann. Der Durchmesser des y-Arms beträgt ca. 50 mm mit einer Wandstärke von ca. 2-3 mm. Die Achsenkonstruktion ist sehr verwindungssteif, wodurch eine Verbiegung der Achsen durch das Gewicht der verwendeten Messinstrumente auszuschließen ist. Ein Gewicht am ausgefahrenen y-Arm führt lediglich zu einer Verkippung des Arms in der Führung, die in der Größenordnung des Spiels der Führungsrollen von einigen Hundertstel μm liegt (s. Kap. 4.2.1 und 4.2.2).

Durch den massiven Bau des Messtisches und der Achsen können diese mit hoher Geschwindigkeit bewegt werden, ohne dass sie beim Beschleunigen oder Abbremsen nachschwingen. Dies ermöglicht es, die Messzeit der Qualitätskontrolle soweit zu reduzieren, dass die Vermessung eines Kamms innerhalb von ca. 30 min erfolgt und die Vermessung eines kompletten Moduls weniger als drei Stunden benötigt. Dadurch ist es möglich, die Qualitätskontrolle eines fertigen Moduls während der Produktion des nächsten Moduls durchzuführen (s. Kap: 6.2.2).

Das Volumen, das von den Armen der Maschine abgefahren werden kann, beträgt $V = 2300 \cdot 1050 \cdot 1600 \text{ mm}^3$. Die Position der Arme wird mit $10 \mu\text{m}$ Auflösung von Drehencodern ausgelesen. Eine genaue Beschreibung der Encoder erfolgt in Kap. 4.1.3. Am verfahrbaren Anbau war ursprünglich ein Auslesesystem für die Positionencodere angebracht, bestehend aus einem Monitor und einem 12-Tasten Feld zur Bedienung. Die nötigen Spannungen wurden über ein Netzteil bereitgestellt, das mit 230 V betrieben wurde und mit dem Auslesesystem verbunden war. Über eine Anschlussbox mit vier fünfpoligen Rundsteckern, die von der Monitoreinheit getrennt montiert war, waren die an den Achsen angebrachten Positionencodere mit der Anzeige verbunden. Die Achsen konnten mit Handrädern verschoben und mit jeweils einer Schraube fixiert werden. Die Bewegung der Handräder wurde über Rutschkopplungen an die Arme übertragen.

Dieses manuell zu bedienende System sollte für die Qualitätskontrolle automatisiert werden. Dazu war es nötig, die Achsen mit Motoren zu versehen, die von einem Computer angesteuert werden können (Kap. 4.1.2). Die vorhandenen Positionencodere der Messmaschine wurden beibehalten und mit einer speziellen Ausleseelektronik bestückt, welche die Encodersignale zählt und über eine Druckerschnittstelle auf eine NI PCI-6014 Interface-



Abb. 4.2: Der Stiefelmayer-Messtisch nach dem Umbau. (1) Messtisch, (2) Schiene der x-Achse, (3) y-Achse, (4) z-Achse, (5) Führung der y-Achse, (6) Ausleseelektronik mit Spannungsversorgungen, (7) Halterung für die Elektrodenmodule, (8) Prototyp eines Zylindermoduls.

Karte am Steuerrechner leitet, der daraus die aktuelle Position des Messarms bestimmen kann. Abb. 4.2 zeigt die Messmaschine nach dem Umbau im Reinraum.

Die Funktionsweise der Encoder und der neuen Elektronik wird in Kap. 4.1.3 beschrieben. Die Monitoreinheit mit dem alten Auslesesystem wurde entfernt (vergleiche Abb. 4.1 und 4.2) und an den vorhandenen Gewinden der Halterung dieser Einheit wurde die in Kap. 4.1.3 beschriebene Ausleseeinheit angebracht. Diese Einheit beinhaltet einen Quadraturdecoder, der die Encodersignale der Messarme zählt, sowie verschiedene Spannungsversorgungen. Die verwendete Quadraturdecoder-Elektronik basiert auf einem Modell, das im Rahmen der Diplomarbeit von H. Gottschlag [Got05] entwickelt wurde. Die Steuerungselektronik der Motoren wurde in einer weiteren Elektroneinheit (s. Kap. 4.1.2) an der Führung der y-Achse befestigt.

Abb. 4.3 zeigt die wesentlichen Komponenten des Messsystems sowie die Signalpfade zwischen Instrumenten und Ausleseelektronik. Die elektronischen Komponenten des Messsystems sind:

- Der PC zur Steuerung des Messsystems mit Hilfe speziell entwickelter LabVIEW Programme.
- Die Ausleseeinheit, bestehend aus Quadraturdecoder und Spannungsversorgung, welche die für die Motoren, Encoder und Sensoren benötigten Spannungen zur Verfügung stellt und die Positionssignale der Arme der Messmaschine verarbeitet.

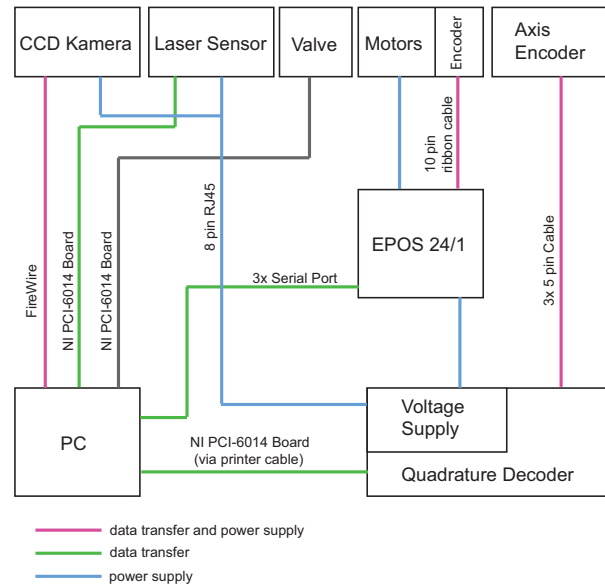


Abb. 4.3: **Verkabelungsschema.** Dargestellt sind die Verbindungen der elektronischen Komponenten der Messmaschine.

- Die EPOS 24/1 Positionierelektroniken, welche die Motoren und deren Encoder steuern und mit Spannung versorgen.
- Die Encoder der Maschinenarme.
- Die Motoren der Achsen mit ihren Encodern.
- Die Sensoren (Kamera und Lasersensor mit Druckluftventil).

Vom Steuercomputer ausgehend verläuft ein Kabelbaum bis zur Ausleseeinheit. Dieser besteht aus drei neunpoligen Kabeln, die am Steuercomputer an RS 232 Schnittstellen angeschlossen sind und die Steuerbefehle an die Positioniersteuerungen der Motoren übertragen, einem Druckerkabel, das vom Rechner zur Ausleseeinheit führt und den Quadraturdecoder ausliest und einem FireWire-Kabel für die Übertragung der Bilder einer Kamera. Von der Ausleseeinheit verläuft der Hauptteil des Kabelbaums weiter an der Haltestange der z-Achse nach oben zur Abschlussplatte der z-Achse. An dieser ist eine Schleppkette angebracht, die mit der Führung der y-Achse verbunden ist. Durch diese sind die RS 232 Kabel und die Spannungsversorgung der EPOS-Positioniersteuerungen und zwei 5-polige Kabel zu den Encodern der y- und z-Achse geführt. Von den EPOS-Einheiten werden die Motoren mit Spannung versorgt und gesteuert.

Zur Übertragung der Signale des Lasersensors werden vier Adern eines 8-adrigen Ausleseeinheit ein achtadriges Blindkabel zum Steuercomputer gelegt, von dem bereits vier Adern zur Auslese verwendet werden. Das FireWire-Kabel und ein Kabel zur Spannungsversorgung und Datenübertragung der Sensoren genutztes 8-adriges Kabel mit RJ45 Anschluss

ist von der Ausleseinheit durch den y-Arm des Messtisches bis zur Haltevorrichtung der Sensoren geführt.

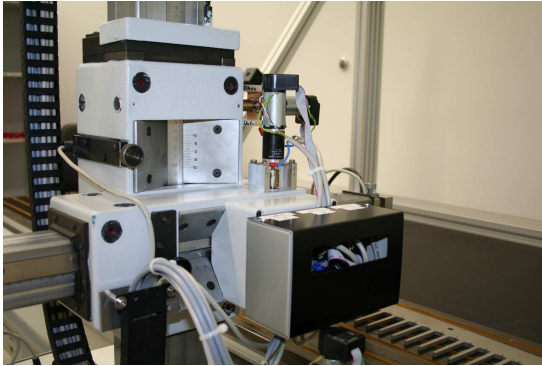


Abb. 4.4: **Führungseinheit der y-Achse.** An der Führung der y-Achse, die entlang der z-Achse verschiebbar ist, sind die Motoren für die y-, und z-Richtung, sowie die Elektroneinheit mit den Positioniersteuerungen und die Schleppkette mit dem Kabelbaum angebracht.

Abb. 4.5 zeigt einen zur Vermessung auf dem Messtisch fixierten Kamm. Für die Locherkennung mit der Kamera ist ein dunkler Untergrund nötig, da sonst nicht genug Kontrast zwischen Kamm und Untergrund erreicht wird, so dass die Bohrungen von der Software nicht erkannt werden können. Zwei mit dem Messtisch verschraubte $50 \cdot 150 \cdot 2500 \text{ mm}^3$ großen Kanya-Profilstreben sind daher mit schwarzem Klebeband und Kapton-Folie abgeklebt. Zur Vermessung werden die Käme mit Stiften, die einem Durchmesser von 8 mm haben und in den Kanya-Profilstreben verschiebbar sind, an den für den Einbau der Module ins Spektrometer vorgesehenen Bohrungen auf dem Messtisch fixiert. Damit eine eventuelle Krümmung der Käme in der Materialebene die Messungen der Qualitätskontrolle nicht verfälscht, werden die Käme zusätzlich mit Aluminiumprofilen, die zwischen den Bohrungen der inneren und äußeren Lage über die Zähne gelegt werden, auf die Kanya-Streben gedrückt. Allerdings sorgten kleine Luftbläschen unter der Kapton-Folie, sowie die nicht abgeklebten Kanya-Profilvertiefungen bei der Erkennung mancher Bohrungen für einen nicht ausreichenden Kontrast (s. Kap. 4.1.4 und 4.3). Daher wird die Unterlage aus Klebeband und Kapton-Folie gegen eine schwarze Kunststoffplatte ausgetauscht werden.

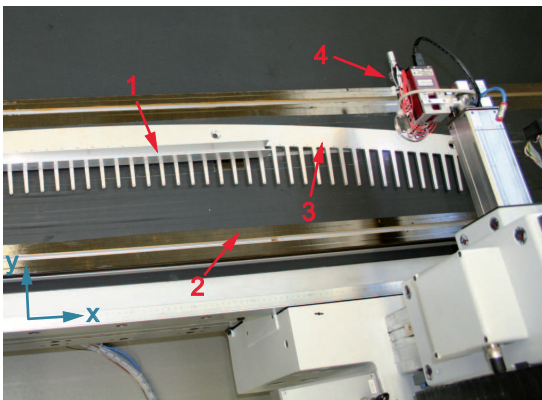


Abb. 4.5: **Fixierter Kamm.** 1) Aluminiumprofil, 2) Mit Kaptonfolie abgedeckte Kanya-Strebe, 3) Zylinderkamm, 4) Kamera am y-Arm der Messmaschine.

Die Haltevorrichtung, mit der fertig montierte Module während der Qualitätskontrolle fi-

xiert werden, ist ebenfalls an den am Messtisch angeschraubten Kanya-Streben montiert. Die Module müssen aufgrund ihrer Abmessungen in diagonaler Ausrichtung auf dem Messtisch positioniert werden. Die Haltevorrichtung kann durch verschieben der Auflagestücke der jeweiligen Modulgeometrie (Zylinder- oder Konusmodule) angepasst werden (Abb. 4.6). Mit dieser Halterung und einem Prototyp der Zylindermodule wurden die Programme zur Vermessung der Drahtpositionen mit dem Lasersensor entwickelt und getestet.

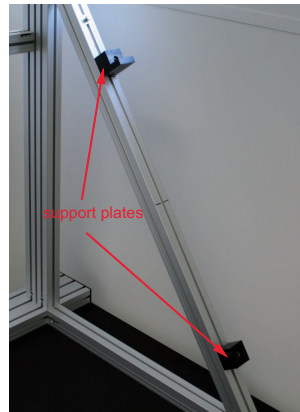


Abb. 4.6: **Modulhalterung.** Durch Verschieben der schwarzen Auflagestücke kann die Halterung auf die zu vermessende Modulgeometrie angepasst werden.

Aufgrund der in Kap. 3.4 genannten Anforderungen an die UHV-Tauglichkeit der Module, müssen diese in einem Reinraum produziert und kontrolliert werden. Für den Einsatz im Reinraum musste die Messmaschine besonders präpariert werden, was in Kap. 6.2.1 beschrieben wird.

4.1.2 Verwendete Motoren

Für die Automatisierung der Achsenbewegung wurden drei Gleichstrommotoren vom Typ A-max der Firma Maxon Motors verwendet. Jeder Motor ist mit einem Planetengetriebe und einem Encoder des Typs HEDL 5540 ausgestattet, die stabartig hintereinander zusammengesetzt sind (s. Abb. 4.8). Die Übersetzung der Getriebe beträgt an der x-Achse der Messmaschine $i=157,46:1$ und an der y- und z-Achse jeweils $i=127,86:1$. Die Positioniersteuerungen EPOS 24/1 sind von den Encoder-Motor-Getriebe-Einheiten getrennt und in einem Aluminiumgehäuse untergebracht, das an der y-Achsenführung befestigt ist (s. Abb. 4.4 und 4.7). Die Steuerungssoftware für die Motoren wurde in der Programmiersprache LabVIEW³ der Firma National Instruments geschrieben, die zur Einbindung der Motoren nötigen LabVIEW Bibliotheken werden von Maxon Motors bereitgestellt. Für die in Kap. 4.2.1 beschriebene Bilderkennung bietet sich in diesem Rahmen die ebenfalls von National Instruments entwickelte Vision Software an, die in LabVIEW eingebunden werden kann.

³Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

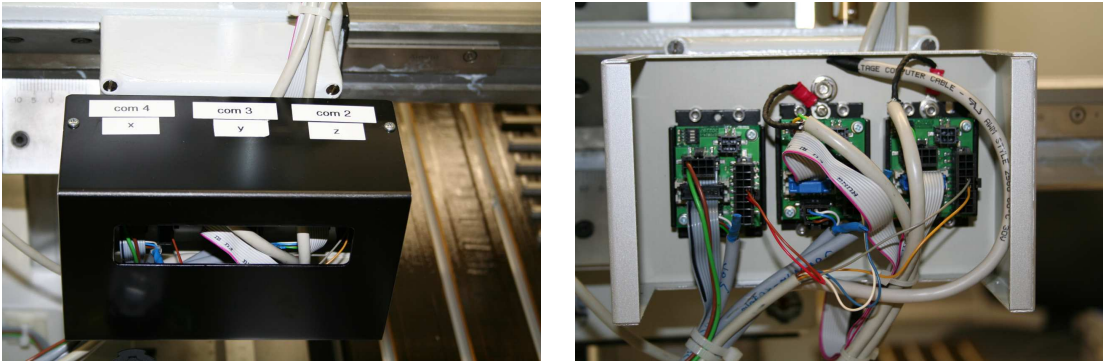


Abb. 4.7: Einheit mit EPOS 24/1 Positioniersteuerungen. Links im geschlossenen, rechts im offenen Zustand. In der Einheit befinden sich die Positioniersteuerungen EPOS 24/1, über die die Steuerbefehle des Computers in Steuerspannungen umgewandelt werden. Über Signale der Encodern an den Motoren bestimmt die EPOS den Bewegungszustand eines Motors und regelt nach Bedarf die Steuerspannung des Motors nach. Für jeden Motor ist eine eigene Positioniersteuerung vorhanden. Die Beschriftung auf der Einheit gibt die von der jeweiligen Steuerung betriebene Achse, sowie die zugehörige serielle Schnittstelle des Steuercomputers an.

Die Motoren sind an den zuvor für die manuelle Bewegung der Achsen genutzten Anbringungen der Handräder befestigt. An der x-Achse wurde der Motor mit einer Aluminiumhalterung an der Basishalterung der z-Achse derart angebracht, dass die Motorwelle mit der Kupplungsachse, an der zuvor die Handräder zum manuellen Verfahren der Arme angebracht waren, über eine Gelenkwelle verbunden ist (s. Abb. 4.8). An der y- und z-Achse wurde als Halterung eine Messingplatte mit einer Dicke $d = 0,2$ mm verwendet, an welche die Motoren mit ihrer Vorderseite angeschraubt sind. Die Messingplatte ist an den Enden mit zwei Aluminium-Stücken, die als Abstandhalter dienen, an der Messmaschine befestigt (Abb. 4.8). Falls nötig können die Motoren durch Lösen jeweils einer Schraube von den Achsen der Maschine getrennt werden, so dass sie bei manueller Bedienung der Maschine keinen Schaden davontragen.

Die direkt an den Motoren angebrachten Encoder sind mit der EPOS-Elektronik über ein 10-adriges Flachbandkabel verbunden. Über das Flachbandkabel wird die Versorgungsspannung $V_{CC} = +5$ V für den Encoder bereitgestellt. Fünf Adern des Kabels dienen der Übertragung von Encodersignalen. Übertragen wird ein Rechteckpuls A und der dazu invertierte Puls \bar{A} , ein zu A um 90° phasenverschobener Rechteckpuls B und \bar{B} , sowie ein Indexpuls \bar{I} . Anhand der Phasenlage der Pulse A und B , sowie deren Frequenz kann die EPOS-Elektronik die Drehrichtung und die Drehgeschwindigkeit des Motors bestimmen: Bei der Bewegung des Arms in eine Richtung werden die Flanken der Pulse A und B abwechselnd registriert. Ändert sich die Bewegungsrichtung, so werden auf einem der beiden Kanäle zwei Flanken hintereinander gezählt und die Elektronik erkennt eine Änderung der Bewegungsrichtung. Die Motoren selbst werden über die EPOS-Elektronik mit einer Spannung von maximal $U = 15$ V versorgt, über deren Wert die Geschwindigkeit der Motoren geregelt wird. Aufgrund der gemessenen Bewegung eines Motors wird die durch das EPOS-Board bereitgestellte Motorspannung nachgeregelt.

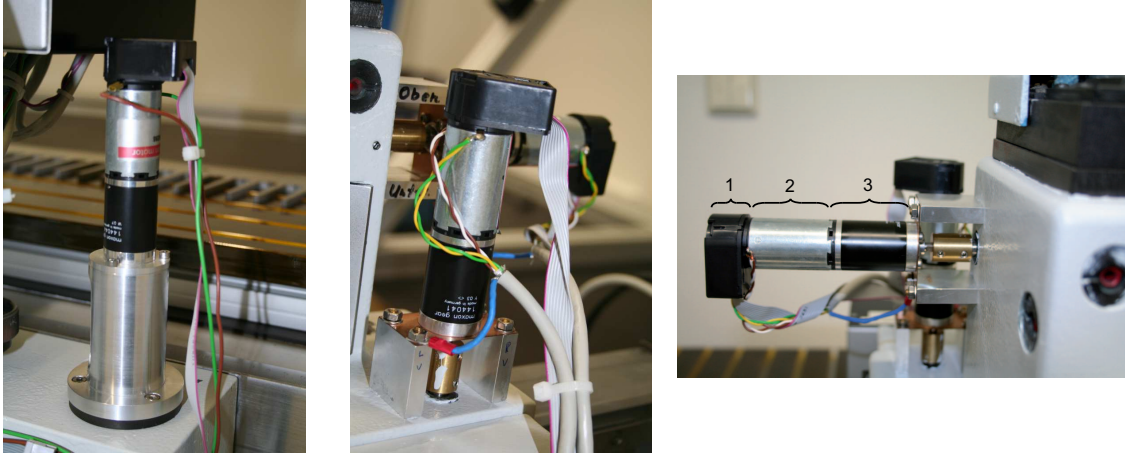


Abb. 4.8: **Die Maxon Motoren.** Anbringung der Maxon A-max Motoren an der x-, y- und z-Achse (v.l.n.r.), 1) Encoder, 2) Motor, 3) Getriebe.

Die Steuerung der Motoren erfolgt über einen Computer mit der vom Hersteller bereitgestellten Software EPOS User Interface V.2.04 oder mit LabView. Beide Programme bieten viele Einstellmöglichkeiten für die Motoren. So kann beispielsweise die Umdrehungsgeschwindigkeit, die Beschleunigung und die Verzögerung, sowie das Geschwindigkeitsprofil den Erfordernissen angepasst werden. Zudem kann zwischen absoluter und relativer Positionierung gewählt werden. Die Motoren werden anhand ihrer Encodersignale⁴ gesteuert. 30.000 Signale entsprechen etwa einer Umdrehung der Achse nach dem Getriebe des Motors. Zur Steuerung eines Motors wird die zu fahrende Strecke in eine Anzahl von Encodersignalen umgerechnet. Die EPOS Positioniersteuerung zählt die Encodersignale des Motors und stoppt diesen bei Erreichen des Vorgabewerts. Zusätzlich verarbeitet die Positioniersteuerung das ausgewählte Beschleunigungsprofil und errechnet wie lange der Motor beschleunigt, und ab welchem Zählerstand der Motor abgebremst wird. Da die Umrechnung von einer Strecke in Pulse nicht genau ist und nicht immer genau die vorgegebene Anzahl an Signalen auch tatsächlich gefahren wird, muss die gefahrene Strecke bzw. die angefahrte Position mit den Angaben der Positionencoder der Messmaschine überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Daher fährt die zur Steuerung der Motoren entwickelte Software eine Position in mehreren Schritten an.

Die Übertragung der Kraft der Motoren auf die Messachsen erfolgt über Rutschkopplungen (s. Kap: 4.1.1), was diesen Abgleich zwingend erforderlich macht. Es kann vorkommen, dass die Rutschkopplung beispielsweise aufgrund einer zu großen Beschleunigung eines Motors nicht greift und somit die vom Motor gefahrene Strecke nicht mit der Distanz, die der Messarm bewegt wurde, übereinstimmt. In diesem Fall muss durch die Software noch ein Korrekturschritt errechnet werden. Das Programm zur Steuerung der Motoren wurde mit LabVIEW realisiert und ist in Kap. 4.1.4 beschrieben.

⁴Die Encodersignale werden in den Programmen als qc bezeichnet

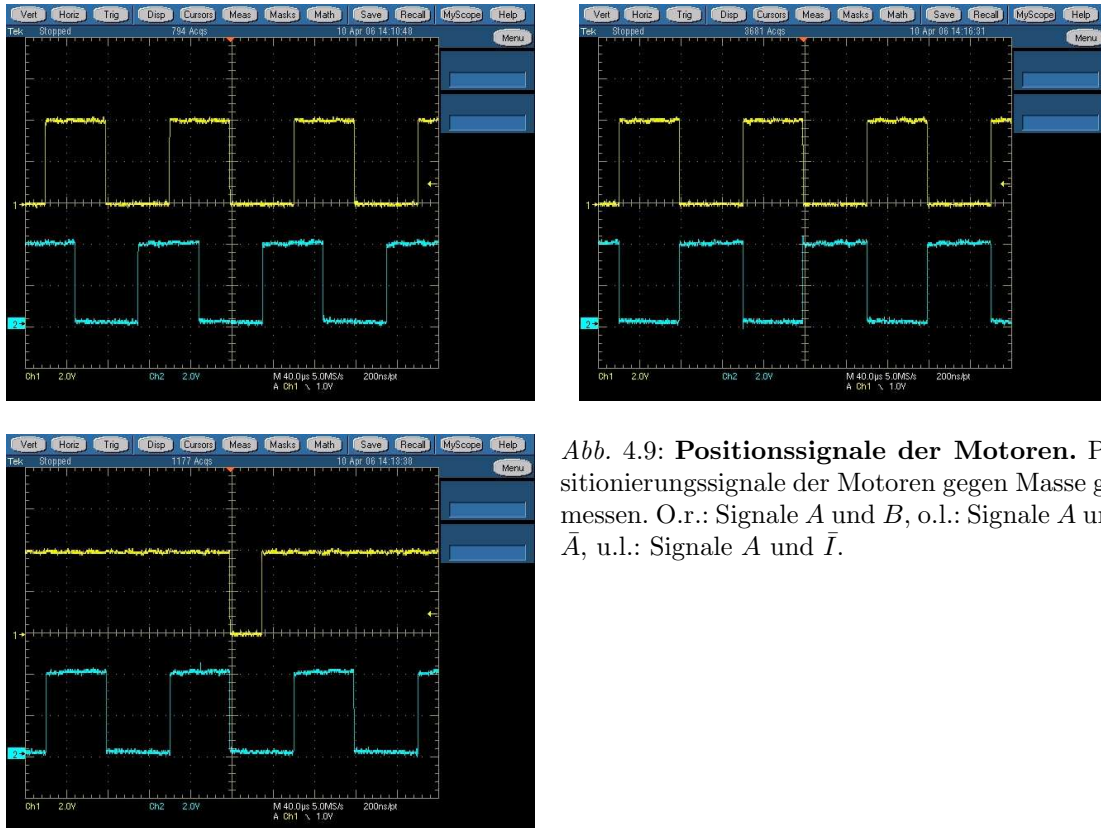


Abb. 4.9: Positionssignale der Motoren. Positionierungssignale der Motoren gegen Masse gemessen. O.r.: Signale A und B, o.l.: Signale A und \bar{A} , u.l.: Signale A und \bar{I} .

4.1.3 Encoderelektronik der Messarme

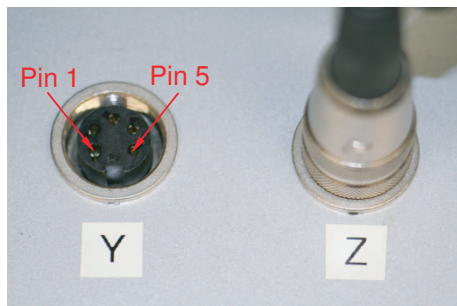


Abb. 4.10: Pinanordnung der Encoderanschlüsse. Die gezeigten 5-poligen Anschlüsse verbinden die Encoder der Messmaschine mit der OED1 Ausleseinheit. Über die Anschlüsse werden die Versorgungsspannung sowie die Positionssignale der Encoder übertragen.

Die Arme der Messmaschine sind mit induktiven Rotationsgebern vom Typ RG 500 A 9.44101-1701 bestückt. Diese zerlegen eine translatorische Bewegung in eine definierte Anzahl gleicher Einzelschritte (Inkrement) und geben eine dazu proportionale Zahl elektrischer Impulse aus. Die lineare Bewegung der Arme der Messmaschine wird dabei von einer Zahnstange in eine Drehbewegung umgewandelt. Die Rotationsgeber fungieren so als Positionencodier der Messmaschine. Sie können mit Spannungen im Bereich von +5 V bis +24 V betrieben werden, wobei die Amplitude der ausgegebenen Impulse in etwa der Versorgungsspannung entspricht. Wie auch die Encoder der Motoren erzeugen die

Rotationsgeber zwei Rechteckpulsfolgen mit 90° Phasenverschiebung, die von der Ausleseelektronik zur Bestimmung der Position und der Bewegungsrichtung verwendet werden. Die Geber der einzelnen Achsen werden jeweils über ein fünfadriges Kabel von der OED1 Ausleseeinheit mit 5 V Spannung versorgt, die an Pin 4 und Pin 5 der in Abb.4.11 mit X, Y und Z bezeichneten Anschlussbuchsen (s. Abb. 4.10) an der OED1 Ausleseeinheit angelegt sind. Pin 3 ist geerdet, Pin 1 und Pin 2 sind die Eingänge für die massebezogenen, 90° zueinander phasenverschoben Positionssignale (4.13). Durch die Phasenverschiebung kann die Bewegungsrichtung des Arms bestimmt werden (s. auch Abschnitt 4.1.2). Die Encoder wurden ursprünglich über einen in der Monitoreinheit eingebauten Decoder ausgelesen und die x-, y- und z-Position der Messarme auf dem Monitor angezeigt. Im Zuge der Automatisierung wurde dieser Monitor durch eine Elektronikeinheit ersetzt, die die Ausleseelektronik für die Encoder des Messtisches beinhaltet, sowie alle notwendigen Spannungen für die Sensoren und Motoren zur Verfügung stellt. Abb. 4.11 zeigt die OED1

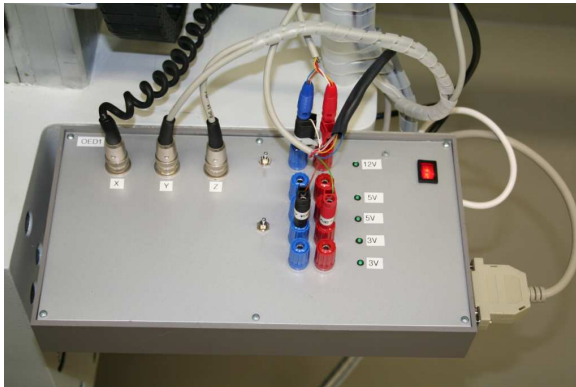


Abb. 4.11: Die Elektronikeinheit OED1 (geschlossen). Die Einheit beinhaltet zwei Spannungsversorgungen, eine für den 15 V und eine für die 3 V und 5 V Stecker. Die mit X, Y und Z beschrifteten Anschlüsse verbinden den Quadraturdecoder mit den Encodern der entsprechenden Achse. An der rechten Seite ist das serielle Kabel zu sehen, über das der Zählerstand des Quadraturdecoders vom Computer ausgelesen werden kann.

Ausleseeinheit. Sie wird mit 230 V Netzspannung versorgt. In der Einheit befinden sich zwei Spannungsversorgungen der Firma Mean Well, eines vom Typ RS-50-15, das 15 V liefert, sowie ein RS-25-5, das 5 V und 3 V über Bananenstecker bereitstellt. Die Spannungsversorgungen können über einen Schalter separat ein- und ausgeschaltet werden. Mit der 15 V Spannung werden die Motoren betrieben und die Photodioden des Lasersensors mit Spannung versorgt. Die Leuchtdioden in der Kamerahalterung können wahlweise mit 15 V, 5 V oder 3 V betrieben werden, je nach benötigter Beleuchtungsstärke. Drei fünfpolige Rundstecker verbinden die Einheit mit den Encodern der Messmaschine und übertragen die Versorgungsspannung und die Signale. Die Druckerschnittstelle an der Seite der Einheit überträgt die Zählerstände der vom Quadraturdecoder gezählten Pulse der Rotationsgeber über ein Druckerkabel an die NI PCI-6014 Interface-Karte des Computers, der daraus die aktuelle Position der Arme bestimmt. Die einzelnen Komponenten der Ausleseeinheit sind in Abb. 4.12 zu erkennen. Der Quadraturdecoder hat die Aufgabe, die von den Positionencodern der Maschinenarme kommenden Signale zu verarbeiten und in Ortsinformation umzuwandeln. Die Elektronik besteht aus zwei HCTL-2032 Quadraturdecodern, welche die Positionssignale der Maschinenencoder verarbeiten und einem GAL16V8B-15LP Baustein, der über den Computer die Auslese der Zählerstände steuert.

Abb. 4.12: Die **Elektronikeinheit OED1 (geöffnet)**. Auf der linken Seite befindet sich eine Elektronikplatine (2), auf der sich die Schaltung nach Abb. 4.14 befindet. Rechts daneben sind die beiden Spannungsversorgungen (3),(4) angebracht. (1): Anschlüsse der Rotationsgeber, (5): Paralleler Anschluss zur Positionsabfrage, (6): Anschlüsse für verschiedene Spannungen, (7): Hauptschalter.

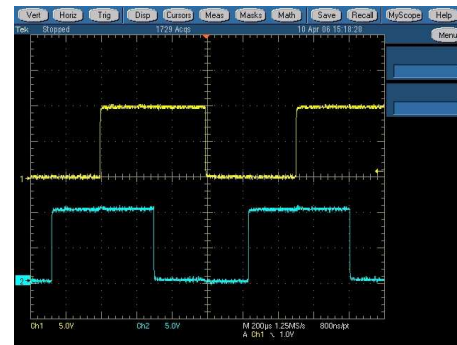
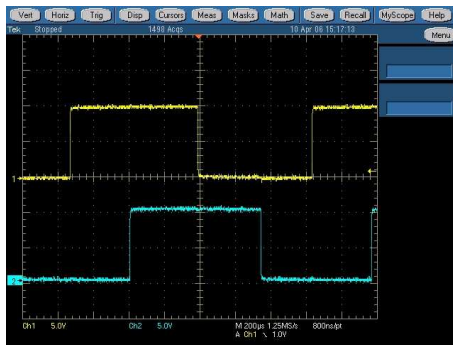
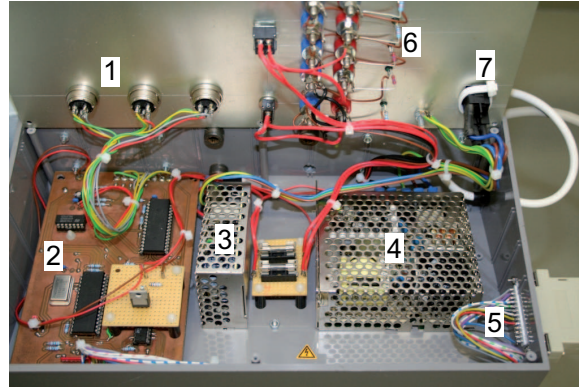


Abb. 4.13: **Signale der Maschinenencoder**. Über die 90° zueinander phasenverschobenen Pulse der an den Achsen der Maschine angebrachten Encoder kann der Quadraturdecoder die Fahrrichtung der Maschine ermitteln.

In Abb. 4.14 ist der Schaltplan der Ausleseelektronik mit integriertem Quadraturdecoder dargestellt⁵. Der HCTL-2032 besteht aus einer Quadraturdecoder-Logik, einem binären 32 Bit-Zähler und einer 8 Bit-Busanbindung. Der Baustein kann simultan die Encodersignale zweier Achsen auslesen. Dabei kann über die Anschlüsse EN1 und EN2 zwischen den Zählmodi 1x, 2x und 4x gewählt werden. Ein Indexpuls, den einige Encoder liefern, kann ebenfalls verarbeitet werden. Der HCTL-2032 kann im 8, 16, 24 oder 32 Bit-Modus betrieben werden, wobei in den Modi die Zählerstände in ein bis vier Bytes aufgeteilt werden und nacheinander über den 8 Bit-Bus ausgelesen werden müssen. Hierzu muss über die SEL1 und SEL2 Leitungen das gewünschte Byte adressiert werden, wobei über den X/_Y Pin der auszulesende Zähler angesteuert werden muss. Über den Anschluss /OE wird die Ausgabe aktiviert und das angesteuerte Byte auf den Ausgang gegeben.

Die Signalleitungen der Achsenencoder sind über die mit KL2, KL3 und KL4 bezeichneten Anschlüsse mit den HCTL-2032 Quadraturdecodern verbunden (s. Anhang B, Abb B.1). Diese geben die Signale auf die mit CHAX und CHBX, bzw. CHAY und CHBY bezeichneten Anschlüsse des ersten HCTL-2032, sowie auf CHAX und CHBX des zweiten

⁵Eine größere vollständige Version mit den zugehörigen Zuordnungstabellen für die Steuerbefehle sind in Anhang B zu finden.

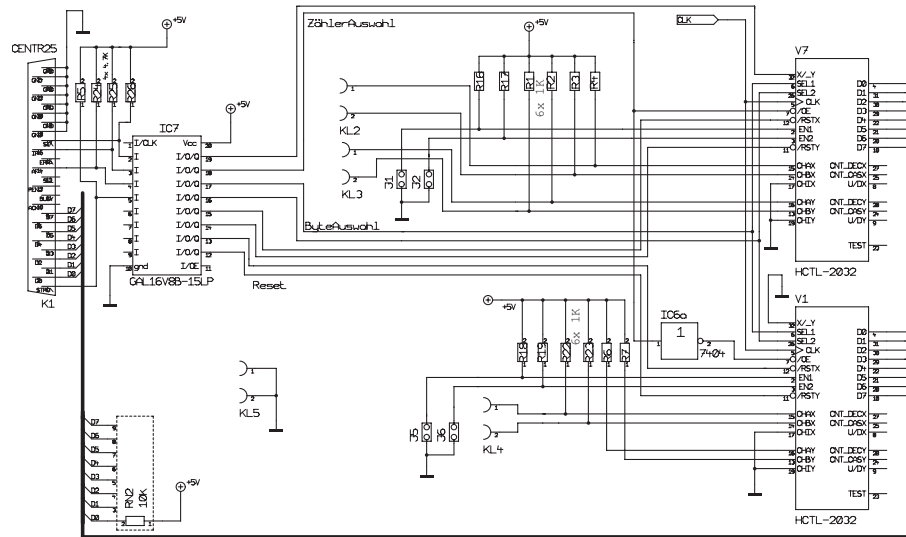


Abb. 4.14: Schaltplan des Quadraturdecoders.

HCTL-2032. Die beiden Bausteine zählen nun im 1-fach Modus die Flanken der beiden um 90° phasenverschobenen Signalkanäle der Encoder (Abb. 4.13). Nach jeder Flanke wird der Zählerstand um eins erhöht, der entsprechende Arm der Messmaschine hat sich $0,01\text{ mm}$ bewegt. Ändert sich die Bewegungsrichtung des Arms, kommt die nächste Flanke, die der Quadraturdecoder registriert, vom selben Kanal wie die vorherige. Anhand eines doppelten Signals eines der Kanäle erkennt der Decoder den Richtungswechsel. Zur Bestimmung der aktuellen Position der Achsen müssen die Quadraturdecoder ausgelesen und die Zählerstände in Längen umgerechnet werden. Die Auslese der HCTL-2032 erfolgt über eine in der Elektronikeinheit eingebaute parallele Schnittstelle, die sowohl der Übertragung der Zählerstände zum Computer, als auch der Ansteuerung der Elektronik zur Auslese dient. Für die Ansteuerung der HCTL-2032 Bausteine werden vier Eingänge der Druckerschnittstelle genutzt. Ein GAL16V8B-15LP Baustein wandelt die vier binären Eingangssignale des Computers in eine Beschaltung der sieben Ausgänge um, welche die HCTL-2032 in die angeforderten Zustände schaltet (Zuordnungstabellen für die Steuerbefehle sind in Anhang B zu finden). Dabei wird über ein Signal am X/_Y Pin der HCTL-2032 Bausteine bestimmt, welcher der beiden HCTL-2032 ausgelesen wird. Die aktuellen Zählerstände werden bei anliegendem Auslesebefehl in einen Zwischenspeicher geschrieben, so dass der Zähler auch während der Ausgabe der Stände weiter zählen kann. Da der HCTL-2032 zur Datenübertragung nur über einen 8 Bit Ausgang verfügt, wird der 32 Bit-Zählerstand dann in vier 8 Bit-Einheiten aufgeteilt, das Least Significant Byte (LSB), 2nd Byte, 3rd Byte und das Most Significant Byte (MSB). Wie oben beschrieben wird über die Eingänge SEL1 und SEL2 des HCTL-2032 das auszugebende Byte festgelegt. Dieses liegt dann am Ausgang an. Die Zeit, die von der Ansteuerung bis zur Ausgabe vergeht, ist kleiner als 1 ms . Soll der gesamte Zählerstand ausgelesen werden, müssen nacheinander alle vier Bytes angesteuert werden. In den zur Auslese der Zähler geschriebenen Programmen wird zwischen zwei Auslesebefehlen für verschiedene Zähler oder Bytes je

weils 1 ms gewartet. Das gesamte Programm benötigt daher zur Auslese aller drei Zähler etwas mehr als 30 ms. Zur Vermeidung von undefinierten Zuständen stellt die Elektronik dabei sicher, dass jeweils der Ausgang nur eines der beiden HCTL-2032 aktiv ist. Die Zuordnungstabelle für die Beschaltung des GAL16V8B-15LP ist in Anhang B zu finden. Die 8 Bit-Ausgänge der beiden HCTL-2032 laufen über einen gemeinsam genutzten 8 Bit-Bus zur Druckerschnittstelle. Werden die Druckerschnittstelle oder die Anschlüsse der Encoder nicht verwendet, werden die Eingänge des GAL16V8B-15LP bzw. der HCTL-2032, sowie der 8 Bit-Bus über Pull-Up-Widerstände auf definierte Werte gesetzt.

4.1.4 Computersteuerung mit LabVIEW

Zur automatischen Vermessung der Käme mit Hilfe des Messtisches und einer Kamera der Firma Allied Vision Technologies wurde in Zusammenarbeit mit M. Prall (siehe [Pra09]) ein auf der grafischen Programmierumgebung LabVIEW 8.0 basierendes Programmpaket entwickelt. Ein LabVIEW Programm besteht aus einem „Frontpanel“ genannten Bedienfeld, in dem alle im Programm verwendeten Kontroll- und Anzeigeelemente angeordnet werden und einem „Blockdiagramm“, in dem der grafische Code dargestellt ist. Durch Platzieren von Symbolen im Blockdiagramm, die Grundfunktionen, Komparatoren, Werkzeuge zur Datenanalyse und vieles mehr darstellen, wird ein LabVIEW-Programm erstellt. Der Ablauf des Programms wird durch Verbinden der einzelnen Funktionen mit virtuellen Signalleitungen vorgegeben.

Der Rechner, der zur Steuerung der Maschine verwendet wird und auf dem die Programme laufen ist ein System bestehend aus einem AMD Athlon 64 3200+, der mit 2 Ghz getaktet ist, 2 GB Hauptspeicher und einer 160 GB Festplatte besitzt. Zur Kommunikation zwischen dem Computer und den Komponenten der Messmaschine dienen mehrere Schnittstellen (s. Abb. 4.3). Die EPOS 24/1 Platinen sind über drei RS 232 Schnittstellen mit dem Rechner verbunden. Die Kommunikation mit der Kamera erfolgt über ein NI PCI-8252 IEEE 1394 Interface Board der Firma National Instruments, das mit der Treibersoftware NI-IMAQ für IEEE 1394 Kameras geliefert wurde. Für die Aufnahme von Messwerten des Lasersensors und für die Ansteuerung eines für die Drahtspannungsmessung benötigten Magnetventils wird ein NI PCI-6014 Basic Multifunction I/O Board verwendet. Die Auslese des Quadraturdecoders erfolgt ebenfalls über das NI PCI-6014 Board⁶. Die benötigten LabVIEW-Treiber wurden zusammen mit den Hardware-Komponenten geliefert.

Bildererkennung mit NI Vision

Wie bereits erwähnt, werden die Positionen der Bohrungen an den Kämmen mit Hilfe von Bildererkennungssoftware bestimmt. Verwendet wird das von National Instruments entwickelte „NI Vision“ Softwarepaket, das in LabVIEW eingebunden werden kann. Diese Software bietet eine eigene Benutzeroberfläche, den sogenannten „NI Vision Assistant“,

⁶Die Anschlussbelegung des I/O Boards ist in Anhang B, Tabelle B.4 zu finden.

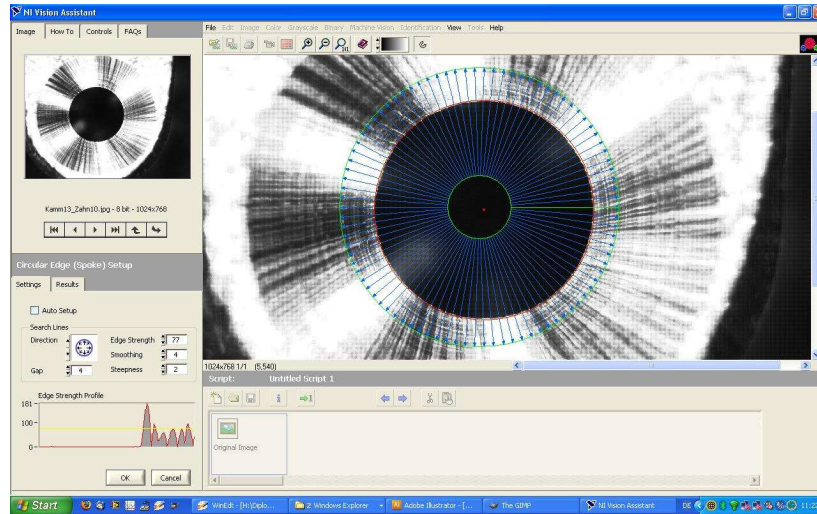


Abb. 4.15: Benutzeroberfläche „NI Vision Assistant“. Oben links ist das zu bearbeitende Bild dargestellt. Direkt darunter befindet sich eine Liste mit Bildbearbeitungsfunktionen, gerade geöffnet ist die Funktion zur Suche nach runden Objekten. Im großen Bild wird die Auswirkung der Bearbeitung dargestellt. In der Leiste unter dem Bild sind die gewählten Bearbeitungsfunktionen in der gewählten Reihenfolge zu sehen.

auf der bestehende Bilddateien geöffnet oder neue direkt von einer Kamera eingelesen werden können (s. Abb. 4.15). Die Bilder können mit verschiedenen Funktionen bearbeitet werden, z.B. können verschiedene Filter über das Bild gelegt, die Bilder kalibriert oder über Kontrastunterschiede verschiedene geometrische Formen erkannt werden. Die im Programm erstellte Bearbeitungsreihenfolge und die gewählten Einstellungen können über einen Konverter in LabVIEW Code umgewandelt werden.

Die verwendete Bilderkennungsroutine sucht entlang des Radius einer Maske nach Kontrastunterschieden, an die nach abgeschlossener Suche ein Kreis angepasst wird. Abb. 4.16 zeigt die Suchmaske mit verschiedenen Einstellungen. Die Bilderkennung ist in der Lage, einen Kreis auch dann zu rekonstruieren, wenn nur ein Viertelsegment der Kontur für die Maske zur Verfügung steht. Die Software verfügt über einige Einstellungsmöglichkeiten für die Kreiserkennung. Der Innen- und Außenradius der Maske kann variiert und die Richtung der Kontrastsuche (von innen nach außen oder umgekehrt) kann geändert werden. Zudem kann angegeben werden, wie groß der Winkelabstand zwischen den einzelnen Suchradien sein soll. Die Parameter des gefundenen Kreises werden in den Koordinaten des Kamerabildes entweder in Pixeln oder, wenn die Kamera kalibriert ist, in mm angegeben. Die absolute Position des Kreises wird aus der Position in Kamerakoordinaten und der Position der Messarme der Maschine berechnet. Hierzu werden die Bildkoordinaten von den Maschinenkoordinaten abgezogen, da die Koordiantensysteme in entgegengesetzte Richtungen zeigen. Die verwendete Methode, Kreise mit Hilfe einer einstellbaren Suchmaske zu erkennen, liefert im Vergleich mit anderen Methoden, z.B. der Suche nach Strukturen aus einer Bildvorlage, bessere und zuverlässigere Ergebnisse.

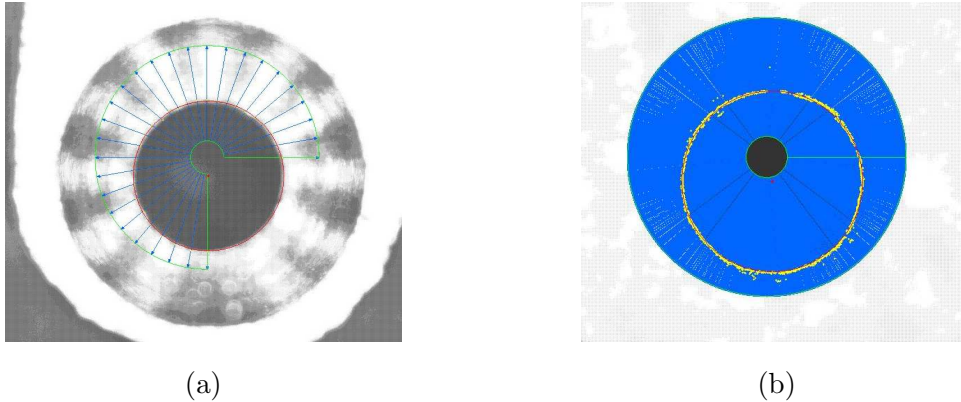


Abb. 4.16: **Locherkennung.** (a) Die Maske sucht entlang der blauen Pfeile nach Kontrastunterschieden (gelbe Punkte) und passt an diese einen Kreis an (rot), (b) Die Locherkennung wird zuverlässiger, wenn die Anzahl der gesuchten Punkte erhöht wird.

Analyse der Messwerte

Die Auswertung der Messungen zur Qualitätskontrolle erfolgt über einen Algorithmus, der die gemessenen Positionen mit den Referenzpositionen vergleicht. Da die Koordinaten der Messung und der CAD-Vorgaben nicht von vornherein vergleichbar sind, werden die gemessenen Positionen zuerst auf die Referenzpositionen rotiert. Dazu wird die Differenz der Koordinaten des ersten Lochs der Messung zu dem entsprechenden Loch der Referenztabelle ermittelt und alle Messwerte um diese Differenz verschoben. Anschließend wird der erste und letzte Messpunkt der inneren Lage beider Datenreihen mit einer Linie verbunden und der Winkel α bestimmt (s. Abb. 4.17), um den die gemessenen Kreispositionen dann rotiert werden. Nun werden die Abweichungen der einzelnen Messwerte zur Sollposition bestimmt, wobei die Summe der quadratischen Abweichungen dazu benutzt wird, die Lage der gemessenen Lochreihen relativ zu der Referenzverteilung weiter zu optimieren (χ^2 -Anpassung). So wird verhindert, dass eventuelle Fabrikationsfehler am ersten oder letzten Loch der Kämmen die gesamte Messung beeinträchtigen. Die in kartesischen Koordinaten bestimmten Abweichungen werden in Zylinderkoordinaten umgerechnet, da deren Aussage in Bezug auf die Genauigkeit der relevanten Größen wie Radiusabweichung, Winkelabweichung und Radiendifferenz dadurch erst ohne Weiteres ersichtlich wird. Diese Methode der Analyse hat sich als zuverlässig herausgestellt.

Es ist geplant, diese Auswertung in Zukunft komplett in Zylinderkoordinaten durchzuführen.

Das Steuerprogramm *Kammvermessungsprogramm_V1.5.vi*

Das Programm *Kammvermessungsprogramm_V1.5.vi* ist das zentrale Steuerungs- und Konfigurationsprogramm für die Vermessung der Kämmen. Es übernimmt während der Qualitätskontrolle die Steuerung der Messmaschine, die Aufnahme der Messdaten und deren

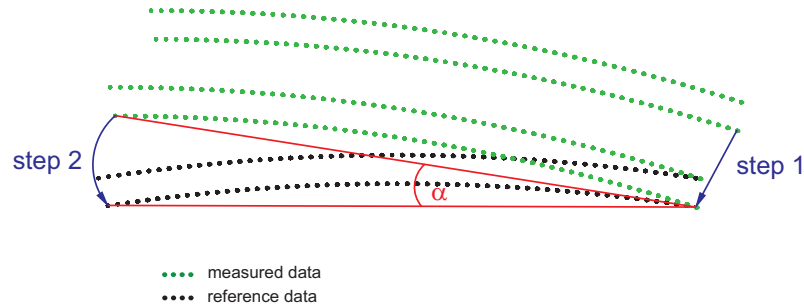


Abb. 4.17: **Rotation der Messwerte.** Im ersten Schritt werden alle Messwerte um die Differenz des ersten Messwertes zu dem ersten Referenzwert verschoben. Im zweiten Schritt wird der Winkel α bestimmt, um den die Messwerte bezüglich des ersten Punktes rotiert werden müssen.

Auswertung. Mess- und Analysedaten werden vom Programm in eine speziell angelegte Verzeichnisstruktur gespeichert, aus der die Daten mit Hilfe eines php-Skripts in eine in Kap. 6.3 beschriebene Datenbank übertragen werden können. Das Programm besteht aus fünf Abschnitten, die im folgenden näher erläutert werden:

1. Kalibration der Kamera
2. Auswahl der Kammgeometrie
3. Erstellen einer Steuerdatei
4. Vermessung des Kamms
5. Auswertung der Messung

1. Kalibration: Im ersten Schritt muss die Kamera kalibriert werden. Die Angabe von Positionen und Abständen, die von der Bilderkennungssoftware ermittelt werden, geschieht im Koordinatensystem des Kamerabildes. Für eine Positionsbestimmung ist es notwendig, dieses Koordinatensystem zu kalibrieren. Dazu wird die Kamera über eine Kalibrationsbohrung mit 2 mm Durchmesser gefahren, die in eine Edelstahlplatte gebohrt ist, welche mit einer Stärke von 6 mm dieselbe Materialdicke wie die Kämmen hat (s. Abb. 4.19). Die z-Position der Kamera wird von Hand so eingestellt, dass das Bild scharf ist. Die Software erkennt die Bohrung, vergleicht den unkalibriert ermittelten Durchmesser mit dem Soll Durchmesser und passt die Kalibrationsparameter an, die in den folgenden Schritten verwendet werden. Der Tiefenschärfebereich δz der Kamera ist wenige Zehntel μm groß, daher wird die z-Achse während der Messung fixiert, so dass die Kalibrierung sich während der Messung nicht ändert bzw. ein Fehler durch ein unscharfes Bild sofort erkannt wird. Falls die Kamera von einer vorhergehenden Messung bereits kalibriert ist, kann dieser Schritt übersprungen werden. Die Edelstahlplatte ist fest auf einer der Kanya-Streben verschraubt und dient neben der Kalibration der Kamera als grobe Nullposition für die Maschinenachsen. Ist die Kamera für die Kalibration ausgerichtet, sind die Positionen

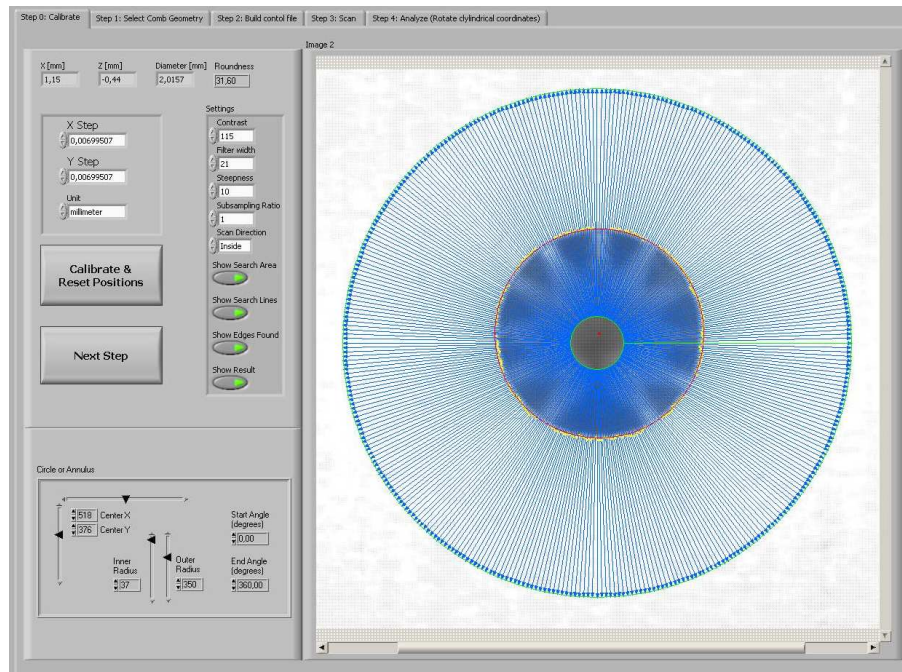


Abb. 4.18: 1. Schritt des Kammvermessungsprogramms. Der erste Schritt des Kammvermessungsprogramms dient der Kalibration der Kamera.



Abb. 4.19: Kalibrationsplatte. Die Bohrung in der Platte dient der Kalibration der Kamera. Während der Kalibration werden auch die Zähler des Quadraturdecoders auf Null gesetzt. Die Platte dient so ebenfalls als Nullposition für die Maschinenachsen.

aller drei Achsen bis auf $< 0,5$ mm definiert. In diesem Zustand werden die Zähler des Quadraturdecoders auf Null gesetzt.

2. Geometrieauswahl: Im zweiten Schritt wird die zu vermessende Kammgeometrie anhand des KATRIN Nummerierungsschemas⁷ gewählt (s. Abb. 4.20). Dieser Schritt ist notwendig und kann nicht übersprungen werden. Ausgehend von dieser Nummer werden die Grundpfade und Verzeichnisse für den gewählten Kamm in der in Abb. 4.21 dargestellten Verzeichnisstruktur erstellt. Zudem wird angegeben, wie der Kamm auf der Messmaschine liegt, da der Kamm nicht symmetrisch ist (s. Abb. 3.11). Anhand der eingegebenen Nummer legt das Programm für die nächsten Schritte zusätzliche Parameter, wie die Anzahl der Bohrungen und den Abstand der Bohrungslagen zueinander fest. Diese Informationen sind im folgenden Schritt für die Erzeugung der Steuerdatei notwendig. Das

⁷Das KATRIN Nummernschema wurde in Kap. 3.3 erläutert.

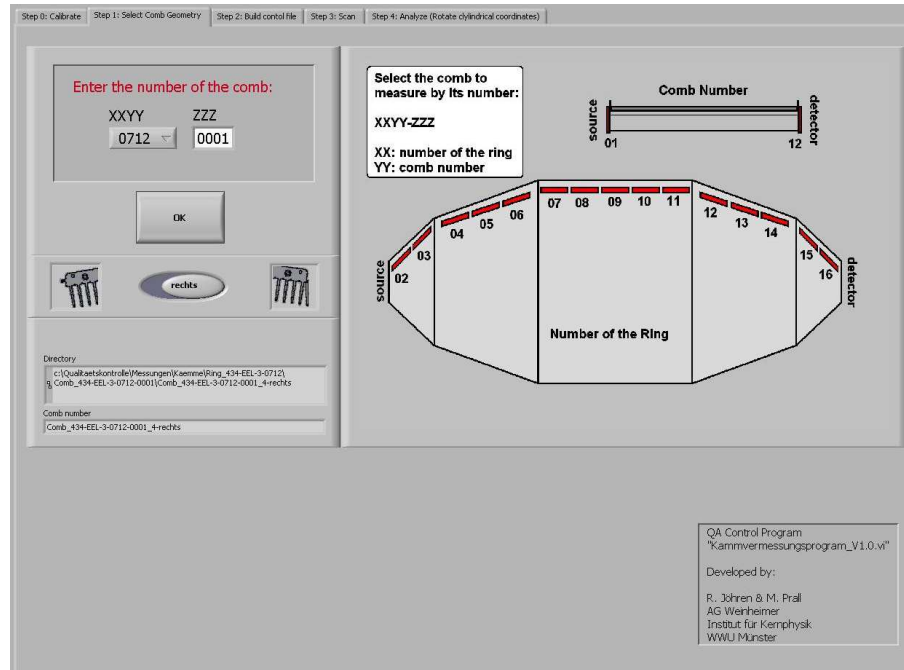


Abb. 4.20: 2. Schritt des Kammvermessungsprogramms. Die zu vermessende Kammgeometrie wird ausgewählt.



Abb. 4.21: Verzeichnisstruktur. Linke Seite: Aufbau der Verzeichnisstruktur, rechte Seite: Gespeicherte Aufnahmen der Bilderkennungsroutine zur nachträglichen Kontrolle.

Programm ruft zudem anhand der in diesem Schritt gemachten Eingaben in den weiteren Schritten die für die gewählte Kammgeometrie hinterlegten Steuer- und Referenzdateien ab. Eine Grafik hilft, die Nummer des Kamms einer Position im Spektrometer zuzuordnen. Die mit XX bezeichneten Zahlen geben den Modulring und die mit YY bezeichneten die Position des Kamms im Modul an. Die Zahlen ZZZZ sind eine laufende Seriennummer.

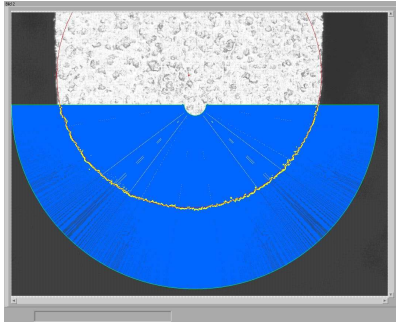


Abb. 4.22: **Positionsbestimmung eines Zahns.** Die Maske zur Erkennung eines Zahns hat einen Suchwinkel von 180° .

Werden für ZZZZ die Buchstaben „uuuu“ eingegeben, kann die Position der Zähne eines ungebohrten Kamms vermessen werden, um die Fertigungsgenauigkeit beim Wasserstrahl-schneiden der Kämme zu prüfen (s. Kap. 5.3). Das Programm fährt in diesem Fall nur die Positionen der Zähne des Kamms an, wobei die Größe der Suchmaske, die runde Objekte erkennt, auf die Größe des Zahnradius angepasst wird, d.h. der Winkelbereich der Maske beträgt 180° und Außen- und Innenradius sind auf den Zahnradius abgestimmt (s. Abb. 4.22).

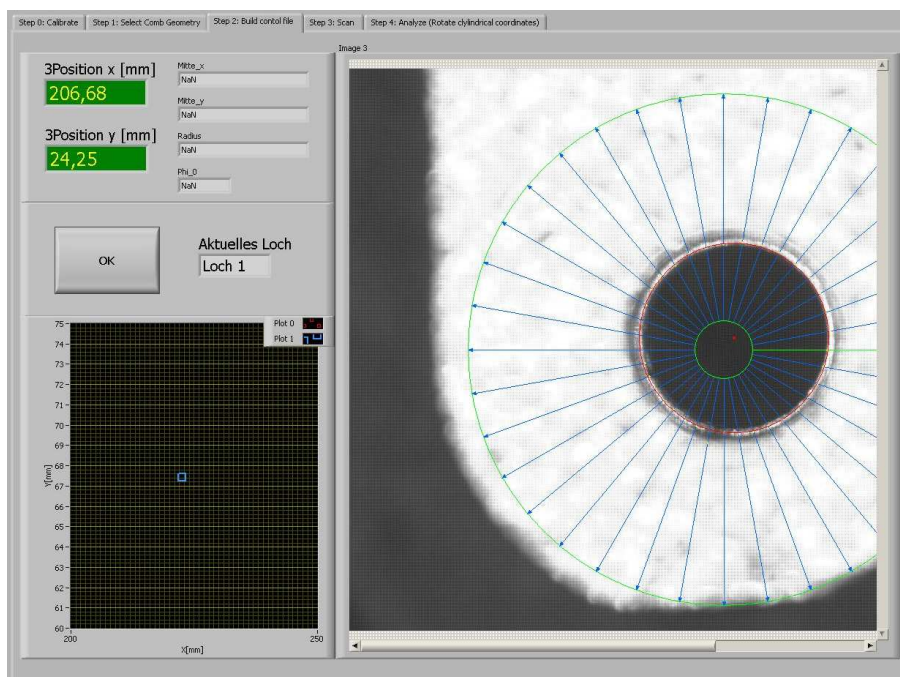


Abb. 4.23: **3. Schritt des Kammvermessungsprogramms.** Erzeugung der Steuerdatei.

3. Steuerdatei: Der dritte Abschnitt des Programms dient der Erzeugung einer Steuerdatei. Dieser Schritt kann übersprungen werden, falls für den gewählten Kammtyp eine passende Steuerdatei zur Verfügung steht. Ist dies nicht der Fall, müssen zur Erzeugung

der Datei nacheinander die rechte äußere Bohrung⁸, eine Bohrung etwa in der Mitte des Kamms und die linke äußere Bohrung von Hand angefahren werden. Bevor angefahrene Positionen mit dem OK-Knopf der Benutzeroberfläche bestätigt werden, ist darauf zu achten, dass die Maske zur Locherkennung und die Bohrung konzentrisch sind. Nach Bestätigung der dritten Bohrung erzeugt das Programm eine Steuerdatei mit errechneten Positionen aller Bohrungen. Dazu verbindet ein Algorithmus die drei aufgenommenen Punkte miteinander und bestimmt aus dem Schnittpunkt der Mittelsenkrechten der Verbindungslinien den Mittelpunkt des Kreises, auf dem die Bohrungen liegen. Aus der Anzahl der Bohrungen, die durch die Kammgeometrie festgelegt ist, bestimmt das Programm deren Winkelabstand. Die Bohrungen der äußeren Drahtlage liegen auf einem größeren Radius und sind um den halben Winkelabstand versetzt zu den Bohrungen der inneren Lage. Die Radiusdifferenz ist durch die Geometrieauswahl festgelegt. Mit der Ausrichtungsinformation aus Schritt 2 werden die Bohrungspositionen der äußeren Lage bestimmt. Die Positionen stimmen im Normalfall nicht mit den Referenzpositionen überein, da sich Ungenauigkeiten der drei aufgenommenen Bohrungspositionen auf die Berechnung der Übrigen auswirken. Die Übereinstimmung ist jedoch ausreichend, um an den errechneten Positionen, die im nächsten Schritt von der Maschine angefahren werden, eine Locherkennung mit der Kamera zu ermöglichen.

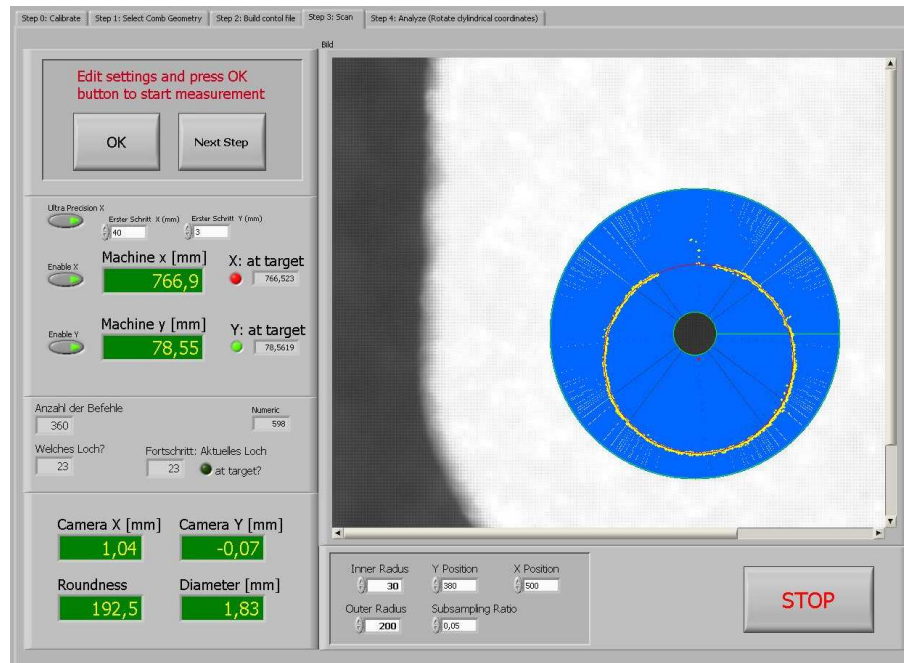


Abb. 4.24: 4. Schritt des Kammvermessungsprogramms. Automatische Vermessung eines Kamms.

⁸Von der x-Achsen- seite der Maschine aus betrachtet.

4. Messung: Im vierten Programmabschnitt vermisst das Programm den ausgewählten Kamm. Dabei werden die von der Steuerdatei erzeugten Positionen nacheinander angefahren, und an diesen Stellen über die Unterprogramme zur Bilderkennung die Position und der Durchmesser der Bohrungen ermittelt. Dabei wird die ermittelte Position in eine Messdatei (s. Abb. 4.25) und ein Bild des erkannten Lochs in das Verzeichnis der aktuellen Messung geschrieben.

Da die Kämmen plan auf dem Messtisch fixiert sind, muss die Maschine nur in x- und y-Richtung gefahren werden, die z-Achse ist festgestellt. Das Verfahren der beiden Achsen geschieht parallel, wobei die aktuelle Position des Messarms mit einer Toleranz von 0,01 mm ausgelesen werden kann. Die Anfahrt einer Position geschieht in drei Schritten. Im ersten Schritt ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Achsen höher gewählt und die Motoren werden bis auf ca. 0,6 mm an die Zielposition gefahren. Die Position der Messarme wird dabei permanent ausgelesen und nach Stoppen des Motors mit der Zielposition verglichen. Die Reststrecke zur Zielposition wird erneut berechnet und die Achsen im zweiten Schritt mit niedrigerer Geschwindigkeit gefahren. Im Normalfall erreicht die Maschine in diesem Schritt ihr Ziel bis auf wenige hundertstel Millimeter. Der dritte Schritt dient als Korrekturschritt. Der Motor fährt hier sehr langsam, um die letzten hundertstel Millimeter zu korrigieren.

Bei der x-Achse ist bei der Positionsanfahrt eine Modifizierung dieser Methode nötig, da der Motor an dieser Achse Schwierigkeiten hat, kleine Korrekturschritte auszuführen. Daher wird dem Motor an dieser Achse im zweiten und dritten Fahrschritt eine Fahrstrecke vorgegeben, welche über die Zielposition hinausreicht. Die Position des Messarms wird kontinuierlich ausgelesen und der Motor instantan gestoppt, wenn die Zielposition überfahren wird. Ist die Position nach den drei Schritten angefahren befindet sich im Zentrum

#LochNr	X Ma. [mm]	Y Ma. [mm]	Z Ma. [mm]	X Cam [mm]	Y Cam [mm]	Diameter [mm]	Rndness [mm]
1	66,310000	63,860000	0,000000	-0,299725	0,401320	2,249682	43,340874
2	90,490000	67,640000	0,000000	-0,338535	0,429171	2,301373	23,670074
3	114,710000	71,300000	0,000000	-0,358819	0,542253	2,266520	28,893095
4	138,960000	74,820000	0,000000	-0,348639	0,474672	2,248933	20,489069
5	163,230000	78,220000	0,000000	-0,394682	0,537164	2,279069	24,725147
6	187,510000	81,500000	0,000000	-0,341402	0,525132	2,283359	33,069599
7	211,810000	84,640000	0,000000	-0,365981	0,695128	2,291155	28,439356
8	236,130000	87,660000	0,000000	-0,381739	0,678922	2,281856	32,639736
9	260,470000	90,550000	0,000000	-0,341307	0,616505	2,201555	35,859524
10	284,820000	93,310000	0,000000	-0,330816	0,629694	2,286442	34,887733
11	309,170000	95,940000	0,000000	-0,330362	0,588228	2,268411	24,790659
12	333,540000	98,460000	0,000000	-0,343384	0,579735	2,259195	36,374859

Abb. 4.25: Aufbau einer Messdatei. In der Messdatei werden die Messwerte in acht Spalten gespeichert: 1) laufende Nummer der Bohrung, 2) x-Koordinate der Messmaschine in mm, 3) y-Koordinate der Messmaschine in mm, 4) z-Koordinate der Messmaschine in mm, 5) x-Koordinate der Bohrungsposition im Kamerabild in mm, 6) y-Koordinate der Bohrungsposition im Kamerabild in mm, 7) Durchmesser der Bohrung in mm, 8) „Rundheit“ als Maß für die Übereinstimmung des angepassten Kreises der Bilderkennung mit Kontrastunterschieden. Die Datei enthält zudem Datum und Uhrzeit der Messung.

des Kamerabildes eine Bohrung. Der Durchmesser und die Position der Bohrung im Koordinatensystem der Kamera werden von der Bilderkennungsroutine bestimmt und mit der aktuellen Position der Arme der Maschine in eine Messdatei geschrieben.

Die unscharfe Kontur des Zahns in Abb. 4.24 kommt dadurch zustande, dass die Kamera auf einen Radiuswechsel der Bohrung in ca. 3 mm Bohrtiefe fokussiert ist. Das Anfahren einer Position mit anschließender Bohrungserkennung dauert weniger als 15 s. Bei einem Zylinderkamm werden für einen kompletten Programmdurchlauf ca. 30 min benötigt. Auf die Genauigkeit des Messverfahrens wird in Kap. 4.3 näher eingegangen.

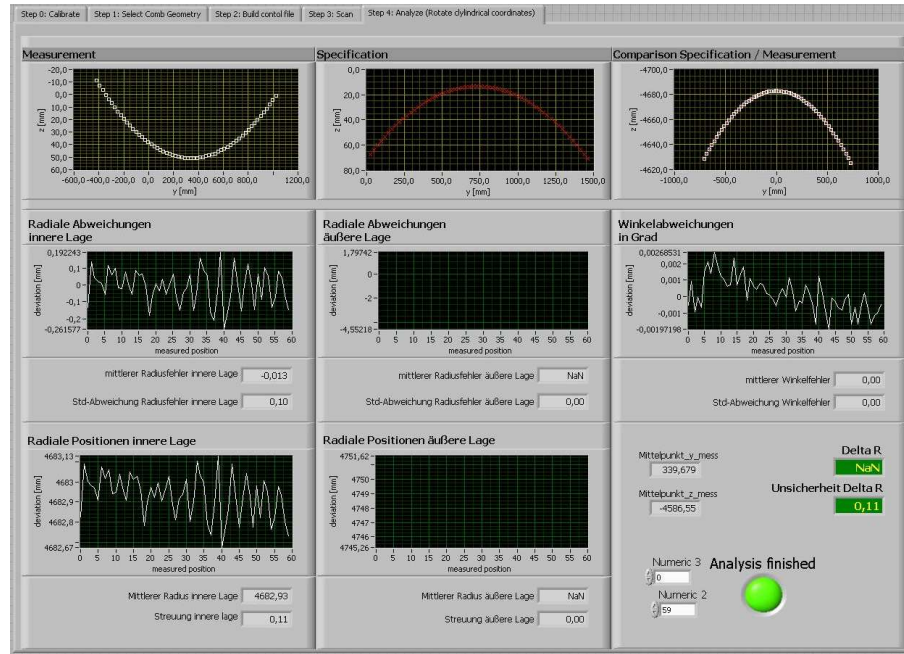


Abb. 4.26: 5. Schritt des Kammvermessungsprogramms. Auswertung der Messergebnisse.

5. Analyse: Die Messdatei wird im letzten Abschnitt des Programms ausgewertet. Dabei werden die gemessenen Positionen mit den Referenzpositionen verglichen, wie in Kap. 4.1.4 beschrieben. Das Programm gibt Graphen der Messwerte und der Abweichungen, sowie Werte für die maximale und durchschnittliche radiale und azimutale Abweichung der Messergebnisse von den Referenzwerten an. Außerdem bestimmt das Programm die Differenz der Radien der Bohrungslagen, sowie deren Abweichung vom Sollwert. Anhand dieser Ergebnisse kann entschieden werden, ob der Kamm den Anforderungen genügt. Die Ergebnisse der Auswertung werden lokal auf dem Messrechner gespeichert und regelmäßig in der dafür vorgesehenen Datenbank gesichert (Kap. 6.3).

4.2 Optische Sensoren

Der Stiefelmayer-Messtisch kann mit zwei unterschiedlichen optischen Sensoren ausgestattet werden, die eine berührungsfreie Qualitätskontrolle ermöglichen. Im ersten Schritt der Qualitätskontrolle wird die Fertigungsgenauigkeit der Kämme überprüft. Dabei ist die

Positionsgenauigkeit der Bohrungen, die die Keramikisolatoren halten, entscheidend. Die Positionen der Bohrungen werden mit einer Digitalkamera über Bilderkennungssoftware bestimmt.

Der 2D-Lasersensor dient im zweiten Schritt der Qualitätskontrolle zur Vermessung der Drahtpositionen und der Drahtspannungen der fertiggestellten Elektrodenmodule.

4.2.1 Kamera

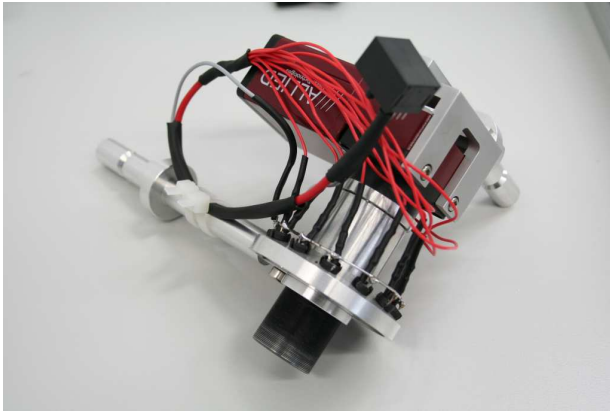
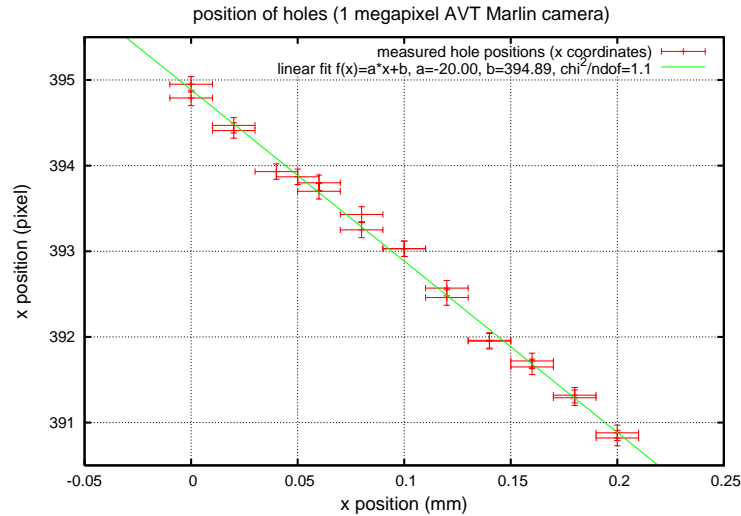
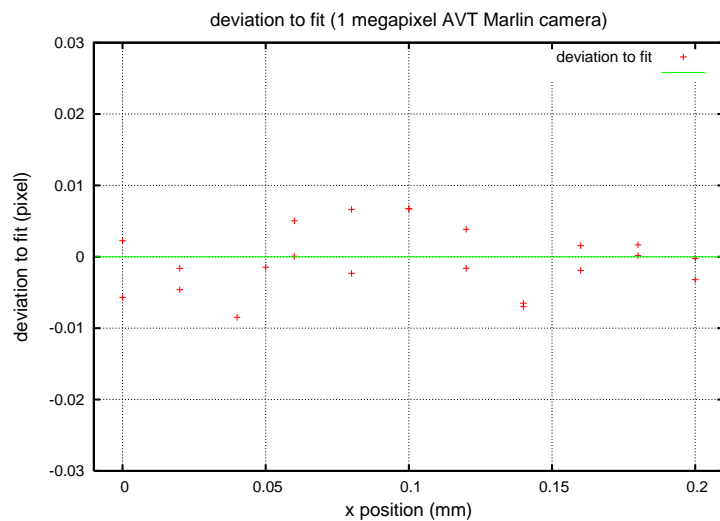


Abb. 4.27: AVT Marlin F080C mit Halterung. Die Kamera kann in verschiedenen Positionen an der Messmaschine angebracht werden. Ihr Sichtfeld wird mit 11 LEDs ausgeleuchtet.

Die erste Aufgabe der Qualitätskontrolle im laufenden Produktionsprozess ist die Vermessung der Kammgeometrie. Hierbei ist nur die Bestimmung der Bohrungspositionen vorgesehen, da diese im fertigen Modul die Positionen der Drähte bestimmen. Um diese Messung präzise und kontaktfrei durchführen zu können, wird eine Digitalkamera mit Bilderkennungssoftware verwendet. Die in der Qualitätskontrolle verwendete Kamera ist ein Modell der Firma Allied Vision Technologies (AVT). Es wurden mehrere Tests mit zwei verschiedenen Kameras dieser Firma, einer 8-Megapixel-Kamera des Typs Oscar F-810C und einer 1-Megapixel-Kamera des Typs Marlin F-080C, und zwei verschiedenen Objektiven, Opto $f = 37$ mm und Linos $f = 16$ mm, durchgeführt. Neben den unterschiedlichen Brennweiten unterscheiden sich die Objektive hauptsächlich durch ihre Bauart. Das Linos-Objektiv ist wie das Objektiv einer Spiegelreflexkamera aufgebaut und verfügt im Gegensatz zum Opto-Objektiv über eine Blende. Das Opto-Objektiv ist ein Leichtbau das aus einer mit Schrauben über dem CCD justierbaren Objektivaufnahme besteht, in die das Linsensystem, dessen Halterung komplett mit einem Außengewinde versehen ist, eingeschraubt werden kann. Getestet wurde die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Bilderkennung. Die Kameras mit den verschiedenen Objektiven wurden in verschiedenen Abständen in 0,02 mm Schritten in y-Richtung über einen Zahn eines Kamms bewegt. Die Bilderkennung (s. Kap. 4.1.4) hat nach jedem Schritt das Kamerabild mit einer Bildvorlage des Lochs verglichen, und so die Position in Kamerakoordinaten (angegeben in Pixeln) bestimmt. Abbildungen 4.28(a),(b) und 4.29 (a),(b) zeigen die Ergebnisse der Testmessungen beider Kameras mit dem Linos $f = 16$ mm Objektiv. Gegeneinander aufgetragen sind die Verschiebung des Messarms in mm und die Position des Lochs in Kamerakoordi-



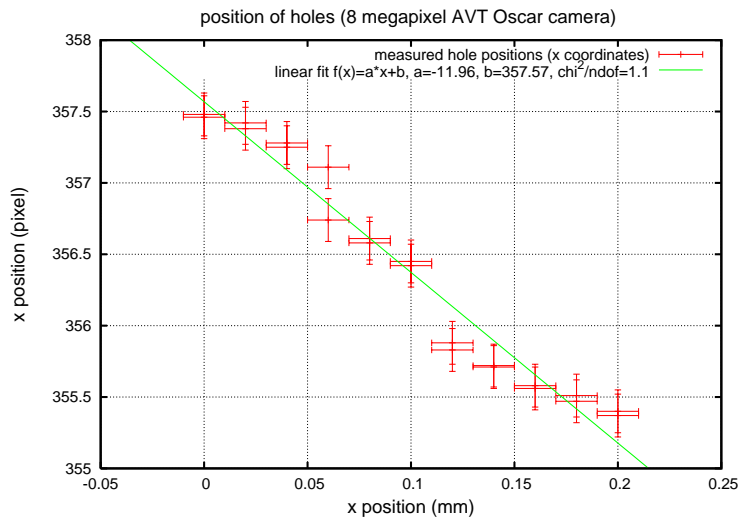
(a)



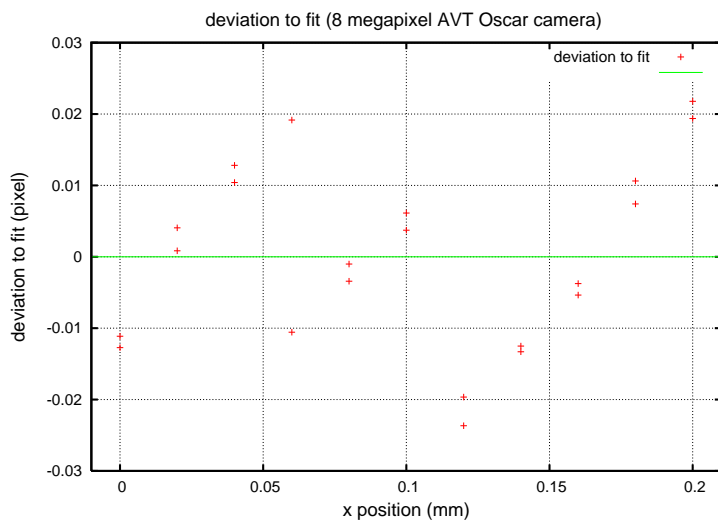
(b)

Abb. 4.28: **Ergebnisse der Kameratests (AVT Marlin).** (a) Position der erkannten Vorlage in Kamerakoordinaten (Pixel) gegen Koordinaten des Messarms (mm) mit angepasster linearer Funktion, (b) Abweichungen der Messpunkte aus (a) vom linearen Fit.

naten. Es sollte ein linearer Zusammenhang zu finden sein. An die Datensätze der beiden Messungen wurden Geraden angepasst und die Abweichungen der einzelnen Messwerte zu diesen bestimmt. Die ungeraden Pixelwerte kommen durch die analytische Bestimmung der Position der Bildverlage zustande. Wie an Abbildungen 4.28 (b) und 4.29 (b) zu erkennen ist, liefert die 1-Megapixel AVT Marlin F080C Kamera die besseren Ergebnisse,



(a)



(b)

Abb. 4.29: **Ergebnisse der Kameratests (AVT Oscar)**. (a) Position der erkannten Vorlage in Kamerakoordinaten (Pixel) gegen Koordinaten des Messarms (mm) mit angepasster linearer Funktion, (b) Abweichungen der Messpunkte aus (a) vom linearen Fit.

was auch bei einer analogen Messung mit dem Opto $f = 37$ mm Objektiv der Fall war.

Im aktuellen Aufbau wird daher die AVT Marlin F-080C⁹ in Verbindung mit dem Opto $f = 37$ mm-Objektiv verwendet. Das Opto Objektiv ist aufgrund seiner individuelleren

⁹Ein ausführliches Datenblatt ist in Anhang C.1 zu finden.

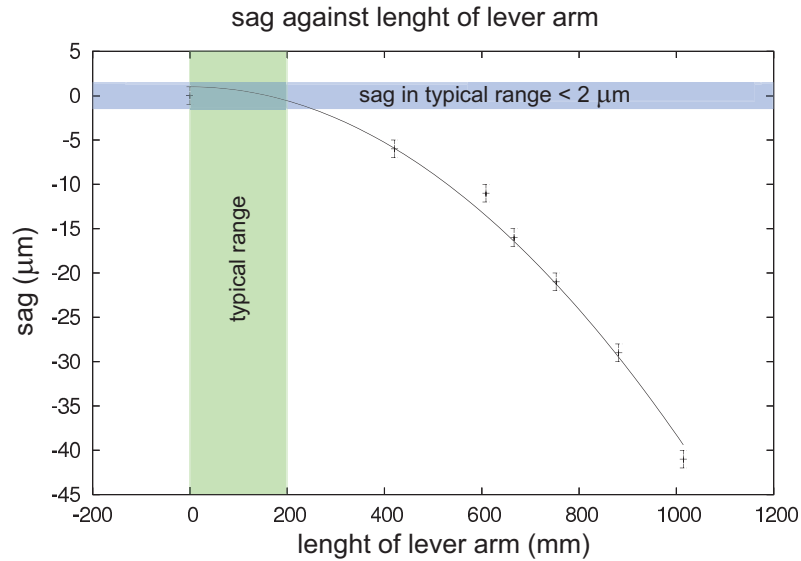


Abb. 4.30: **Verkippung des Messarms unter dem Kameragewicht.** Während der Vermessung der Kämmen tritt eine Verkippung des Messarms unter dem Gewicht der Kamera von weniger als $2 \mu\text{m}$ auf.

Einstellmöglichkeiten besser geeignet. Das Linsensystem ist in ein Gehäuse eingelassen, das von außen komplett mit einem Gewinde versehen (s. Abb. 4.27) ist. Es wird so in die mit der Kamera verbundenen Halterung geschraubt und mit einem Konterring fixiert. Das Objektiv hat dadurch, dass man die Linseneinheit auch umgedreht in das Gehäuse schrauben kann, sehr gute Makro-Eigenschaften, die für die Anwendung notwendig sind. Dies konnte das Linos-Objektiv nicht leisten. Die Kamera wird bei der Bestimmung der Lochpositionen in einem Abstand von ca. 60 mm über die Kämmen fahren, wobei das Sichtfeld der Kamera ungefähr $4 \cdot 3 \text{ mm}^2$ beträgt. Dieses wird mit dem Objektiv auf das $4,65 \cdot 4,65 \mu\text{m}^2$ große CCD mit effektiv 1024×768 Pixeln abgebildet. Daraus ergibt sich ein Abbildungsverhältnis von ca. $4 \cdot 4 \mu\text{m}^2$ pro Pixel.

Nach Nyquist¹⁰ muss die Auflösung eines Sensors mindestens doppelt so hoch sein wie das kleinste zu vermessende Bilddetail. Das Nyquist-Kriterium besagt in diesem Zusammenhang, dass für eine verlustfreie Aufnahme die Zahl der Pixel die Auflösung um den Faktor 4 übersteigen soll: ein Faktor 2 für die x- und nochmal ein Faktor 2 für die y-Richtung. Umgekehrt lässt sich damit aus dem eben angegebenen Abbildungsverhältnis das Auflösungsvermögen dieser Kameraeinstellung zu $8 \cdot 8 \mu\text{m}^2$ bestimmen.

¹⁰Das Nyquist-Shannon Abtasttheorem besagt, dass ein kontinuierliches, bandbegrenztetes Signal mit einer Maximalfrequenz f_{max} , mit einer Frequenz größer als $2 \cdot f_{max}$ abgetastet werden muss, damit man aus dem so erhaltenen zeitdiskreten Signal das Ursprungssignal ohne Informationsverlust exakt rekonstruieren bzw. beliebig genau approximieren kann. Das Nyquist-Shannon Abtasttheorem findet bei jeder Digitalisierung Anwendung. $\frac{1}{2} f_{abtast}$ nennt man, nach Vorschlag von C. E. Shannon, die Nyquist-Frequenz. Analog gilt das Abtasttheorem auch bei Bildern, wobei die Abtastfrequenz dann in Linien (bzw. Pixel) pro Längeneinheit bestimmt werden kann. [Wik2]

Es wurde eine der Anwendung angepasste Kamerahalterung gebaut, die sowohl das Vermessen der Bohrungen ermöglicht, als auch passende Abmessungen hat, um Kontrollbilder der Keramiken in den fertigen Modulen aufzunehmen. Aufgrund der Abmessungen der größten Elektrodenmodule wird das vom Messarm abfahrbare Volumen vollständig genutzt. Die Kamera mit Halterung, in der sowohl das Objektiv, als auch 11 Leuchtdioden integriert sind, wiegt 595 g. Die Beleuchtungsstärke lässt sich durch Auswahl der Versorgungsspannung der Leuchtdioden (3 V, 5 V oder 15 V) variieren. Das Gewicht dieser Einheit ist bei der Bestimmung der Lochpositionen nicht kritisch, da bei dieser Messung der y-Arm des Messtisches nur wenige Zentimeter ausgefahren wird. Eine Messung hat gezeigt, dass die auftretende Durchbiegung des Arms minimal und vernachlässigbar ist. In Abb. 4.30 ist das Ergebnis dieser Tests dargestellt. Im Arbeitsbereich der Kammvermessung tritt eine Verkippung von maximal $2 \mu\text{m}$ auf. Auch bei der Aufnahme von Kontrollbildern der Keramiken, bei der die Kamera am voll ausgefahrenen Messarm hängt, ist das Gewicht nicht problematisch, da hierbei keine Positionsinformationen aufgenommen werden, die durch den Durchhang des Messarms verfälscht würden.

4.2.2 Lasersensor

Zur Bestimmung der Position der Drähte und deren Spannung im fertigen Modul wird ein Lasersensor verwendet, der im Rahmen der Diplomarbeit von M. Reinhardt speziell für die Erfordernisse dieser Qualitätskontrolle entwickelt wurde [Rht07]. Vorausgehende Tests mit kommerziell erhältlichen Geräten lieferten nicht die gewünschten Ergebnisse. Der Lasersensor hat eine Genauigkeit von $\sigma_x = 0,014 \text{ mm}$ und $\sigma_y = 0,016 \text{ mm}$. Der Sensor

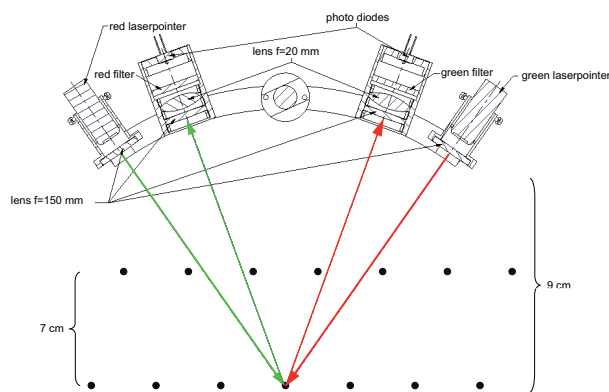


Abb. 4.31: Schematische Darstellung des Lasersensors.



Abb. 4.32: Der Lasersensor am Arm der Messmaschine. Der Lasersensor ist an der Halterung des y-Arms der Maschine angebracht. Der blaue Schlauch dient der Zufuhr von Argon, um die Drähte in Schwingung zu versetzen.

besteht aus einem roten und einem grünen Laser, die beide handelsüblichen Laserpointern entnommen wurden. Diese sind an den äußeren Enden einer Halterung angebracht und werden mit Linsen der Brennweite $f = 150$ mm fokussiert (s. Abb. 4.31). Neben den Lasern sind Photodioden angebracht. Um diese vor Streulicht zu schützen sind sie in Gehäuse gefasst. Damit jeweils nur das Licht des roten bzw. grünen Lasers auf eine Photodiode trifft, sind vor den Dioden Farbfilter angebracht. Ein vor den Farbfiltern liegendes Linsensystem bestehend aus einer $f = 150$ mm und einer $f = 20$ mm Linse fokussiert das am Draht reflektierte Licht auf die Photodioden.

Der Lasersensor bestimmt die Position eines Drahtes in der von den beiden Laserstrahlen aufgespannten Ebene nach einem einfachen Prinzip. Beim Auftreffen eines Laserstrahls auf einen Draht wird dieser reflektiert und die Intensität des reflektierten Lichts mit einer Photodiode gemessen. Wird der Draht vom Lasersensor überfahren, registriert die Photodiode eine gaußförmige Intensitätsverteilung. Das Intensitätsmaximum gibt dabei den Mittelpunkt des Drahtes an. Im allgemeinen treffen nicht beide Laserstrahlen den Draht gleichzeitig, so dass erst eine der Photodioden ein Spannungssignal ausgibt und die zweite Diode erst etwas später. Die Abstände der Maxima der Gaußkurven, aufgetragen gegen den Abstand des Sensors zum Draht, ergeben eine Gerade, mit deren Hilfe die y -Position des Drahtes anhand der Maximaabstände bestimmt werden kann (s. Abb. 4.33). Die Bestimmung der x -Position setzt die Kenntnis eines der Winkel α und β zwischen der

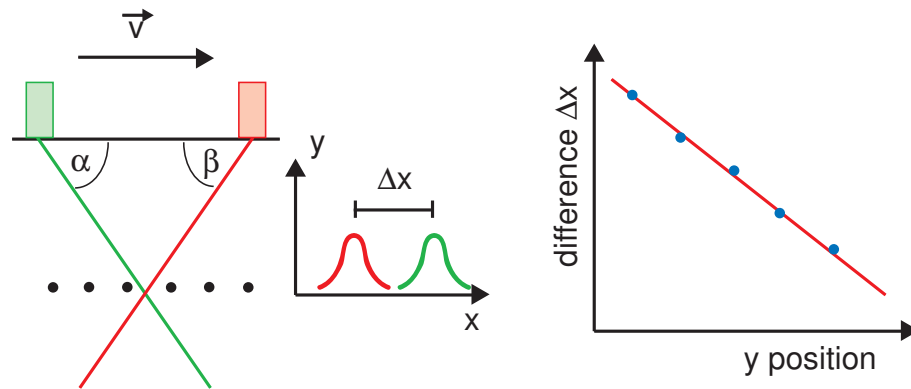


Abb. 4.33: **Bestimmung der y -Koordinate.** Die y -Position eines Drahtes lässt sich mit Hilfe einer zuvor bestimmten Eichgerade und dem Abstand der Reflexionsmaxima Δx bestimmen. [Rht07]

Verbindungsachse der Laser und den Laserstrahlen voraus. Diese können aus Messungen der absoluten x -Positionen der Gaußmaxima bei verschiedenen y -Positionen bestimmt werden. Ist somit beispielsweise der Winkel α bekannt, kann über $\tan \alpha = x/y$ die x -Position des Drahtes berechnet werden, wobei der Kreuzungspunkt der beiden Laserstrahlen als Bezugspunkt gewählt wird (s. Abb. 4.34)[Rht07].

Neben der Position eines Drahtes soll der Lasersensor auch dessen Spannung bestimmen. Ein in Schwingung versetzter Draht bildet, da er an beiden Seiten eingespannt ist, wie

eine Gitarrensaite stehende Wellen aus. Die Schwingungsfrequenzen f_{n-1} stehen über

$$f_{n-1} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}} \quad (4.1)$$

mit der Drahtspannung in Zusammenhang [Rht07]. Dabei ist l die Länge des Drahtes, ρ die Dichte des Drahtmaterials und A dessen Querschnittsfläche. n gibt die Ordnung der Oberschwingung an, wobei f_0 mit $n = 1$ die Grundschiwingung ist. Wird der Sensor

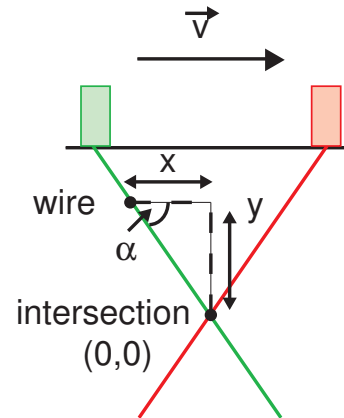


Abb. 4.34: **Bestimmung der x-Koordinate.** Die x-Position eines Drahtes kann über dessen y-Position und den Winkel α bestimmt werden. [Rht07]

so positioniert, dass einer der Laser den Draht trifft, so stellt das Ausgangssignal des Lasersensors eine Überlagerung aller harmonischen Schwingungszustände dar. Mit Hilfe einer Fourieranalyse wird das Signal des Sensors in seine Frequenzkomponenten zerlegt. Daraus wird die Frequenz der 1. Oberschwingung f_1 bestimmt¹¹, mit der über

$$F = f_1^2 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot A \quad \text{mit } A = \pi \cdot r^2 \quad (4.2)$$

die Drahtspannung berechnet werden kann. Dabei sind der Drahtradius r und die Drahtlänge l gegeben.

An der Halterung des Lasersensors ist eine Düse angebracht, durch die unter 8 bar Druck stehendes Argon ausgestoßen werden kann. Sie ist mit einer Schelle befestigt, so dass der Luftstrom auf den Draht gerichtet werden kann. Wenn der Lasersensor sich über einem Draht befindet wird ein Ventil geöffnet und ein kurzer Gasstoß versetzt den Draht zur Bestimmung der Spannung in Schwingung. Der Gasstoß wird durch ein Magnetventil reguliert, das eine Öffnungszeit von 15 ms hat und über den Steuercomputer geöffnet und geschlossen werden kann [Pra09].

Der Lasersensor wird während der Vermessung der fertigen Module am zeitweise voll ausgefahrenen y-Arm des Messtisches befestigt. Da sich dieser auch unter geringer Gewichtsbelastung messbar verkippt, werden Messungen durch einen zu schweren Sensor verfälscht.

¹¹Die Bestimmung der Drahtspannung erfolgte zunächst über die Grundschiwingung. Um das Verfahren schneller zu machen, wurde es auf die 1. Oberschwingung umgestellt, da die Grundmode erst nach einigen Sekunden, nach abklingen der Oberschwingungen zu finden war.

Abb. 4.35 zeigt die Verkipfung des Messarms unter einer Gewichtslast von ca. 250 g. Bei voll ausgefahrenem Arm beträgt diese $28 \mu\text{m}$. Während der Entwicklung wurde daher darauf geachtet, Gewicht am Sensor einzusparen, ohne die Funktionalität einzuschränken. Der fertige Sensor wiegt ca. 230 g.

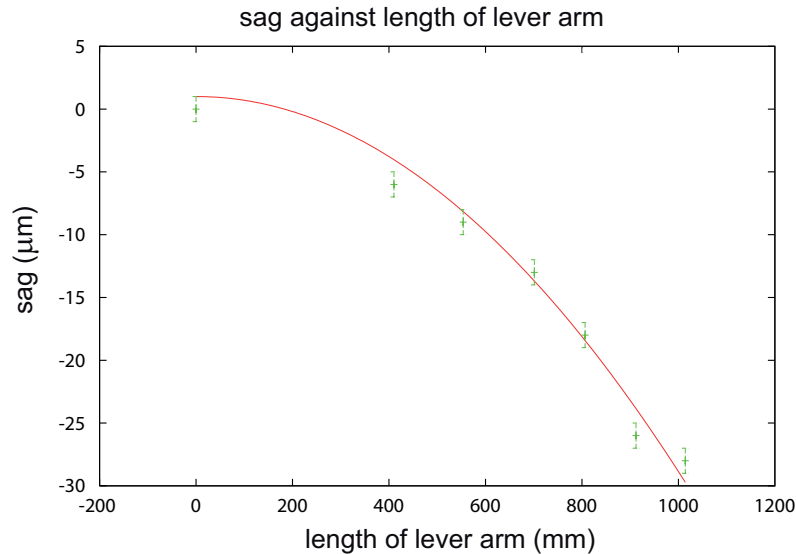


Abb. 4.35: **Verkipfung des Messarms unter Gewicht des Lasersensors.** Unter einer Gewichtslast von ca. 250 g verkippt der voll ausgefahrne y-Arm der Messmaschine um $28 \mu\text{m}$.

4.3 Genauigkeit der Kammvermessung

Nach der Automatisierung wurden die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der vorgestellten Methode zur Vermessung der Kammgeometrie experimentell bestimmt. Wie schon beschrieben, wird die absolute Position einer Bohrung im Kamm aus der Position des Messarms und der Position des mit Hilfe der Bilderkennungssoftware NI Vision aus dem Kamerabild ermittelten Zentrum der Bohrung bestimmt (s. Kap. 4.1.4).

Die Bilderkennungsroutine arbeitet zuverlässig, wenn der Mittelpunkt der Maske und der Mittelpunkt der Bohrung in der Größenordnung von $\pm 0,5 \text{ mm}$ übereinstimmen. Bei deformierten Löchern oder schlechtem Kontrast gegenüber dem Untergrund kann es jedoch zu Schwierigkeiten mit der Bilderkennungsroutine kommen, so dass die Bohrungspositionen falsch erkannt werden. Abb. 4.36 zeigt zwei Fälle, in denen die Geometrie nicht korrekt erkannt wird.

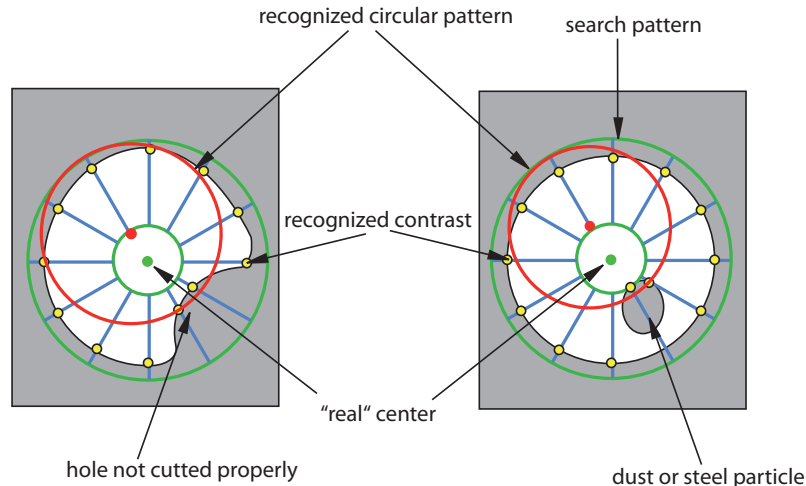


Abb. 4.36: **Probleme bei der Locherkennung.** Die Position der Löcher kann durch Deformation (links) oder reflektierende Partikel (rechts) verfälscht werden. Die an der Deformation oder dem Partikel gefundenen Kontrastunterschiede werden von der Software bei der Anpassung eines Kreises berücksichtigt, was zu einer Verschiebung des Mittelpunkts führt.

Da die Qualitätskontrolle 496 Kämmen vermessen soll, ist es wichtig sicherzustellen, dass die Ergebnisse einer Messung reproduzierbar sind. Die Messmaschine sollte in der Lage sein mehrere Kämmen der gleichen Form nacheinander mit den gleichen Einstellungen zu vermessen und dabei Ergebnisse zu liefern, die einen Vergleich mit den Vorgaben durch die CAD-Dateien zulassen. Das bedeutet für die Messmaschine, dass die automatische Steuerung in der Lage sein muss, vorgegebene Positionen genau und fehlerfrei anzufahren, und dies im Fall der Kämmen für den Zentralteil 120 mal hintereinander. Daher wurde die Reproduzierbarkeit der Positionserkennung getestet, indem ein Zylinderkamm mehrfach hintereinander komplett vermessen wurde und die Ergebnisse der insgesamt sechs Einzelmessungen miteinander verglichen wurden. Die Messung erfolgte bereits voll automatisch, lediglich die Analyse der Daten wurde noch nicht vom Steuerprogramm durchgeführt. Die Messung wurde an einem der Wasserstrahl-Schnittmuster eines Zylinderkamms der Firma Göcke durchgeführt, deren Design noch die geschlitzten Zahnschneiden beinhaltet.¹² In Abb. 4.37 und 4.38 sind die Abweichungen der Messwerte der sechs Messungen von den Vorgaben des CAD-Entwurfs dargestellt.¹³ Neben den Abweichungen der gemessenen Positionen von den Sollwerten wird deutlich, dass die vom Messsystem ermittelten Koordinaten der Bohrungen reproduzierbar sind. Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit wurden zu jedem der 120 Löcher des Kamms der Mittelwert und die Standardabweichung aus den sechs Messwerten ermittelt, und über alle 120 Standardabweichungen gemittelt. Die Standardabweichung hat im Mittel einen Wert von $\sigma_{mittel} = 0,004$ mm, der Maximalwert

¹²Der auf einigen Bildern zu erkennende Spalt am Ende eines Lochs sollte das Einfädeln der Drähte mit den Keramikisolatoren in die Kämmen erleichtern. In Kap. 5.2 wird erläutert, warum das finale Kammdesign diesen Spalt nicht mehr vorsieht.

¹³Der vermessene Kamm stammt aus einer Testproduktion, deren Kämmen zu große Abweichungen aufwiesen.

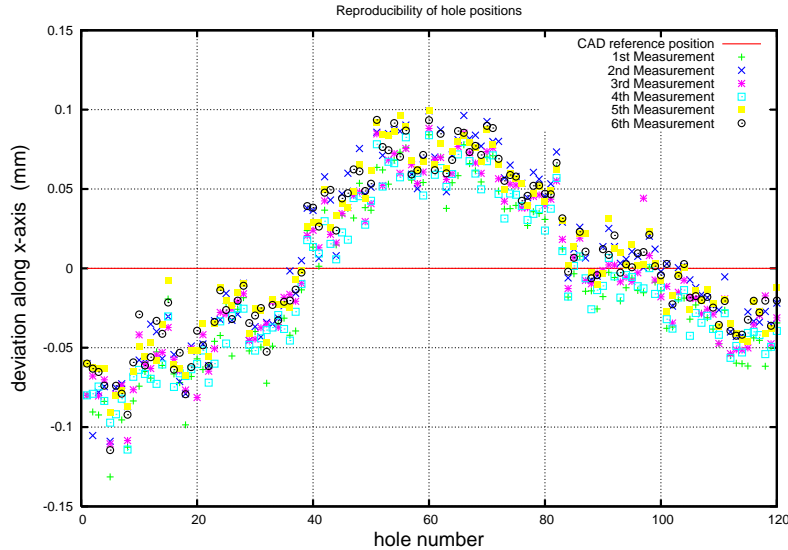


Abb. 4.37: **Reproduzierbarkeit der Kammvermessung, x-Werte.** Zu erkennen ist, dass die x-Werte der Lochpositionen des vermessenen Kamms von den CAD Vorgaben abweichen, die Ergebnisse für einzelne Bohrungen aber reproduzierbar sind.

von $\sigma_{max} = 0,011$ mm wurde bei Loch Nummer 97 des Kamms festgestellt. Die absolute Genauigkeit der Positionsbestimmung ist gegeben durch die Genauigkeit mit der die Position des Messarms festgelegt werden kann und der soeben bestimmten Unsicherheit der Einzelmessungen, die auch die Auflösung und Unsicherheiten in der Bilderkennung beinhaltet. Erstere ist durch die Auflösung der Encoder der Messmaschine von $10 \mu\text{m}$ ($\Delta P_{Messarm} = \pm 0,005$ mm) gegeben, letztere wird konservativ durch σ_{max} abgeschätzt. Der Gesamtfehler ergibt sich zu

$$\Delta x = \Delta y = \Delta P_{Messarm} + \sigma_{max} = \pm 0,016 \text{ mm.}$$

Die Auflösung der Messarme geht an dieser Stelle noch einmal extra in den Gesamtfehler ein, da während der Testmessung die Kammposition auf dem Messtisch nicht verändert wurde und so ein eventueller Achsenfehler die Messung jedesmal auf dieselbe Weise beeinflusst haben könnte, ohne bemerkt zu werden. Bei der Vermessung der Kämme und der Analyse der Messergebnisse ist zu beachten, dass eine von der Bilderkennungsroutine nicht erkannte Bohrung zu Abweichungen in mm-Bereich führt, da die Bilderkennung in diesem Fall den Wert Null als x- und y-Koordinate der Bohrung im Kamerabild in die Messdatei ausgibt. Nach Ablauf der automatischen Analyse sollten die aufgenommenen Bilder von Bohrungen, die auffällig aus der Verteilung der Messwerte abweichen, auf Fehler bei der Locherkennung, verursacht z.B. durch Metallspäne, überprüft werden. Gegebenenfalls muss die Vermessung eines Kamms wiederholt werden.

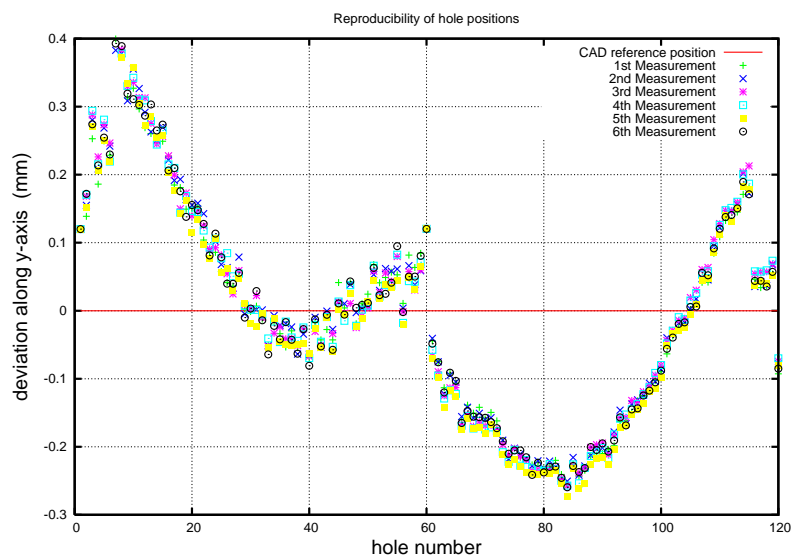


Abb. 4.38: **Reproduzierbarkeit der Kammvermessung, x-Werte.** Zu erkennen ist, dass die y-Werte der Lochpositionen des gemessenen Kamms ebenfalls von den CAD Vorgaben abweichen, die Ergebnisse für einzelne Bohrungen jedoch auch in diesem Fall reproduzierbar sind.

Kapitel 5

Qualitätskontrolle der Modulkomponenten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von Qualitätskontrollmessungen präsentiert, die während der Entwicklung des im vorherigen Kapitel beschriebenen Messsystems durchgeführt wurden. Vor der Serienproduktion der Elektrodenmodule war es nötig, die Fertigungstoleranzen der Modulkomponenten zu kontrollieren. Dies betraf sowohl die Auswahl des Schnittverfahrens bei der Kammproduktion, als auch die Vergabe des Produktionsauftrags und Studien des Ausheizverhaltens der Komponenten. All diese Messungen wurden während der Entwicklungsphase der Messmaschine durchgeführt und haben zur Verbesserung des Systems beigetragen.

5.1 Auswertungsmethoden der Messergebnisse

Im zur Qualitätskontrolle der Käme verwendeten *Kammvermessungsprogramm_V1.5.vi* wird der Vergleich der Messergebnisse mit den CAD-Vorgaben in Zylinderkoordinaten durchgeführt, wie in Kap. 4.1.4 erläutert. Dies macht die Auswertung einfacher und übersichtlicher, da eine der wichtigsten Größen der Abstand der Bohrungslagen zueinander ist. Zum Zeitpunkt der Messungen, die in diesem Kapitel behandelt werden, war die Auswertung in Zylinderkoordinaten allerdings noch nicht vollständig im Programm implementiert, so dass die Ergebnisse in kartesischen Koordinaten angegeben werden. Abb. 5.1 zeigt das Bedienfeld des Auswertungsprogramms. Zu Beginn der Analyse wird die Datei mit den Messwerten des kontrollierten Kamms (Abb. 5.1 (1)) und die Datei mit den Referenzwerten ausgewählt (Abb. 5.1 (2)), die anschließend miteinander verglichen werden (Abb. 5.1 (3)). Die Käme sind während der Messungen parallel zur x-Achse auf dem Messtisch fixiert, so dass eine Positionsabweichung in y-Richtung im Wesentlichen einer Abweichung parallel zu den Zähnen und in x-Richtung senkrecht zu den Zähnen entspricht.

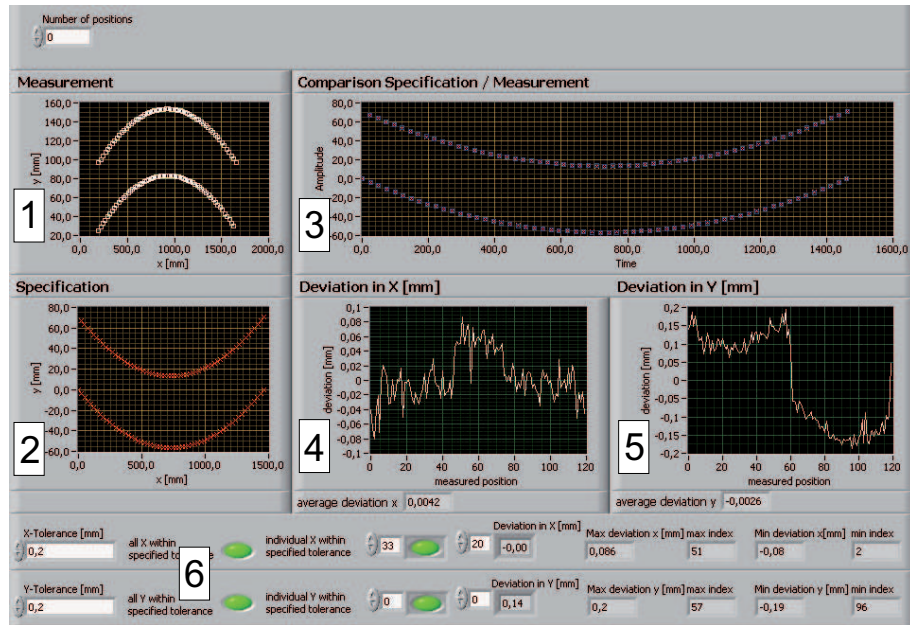


Abb. 5.1: **Bedienfeld des Analyseprogramms.** Das Analyseprogramm rotiert die Daten der Messung (1) auf die Referenzdaten (2). Das Ergebnis der Rotation ist in (3) zu sehen. Danach wird die Summe der quadratischen Abweichungen optimiert und die Abweichungen von den Referenzwerten in x- und y-Richtung angezeigt (4) u. (5) und in eine Datei geschrieben. Im unteren Teil (6) werden zusätzliche Informationen wie die maximale und minimale Abweichung angegeben.

5.2 Test verschiedener Schnittverfahren

Während der Entwicklungsphase der Module wurden zwei Schnittverfahren zur Herstellung der Käme getestet, Wasserstrahl- und Laserschnitt. Die von zwei Firmen mit Wasserstrahl- und Laserschnitt gefertigten Kammmuster wurden im Rahmen der Messungen in Kap. 4.3 auf ihre Fertigungsqualität überprüft. Wie schon beschrieben sollte der Grundradius der Löcher, in denen die Drähte befestigt werden, bei der Fertigung mitgeschnitten werden. Der dabei entstehende Schlitz (s. z.B. Abb. 5.2) sollte das spätere Einfädeln der Drähte mit den Isolatoren vereinfachen. An dieser Stelle soll kurz auf die Qualität der Schnittmuster eingegangen werden.

Laserschnitt

- Die Schnittkante der Käme auf der Seite der Zähne ist wesentlich länger als die Schnittkante der Krümmung an der gegenüberliegenden Seite des Kamms. Durch die größere Hitzeentwicklung an der Schnittkante der Zähne kam es zu einer Verformung der Käme die sich in einem vom Sollwert abweichenden Radius der Krümmung des Kamms äußerte.

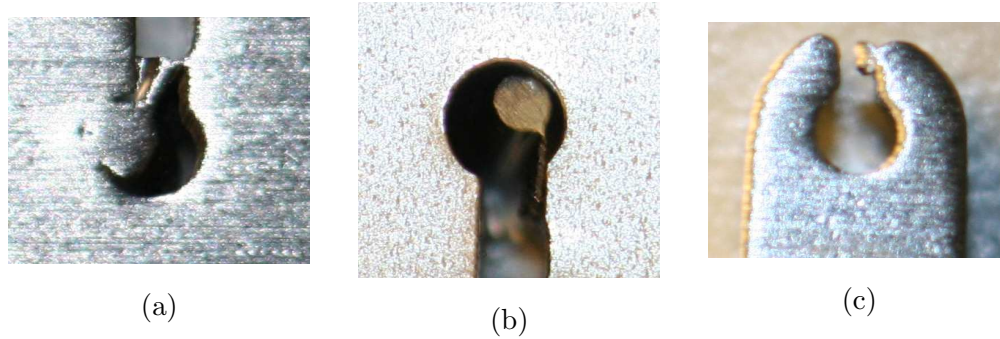


Abb. 5.2: **Verschmelzungen durch Laserschnitt.** Beim Laserstrahlschnitt traten an einigen Löchern Materialverschmelzungen auf.

- Durch die Hitze des Laserstrahls kam es zu Verschmelzungen des Materials. Dies ist besonders bei den mitgeschnittenen Löchern zu erkennen (Abb. 5.2). Diese sind teilweise stark deformiert. Die Qualität der Schnittkanten ist insgesamt schlechter als beim Wasserstrahlschneiden.

Wasserstrahlschnitt

- Bei den mit einem Wasserstrahl geschnittenen Kämmen war ebenfalls eine Radiusdeformation festzustellen, die allerdings deutlich geringer ausfiel als beim Laserschnitt.
- Der Durchmesser der mitgeschnittenen Löcher, die die Keramikisolatoren halten sollen, war zu groß. Der benötigte kleinere Durchmesser ist mittels Wasserstrahlschnitt technisch nicht umsetzbar.

Aufgrund der festgestellten Qualitätsunterschiede wurde entschieden, die Kämmen im Wasserstrahlverfahren herstellen zu lassen. Die Überlegung, den Grundradius der Löcher zur Keramikhalterung während der Fertigung der Kämmen mitzuschneiden, wurde aufgrund der Ergebnisse der Tests mit den Schnittmustern fallen gelassen.

5.3 QA der Muster verschiedener Lieferanten

Aufgrund der hohen Kosten des Wasserstrahlschneidens wurden im Folgenden Firma Bartsch¹ und ein Mitbewerber beauftragt, weitere Schnittmuster von Kämmen anzufertigen. Diese Muster wurden einer Qualitätskontrolle auf der Messmaschine unterzogen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Genauigkeit der Zahnpositionen gelegt. Wie in Kap. 5.2 erläutert, kann es aufgrund von Materialspannungen zu Verformungen der

¹Bartsch GmbH, Hullerweg 20, D-49134 Wallenhorst

Kämme beim Schneiden kommen. Diese sind nicht kritisch, solange sie die Positionen der Drähte nicht beeinflussen. Da die Löcher erst nachträglich gebohrt werden, ist es an dieser Stelle nur entscheidend zu gewährleisten, dass eventuelle Deformationen der Zähne gering genug sind um die Bohrungen vollständig im Material platzieren zu können.

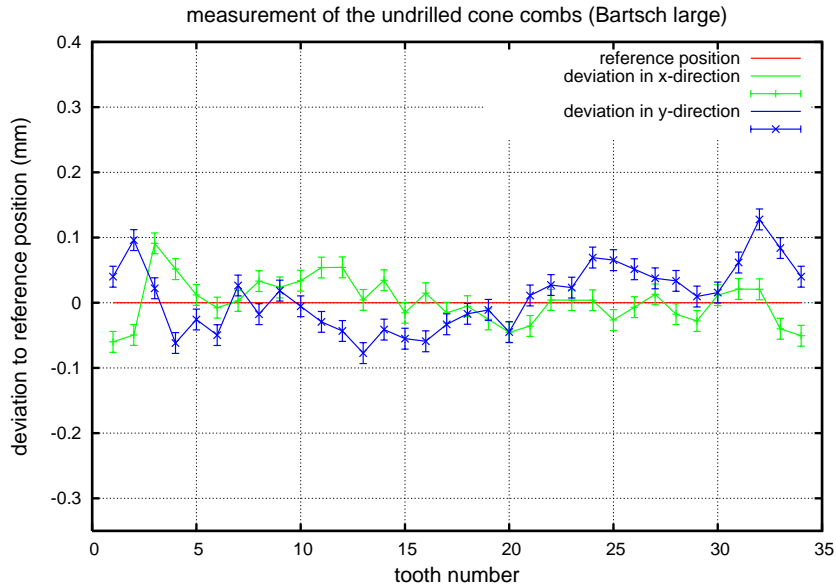


Abb. 5.3: **Abweichungen der Zahnpositionen (Bartsch Form 26)**. Abweichungen der gemessenen Zahnpositionen des Bartsch-Kamms der Form 26 von den Referenzwerten der CAD Datei.

Es wurden je zwei Schnittmuster² der Bewerberfirmen mit der Messmaschine auf ihre Übereinstimmung mit den CAD Vorgaben überprüft. Vermessen wurden dabei die Positionen der Zähne, in die die Bohrungen für die Keramikisolatoren der inneren Drahtlage gesetzt werden. Wie bereits mehrfach erwähnt ist die genaue Positionierung der Drähte besonders wichtig. Die Zähne der Kämme sind an den Spitzen abgerundet, wobei der Bogen der Rundung konzentrisch mit den späteren Bohrungen für die Keramikisolatoren ist. Daher kann mit Hilfe der Bilderkennungssoftware an die Rundung des Zahns ein Kreis angepasst werden, dessen Mittelpunkt dem Mittelpunkt der Bohrung entsprechen sollte. Die Mittelpunkte können anschließend wie bei der Qualitätskontrolle der gebohrten Kämme mit den CAD Vorgaben für die Bohrungspositionen verglichen werden.

Da das automatische Programm, das in Kap. 4.1.4 beschrieben wurde, noch nicht vollständig zur Verfügung stand, wurden die Zähne der Kämme zur Positionsbestimmung mit der Messmaschine manuell angefahren. Die bereits fertiggestellte Bilderkennungsroutine lieferte die Positionen der Bohrungen im kalibrierten Koordinatensystem der Kamera. Die Auswertung der Messung wurde mit einer modifizierten Version des schon für die Messungen in Kap. 4.3 verwendeten LabVIEW-Programms durchgeführt.

²Pro Firma wurde ein Kamm der Form 25 und ein Kamm der Form 26 für den Vergleich genutzt. Die Formentabelle ist in Anhang A.1 zu finden.

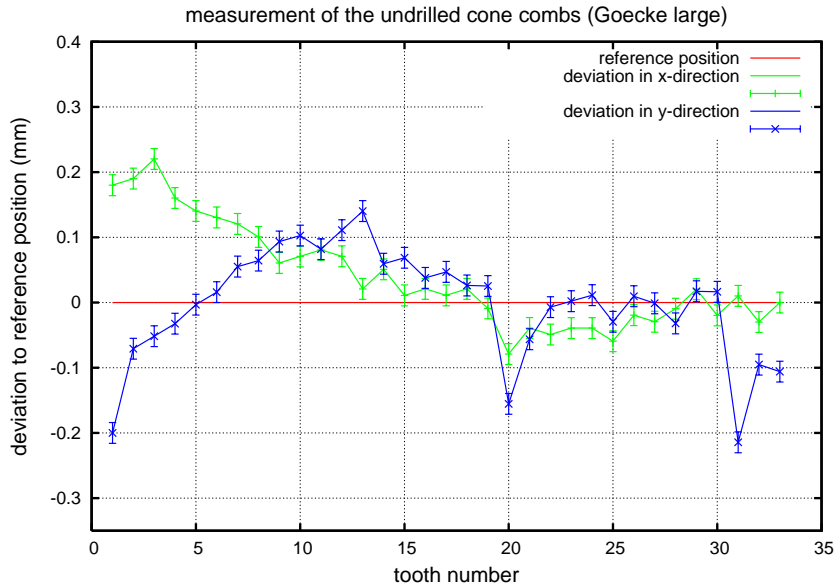


Abb. 5.4: **Abweichungen der Zahnpositionen (Mitbewerber Form 26)**. Abweichungen der gemessenen Zahnpositionen des vom Mitbewerber geschnittenen Kamms der Form 26 von den Referenzwerten der CAD Datei.

Abb. 5.3 und 5.4 zeigen die vom Analyseprogramm bestimmten Abweichungen der einzelnen Zähne zu den CAD Vorgaben der beiden Käme der Form 26. Die Fehlerbalken geben die Genauigkeit der Messmaschine an. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen bei dem Muster der Firma Bartsch geringer und gleichmäßiger sind, als beim Muster des Mitbewerbers. Die Fertigungsgenauigkeit beider Muster liegt innerhalb der geforderten Toleranzen von $\pm 0,2$ mm.

Die Abweichungen der beiden vermessenen Käme der Form 25 sind in Abb. 5.5 und 5.7 zu sehen. Bis auf die Werte von Zahn 10 und Zahn 33 in Abb. 5.5 liegen alle Abweichungen innerhalb der geforderten Toleranz von 0,2 mm. Die Abweichungen dieser beiden Zähne lassen sich durch die Aufnahmen der Bilderkennung erklären, die anhand des von der Software gefundenen Kreises zeigen, dass beide Zahnspitzen nicht vollkommen korrekt erkannt wurden (Abb. 5.6).

Neben dem Vergleich der Fertigungsgenauigkeit fiel bei der optischen Kontrolle der Schnittmuster beider Firmen eine ebenere Schnittkante bei den Bartsch-Mustern auf. Die Käme des Mitbewerbers wiesen einen Versatz der Schnittkante etwa in der Mitte des Kammrückens auf, die durch den Ansatz des Wasserstrahls direkt an der Kontur des Kamms zustande kommt. Ein solcher Versatz war bei den Kämmen der Firma Bartsch nicht festzustellen.

Aufgrund der besseren Fertigungsqualität, sowie eines günstigeren Angebots für die Fertigung der insgesamt benötigten Anzahl von 496 Kämmen wurde der Produktionsauftrag an Firma Bartsch vergeben.

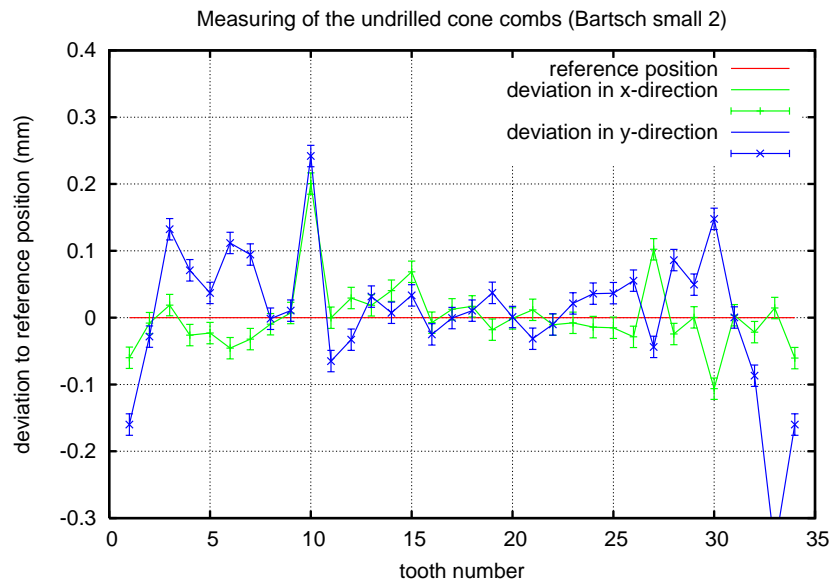
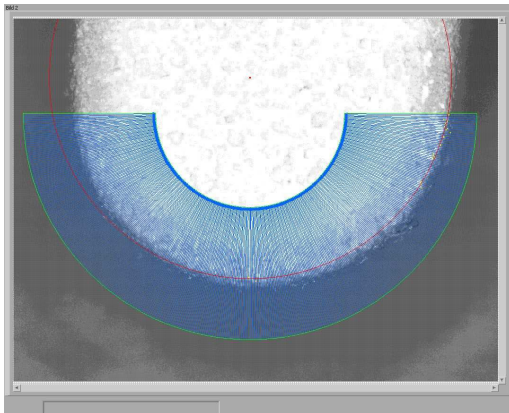
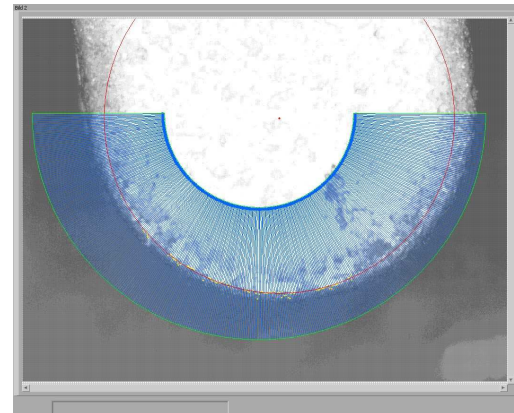


Abb. 5.5: **Abweichungen der Zahnpositionen (Bartsch Form 25)**. Abweichungen der gemessenen Zahnpositionen des Bartsch-Kamms der Form 25 von den Referenzwerten der CAD Datei.



Loch 10



Loch 33

Abb. 5.6: **Falsch erkannte Zahnschneiden (Bartsch Form 25)**. Zu erkennen sind die nicht korrekt erkannten Zahnschneiden 10 und 33. Die gefundenen roten Kreise stimmen nicht mit der Zahnkante überein.

5.4 Ausheizverhalten der Konuskämme und C-Profile

Im Rahmen der Tests des Drahtmaterials wurde festgestellt, dass die Spannung der Drähte eines Testmoduls bei Ausheiztests im Vakuumofen deutlich anstieg [Geb07],[Rht07]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass kleine Defekte beim Herstellungsprozess der Drähte schon

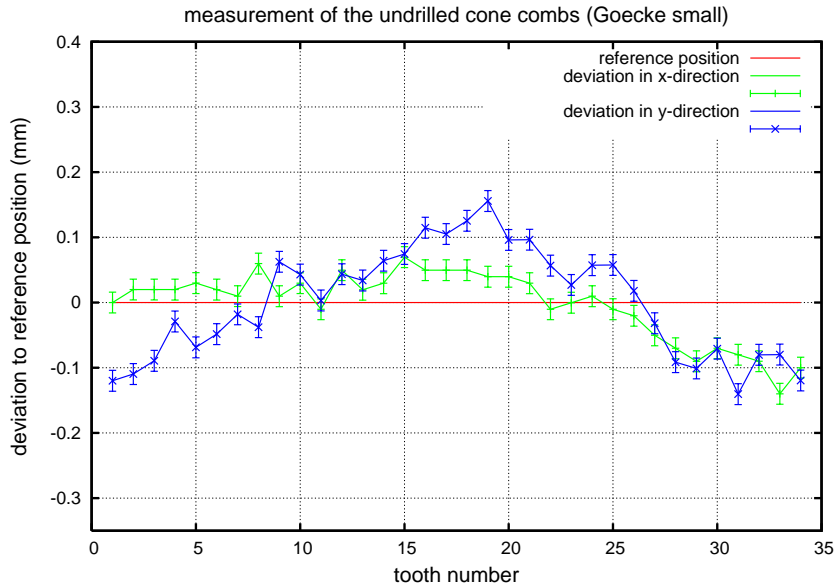


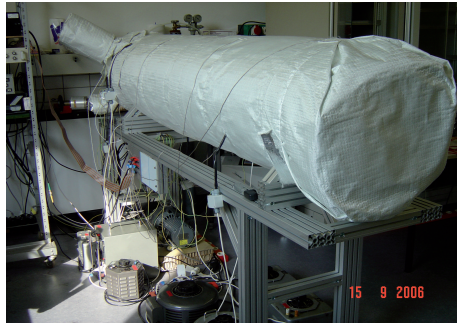
Abb. 5.7: **Abweichungen der Zahnpositionen (Mitbewerber Form 25)**. Abweichungen der gemessenen Zahnpositionen des vom Mitbewerber geschnittenen Kamms der Form 25 von den Referenzwerten der CAD Datei.

bei relativ niedrigen Temperaturen von in diesem Fall 350°C ausheilen können. Um Verformungen der Kämmen und C-Profil Streben während der Ausheizzyklen im KATRIN Hauptspektrometer ausschließen zu können, muss das thermische Verhalten dieser Modulkomponenten ebenfalls untersucht werden. Dazu wurden mehrere Kämmen und C-Profil Streben nach der Lieferung im UHV-Ofen auf 350°C ausgeheizt und vorher und nachher auf dem Messtisch vermessen. Die Ergebnisse dieser Tests werden im folgenden vorgestellt. Zuvor wird kurz auf die Ausheizapparatur eingegangen.

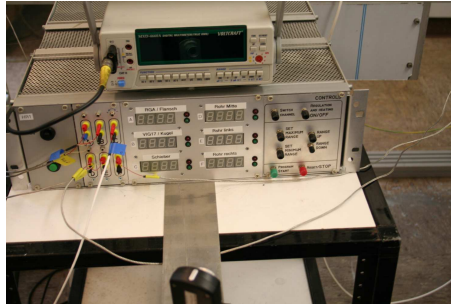
5.4.1 Der Vakuumofen

Der Ultra-Hoch-Vakuum(UHV)-Ofen wurde im Rahmen der Diplomarbeit von A. Gebel entwickelt, um die Komponenten der Drahtelektrode unter Ausheizbedingungen zu testen, die denen im KATRIN Hauptspektrometer entsprechen [Geb07]. Der Ofen besteht aus einem zwei Meter langen Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 30 cm. Eine Seite des Rohrs ist mit einem DN250CF Blindflansch verschlossen, der als Eingang in den Ofen genutzt wird. Am anderen Ende des Ofens ist über einen DN250/160CF Reduzierflansch eine Edelstahlkugel mit einem Durchmesser von ca. 30 cm montiert, an der über mehrere kleine Flansche Pumpen, Druckmessgeräte und ein Massenfilter angebracht sind. Eine ölfreie Scroll-Vakuumpumpe dient als Vorpumpe zur Erzeugung eines Vakuums im 10^{-2} mbar Bereich. Sie sorgt für einen passenden Vordruck zum Betrieb der Turbomolekularpumpen. Die drei kaskadiert betriebenen Pumpen sorgen für ein Vakuum im 10^{-10} mbar Bereich. Das Hauptrohr und die Edelstahlkugel sind mit acht Heizbändern umwickelt, über die

der Ofen bis zu einer Temperatur von 400°C aufgeheizt werden kann. Die Temperatur des Ofens wird an mehreren Stellen über acht Platin-Temperatursensoren PT100 bestimmt, die mit einer speziell entwickelten Heizungssteuerung verbunden sind, welche die Aufheiz- und Abkühlzyklen regelt [Tem07]. Der gesamte Ofen ist gegen Wärmeverluste mit Steinwolle umwickelt, die von einem isolierenden Gewebe abgedeckt wird.



(a)



(b)

Abb. 5.8: UHV-Ofen und Heizungssteuerung. (a) Der UHV-Ofen wurde speziell für die Simulation der Ausheizzyklen des Hauptspektrometers entwickelt [Geb07], (b) Die Ofensteuerung [Tem07].

Um im Hauptspektrometer des KATRIN Experiments einen Enddruck von $p = 3 \cdot 10^{-11}$ mbar zu erreichen, muss das Spektrometer nach Installation der Drahtelektrode und Abschluss aller für den Betrieb nötigen Arbeiten ausgeheizt werden, damit auf den Materialien der Elektrode und der Tankinnenwand abgelagerte Restgasmoleküle (hauptsächlich Wasser) verdampfen und anschließend abgepumpt werden können. Die Ausgasrate q des Spektrometers soll nach diesem Verfahren bei $q < 10^{-12} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ liegen. Daher darf die Ausgasrate für die gesamte Elektrode maximal $q_{\text{elektrode}} = 3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$ betragen [Wol07]. Die Kompatibilität der Materialien und der Reinigungsprozedur³ mit den geforderten Ausgasraten wurde in [Rht07] getestet.

5.4.2 Ausheizverhalten der Konuskämme

Die Tests des thermischen Verhaltens der Kämme sollten zeigen, ob durch die nach dem Einbau der Elektrodenmodule durchzuführenden Ausheizzyklen des Hauptspektrometers die Präzision der Elektrode durch Deformation der Kämme gefährdet und so deren Funktionalität eingeschränkt werden könnte. Zudem sollte geklärt werden, ob eventuelle Deformationen, wie bei den Drähten vornehmlich nach dem ersten Ausheizgang auftreten. In diesem Fall könnten die Kämme vor dem Bohren der Löcher getempert werden, wie es beim Drahtmaterial durchgeführt wird, um späteren Problemen vorzubeugen.

³Der Aufbau der Ultraschall-Reinigungsanlage wird in [Tem07] beschrieben.

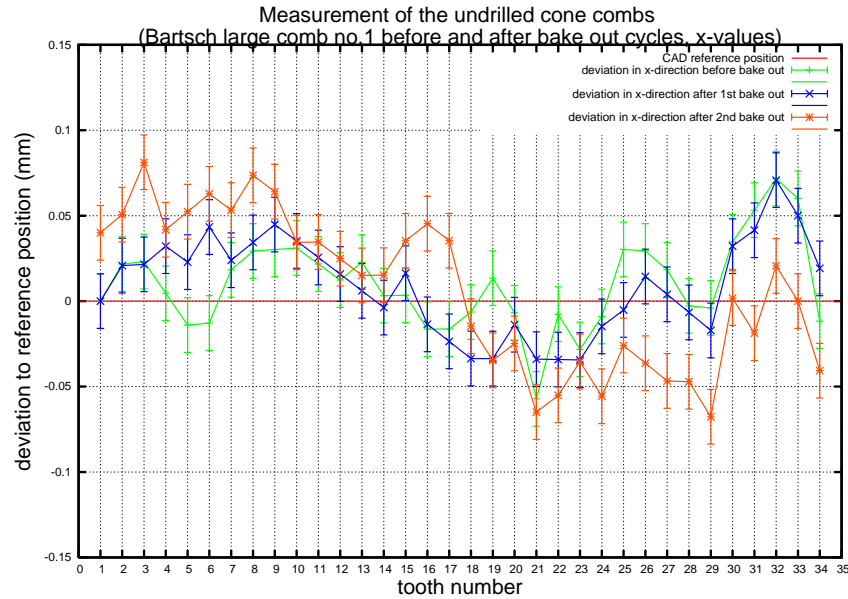


Abb. 5.9: Vergleich der Messwerte mit den CAD-Referenzwerten (Bartsch Form 25, Nr. 1, x-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der x-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den x-Werten der CAD-Dateien.

Um aussagekräftige Ergebnisse bezüglich einer möglichen Formveränderung zu erhalten wurden jeweils zwei Kämmen der Formen 25 und 26⁴ im Vakuumofen ausgeheizt. Ein Ausheizzyklus dauert ca. zwei Tage. Nach dem Einbringen der Kämmen in den Ofen wird dieser evakuiert und anschließend auf 350°C aufgeheizt. Das Aufheizen dauert einige Stunden. Der Ofen wird dann zwei Stunden auf 350°C gehalten und die Temperatur danach heruntergefahren, was etwa einen Tag dauert. Dabei sorgt die Heizungssteuerung dafür, dass sich die Temperatur sowohl beim Aufheizen als auch beim Herunterfahren gleichmäßig und zeitlich nicht zu schnell ändert.

Auch bei dieser Messung sind die Mittelpunkte der Radien der Zahnschneidkanten mit denen der CAD-Positionen der Bohrungen identisch, so dass die Messung und Auswertung wie in Kap. 5.3 beschrieben durchgeführt wurde. Die vier Kämmen wurden vor, nach einem ersten und einem zweiten Ausheizzyklus vermessen.

Abb. 5.9 und 5.10 zeigen die Abweichungen der Zahnpositionen von den CAD-Referenzwerten vor und nach den einzelnen Ausheizzyklen. In Abb. 5.10 sind nur Abweichungen in y-Richtung und in Abb. 5.9 nur in x-Richtung dargestellt. Insgesamt sind alle Abweichungen und Positionsänderungen $< 0,1$ mm (ausgenommen die y-Position von Zahn 24 vor dem Ausheizen). Ein Vergleich der Abweichungen der Zahnpositionen vor und nach den Ausheizzyklen mit den Referenzpositionen der CAD Entwürfe ergab, dass die Positionsänderung durch das Ausheizen teilweise eine stärkere Abweichung vom Soll vor dem Ausheizen kompensiert, in anderen Fällen jedoch verstärkt. In vielen Fällen stimmen die

⁴Die Formentabelle der Komponenten der Drahtelektrode ist in Anhang A.1 zu finden.

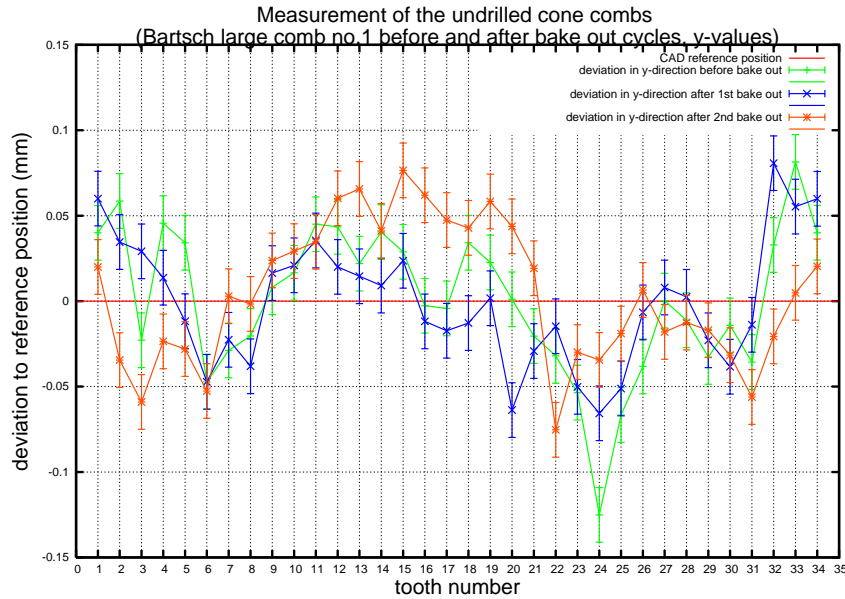


Abb. 5.10: **Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 25, Nr. 1, y-Werte).** Dargestellt sind die Abweichungen der y-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den y-Werten der CAD-Dateien.

Messwerte der einzelnen Messungen im Rahmen ihrer Fehler überein, so dass keine Aussage über eine Veränderung möglich ist. Insgesamt sind in den Messungen keine systematischen Veränderungen der Zahnpositionen zu erkennen. Alle Abweichungen sind sowohl vor, als auch nach den Ausheizvorgängen kompatibel mit den vorgegebenen Toleranzen von $\pm 0,1$ mm und somit unbedenklich. Ein mögliches Tempern der Käme wird daher als nicht notwendig erachtet.

5.4.3 Ausheizverhalten der C-Profile

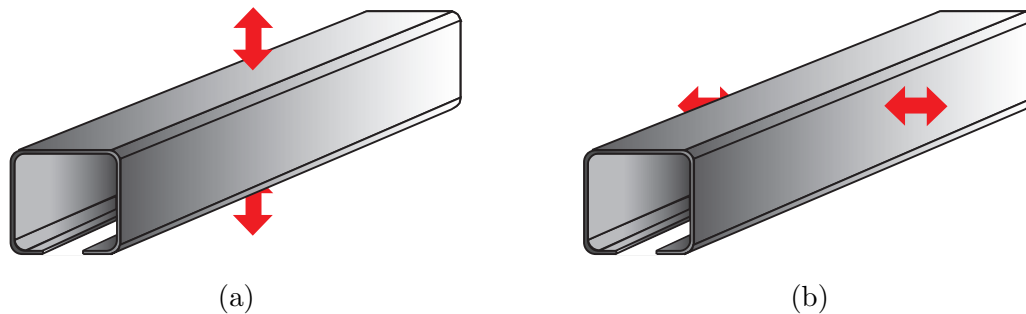


Abb. 5.11: **Krümmungsrichtungen der C-Profil Streben.** (a) Krümmung senkrecht zur Modulebene, (b) Krümmung parallel zur Modulebene.

Die im vorherigen Kapitel durchgeführten Tests bezüglich des Ausheizverhaltens wurden

auch für die C-Profil Streben durchgeführt, die als Verbinder der beiden Kämme eines Elektrodenmoduls verwendet werden. Auch hier galt es, das Material auf mögliche, durch die Ausheizzyklen hervorgerufene Deformationen zu untersuchen. Getestet wurden drei Streben, die einmal vor und einmal nach einem Ausheizzyklus vermessen wurden. Dazu wurden die Streben auf dem Messtisch gelegt, und die jeweils oben liegende Seite mit der Messmaschine so angefahren, dass ein Taster die Oberfläche der Streben leicht berührt, ohne jedoch Druck auf diese auszuüben. Der entsprechende z-Wert der Messmaschine wurde notiert. Diese Messung wurde über die Länge der Streben in Abständen von ca. 30 cm insgesamt 7 mal durchgeführt. In Abb. 5.12 und 5.13 sind die Verformungen einer der Streben für beide Ebenen dargestellt (s. Abb. 5.11). Zum Vergleich der Ergebnisse wurden die Messwerte der Messung nach dem Ausheizen wie bei der Analyse der Bohrungsge- nauigkeit (s. Kap. 4.1.4) um die Differenz der ersten Messwerte der beiden Messungen verschoben, so dass die ersten Punkte der beiden Messungen übereinanderliegen. Auf ein Übereinanderrotieren der Messkurven wurde verzichtet.

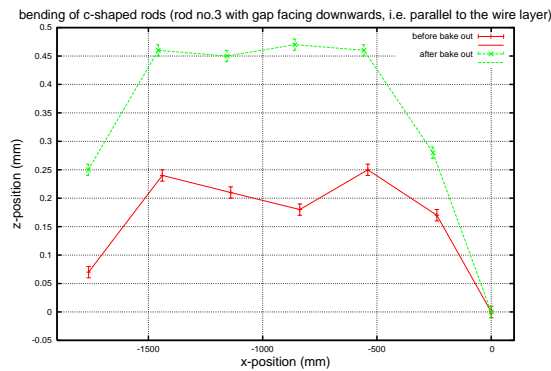


Abb. 5.12: Verformung einer C-Profil Strebe (senkrecht zur Modulebene).

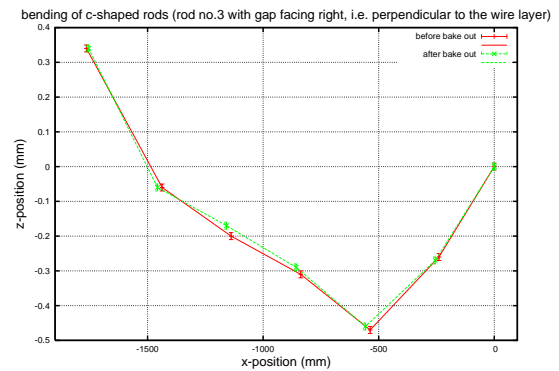


Abb. 5.13: Verformung einer C-Profil Strebe (parallel zur Modulebene).

Die Auswertung der Messungen ergab, dass sich die C-Profil Streben durch das Ausheizen leicht verformen. Diese Verformung verstärkt in zwei der drei Fälle nur eine bereits vor dem Ausheizen vorhandene Verformung parallel zur Ebene des Elektrodenmoduls, während die Verformung in der Ebene senkrecht zur Modulebene nicht beeinflusst wird. In allen gemessenen Fällen blieben die Verformungen jedoch auch nach dem Ausheizen < 1 mm auf einer Länge von 1820 mm. Diese Verformungen sind daher für die Präzision der Modulgeometrie und der Drahtspannung als nicht problematisch anzusehen.

5.5 Genauigkeit der Bohrungen

Für die Homogenität des Analysierpotentials ist Positionsgenauigkeit der Drähte im zentralen Zylinderabschnitt des Spektrometers besonders wichtig. Daher ist sicherzustellen, dass die Bohrungen, die die Keramikisolatoren mit den darin eingespannten Drähten der Elektrode halten, die Anforderungen an die Genauigkeit ihrer Position einhalten. Wie in

Kapitel 5.4.2 zeigt, kann es während der Ausheizzyklen des Hauptspektrometers zu leichten Verformungen der Kämmen kommen. Diese liegen innerhalb der geforderten Toleranzen, könnten aber problematisch werden, falls die Bohrungen nicht mit ausreichender Genauigkeit platziert werden. Das Bohren der Löcher wird bei den Kämmen des Zylinderteils von der Firma Bölling⁵ durchgeführt.

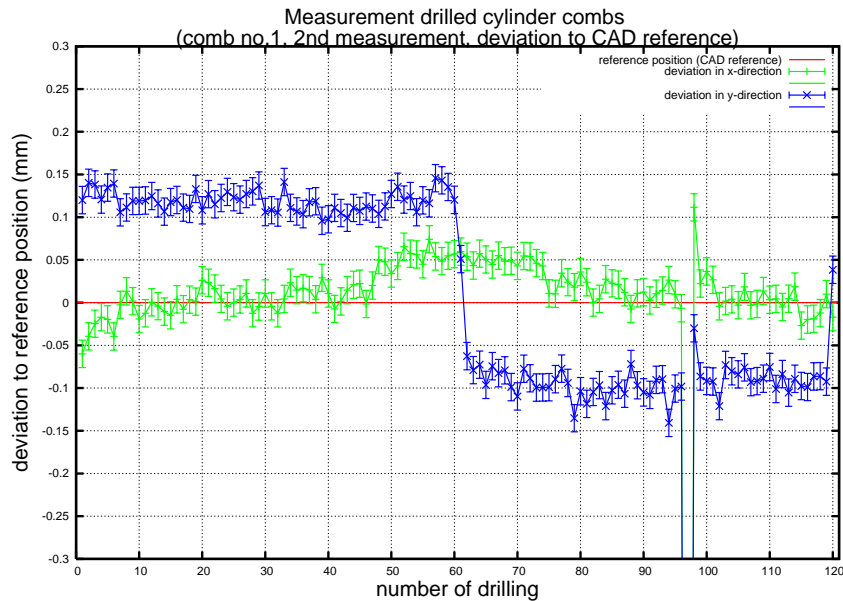


Abb. 5.14: **Bohrungsgenauigkeit Kamm Nr. 1 (Form 55)**. Dargestellt sind die Abweichungen x- und y-Werte der Bohrungspositionen von den CAD-Referenzwerten.

Im folgenden werden die Messungen zur Überprüfung der Bohrungsgenauigkeit vorgestellt. Dabei wurden drei der von der Firma Bölling mit Bohrungen versehenen Zylinderkämmen (Form 55) vermessen und wiederum die Abweichungen der Bohrungspositionen zu den CAD Vorgaben bestimmt. Die Messung wurde mit dem in Kap. 4.1.4 vorgestellten *Kammvermessungsprogramm_V1.5.vi* durchgeführt, wobei auch hier das bereits in den vorherigen Auswertungen verwendete Analyseprogramm zum Einsatz kam.

Bei der Messung viel auf, dass die Software stellenweise Probleme bei der Erkennung der Bohrungen hat, obwohl sich die Suchmaske nahezu konzentrisch über der Bohrung befand. Einige Bohrungen wurden falsch, andere gar nicht erkannt. Dies konnte auf schlechten Kontrast zum Untergrund zurückgeführt werden. Wie bereits in Kap. 4.3 erwähnt wurde, müssen daher nach Ablauf der Analyse die Bilder von Bohrungen, welche aus der Verteilung der Messwerte abweichen, auf Fehler bei der Locherkennung überprüft und die Vermessung eines Kamms eventuell wiederholt werden.

⁵Bölling GmbH, Haus Uhlenkotten 16c, D - 48159 Münster.

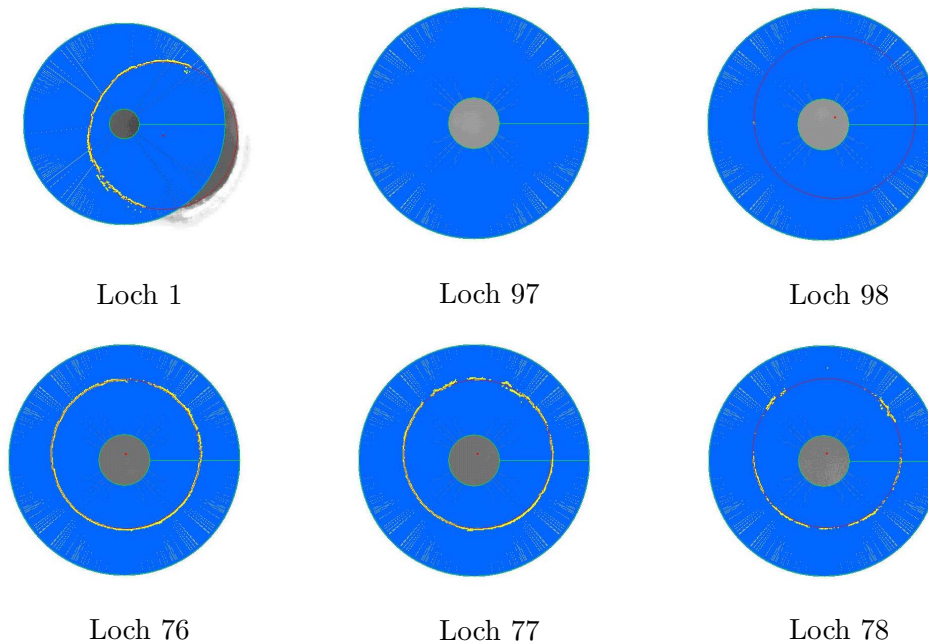


Abb. 5.15: **Locherkennung während der Messung.** Zu erkennen ist, dass Loch 1 trotz schlecht zentrierter Maske richtig erkannt wird. Loch 97 hingegen wird nicht erkannt, obwohl die Suchmaske gut über dem Loch zentriert ist. Bei Loch 98 wurden nur wenige Kontrastunterschiede erkannt, so dass der an diese Unterschiede angepasste Kreis einen falschen Durchmesser und eine falsche Position hat. Zum Vergleich sind Loch 76, 77 und 78 dargestellt, bei denen die Bilderkennung problemlos verlief (Normalfall).

Abb. 5.14 zeigt die Ergebnisse der Vermessungen des ersten Kamms. Dargestellt sind die Abweichungen der x- und y-Werte der Messung von den CAD-Werten. Die Abweichungen der x-Positionen sind in allen Fällen $\Delta P_X < 0,075$ mm, mit wenigen Ausnahmen gilt sogar $\Delta P_X < 0,05$ mm. Die Abweichungen der y-Werte zeigen einen auffälligen Sprung zwischen Bohrung 60 und Bohrung 62. Dieser Übergang entspricht dem Wechsel von der inneren zur äußeren Bohrungslage eines Kamms. Die Abweichungen der ersten 60 Bohrungen liegen in einem Band mit maximal 0,5 mm Breite und die Bohrungen 62 bis 119 bis auf wenige Ausnahmen ebenfalls. Die Auswertung der Messung deutet darauf hin, dass der Abstand der beiden Bohrungslagen einen falschen Wert hat.

Auffällig sind allerdings die ermittelten Abweichungen von Bohrung 61 und 120, die beide zwischen den Bändern der Abweichungen liegen. Hierfür konnte keine Erklärung gefunden werden. Durch eine Kon-

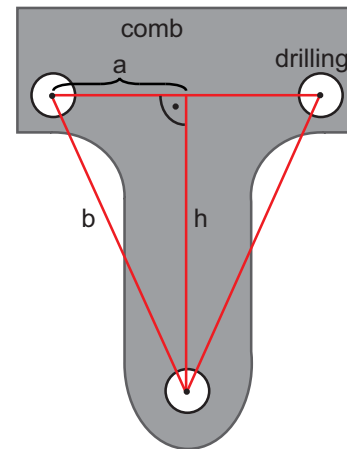


Abb. 5.16: **Bestimmung der Radiendifferenz h** über einfache geometrische Betrachtungen.

trolle der gespeicherten Kamerabilder konnte festgestellt werden, dass die besonders große Abweichung bei Position Nr. 97 daraus resultiert, dass die Bohrung von der Software nicht erkannt wurde. Anhand der Bilder ist auch zu erkennen, dass Loch Nr. 98 nicht richtig erkannt wurde, da der Durchmesser des angepassten Kreises leicht größer ist, als der der Bohrungen (s. Abb. 5.15). Sowohl der Versatz zwischen den Bohrungslagen, wie auch die herausfallenden Positionen von Bohrung 61 und 120, konnten bei allen drei vermessenen Kämmen festgestellt werden.

Um herauszufinden, ob dieser Versatz auf einen Fehler im Analyseprogramm zurückzuführen ist, wurde ein weiterer Test durchgeführt, der ebenfalls ergab, dass der Abstand der beiden Bohrungslagen ca. 0,2 mm zu groß ist. Dabei wurde, wie in Abb. 5.16 dargestellt, über die Bestimmung von drei Lochpositionen, die mit der Messmaschine bestimmt wurden, der Abstand der Bohrungslagen h ermittelt. Die Abstände an drei verschiedenen Stellen eines der Kämmen ergaben:

Tabelle 5.1: Messung des Abstands der Bohrungslagen

Messung	A [mm]	B [mm]	H [mm]
1	12,43	71,28	70,19
2	12,56	71,40	70,29
3	12,38	71,24	70,16
Mittelwert			70,21

Der Soll-Abstand von 70,00 mm wird dabei im Mittel um 0,2 mm überschritten, was mit dem Versatz der Abweichungen in Abb. 5.14 übereinstimmt. Die Auswertung durch das LabVIEW Programm scheint demnach richtig zu sein. Die Genauigkeit der Bohrungen wird von der Firma Bölling auf $< \pm 0,1$ mm angegeben, so dass die ermittelten Abweichungen von den CAD-Werten schwer zu erklären waren.

Um einen Fehler der Positionsangabe des Messtisches auszuschließen, wurde in dem zur Kammvermessung verwendeten Fahrbereich der Maschine eine Testplatte vermessen, auf der sich zwei Bohrungslagen im Abstand von 80 mm befinden, wobei der Abstand der Bohrungen innerhalb einer Lage 100 mm beträgt. Die Messung ergab jedoch, dass die Positionsangabe der Messarme der Maschine im bisher für die Kammvermessung verwendeten Fahrbereich bei einer bestimmten Auslenkung des y-Arms falsche Werte liefert. Die Ursache dieses Fehlers konnte bislang nicht geklärt werden.

Durch Verlegen des Messbereichs hin zu etwas größeren Auslenkungen des y-Arms kann dieses Problem umgangen werden. Neue Messungen der von der Firma Bölling bearbeiteten Kämmen, die dies berücksichtigten, ergaben Abweichungen von $< \pm 0,1$ mm wie in Abb. 5.17 zu sehen ist. Bohrung 120 wurde nicht erkannt, was zu den dargestellten Abweichungen in x- und y-Richtung führt. Festzuhalten ist, dass in vielen Bohrungen der Kämmen Metallspäne gefunden wurden, die zu den in Abb. 4.36 dargestellten Fehlern bei der Bilderkennung führen können.

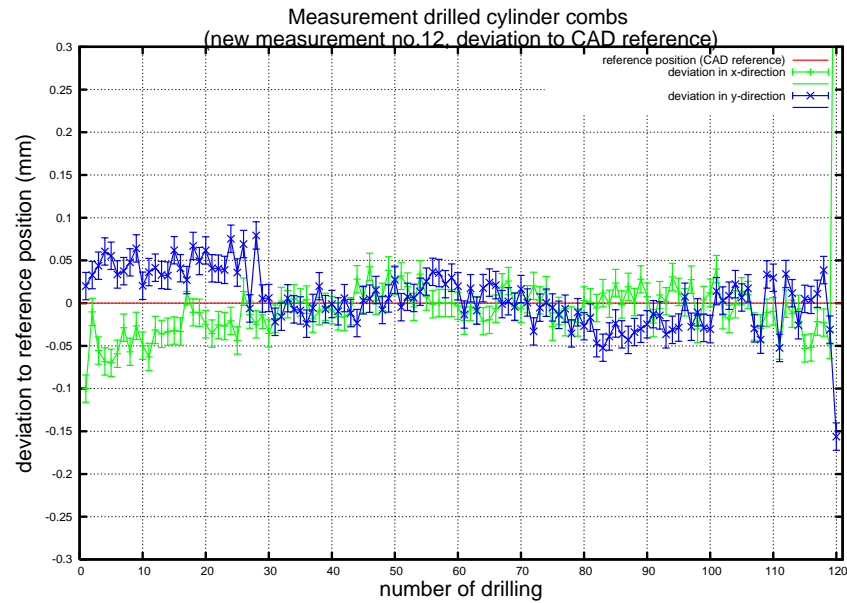


Abb. 5.17: Neue Ermittlung der Bohrungsgenauigkeit (Form 55). Dargestellt sind die Abweichungen x- und y-Werte der Bohrungspositionen von den CAD-Referenzwerten.

Insgesamt zeigen die neuen Messungen, dass die Abweichungen der Bohrungspositionen im Bereich der vorgegebenen Toleranzen liegen und die fertigen Käämme somit die Qualitätsanforderungen für den Einbau in die Elektrodenmodule erfüllen.

Kapitel 6

Vorbereitungen für die Massenproduktion

In diesem Kapitel wird die Vorbereitung des institutseigenen Reinraums für die Produktion der Elektrodenmodule erläutert. Da die Module wie in Kapitel 3.4 beschrieben in ein UHV von ca. 10^{-11} mbar eingebaut werden, darf die Ausgasrate der Elektrodenmodule eine Grenze von $1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{mbar}\cdot\text{l}}{\text{s}\cdot\text{cm}^2}$ nicht überschreiten [Wol07]. Sie müssen daher hohen Anforderungen an die Oberflächensauberkeit genügen, die nur bei einer Produktion in einem Reinraum einzuhalten sind. Es wurde ein Produktionsablauf entworfen, der es einer Gruppe von vier Personen ermöglicht, innerhalb von vier bis fünf Stunden ein Modul der Drahtelektrode zu produzieren. Den Abschluss der Produktion bildet die Qualitätskontrolle des fertigen Moduls, die mit der automatisierten Messmaschine durchgeführt wird.

6.1 Reinraum

Aufgabe eines Reinraums, egal in welchem Arbeitsgebiet, ist es, den Arbeitsplatz vor Kontamination aus der Umgebung zu schützen. Dies geschieht durch ein spezielles Lüftungssystem, welches die Partikel-Kontamination unter bestimmten Grenzwerten hält. Anhand der Partikelkonzentration der Luft werden Reinräume in verschiedene Klassen eingeteilt. Die Normen sind in der DIN EN ISO 14644-1 und ISO 14644-2 festgelegt. Der alte US Federal Standard 209E¹ ist seit Dezember 2001 nicht mehr gültig, wird jedoch aufgrund der Anschaulichkeit teilweise noch angegeben. Die für Reinräume geltende Richtlinie ist die VDI 2083².

Im Fall der inneren Elektrode für das KATRIN Hauptspektrometer ist die Produktion in einem Reinraum wünschenswert, um die Anforderungen an die Sauberkeit der in das

¹Sowohl die DI-Norm als auch der US Fed. Std. gelten für Reinräume in der Halbleitertechnik. In anderen Gebieten wie Raumfahrttechnik, Pharmazie und Lebensmitteltechnik gelten andere Normen [Wik1].

²Richtlinie des vom **Verein Deutscher Ingenieure** aufgestellten technischen Regelwerks.

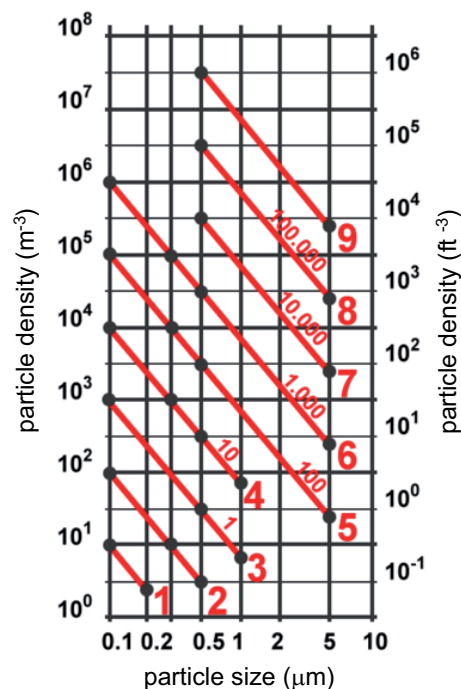


Abb. 6.1: **Reinraumklassen.** Zulässige Partikelkonzentrationen bei verschiedenen Partikelgrößen. Große Ziffern: DIN EN ISO Norm, kleine Zahlen: US Fed.Std.209. [Wik1]

Spektrometer eingebrachten Komponenten zu gewährleisten. Da im Hauptspektrometer ein UHV von $3 \cdot 10^{-11}$ mbar erzeugt werden soll, können schon geringe Kontaminationen mit im Vakuum stark ausgasenden Stoffen dazu führen, dass dieses Vakuum nicht erreicht werden kann. Aufgrund des Untergrundes, der mit der Güte des Vakuums skaliert, kann dadurch die Sensitivität des Experiments eingeschränkt werden. Problematisch sind insbesondere Verunreinigungen mit Schmierstoffen und Fetten, z.B. von der menschlichen Haut. Die Verbreitung dieser Stoffe kann auch über Partikel in der Luft geschehen, so dass deren Konzentration gering gehalten werden muss.

Der Reinraum des Instituts für Kernphysik der Universität Münster wurde im Jahr 2005 baulich fertiggestellt. Der Raum war als Klasse 7 Reinraum spezifiziert worden, was durch eine Messung der Reinraumklasse in Kap. 6.1.3 bestätigt wurde. Die Grundfläche des Raums beträgt ca. 26 m² und das Volumen ca. 80 m³. Der Reinraum ist bei ca. 22°C temperaturstabilisiert und wird bei 20 pa Überdruck betrieben. Das Lüftungssystem arbeitet nach dem Prinzip der turbulenten Verdünnungsströmung (s. Kap. 6.1.1) und kann 3000 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ Luft umwälzen. Abb. 6.2 zeigt den Grundriss des Reinraums und die Lage der Lüftungsöffnungen. Im folgenden werden das Lüftungssystem und die Messung zur Bestimmung der Reinraumklasse vorgestellt.

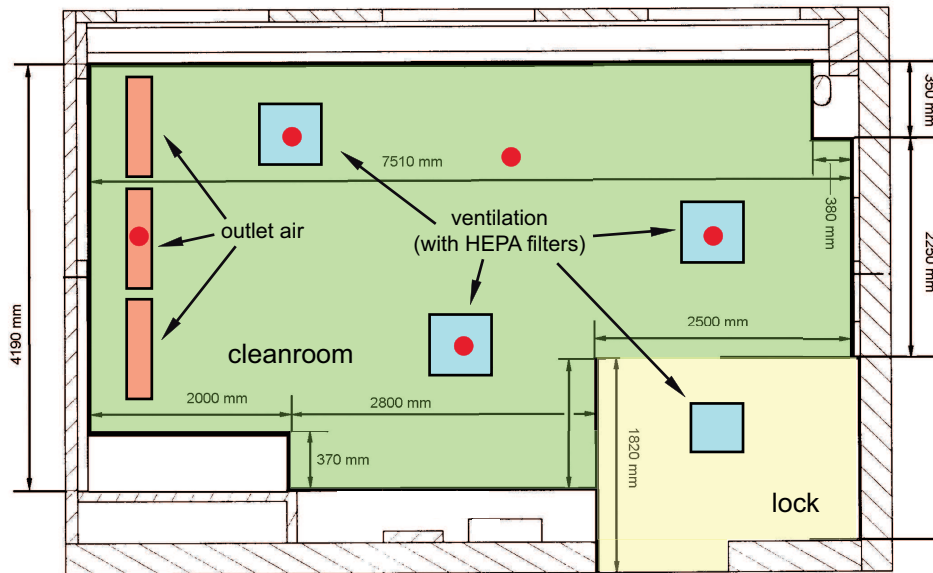


Abb. 6.2: **Grundriss des Reinraums.** Dargestellt ist der Grundriss des Reinraums mit Größenangaben, sowie die Positionen der Lüftungsöffnungen. Die roten Punkte markieren die Stellen, an denen die Messungen zur Bestimmung der Reinraumklasse durchgeführt wurden (s. Kap. 6.1.3).

6.1.1 Das Lüftungssystem

Für die Funktion und die Güte eines Reinraums ist in erster Linie das Lüftungskonzept verantwortlich. Die Luftströmungen sollten so angelegt sein, dass sie eine Ablagerung von Partikeln verhindern. Es wird grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Lüftungsarten, einer turbulenten Verdünnungsströmung (auch Mischströmung genannt) und einer turbulenzarmen Verdrängungsströmung (auch *Laminar Flow (LF)*, laminare Strömung genannt), unterschieden. Die Mischströmung kann in Reinräumen bis zur Klasse 4 (s. Abb. 6.1) verwendet werden, bei den Klassen 1 bis 3 ist die notwendige Partikelkonzentration nur durch LF-Systeme zu erreichen.

Der Partikelaustrag erfolgt bei der Mischströmung (Abb. 6.3 (a)) ausschließlich über Verdünnungseffekte. Schwebefähige Teilchen³ werden durch die einströmende Luft gleichmäßig verteilt und ihre Konzentration über den Luftkreislauf permanent verringert, bis sich ein Gleichgewicht von abtransportierten und neu entstandenen Partikeln einstellt [Gai04]. Bei hochwertigen Reinräumen ab Klasse 4 reicht eine turbulente Verdünnungsströmung (Abb. 6.3 (b)) nicht mehr aus, die Partikelkonzentration in der Reinraumluft weiter zu senken. Hier kommt das Verfahren der turbulenzarmen Verdrängungsströmung zum Einsatz. Bei diesem Lüftungssystem wird eine sich über den ganzen Raum erstreckende, gleichmäßige Luftströmung aufgebaut, die den Raum je nach Anwendung horizontal oder vertikal

³Als schwebefähig werden Teilchen im Größenbereich von $\leq 10 \mu\text{m}$ bezeichnet [Gai04].

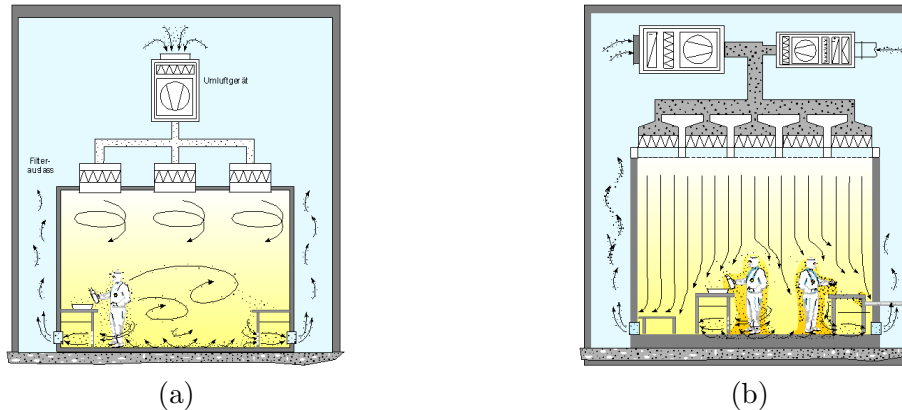


Abb. 6.3: **Lüftungskonzepte.** (a) Turbulente Verdünnungsströmung (Mischströmung), (b) Turbulenzarme Verdrängungsströmung (laminare Strömung). [Wik1]

durchströmt. Meist wird die vertikale Variante verwendet, da diese beispielsweise eine stabilere Strömungsform und gleichmäßigere Luftqualität bietet. Die dem Prinzip der Verdrängungsströmung zugrunde liegende Überlegung ist, dass in der Luft schwebende Partikel von der Strömung erfasst und direkt zur Abluftstelle transportiert werden. Bei diesem System sind es besonders Mechanismen wie z.B. Wirbelschleppen hinter bewegten Körpern, die das Strömungskonzept stören. [Gai04]

Der bei der Fertigung der Elektrodenmodule benutzte Reinraum arbeitet nach dem Mischströmungsprinzip, wobei aus baulichen Gründen die Abluftkanäle an der Decke angebracht sind, was zu einer stärkeren Ablagerung von Partikeln in Bodennähe führt. Um diesem Effekt entgegenzuwirken wird der Reinraum regelmäßig mit einem speziellen Staubsauger⁴ gereinigt. Abbildung 6.4 zeigt schematisch den Aufbau der Lüftungsanlage des Reinraums. Das System ist in der Lage pro Stunde maximal 2880 m³ gefilterte Luft in den Reinraum strömen zu lassen. Bei einem Volumen des Reinraums von ca. 80 m³ kann die gesamte Raumluft so alle zwei Minuten komplett ausgetauscht werden. Im Normalbetrieb läuft die Anlage nicht mit voller Kapazität, so dass ein Umwälzzyklus etwa vier bis fünf Minuten dauert. Wie in Abbildung 6.4 zu erkennen, ist die durch die Abluftanlage abgeführte Luftmenge geringer als die Zuführte, da durch Türen und Fenster ein Teil der Luft entweicht. Um den Luftstrom und den im Reinraum herrschenden Überdruck von 20 pa bei konstantem Luftdurchsatz im Reinraum auch konstant zu halten, muss dem Luftkreislauf permanent ein geringer Anteil Außenluft zugeführt werden. Der im Raum herrschende Druck wird dabei von Messgeräten überwacht, welche über Druckregler an den Vor- und Hauptfiltern den Raumdruck konstant halten. Zudem sorgen Luftstromregler für einen gleichmäßigen Luftstrom in den Reinraum. Der Reinraum wird durch die Heiz- und Kühlaggregate im Lüftungssystem auf einer Temperatur von ca. 21°C stabilisiert. Über einen Regler im Reinraum kann die Temperatur geringfügig geändert werden. Die für die Luftfiltration wichtigsten Komponenten sind die H13 HEPA Filter⁵, welche die in den Reinraum

⁴Tiger-Vac Modell CR-1.

⁵engl. **H**igh **E**fficiency-**P**articulate **A**ir Filter

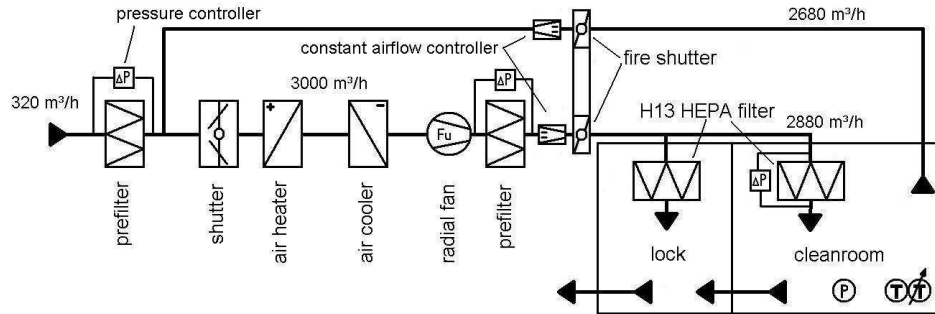


Abb. 6.4: Schema des Reinraum-Lüftungssystems.

strömende Luft filtern. Sie haben einen Abscheidegrad von 99,95% bei einer Partikelgröße von $0,1 \mu\text{m}$ bis $0,2 \mu\text{m}$. Vorfilter entfernen grobe Schmutzpartikel, bevor die Außenluft durch die HEPA-Filter geleitet wird. Das Lüftungssystem verfügt aus Brandschutzgründen über mehrere Brandschutzklappen.

6.1.2 Abschätzung der Reinraumklasse

Anhand einiger einfacher Überlegungen kann die Partikelkonzentration in der Reinraumluft und die dadurch gegebene Reinraumklasse abgeschätzt werden. Die Partikelanzahl in der Reinraumluft ist $n \cdot V$. Dabei ist n die Anzahl der Teilchen pro m^3 und V das Volumen des Raums. Durch im Raum arbeitende Personen wird pro Zeiteinheit eine Menge Q an Staubpartikeln emittiert (angegeben in $\frac{1}{\text{s}}$), die zu einer Erhöhung der Partikelkonzentration führen:

$$\frac{d}{dt}(n(t) \cdot V) = Q. \quad (6.1)$$

Gleichzeitig sorgt das Lüftungssystem mit dem Luftdurchsatz S pro Zeiteinheit (hier $\frac{1}{\text{s}}$) für eine Verminderung der Partikelkonzentration in Abhängigkeit von der zum Zeitpunkt t herrschenden Konzentration $n(t)$:

$$\frac{d}{dt}(n(t) \cdot V) = -n(t) \cdot S. \quad (6.2)$$

Diese beiden Effekte finden gleichzeitig statt. Gleichung (6.1) und (6.2) müssen daher zusammengefasst werden zu:

$$\frac{dn}{dt} = -n(t) \cdot \frac{S}{V} + \frac{Q}{V}. \quad (6.3)$$

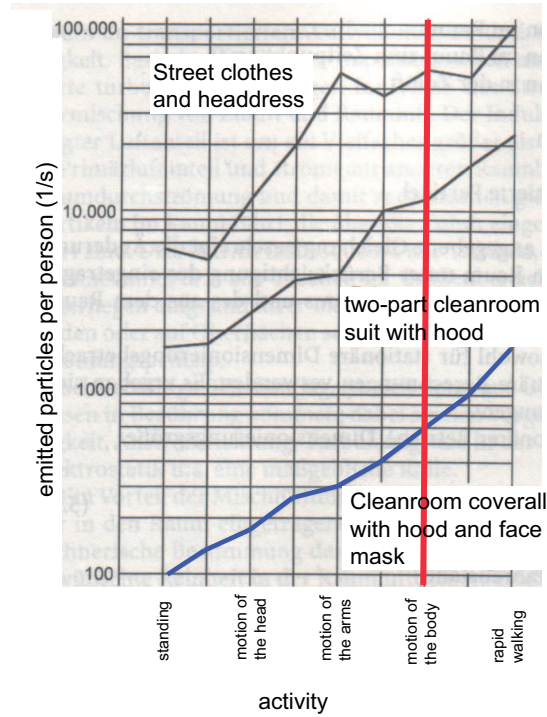


Abb. 6.5: **Partikelemission einer Person.** Pro Sekunde von einer Person emittierte Partikel in Abhängigkeit von Aktivität und Kleidung. Die rote Linie markiert die bei der Modulproduktion anzunehmende Bewegungsaktivität. Die im Fall der Modulproduktion beim Tragen eines Reinraumoveralls mit Kopfhaube, Handschuhen und Mundschutz emittierte Partikelzahl ist durch die blaue Linie gekennzeichnet. [Rel04]

Dabei ist das Volumen V konstant. Zur Lösung der Differentialgleichung (6.3) wird der Ansatz

$$n(t) = c_0 + c_1 e^{-c_2 t} \quad (6.4)$$

in Gleichung (6.3) eingesetzt. Damit lassen sich die Koeffizienten $c_0 = \frac{Q}{S}$ und $c_2 = \frac{S}{V}$ bestimmen. c_1 kann zu 1 gewählt werden. Werden diese in Gleichung (6.4) eingesetzt, ergibt sich für die Anzahl der Teilchen n pro m^3 Raumluft in Abhängigkeit von der Zeit:

$$n(t) = e^{-\frac{S}{V}t} + \frac{Q}{S}. \quad (6.5)$$

Für den Grenzfall $t \rightarrow \infty$ stellt sich ein Gleichgewicht der Teilchenkonzentration n_{GG} ein, das nur durch Q und S bestimmt ist:

$$n_{GG} = \frac{Q}{S}. \quad (6.6)$$

Mit einem Luftdurchsatz von $S \approx 2800 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ (s. Kap. 6.1.1) und einer Partikelemission von $Q \approx 2800 \frac{\text{Partikel}}{\text{s}}$, verursacht von vier Personen bei der Arbeit im Reinraum (s. Abb. 6.5),

ergibt sich nach Gleichung (6.6):

$$n_{GG} \approx 3600 \frac{\text{Partikel}}{\text{m}^3} \quad (6.7)$$

Dabei wurde angenommen, dass die Filter der Lüftungsanlage 100% aller Partikel filtern. Verglichen mit Abb. 6.1 liegt eine Partikelkonzentration von $n_{GG} \approx 3600 \frac{\text{Partikel}}{\text{m}^3}$ im Bereich eines Reinraums der Klasse 6. Diese Abschätzung muss allerdings durch Messungen verifiziert werden.

6.1.3 Messung der Reinraumklasse

Der Reinraum des Instituts für Kernphysik an der Universität Münster wurde ursprünglich so konzipiert, dass er bestenfalls die Anforderungen der Reinraumklasse 7 (10.000 nach der alten US Norm) erfüllen sollte. Nach baulicher Fertigstellung im Jahr 2005 wurde der Reinraum Anfang 2007 für die Produktion der Module der inneren Elektrode für das KATRIN Hauptspektrometer eingerichtet. Eine Messung zur Bestimmung der Reinraum-

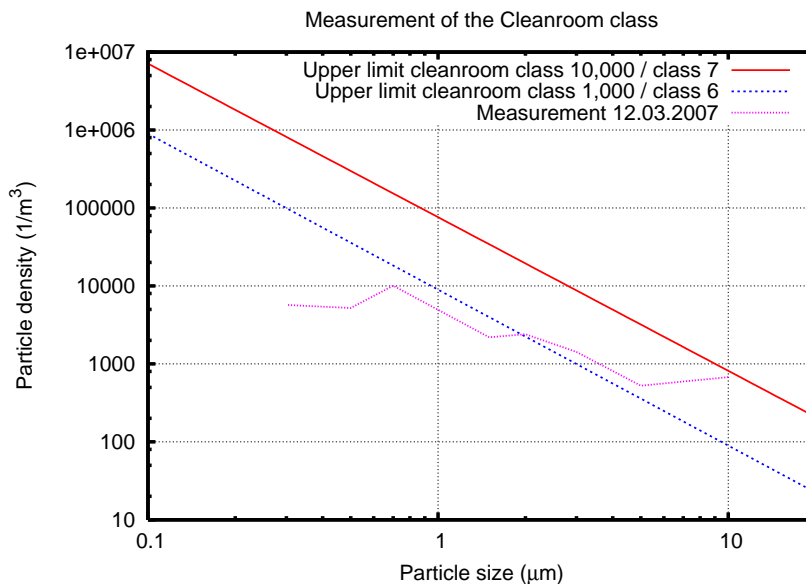


Abb. 6.6: **Messung der Reinraumklasse.** Die Messwerte ergeben Reinraumklasse 10000 (US) bzw. 7 (DIN).

klasse ergab, dass der Reinraum nach der Anzahl der in der Luft nachgewiesenen Partikel die Normen der Klasse 7 (DIN) bzw. 10.000 (US) tatsächlich erfüllt. Die Messung wurde mit einem Partikelmonitor durchgeführt, der die Anzahl N an Partikeln verschiedener Größen ($0,3 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$) pro Volumen ($1/\text{m}^3$) bestimmt. Abb. 6.6 zeigt das Ergebnis der Messung. Die Geraden geben die Obergrenzen für die Partikelkonzentration pro m^3 Raumluft der Klassen 6 (1.000) und 7 (10.000) an. Wie zu erkennen, liegen die Messwerte

für Partikel $< 1 \mu\text{m}$ deutlich unterhalb der Grenzwerte für Klasse 6. Die Konzentration der Partikel $> 2 \mu\text{m}$ beeinflusst das Ergebnis negativ, so dass der Reinraum mit Klasse 7 bezeichnet werden muss. Da die Abluftschächte wie in Kap. 6.1.1 erwähnt, an der Decke des Reinraums angebracht sind, ist es sehr wahrscheinlich, dass die größeren Partikel sich in Bodennähe sammeln und nicht von der Abluftströmung erfasst werden. Die vereinfachte Abschätzung in Kap. 6.1.2 liefert demnach zumindest für kleine Partikelgrößen, die der turbulenten Strömung des Lüftungssystems folgen, bis auf einen Faktor 2 passende Ergebnisse.

Gemessen wurde an mehreren Stellen des Reinraums (s. rote Punkte in Abb. 6.2). Die besten Ergebnisse brachten, wie zu erwarten war, die Messungen der direkt aus den Filtern in den Reinraum strömenden Luft. Die für die Reinraumklasse entscheidende schlechteste Messung wurde auf ca. 1,5 m Höhe über dem Boden vorgenommen, wobei drei Personen mit Reinraumbekleidung in der Nähe des Messkopfes standen. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Da die Messung in Anwesenheit von Personen mit der während der Produktion getragenen Schutzkleidung durchgeführt wurde (s. Abb. 6.7), ist davon auszugehen, dass sich die Partikeldichte in der Reinraumluft während der Produktion nicht wesentlich erhöhen wird. Abb. 6.5 zeigt, welchen Einfluss die Wahl der im Reinraum getragenen Kleidung auf die Partikelemissionsrate einer Person hat. Um diese möglichst gering zu halten wird während der Arbeit im Reinraum ein spezieller einteiliger Reinraumoverall zusammen mit Überschuhen, Handschuhen, Kopfhaube und evtl. Mundschutz getragen (blaue Linie in Abb. 6.5), was die Partikelemission einer Person bei den durchzuführenden Tätigkeiten (rote Linie in Abb. 6.5) auf etwa $600 \frac{\text{Partikel}}{\text{s}}$ reduziert.

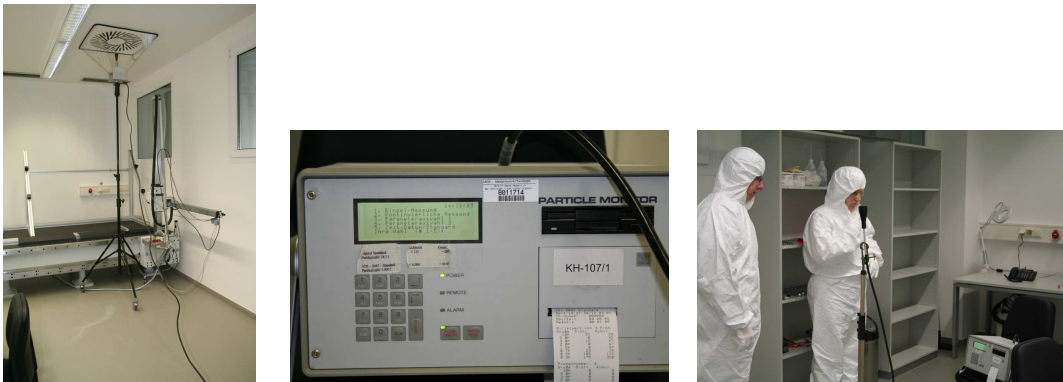


Abb. 6.7: Fotos: Messung der Reinraumklasse.

6.2 Vorbereitung der Produktion

Nachdem im vorherigen Kapitel das Konzept eines Reinraums vorgestellt und der Reinraum des Instituts für Kernphysik beschrieben wurde, soll nun auf die in diesem Raum geplante Produktion und Qualitätskontrolle der Elektrodenmodule eingegangen werden.

Dabei soll es insbesondere um die Planung der Arbeitsabläufe der Fertigung und die Vorbereitung des Reinraums mit den Fertigungsstationen gehen. Um die Qualitätskontrolle im Anschluss an die Modulproduktion durchzuführen, musste das automatisierte Messsystem in den Reinraum transferiert werden.

6.2.1 Reinraumtauglichkeit der Messmaschine

Zur Gewährleistung der UHV-Tauglichkeit der Elektrodenmodule ist es notwendig, die Produktion und die Qualitätskontrolle der Elektrodenmodule in einer sauberen Umgebung durchzuführen. Zu diesem Zweck musste die automatisierte 3D-Messmaschine für den Einsatz im Reinraum des Instituts präpariert werden. Bei der Produktion der Module ist besonders auf UHV-Tauglichkeit zu achten. Dazu zählt insbesondere, Kontakt der Komponenten mit Substanzen zu vermeiden, die das Vakuum im Spektrometertank verschlechtern können. Dazu zählen vor allem Fette und Schmierstoffe.

Der 3D-Messtisch wurde gebraucht gekauft. Um ihn vor Rost zu schützen war die gesamte Oberfläche des Tisches leicht eingefettet. Die Unterseite des Tisches weist eine vom Guss der Platte stammende kassettenartige Struktur auf, in der teilweise ein Sand-Metall-Gemisch abgelagert ist. Des weiteren waren alle Arme der Maschine geschmiert. Zudem war das System bedingt durch seinen früheren Einsatz sehr verdreckt. In mehrwöchiger Arbeit wurde die Messmaschine komplett gereinigt. Die Arme der Maschine wurden entfernt und entfettet, Schrauben und Kleinteile im Ultraschallbad gereinigt, sowie die gesamte Oberfläche der Achsenführungen gesäubert und neu lackiert. Die gereinigten Schrauben sowie die Arme der Messmaschine wurden gegen Abrieb und Festfressen mit speziellem Schmiermittel vom Typ CASTROL MOLUB-ALLOY 2115-2 leicht geschmiert. Die Tischplatte wurde vollständig von der schützenden Fettschicht befreit und die Kassettenstruktur mit einem Hochdruckreiniger grob von den abgelagerten Sand- und Metallpartikeln befreit. Anschließend wurden die Seiten und die Unterseite des Tisches angeschliffen und lackiert, um eine rostfreie und saubere Oberfläche zu erhalten. Die Kassettenstruktur auf der Unterseite wurde ebenfalls gestrichen, um durch den Lack die noch verbliebenen Partikelablagerungen zu binden. Anschließend wurde die Unterseite mit einer Aluminiumplatte verschlossen, die an den Rändern gegen austretende Partikel mit Silikon abgedichtet ist. Zum Transport des Messtisches sind in den kurzen Seiten der Platte Durchführungen, in denen eine Transportstruktur angebracht werden kann. Diese Löcher wurden ebenfalls gegen Partikelaustritt mit Gummistopfen verschlossen, die für einen erneuten Transport des Tisches leicht entfernt werden können. Um die besonders ebene Fläche des Messtisches nicht zu beschädigen wurde auf eine Lackierung verzichtet. Stattdessen wurde sie mit CASTROL MOLUB-ALLOY 2115-2 versiegelt, um sie vor Rost zu schützen und mit einer Aluminiumplatte abgedeckt. Diese wurde mattschwarz lackiert, damit entstand für die Bilderkennung und die Positionsbestimmung mit dem Lasersensor eine nichtspiegelnde kontrastverstärkende Oberfläche. Die sechs Füße des Messtisches wurden ebenfalls gereinigt und lackiert. Nach diesen Maßnahmen wurde die Messmaschine im Januar 2007 den Reinraum transportiert und dort wieder in Betrieb genommen.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 6.8: **Reinigung des Messtisches.** (a) Vorreinigung mit Hochdruckreiniger, (b) Anstrich der Unterseite um Sand- und Metallpartikel zu binden, (c) Gestrichener Messtisch im Reinraum, (d) Abdeckung der Unterseite mit einer Aluminiumplatte.

6.2.2 Planung des Produktionsablaufs

Zur Produktion der ca. 250 Module der Drahtelektrode innerhalb weniger Monate wurde ein Produktionsablauf entwickelt, der es einer Gruppe von vier Personen ermöglichen soll, innerhalb von etwa fünf Stunden ein Modul der Drahtelektrode zu fertigen und parallel ein bereits fertiges Modul der finalen Qualitätskontrolle zu unterziehen. Es wurde versucht, die im Reinraum beim Zusammenbau eines Moduls anfallenden Arbeiten möglichst ökonomisch und ergonomisch in einzelne Arbeitsschritte einzuteilen. Zudem sind einige vorbereitende Arbeiten außerhalb des Reinraums notwendig. Dazu gehört insbesondere die rechtzeitige Reinigung und Bereitstellung der Modulkomponenten, für die ebenfalls mindestens eine Person eingeplant werden muss. Die Kapazitäten des Reinraums reichen nicht aus, eine größere Anzahl an gereinigten Komponenten einzulagern. Es können Einzelteile für maximal vier bis fünf Module untergebracht werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Dokumentation des Zusammenbaus ist dies nicht von Nachteil.

Folgende Arbeitsschritte sind vorgesehen:

1. **Ablängen der Drähte.** Die 0,2 mm und 0,3 mm starken Drähte der zwei Drahtla-

gen müssen unter der Zugspannung, die sie im Modul haben sollen, auf die richtige Länge geschnitten werden. Dazu wurde eine Arbeitsstation gebaut (siehe Kapitel 6.2.3), an der zwei Personen gleichzeitig arbeiten können, wobei je eine Person nur Draht eines Durchmessers bearbeitet. Der Ablauf dieses Arbeitsschritts besteht aus:

- (a) *Anbringen der ersten Keramik.* Die erste Keramik wird auf den Draht gefädelt, mit einer Drahtbiegemaschine umgebogen und das Ende in ein weiteres Loch der Keramik geführt.
- (b) *Draht unter Spannung ablängen.* Der Draht wird in die Ablängstation eingespannt und so mit einer definierten Spannung und eingestellter Länge abgeschnitten.
- (c) *Draht in die Käämme einfädeln.* Der Draht wird durch die Bohrungen der in der Modulstation befestigten Käämme gefädelt.

Jede der beiden Personen ist für eine der Drahtlagen zuständig.

2. **Anbringen der zweiten Keramik.** Eine weitere Person hat die Aufgabe, die an der Modulstation in die Käämme eingefädelten Drähte am abgeschnittenen Ende mit der zweiten Keramik zu versehen.
3. **Montage der C-Profil Streben.** Nachdem alle Drähte abgelängt, eingefädelt und mit der zweiten Keramik versehen wurden, müssen die Käämme durch die C-Profil Streben verbunden werden, wodurch gleichzeitig die Drähte gespannt werden. Für diesen Schritt sind wegen der Größe der Module und der Schwierigkeit des Einbaus alle Personen eingebunden. Nach diesem Arbeitsschritt ist das Modul fertig. Es muss im Anschluss noch eine abschließende Qualitätskontrolle durchlaufen.

Arbeitsschritte 1 und 2 laufen parallel ab, wobei die vierte Person die Messmaschine und die automatische Qualitätskontrolle überwacht. Zudem kann die vierte Person bei auftretenden Problemen helfen. Gleiches gilt für die folgende Fixierung des während der Fertigung auf der Messmaschine kontrollierten Moduls in einem Transportrahmen⁶, der das Modul während der Lagerung und des Transports nach Karlsruhe vor Beschädigungen schützt. Nachdem das vermessene Modul im Rahmen fixiert und das neue Modul auf die Messmaschine gelegt wurde, beginnt der Produktions- und Kontrollablauf wieder von vorn. Es ist vorgesehen, dass pro Tag zwei dieser Produktionszyklen in zwei Schichten mit je vier Personen durchlaufen werden. Bei der Nullserienproduktion wurden die Arbeitsabläufe getestet.

6.2.3 Arbeitsstationen

Für den gerade beschriebenen Produktionsablauf werden mehrere Arbeitsstationen benötigt, die auf die Anforderungen des jeweiligen Arbeitsschritts abgestimmt sein müssen. Zu

⁶Verpackung und Transportlogistik der fertigen Module werden in [Zac08] beschrieben werden.

diesem Zweck wurden mehrere Stationen entwickelt, die die räumlichen Gegebenheiten des Reinraums berücksichtigen. Es wurden Arbeitsplätze zum Ablängen der Drähte und zum Zusammensetzen der Module entworfen. Zudem sind zwei Computerarbeitsplätze u.a. zur Steuerung der Messmaschine und zur Dokumentation der Arbeiten im Reinraum vorhanden.

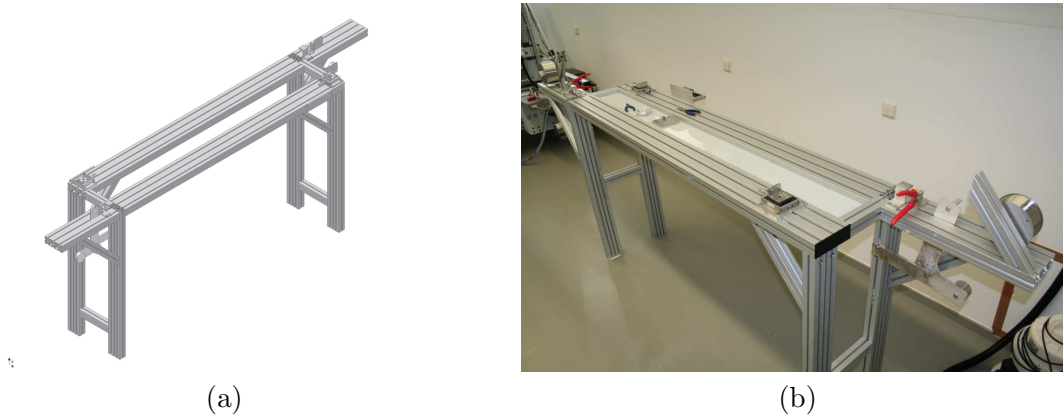


Abb. 6.9: Die Ablängstation. (a) CAD Zeichnung, (b) Aufnahme im Reinraum.

Die Ablängstation: Diese speziell für das Ablängen der Drähte entwickelte Arbeitsstation besteht aus zwei gegenüber liegenden Vorrichtungen, in denen die Drähte eingespannt und auf eine vorher eingestellte Länge geschnitten werden. Abbildung 6.9 (a) zeigt eine Konstruktionszeichnung der Ablängstation. Die Grundkonstruktion besteht aus Kanya Profilstreben der Größen $50 \cdot 50 \text{ mm}^2$, $100 \cdot 50 \text{ mm}^2$ und $150 \cdot 50 \text{ mm}^2$. Die Gesamtlänge der Station beträgt ca. 2950 mm und die Breite ca. 450 mm. Dadurch können Drähte auf eine Länge von knapp 2000 mm geschnitten werden. Die Station hat eine Arbeitshöhe von ca. 1100 mm, so dass sowohl kleinere als auch große Personen bequem stehend daran arbeiten können. Die einzelnen Teile der Konstruktion durften nicht länger als 1900 mm sein, da sie sonst nicht in der Ultraschall-Reinigungsanlage für einen Einsatz im Reinraum gesäubert werden konnten. Auf dem Kanya Grundkonstrukt sind mehrere Teile angebracht. An einem Ende der Kanya-Strebe ist eine Halterung mit einer Mikrometer-Verschiebeeinheit montiert, auf der eine Halterung für einen mit einer Keramik versehenen Draht befestigt ist. Diese lässt sich durch die Verschiebeeinheit mit Mikrometerschraube um bis zu 20 mm verstellen (Abbildung 6.10), um die gewünschte Drahtlänge präzise einstellen zu können. Auf der anderen Seite der langen Kanya-Strebe ist die Spannvorrichtung und die Schneidezange an einem ca. 500 mm langen Kanya-Ausleger angebracht. Dieser ist mit einem l-förmigen Hebelarm ausgestattet, an dem der Draht in einer speziellen Halterung fixiert werden kann (Abbildung 6.12). Ein Gewicht am unteren Arm des Hebels spannt den fixierten Draht mit einer Spannung von 5 N im Fall des 0,2 mm starken Drahts und mit 10 N im Fall des 0,3 mm Drahts. An die Schneidezange wurde, wie in Abbildung 6.11 zu sehen ist, ein Stück Federbronze angelötet, an dessen Ende eine kleine Teflonplatte angeschraubt ist. Diese Konstruktion hält den abgeschnittenen Draht fest, wobei der

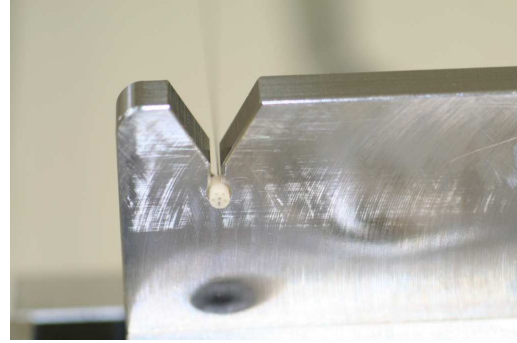
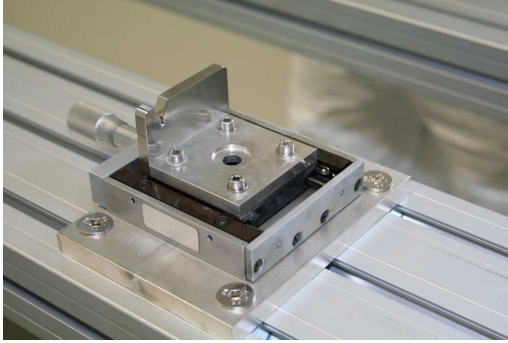


Abb. 6.10: **Keramikhalterung.** Die Vorrichtung hält die Keramik, in die der Draht eingespannt ist während der Draht unter Spannung geschnitten wird.

Draht nur Kontakt zum Teflon hat. Hinter dem Hebelarm können Spulen mit gereinigtem



Abb. 6.11: **Drahtschneidevorrichtung.** Der Draht ist am Hebelarm mit einer speziellen Klemmvorrichtung befestigt und gespannt. Wird der Draht mit der Zange abgeschnitten, wird das Teflonplättchen am Bronzeblech gegen den Metallwinkel gedrückt und hält das lose Ende des Drahtes so fest.

Abb. 6.12: **Hebelarm mit Gewicht.** Der Hebelarm ist am waagerechten Ausleger mit einem Gewicht beschwert, das für die passende Spannung des fixierten Drahtes sorgt. Ebenfalls zu sehen sind die Drahtspule und die Schneidevorrichtung.

Draht eingespannt werden, so dass dieser direkt von der Spule abgerollt, mit einer Keramik versehen, eingespannt und geschnitten werden kann. Alle Teile, mit denen der Draht in Berührung kommt, sind aus Edelstahl gefertigt.

Die Modulstation: Diese von B. Hillen konstruierte Arbeitsstation (Abb. 6.13) dient dem Zusammenbau der Module. Sie hält vor dem Einbau der C-Profile die Käbme in einem Abstand, bei dem die mit der ersten Keramik versehenen und auf die passende Länge geschnittenen Drähte in die Bohrungen beider Käbme eingefädelt werden können. Dabei steht der Draht an dem unteren Kamm ein wenig über, so dass die an der Station arbeitende Person die zweite Keramik am losen Drahtende befestigen kann. Ist dies bei

allen Drähten des Moduls geschehen, werden die C-Profile zwischen den Kämmen eingebaut und die Drähte dadurch gespannt. Die Fertigung der Prototypmodule hat gezeigt,



Abb. 6.13: **Die Modulstation.** Aufnahmen der Modulstation mit einem Konusmodul im Reinraum.

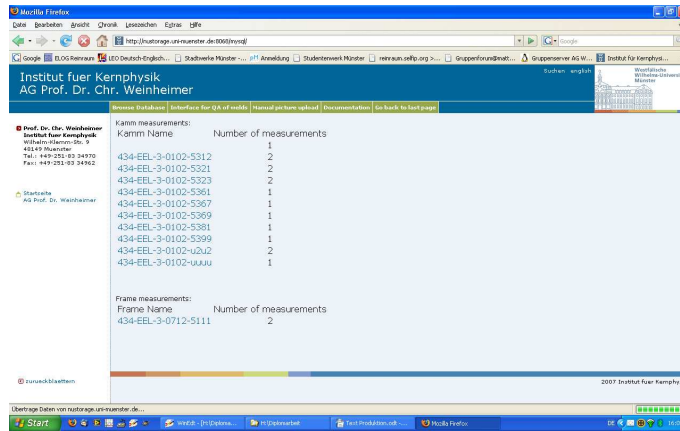
dass die Käämme einen gewissen Abstand zueinander haben müssen, da sich die Drähte andernfalls ineinander verdrillen. Dieser Abstand (ca. 40 cm weniger als die Modullänge) kann aufgrund der Größe des Reinraums nur dadurch erreicht werden, dass die Käämme diagonal oder gar vertikal zueinander gehalten werden. Aus Platzgründen wäre vertikal am geeignetsten, jedoch muss darauf geachtet werden, dass aus ergonomischen Gründen sowohl die zweite Keramik sitzend an die Drähte angebracht werden soll, als auch die Drähte problemlos in die Käämme eingefädelt werden sollen. Daher sind die Käämme in der Modulstation diagonal zueinander angebracht, so dass beide Kriterien erfüllt sind. Lediglich eine kleine Fußbank ist nötig, um die Drähte in den oberen Kamm einzufädeln.

Die Konstruktion besteht aus 50·50 mm² Kanya-Streben. Sie steht auf einem 2000·800 mm² großen Tisch. Zwei dreieckige, am Tisch befestigte Seitenteile sind mit drei 1500 mm langen Kanyastreben verbunden sind. An zwei dieser Streben sind mit speziellen Halterungen die Käämme montiert. Abbildung 6.13 zeigt den Aufbau im Reinraum.

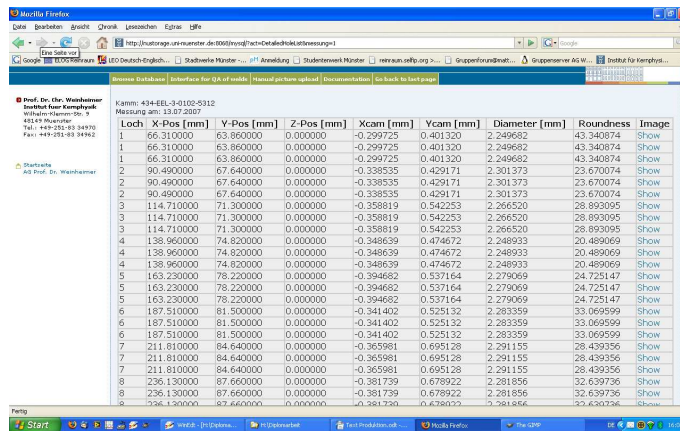
6.3 Dokumentation der QA-Ergebnisse

An dieser Stelle soll erläutert werden, wie die Ergebnisse der Qualitätskontrolle gespeichert werden, und wie man auf diese zugreifen kann. Um die aufgenommenen Daten für die Kollaboration gut zugänglich zu machen, werden sie in eine Datenbank eingelesen, auf die über das Internet zugegriffen werden kann. Der Server, auf dem die Datenbank angelegt ist, wird täglich vom Rechenzentrum der Universität Münster gesichert. Abbildung 6.14(a)-(c) zeigen das Webinterface der Datenbank [Pra09]. Die Käämme und Module können anhand ihrer Zuordnungsnummer ausgewählt und alle aufgenommenen Messdaten und Kamerabilder angesehen werden. Zudem können die von LabVIEW generierten Diagramme der Abweichungen angesehen werden. Zur Übersicht kann eine PDF-Datei mit allen relevanten Messergebnissen und Auswertungen sowie einigen Diagrammen, welche

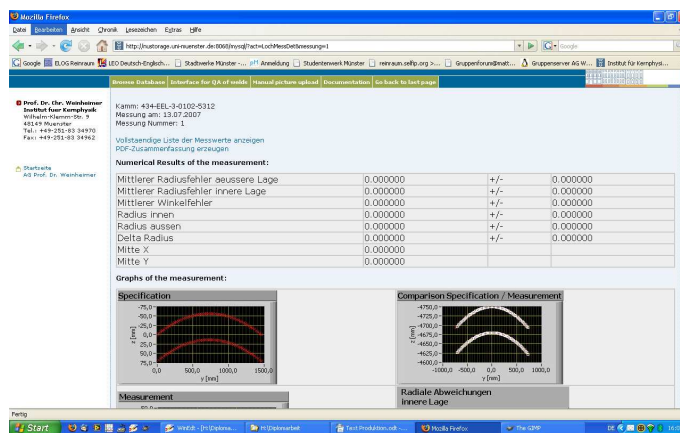
die Abweichungen von den CAD Vorgaben darstellen, erstellt und heruntergeladen werden. Die Messergebnisse der Qualitätskontrolle werden in regelmäßigen Abständen von einem php-Skript in die Datenbank eingelesen. Sie besteht zur Zeit nur aus Platzhaltern und wird im Laufe der Modulproduktion mit Messdaten gefüllt werden.



(a)



(b)



(c)

Abb. 6.14: Webinterface der Datenbank. (a) Kamm- und Moduluswahl, (b) Tabelle der Messwerte, (c) Informationen zur Auswertung der Messung.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Das KATRIN Experiment soll die Masse des Elektron-Antineutrinos durch eine Präzisionsmessung des Tritium- β -Spektrums bestimmen. Die Energieanalyse der Zerfallselektronen geschieht dabei im Hauptspektrometer des Experiments, das nach dem Prinzip des MAC-E-Filters arbeitet. Der im Hauptspektrometer zu erwartende Untergrund ist ein die Sensitivität des Experiments limitierender Faktor, der zu minimieren ist. Einige der Untergrundquellen im Spektrometer können durch den Einbau einer in diesem Fall modular aufgebauten Drahtelektrode signifikant unterdrückt werden.

Um die für die Funktionalität der Drahtelektrode nötige Fertigungsgenauigkeit der Elektrodenmodule zu gewährleisten wurde ein halbautomatisches Messsystem zur Qualitätskontrolle der Module entwickelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Aufbau und die Automatisierung des Messsystems beschrieben. In diesem Rahmen wurden auch Komponenten der Elektronik und die optischen Sensoren zur kontaktfreien Vermessung der Module und ihrer Komponenten erläutert. Um als Anleitung für die Benutzung des Messsystems dienen zu können wurde die Funktion der zur Steuerung der Maschine und zur Vermessung der Käme entwickelten Software erklärt. Tests ergaben, dass das Messsystem in Verbindung mit einer LabVIEW-gesteuerten Bilderkennung in der Lage ist, die Vermessung der Bohrungspositionen der Käme mit einer Genauigkeit $\Delta x = \Delta y = \pm 0,016$ mm durchzuführen. Bei der automatischen Vermessung der Komponenten treten im Moment noch vereinzelt Probleme in der Bilderkennung auf, die zum einen auf Probleme der zu vermessenden Objekte zurückgeführt werden können (z.B. Metallspäne in den Bohrlöchern), und zum anderen durch unzureichenden Kontrast der aufgenommenen Bilder zustande kommen. Hier sind noch Verbesserungen möglich (s. unten). Des Weiteren wurden Vorkehrungen für die Massenproduktion der Elektrodenmodule im Reinraum des Instituts für Kernphysik der Universität Münster getroffen, wodurch die UHV-Tauglichkeit der gefertigten Module gewährleistet ist.

Während der Entwicklungsphase des Messsystems wurden bereits erste Messungen zur Fertigungsgenauigkeit der Käme durchgeführt, die Einfluss auf das Design der Module und die Fertigung der Käme hatten. Durch einfache Messungen zeigt sich, dass für die gestellten Anforderungen ein Zuschnitt der Käme mittels Laser nicht praktikabel ist. Nach

einer Kontrolle der wasserstrahlgeschnittenen Kammuster zweier Firmen wurde der Fertigungsauftrag für die insgesamt 496 Kämmen der Elektrode vergeben. Mehrere Tests zum thermischen Verhalten der Kämmen und C-Profil Streben ergaben, dass die Ausheizzyklen im Fall der Kämmen zu keinen systematischen Verformungen führen, sie sich allerdings im Bereich $< \pm 0,1$ mm leicht verformen. Im Fall der C-Profile ist eine Verstärkung der schon vor dem Ausheizen vorhandenen Krümmung in der Ebene parallel zu den Drahtlagen der Module um bis zu 1 mm festzustellen. Diese Effekte sind jedoch klein, so dass ein Tempern der Kämmen und der C-Profil Streben vor deren Zusammenbau zu einem Elektrodenmodul unterlassen werden kann. Bei der Überprüfung der Bohrungsgenauigkeit der von der Firma Bölling gebohrten Kämmen wurde festgestellt, dass im bisher verwendeten Messbereich bei geringer Auslenkung des y-Arms Fehler in der Positionsangabe auftreten. Diese können durch Verschieben des Messbereichs hin zu größeren Auslenkungen des y-Arms umgangen werden. Dadurch erwies sich der zunächst festgestellte Radiusunterschied der Bohrungslagen der Zylinderkämmen von ca. 0,2 mm als systematischer Fehler des Messarms im verwendeten Messbereich. Eine erneute Vermessung im verschobenen Messbereich ergab eine Abweichung von $< \pm 0,05$ bei allen Bohrungen.

An dieser Stelle soll ein kurzer Ausblick auf die Verbesserungsmöglichkeiten der Bilderkennung gegeben werden. Dies betrifft vor allem deren Zuverlässigkeit bei der Locherkennung. Bei kontinuierlicher Ausführung der Bilderkennungsroutine kann beobachtet werden, dass eine Bohrung bei gleichbleibender Kameraposition und Beleuchtungsstärke in seltenen Fällen nicht erkannt wird. Im Kammvermessungsprogramm wird die Bilderkennung jedoch bei jeder angefahrenen Position nur einmal ausgeführt. Daher sollte eine Funktion in das Programm eingefügt werden, die im Fall einer nicht erkannten Bohrung den Suchalgorithmus einige Male wiederholt. So könnte unterschieden werden, ob die Bohrung nicht korrekt erkannt wird, oder sich tatsächlich nicht im Bereich der Suchmaske befindet, bzw. ob eine Deformation, eine teilweise Verdeckung durch Metallspäne oder ähnliches die Locherkennung behindert. Außerdem könnte in das bestehende Programm eine Warnmeldung oder ein Vermerk in der Messdatei eingefügt werden, falls Probleme bei der Bilderkennung aufgetreten sind, so dass nach der Messung eine gezielte Kontrolle der aufgenommenen Kamerabilder Aufschluss über die Ursache geben könnte. Zudem wird, wie bereits in Kap. 4.1.1 beschrieben, zur Verbesserung des Kontrasts der bisherige Untergrund der Kammauflage gegen eine schwarze Kunststoffplatte ausgetauscht. Diese Maßnahmen könnten die Bilderkennung und damit die Qualitätskontrolle der Kämmen deutlich verbessern.

Anhang A

Drahtelektrode

A.1 Formentabelle der Komponenten der Drahtelektrode

Tabelle A.1: Bezeichnungssystem der Elektrodenkomponenten

Bauteilnummer	ANZAHL	Form	Beschreibung
434-EEL-3-0708-0657	400	57	C- Profil Modul 7 bis 11
434-EEL-3-0707-0660	400	60	Endstück kleiner Kamm Modul 7 - 11 innen
434-EEL-3-0712-1655	100	55	Kamm des Moduls 7 bis 11 detektorseitig
434-EEL-3-0704-1852	6000	52	Draht 03/ Modul 7, 8, 9, 10 und 11
434-EEL-3-0703-1851	6000	51	Draht 02/ Modul 7, 8, 9, 10 und 11
434-EEL-3-0801-1165	80	65	Kamm des Moduls 8 bis 11 sourceseitig mit Kappe
434-EEL-3-0814-1166	80	66	Kappe Zentralteil
434-EEL-3-0701-0555	20	55	Kamm des Moduls 7 der Spiegel ist 0701
434-EEL-3-0401-0525	20	25	Kleiner Kamm des Moduls der Spiegel ist 1412
434-EEL-3-0412-0526	20	26	Großer Kamm des Moduls gespiegelt von 1401
434-EEL-3-0408-0727	120	27	C- Profil Modul 4 u. 14
434-EEL-3-0407-0930	160	30	Endstück kleiner Kamm Modul 4 innen kleiner Kamm
434-EEL-3-0409-0930	160	30	Endstück kleiner Kamm Modul 4 innen großer Kamm
434-EEL-3-0501-0535	20	35	Kleiner Kamm des Moduls der Spiegel ist 1312
434-EEL-3-0512-0536	20	36	Großer Kamm des Moduls Spiegel von 1301
434-EEL-3-0508-0737	120	37	C- Profil Modul 5 u. 13
434-EEL-3-0601-0545	20	45	Kleiner Kamm des Moduls der Spiegel ist 1212
434-EEL-3-0608-0747	160	47	C- Profil Modul 6 u. 12
434-EEL-3-0612-0546	20	46	Großer Kamm des Moduls Spiegel von 1201
434-EEL-3-1201-0546	20	46	Großer Kamm des Moduls Spiegel ist 0612
434-EEL-3-1212-0545	20	45	Kleiner Kamm des Moduls gespiegelt von 0601
434-EEL-3-1301-0536	20	36	Großer Kamm des Moduls Spiegel ist 0512
434-EEL-3-1312-0535	20	35	Kleiner Kamm des Moduls gespiegelt von 0501
434-EEL-3-1401-0526	20	26	Großer Kamm des Moduls Spiegel ist 0412
434-EEL-3-1412-0525	20	25	Kleiner Kamm des Moduls gespiegelt von 0401
434-EEL-3-0603-0841	2080	41	Draht 02/ Modul 6 und 12

Tabelle A.2: Bezeichnungssystem der Elektrodenkomponenten (Fortsetzung)

Bauteilnummer	ANZAHL	Form	Beschreibung
434-EEL-3-0706-0758	400	58	Endstück kleiner Kamm Modul 4 aussen kleiner Kamm
434-EEL-3-0406-0828	240	28	Endstück kleiner Kamm Modul 4 aussen kleiner Kamm
434-EEL-3-0410-0929	240	29	Endstück kleiner Kamm Modul 4 aussen großer Kamm
434-EEL-3-0813-1267	640	67	Isolatoren der Kappe
434-EEL-3-0403-0821	1360	21	Draht 02/ Modul 4 und 14
434-EEL-3-0404-0822	1360	22	Draht 03/ Modul 4 und 14
434-EEL-3-0503-0831	1680	31	Draht 02/ Modul 5 und 13
434-EEL-3-0504-0832	1680		Draht 03/ Modul 5 und 13
434-EEL-3-0705-1662	200	62	Distanzrohr im Zentralteil
434-EEL-3-0411-0431	120	31	Distanzrohr großer Kamm Konusmodule
434-EEL-3-0405-0432	120	32	Distanzrohr kleiner Kamm Konusmodule
434-EEL-3-0402-0220	44480	20	6- fach Kapilare
434-EEL-3-0604-0842	2080	42	Draht 03/ Modul 6 und 12

Anhang B

ODE1 Quadraturdecoder

B.1 Schaltpläne OED1 Quadraturdecoder

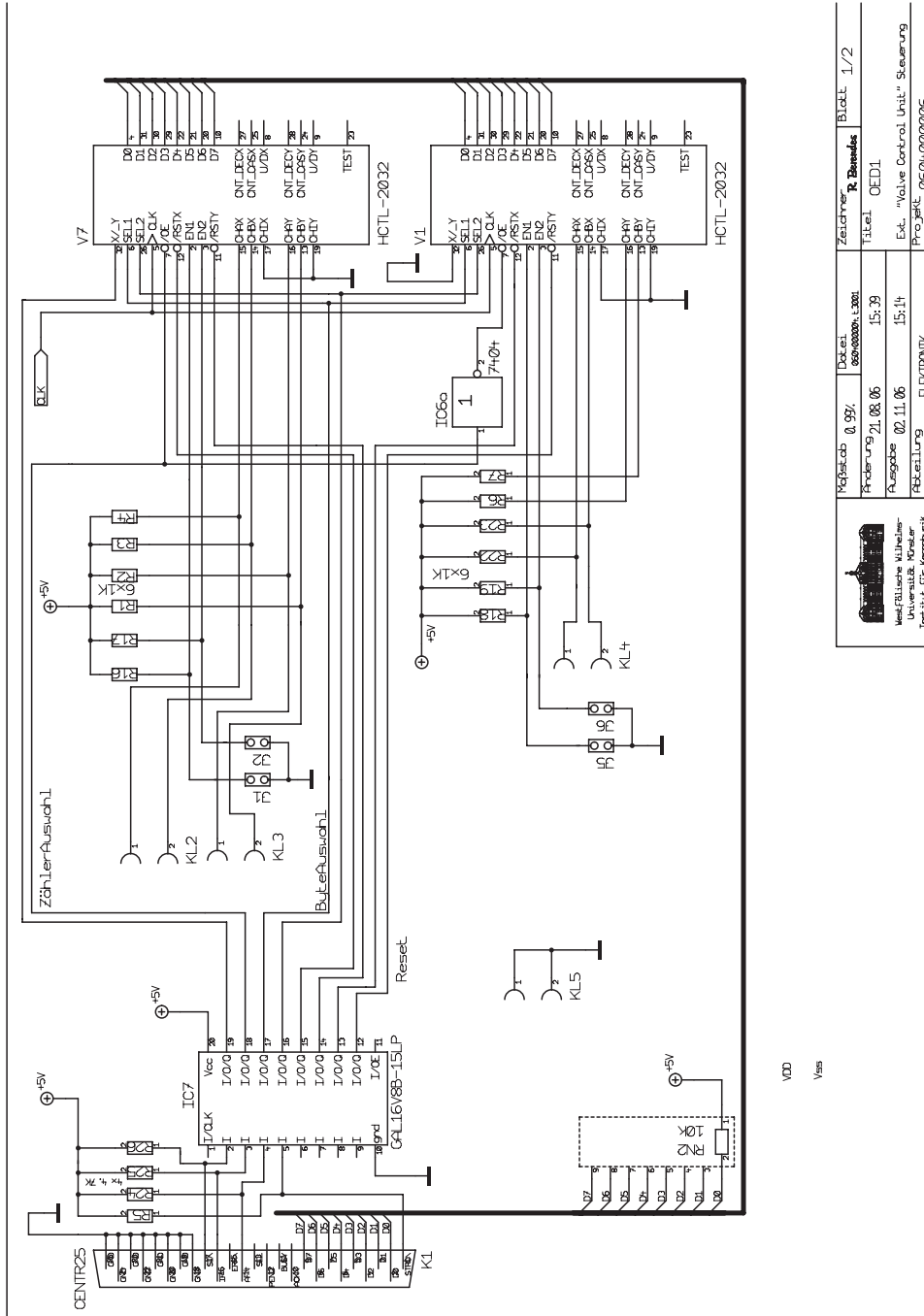

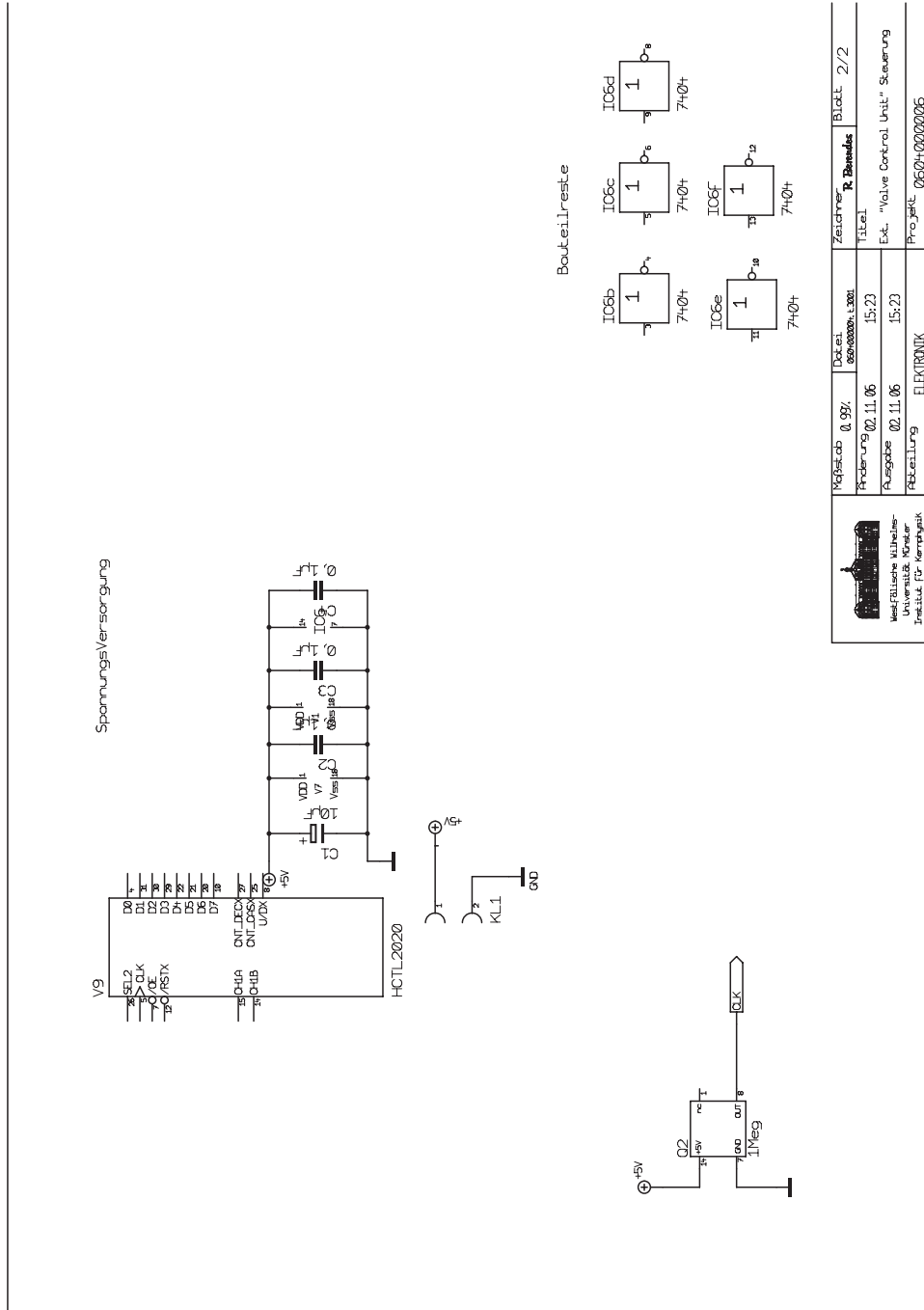


Abb. B.1: Schaltplan des Quadraturdecoders (Teil 1)

 Lehrstuhl für Mechatronik Universität Würzburg Institut für Mechatronik	MechLab 0.99f	Dat.: 08.08.2008	Blatt: 1/2
	Prüfung 21.08.06	15:39	Zeichner: R. Böhndel
	Ausgabe 02.11.06	15:14	Titel: OED1
	Abteilung: ELEKTRONIK		Est.: "Valve Control Unit" Steuerung
			Projekt: 0650H-000006




 Mechatronik Universität Kassel Institut für Mechatronik	Maßstab 1:1 Datum 02.11.06 Änderung 02.11.06 Ausgabe 02.11.06 Abschließung	Blatt 2/2 Zeichner R. Benda Filel 15:23 15:23 Ex. "Nalve Control Unit" Steuerung Projekt 0650H-000006
--	--	---

Abb. B.2: Schaltplan des Quadraturdecoders (Teil 2)

B.2 Zuordnungstabellen

Tabelle B.1: Zuordnungstabelle der Auslesebefehle (Invertierungen der LPT-Schnittstelle mitberücksichtigt)

Zähler Bytes :	SLCT IN	Init	Auto Feed	Strobe
Zähler :Nr.1 Byte:LSB	1	0	1	1
Zähler :Nr.1 Byte:3RD	0	0	1	1
Zähler :Nr.1 Byte:2ND	1	1	1	1
Zähler :Nr.1 Byte:MSB	0	1	1	1
Zähler :Nr.2 Byte:LSB	1	0	0	1
Zähler :Nr.2 Byte:3RD	0	0	0	1
Zähler :Nr.2 Byte:2ND	1	1	0	1
Zähler :Nr.2 Byte:MSB	0	1	0	1
Zähler :Nr.3 Byte:LSB	1	0	1	0
Zähler :Nr.3 Byte:3RD	0	0	1	0
Zähler :Nr.3 Byte:2ND	1	1	1	0
Zähler :Nr.3 Byte:MSB	0	1	1	0
Resets :				
Zähler Nr.1 reset	1	0	0	0
Zähler Nr.2 reset	0	0	0	0
Zähler Nr.3 reset	1	1	0	0

Tabelle B.2: Zuordnung Ein- und Ausgänge des GAL16V8B-15LP

		Input				Output					
2	3	4	5	13	14	15	16	17	18	19	
a	b	c	d	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	
0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	
0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	
1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	
0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	
1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	
0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	
1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	
0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	X	
1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	X	
0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	X	
1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	X	
0	0	1	1	1	1	0	X	X	X	X	
1	0	1	1	1	0	1	X	X	X	X	
0	1	1	1	0	1	1	X	X	X	X	
1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	

Tabelle B.3: GAL16V8B-15LP Logiktablelle

Q1	$x = \neg(a \& b \& c \& d)$
Q2	$x = \neg(a \& \neg b \& c \& d)$
Q3	$x = \neg(\neg a \& \neg b \& c \& d)$
Q4	$x = (b \& \neg c) \# (b \& \neg d)$
Q5	$x = (\neg a \& \neg d) \# (\neg a \& \neg c)$
Q6	$x = \neg c \& d$
Q7	$x = c \& \neg d$

Tabelle B.4: Anschlussbelegung des NI Multi I/O Boards

I/O Board	Funktion	Druckerkabel	I/O Board	Funktion	Druckerkabel
1			35	GND	Pin 24
2			36	GND	Pin 25
3			37	GND	Pin 18
4	GND	Pin 23	38		
5			39	GND	Pin 23
6			40		
7	GND	Pin 24	41		
8			42		
9			43		
10			44	GND	Pin 19
11			45		
12			46		
13			47	Control Bit	Pin 17
14			48	Data Bit 3	Pin 5
15	GND	Pin 19	49	Init	Pin 16
16	Data Bit 2	Pin 4	50		
17	Control Bit	Pin 14	51	Data Bit 1	Pin 3
18	GND	Pin 22	52	Strobe	Pin 16
19	Data Bit 0	Pin 2	53		
20			54		
21	+ Ventil		55	GND Ventil	
22			56		
23			57		
24			58		
25			59		
26	GND	Pin 21	60	Data Bit 7	Pin 9
27			61	GND	Pin 22
28	Data Bit 6	Pin 8	62		
29			63	GND	Pin 25
30	Data Bit 5	Pin 7	64		
31	GND	Pin 25	65	Data Bit 4	Pin 6
32			66	- roter Laser	
33	+ roter Laser		67		
34	- grüner Laser		68	+ grüner Laser	

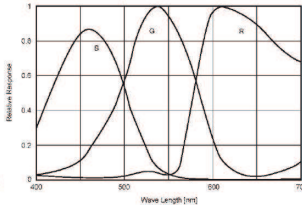
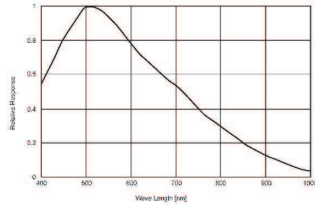
Anhang C

Datenblätter

C.1 Technische Daten der AVT Marlin F080C Kamera

In der Abbildung ist ein Ausschnitt aus dem Datenblatt der AVT Marlin F080C zu finden.

AVT Marlin F-080B / F-080C



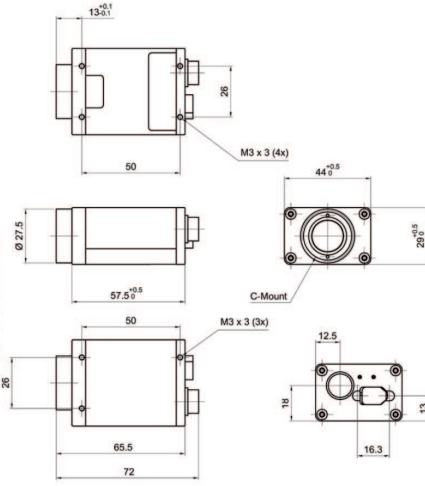
Sensor specifications b/w; color (extracted from the data sheet of the sensor - excluding lens and filter)

Martin F-080B/C		Martin F-080B/C-30fps	
AOI height / pixel	Frame rate / fps	AOI height / pixel	Frame rate / fps
778	20.0	778	30.2
768	20.3	768	30.5
600	25.0	600	37.7
480	30.0	480	45.2
240	49.8	240	75.4
120	73.3	120	113.1
60	99.2	60	150.8



Connections

Pin	Descriptions	Use
1	Ground	GND for RS232 and ext. power
2	Power In (CCD only)	
3		
4	Input1/Trigger	TTL, Edge, progr.
5		
6	Output 1 /IntEua	Open emitter
7	Input Ground	Common ground for inputs
8	RS232 RxD	
9	RS232 TxD	
10	OutVCC	Common VCC for outputs
11	Input 2	TTL
12	Output 2	Open emitter



Dimensions

Camera Specifications

	MARLIN F-080B (b/w)	MARLIN F-080 C (color)
Image device	Type 1/3 (diag. 6 mm) progressive scan SONY CCD	
Effective picture elements	1032 (H) x 778 (V): mono	1032 (H) x 778 (V) @ Raw8; 1032 (H) x 776 (V) @ YUV
Picture size	1024 x 768 pixels (Format_1); supporting all smaller fixed formats; up to 1032 x 778 pixels (Format_7 Mode_1)	
Cell size	4.65 μm x 4.65 μm	
Resolution depth	8 bit / 10 bit (b/w only) up to 12 bit (ADC)	
Lens mount	C-Mount; CS-Mount on demand	
Digital interface	IEEE 1394 IIDC v. 1.3	
Transfer rate	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s	
Frame rates	Up to 20 Hz in Format_7 optional: up to 30 Hz (Format_7)	up to 20/30 Hz in Format_7 Raw8; 20/27 Hz (YUV 4:1:1); 20/20 Hz (YUV 4:2:2); 13Hz (RGB8)
Gain control	Manual: 0-24 dB (0.035 dB/step); auto gain (select. AOI)	
Shutter speed	20 ...67.108.864 μs (67 s); auto shutter (select. AOI)	
External trigger shutter	Trigger_Mode_0, Trigger_Mode_1, advanced feature: Trigger_Mode_15 (bulk); image transfer by command; trigger delay	
Smart features	Real-time shading correction; image sequencing; built in FIFO memory up to 7 frames; one user programmable look-up table; 2 configurable inputs, 2 configurable outputs; image mirror (L-R<->R-L), binning, secure image signature (SIS), user profiles, serial port (IIDC V1.3)	
Power requirements	DC 8 V – 36 V via IEEE 1394 cable or 12-pin HIROSE	
Power consumption	Less than 3 watt (@ 12 V DC)	
Dimensions	72 mm x 44 mm x 29 mm (L x W x H); w/o tripod and lens	
Mass	<120 g (without lens)	
Operating temperature	+5...+ 45 °Celsius	
Storage temperature	-10...+ 60 °Celsius	
Regulations	EN 55022, EN 61000, EN 55024, FCC Class B; DIN ISO 9022, RoHS (2002/95/EC)	
Options	Removable IR cut filter, host adapter card, locking IEEE 1394 cable, AVT FirePackage /Direct FirePackage / Fire4Linux	

Anhang D

Diagramme

In diesem Abschnitt sind die Diagramme der Messungen aus Kap. 5 angefügt.

D.1 Ausheiztests der C-Profil Streben

Die Diagramme zeigen die Messwerte der übrigen getemperten C-Profile aus Kapitel 5.4.3.

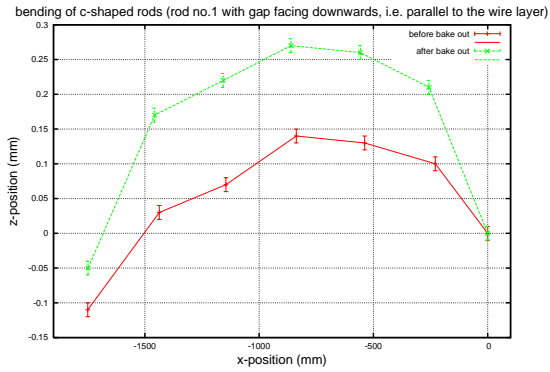


Abb. D.1: Verformung des 2. C-Profil Strebe (senkrecht zur Modulebene).

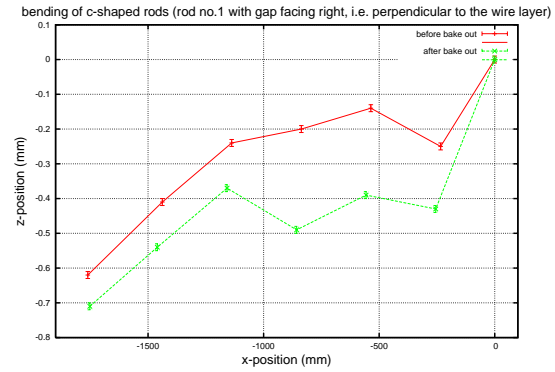


Abb. D.3: Verformung des 2. C-Profil Strebe (parallel zur Modulebene).

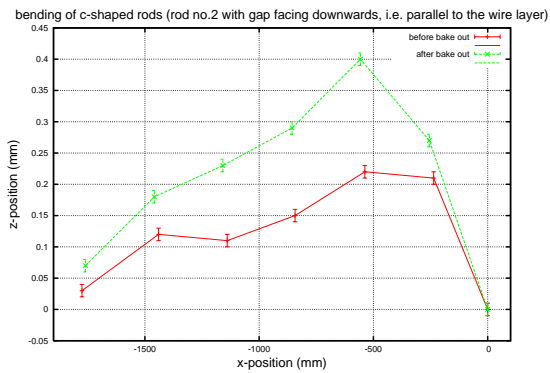


Abb. D.2: Verformung des 3. C-Profil Strebe (senkrecht zur Modulebene).

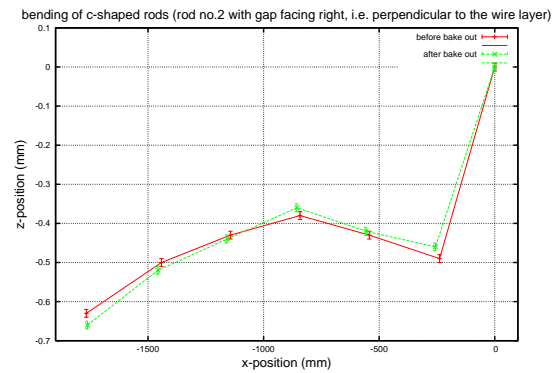


Abb. D.4: Verformung des 3. C-Profil Strebe (parallel zur Modulebene).

D.2 Ausheiztests der Kämme

In diesem Abschnitt sind die Diagramme mit den Abweichungen der Messwerte vor und nach den Ausheizzyklen der übrigen drei vermessenen Kämme zum Vergleich mit Kap. 5.4.2 dargestellt.

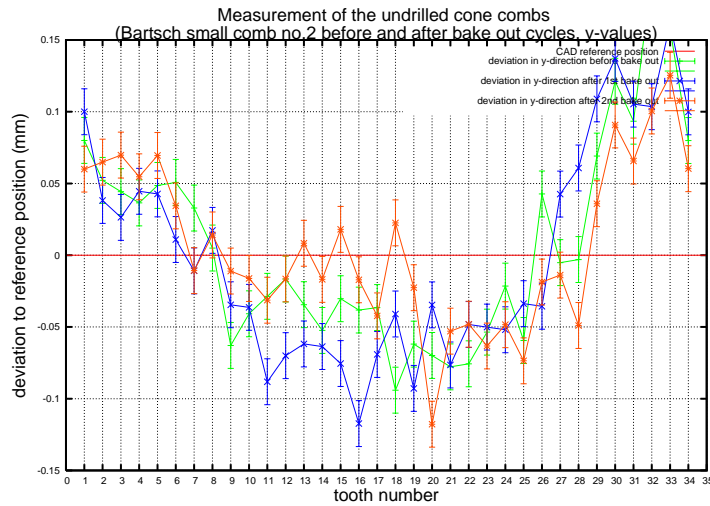


Abb. D.5: Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 25, Nr. 2, x-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der x-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den x-Werten der CAD-Dateien.

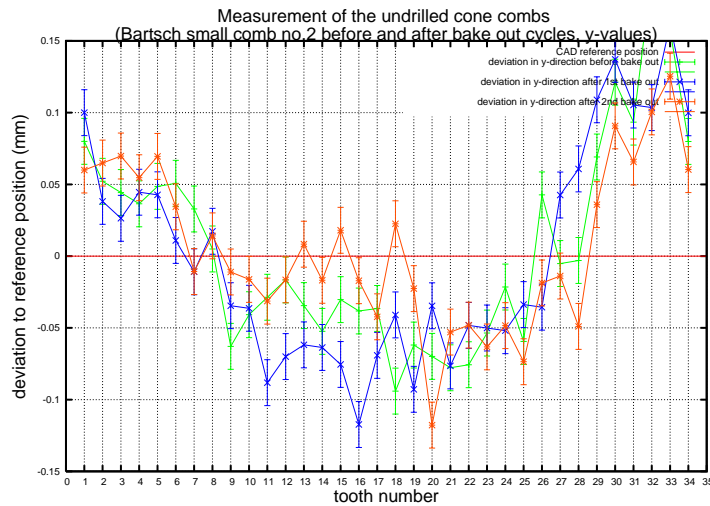


Abb. D.6: Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 25, Nr. 2, y-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der y-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den y-Werten der CAD-Dateien.

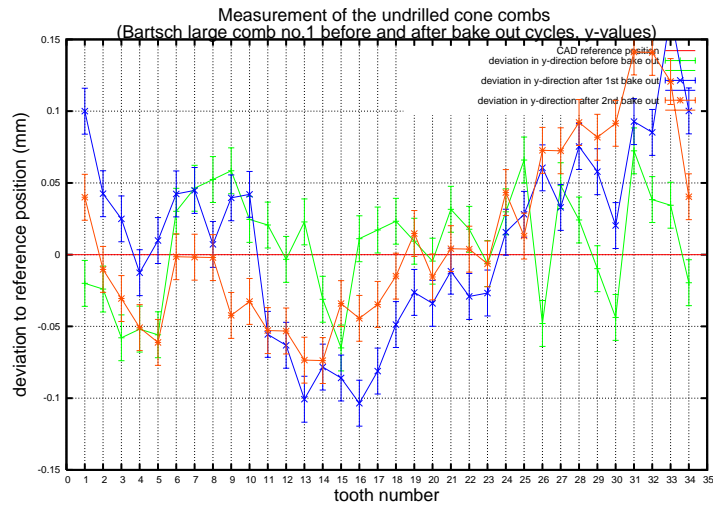


Abb. D.7: Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 26, Nr. 1, x-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der x-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den x-Werten der CAD-Dateien.

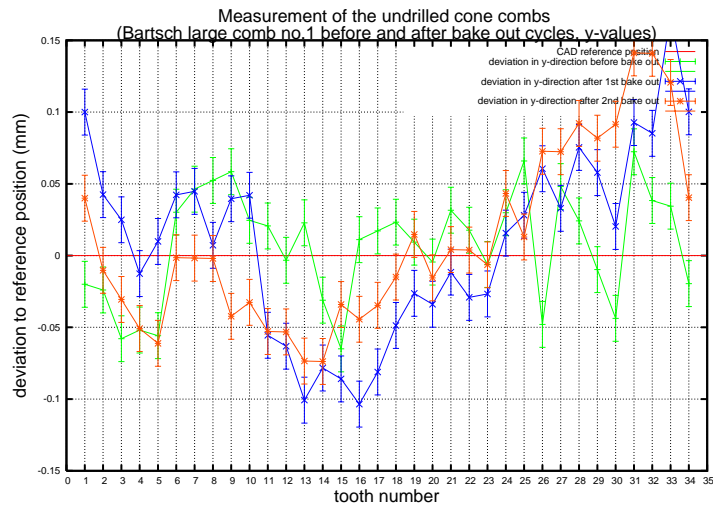


Abb. D.8: Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 26, Nr. 1, y-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der y-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den y-Werten der CAD-Dateien.

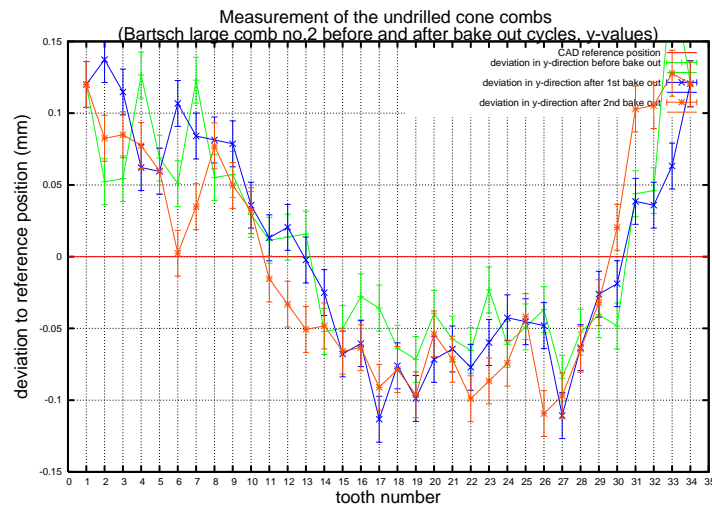


Abb. D.9: Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 26, Nr. 2, x-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der x-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den x-Werten der CAD-Dateien.

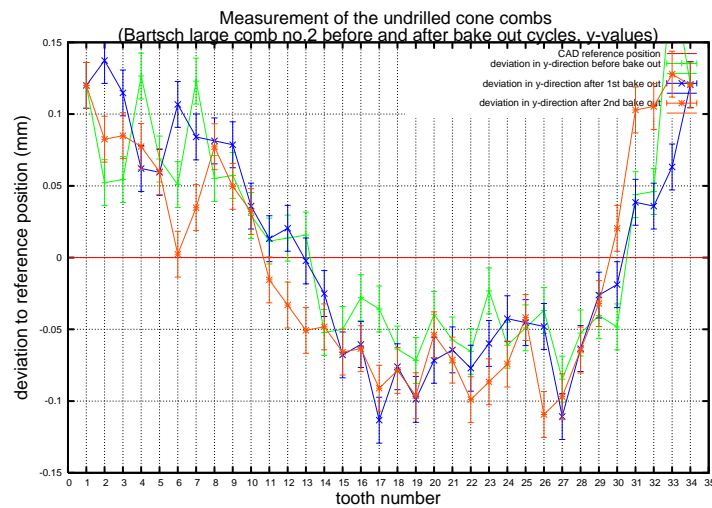


Abb. D.10: Veränderung nach Ausheizen (Bartsch Form 26, Nr. 2, y-Werte). Dargestellt sind die Abweichungen der y-Werte vor und nach den Ausheizzyklen von den y-Werten der CAD-Dateien.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Aufbau des Experiments von Reines und Cowan	7
1.2	Der pp -Zyklus	9
1.3	Spektrum der solaren Neutrinos	10
1.4	Resultate des SNO-Experiments	11
1.5	Ergebnisse des Super-Kamiokande Experiments	14
1.6	Helizität eines Teilchens	15
1.7	Neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall	16
1.8	Massenparabel	17
1.9	Beitrag der Neutrinos zu Ω	18
1.10	Obergrenzen des diffusen Neutrinoflusses	20
1.11	Der nördliche Himmel im Licht der Neutrinos	21
2.1	Tritium β -Zerfall	24
2.2	Energiespektrum des Tritium- β -Zerfalls	26
2.3	Das Prinzip des MAC-E-Filters	28
2.4	Transmissionsfunktion des KATRIN Hauptspektrometers	31
2.5	Aufbau des KATRIN Experiments	33
2.6	WGTS	33
2.7	Transportsektion	34
2.8	Das Vorspektrometer	35
2.9	CAD Grafik des Hauptspektrometers	36
2.10	Das Hauptspektrometer	38

3.1	Prinzip der Untergrundreduktion durch eine Drahtelektrode	42
3.2	Zweilagige Drahtelektrode	44
3.3	Aufteilung der Drahtelektrode	45
3.4	Aufteilung der Drahtelektrode (2)	46
3.5	Ein Prototypmodul	46
3.6	CAD Grafiken der Module	47
3.7	Drähte im Modul	49
3.8	Modulübergang mit Abschirmblech	49
3.9	Bohrung und Keramik	49
3.10	Das Schienensystem	50
3.11	Zylinderkamm (Technische Zeichnung)	52
4.1	Der Stiefelmayer-Messtisch vor dem Umbau	57
4.2	Der Stiefelmayer-Messtisch nach dem Umbau	58
4.3	Verkabelungsschema	59
4.4	Führungseinheit der y-Achse	60
4.5	Fixierter Kamm	60
4.6	Modulhalterung	61
4.7	Einheit mit EPOS 24/1 Positioniersteuerungen	62
4.8	Anbringung der Maxon Motoren	63
4.9	Positionssignale der Motoren	64
4.10	Pinanordnung der Encoderanschlüsse	64
4.11	OED1 Elektronikeinheit geschlossen	65
4.12	OED1 Elektronikeinheit offen	66
4.13	Signale der Maschinenencoder	66
4.14	Schaltplan des Quadraturdecoders	67
4.15	Benutzeroberfläche „NI Vision Assistant“	69
4.16	Locherkennung	70
4.17	Rotation der Messwerte	71
4.18	1. Schritt des Kammvermessungsprogramms: Kalibration	72

4.19	Kalibrationsplatte	72
4.20	2. Schritt des Kammvermessungsprogramms: Wahl der Kammgeometrie . . .	73
4.21	Verzeichnisstruktur	73
4.22	Positionsbestimmung eines Zahns	74
4.23	3. Schritt des Kammvermessungsprogramms: Steuerdatei erzeugen	74
4.24	4. Schritt des Kammvermessungsprogramms: Vermessung des Kamms	75
4.25	Aufbau einer Messdatei	76
4.26	5. Schritt des Kammvermessungsprogramms: Auswertung	77
4.27	AVT Marlin F080C mit Halterung	78
4.28	Ergebnisse der Kameratests (AVT Marlin)	79
4.29	Ergebnisse der Kameratests (AVT Oscar)	80
4.30	Verkipfung des Messarms unter Kameragewicht	81
4.31	Schematische Darstellung des Lasersensors	82
4.32	Der Lasersensor am Arm der Messmaschine	82
4.33	Bestimmung der y-Koordinate	83
4.34	Bestimmung der x-Koordinate	84
4.35	Verkipfung des Messarms unter Gewicht des Lasersensors	85
4.36	Probleme bei der Locherkennung	86
4.37	Reproduzierbarkeit der Kammvermessung, x-Werte	87
4.38	Reproduzierbarkeit der Kammvermessung, y-Werte	88
5.1	Bedienfeld des Analyseprogramms	90
5.2	Verschmelzungen durch Laserschnitt	91
5.3	Abweichungen der Zahnpositionen (Bartsch Form 26)	92
5.4	Abweichungen der Zahnpositionen (Mitbewerber Form 26)	93
5.5	Abweichungen der Zahnpositionen (Bartsch Form 25)	94
5.6	Falsch erkannte Zahnspitzen (Bartsch Form 25)	94
5.7	Abweichungen der Zahnpositionen (Mitbewerber Form 25)	95
5.8	UHV-Ofen und Heizungssteuerung	96
5.9	Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 25, Nr. 1, x-Werte) 97	

5.10 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 25, Nr. 1, y-Werte)	98
5.11 Krümmungsrichtungen der C-Profil Streben	98
5.12 Verformung einer C-Profil Strebe (parallel zur Modulebene)	99
5.13 Verformung einer C-Profil Strebe (senkrecht zur Modulebene)	99
5.14 Bohrungsgenauigkeit Kamm Nr. 1 (Form 55)	100
5.15 Locherkennung während der Messung	101
5.16 Bestimmung der Radiendifferenz	101
5.17 Neue Ermittlung der Bohrungsgenauigkeit (Form 55)	103
6.1 Reinraumklassen	106
6.2 Grundriss des Reinraums	107
6.3 Lüftungskonzepte	108
6.4 Schema des Reinraum-Lüftungssystems	109
6.5 Partikelemission einer Person	110
6.6 Messung der Reinraumklasse	111
6.7 Fotos: Messung der Reinraumklasse	112
6.8 Reinigung des Messtisches	114
6.9 Die Ablängstation	116
6.10 Keramikhalterung	117
6.11 Drahtschneidevorrichtung	117
6.12 Hebelarm mit Gewicht	117
6.13 Die Modulstation	118
6.14 Webinterface der Datenbank	120
B.1 Schaltplan des Quadraturdecoders (Teil 1)	128
B.2 Schaltplan des Quadraturdecoders (Teil 1)	129
D.1 Verformung einer C-Profil Strebe (parallel zur Modulebene)	136
D.2 Verformung einer C-Profil Strebe (parallel zur Modulebene)	136
D.3 Verformung einer C-Profil Strebe (senkrecht zur Modulebene)	136
D.4 Verformung einer C-Profil Strebe (senkrecht zur Modulebene)	136

- D.5 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 25, Nr. 2, x-Werte)137
- D.6 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 25, Nr. 2, y-Werte)137
- D.7 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 26, Nr. 1, x-Werte)138
- D.8 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 26, Nr. 1, y-Werte)138
- D.9 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 26, Nr. 2, x-Werte)139
- D.10 Vergleich: Messwerte/CAD-Referenzwerte (Bartsch Form 26, Nr. 2, y-Werte)139

Tabellenverzeichnis

3.1	Moduldaten	48
5.1	Messung des Abstands der Bohrungslagen	102
A.1	Bezeichnungssystem der Elektrodenkomponenten	124
A.2	Bezeichnungssystem der Elektrodenkomponenten (Fortsetzung)	125
B.1	Zuordnungstabelle der Auslesebefehle (Invertierungen der LPT-Schnittstelle mitberücksichtigt)	130
B.2	Zuordnung Ein- und Ausgänge des GAL16V8B-15LP	131
B.3	GAL16V8B-15LP Logiktablelle	131
B.4	Anschlussbelegung des NI Multi I/O Boards	132

Literaturverzeichnis

- [Abd95] J.N. Abdurashitov, et al. (SAGE), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **38** (1995) 60
- [Ahm02] Q.R. Ahmad, et al., (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 011301
- [Ahn06] M.H. Ahn, et al., (K2K Collaboration), [hep-ex/0606032](#)
- [Alt03] G. Altarelli, K. Winter, Neutrino Mass, Springer, 2003
- [Ara04] T. Araki, et al., (KamLAND Collaboration), [hep-ex 0406035](#)
- [Ash04] Y. Ashie, et al., (Super-Kamiokande Collaboration), [hep-ex/0404034](#)
- [Bah76] J.N. Bahcall and R. Davis: Science **191** (1976) 264-267
- [Bah89] J.N. Bahcall, Neutrino Astrophysics, Cambridge University Press, 1989
- [Bea80] J.Beamson, et. al., J.Phys. **E13** (1980) 64
- [Bor07] B. Bornschein, KATRIN numbering system for equipment, components and related documents, 20.04.2007, KATRIN-internes Dokument, URL: <http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/423655>
- [Dra02] BSCW, 2002, [http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d47120/Radioactive steel.pdf](http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d47120/Radioactive%20steel.pdf)
- [Eic05] <http://www-zeuthen.desy.de/astro-workshop/postersession/eichelhardt.pdf>
- [Ell87] S.R. Elliott, Phys. Rev. C **36**, 2129-2131 (1987)
- [Fla04] B. Flatt, Dissertation, Inst. f. Physik, Universität Mainz, 2004
- [Gai04] L. Gail, H.-P. Hortig, Reinraumtechnik, Springer, Heidelberg 2002,2004
- [Geb07] A. Gebel, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, März 2007
- [Gol58] M. Goldhaber, et al., Phys. Rev. **109** (1958) 1015
- [Goo06] A. Goobar, et al., [astro-ph/0602155](#)

- [Got05] H. Gottschlag, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, Februar 2005
- [Gru05] C. Grupen, Astroparticle Physics, Springer, Heidelberg 2005
- [Hab06] F. Eichelhardt, F. Habermehl, Seminar des Graduiertenkollegs „Hochenergiephysik und Teilchenastrophysik“, Uni Karlsruhe, 01.12.06
- [Ham96] W. Hampel, et al. (GALLEX), Phys. Lett. **B388** (1996) 384
- [Hil07] B. Hillen, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, Januar 2007
- [Hug07] K. Hugenberg, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, 2007
- [Ish04] M. Ishitsuka for the Super-Kamiokande collaboration, hep-ex/0406076
- [Jac02] J.D. Jackson, Klassische Elektrodynamik, de Gruyter, 2002
- [KDR04] KATRIN Design Report 2004, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte **FZKA 7090** (2005)
- [Kla04] H. V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Phys. Lett. **B586** (2004) 198 - 212
- [Kla97] H. V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber, Teilchenastrophysik, Teubner Verlag 1997
- [Kra05] Ch. Kraus et al. (Mainzer Neutrinomassenexperiment), hep-ex/0412056
- [Kru83] P. Kruit, F.H. Read, J. Phys. E16, 313 (1983)
- [Lob03] V.M. Lobashev et al., Nucl. Phys A 719, 157c (2003)
- [Mue02] B. Müller, Diplomarbeit, Inst. f. Physik, Universität Mainz, 2002
- [Ost08] B. Ostrick, Dissertation an der WWU Münster, voraussichtlich 2008
- [Pau61] W. Pauli in: Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie, p.156, Hrsg. W. Westphal, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1961
- [PDG04] S. Eidelman et al. (Particle Data Group), Phys. Lett. **B592** (2004) Issues 1 - 4
- [Pra09] M. Prall, Dissertation an der WWU Münster, voraussichtlich 2009
- [Rei56] F. Reines, C.L. Cowan: Nature **178** (1956) 446;532(erratum); C.L. Cowan et al: Science **124** (1956)103
- [Rei59] F. Reines, C.L. Cowan: Phys.Rev. **113** (1959) 273
- [Rel04] Ch.G. Relf, Image Aquisition and Processing with LabVIEW, CRC Press, 2004

- [Rht07] M. Reinhardt, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, September 2007
- [Rob88] R.G.H. Robertson, D.A. Knapp, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **38**(1988) 185
- [Sch97] N. Schmitz, *Neutrino Physik*, Teuber Verlag 1997
- [Stu07] M. Sturm, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik, Uni Karlsruhe, 2007
- [Tem07] K. Temming, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, Februar 2007
- [Thu07] T. Thümmeler, Dissertation an der WWU Münster, Sommer 2007
- [Toa06] P.A. Toale (IceCube Collaboration), [astro-ph/0607003](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0607003)
- [Val04] K. Valerius, Diplomarbeit an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Dezember 2004
- [Val08] K. Valerius, Dissertation an der WWU Münster, voraussichtlich 2008
- [Wik1] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Reinraum>
- [Wik2] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Nyquist-Shannon-Abtasttheorem>
- [Wik3] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelter_Betazerfall
- [Wol07] J. Wolf, Vacuum Performance of the Main Spectrometer, Katrin Doc. No.: 95-TRP-4302-S1, 08.10.2007
- [Zac08] M. Zacher, Diplomarbeit am Institut für Kernphysik der WWU Münster, voraussichtlich 2008
- [Zub04] K. Zuber, *Neutrino Physics*, Institut of Physics Publishing, 2004

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, herzlich danken.

In erster Linie möchte ich Herrn Prof. Dr. Ch. Weinheimer danken, der mir diese interessante und herausfordernde Diplomarbeit übertragen hat. Zudem hat er mir ermöglicht, an der Astroteilchenschule in Obertrubach teilzunehmen und meine Arbeit auf dem KATRIN-Kollaborationsmeeting und der DPG Frühjahrstagung vorzustellen.

Besonders möchte ich mich bei Dr. Volker Hannen für seine Unterstützung bedanken. Er war bei Problemen und Fragen jederzeit ansprechbar, hat mir in vielen Diskussionen zum Abschluss der Arbeit mit seinen Ratschlägen sehr geholfen und mir oft wertvolle Tipps zur Darstellung der Ergebnisse meiner Arbeit gegeben.

Dipl.-Ing. Hans-Werner Ortjohann danke ich für seine Unterstützung in allen technischen Belangen. Er hat bei allen auftretenden Problemen sofort geholfen und hatte immer sehr gute Ideen für die praktische Umsetzung der Problemstellungen. Aus seinem reichhaltigen Erfahrungsschatz, besonders was die elegante Lösung von technischen Belangen angeht, konnte ich viel lernen.

Matthias Prall danke ich für die gute und konstruktive Zusammenarbeit bei der Automatisierung der Messmaschine und für seine Hilfe bei physikalischen Fragestellungen. Ich denke, dass wir uns bei der Entwicklung der Qualitätskontrolle und der Arbeit im Reinraum gut ergänzt haben.

Mein Dank gilt ebenfalls den Mitarbeitern der elektrischen Werkstatt, im besonderen Roland Berendes für die Entwicklung der Ausselelektronik für die Maschinenachsen. Christoph Ising und Pascal Sommer danke ich dafür, dass sie geduldig die immer neuen Anfragen nach speziellem Kabelwerk für die Messmaschine bearbeitet haben.

Des weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeitern der feinmechanischen Werkstatt für die schnelle und präzise Anfertigung aller benötigten Bauteile.

Neben Matthias Prall danke ich zudem Björn Hillen und Martina Reinhardt für die gute, konstruktive und freundschaftliche Stimmung, die während der gesamten Zeit in unserem Büro geherrscht hat, für die Diskussion vieler Fragen und den Erhalt vieler Antworten.

Außerdem danke ich allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe von Prof. Weinheimer für die lockere aber disziplinierte Arbeitsatmosphäre, die aufheiternden Gespräche am Mittagstisch, die Hilfe bei Computerproblemen und anderen Schwierigkeiten.

Mein größter Dank gilt jedoch dir, liebste Margarete, für deine Zuversicht und Geduld. Du hast mich aufgemuntert und gestützt, hast mir zugehört, wenn ich von Graphen und Messungen erzählt habe. Du hast mir Ruhe gegeben, wenn ich aufgewühlt war und hast den Stress mit mir getragen. Dein Rückhalt hat mir Kraft gegeben. Ich danke dir.