

Aufbau und Funktionstest des CKrS-Positionssystems für das KATRIN-Experiment

als Masterarbeit vorgelegt von Phillip Schindler

Institut für Kernphysik
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Wilhelm-Klemm-Str. 9
48149 Münster

13. September 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Der Beginn der Neutrinophysik	3
1.2	Erster Neutrinonachweis	4
1.3	Neutrinos im Standardmodell der Teilchenphysik	5
1.4	Neutrinoquellen	6
1.5	Neutrinooszillation	8
1.5.1	Experimente zur Neutrinooszillation	10
1.6	Aufbau der Arbeit	14
2	Das KATRIN-Experiment	17
2.1	Übersicht	17
2.2	Tritium Beta-Zerfall	18
2.3	Die fensterlose gasförmige Tritiumquelle	20
2.4	Transportsektion	21
2.5	Spektrometersektion	23
2.5.1	MAC-E-Filter	24
2.5.2	Die Spektrometer	27
2.5.2.1	Das Vorspektrometer	27
2.5.2.2	Das Hauptspektrometer	28
2.6	Detektor	28
3	Die kondensierte Kryptonquelle	31
3.1	Konversionselektronen des Krypton-Zerfalls	33
3.2	Aufbau	34
3.2.1	Das Gassystem	36
3.2.2	Das Kryosystem	37
3.2.3	Der Optikaufbau	38
3.2.4	Das Motorsystem	42

4	Das Positionssystem der CKrS	43
4.1	Hardware-Komponenten	43
4.1.1	Motoren und Positioniermodule	44
4.1.2	Komponenten des PXI-Systems	46
4.1.3	Schaltersysteme und Positionsauslesen	47
4.2	Software	53
4.2.1	Benutzeroberflächen	54
4.2.1.1	Die Antastfahrt	54
4.2.1.2	Programm zur Detektorpixel-Anfahrt	58
4.2.1.3	Das Test-Programm	64
4.2.2	Umrechnung von Pixelpositionen zu Zielpositionen	64
4.2.3	Struktur der Programme und Sub-VIs	68
4.2.4	Funktionstest	74
5	Abschätzung der Elektronenrate im ^{83m}Kr-Betrieb	79
5.1	Diskussion der Ergebnisse	83
6	Zusammenfassung und Ausblick	85

1 Einleitung

1.1 Der Beginn der Neutrinophysik

Im Jahr 1896 entdeckte A.-H. Becquerel die Radioaktivität. Dies war der Start für eine Vielzahl von Experimenten um die Struktur von Atomen und Atomkernen genauer zu untersuchen. Die dabei beobachteten Strahlungsarten wurden α -, β - und γ -Strahlung genannt, wobei α -Strahlung als Emission von Heliumkernen, β -Strahlung als Elektronenstrom und γ -Strahlung als hochenergetische elektromagnetische Strahlung identifiziert wurde.

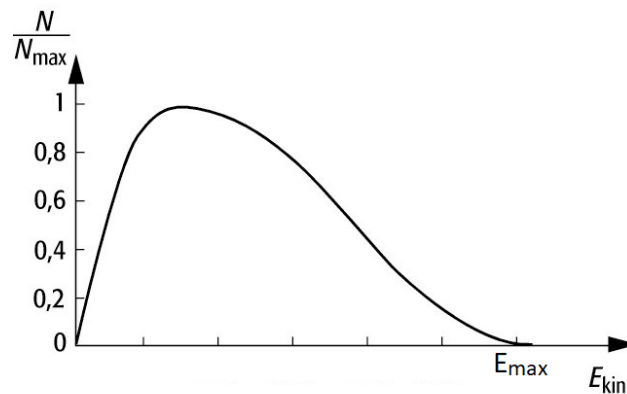


Abbildung 1.1: Skizze des kontinuierlichen β -Zerfall-Spektrums.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen β -Strahlung und den anderen beiden Strahlungsarten war das beobachtete Energiespektrum, das beim β -Zerfall kontinuierlich (siehe Abbildung 1.1), beim α - und γ -Zerfall aber diskret ist. Das kontinuierliche Spektrum schien die bestehenden Erhaltungssätze für Energie und Drehimpuls zu verletzen, da der β -Zerfall als ein Zweikörperzerfall angenommen wurde. Um die Erhaltungssätze zu retten postulierte Wolfgang Pauli 1930 erstmals ein hypothetisches Teilchen, das Neutrino, das zusätzlich zum Elektron emittiert wird. Dieses Teilchen sollte einen Teil der Zerfallsenergie tragen und wurde als masselos angesehen. Dadurch, dass Neutrinos ausschließlich über die schwache Wechselwirkung interagieren, konnten sie mit den damals verwendeten Detektoren nicht nachgewiesen werden.

Das Neutrino findet seine erste schriftliche Erwähnung als elektrisch neutrales Spin-1/2-Teilchen in einem Brief von Pauli an H. Geiger und L. Meitner am 4. Dezember 1930. Für das damals noch als „Neutron“ bezeichnete Teilchen wurde nach der Entdeckung des heute bekannten Neutrons (1932 durch Chadwick) der Name Neutrino von E. Fermi eingeführt. Der β^- -Zerfall konnte dann von Fermi wie folgt beschrieben werden:

$$B(A, Z) \rightarrow C(A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (1.1)$$

Der ursprüngliche Kern B mit A Nukleonen und Z Protonen (dementsprechend $A - Z$ Neutronen) zerfällt in einen Tochterkern C mit $Z+1$ Protonen. Auf Nukleonenebene lässt sich die Erhöhung der Protonenzahl erklären, da ein im Mutterkern gebundenes Neutron sich unter Aussendung eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos in ein Proton umwandelt:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.2)$$

1.2 Erster Neutrinonachweis

Bis zum experimentellen Nachweis des Neutrinos vergingen noch ca. 25 Jahre, ehe dieser durch Reines und Cowan im Jahre 1956 erbracht werden konnte. Sie nutzten Kernreaktoren also Neutrinoquelle. Die Spaltprodukte in den Reaktoren sind wegen ihres Neutronenüberschusses allesamt β^- -Strahler und emittieren dadurch $\bar{\nu}_e$. Die Antineutrinos wurden dann im „inversen β -Zerfall“ über die Reaktion

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (1.3)$$

nachgewiesen. Der Detektor, der zum Nachweis der Reaktion benutzt wurde bestand aus einem Behälter gefüllt mit in Wasser gelöstem Kadmium-Chlorid. Der Behälter wurde zwischen zwei Szintillatoren gebracht, die mit Photomultipliern versehen wurden. Die Reaktion findet an einem Proton der Wasserlösung statt. Das entstandene Positron wird gebremst und annihiliert mit einem Elektron seiner Umgebung unter Aussendung zweier Photonen derselben Energie ($e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$, mit $E_\gamma = 511 \text{ keV}$). Das bei der Reaktion entstandene Neutron wird durch Stöße mit den Wasserstoffkernen auf einer Zeitskala von einigen Mikrosekunden auf niedrige kinetische Energien gebremst (thermische Neutronen) und dann von einem Cadmiumkern eingefangen, was zu folgender Reaktion führt:

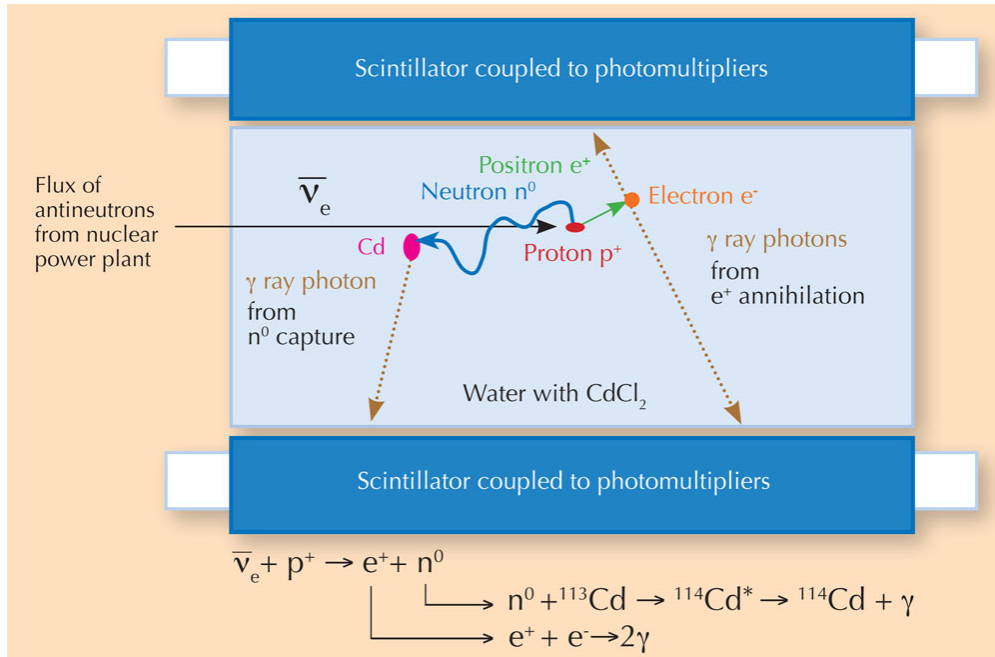


Abbildung 1.2: Aufbau des Experiments von Cowan und Reines zum Nachweis von Elektron-Antineutrinos. Die Antineutrinos reagieren mit Protonen einer wässrigen Lösung gemäß des inversen β -Zerfalls. Die entstandenen Positronen annihilieren mit den Elektronen der Umgebung, während die Neutronen nach einiger Zeit von Cadmiumkernen aufgenommen werden. Die dadurch angeregten Cadmiumkerne regen sich durch Emission eines Photons ab. Die beiden Nachweis-Reaktionsgleichungen sind im unteren Teil des Bildes noch einmal gezeigt [iS17].

$$n + {}^{108}\text{Cd} \rightarrow {}^{109m}\text{Cd} \rightarrow {}^{109}\text{Cd} + \gamma. \quad (1.4)$$

Der Nachweis für die Reaktion von Elektron-Antineutrinos mit Protonen bestand demnach aus zwei koinzidenten Photonensignalen der Elektron-Positron-Annihilation und eines um einige Mikrosekunden verzögerten Signals der Cadmiumrelaxation.

1.3 Neutrinos im Standardmodell der Teilchenphysik

Im Standardmodell der Teilchenphysik werden die heute bekannten Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen beschrieben. Es unterscheidet zwischen 12 Fermionen (halbzahliger Spin), den Leptonen und Quarks¹, und 13 Bosonen (ganzzahliger Spin) als Austauscheteilchen der unterschiedlichen Wechselwirkungen. Neben der elektromagnetischen Wechselwirkung, deren Austauscheteilchen das Photon ist, existiert noch die schwache Wechselwirkung die über

¹jedes der 12 Fermionen besitzt noch ein Antiteilchen der gleichen Masse und des gleichen Spins, aber der entgegengesetzten elektrischen Ladung und magnetischem Moment

das W^{+-} , das W^- und das Z -Boson übertragen wird und die starke Wechselwirkung mit 8 Gluonen. Ein weiteres Austauscheteilchen zeichnet sich für die Masse der Elementarteilchen verantwortlich und wird, nach dem britischen Physiker Peter Higgs, Higgs-Boson genannt. Die Existenz des Higgs-Boson wurde erst im Juli 2012 von der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN bewiesen.

Die Fermionen, aus denen sich die sichtbare Materie des Universums zusammen setzt, werden im Standardmodell in 3 Familien ihrer Masse entsprechend eingeteilt und kommen innerhalb der Familie (Generation) als Dublett vor. Es existieren sechs unterschiedliche Quarks (1 Quarkdublett pro Generation), die die elementaren Bestandteile der Hadronen bilden. Somit setzen sich auch die Bausteine der Atome, das Neutron und das Proton, aus diesen Quarks zusammen. Das Elektron, das Myon und das Tau bilden mit ihren jeweiligen Neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) die drei übrigen Dublette der Fermionen, wobei die Neutrinos zunächst als masselos angesehen wurden.

Einen Nachweis, dass Neutrinos jedoch eine endliche Masse besitzen, lieferte der Beweis der Existenz von Neutrinooszillation durch verschiedene Experimente (siehe 1.5.1). Die

Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson	
Leptonen					Eichbosonen

Abbildung 1.3: Übersicht der Elementarteilchen des Standardmodells eingeteilt in 3 Familien. Dargestellt sind neben den sechs Fermionen-Dubletts (3 Quark-Dubletts (lila) und Elektron, Myon und Tau als Dublett mit dem zugehörigen Neutrino (grün)) auch die Austauschteilchen der elektromagnetischen-, schwachen und starken Wechselwirkung (rot) inklusive des Higgs-Bosons (gelb) [SdT17].

eigentliche Masse eines Neutrinos konnte bis heute noch nicht bestimmt werden.

1.4 Neutrinoquellen

Kernreaktoren, wie sie von Reines und Cowan für den ersten Neutrinonachweis verwendet wurden, sind eine **künstliche Quelle**, also von Menschenhand erbaut, zur Erzeugung von Neutrinos. Neutrinos aus Kernreaktoren bilden auch gleich den größten Anteil der künstlich erzeugten Neutrinos. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Elektron-Antineutrinos, die beim β^- -Zerfall der neutronenreichen Spaltprodukte im Kernreaktor entstehen.

Eine weitere künstliche Neutrinoquelle sind Teilchenbeschleuniger. In einem Protonsynchrotron können Kaonen und Pionen (K^\pm, π^\pm) durch den Beschuss fixer Targets mit hochenergetischen Protonen entstehen. Beim Zerfall dieser instabilen Hadronen werden sowohl Myon-Neutrinos, als auch Myon-Antineutrinos über folgende Reaktionen erzeugt:

$$\begin{aligned} K^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^-, & K^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \\ K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & K^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \end{aligned}$$

Neben der höheren kinetischen Energie (Rektoren: $E_{\text{kin},\nu} < 10 \text{ MeV}$, Beschleuniger: $E_{\text{kin},\nu} < 300 \text{ GeV}$) liegt ein weiterer Vorteil darin, dass in Beschleunigern gerichtete Myon-Neutrinobeziehungsweise Myon-Antineutrino-Strahlen erzeugt werden können.

Zusätzlich zu den Künstlichen gibt es **natürliche Neutrinoquellen**, die einen Großteil der Neutrinos, die auf der Erde registriert werden können, erzeugen. Neben den Geoneutrinos, die durch natürliche β -Strahler auf der Erde (zum Beispiel ^{238}U) erzeugt werden, gibt es verschiedene extraterrestrische Quellen:

- **Kosmologische Neutrinos** sind die „Restneutrinos“ aus dem thermodynamischen Gleichgewicht des Universums nach dem Urknall. Durch die Abkühlung des Universums sind diese Neutrinos niederenergetisch und konnten bisher nur durch indirekte Hinweise vorausgesagt, aber noch nicht direkt nachgewiesen werden.

- Neutrinos aus **Supernovae** entstehen während des Gravitationskollaps eines massereichen Sterns durch die Reaktion $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$. Bei einer Typ-II-Supernova entstehen so bis zu 10^{57} Elektron-Neutrinos.

Im Februar 1987 wurden erstmalig und einzigartig bis heute Neutrinos einer Supernova detektiert. Bei der Sternexplosion SN1987A wurden von verschiedenen Neutrino-detektoren, unter anderem durch das Kamiokande-Experiment (siehe Kapitel 1.5.1), Neutrinoereignisse nachgewiesen, bevor das sichtbare Licht der Supernova die Erde erreichte.

- **Solare Neutrinos** entstehen während der Kernfusionsprozesse in der Sonne. Die Summenreaktion bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium (pp-Fusionskette) lautet

$$4p \rightarrow He^4 + 2e^+ + 2\nu_e. \quad (1.5)$$

In der Sonne werden also nur Elektron-Neutrinos erzeugt, die wegen ihres kleinen Wirkungsquerschnittes die Sonne nahezu ungehindert verlassen können. Aufgrund ihrer geringen Energie im unteren MeV Bereich und der großen Distanz zwischen Sonne und Erde ($\approx 1,5 \cdot 10^8$ km) eignen sich solare Neutrinos zur Untersuchung der Neutrinooszillation im Vakuum, die sowohl von der zurückgelegten Wegstrecke, als auch invers von der Energie der Neutrinos abhängt (siehe Kapitel 1.5).

- Bei der Wechselwirkung von kosmischer Strahlung² mit Atomkernen (A) der oberen Erdatmosphäre entstehen Kaskaden von Kaonen und Pionen, ähnlich wie bei den Teilchenbeschleunigern. Während des Zerfalls in Myonen und dem Myonenzerfall in Elektronen beziehungsweise Positronen entstehen sowohl Elektron- als auch Myon-Neutrinos und Antineutrinos. Diese werden basierend auf dem Entstehungsort **atmosphärische Neutrinos** genannt.

$$\begin{aligned}
 p + A &\rightarrow \pi^\pm, K^\pm, \dots \\
 \pi^+, K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^-, K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\
 \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Der Energiebereich von atmosphärischen Neutrinos liegt zwischen 10^2 MeV und 10^6 GeV.

1.5 Neutrinooszillation

Der Beweis, dass Neutrinos Masse besitzen konnte in den letzten Jahren durch verschiedene unabhängige Experimente gebracht werden, indem sie Neutrinooszillation beobachteten. Die Theorie zur Neutrinooszillation, die von Bruno Pontecorvo im Jahre 1957 aufgestellt wurde, machte zwei Voraussetzungen notwendig [Sch97]:

1. Die Flavoureigenzustände $|\nu_\alpha\rangle$ mit $\alpha = e, \mu, \tau$ sind nicht die Eigenzustände $|\nu_i\rangle$ des Masseoperators M mit $i = 1, 2, 3$. Sie sind vielmehr eine Superposition der Masseneigenzustände, verknüpft über eine unitäre 3x3-Mischungsmatrix U

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \tag{1.7}$$

²ungefähre Zusammensetzung: 85% Protonen, 12% α -Teilchen, Rest aus Elektronen, γ -Strahlung und Kohlenstoff

U ist dabei die Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix (PMNS-Matrix), in der die drei Mischungswinkel und eine CP-verletzende Phase berücksichtigt sind.

2. Die Masseneigenzustände unterscheiden sich in ihren Massen, somit ist mindestens einer der Zustände und somit eine Masse von null verschieden.

Im Folgenden wird die Herleitung zur Neutrinooszillation im Vakuum für den vereinfachten Fall von nur $n = 2$ existierenden Neutrino-Flavour (hier ν_a und ν_b , *Zwei-Flavour-Formalismus*) gezeigt. Die vollständige Herleitung für den Fall von 3 oder mehr existierenden Flavour kann beispielsweise in [Sch97] nachgeschlagen werden. In diesem Fall gibt es genau einen Mischungswinkel θ aus dem Intervall $[0, 2\pi]$ und eine Massendifferenz $\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$. Im Gegensatz zu $n > 2$ existierenden Flavour gibt es beim Zwei-Flavour-Formalismus keine CP-verletzende Phase. Die Transformation zwischen Flavour- und Massen-Eigenzuständen wird beschrieben durch:

$$\begin{pmatrix} \nu_a \\ \nu_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}. \quad (1.8)$$

Für die Wahrscheinlichkeit, dass kein Übergang stattgefunden hat erhält man

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_i) = 1 - 4 \cos^2(\theta) \sin^2(\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta}{2}\right) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (1.9)$$

und analog dazu für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Übergang stattgefunden hat

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta}{2}\right) = 1 - P(\nu_i \rightarrow \nu_i) \quad (1.10)$$

mit $i, j = a, b$ für $i \neq j$ und $\Delta = \frac{\delta m^2}{2} \cdot \frac{L}{E}$, wobei L die Länge der zurückgelegten Strecke und E die Energie des Neutrinos ist. Es wird deutlich, dass Neutrinooszillation nur auftreten kann, wenn sowohl der Mischungswinkel θ als Maß für die Oszillationsamplitude als auch die Massendifferenz δm^2 als Maß für die Oszillationsfrequenz ungleich 0 sind. Die Existenz der Neutrinooszillation führt also automatisch zu dem Schluss, dass mindestens ein Neutrino massebehaftet ist. Da in diese Berechnungen allerdings nur die Massendifferenz eingeht, liefern Experimente zur Neutrinooszillation keine Ergebnisse über die absolute Masse eines Neutrinos.

1.5.1 Experimente zur Neutrinooszillation

Eines der ersten Experimente, das Hinweise auf Neutrinooszillationen lieferte, war das **Homestake-Experiment** einer Forschungsgruppe aus Brookhaven um *R. Davis* in der Homestake Goldmine in South Dakota. In die Mine wurde ein zylindrischer Tank gebaut und mit 615 t Tetrachlorethylen (C_2Cl_4) gefüllt. Die Neutrinos werden über die radiochemische Reaktion



detektiert, indem man nach einer gewissen Messdauer das entstandene Argon aus dem Detektor spült und die Anzahl der Ar^{37} -Atome anhand der Zerfallsrate, da es sich bei Ar^{37} um ein instabiles Isotop handelt, bestimmt. Die Reaktion in 1.11 hat eine Schwellenenergie von $E_S = 814 \text{ keV}$ und ist somit überwiegend sensitiv für Be^7 - und B^8 -Neutrinos aus der Sonne [Sch97]. Zwischen 1970 und 1994 wurde in insgesamt 108 Messläufen auf diese Art der Neutrinofluss der Sonne untersucht und im Mittel ein Fluss von

$$R_{exp} = (2,56 \pm 0,22) \text{ SNU}^3 \quad (1.12)$$

gemessen. Dieses Ergebnis weicht deutlich von dem vorhergesagten Wert des bis dahin als korrekt angesehenen Standard-Sonnenmodell (SSM) ab. Laut des SSM ist ein Wert von

$$R_{SSM} = (8,0 \pm 3,0) \text{ SNU} \quad (1.13)$$

zu erwarten. Dieses Neutrinodefizit wurde als das „Problem der solaren Neutrinos“ oder auch „solares Neutrinodefizit“ bekannt. Theorien zur Lösung des Problems gingen damals von der Annahme eines fehlerhaften Experiments, bis hin zu Zweifeln am SSM. Auch die Neutrinooszillation wurde als Grund für das Defizit an ν_e in die Überlegungen eingebunden, allerdings konnte man mit dem Homestake-Aufbau konzeptionell keine ν_μ oder ν_τ nachweisen (siehe Reaktion 1.11), sodass diese Theorie nicht überprüft werden konnte.

Neben den solaren Neutrinos wurden zu dieser Zeit auch Experimente zur Untersuchung atmosphärischer Neutrinos errichtet. Da diese Experimente sensitiv für $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu$ und $\bar{\nu}_\mu$ sein sollten nutzte man Kalorimeter oder einen Wasser-Cherenkov-Detektor zur Detektion von Neutrinoereignissen. Letzterer wurde zum Beispiel beim **Kamiokande** beziehungsweise dem Nachfolge-Experiment **Super-Kamiokande** verwendet. Signale in dem Detektor, der

³1 SNU (solar neutrino unit) entspricht 10^{-36} Neutrinoeinfänge pro Atom und Sekunde

mit 3000 t (Kamiokande) beziehungsweise 50000 t (Super-Kamiokande) hochreinem Wasser gefüllt ist, werden durch die Reaktionen

$$\begin{aligned}\nu_e + n &\rightarrow e^- + p & \nu_\mu + n &\rightarrow \mu^- + p \\ \bar{\nu}_e + p &\rightarrow e^+ + n & \bar{\nu}_\mu + p &\rightarrow \mu^+ + n\end{aligned}\tag{1.14}$$

erzeugt. Hierbei emittieren die erzeugten Elektronen und Myonen wegen ihrer hohen Geschwindigkeit Cherenkov-Strahlung, die von den Photomultipliern an der Innenwand des Detektortanks registriert wird. Aufgrund der verschiedenen Wirkungsquerschnitte von e^\pm und μ^\pm können die Signale unterschieden werden, da die e^\pm einen elektromagnetischen Schauer, dementsprechend ein ausgeschmiertes Signal erzeugen, die μ^\pm sich im Detektor dagegen nahezu wechselwirkungsfrei bewegen und somit ein scharfes Signal liefern. Zur Abschirmung gegen atmosphärische, nicht zerfallene Myonen musste auch dieses Experiment tief unter der Erde errichtet werden.

Wie beim Homestake-Experiment stimmte auch bei den Experimenten mit atmosphärischen Neutrinos das Ergebnis nicht mit den Erwartungen überein. Die Reaktionen aus 1.6 lassen ein Verhältnis zwischen erzeugten $\nu_e/\bar{\nu}_e$ und $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ von

$$r = \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \approx 2\tag{1.15}$$

vermuten. Das Ergebnis des Kamiokande-Experiments lieferte allerdings ein kleineres Verhältnis mit einer Abweichung von

$$R = \frac{(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{gemessen}}}{(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{simuliert}}} = 0,60 \pm 0,06 \pm 0,05.\tag{1.16}$$

Auch hier wurden demnach weniger Neutrinos eines bestimmten Flavours gemessen als durch Simulationen vorhergesagt, sodass von der „atmosphärischen Neutrino-Anomalie“ gesprochen wurde. Diese wäre erneut durch Neutrinooszillation zu erklären.

Das erste Experiment, das sensitiv auf den gesamten solaren Neutrinofluss war und somit das Problem der solaren Neutrinos lösen konnte wurde durch die SNO-Kollaboration (Sudbury Neutrino Observatory) errichtet und konnte während verschiedener Messphasen zwischen 1999 und 2006 Neutrinooszillation nachweisen. Das Experiment nutzt einen Wasser-Cherenkov-Detektor. Ein mit 1000 Tonnen schwerem Wasser (D_2O) gefüllter Tank befindet

sich rund 2000 m unter der Erde in einer Mine in Kanada. Um den Tank noch besser vor Myonen der kosmischen Strahlung zu schützen und vor mechanischen Störungen zu bewahren befindet sich der Detektortank in einem Becken, das mit normalem Wasser gefüllt ist. Die Detektion erfolgt durch insgesamt 9456 Photomultiplier und kann je nach Signalart einem der drei folgenden Prozesse zugeordnet werden:

1. Wird ein ν_e von einem Neutron eines Deuteronkerns absorbiert wandelt sich dieses Neutron unter Emission eines Elektrons in ein Proton. Dies erfolgt über ein geladenes W-Boson, sodass man von einer **CC-Reaktion** (charged current reaction) spricht. Durch die kleinere Masse des Elektrons gegenüber dem Proton erhält dieses den Großteil der Energie und kann durch die Abstrahlung von Cherenkov-Licht detektiert werden. Dieser Vorgang ist nur für Elektronenneutrinos möglich, da solare Neutrinos weniger Energie besitzen, als die Ruhemassen eines μ oder τ .



2. Es ist einem Neutrino durch Streuprozesse möglich, einen Deuteronkern in seine Einzelteile aufzuspalten. Das Neutrino selbst verlässt danach den Detektor, das frei gewordene Neutron kann jedoch von einem weiteren Deuteronkern eingefangen werden. Bei diesem Neutroneneinfang wird eine Gammastrahlung mit $E_\gamma = 6,25 \text{ MeV}$ emittiert und kann detektiert werden. Bei dem Streuprozess, welcher über den Austausch eines neutralen Z-Bosons stattfindet, spielt es keine Rolle, welchen Flavour das Neutrino trägt. Man spricht von einer **NC-Reaktion** (neutral current reaction). Diese Reaktion ist demnach sensitiv auf alle drei Neutrino-Flavours ($\alpha = e, \mu, \tau$).



3. Der letzte Prozess, der im Detektorinneren stattfinden kann, ist die elastische Streuung eines Neutrinos an einem Elektron (**ES-Reaktion**, elastic scattering). Durch den Energieübertrag von dem Neutrino an das Elektron emittiert dieses erneut Cherenkov-Strahlung. Dieser Vorgang ist prinzipiell unabhängig von dem Neutrino-Flavour, auch wenn der Prozess mit einem Faktor 6 von den ν_e dominiert wird.



Das Ergebnis des Experiments konnte durch die Betrachtung der verschiedenen Anteile von Elektroneneutrino-, Myoneneutrino- und Taueneutrino-Ereignissen und deren Addition zu einem Gesamtfluss den erwarteten Neutrinofluss nach dem SSM bestätigen (siehe Abbildung 1.4). Die fehlenden Elektroneneutrinos des Homestake-Experiments (und weiterer darauffolgender Experimente) sind seitdem durch die Flavour-Umwandlung durch Neutrinooszillation im Vakuum auf dem Weg von der Sonne zur Erde in Myon- und Taueneutrinos zu erklären.

Auch das Problem der atmosphärischen Neutrino-Anomalie konnte durch das Super-Kamiokande-Experiment gelöst werden. Der Nachfolger des Kamiokande-Experiments veröffentlichte 1998 als erste Kollaboration Ergebnisse, die die Oszillation von Neutrinos bewiesen.

Auch wenn durch den Beweis der Existenz von Neutrinooszillation bewiesen wurde, dass Neutrinos nicht masselos sind, konnte bis heute die genaue Masse eines Neutrinos nicht bestimmt werden. Verschiedene Experimente, beispielsweise in Mainz oder Troisk, konnten allerdings Obergrenzen für die Massen festlegen (siehe Kapitel 2). Eine Methode die genaue Masse zu bestimmen ist die kinematische Untersuchung des Energiespektrums von β -Strahlern. Die Ergebnisse liefern eine gewichtete Überlagerung der Masseneigenzustände für den untersuchten Neutrino-Flavour. Bezogen auf Elektroneneutrinos kann man also bei dem potentiellen Ergebnis dieser experimentellen Methode von einem gewichteten Mittelwert der Elektroneneutrinomasse sprechen

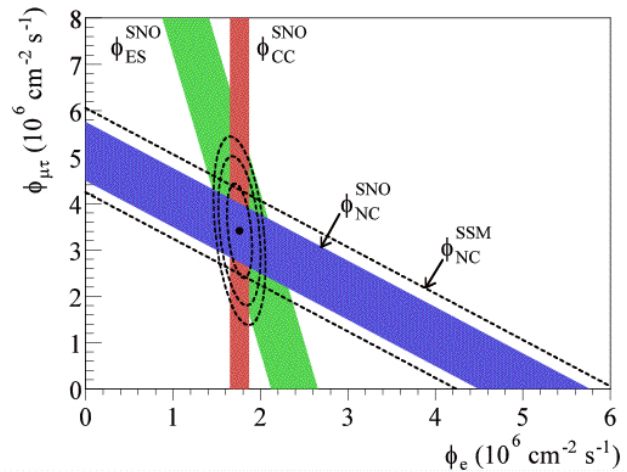


Abbildung 1.4: Ergebnis des SNO-Experiments. Aufgetragen ist der Elektron-Neutrino-Fluss Φ_e gegen den Myon- und Tau-Neutrino-Fluss $\Phi_{\mu\tau}$. Die einzelnen Flüsse werden anhand verschiedener Reaktionen bestimmt. Der Gesamtfluss aller Neutrinos stimmt mit den Vorhersagen des Standard-Sonnen-Modells überein, dabei trägt Φ_e zu einem Drittel zum Gesamtfluss bei [AA02].

$$m(\nu_e)^2 = \sum_i |U_{ei}^2| m(\nu_i)^2. \quad (1.20)$$

Das KATRIN-Experiment folgt genau dem Prinzip und hat als Ziel, anhand des Verlaufs des Spektrums beim Tritium- β -Zerfall im Bereich den Endpunktes die Masse des Elektron-Antineutrinos zu bestimmen, oder eine verbesserte Obergrenze für diese Masse zu liefern. Kapitel 2 beschäftigt sich mit diesem Experiment.

1.6 Aufbau der Arbeit

Die nachfolgende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines Positionssystems für die kondensierte Kryptonquelle (CKrS) des KATRIN-Experiments zur Bestimmung der Masse des Elektron-Antineutrinos. Die CKrS dient dem KATRIN-Experiment als Kalibrationsquelle zur Bestimmung der Transmissionsfunktion der Spektrometer. Hierfür werden Konversionselektronen des Zerfalls von $^{83m}\text{Krypton}$ genutzt. Um den gesamten Flussschlauch⁴ untersuchen zu können muss die Quelle in beiden Richtungen senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen bewegt werden können. Hierzu wird ein Positionssystem bestehend aus verschiedenen Hardware-Komponenten und einer Steuerungssoftware genutzt.

Nach dem Umbau der CKrS von der horizontalen in die vertikale Position in Münster, um die äußeren Bedingungen des KATRIN-Experiments zu simulieren, wurden die Hardware-Komponenten weiterentwickelt um den Anforderungen an die Motorsteuerung nach Einbindung in das KATRIN-Experiment zu entsprechen. Außerdem wurde erstmalig die zweite Bewegungsachse in Betrieb genommen.

Mit Hilfe des grafischen Programmiersystems *LabView 2013* wurde das Steuerungsprogramm geschrieben und sowohl Hardware als auch Software ist im Zuge dieser Arbeit auf Funktionalität getestet worden. Darüber hinaus wurde ein erstes Elektronenspektrum beim Betrieb der Quelle mit ^{83m}Kr in Münster aufgenommen und ausgewertet. Um die Ergebnisse zu präsentieren ist die Arbeit wie folgt aufgebaut:

- **Kapitel 1** gibt als Einführung in die Neutrinophysik einen Überblick über die Geschichte und die Eigenschaften der Neutrinos. Außerdem werden wichtige Neutrino-Experimente kurz vorgestellt.
- In **Kapitel 2** wird das KATRIN-Experiment vorgestellt. Dies umfasst sowohl das Messprinzip, als auch die einzelnen Komponenten des Experiments.
- In **Kapitel 3** werden zunächst kurz die Kalibrationsquellen des KATRIN-Experiments beschrieben, bevor dann detaillierter auf die kondensierte Kryptonquelle eingegangen wird. Das Funktionsprinzip ist in diesem Kapitel ebenso thematisiert, wie die einzelnen Sektionen, die die Funktionalität des Aufbaus sicherstellen sollen.
- **Kapitel 4** befasst sich zunächst mit den Hardware-Komponenten des Positionssystems. Neben den Motoren selbst, werden die Steuermodule, Schaltersysteme und Positionsauslesen vorgestellt. Als Bindeglied zwischen Anwender und Motoren wird die

⁴Die Magnetfelder, die die Elektronen in Richtung der Spektrometer und durch diese hindurch führen werden in dem Begriff Flussschlauch zusammengefasst.

genutzte PXI-Einheit gezeigt, die darüber hinaus auch für die Datenaufnahme zuständig ist. Die Vorstellung der Steuersoftware bildet den Abschluss dieses Kapitels, wobei auf die Struktur und die unterschiedlichen Funktionen der verschiedenen Programme eingegangen wird, aber auch Programm-Abläufe und Benutzeroberflächen detailliert beschrieben werden. Die Umrechnung von Motorbewegung in Bewegung des Substrats und damit der eigentlichen Elektronenquelle bildet den Abschluss des Kapitels.

- **Kapitel 5** beschäftigt sich mit der Auswertung des Elektronenspektrums, das bei Tests der Kryptonquelle mit radioaktivem Krypton in Münster aufgenommen wurden. Die Elektronenrate der Quelle soll hierbei bezogen auf die Aktivität des Ausgangsisotops ^{83}Rb bestimmt werden.
- Zum Abschluss werden in **Kapitel 6** die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein kleiner Ausblick auf die Inbetriebnahme der Kryptonquelle am KIT in Karlsruhe gegeben.

2 Das KATRIN-Experiment

2.1 Übersicht

Das **K**arlsruhe **T**ritium **N**eutrino Experiment (kurz: KATRIN-Experiment) dient zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse, genauer gesagt der Masse des Elektron-Antineutrinos. Hierzu wird das Spektrum des Tritium- β -Zerfalls nahe des Endpunkts bei 18,6 keV mit Hilfe eines Spektrometers vermessen. Aus dem Verlauf des Spektrums und seinem Endpunkt wird die Neutrinomasse bestimmt. Die Abhängigkeit des Verlaufs und des spektralen Endpunkts von der Neutrinomasse ermöglichen diese Methode, die schon in früheren Experimenten wie zum Beispiel beim „Troitsk Neutrinomassenexperiment“ oder beim „Mainzer Neutrinomassenexperiment“ angewandt wurde. Aufgrund der gestiegenen technischen Anforderungen, um die angestrebte Sensitivität zu erreichen, soll das KATRIN-Experiment die Resultate der Vorgängerexperimente um eine Größenordnung verbessern. Die aktuell gültige Obergrenze für die Elektron-Neutrinomasse beträgt

$$m(\nu_e) < 2.05 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.}) \quad \text{Troitsk}$$

$$m(\nu_e) < 2.3 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.}) \quad \text{Mainz}$$

Nach einer 5-jährigen Messphase, was einer effektiven Datenaufnahme von 3 Jahren entspricht, wird das KATRIN-Experiment die Obergrenze auf $m(\nu_e) < 0.02 \text{ eV}$ (90% C.L.) verringern, sofern keine endliche Masse beobachtet wurde.

Das Experiment befindet sich auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Auf dem selben Gelände befindet sich auch das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK), welches eine ausreichende Menge Tritium zur Verfügung stellt und dadurch maßgeblich zu der Wahl des Standorts beigetragen hat.

Der genaue Aufbau von KATRIN (vgl. Abbildung 2.1) soll in diesem Kapitel skizziert und die einzelnen Sektionen kurz erläutert werden.

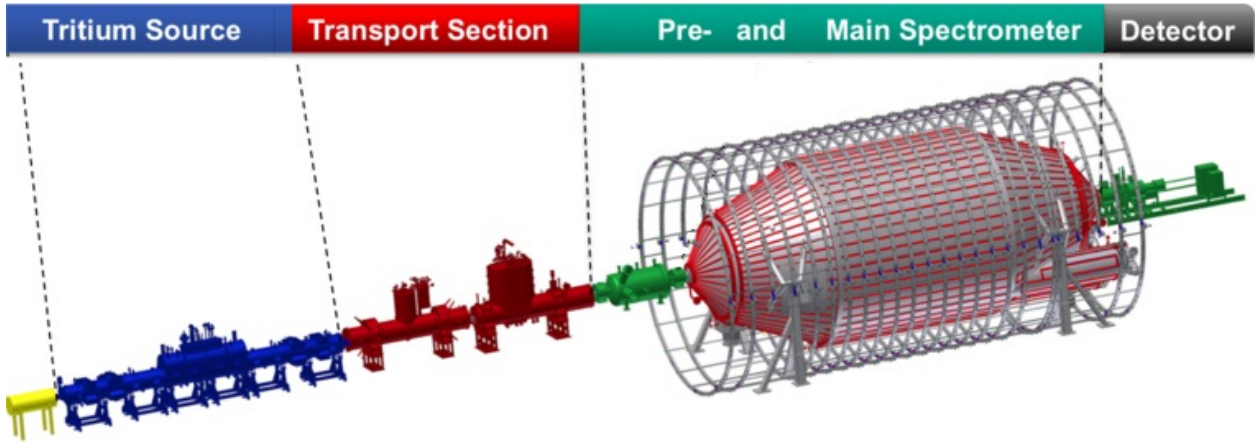


Abbildung 2.1: Übersicht des KATRIN-Experiments mit Einteilung in verschiedene Sektionen. Der radioaktive Zerfall von Tritium findet in der fensterlosen Tritiumquelle statt. Die emittierten Elektronen durchlaufen die Transportsektion und werden in dem Bereich des Vor- und Hauptspektrometers energetisch selektiert. Die transmittierten Elektronen werden dann am Detektor registriert [KAT17].

2.2 Tritium Beta-Zerfall

Das KATRIN-Experiment nutzt wie eingangs erwähnt den β^- -Zerfall von gasförmigen Tritium. Gemäß der Theorie des β^- -Zerfalls bleibt die Massenzahl bei diesem Zerfall konstant, während sich die Nukleonenzahl um eins erhöht.

$$(Z, A) \longrightarrow (Z, A + 1) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.1)$$

Tritium zerfällt unter Emission eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos in seinen Spiegelkern Helium-3. Dieser Vorgang ist in Abbildung 2.2 skizziert. Eines der beiden Neutronen (n) im Tritiumkern (T_2) wandelt sich in ein Proton (p), indem es ein Elektron (e^-) und ein Elektron-Antineutrino ($\bar{\nu}_e$) aussendet. Hierbei erhält der Tochterkern ${}^3\text{He}^+$ aufgrund seiner im Vergleich mit e^- und $\bar{\nu}_e$ großen Masse einen vernachlässigbar geringen Rückstoß-Impuls. Die gesamte Zerfallsenergie verteilt sich also auf das Elektron und das Neutrino.

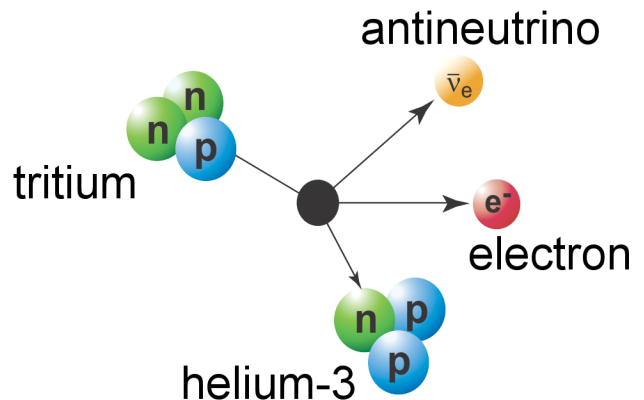


Abbildung 2.2: Der $T_2 - \beta$ -Zerfall. Ein Neutron wandelt sich in ein Proton und emittiert dabei ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino.



Das Energiespektrum der Elektronen ist kontinuierlich (siehe Abbildung 5.1 links) und lässt anhand seiner Form Rückschlüsse auf die Masse des Elektron-Antineutrinos zu. Der Verlauf des Spektrums kann durch Fermis Goldene Regel beschrieben werden. Demnach bestimmt das Kernmatrixelement M und die Phasenraumdichte $\rho(E)$ die Übergangsrate eines Zerfalls im Zeitintervall dt und dem Energieintervall $[E, E + dE]$

$$\frac{d^2 N}{dt dE} = \frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{2\pi}{\hbar} |M|^2 \rho(E). \quad (2.3)$$

Nach [Wei03] ergibt sich das β -Spektrum zu

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = R(E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2 c^4} \Theta(E_0 - E - m_\nu c^2) \quad (2.4)$$

mit

$$R(E) = \frac{G_F^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} \cos^2(\Theta_C) |M|^2 F(Z + 1, E) p(E + m_e c^2) (E_0 - E) \quad (2.5)$$

und

G_F	die Fermi-Kopplungskonstante,
Θ_C	der Cabbibo-Winkel,
M	das Kernmatrixelement des Zerfalls,
F	die Fermikonstante,
p	der Elektronimpuls,
E	die kinetische Energie des Elektrons,
E_0	Die Endpunktenergie des Spektrums,
$m_e c^2$	die Ruheenergie des Elektrons,
$m_\nu c^2$	die Ruheenergie des Elektron-Antineutrinos.

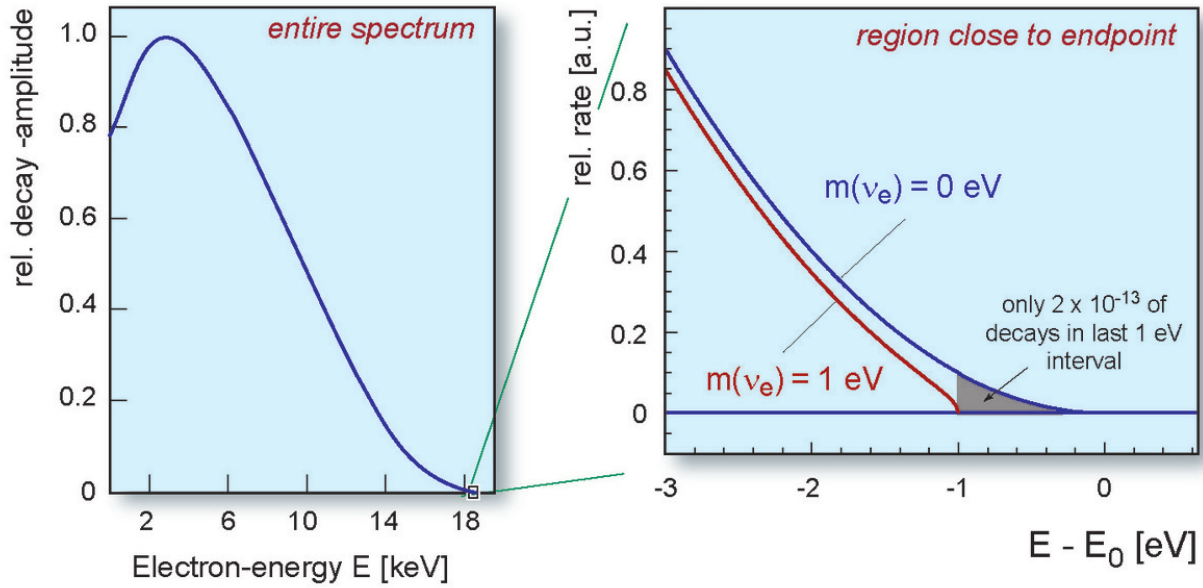


Abbildung 2.3: Bestimmung der Neutrinomasse aus dem β -Spektrum von Tritium. Der linke Graph zeigt das gesamte Spektrum des β -Zerfalls mit einem Endpunkt bei ungefähr $18571,8 \pm 1,2$ eV [OW08]. Der rechte Graph ist der vergrößerte Ausschnitt des Endpunktbereiches desselben Spektrums. Die zwei eingezeichneten Kurven simulieren den Verlauf für unterschiedliche Neutrinomassen. Hierbei entspricht die blaue Kurve dem Verlauf für masselose Neutrinos, die rote für Neutrinos mit einer Masse von 1 eV [KAT17].

Die Neutrinomasse hat durch den Term $\sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2 c^4}$ Einfluss auf die Form des Spektrums. Dieser Einfluss ist bei Elektronen im Endpunktbereich am größten. Da die Position von E_0 nicht ausreichend genau bekannt ist, wird der Verlauf des Spektrums nahe des Endpunktes durch eine Anpassung der experimentellen Daten mit den freien Parametern der Amplitude, des Endpunktes, des Untergrunds und der ν -Masse angepasst, um Letztere zu bestimmen. Der Einfluss verschiedener Werte für $m(\nu_e)$ auf das Spektrum ist in Abbildung 5.1 rechts gezeigt.

2.3 Die fensterlose gasförmige Tritiumquelle

Die Quellsektion besteht aus einem 10 m langen Rohr mit einem Durchmesser von ≈ 90 mm, der fensterlosen gasförmigen Tritiumquelle (windowless gaseous tritium source, WGTS). Tritiumsgas mit einer Isotopenreinheit von 95% wird auf eine Temperatur von 27 K gekühlt und über ein System von Kapillaren mittig in die WGTS injiziert. Über den Einlassdruck p_{in} lässt sich das Volumen bzw. die Quellsäulendichte der Injektion regulieren. Bei einem Einlassdruck

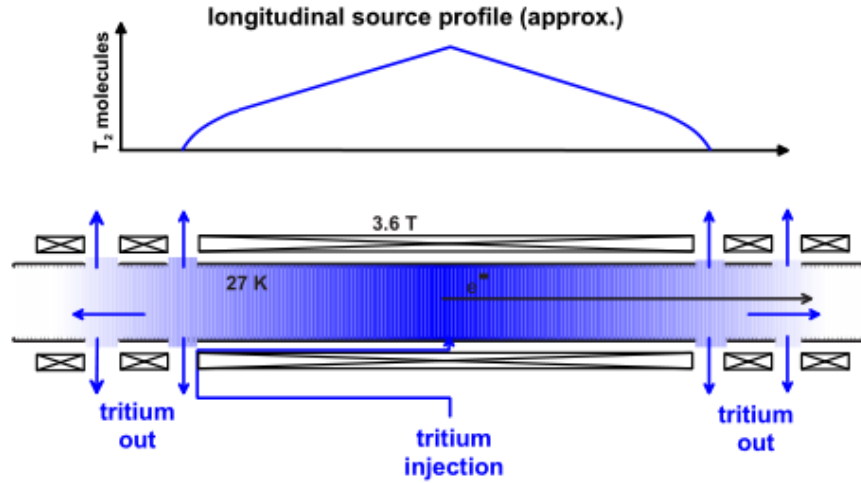


Abbildung 2.4: Oben: longitudinales Dichteprofil von Tritium innerhalb der WGTS. Unten: Schema der Tritiumgas Injektion in die WGTS und die erste differentielle Pumpstufe [KAT17].

von $p_{in} = 3,4 \cdot 10^{-3}$ mbar wird eine Referenzdichte ρd des Tritiumgases innerhalb der WGTS von $\rho d = 5 \cdot 10^{17}$ Moleküle/cm² erzeugt. Nach Einlass diffundieren die T_2 -Moleküle über eine Strecke von 5 m zu beiden Seiten, was zu einer nichtlinearen Dichteänderung des Quellgases führt (vergleiche Abbildung 2.4).

Die emittierten β -Elektronen des Tritiumzerfalls werden über ein Magnetfeld $B_{WGTS} = 3,6$ T adiabatisch zu beiden Enden des Rohres geführt. Die zu den Rohrenden diffundierten Moleküle werden abgepumpt und erneut in die WGTS geführt. Die Aufenthaltszeit eines T_2 -Moleküls innerhalb der WGTS liegt im Bereich von 1 s, wodurch sich eine Zerfallswahrscheinlichkeit von 10^{-9} pro Molekül ergibt. Insgesamt wird durch den Kreislauf des Tritiums und der Referenzdichte eine Rate von 10^{11} Elektronen/s erreicht.

Die größte Herausforderung an der WGTS ist die Qualität der Quellsäulendichte. Diese Dichte muss mit einer Genauigkeit von 0,1% bekannt sein. Um dies zu erreichen müssen sowohl die Temperatur in einem Bereich von 30 mK, als auch der Einlassdruck mit Hilfe eines Puffervolumens stabil gehalten werden.

2.4 Transportsektion

Die Transportsektion des KATRIN-Experiments dient dazu, die Elektronen des Tritium-Zerfalls zu den Spektrometern zu leiten und gleichzeitig zur Unterdrückung des Untergrunds durch Tritiummoleküle.

Sie besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Zunächst schließt sich direkt an die WGTS die

differentielle Pumpstrecke (Differential Pumping Section, DPS) an, gefolgt von der kryogenen Pumpstrecke (Cryogenic Pumping Section, CPS). Die Anforderungen an die Sensitivität des KATRIN-Experiments erfordern einen fensterlosen Übergang von Quell- zu Transportsektion, da unvorhersehbare Energieverluste der β -Elektronen beim Passieren einer mechanischen Trennung von Quelle und Flussschlauch die Folge wären. Durch diese Energieverluste wären die Voraussetzungen für den erfolgreichen Ablauf des Experiments nicht mehr gegeben. Mit Hilfe des fensterlosen Übergangs gelangen aber auch Tritiummoleküle und deren Zerfallsprodukte ungehindert in den Flussschlauch. Dies führt zu einem Anstieg des Untergrunds, der über die beiden oben erwähnten Pumpstrecken verringert werden soll.

Die DPS besteht aus 5 Rohren, die an 2 Übergängen um 20° aus der Hauptachse des Experiments verkippt sind, um den Flussschlauch kurzzeitig Parallel zu dieser Achse verlaufen zu lassen. Magnetfelder sorgen dafür, dass die Elektronen durch die DPS geleitet werden, wohingegen neutrale Atome und Moleküle von den Feldern nicht abgelenkt werden und gegen die inneren Rohrwände stoßen. Die neutralen Teilchen können dadurch an verschiedenen Stellen in der DPS durch insgesamt 5 Turbomolekularpumpen (TMP) mit einer Pumpleistung von mindestens 2000 l/s abgepumpt werden.

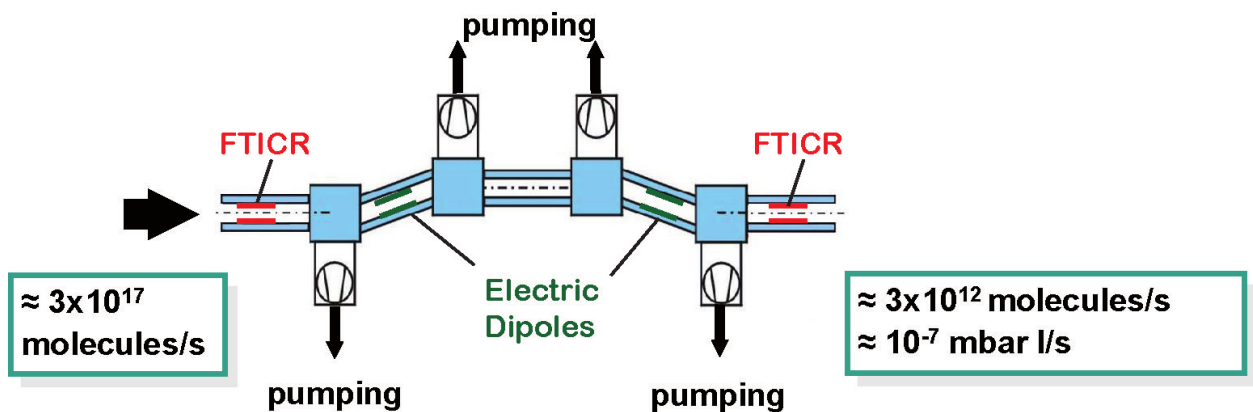


Abbildung 2.5: Die DPS: Durch Diffusionsprozesse gelangen außer den gewünschten Elektronen auch neutrale Tritiummoleküle und Ionen in die DPS. Die Elektronen werden durch Magnetfelder durch den Flussschlauch geleitet, während die neutralen Teilchen mit den Rohrwänden der DPS kollidieren und an vier Stellen abgepumpt werden. Zwei Dipolelektroden werden genutzt um positiv geladene Teilchen aus der DPS zu entfernen. Dies führt zu einer Reduzierung von unerwünschten Teilchen im Flussschlauch um einen Faktor von 10^5 [KAT17].

Ähnlich wie bei der DPS besteht auch die CPS aus verwinkelten Rohren. Dadurch wird zum einen verhindert, dass Tritium direkt in das Vorspektrometer diffundieren kann, zum anderen wird die Chance einer Kollision zwischen Tritiumatomen und den Rohrwänden erhöht. Das Strahlrohr der CPS wird auf eine Temperatur von 4,5 K gekühlt und im Inneren mit einer Goldschicht überzogen, auf der eine dünne Schicht Argonfrost aufgefroren wird. Dies führt dazu, dass Tritiumatome, die mit der Wand wie eben beschrieben kollidieren,

mit hoher Wahrscheinlichkeit über den Frost an der Wand adsorbieren. Ab einem gewissen Sättigungsgrad des adsorbierten Tritiums kann das System aufgeheizt werden, wodurch sich das Tritium von den Rohrwänden löst und von TMPs abgepumpt werden kann.

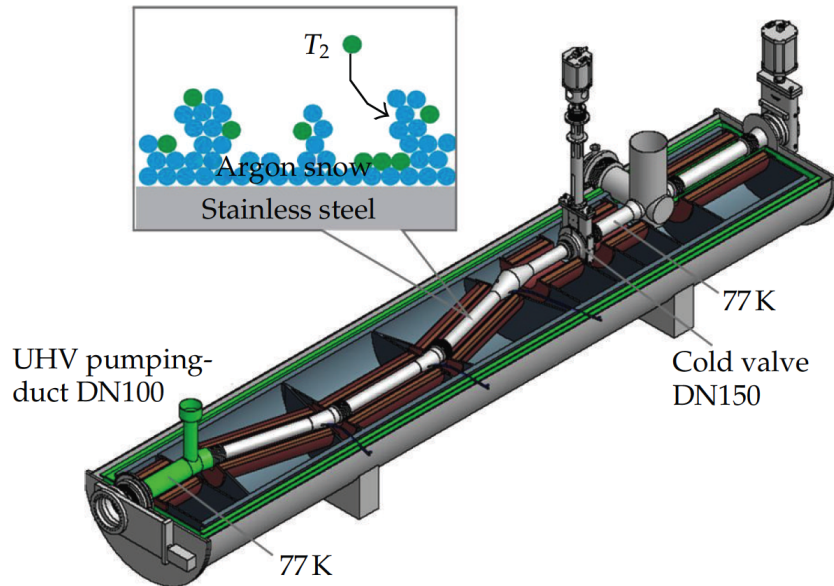


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der **CPS**. Bei einer Temperatur von 4,5 K wird Tritium an der mit Argonfrost bedeckten Oberfläche der CPS-Rohrwände adsorbiert, um zu verhindern, dass es in die Spektrometer gelangt. Am Ende der kombinierten Transportsektion aus DPS und CPS beträgt die Flussrate von Tritium nur noch etwa $10^{-14} \frac{\text{mbar l}}{\text{s}}$ [GD13].

Beide Sektionsteile dienen also zur Reduzierung des Tritiumuntergrundes innerhalb des Vor- und Hauptspektrometers. Dieser Untergrund muss unterhalb von 10^{-3} Signale/s liegen. Im Hauptspektrometer entspricht die maximale Zählrate einem Tritium-Partialdruck von etwa 10^{-20} mbar, was zu einer erlaubten Flussrate von $10^{-14} \frac{\text{mbar l}}{\text{s}}$ in das Vorspektrometer führt. Bei einer Einlass-Flussrate von 2 mbar l/s in die WGTS ist eine Verringerung zwischen dem Ausgang der WGTS und dem Eingang in das Vorspektrometer um einen Faktor von 10^{11} notwendig. Am Ende der Transportsektion kann durch die oben beschriebenen Effekte sogar eine Reduzierung um 10^{12} Molekülen/s erreicht werden.

2.5 Spektrometersektion

Die energetische Selektion der Elektronen geschieht in den beiden Spektrometern, die sich direkt an die kryogene Pumpsektion anschließen. Es handelt sich um ein **Vor-** und ein **Hauptspektrometer**, die Elektronen unterhalb einer einstellbaren Energie reflektieren und nur

Elektronen oberhalb dieser Grenze zum Detektor durchlassen. Hierbei arbeiten beide Spektrometer nach dem Prinzip eines MAC-E-Filters. Die Funktionsweise eines MAC-E-Filters soll im Folgenden kurz erläutert werden, bevor detaillierter auf die beiden Spektrometer eingegangen wird (2.5.2).

2.5.1 MAC-E-Filter

Die Idee für einen MAC-E-Filter (Magnetic Adiabatic Collimation and Electrostatic Filter) wurde 1980 von *J. Beamson et al.* vorgeschlagen. Hierbei handelt es sich um einen Hochpassfilter, dessen Grundgedanke auf einem elektrostatischen Spektrometer beruht.

Innerhalb des Spektrometers wird mit Hilfe von 2 supraleitenden Magneten, die sich an den beiden Öffnungen befinden, ein magnetisches Feld erzeugt. Aufgrund der Lorentzkraft $\vec{F}_L = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ bewegen sich die Elektronen auf Zyklotronbahnen entlang der Feldlinien durch das Spektrometer. Durch die Zyklotronbewegung lässt sich die kinetische Energie der Elektronen aufteilen in einen Anteil parallel zu den magnetischen Feldlinien und einen transversal zu diesen:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= E_{||} + E_{\perp} \\ &= E_{kin} \cos^2 \theta + E_{kin} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (2.6)$$

θ beschreibt den Winkel zwischen den magnetischen Feldlinien und dem Impuls des Elektrons. Die Funktionsweise eines MAC-E-Filters und das Verhalten des Elektronenimpulses ist in Abbildung 2.7 illustriert.

Aufgrund der Anordnung der beiden Magneten am Spektrometer Ein- beziehungsweise Ausgang wird das Magnetfeld kleiner, je weiter sich ein Elektron der Spektrometermitte nähert. Es erfährt also zunächst eine Abnahme und ab der Mitte eine erneute Zunahme der magnetischen Feldstärke. Durch die langsame Änderung des Magnetfeldes gilt

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{konstant} \quad (2.7)$$

im Bezug auf die Zyklotronbewegung der Elektronen. Die Beziehung 2.7 fordert, dass bei einer Abnahme des magnetischen Feldes auch E_{\perp} abnimmt. Dieser Anteil wird adiabatisch in $E_{||}$ umgewandelt.

In der WGTS emittierte Elektronen bewegen sich also an einem bestimmten Punkt, der

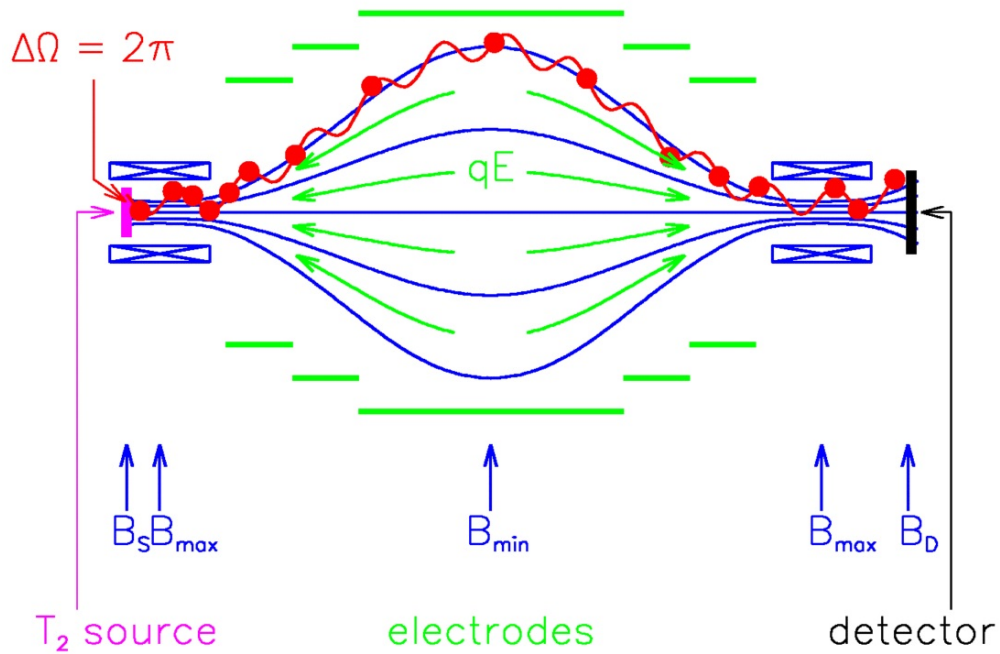


Abbildung 2.7: Funktionsprinzip eines MAC-E-Filters: Elektronen bewegen sich auf Zyklotronbahnen entlang der magnetischen Feldlinien. Das Magnetfeld wird durch zwei supraleitende Magneten an den beiden Enden des MAC-E-Filters erzeugt. Die Feldstärke nimmt zur Mitte des Filters ab und erreicht in der Mitte, in der Analyseebene, ihr Minimum. Durch die langsame Abnahme der Feldstärke wandelt sich der Anteil des Elektronenimpulses transversal zur Filterebene in einen Anteil parallel zu dieser. Auf Höhe der Analyseebene besitzt ein Elektron nahezu ausschließlich parallele Impulsanteile. Durch ein Retadierungspotential, dessen Maximum in der Analyseebene liegt, werden Elektronen unterhalb einer durch das Potential bestimmten Grenzeenergie reflektiert. Nur Elektronen deren kinetische Energien oberhalb dieser Grenze liegen gelangen zum Ausgang des MAC-E-Filters [KAT17].

Analyseebene, alle nahezu parallel zur Längsachse des Spektrometers, unabhängig von dem Winkel (im Bezug auf diese Achse) unter dem sie ausgesandt wurden. Durch ein angelegtes Potential innerhalb des Spektrometers, dessen Maximum auf Höhe der Analyseebene liegt, können die Elektronen nun selektiert werden. Alle Elektronen, deren kinetische Energie nicht ausreicht um diese Potentialbarriere zu passieren werden reflektiert. Dies führt zu einer Transmissionsbedingung

$$E_{||} \approx E_{\text{kin}} > e \cdot U \quad (2.8)$$

für Elektronen mit der Ladung e , bei einem angelegten elektrischen Potential U . Es wird deutlich, dass es sich bei einem MAC-E-Filter um einen integrierenden Hochpassfilter handelt, da eine Unterscheidung verschiedener Elektronenenergien, die diese Bedingung erfüllen, nicht möglich ist. Allerdings kann man durch Variation des Potentials ein integriertes Spektrum der Elektronen aufnehmen.

Durch das elektrische Feld zwischen Analyseebene und Spektrometerausgang werden die Elektronen wieder auf ihre ursprüngliche Geschwindigkeit beschleunigt. Startet ein Elektron mit maximaler Energie in der Transversalkomponente, so hat es einen maximalen Anteil E_{\perp} in der Analyseebene von

$$E_{\perp, \text{max}} = E_{\text{kin}, \text{max}} \cdot \frac{B_{\text{min}}}{B_{\text{max}}}. \quad (2.9)$$

Dieser Wert entspricht der energetischen Auflösung ΔE des Spektrometers. Mit Hilfe von 2.8 und 2.9 lässt sich die parallel Komponente der kinetischen Energie auf Höhe der Analyseebene über

$$E_{||} = E_{\text{kin}} - E_{\perp} \quad (2.10)$$

$$= E_{\text{kin}} - E_{\text{kin}} \cos^2(\theta) \frac{B_{\text{min}}}{B_{\text{max}}} \quad (2.11)$$

berechnen. θ beschreibt hier erneut den Winkel zwischen den magnetischen Feldlinien und dem Impuls des Elektrons.

2.5.2 Die Spektrometer

Das KATRIN-Experiment beinhaltet zwei Spektrometer zur Selektion der Elektronen. Im ersten, kleineren der beiden Spektrometer, dem Vorspektrometer, findet eine Vorfilterung statt und es arbeitet bei einem konstanten Retadierungspotential. Die Hauptaufgabe des Vorspektrometers ist die Reduzierung der Elektronenanzahl im Hauptspektrometer, außerdem konnten anhand des Vorspektrometers als Prototyp des Hauptspektrometers sowohl der Aufbau, als auch der Betrieb getestet werden, da das Hauptspektrometer deutlich höheren Anforderungen unterliegt. Das Hauptspektrometer befindet sich hinter dem Vorspektrometer direkt vor dem Detektor und besitzt ein variables Retadierungspotential. Beide Spektrometer werden im Folgenden beschrieben.

2.5.2.1 Das Vorspektrometer

Das Vorspektrometer ist ein zylindrischer Tank mit einer Länge von 3,38 m und einem inneren Durchmesser von 1,68 m. Es ist von vergleichbarer Größe wie die bestehenden MAC-E-Filter der Experimente in Mainz und Troitsk (vergleiche Abschnitt 2.1). Da beide Spektrometer auf dem gleichen Prinzip beruhen kann das Vorspektrometer als eine kleine Kopie des Hauptspektrometers angesehen werden, weshalb zunächst das Vorspektrometer entwickelt und gebaut wurde. Lösungen für die hohen technischen Anforderungen wie beispielsweise ein Ultrahochvakuum $< 10^{-11}$ mbar, ein zuverlässiges Kühl- und Heizsystem oder das gesamte elektro-magnetische Design (Betrieb bei Hochspannung, Retadierungspotential) konnten entwickelt und getestet werden.

Die eigentliche Aufgabe des Vorspektrometers im Messbetrieb ist die Vorfilterung der Elektronen, um den Elektronenfluss in das Hauptspektrometer zu verringern. Zur Flussverminderung um einen Faktor von 10^7 (von 10^{10} Elektronen/s auf 10^3 Elektronen/s) genügt dem Spektrometer eine Energieauflösung von $\Delta E \approx 100$ eV bei einem festen Retadierungspotential von 300 eV unterhalb des Endpunktes des β -Spektrums. Die technischen Anforderungen

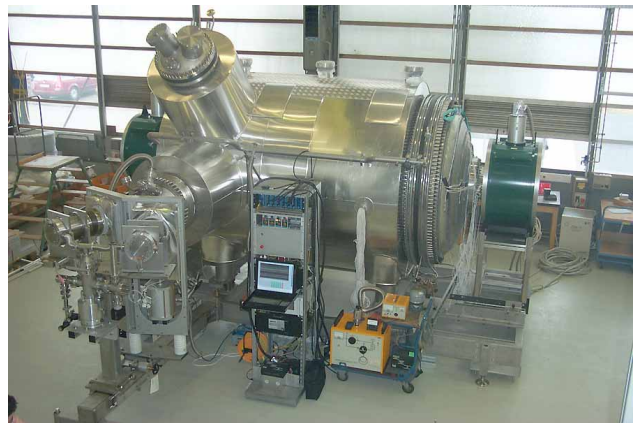


Abbildung 2.8: Fotografie des Vorspektrometers. Der zylindrische Tank besitzt einen äußeren Durchmesser von 1,7 m bei einer Länge von 3,38 m. Die beiden Magnetspulen, die das Magnetfeld im Inneren des Spektrometers erzeugen, sind türkis zu sehen [KAT17].

sind also geringer im Vergleich zum Hauptspektrometer. Durch diese Vorfilterung kann das Untergrundsignal gesenkt werden, da die Wahrscheinlichkeit von Stoßionisation von Restgasmolekülen im Hauptspektrometer gesenkt wird.

2.5.2.2 Das Hauptspektrometer

Das Hauptspektrometer besitzt einen Durchmesser von 9,8 m bei einer Länge von 23,28 m. Der Tank hat ein Gesamtvolumen von 1400 m^3 und wurde in der Vorbereitung auf die Messphase auf einen Druck von 10^{-11} mbar evakuiert. Bei einem Tank dieser Größe ist das erreichte Vakuum weltweit einmalig. Die Länge des Tanks ist notwendig, um die adiabatische Umwandlung der transversalen Bewegungsenergieanteile E_{\perp} in parallele Anteile E_{\parallel} im Bezug auf die Spektrometerachse zu ermöglichen. Die Magneten an den Spektrometeröffnungen erreichen eine magnetische Feldstärke von $B_{max} = 3,5 \text{ T}$. Die Feldstärke nimmt gemäß der Beschreibung in Kapitel 2.5.1 zur Spektrometermitte auf einen minimalen Wert von $B_{min} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ ab. Die Dadurch erreichte Auflösung von $0,93 \text{ eV}$ ist um einen Faktor 5 besser als die zuvor verwendeter MAC-E-Filter.

In Abbildung 2.9 ist der Aufbau des Hauptspektrometers mit seiner Funktion als MAC-E-Filter skizziert.

2.6 Detektor

Die Elektronen, deren Energie ausreicht die Potentialbarriere zu passieren, werden in der zweiten Hälfte des Hauptspektrometers wieder auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt und auf den Detektor (Focal Plane Detector, FPD) geleitet. Der FPD ist eine segmentierte Silizium PIN-Diode bestehend aus 148 Pixeln. Die Anordnung der Pixel erinnert an eine Dartscheibe (siehe Abbildung 2.10), auf der jeder Pixel die gleiche Fläche einnimmt. Der Durchmesser des FDP beträgt 90 mm und besitzt 12 Ringe mit jeweils 12 Pixeln. Eine Ausnahme bildet das Bullseye, das in 4 gleich große Pixel eingeteilt ist. Die Energieauflösung jedes einzelnen Pixel beträgt $1,4 \text{ keV}$ (FWHM). Durch diesen Aufbau stellt der Detektor außer der energetischen Information (die eigentliche Energiebestimmung findet im Hauptspektrometer durch Variation der Potentialbarriere statt) auch noch eine Ortsinformation für jedes detektierte Elektron zur Verfügung. Diese Ortsinformationen können bei der Auswertung genutzt werden um beispielsweise Inhomogenitäten des Retardierungspotentials zu korrigieren. Für diese Korrekturen ist es notwendig, die Inhomogenitäten der elektrischen und magnetischen Felder in der Analyseebene durch Kalibrationsquellen zu vermessen. Eine

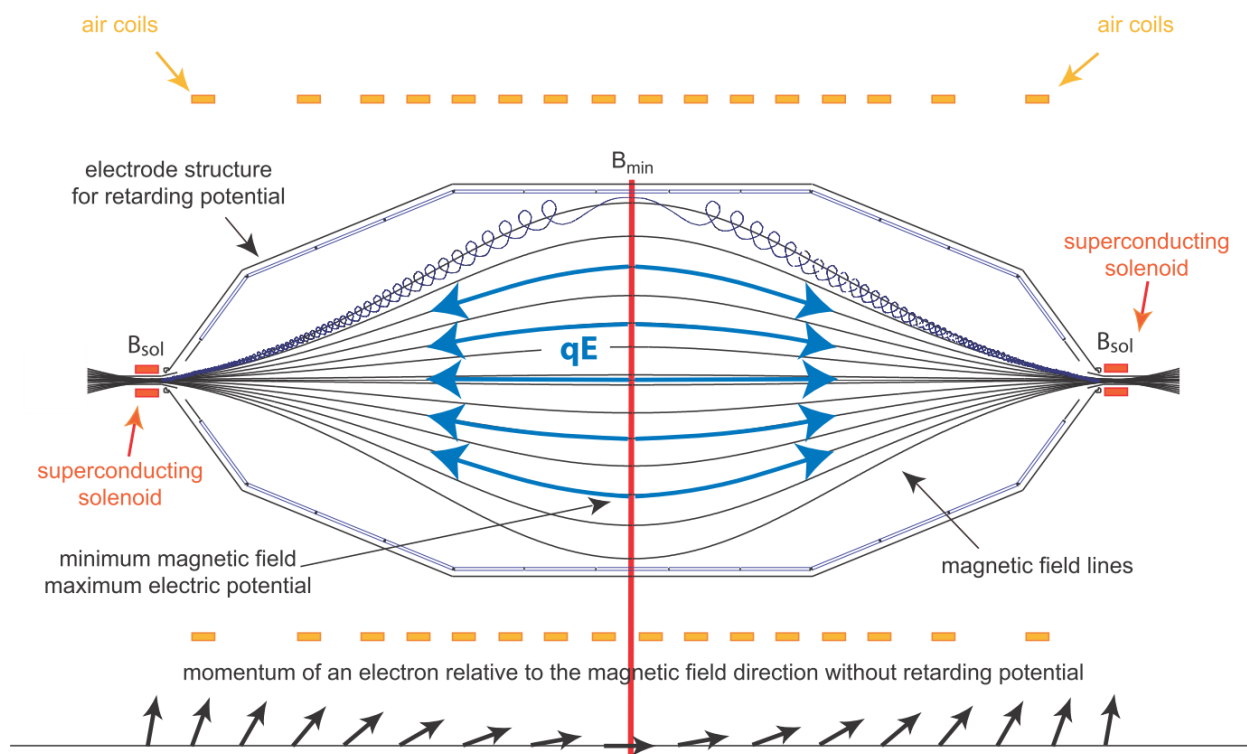


Abbildung 2.9: Querschnitt durch das Hauptspektrometer. Drahtelektroden („electrode structure“) im inneren reflektieren Elektronen, die bei der Wechselwirkung von Myonen mit der Spektrometerhülle entstehen können. Spulen („air coils“) kompensieren das Erdmagnetfeld. Die Flugbahn eines Elektrons ist durch die spiralförmig verlaufende Trajektorie skizziert. Außerdem sind die Magneten am Spektrometer Ein- und Ausgang, sowie die magnetischen Feldlinien gezeigt. Im unteren Bereich des Bildes ist außerdem noch die Umwandlung des Elektronimpulses eingezeichnet [Pra05].

dieser Quellen ist die in dieser Arbeit beschriebene kondensierte Kryptonquelle. Für Informationen zu weiteren Kalibrationsquellen des KATRIN-Experiments wird hier auf den Designreport des KATRIN-Experiments [Kol04] verwiesen.

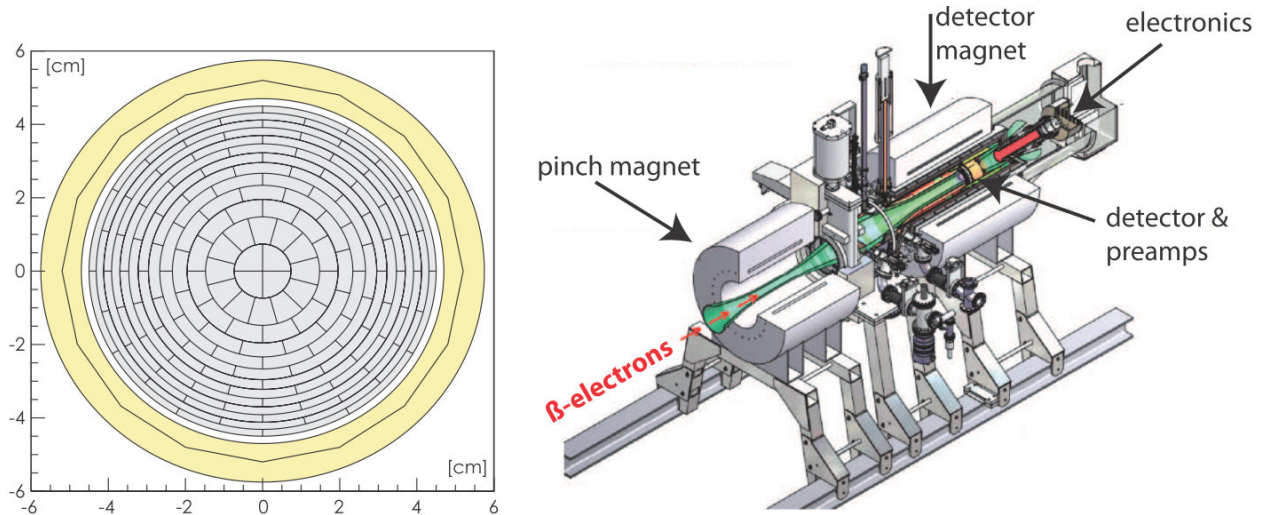


Abbildung 2.10: Die Segmentierung des **FPD** ist links zu sehen. Die rechte Abbildung zeigt den gesamten Aufbau der Detektorsektion mit den verschiedenen Magneten und Vorbeschleunigern um die Elektronen auf den Detektor zu führen und ein deutlich reduziertes Untergrundsignal zu erhalten [Bot12].

Um eine weitere Möglichkeit zur Untergrundreduktion bereitstellen zu können, können die β -Elektronen nach dem Verlassen des Hauptspektrometers mit bis zu 30 kV nachbeschleunigt werden, um die Signale der Elektronen aus dem Tritiumzerfall in einen Energiebereich zu verschieben, in dem eine geringe Untergrundsignalrate erwartet wird. Dadurch entstehen jedoch weitere Herausforderungen, wie der Betrieb der erwähnten hohen Beschleunigungsspannungen bei Magnetfeldstärken bis zu 6 T, oder die Auslese des Detektors und der Status der Ausleseelektronik unter diesen Voraussetzungen.

3 Die kondensierte Kryptonquelle

Damit das KATRIN-Experiment die gewünschte Sensitivität erreicht müssen verschiedene Parameter überwacht beziehungsweise grundsätzlich bestimmt werden:

- Ein wichtiger Parameter ist die Stabilität der Spannung des Hauptspektrometers. Die Überwachung der Stabilität birgt einen wichtigen systematischen Fehler bei der Zusammensetzung der Unsicherheiten im gesamten KATRIN-Experiment. Fluktuationen von maximal 60 mV sind erlaubt, ohne die obere Grenze der erlaubten Abweichung zu überschreiten. Bei einer angelegten Spannung von $U = 18.6 \text{ keV}$ in der Analyseebene bedeutet dies eine relative Stabilität von $\frac{0.06 \text{ V}}{18600 \text{ V}} = 3 \text{ ppm}^1$ die über die gesamte Messzeit sichergestellt werden muss. Diese Überwachung übernimmt unter anderem das ehemalige Spektrometer des Mainzer Neutrinomassenexperiment, das als Monitorspektrometer erneut auf der Grundlage eines MAC-E-Filters arbeitet. Es liegt auf demselben Potential wie das Hauptspektrometer. Die benötigten Elektronen liefert eine Festkörperquelle. Durch die zusätzliche Beschleunigung auf eine kinetische Energie äquivalent zum Endpunkt des Tritium- β -Spektrums können Verschiebungen des Potentials im gewünschten Bereich festgestellt werden.

Eine zweite Möglichkeit die Hochspannung zu überwachen ist der Spannungsteiler, der die 18,6 keV in einen Bereich zwischen 0 V und 10 V unterteilt. Dieser Wert kann mit einem 10 V Standard auf die gewünschte Präzision verglichen werden [Thu07]. Es existieren somit zwei unabhängige Überwachungsmethoden für die Hochspannung am Spektrometer. Da der Spannungsteiler allerdings Alterungseffekten unterliegen könnte, ist dieser nur für kurze Messphasen vorgesehen. Die Langzeitüberwachung übernimmt das Monitorspektrometer.

- Die Transmissionsfunktion der Spektrometer inklusive ihrer Ortsabhängigkeit müssen vermessen werden. Dies ist mit einer monoenergetischen Elektronenquelle, deren Energie sich im Endpunktbereich des Tritium- β -Spektrums befindet, bei bekannter

¹parts per million

Winkelverteilung möglich. Durch eine solche Kalibrationsquelle können etwaige Abweichungen der simulierten elektrischen Potentiale und magnetischen Felder genauso erkannt werden wie Transmissionsverluste durch nicht adiabatische Bewegung im Hauptspektrometer. Diese Vermessung könnte sowohl mit monoenergetischen Elektronen einer geeigneten Photoelektronenquelle [Val09] durchgeführt werden, als auch mit Konversionselektronen. Beim Vergleich dieser beiden Methoden besitzt eine Konversionselektronenquelle, basierend auf einem natürlichen Standard, den Vorteil, dass man gleichzeitig die Stabilität der Hochspannung und die Austrittsarbeit der Filterelektroden des Hauptspektrometers messen kann. Weitere Anforderungen an die Elektronenquelle sind

1. eine schmale Linienbreite und eine gute Reproduzierbarkeit der Linienposition,
2. eine kurze Halbwertszeit, um eine dauerhafte Kontamination der Spektrometer zu verhindern und
3. eine hohe Elektronen-Zählrate.

Diese Eigenschaften vereint die kondensierte Kryptonquelle (condensed krypton source, CKrS). Die CKrS befindet sich am Ende der CPS vor dem Vorspektrometer und soll durch mechanisches Verfahren der Elektronenquelle den gesamten Flussschlauch abdecken.

Da das Positionssystem für die CKrS Gegenstand dieser Arbeit ist wird in diesem Kapitel zunächst der Aufbau und die Funktionsweise der CKrS als Kalibrationsquelle erläutert. Für detaillierte Informationen zu anderen Kalibrationsquellen wird auf [Kol04] und die genannten Quellen verwiesen.

Die CKrS nutzt das metastabile Kryptonisotop ^{83m}Kr als Elektronenquelle. Die Konversionselektronen, die beim Übergang in den stabilen Zustand emittiert werden erfüllen die Anforderungen an die Kalibrationsquelle (siehe Abschnitt 3.1). Dieses Isotop kann aus ^{83}Rb über den Elektroneneinfang erzeugt werden. Das radioaktive Krypton gelangt dann im gasförmigen Zustand über eine Kapillare zu einem Substrat bestehend aus einem Film hoch orientiertem pyrolytischem Graphits (HOPG). Das Substrat ist thermisch an einen Kaltfinger gekoppelt, um Temperaturen zu erreichen, bei denen das Kryptongas auf dem HOPG als Film kondensiert und von dort aus die benötigten Konversionselektronen emittieren kann. Dieser Prozess erfordert einen Aufbau, der sich in vier Teile gliedern lässt:

1. Das Kryosystem (siehe Abschnitt 3.2.2), das sämtliche Temperaturen überwacht und steuert, die zum gasförmigen Transport durch die Kapillare, zum Austreten des Gases im Substratbereich durch eine Düse und zum Kondensieren des Gases auf dem Substrat benötigt werden.
2. Das Gassystem (siehe Abschnitt 3.2.1), welches das Quellgas ^{83m}Kr aus dem Zerfall von ^{83}Rb bereitstellt und zusätzlich die Möglichkeit bietet stabiles Kryptongas für optische Referenzmessungen einzulassen.
3. Der Optikaufbau (siehe Abschnitt 3.2.3), der zur Überwachung der Filmdicke auf dem Substrat genutzt wird, aber auch zur Reinigung des Substrats mit Hilfe von Laserablation.
4. Das Positionssystem (siehe Abschnitt 3.2.4), das zum Bewegen des Substrats dient und somit im Messbetrieb für die Vermessung des gesamten Flussschlauchs zuständig ist.

3.1 Konversionselektronen des Krypton-Zerfalls

Ein angeregter Kern kann durch Aussendung von γ -Strahlung den Grundzustand erreichen. Ein dazu konkurrierender Prozess ist die interne Konversion. Hierbei wechselwirkt der Kern elektromagnetisch mit einem der Hüllenelektronen. Die Anregungsenergie wird auf mindestens ein Elektron übertragen, was zur Auslösung dieses Elektrons und in der Folge eventuell weiterer, niederenergetischer Elektronen aus der Atomhülle führt. Die kinetische Energie E_{Kin} des Elektrons ist dann in einfachster Näherung der Überschuss der Anregungsenergie E_γ abzüglich der Bindungsenergie (im Bezug auf ein freies Atom im Vakuum) $E_{\text{B}}^{\text{Vak}}$, also

$$E_{\text{Kin}} = E_\gamma - E_{\text{B}}^{\text{Vak}}. \quad (3.1)$$

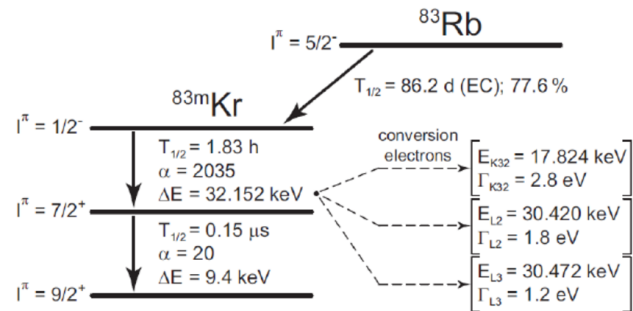


Abbildung 3.1: Zerfallsschema von ^{83m}Kr . Krypton entsteht über Elektroneneinfang von ^{83}Rb und zerfällt über ein Zwischenniveau in den stabilen ^{83}Kr -Zustand über interne Konversion

Das Spektrum von Konversionselektronen weist dadurch diskrete Peaks auf, deren Linienbreite von der Lebensdauer der involvierten Niveaus abhängt.

Wie schon erwähnt nutzt die CKrS den Zerfall von ^{83m}Kr . Dieser isomere Zustand entsteht zu

77,9 % durch Elektroneneinfang des Isotops ^{83}Rb und liegt bei 41,5 keV. Das angeregte Krypton zerfällt dann über ein Zwischenniveau bei 9,4 keV mit einer Halbwertszeit von 1,83 h, wobei das Zwischenniveau mit $0,15\text{ }\mu\text{s}$ kurzlebig ist. Im Zerfallsschema in Abbildung 3.1 ist zu erkennen, dass der erste Übergang $I = \frac{1}{2}^- \rightarrow I = \frac{7}{2}^+$ eine Zerfallsenergie von 32,1517(5) keV hat. Durch einen Konversionskoeffizienten $\alpha = 2000$ ist die Wahrscheinlichkeit der internen Konversion 2000 mal höher, als die Abregung durch Emission von γ -Strahlung. Der zweite Übergang $I = \frac{7}{2}^+ \rightarrow I = \frac{9}{2}^+$ besitzt eine Energie von 9,4 keV und einen Konversionskoeffizienten $\alpha = 17$. Die Konversionselektronen der K-Schale werden beim 32 keV-Übergang mit einer Energie von 17,824 keV emittiert und liegen damit knapp unterhalb des spektralen Endpunktes des Tritium- β -Zerfalls. Sie weisen eine Linienbreite von 2,8 eV auf.

3.2 Aufbau

Im Folgenden wird der Aufbau der Kryptonquelle mit den angesprochenen Systemen und deren Eigenschaften genauer erläutert. Hierbei handelt es sich um den aktuellen Stand nach Aufbau der CKrS am KIT. Zu Beginn dieser Arbeit befand sich der Aufbau für erste Testmessungen in horizontaler Position. Da die CKrS aber vertikal in das KATRIN-Experiment integriert wird, fand nach erfolgreichem Abschluss der Testmessungen ein Umbau in die vertikale Position in Münster statt, um die Umstände in Karlsruhe genau zu simulieren und erneut zu testen.

Die Einbindung von leistungstärkeren Motoren und den dazugehörigen Positioniermodulen, die erstmalige Installation einer Kippbewegung zur Änderung der horizontalen Position, um mit der Elektronenquelle den gesamten Flussschlauch abzudecken, die Justage der linearen Messköpfe und der Entwurf eines Schaltersystems für die horizontale und die vertikale Bewegungsachse waren hierbei die Anforderungen an das Positionssystem (siehe Kapitel 4.1). Die Ergebnisse der Tests für das Positionssystem werden später gezeigt, für die anderen Systeme wird an dieser Stelle auf weitere Arbeiten der AG Weinheimer verwiesen. Da die finalen Tests zu den gewünschten Ergebnissen führten, wurde die CKrS nach Karlsruhe transportiert und dort erfolgreich in die CPS integriert. Die angestrebten Temperaturen und der angestrebte Vakuumdruck konnten auch hier erreicht und das Positionssystem erfolgreich in Betrieb genommen werden. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 3.2 skizziert.

3.2.1 Das Gassystem

Das Gassystem ist für den kontrollierten, reproduzierbaren Einlass von Krypton in die Vakuumkammer zuständig. Hierbei gibt es zwei Betriebsmodi. Es ist möglich stabiles Krypton einzulassen, um die korrekte Funktionsweise des Gassystems zu testen. Außerdem können nach Auffrieren von stabilem Krypton auf das HOPG Referenzmessungen für die Laserellipsometrie durchgeführt werden, die die Änderung der Polarisation des Laserstrahls mit der Schichtdicke des Kryptonfilm in Zusammenhang setzen. Näheres hierzu liefert Abschnitt 3.2.3. Im zweiten Modus wird radioaktives Krypton ^{83m}Kr aufgefroren, um Elektronen aus dem radioaktiven Zerfall wie beschrieben zu nutzen, um die Transmissionsfunktionen des Spektrometers zu bestimmen.

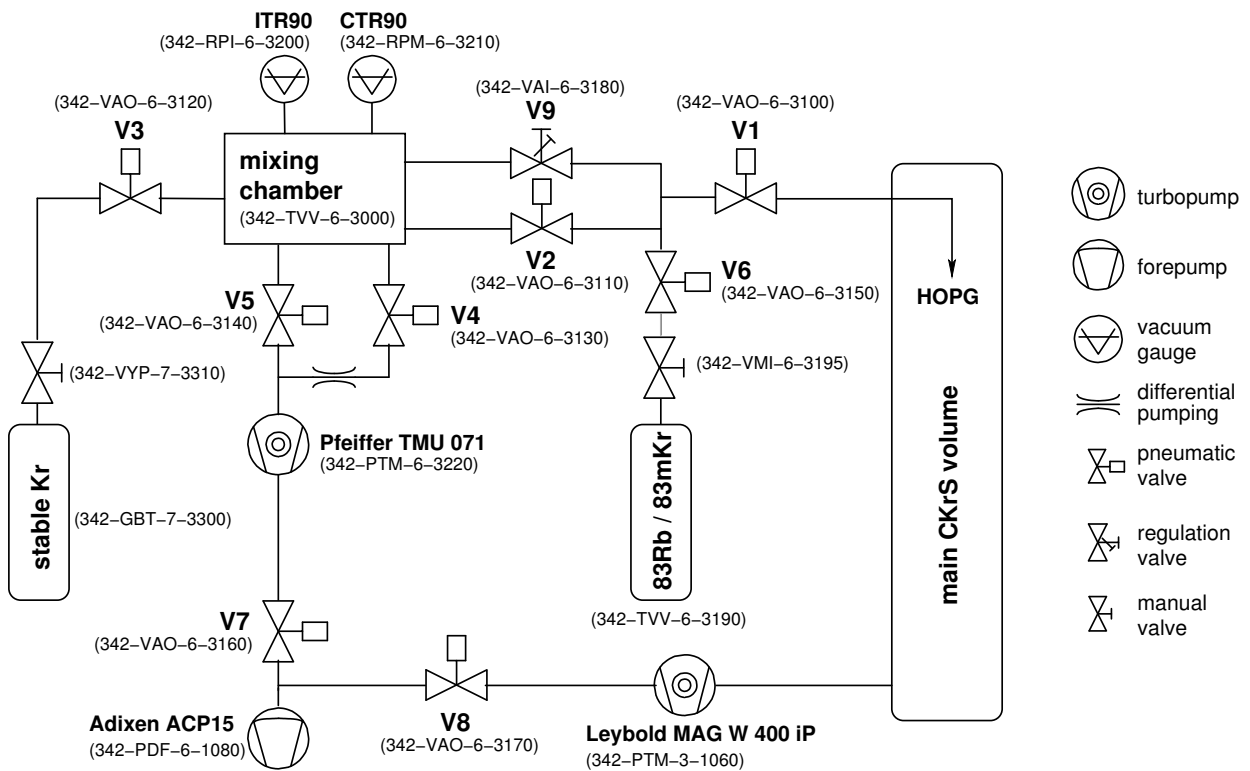


Abbildung 3.3: Schematische Zeichnung des Gassystems. Neben dem radioaktiven Krypton, das aus ^{83}Rb gewonnen wird, ist es auch möglich stabiles Krypton auf dem Substrat aufzufrieren. Außerdem sind sämtliche Ventile (V1-V9) und die Vakuumpumpen eingezeichnet. An der Mischkammer sind zusätzlich zwei Druckmessröhren montiert, die für verschiedene Druckbereiche konstruiert sind.

Eine Skizze des Gassystems ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Das stabile Krypton wird über das Ventil V3 in die Mischkammer gelassen. Vor Einlass des Kryptons in die Mischkammer muss in dieser ein ausreichend gutes Vakuum vorhanden sein, um Verunreinigungen vorzubeugen. Damit das Gas durch die Kapillare in den Substratbereich, dessen Druck bei $\approx 10^{-11}$ mbar liegt, propagieren kann, muss der Druck in der Mischkammer nach Einlass des Kryptons im

Bereich einiger Millibar liegen, da der Gasfluss Q über den Leitwert L proportional zu der Druckdifferenz Δp über

$$Q = L \cdot \Delta p \quad (3.2)$$

ist. Die Mischkammer kann über eine Turbopumpe der Firma Pfeiffer evakuiert werden. Um die Pumpe bei der Mischkammerbefüllung nicht zu überlasten kann bei geschlossenem Ventil V5 über das Ventil V4 differentiell gepumpt werden. Die genaue Gasmenge, die in den Substratbereich gelangt, kann durch das Ventil V9 über den Grad der Ventilöffnung und die Öffnungsdauer reguliert werden. Da V9 aber nicht genutzt werden kann, um den Bereich zwischen dem Ventil und der Vakuumkammer abzupumpen, wurde das Druckluftventil V2 installiert, das diese Aufgabe übernimmt.

Der Einlass von ^{83m}Kr wird über V6 gesteuert, wobei wie auch zwischen dem Einlass von stabilem Krypton und dem eigentlichen Einlassventil (V3) ein Handventil zum manuellen Schließen eingebaut wurde. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme bildet V1, welches das gesamte Gassystem von der Vakuumkammer und dem Substratbereich der Kryptonquelle trennen kann. Sollte beispielsweise ein Leck im Gassystem entdeckt werden, so kann das Vakuum dort erhalten bleiben, ohne den genauen Ort des Lecks zu kennen.

3.2.2 Das Kryosystem

Das Kryosystem besteht aus einem Kaltkopf und einem Kaltfinger. Der Kaltfinger besteht aus einem 2 m langen Kupferstab und zwei Metallschilden, an dessen Stirnseite das Substrat angebracht ist. Der Kaltkopf ist eine Gifford-McMahon-Kältemaschine der Firma Sumitomo. Mit dieser Kältemaschine wird das äußere Kaltschild auf eine Temperatur von 80 K gekühlt (1. Kühlstufe). Durch das Kaltschild soll der Substratbereich vor Wärmestrahlung durch die umgebene Raumtemperatur geschützt werden. Das innere Kaltschild und der Kaltfinger werden auf $< 20\text{ K}$ gekühlt (2. Kühlstufe) und dienen dadurch als Kältefalle um mögliche Fremdatome, die sich noch im System befinden, einzufangen. Dadurch kann das Vakuum lokal verbessert und Restgaskondensation auf dem HOPG-Substrat vermieden werden. Dies wird noch unterstützt, indem das Substrat selbst auf eine Temperatur von ca. 25 K gebracht wird. Über die Slow Control der CKrS lassen sich die verschiedenen Temperaturen überwachen. Dafür wurden 8 Temperatursensoren an den wichtigen Positionen, wie zum Beispiel der Kapillare oder auch an den Kaltschilden angebracht.

Abbildung 3.4 zeigt die für das Kryosystem wichtigen Komponenten im Substratbereich. Neben dem äußeren Kaltschild, das den gesamten Substratbereich umfasst und dem inneren

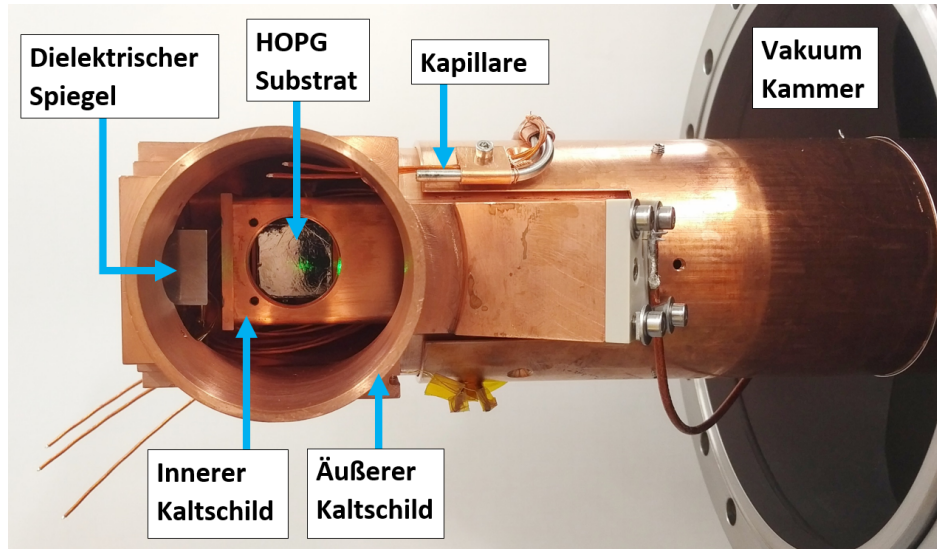


Abbildung 3.4: Foto des Substratbereichs der CKrS mit den Komponenten des Kryosystems. Markiert sind die beiden Kaltschilde (40 K und 4 K), sowie das Substrat, die Kapillare, der Ausgang der Vakuumkammer und ein dielektrischer Spiegel, der für den optischen Aufbau (Ellipsometrie und Ablation) genutzt wird [Hö16].

Kaltschild sind sowohl das Substrat als auch die Kapillare zu sehen, durch die das Kryptongas zum HOPG geleitet wird. Um das Auffrieren von Kryptongas im Kapillareninneren zu vermeiden sind auch hier Heizer eingesetzt. Zusätzlich ist ein dielektrischer Spiegel zu sehen, um einen Laserstrahl auf das Substrat zu leiten. Dies ist notwendig um Laserellipsometrie zu betreiben (siehe Abschnitt 3.2.3).

3.2.3 Der Optikaufbau

Um eine schmale spektrale Linienbreite der Elektronen der CKrS garantieren zu können, müssen die Schichtdicke des Kryptonfilms und eventuelle Verunreinigungen auf dem HOPG-Substrat überwacht werden. Eine zu große Schichtdicke kann zu Streueffekten bei Elektronen aus unteren Schichten führen. Dies wiederum führt zu Energieverlusten und einer Verbreiterung der Energieverteilung und somit auch zu einer höheren Messunsicherheit der Kalibrationsquelle. Die ideale Schichtdicke für den Kryptonfilm liegt unterhalb einer Monolage, weshalb die Laserellipsometrie mit einer Auflösung im Sub-Nanometer Bereich für die Überwachung geeignet ist.

Bei bekannter Polarisation eines einfallenden Lichtstrahls auf ein Medium lässt sich anhand der Polarisationsänderung des reflektierten Strahls die Dicke der Schicht bestimmen oder aber auch die Stabilität dieser Schichtdicke überwachen. Voraussetzung dafür ist ein 3-Schichten-System, wie es bei der CKrS der Fall ist. Der Laserstrahl trifft aus dem Vaku-

um (Schicht 0) kommend auf den Kryptonfilm (Schicht 1). Der Anteil des transmittierten Lichts trifft wiederum auf das HOPG (Schicht 2) unterhalb des Kryptons. Die Theorie zur Transmission und Reflexion eines polarisierten einfallenden Lichtstrahls ist in Abbildung 3.6 illustriert.

Elliptisch polarisiertes Licht kann nach der Reflexion eine lineare Polarisation aufweisen. Dadurch ist es möglich, die Intensität der reflektierten Strahlanteile mit einem Analysator auszulöschen. Nutzt man nun einen Photodetektor hinter dem Analysator, so ergibt sich für jede Schichtdicke ein Wertepaar für die Polarisator²- und Analysatorstellung, bei dem die Intensität minimal ist. Hat man dieses Wertepaar für eine Schichtdicke gefunden, lassen sich Änderungen der gemessenen Intensität auf eine Änderung der Schichtdicke zurückführen. Diese Art der Ellipsometrie wird Nullellipsometrie genannt³.

Innerhalb der Kryptonquelle ist es aufgrund der starken Magnetfelder und der tiefen Temperaturen im Vakuum nicht möglich den Analysator zu drehen. Den reflektierten Strahl aus der CPS hinaus zu leiten würde aber zu einer zu starken Aufweitung des Strahls führen. Dr. Stephan Bauer konnte in seiner Dissertation von 2013 zeigen, dass mit einem fixierten Analysator ebenfalls Ellipsometrie betrieben werden kann, wenn dafür der Kompensator als zweite veränderbare Observable genutzt wird (PC-Ellipsometrie, für Polarisator-Compensator-Ellipsometrie). Die Ellipsometrie der CKrS wird nach diesem Prinzip durchgeführt [Bau13].

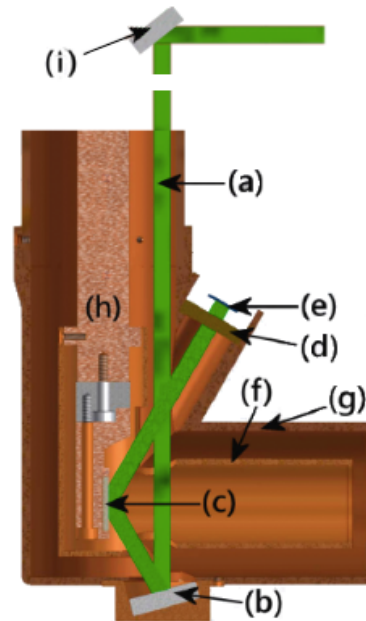


Abbildung 3.5: Strahlengang des Ellipsometrielasers im Substratbereich. Über einen dielektrischen Spiegel (i) verläuft der zuvor polarisierte Strahl parallel zum Kaltfinger (a). Unterhalb des Substrats wird der Strahl erneut über einen dielektrischen Spiegel (b) auf den Kryptonfilm reflektiert (c). Danach passiert der Strahl einen fixierten Analysator (d) bevor die Intensität von einer Photodiode (e) gemessen wird. Der gesamte Bereich ist durch den inneren (f) und äußeren (g) Kaltschild gekühlt [Pet15].

²Zur Polarisierung des Lichts befindet sich in dem Fall noch ein Kompensator hinter dem Polarisator, dessen Wert konstant ist

³In dem Fall spricht man auch von PA-Ellipsometrie, da die Winkelstellungen von Polarisator und Analysator die beiden Observablen bilden.

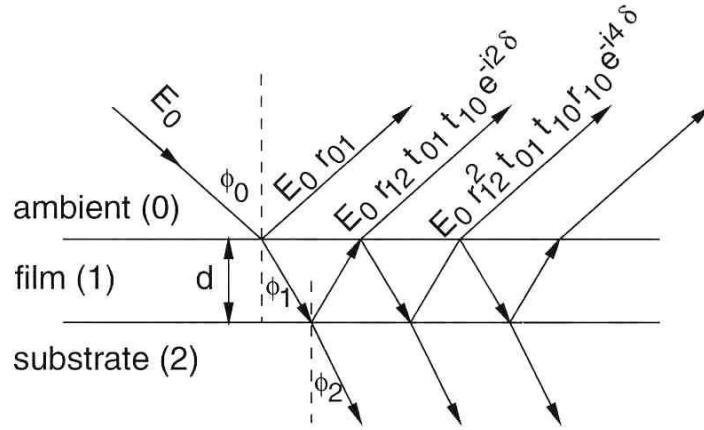


Abbildung 3.6: Strahlengang bei Reflexion beziehungsweise Transmission einer ebenen Welle an einem 3-Schichten-System. Bei der Kryptonquelle bestehen diese 3 Schichten aus Vakuum (0), Kryptonfilm (1) und HOPG-Substrat (2), wobei die Grenzflächen als glatt und zueinander parallel angenommen werden. Die einfallende Ebene Welle E_0 fällt unter dem Einfallswinkel ϕ_0 auf den Film der Dicke d . Reflektierte und transmittierte Strahlenanteile sind durch die Fresnelschen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten $r_{01}, r_{10}, r_{12}, t_{01}, t_{10}$ bestimmt. Außerdem sind die Brechungswinkel des Films ϕ_1 und des Substrats ϕ_2 eingezeichnet [Weg10].

Mathematisch betrachtet man bei der Untersuchung der Polarisationsänderung den Amplitudenreflektionskoeffizienten R_p und R_s für p- und s-polarisiertes Licht. Diese sind durch

$$R_p = \frac{r_{01p} + r_{12p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{01p}r_{12p}e^{-i2\delta}} \quad (3.3)$$

und

$$R_s = \frac{r_{01s} + r_{12s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{01s}r_{12s}e^{-i2\delta}} \quad (3.4)$$

gegeben. Dabei ist der Gangunterschied δ zweier benachbarter Strahlen

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{N_1^2 - N_0^2 \sin^2(\Phi_0)}. \quad (3.5)$$

Hierbei spielt sowohl die Wellenlänge des Lasers λ , der Einfallswinkel Φ_0 , die Brechungsindizes N_0 und N_1 der Materialien, aber auch die Schichtdicke d eine Rolle. Über das Verhältnis der Amplitudenreflektionskoeffizienten lässt sich dann die Schichtdicke wie folgt bestimmen:

$$\rho_s = \frac{R_p}{R_s} = \mp \tan(A) e^{\mp 2i(P \mp \pi/4)}. \quad (3.6)$$

Die Observablen A und P stehen für die Winkelstellungen des Analysators beziehungsweise des Polarisators. Die genutzte Konstruktion um die Ellipsometrie nach dem Aufbau der Kryptonquelle in Karlsruhe nutzen zu können ist in Abbildung 3.5 illustriert.

Durch die Nutzung der PC-Ellipsometrie ist es bei der Auswertung notwendig die Winkelstellungen von Polarisator und Analysator in Formel 3.6 in Einstellungen für Polarisator und Kompensator zu übersetzen. Nach [Bau13] lässt sich diese Transformation wie folgt durchführen:

$$\tan(\tilde{A}) e^{2i(\tilde{P} + \pi/4)} = \rho_s = -\tan(A) \frac{\tan(C) - i \tan(P - C)}{1 + i \tan(C) \tan(P - C)}. \quad (3.7)$$

Das bedeutet, dass jedes Wertepaar (P, C) , dass bei der PC-Ellipsometrie einer bestimmten Schichtdicke entspricht über die Formel 3.7 in ein Wertepaar (\tilde{P}, \tilde{A}) überführt werden kann, das derselben Dicke bei der Berechnung über die PA-Ellipsometrie entspricht.

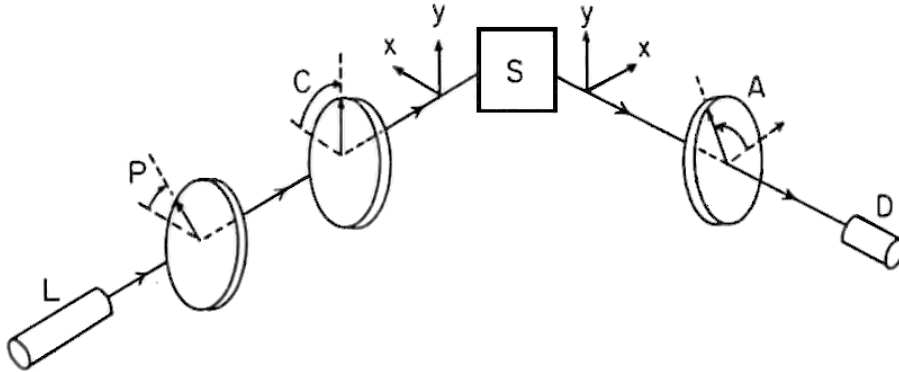


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der PCSA-Anordnung für Ellipsometriemessungen der CKrS. Ausgehend von der Lichtquelle (L) trifft der Strahl auf einen Linearpolarisator (P) und einem aus einem $\lambda/4$ -Plättchen bestehenden Kompensator (C). Anschließend wird das polarisierte Licht vom optischen Substrat (S) reflektiert und durchläuft einen Analysator (A) bevor es mit einem Photodetektor (D) detektiert wird [Azz87].

Zum Optiksystm gehört außerdem ein Ablationslaser, der über ein Teleskop und ein Fenster im CKrS-Aufbau oberhalb der CPS direkt auf das Substrat strahlt. Zur Ablation wird ein Nd:YAG Laser der Firma *Quantel* genutzt. Dieser Laser hat eine Pulsenergie von 360 mJ bei einer Wellenlänge von 1064 nm. Die Pulsfrequenz beträgt 10 Hz und die Pulsdauer ≈ 5 ns. Durch bestrahlen des Substrats wird dieses lokal geheizt, sodass aufgefrorene Atome desorbieren und durch die Vakuumpumpen aus dem Substratbereich entfernt werden. Zusätzlich

wird bei der Reinigung das Substrats geheizt, um die Desorption der Atome zu unterstützen.

3.2.4 Das Motorsystem

Hauptbestandteil dieser Arbeit war die Programmierung und die Inbetriebnahme des Positionssystems für die CKrS. Neben der Steuerungssoftware war der Entwurf, die Montage und die Verkabelung der Hardware-Komponenten ein wichtiger Bestandteil für den erfolgreichen Abschluss dieses Projekts. Die Beschreibung des gesamten Positionssystems inklusive Motorsystem erfolgt deswegen im folgenden Kapitel gesondert.

4 Das Positionssystem der CKrS

Um die Transmissionsfunktion der Spektrometer ortsabhängig bestimmen zu können, ist es notwendig, das Substrat bewegen zu können. Es muss möglich sein, die CKrS so zu bewegen, dass Elektronen jeden Punkt des Detektors erreichen. Das Positionssystem übernimmt genau diese Aufgabe und kann in zwei Bereiche geteilt werden. Zunächst gibt es verschiedene Hardware-Komponenten, wie die Motoren selbst, oder ihre Steuermodule. Der erste Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit dieser Hardware und erklärt die Funktionen der einzelnen Komponenten. Im zweiten Teil des Kapitels wird die Software zur Steuerung des Positionssystems erläutert. Auch an die Software gab es verschiedene Ansprüche, denen je nach Betriebsmodus genügt werden musste. Die Struktur des Haupt- sowie der Unterprogramme spielten hierbei eine große Rolle, beispielsweise in der Realisierung eines Not-Aus-Schalters. Je nach verwendetem Betriebsmodus existieren auch verschiedene Benutzeroberflächen, die in Abschnitt 4.2.1 beschrieben werden. Um die einzelnen Detektorpixel anzufahren waren außerdem geometrische Überlegungen notwendig, da die Motorbewegungen der horizontalen Positionierung nicht den Bewegungen des Substrates entsprechen. Die notwendigen Berechnungen bilden den Abschluss des Kapitels.

4.1 Hardware-Komponenten

Die Hardware-Komponenten lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen. Für die eigentliche Bewegung sind zwei Servomotoren der Firma ISEL in Verbindung mit Positioniermodulen desselben Herstellers zuständig. Die Kommunikation zwischen dem Anwender-PC und den Positioniermodulen übernimmt ein PXI-System. Für die genaue Positionsbestimmung werden optische Linearmessköpfe der Firma Renishaw genutzt, die eine verbesserte Genauigkeit gegenüber der motorinternen Positionsabnahme bereitstellen. Hardware-Endlagenschalter und Positionsschalter, die softwareseitig ausgelesen werden, wurden ebenfalls installiert und getestet. Hierfür wurde ein eigenes Schaltersystem entworfen, das den Anforderungen der CKrS gerecht wird. Die gesamte Datenverarbeitung übernimmt wiederum das PXI-System.

4.1.1 Motoren und Positioniermodule

Um den zweidimensionalen Bereich des Detektors abzudecken muss die Elektronenquelle in zwei Raumrichtungen bewegt werden. Die vertikale Bewegung übernimmt ein Motor des Typs EC86L der Firma Isel. Es handelt sich hierbei um eine lineare aufwärts beziehungsweise abwärts Bewegung, bei der das Gassystem, die optischen Komponenten für die Laserellipsometrie und eine Turbomolekularpumpe mitbewegt werden. Bei dieser Fahrstuhlbewegung, die durch Gegengewichte über ein Seilzugsystem entlastet ist, ist ein stärkerer Motor notwendig, als bei der horizontalen Bewegung. Der EC86L erfüllt mit einem Drehmoment von 2,1 Nm diese Anforderungen und kann Geschwindigkeiten von bis zu $11 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ erreichen. Dieser Wert ist durch die genutzte Spindel auf $9 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ begrenzt, wodurch der Motor nie unter voller Auslastung betrieben wird. Alle weiteren technischen Daten, die bei der Initialisierung der Motoren in der Software eine Rolle spielen sind in den Datenblättern im Anhang nachzulesen.

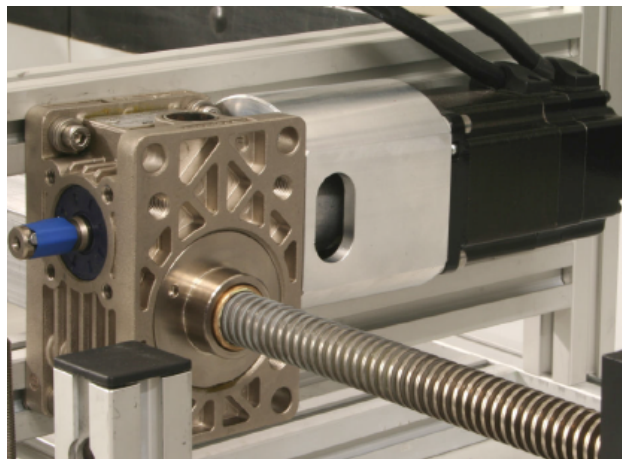


Abbildung 4.1: Fotografie eines Motors der Firma Isel (schwarz) mit Getrieben und Spindel. Die genutzten Motoren unterscheiden nur in Größe und Leistung. Zu sehen sind auch die beiden Anschlusskabel am Motor, die direkt mit dem Positioniermodul verbunden werden [Bot12].

Bei der horizontalen Bewegung wird ein Motor des Typ EC60L genutzt. Dieser hat mit 0,75 Nm ein kleineres Drehmoment, welches aber ausreichend ist um die gewünschte Bewegung durchzuführen. Durch verschiedene Scharniere am Gestell der CKrS (siehe Abbildung 4.7) und an der Motoraufhängung ist es möglich, eine lineare Bewegung des Motors in eine Kippbewegung des in grün und ockerfarben gezeigten Gestells (siehe Abbildung 3.2) zu transformieren. Durch diese Verkippung wird die horizontale Bewegung ausgeführt. Bei der genauen Anfahrt von Zielpositionen ist zu beachten, dass durch eine Kippbewegung der Übergang von kartesischen Koordinaten zu Polarkoordinaten sinnvoll ist. Diese Überlegung wird in 4.2.2 genauer ausgeführt.

Die Motoren werden von Positioniermodulen angesteuert, die auch von der Firma ISEL vertrieben werden und motorspezifisch ausgewählt werden müssen. Für den EC86L wird das Positioniermodul IMD40 benötigt, für den EC60L das Modul IMD20. Der Unterschied zwischen den beiden liegt im wesentlichen in der für den jeweiligen Motor bereitgestellten Betriebsspannung. Die IMD40 benötigt für den Betrieb des EC86L 230 V Netzspannung, die IMD20 nur eine Spannung von 48 V für den EC60L. Außer der Bereitstellung der Betriebsspannung besitzen die Motoren jeweils noch eine weitere Verbindung zu dem jeweiligen Modul (siehe Abbildung 4.1). Über einen Sub-D-Stecker werden sowohl die Encodersignale zur Positionsbestimmung, als auch die Signale für die Endlagenschalter direkt von den Motoren übermittelt. Die Betätigung eines Endlagenschalters führt zum sofortigen Anhalten des Motors. Das Positioniermodul geht dabei in einen Fehlerzustand über und verhindert eine erneute Bewegung des Motors. Die einzelnen Fehlerzustände werden anhand eines Signals über die LED-Leuchten an der Front der IMD-Module übermittelt. Während der Bewegung empfängt das Positioniermodul eine gewisse Anzahl Impulse pro Distanzeinheit von den motorinternen Encodern. Diese können dann bei bekannter Encoderauflösung (Anzahl der Impulse bzw. Inkremente pro Motorumdrehung) und Getriebeübersetzung über einen Umrechnungsfaktor in reale Distanzen umgerechnet werden.

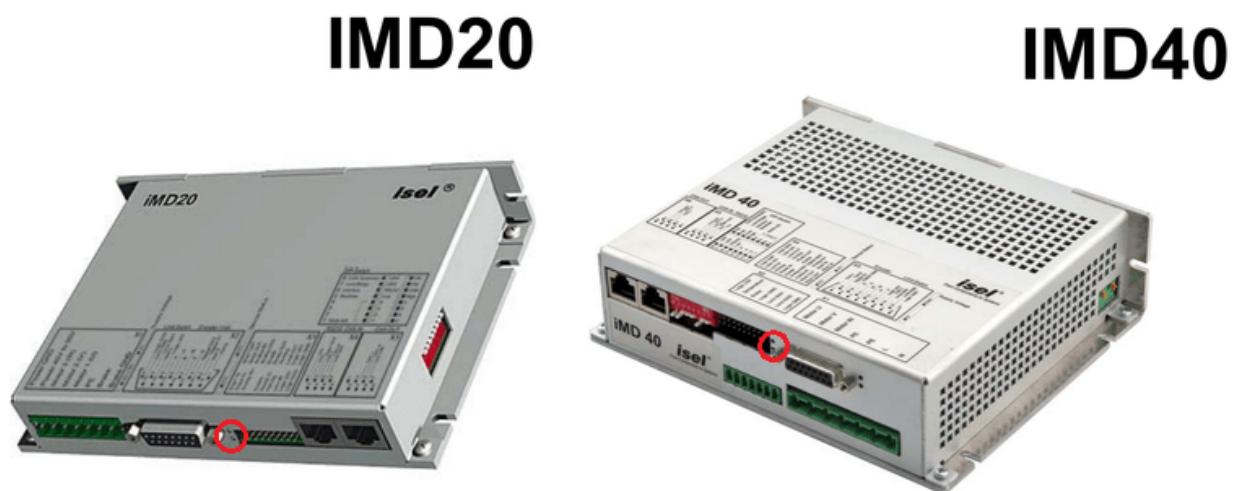


Abbildung 4.2: Positioniermodule IMD20 und IMD40 der Firma ISEL. Die Positioniermodule übersetzen die Befehle der Software und geben diese an die Motoren weiter. Außerdem übernehmen sie die hardwareseitigen Funktionen wie Endlagenschalter auslesen oder die Encodersignale des Motors registrieren. Rot eingekreist sind die LED anzeigen, über die auftretende Fehler oder aktivierte Endlagenschalter identifiziert werden konnten [IB17].

Beide Module benötigen noch eine Spannungsversorgung von jeweils 24 V für die interne Logik und sind außerdem über ein Ethernetkabel mit der PXI-Einheit verbunden. Über diese PXI-Einheit kann der PC mit den Positioniermodulen über das CanOpen-Protokoll kommu-

nizieren. Abbildung 4.2 zeigt die Fronten der beiden Module mit den jeweiligen Anschlüssen. Für eine PIN-genaue Belegung wird an dieser Stelle auf die Bedienungsanleitung verwiesen, die in der Quellenangabe unter [IB17] zu finden ist. Mit Hilfe einer Herstellersoftware (ACSetup) ist es möglich die Motoren mit den korrekten Parametern zu initialisieren und die verschiedenen Funktionen zu testen. Hierzu kann das Positioniermodul ohne den Umweg über das PXI-System direkt mit dem PC verbunden werden. Durch manuelles Fahren ohne Angabe von absoluten Zielpositionen, wie es bei der Steuerungssoftware der Fall ist, konnten so die Endlagenschalter getestet werden, da der Motor notfalls manuell gestoppt werden konnte. Bei der Angabe von absoluten Zielpositionen wäre das nur durch Trennen der Spannungsversorgung möglich gewesen, was zu Schäden am Motor oder an den Positioniermodulen führen kann. Während der Programmierung der Motorsteuerung war das Programm ebenfalls hilfreich, da die Motoren mit dem ACSetup jederzeit funktionsfähig sind. So konnte an verschiedenen Stellen, während der Entwicklung des Programms defekte Hardware identifiziert und ausgetauscht werden¹. Im Gegensatz dazu wurden auch Programmierfehler gefunden und behoben, indem ein funktionierender Motorbetrieb über das ACSetup fehlerhafte Hardware als Fehlerursache ausschließt.

4.1.2 Komponenten des PXI-Systems

PXI ist ein Bussystem basierend auf dem PCI-Bus mit der modularen CompactPCI-Chassis Erweiterung im Europakartenformat. Das für die Motorsteuerung genutzte PXI-System ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Es wird ein Chassis des Typs PXI-1036DC genutzt in das ein Echtzeit-Controller (PXI-8146RT) eingebaut ist, um eine Echtzeitplattform zu konstruieren. Der Controller ist mit jedem anderen der genutzten Module verbunden um direkt Daten erfassen und verarbeiten zu können. Die Steuerungssoftware für die Motoren wird auf diesem Controller ausgeführt, sodass ein PC nur für die Benutzeroberflächen der Programme benötigt wird. Ein Ethernet-Kabel verbindet den Echtzeit-Controller mit den PC.

Desweiteren ist in dem Chassis eine CAN-Schnittstellenkarte des Typs (PXI-8464/2-Serie 2) integriert. Dieses hält 2 Ports für jeweils ein IMD-Positioniermodul bereit, die beide separat adressiert werden können. Dadurch ist die unabhängige Steuerung beider Motoren möglich. Der letzte belegte Steckplatz enthält ein PXI-6602 Zählermodul. Diese ist mit einem SCB-68 I/O-Anschlussblock verbunden der in Abbildung 4.4 zu sehen ist. In dem Anschlussblock können verschiedene Anschlüsse zur Erfassung digitaler und analoger Signale genutzt werden. Außerdem stellt er eine Spannungsversorgung von 5 V zur Verfügung. Die Signale der vier Positionsschalter, der Antastschalter und beider Renishaw Messköpfe werden von dem

¹Im Laufe der Arbeit wurden ein IMD40 und zwei Motoren als Defekt diagnostiziert und ersetzt.



Abbildung 4.3: Die PXI-Einheit des Positionssystems. In dem Chassis (PXI-1036 DC) ist der Controller (PXI-8146 RT) in Steckplatz 1 eingebaut, um in Echtzeit mit den Motoren arbeiten zu können. Die CAN-Schnittstellenkarte (PXI-8464/2-Serie 2) befindet in Steckplatz 4 und ermöglicht die unabhängige Steuerung beider Motoren. Die Counterkarte zur Datenerfassung (PXI-6602) ist in Steckplatz 5 zu sehen. Diese drei Module werden für die Motorsteuerung genutzt. Das Modul in Steckplatz 3 wird nicht benötigt.

Anschlussblock registriert. Die verschiedenen Signale sind immer genau einem Kanal zugeordnet, weshalb im Laufe dieser Arbeit ein Anschlussplan erstellt wurde, um die richtige Belegung der einzelnen Anschlüsse auch nach dem Aufbau am KIT in Karlsruhe garantieren zu können. Dieser Anschlussplan wurde von der Elektronischen Werkstatt in Münster in den Plan der gesamten Kryptonquelle integriert.

4.1.3 Schaltersysteme und Positionsauslesen

Für beide Bewegungsrichtungen gibt es jeweils ein Schaltersystem, bestehend aus 4 Schaltern für die horizontale Kippbewegung und 5 Schaltern für die vertikale Bewegung (siehe Abbildung 4.5). Die Schalter sind jeweils in einem Gehäuse zusammengefasst und erfüllen für beide Achsen die gleichen Aufgaben. Bei der **horizontalen Kippbewegung** sind die beiden äußeren Schalter die motorseitigen Endlagenschalter. Wie zuvor beschrieben wird die Bewegung gestoppt, sobald einer der beiden Schalter betätigt wird und blockiert den Motor, sodass keine weitere Bewegung möglich ist. Diese beiden Schalter begrenzen die fahrbare Strecke des Motors auf beiden Achsen. Die beiden mittleren Schalter werden als Positionsschalter genutzt und geben ein logisches Signal zurück. Die Auslese erfolgt über die Zählerkarte der PXI-Einheit softwareseitig (siehe Abbildung 4.4) und beeinflusst die Motorbewegung prinzipiell nicht.

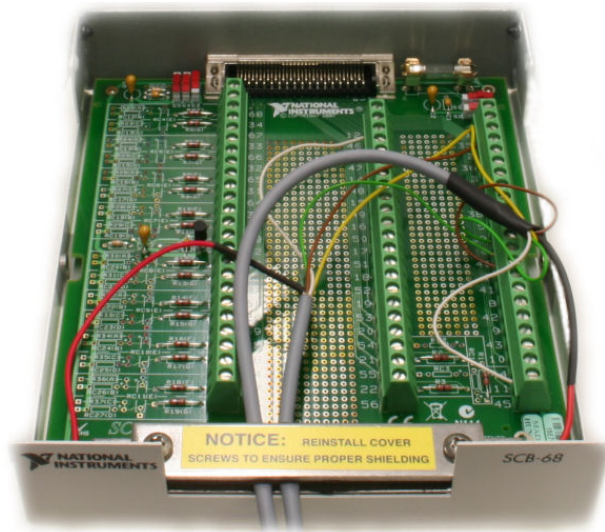


Abbildung 4.4: Die Zählerkarte SCB-68 ist über ein Kabel der Firma National Instruments mit dem Zählermodul verbunden. Die Signale der Positions- und Antastschalter, sowie die der Renishaw Messköpfe werden von der Zählerkarte erfasst und an das Modul weitergeleitet.

Die Positionsschalter werden dazu genutzt, den Mittelpunkt des Strahlrohrs nach einmaliger Justage bei jedem Programmstart mit gleicher Genauigkeit anfahren zu können. Bei perfekter Ausrichtung der Spektrometer und des Detektors ist die Mitte des Strahlrohrs äquivalent zur Detektormitte, allerdings ist im Realfall mit Abweichungen zwischen Detektor- und Strahlrohrmitte zu rechnen. Die Zielpositionen der Motoren, die über die Koordinaten der Detektorpixel angegeben werden entsprechen demnach Positionen im Strahlrohr. Die Konversionselektroniken treffen durch die ausrichtungsbedingten Abweichungen aber nicht zwingend den angestrebten Detektorpixel. Details zur

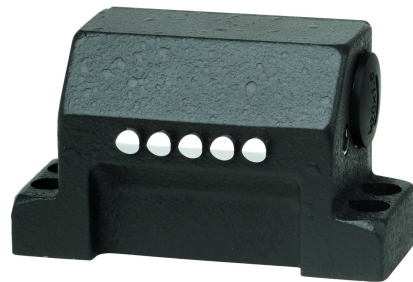


Abbildung 4.5: Schaltersystem der vertikalen Bewegungsachse. Die horizontale Achse besitzt das gleiche System mit 4 Schaltern, da bei der vertikalen Bewegung ein zusätzlicher Endlagenschalter nötig ist, falls der Zugang zur CPS geschlossen ist. Die Schalter 1, 4, 5 (von links) sind die Endlagenschalter und werden vom jeweiligen Positioniermodul ausgelesen. Die Signale der mittleren Schalter (Positionsschalter) werden softwareintern zur Anfahrt der Nullposition genutzt.

Anfahrt der Strahlrohrmitte werden in Kapitel 4.2 gegeben. Die Schalterbox für die Kippbewegung ist auf dem blauen Gestell fixiert (siehe Abbildung 3.2). Um die einzelnen Schalter auszulösen wurde eigens ein Bauteil entwickelt, dass an den kippbaren Teil des Gestells montiert ist und 4 in der Höhe verstellbare Taster besitzt. Durch Justage dieser Taster können die Endlagen- bzw. Positionsschalter in der richtigen Reihenfolge und an der richtigen Stelle der Verkipfung ausgelöst werden. Der CAD-Entwurf dieses Bauteils ist in Abbildung 4.7

rechts zu sehen.

Für die **vertikale Bewegung** ist die Schalterbox mit 5 Schaltern auf dem fahrbaren hellblauen Gestell montiert (vergleiche Abbildung 3.2) und bewegt sich so mit der Quelle mit. Während dieser Bewegung werden die Schalter durch 5 verstellbare, aber fest an den grünen Rahmen montierte Tasten ausgelöst. Wie bei der Kippbewegung sind auch an der vertikalen Achse die äußeren Schalter die Hardware-Endlagenschalter. Zusätzlich zu dem unteren Endlagenschalter, der die tiefste Position innerhalb der CPS angibt, die angefahren werden darf, gibt es noch eine weitere untere Begrenzung, für den Fall, dass das Ventil als Zugang zur CPS geschlossen ist. Hierbei darf das Substrat nicht auf die Ventilposition herab gefahren werden, da sowohl Ventil als auch Substrat im Falle einer Kollision beschädigt werden. Der zusätzliche 5. Schalter übernimmt genau diese Funktion und fungiert bei geschlossenem Ventil als unterer Endlagenschalter. Da das Positioniermodul aber nur insgesamt 2 Endlagenschalter auslesen kann (einen oberen und einen unteren) muss einer der beiden unteren Endlagenschalter überbrückt werden, je nachdem, ob das Ventil zur CPS geöffnet oder geschlossen ist. In Münster konnte dies über einen mechanischen Schalter direkt am Schaltergehäuse simuliert werden. Die beiden übrigen Schalter für die vertikale Bewegung sind die Positionsschalter, über die auch bei dieser Achse der Nullpunkt des Positionssystems, also die Strahlrohrmitte, angefahren wird.

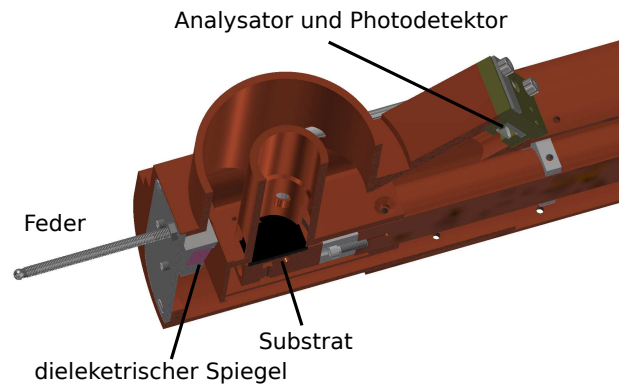


Abbildung 4.6: Querschnitt des Substratbereichs. Unterhalb des Substrats und außerhalb der Kaltschilde ist die als Antastschalter genutzte Feder eingezeichnet. Die Feder liegt auf einem Potential von 5 V. Diese Spannung bricht zusammen, sobald die Feder die Innenseite der CPS-Wand berührt. Außerdem ist das Substrat und verschiedene Optikkomponenten (ein dielektrischer Spiegel, sowie der Analysator und der Photodetektor) für die Laserellipsometrie zu sehen. Oberhalb des Substrats endet die Kapillare und gasförmiges Krypton gelangt durch eine Düse auf das Substrat.

Für die einmalige Justage der Positionsschalter der Motorsteuerung wird ein weiteres Signal über den SCB-68 I/O-Anschlussblock ausgelesen, das im Folgenden als **Antastschalter** bezeichnet wird. Der Antastschalter besteht aus einer Feder, die am unteren Ende des Kaltfingers, also unterhalb des Substrates, befestigt ist (Abbildung 4.6). Die Feder liegt für diesen Zweck auf einem Potential von 5 V, welches durch die Berührung mit der inneren CPS-Wand zusammenbricht. Der Abfall der Spannung kann dann als Betätigung des An-

tastschalter gesehen werden. Wie bei den Positionsschalter reagieren die Positioniermodule nicht auf dieses Signal, es wird ausschließlich durch die Steuerungssoftware ausgelesen. Der genaue Ablauf, der zur Anfahrt der Strahlrohrmitte führt ist in Abschnitt 4.2.1.1 in Verbindung mit dem zugehörigen Programm beschrieben.

Desweiteren werden Hardware-Endschalter oberhalb beziehungsweise unterhalb der Endlagenschalter beider Motoren installiert. Da es möglich ist die Endlagenschalter der Motoren zu überbrücken und es so passieren kann, dass diese überfahren werden, ohne dass die Motoren stoppen, sind die Hardware-Endschalter eine Absicherung, um die Quelle vor Schaden zu schützen. Diese Endschalter trennen bei Aktivierung die Stromversorgung der Positioniermodule und können nur manuell wieder deaktiviert werden. Somit ist sichergestellt, dass für den Fall eines Software-Fehlers die Motoren rechtzeitig gestoppt und nicht wieder automatisch in Gang gesetzt werden können.

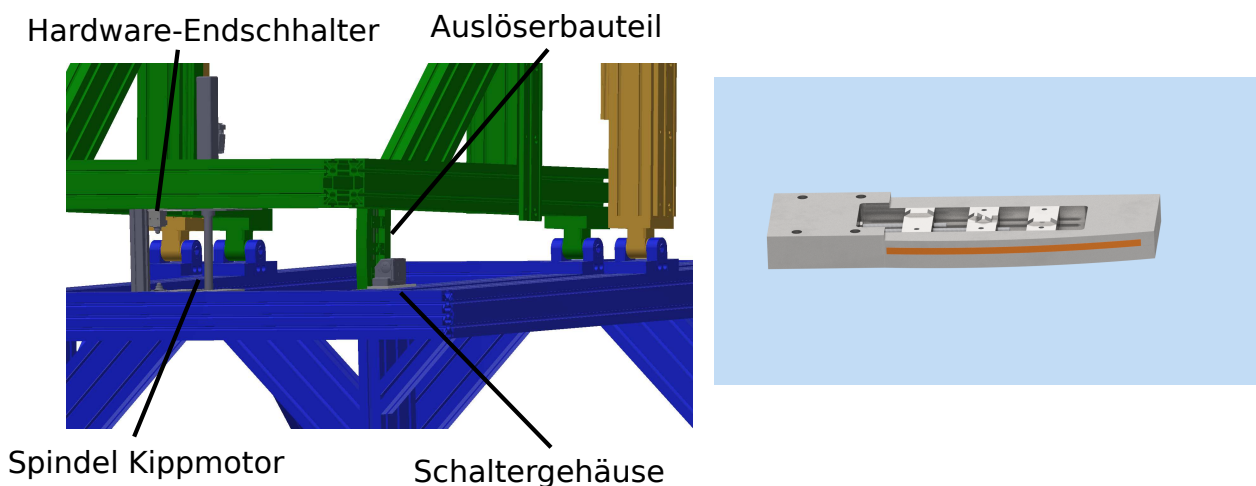


Abbildung 4.7: *links:* das Schaltersystem der Kippbewegung. Das Schaltergehäuse ist auf dem blauen Gestell montiert und bewegt sich dadurch nicht. Das Bauteil mit den Auslösern ist an dem grünen Rahmen fixiert und vollzieht die Kippbewegung mit. Außerdem sind die Spindel des Motors (der Motor selbst ist an der Innenseite des grünen Rahmens befestigt und wird hier davon verdeckt) und die Hardware-Endschalter, die den Motor bei Aktivierung von der Stromversorgung trennen eingezeichnet. Beide Rahmen (grün und ocker) sind über jeweils 2 Kippscharnieren mit dem blauen Gestell verbunden. *rechts:* CAD-Zeichnung des Auslöserbauteils für das horizontale Schaltersystem. Das Bauteil (in dieser Darstellung auf der Seite liegend) wird aufrecht und fest an das CKrS-Gestell montiert. Die vier Erhöhungen in der Mitte lösen aufgrund ihres Versatzes jeweils einen Schalter aus und sind in der Höhe verstellbar. Die beiden äußeren Erhöhungen lösen die Endlagenschalter aus, die mittleren dienen als Auslöser der Positionsschalter. Außerdem ist in Gold das Maßband für das Renishaw-Positioniersystem zu sehen. Der Messkopf wird kontaktfrei vor dem Maßband angebracht und führt die Kippbewegung der Quelle mit aus, während das Maßband dort fixiert ist.

Um die Genauigkeit der Positionsabnahme zu erhöhen wird für jede Bewegungsachse ein optisches Messsystem der Firma Renishaw verwendet (siehe Abbildung 4.8). Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus einem Abtastkopf und einem Maßband, die kontaktfrei

montiert werden. Dadurch kann das System zuverlässig über einen langen Zeitraum genutzt werden ohne zu verschleifen. Die Justage unterliegt allerdings verschiedenen Bedingungen. Der Abstand zwischen Messkopf und Maßband darf nur in einem Bereich zwischen 0,7 mm und 0,9 mm liegen und die Längsseiten des Messkopfes müssen parallel zu den Längsseiten Maßband angebracht werden. Das System erlaubt nur eine Abweichtoleranz von 1° in allen drei Raumrichtungen.

Die Kippbewegung wird mit einem Messkopf des Typs RGH41X und die vertikale Bewegung mit einem RGH41Y Messkopf vermessen. Beide Messköpfe erzeugen zwei um 90° verschobene Rechtecksignale sobald ein Inkrement auf dem Maßband überfahren wird. Der RGH41X weist eine Periode von $4\mu\text{m}$, der RGH41Y eine von $0,4\mu\text{m}$ auf. Die Signalanfänge haben durch die Phasenverschiebung einen Abstand von einer Viertel Periodenlänge, was zu einer Auflösung von $1\mu\text{m}$ beziehungsweise $0,1\mu\text{m}$ führt. Die Messköpfe werden über die Zählerkarte des PXI-Systems ausgelesen und bestimmen die absolute Position des Substrats. Bei der Anfahrt verschiedener Zielpositionen muss berücksichtigt werden, dass der Motor, sowohl bei der aktuellen Position, als auch bei der Verarbeitung der neuen Positionsangabe, mit den Werten seines internen Encoders arbeitet. Ein Abgleich mit dem genaueren Wert der Messköpfe ist also zwingend erforderlich und wird von der Motorsteuerung übernommen. Details hierzu folgen in Abschnitt 4.2.1.

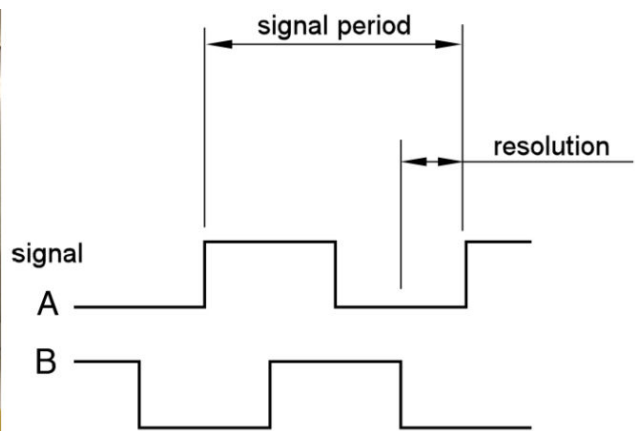


Abbildung 4.8: Links: Linearmesskopf der Firma Renishaw mit goldenen Maßband. Die grüne LED auf der Stirnseite des Messkopfes zeigt eine korrekte Justage an. Rechts: Die beiden um 90° verschobenen Signale, die erzeugt werden, sobald ein Inkrement des Maßbandes überfahren wird. Eingezeichnet sind die Signalperiode und die daraus resultierende Auflösung der Messköpfe.

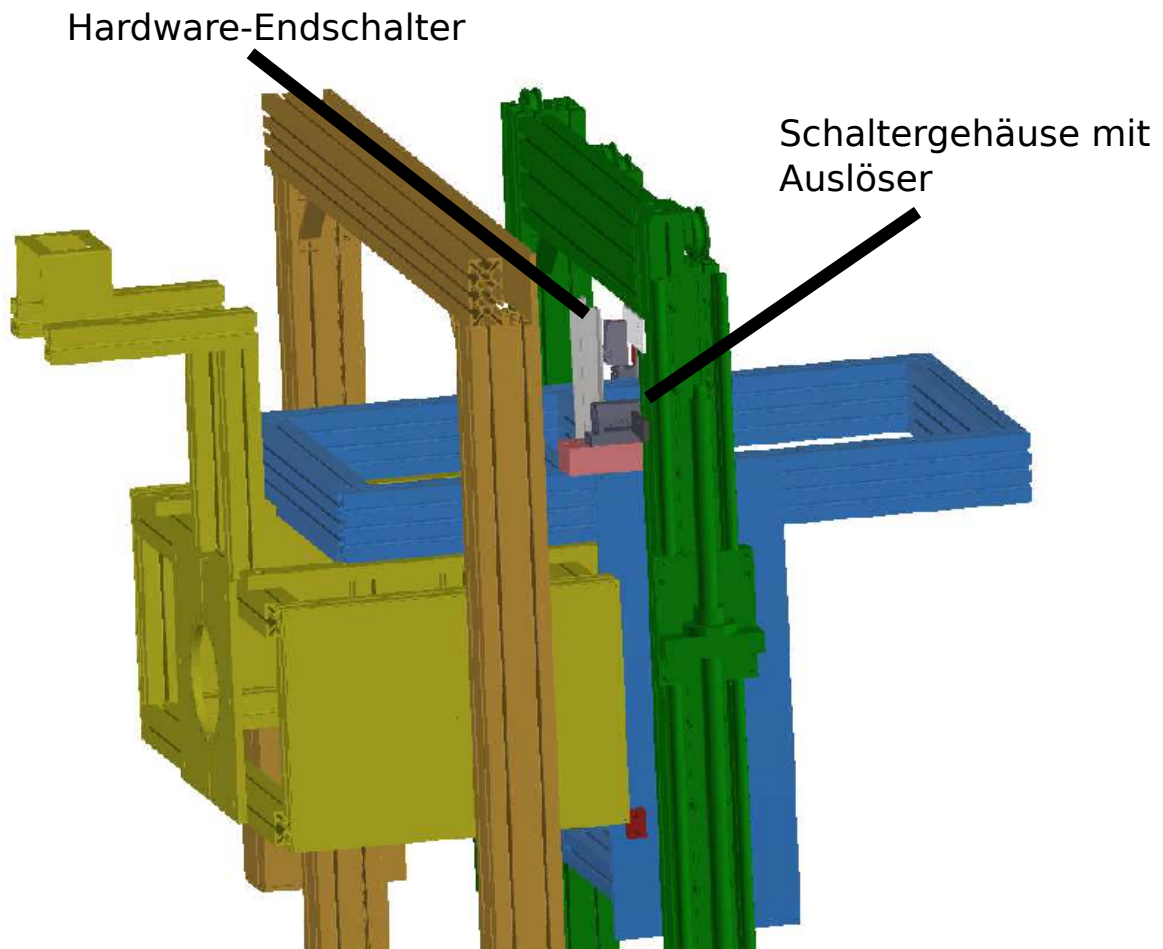


Abbildung 4.9: Verkipptes Gestell der Kryptonquelle. Markiert ist das Schaltergehäuse (montiert auf dem hellblauen Gestell) mit einem Auslöser auf gleicher Höhe angebracht. Vier weitere Auslöser sind an dem grünen Rahmen befestigt, auf dieser Zeichnung aber nicht zu sehen. Diese Auslöser haben jeweils einen größeren Abstand zum Rahmen, um die unterschiedlichen Schalter auszulösen. Die Spindel der vertikalen Bewegung ist an der Vorderseite des grünen Rahmens angebracht. Stromunterbrechende Hardware-Endschalter sind oberhalb und unterhalb des jeweiligen motoreigenen Endlagenschalters zur Sicherheit angebracht. Rechts unten am grünen Rahmen ist das Motor- und Schaltersystem der Kippbewegung angebracht. Der ockerfarbene Rahmen verkippt sich parallel zum grünen. Beide sind im unteren Bildbereich über Kippscharniere mit dem blauen Gestell verbunden.

4.2 Software

Der zweite Teil des Positionssystems besteht aus dem Motorsteuerungsprogramm, dessen Programmierung der Hauptbestandteil dieser Arbeit war. In der Diplomarbeit von Richard Bottesch aus dem Jahr 2012 [Bot12] ist eine Motorsteuerung vorgestellt, die an einem Testaufbau entwickelt wurde, als die CKrS noch in horizontaler Position betrieben wurde. Diese Motorsteuerung ist mit dem Programmiersystem LabView2013 von *National Instruments* geschrieben und wurde mit Hilfe der größtenteils gleichen Hardware erfolgreich getestet. Der volle Umfang der benötigten Funktionen konnte zu dem Zeitpunkt allerdings noch nicht abgesehen werden, sodass bei der Weiterentwicklung des Aufbaus bis hin zum Umbau in die vertikale Position der CKrS notwendigerweise eine neue Motorsteuerung geschrieben werden musste. Das Konzept der Motorsteuerung von 2012 konnte für die neue Version übernommen werden, sodass sich das „Gerüst“ des Programms nur geringfügig geändert hat. Für die Unterprogramme war allerdings eine komplette Umstrukturierung notwendig und auch neue Funktionen mussten entwickelt und programmiert werden. An den betreffenden Stellen wird im Verlauf dieses Kapitels auf die notwendigen Änderungen genauer eingegangen.

Zunächst soll jedoch auf die genutzte Software allgemein eingegangen werden. Ein LabView-Programm besteht aus einem Frontpanel, das die Benutzeroberfläche eines jeden Programms darstellt und einem dazugehörigen Blockdiagramm, welches den eigentlichen Programmcode enthält. Um die portierbaren Programmteile der alten Motorsteuerung weiterhin nutzen zu können ist auch die neue Software mit LabView2013 programmiert. Das Programm ist ein sogenanntes „Real Time Project“, welches von LabView selbst bereitgestellt wird. Durch die Nutzung des Real Time Moduls in Verbindung mit dem Real Time Project ist eine kontinuierliche Kommunikation zwischen Positioniermodul und PXI-System möglich. Da beispielsweise während einer Positionsfahrt dauerhaft Daten ausgelesen werden, ist diese ununterbrochene Kommunikation notwendig. In dem Real Time Project sind die Hauptprogramme, sämtliche Unterprogramme, sogenannte Sub-VIs, und lokale beziehungsweise globale Netzwerkvariablen gespeichert. Die genutzten Bibliotheken, wie die CanOpen-Bibliothek, sind auch in den Projektexplorer eingebunden (siehe Abbildung 4.10). Über eine IP-Adresse kann die Verbindung zwischen PXI-Einheit und PC hergestellt werden. Ohne Verbindung zwischen PC und PXI-Einheit können die Programme zwar ausgeführt werden, die Befehle werden aber nicht weitergeleitet, sodass keine Möglichkeit zur Motorsteuerung besteht.

Das Projekt selbst trägt den Namen **Motorsteuerung.lvproj**. Bei bestehender Verbindung zwischen dem PXI-System und den Positioniermodulen kann, je nach gewünschtem Betriebsmodus zwischen 3 Hauptprogrammen gewählt werden. Zur absoluten Kalibration der Nullpunkte beider Bewegungsachsen wird das Programm **Antasten.vi** genutzt.

Mit dem zweiten Programm (**Steuerung_lineare_Bewegung.vi**), können den Motoren

direkte Auslenkungen als Zielposition übergeben werden. Eine Umrechnung auf der horizontalen Achse von linearer Motorauslenkung zu Kippwinkel findet in diesem Programm nicht statt. Die Hauptaufgabe dieses Programms ist vor allem die Überprüfung der Verkabelung und Motorfunktion, indem bei geschlossenem CPS-Ventil kleinere Strecken gefahren werden. Hierbei ist bei der Kippachse zu beachten, dass die Endlagenschalter nicht für diesen Bereich justiert sind. Sie begrenzen die maximale Verkippung innerhalb des Flussschlauchs. Oberhalb des CPS-Ventils ist nur eine Verkippung von weniger als 20 mm erlaubt, da sonst die Kaltschilde und das Substrat beschädigt werden. Im Laufe dieser Arbeit konnte die Hardware des Positionssystems erfolgreich in Karlsruhe in Betrieb genommen und mit Hilfe dieses Programms getestet werden. Über das Ansprechen sämtlicher Endlagen-, Positions- und Hardware-Endschalter hinaus konnte die Quelle über kleine Strecken gefahren werden. Das Auslösen der Schalter wurde in dem Fall manuell vorgenommen, da nur der Bereich oberhalb des CPS-Ventils freigegeben war.

Das dritte und letzte Programm (**Steuerung_komplett_v2.vi**) ist das Hauptprogramm bei Kalibrationsmessungen. Nach Abschluss der gesamten Justage des Nullpunktes und der Endlagenschalter mit den oben beschriebenen Programmen können hierbei Positionen im Strahlrohr angefahren werden, indem ausgehend vom Bullseye des Detektors Radius und Winkel des Ziel-Detektorpixels angegeben werden. Die Software übernimmt die Umrechnung in Zielpositionen für beide Motoren, die aufgrund des Übergangs von zwei linearen Bewegungen, die durch die Motoren durchgeführt werden in eine lineare und eine Kippbewegung nicht identisch sind. Im folgenden werden sowohl die Benutzeroberflächen der drei Hauptprogramme, als auch der konzeptionelle Aufbau der Programme vorgestellt.

4.2.1 Benutzeroberflächen

Aufgrund der drei verschiedenen Betriebsmodi der Motorsteuerung wurden unterschiedliche Hauptprogramme geschrieben, die je nach Bedarf verwendet werden können. Anhand der Benutzeroberflächen sollen die Funktionen vorgestellt und so auch die Unterschiede zwischen den Programmen aufgezeigt werden.

4.2.1.1 Die Antastfahrt

Ziel der Antastfahrt ist die genaue Bestimmung der Nullposition des Substrats. Die Nullposition soll im Verlauf der Kalibrationsmessungen mit der Mitte des Strahlrohrs übereinstimmen und reproduzierbar genau angefahren werden.

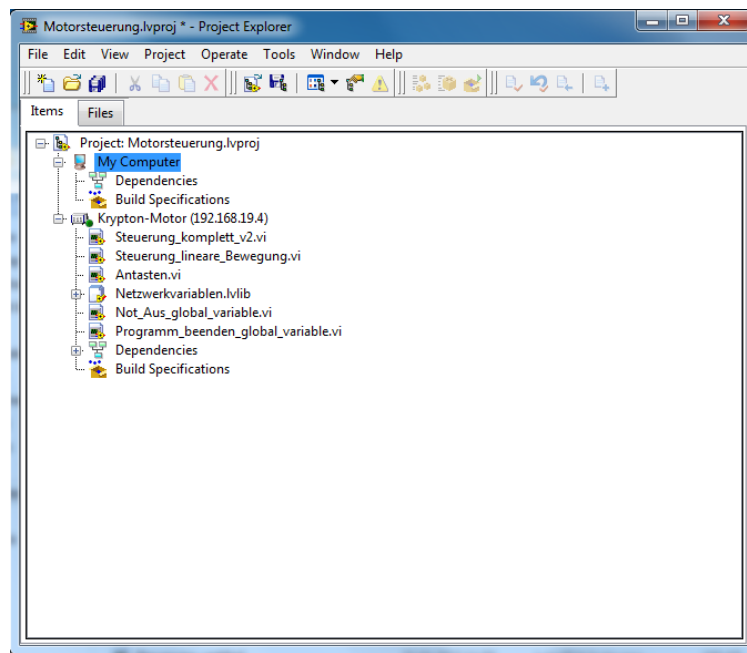


Abbildung 4.10: Ansicht des LabView Live Projekts im Project Explorer. Über die IP-Adresse kann der PC mit dem PXI-System (hier: Krypton-Motor) verbunden werden. Dies wird durch die grüne Lampe am PXI-Symbol angezeigt. Auf der PXI-Einheit befinden sich dann die drei Steuerungsprogramme `Steuerung_komplett_v2.vi`, `Steuerung_lineare_Bewegung.vi` und `Antasten.vi`. Außerdem sind dort die genutzten Netzwerkvariablen in `Netzwerkvariablen.lvlib` und die globalen Variablen (`Not_Aus_global_variable.vi` und `Programm_beenden_global_variable.vi`) als eigenes Programm gespeichert. In dem Reiter „Dependencies“ befinden sich die genutzten Bibliotheken und die Sub-VIs. Der Computer selbst („My Computer“) dient nur als Benutzeroberfläche, sodass dort keine Programme gespeichert sind.

Nach einmaliger Justage der Positionsschalter mit Hilfe des Programms *Antasten.vi* ist in *Steuerung_komplett_v2.vi* eine Routine eingebaut, die das Anfahren und Setzen des Nullpunktes für beide Bewegungsachsen ermöglicht. Diese Justage funktioniert über den Antastschalter, der aus einer Feder besteht, unterhalb des Substrats montiert ist und auf einem Potential von 5 V liegt. Beim Absenken der Quelle in den Flussschlauch berührt die Feder somit als erstes die untere Wand. Die Berührung der CPS-Wand führt zum Einbruch der Spannung, was als Stopp-Signal für die Software dient. Um die CPS-Wand nicht zu beschädigen wird die Antastfahrt bei geringer Geschwindigkeit durchgeführt. Nachdem diese Position erreicht ist werden die bekannten Abmessungen der CPS genutzt um die Strahlrohrmitte anzufahren. Diese Prozedur ist aufgrund einer eingebauten Antastdose im inneren der CPS unterhalb der unverkippten Kryptonquelle (siehe Abbildung 4.11) und der Länge und Position der Feder für beide Achsen mit nur einem Signal realisierbar. Ist die Strahlrohrmitte erreicht können manuell die Taster der Positionsschalter symmetrisch montiert werden.

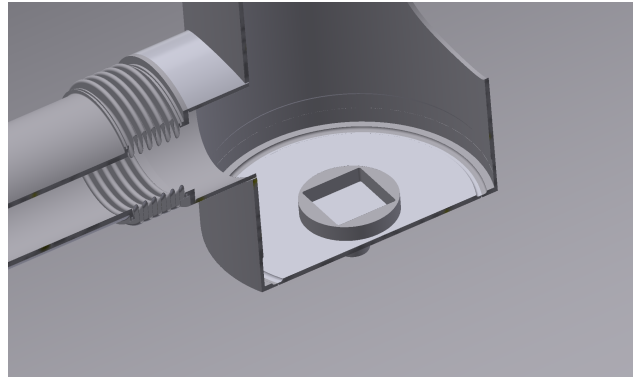


Abbildung 4.11: CAD-Zeichnung der Antastdose unterhalb der CKrS. Das innere Quadrat der Erhöhung am Boden der CPS hat eine Seitenlänge von $a = 50$ mm und eine Höhe von $h = 10$ mm. Bei der Kippbewegung der Antastfahrt wird diese Erhöhung vom Antastschalter berührt, wodurch das angelegte Potential zusammenbricht, was dem Auslösen des Schalters entspricht.

Abbildung 4.12 zeigt die Benutzeroberfläche des **Antastfahrt.vi**. Die grün unterlegten Felder auf der linken Seite sind Standardwerte zur Erzeugung eines Interfaces des CanOpen-Protokolls. Außerdem muss ein Servicedatenobjekt (SDO) innerhalb dieses Interfaces erstellt werden, um Lese- und Schreibbefehle an das Positioniermodul zu übermitteln (mehr dazu in 4.2.3). Diese Parameter müssen nicht verändert werden und sind in der Regel auf den Benutzeroberflächen ausgeblendet, der Übersicht halber hier aber einmal gezeigt. Ebenso sind die drei Positionsauslesen auf der rechten Seite (Position 1/2 horizontal [mm] und Abstand horizontale Taster [μ m]; hier in gelb unterlegt) eigentlich ausgeblendet, da diese während der Programmierung nur zur Überprüfung dienten. Innerhalb des Programms werden diese Werte aber zur Berechnung des horizontalen Nullpunkts bzw. als Zielposition nach dem zweiten Antastsignal genutzt. Der mittlere Teil ist der wesentliche Bereich für den Anwender. Hier wird der vertikale Abstand zwischen Position des Antastsignals und der Strahlrohrmitte in dem Feld „Abstand Taster-Bullseye vertikal [μ m]“ gesetzt. Außerdem muss das Programm über „Antasten Starten“ gestartet werden. Zur Sicherheit wird die horizontale Position über

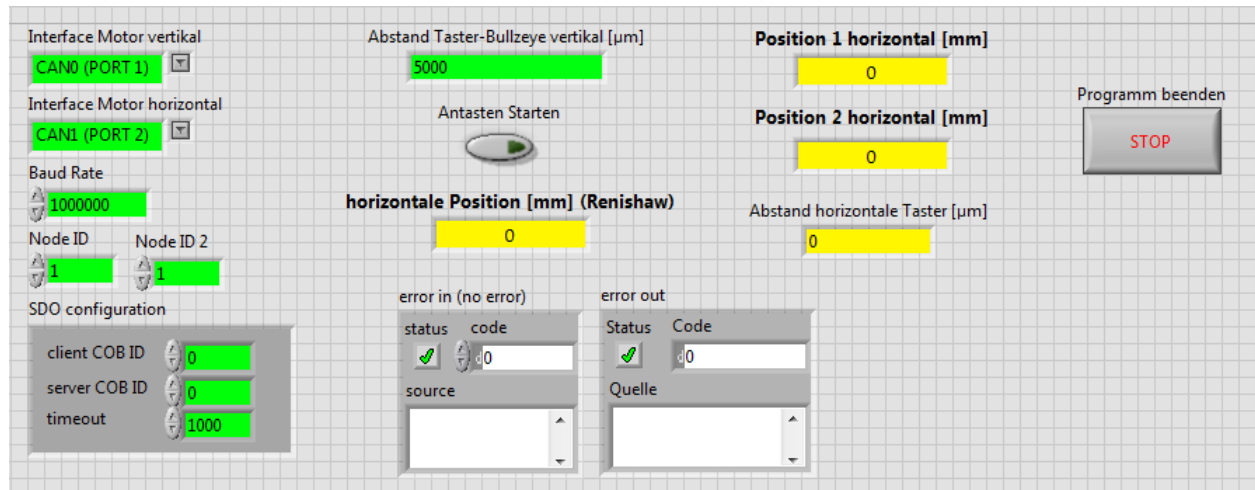


Abbildung 4.12: Die Benutzeroberfläche des Programms Antastfahrt.vi. Auf der linken Seite werden die Parameter für das CanOpen-Interface und für das Erstellen eines Servicedatenobjekt zur Kommunikation zwischen PXI-Einheit und IMD-Positioniermodul eingestellt. Im mittleren Bereich wird der vertikale Abstand zwischen Position des Antastsignals und der Strahlrohrmitte in dem Feld „Abstand Taster-Bullseye vertikal [μm]“ angegeben. Über das Bedienelement „Antasten Starten“ wird die automatisierte Positionierung im Strahlrohrmittelpunkt gestartet. Über die gelb unterlegten Felder lassen sich die aktuelle Position des Renishaw Messkopfes („horizontale Position [mm] Renishaw“), die Positionen der horizontalen Positionsschalter „Position 1/2 horizontal [mm]“ und der Abstand der horizontalen Positionsschalter („Abstand horizontale Taster [μm]“) auslesen. Ein weiteres Bedienelement um das Programm zu beenden ist rechts zu sehen.

den Renishaw-Messkopf dauerhaft ausgelesen. Dieser Wert wird in dem Feld „horizontale Position [mm] Renishaw“ angezeigt. Nach Eingabe des Abstands und starten des Programms läuft folgende Routine ab:

1. 1. Antasten vertikal

Die Quelle wird mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/s abgesenkt, bis es zu einer Berührung der Feder mit der Innenwand der CPS kommt. Bei Berührung zwischen Feder und Wand stoppen die Motoren und der Motorencoder des EC86L wird auf 0 gesetzt. Danach wird die Quelle vertikal um 5 mm angehoben. Auf dieser Höhe ist das vertikale Antasten aufgrund der Antastdose möglich.

2. Antasten horizontal

Die Quelle wird zunächst mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/s in eine Richtung verkippt, bis auch hier das Stopp-Signal durch den Spannungsabfall registriert wird. Der Motorencoder des EC60L wird auf 0 gesetzt und die Verkipfung wird in die andere Richtung gestartet. Da die Abmessungen bekannt sind, kann zunächst eine Strecke von 2 cm bei einer höheren Geschwindigkeit von 2 mm/s gefahren werden. Das Antasten an die gegenüberliegende Wand der Antastdose erfolgt dann wiederum mit 0,1 mm/s.

Erneut wird der Motor bei Berührung der Feder gestoppt und der Abstand zwischen erstem und zweiten Stopp-Signal ausgelesen und die Quelle wird auf die Hälfte der Distanz zurück gekippt. Somit ist der Nullpunkt auf horizontaler Achse erreicht.

3. 2. Antasten vertikal

Zu Beginn des Programms ist nicht sichergestellt, dass die Kryptonquelle unverkippt ist. Dies ist durch die Anfahrt der Strahlrohrmitte der horizontalen Achse gegeben, sodass die Antastfahrt in vertikaler Richtung wiederholt wird. Diesmal wird die Quelle nach dem Stopp-Signal um den bekannten Abstand zwischen unterer Wand und Nullposition bezogen auf das untere Federende gehoben. Dieser Wert kann bei möglichen Änderungen des Aufbaus manuell durch den Benutzer angepasst werden, in dem der Wert „Abstand Taster-Bullseye vertikal [μm]“ auf der Benutzeroberfläche geändert wird. Nach diesem Schritt hat die Quelle ihre Nullposition in beiden Achsen erreicht und die Positionsschalter können montiert werden.

4.2.1.2 Programm zur Detektorpixel-Anfahrt

Der Unterschied zwischen den Programmen **Steuerung_lineare_Bewegung.vi** (Details dazu in Kapitel 4.2.1.3) und **Steuerung_komplett_v2.vi** besteht in der Umrechnung der linearen Motorbewegungen in die Auslenkung der Quelle durch die Verkipfung. Diese Umrechnung ist notwendig, um die Positionen der Detektorpixel, die ausgehend von der Detektormitte in Polarkoordinaten angegeben sind, anzufahren². Ohne diese Umrechnung ist der genaue Winkel der Verkipfung nicht zu bestimmen. Im eigentlichen Betrieb der Kryptonquelle wird das Programm **Steuerung_komplett_v2.vi** genutzt, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Abbildung 4.13 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms. Nach dem Start werden beide Motoren initialisiert und das System ist betriebsbereit. Als Anzeige dient eine Kontrollleuchte im oberen Bereich (**Betriebsbereit**). Während der Ausführung der einzelnen Funktionen erlischt diese, sodass sich der Benutzer immer über den aktuellen Zustand des Positionssystems auch ohne direkten visuellen Zugang zur Quelle im Klaren ist.

Vor sämtlichen Messungen müssen die Positioniermodule zunächst den Mittelpunkt des Flussschlauchs als Nullpunkt übergeben bekommen, da bei Systemstart die aktuelle Position als Nullpunkt angenommen wird. Diese Einstellungen werden auf der linken Seite der Benutzeroberfläche vorgenommen. Der Bereich beinhaltet ein Menü **Nullpunktsuche** zur Wahl zwischen zwei verschiedenen Nullpunktsuchen, zwei Bedienelemente **Nullpunktsuche**

²Zur Erinnerung: Es werden Positionen im Strahlrohr angefahren, die bei perfekter Ausrichtung der Spektrometer und des Detektors den Detektorpixeln entsprechen.

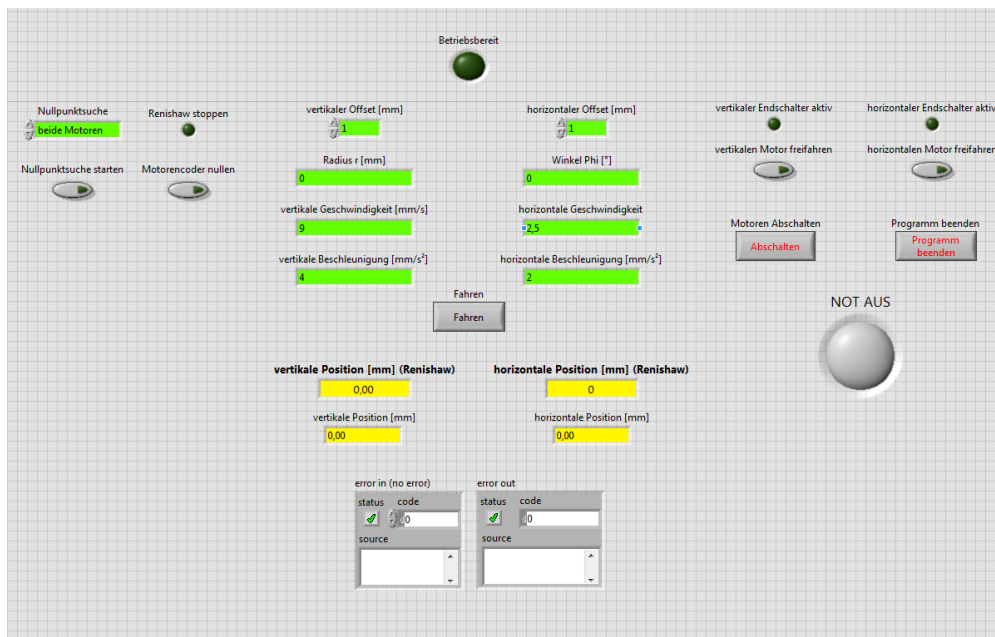


Abbildung 4.13: Benutzeroberfläche der Software Steuerung_komplett_v2.vi zur Positionierung des Substrats während der Kalibrationsmessungen. Die Anzeige „Betriebsbereit“ gibt den Zustand der Positioniermodule an. Bei den grün unterlegten Feldern handelt es sich um die Benutzereingaben. Dazu zählen die Achsen für die Nullpunktsuche auf der linken Seite, die über das Bedienelement „Nullpunktsuche starten“ gestartet werden kann und mittig auf der Oberfläche die Einstellungen für den Offset, den Zielradius, den Kippwinkel des Detektorpixels, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung für beide Bewegungsachsen. Über das Bedienelement „Fahren“ werden die eingegebenen Parameter verarbeitet und die Positionsfahrt gestartet. Die gelb unterlegten Felder im unteren Bereich entsprechen den Positionsauslesen der beiden Renishaw-Messköpfe und der Motorencoder. Der rechte Bereich beinhaltet die Statusanzeigen der Endlagenschalter beider Achsen mit den dazugehörigen Bedienelementen zur Freifahrt aus diesen Schaltern und drei weitere Elemente zum Abschalten der Motoren, zum Beenden des Programms und zum Starten der Not-Aus-Prozedur, die beide Motoren stoppt und bei maximaler Geschwindigkeit in die Parkposition fährt.

starten und **Motorencoder und Reni nullen** und eine Kontrollleuchte **Renishaw werden gestoppt**. Das Menü bietet eine Nullpunktsuche automatisiert für beide Achsen, diese Option ist in Abbildung 4.13 gewählt, oder eine Nullpunktsuche nur für die vertikale Achse (**vertikaler Motor**). Durch verschiedene Maßnahmen ist sichergestellt, dass die CKrS unverkippt ist, wenn sie sich in der Position oberhalb der CPS befindet. Dadurch ist es nach Öffnung des Zugangs zur CPS jederzeit möglich, den vertikalen Nullpunkt anzufahren. Ist das Ventil zur CPS geschlossen, ist der untere Endlagenschalter aktiv, der einen Zusammenstoß von Kaltfinger und CPS-Ventil verhindert. Dadurch wird der Motor spätestens auf der Höhe des Endlagenschalters gestoppt. Ist der Zugang geöffnet, so wird dieser Schalter überbrückt, und der eigentliche untere Endlagenschalter ist aktiv.

Da nur auf Höhe des Flussschlauches genug Platz für die komplette Kippbewegung ist, gibt es keine Möglichkeit, die Nullpunktsuche für diese Achse einzeln zu starten. Oberhalb des Flussschlauchs würde das äußere Kaltschild mit den Innenwänden der Quelle kollidieren, bevor die Positionsschalter auslösen. Dementsprechend wird auch bei der Nullpunktsuche für beide Achsen zunächst der vertikale und im Anschluss der horizontale Nullpunkt angefahren. Mit dem Bedienelement „Nullpunktsuche starten“ wird wie bei der Antastfahrt ein Programmablauf gestartet, der sich wie folgt gliedern lässt:

1. oberen Endlagenschalter anfahren

Da die Taster der Positionsschalter eine gewisse Ausdehnung haben macht es bei der Signalerfassung einen Unterschied aus welcher Richtung diese angefahren werden. Es ist sinnvoll beide Schalter gleich anzufahren. Ist dies sichergestellt, so kann die Ausdehnung der Taster bei der Berechnung der Mittelposition vernachlässigt werden. Es wird also ein Startpunkt benötigt, der zu Beginn der Nullpunktsuche immer an der gleichen Position ist. Hierfür wird der obere Endlagenschalter verwendet. Dieser wird zu Beginn der Prozedur mit einer Referenzfahrt angefahren. Die Referenzfahrt sucht den gewählten Endlagenschalter und positioniert den Motor ein Encoderinkrement unterhalb des Schalters und der Motorencoder wird dort auf null gesetzt. Dadurch dass der Schalter in dieser Position nicht ausgelöst ist, ist der Motor betriebsbereit.

2. grobe Positionsanfahrt

Um die Motoren möglichst direkt zu stoppen, sobald das Signal eines Positionsschalters registriert wird, wird die Anfahrt der Schalter bei geringen Geschwindigkeiten durchgeführt. Da das Substrat zwischen dem oberen Endlagenschalter und dem Bereich der Strahlrohrmitte eine Strecke von ungefähr 1,5 m zurücklegen muss, findet zunächst eine grobe Anfahrt statt, die den Programmablauf beschleunigt. Eine Strecke von 1,45 m wird dazu bei einer Geschwindigkeit von $5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ zurückgelegt.

3. unteren Positionsschalter anfahren

Die Geschwindigkeit wird hier auf $2 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ gedrosselt, die Fahrtrichtung aber beibehalten. Wird das Signal des unteren Positionsschalters registriert stoppt der Motor sofort und der Wert des Motorencoders (P_1) wird gespeichert.

4. oberen Positionsschalter anfahren

Daraufhin wird die Fahrtrichtung geändert, wobei die Geschwindigkeit bei $2 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ bleibt, um auch bei der Suche nach dem oberen Positionsschalter die Genauigkeit beizubehalten. Der Motor stoppt erneut direkt bei Signalregistrierung und auch diese Position wird übernommen (P_2).

5. Nullposition anfahren

Mit Hilfe der beiden gespeicherten Werte und der aktuellen Position (P_{temp}) lässt sich dann die Position der Strahlrohrmitte (P_{Mitte}) über

$$P_{\text{Mitte}} = P_{\text{temp}} - \frac{P_1 - P_2}{2} \quad (4.1)$$

berechnen. Das Vorzeichen wird durch die Fahrtrichtung bestimmt, ausgehend von der Nullposition führen positive Zielpositionen zur Anhebung des Substrates, negative Positionen zur Absenkung.

Die berechnete Position P_{Mitte} wird nach der Berechnung als neue Zielposition übergeben und angefahren.

6. Nullposition übernehmen

Der letzte Schritt ist die Festlegung der aktuellen Position als Nullposition. Dem motorinternen Encoder kann über einen Befehl die aktuelle Position als Referenzpunkt übergeben werden, wodurch der Motorencoder genullt wird. Die Renishaw-Messköpfe werden neu gestartet, wodurch auch diese den Wert null annehmen.

Der beschriebene Ablauf entspricht der Option „vertikaler Motor“. Soll für beide Achsen der Nullpunkt gesetzt werden, so schließt sich eine ähnliche Prozedur für die horizontale Achse an. Hierbei wurden nur die Signalkanäle geändert, um sensitiv für die korrekten Positionsschalter zu sein und die Strecke und Geschwindigkeit der groben Anfahrt (Punkt 2) werden an die Achse angepasst. Bei einer Geschwindigkeit von $2,5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ wird eine Strecke von 18 mm gefahren, um den Bereich des Mittelpunktes ausgehend vom oberen Endlagenschalter bei der Verkipfung zu erreichen.

Mit dem Bedienelement **Motorencoder und Reni nullen** kann der letzte Schritt (Punkt

6) manuell durchgeführt werden. Um die Fahrbereitschaft der Motoren oder auch die Funktionsfähigkeit der Software zu überprüfen ist es sinnvoll, eine kleine Strecke pro Achse als Test abzufahren. Haben Motorencoder und Renishaw-Messsystem aber zwei unterschiedliche Nullpunkte und dadurch zwei verschiedene Positionen gespeichert (beispielsweise nach einem Programmabsturz) so gibt es ein Problem mit dem Feinabgleich, der nach jeder Positionsfahrt für beide Achsen durchgeführt wird (Details zum Feinabgleich folgen). Durch vorheriges nullen der Motorencoder und der Messköpfe tritt dieses Problem nicht auf.

Der mittlere Bereich der Benutzeroberfläche dient zur Kontrolle der Motorbewegungen. Hier sind grün unterlegt sämtliche Parameter zu sehen, die vom Benutzer eingegeben werden können. Es handelt sich zunächst mal um einen Toleranzbereich, der angibt, welchen Wert die Differenz zwischen Zielposition und Renishaw-Messsystem nicht überschreiten darf. Dieser Toleranzbereich wird über die Eingabefelder **vertikaler Offset** und **horizontaler Offset** angegeben. Ein Unterschied zwischen eigentlicher Zielposition ($Ziel_{alt}$) und aktueller Messkopf-Position ($Ren_{aktuell}$) nach der Positionsanfahrt entsteht, aufgrund der größeren Genauigkeit der Renishaw-Messköpfe. Nach absolvierter Fahrt werden beide Werte miteinander verglichen. Liegt die Renishaw-Position außerhalb des Toleranzbereichs, so wird automatisch eine neue Zielposition ($Ziel_{neu}$) berechnet und angefahren. Mit Hilfe der Formel

$$Ziel_{neu} = (Ziel_{alt} + Offset) + (Ziel_{alt} - Ren_{aktuell}) \quad (4.2)$$

ist sichergestellt, dass die neue Position dann innerhalb der Toleranz liegt.

Desweiteren können die Zielpositionen r in mm und φ in ° angegeben werden. Diese entsprechen Positionen im Strahlrohr, denen einzelne Detektorpixel zugeordnet werden können. Für die Geschwindigkeiten beider Achsen in $\frac{mm}{s}$ und die Beschleunigungen in $\frac{mm}{s^2}$ sind 4 weitere Eingabefelder vorhanden. Diese Parameter werden durch Betätigung des Schalters **Fahren** übernommen und die Motoren starten die Positionsfahrt. Während der Fahrt messen die Renishaw-Messköpfe dauerhaft die zurückgelegte Strecke. Diese Werte können in den gelb unterlegten Feldern **vertikale Position [mm] Renishaw** und **horizontale Position [mm] Renishaw** abgelesen werden. Nach Erreichen der Zielposition wird der Motorencoder ausgelesen und die Position an die Anzeigefelder **vertikale Position [mm]** und **horizontale Position [mm]** übergeben.

Weitere Funktionen können im rechten Bereich der Oberfläche gestartet werden. Das Bedienelement **Motoren stoppen** trennt die Motoren von der Stromversorgung, wodurch sie beispielsweise manuell bewegt werden können. Bei Notfall-Tests wurde überprüft, ob die Motoren mit Hilfe einer Bohrmaschine über das Getriebe bewegt werden können. Sind die Motoren mit Strom versorgt so blockieren sie, was eine manuelle Bewegung unmöglich macht.

Das Programm selbst läuft auch bei abgeschalteten Motoren weiter und startet diese bei Bedarf wieder, sodass die gesamte Software nicht neu gestartet werden muss, nachdem man die Motoren gestoppt hat. Anders verhält es sich mit dem Bedienelement **Programm beenden**. Dieses führt zum Abbruch sämtlicher interner Schleifen und beendet das Programm komplett. Zuvor wird die Quelle allerdings noch senkrecht gekippt, sodass beim nächsten Programmstart immer von einem Kippwinkel von 0° ausgegangen werden kann, sofern das Programm ohne Fehler beendet wurde.

Sollte sich einer der Motoren in einer seiner Endlagen befinden, so wird dies über die Kontrollleuchten **vertikaler Endschalter aktiv** und **horizontaler Endschalter aktiv** angezeigt. Bei Tests in Münster konnte dieser Zustand an den LEDs der Positioniermodule abgelesen werden. Das ist in Karlsruhe nicht mehr möglich, sodass eine Anzeige auf der Benutzeroberfläche notwendig ist. Über das Bedienelement **vertikaler Motor freifahren** wird der Motor solange in die entgegengesetzte Richtung bewegt, bis der Endlagenschalter nicht mehr aktiviert und der Motor wieder betriebsbereit ist. Da beide Endlagenschalter unterschiedliche Signale liefern, wird die Richtung zum frei fahren automatisch gewählt und muss nicht vom Anwender eingegeben werden. Die gleiche Funktion ist auch für die horizontale Achse über **horizontaler Motor freifahren** nutzbar.

Die letzte Funktion die die Software bereit stellt ist die **Not-Aus** Funktion. Diese wird über den entsprechenden Knopf gesteuert und soll in Situationen wie beispielsweise einem Druckabfall in der CPS das Substrat direkt in die Parkposition oberhalb des Zugangsventils (im weiteren CPS-Ventil genannt) fahren. Wird der Not-Aus Knopf betätigt, so wird unabhängig des aktuellen Zustands des Systems, also egal ob gerade eine Aktion ausgeführt wird, oder der Motor auf neue Befehle wartet, die Quelle senkrecht gekippt und gleichzeitig mit maximaler Geschwindigkeit nach oben gefahren. Da die Distanz zwischen dem Strahlrohr und dem Bereich oberhalb des Ventils bekannt ist, kann prinzipiell grob in diesen Bereich gefahren werden, oder es wird eine fiktive Distanz oberhalb des oberen Endlagenschalters angegeben, sodass der Motor erst durch den Endlagenschalter gestoppt wird. Diese Überlegungen waren noch nicht abgeschlossen, werden aber softwareintern gelöst und betreffen den Anwender nicht. Desweiteren soll in Karlsruhe ein zusätzliches Signal eingebaut werden, dass das Betätigen des Not-Aus Knopfes ersetzt und im Notfall vom KATRIN-System an die Motorsteuerungssoftware gesendet wird. Da die Auslese dieses Signals sich nicht von der Auslese der anderen Signale (Positionsschalter, Antastschalter) unterscheidet, sollte die Programmierung vor Ort kein Problem darstellen.

Der Einbau dieser Not-Aus Funktion führte allerdings dazu, dass sämtliche Sub-VIs, die die eigentlichen Funktionen durch eine Abfolge verschiedener Befehle ausführen und von den Hauptprogrammen nur aufgerufen werden, umgeschrieben werden mussten. Details dazu folgen in Kapitel 4.2.3.

4.2.1.3 Das Test-Programm

Das dritte Hauptprogramm wurde für Funktionstest der Hard- und Software geschrieben. Wie erwähnt ist der einzige Unterschied zu 4.2.1.2 die fehlende Umrechnung von linearen Zielpositionen in Radius und Winkel der Detektorpixel. Dementsprechend hat man bei diesem Programm eine genauere Vorstellung über die Auslenkungen der Motoren bei Eingabe der Zielpositionen. Weitere Funktionen beider Programmen sind identisch. Auf die Betrachtung der Benutzeroberfläche kann hier also verzichtet werden. Der Ausschnitt der sich von der Detektorpixel-Anfahrt unterscheidet ist in Abbildung 4.14 zu sehen und zeigt die beiden Eingabefelder der Zielpositionen für die unterschiedlichen Achsen. Im Gegensatz zu 4.13 werden hier also Motorauslenkungen und nicht mehr ein Radius und ein Winkel als Zielposition angegeben.

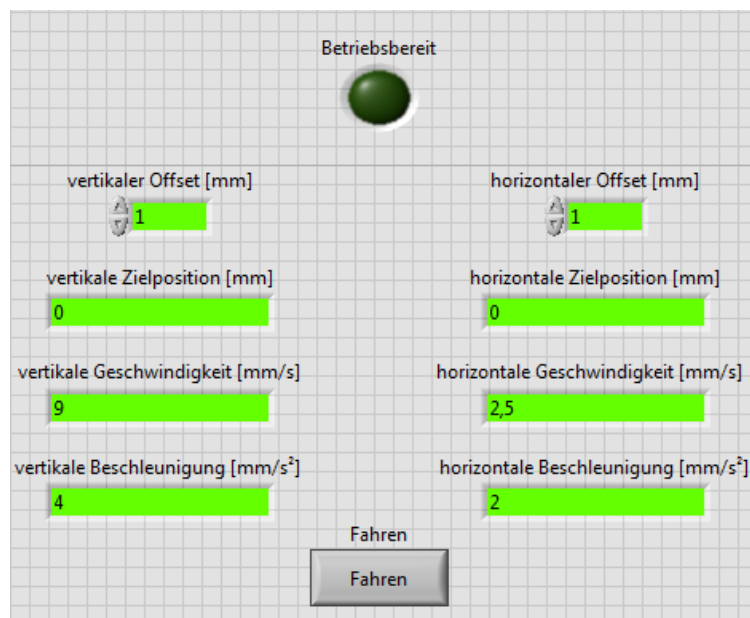


Abbildung 4.14: Ausschnitt aus dem Programm **Steuerung_lineare_Bewegung.vi**. Der Unterschied zu **Steuerung_komplett_v2.vi** liegt in der Angabe der Zielposition für beide Achsen. Hierbei handelt es sich um direkte Positionsangaben auf der Spindel beider Motoren. Eine Umrechnung in den Kippwinkel wird nicht durchgeführt.

4.2.2 Umrechnung von Pixelpositionen zu Zielpositionen

Abbildung 2.10 zeigt die Strukturierung der Detektorpixel ähnlich einer Dartscheibe. Diese Pixel sind nummeriert und ausgehend von der Detektormitte, also dem Bullseye über einen Radius und einen Winkel gemäß ebener Polarkoordinaten angegeben (siehe Abbildung 4.13). Da die Motoren lineare Bewegungen ausführen, kann die Verkippung als Winkelangabe nicht

übernommen werden. Dazu kommt, dass die Detektormitte, oder genauer die Strahlrohrmitte, nicht als Koordinatenursprung im CKrS-Koordinatensystem genutzt werden kann, da der Ursprung bei ebenen Polarkoordinaten Drehpunkt des Koordinatensystems ist. Bei der Kryptonquelle liegt dieser Drehpunkt (im englischen „pivot point“) oberhalb des Strahlrohrs und ist in Abbildung 4.15 eingezeichnet.

Für die Umrechnung von den Detektorkoordinaten $(r_{\text{Detektor}}, \varphi_{\text{Detektor}})$ in Motorauslenkungen $(x_{\text{Motor}}, y_{\text{Motor}})$ sind dementsprechend mehrere Rechenschritte notwendig. Zunächst werden die Benutzereingaben über

$$\begin{aligned} x_1 &= r_{\text{Detektor}} \cdot \cos(\varphi_{\text{Detektor}}) \\ y_1 &= r_{\text{Detektor}} \cdot \sin(\varphi_{\text{Detektor}}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

in kartesische Koordinaten umgerechnet, wobei der Koordinatenursprung in der Detektormitte bleibt. Im nächsten Schritt wird der Drehpunkt der Kryptonquelle als Koordinatenursprung genutzt. Außerdem wird das Koordinatensystem gekippt, als Vorbereitung darauf, dass so der Radius über die vertikale Bewegung der CKrS verändert werden kann. Da es sich bei der Radiusänderung um einen linearen Wert handelt, entspricht dieser bei der vertikalen Achse genau der Motorbewegung. Daraus folgt unter Berücksichtigung des Abstandes d zwischen dem Mittelpunkt des Strahlrohrs und dem Drehpunkt:

$$\begin{aligned} x_2 &= d - y_1 \\ y_2 &= x_1. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Diese beiden Werte stehen für die Position des Zielpixels in kartesischen Koordinaten und

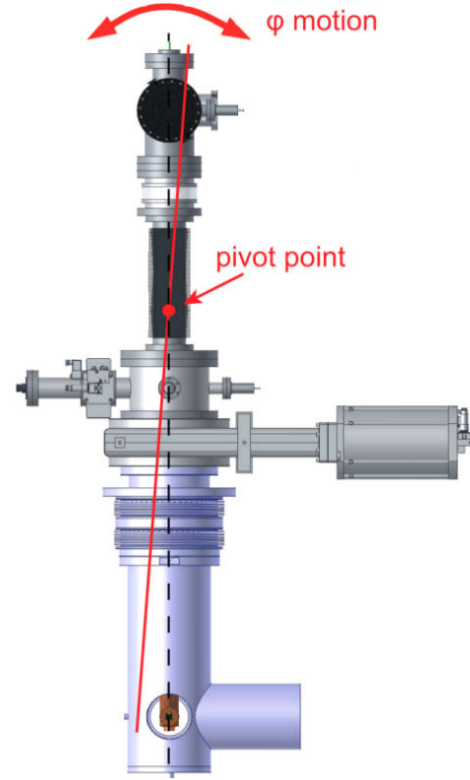


Abbildung 4.15: Seitenansicht der CKrS. Eingezeichnet ist neben der Kippbewegung der Drehpunkt innerhalb des Balgs, der als Koordinaten-Ursprung bei der Berechnung der Pixelpositionen des Detektor in Polarkoordinaten genutzt wird [Bau13].

können dann über die Rücktransformation zu 4.3 wieder in ebene Polarkoordinaten umgewandelt werden. Hierzu werden folgende Transformationsvorschriften genutzt:

$$\begin{aligned} r_{\text{Detektor}} &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \\ \varphi_{\text{Detektor}} &= \arccos\left(\frac{x}{r}\right). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Für den Fall $r = 0$ wird der Kippwinkel auf $\varphi_{\text{Detektor}} = 0$ gesetzt. Befindet sich die Kryptonquelle in der Mitte des Strahlrohrs, welches standardmäßig die Nullposition der Quelle ist, so ist der aktuelle Wert des Radius $r_{\text{temp}} = d$. Von dem neu berechneten Radius muss dieser Wert abgezogen werden, um die genaue Motorauslenkung zu bekommen. Dieser Wert wird dann als Zielposition an die IMD40 weitergegeben.

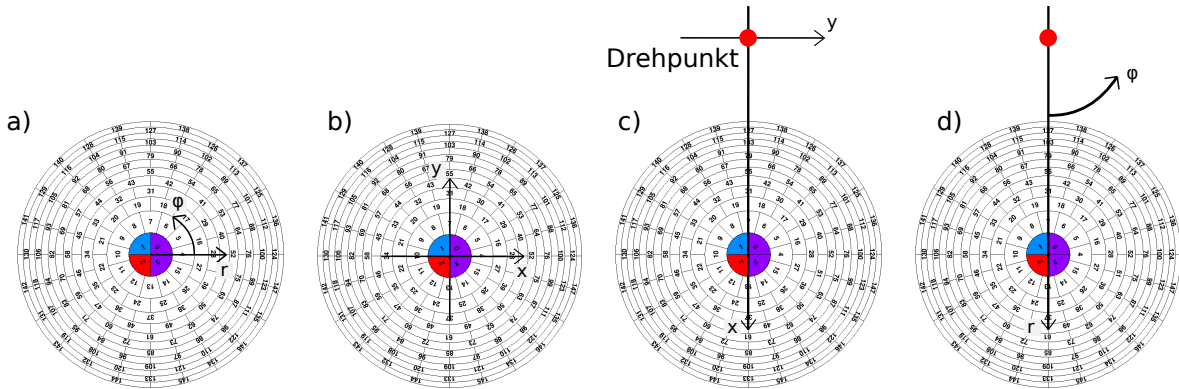


Abbildung 4.16: Transformationsschritte zur Anfahrt der Pixelposition. **a)** Der Benutzer gibt die Pixelposition ausgehend von der Detektormitte als Nullpunkt in Polarkoordinaten an. **b)** Die Position wird in kartesische Koordinaten umgerechnet, der Nullpunkt bleibt unverändert. **c)** Das Koordinatensystem wird um 90° im Uhrzeigersinn gedreht, der Nullpunkt wird auf den Drehpunkt der CKrS gelegt und es werden die neuen kartesischen Koordinaten für die Pixelposition übernommen. **d)** Die neuen kartesischen Koordinaten werden erneut in Polarkoordinaten umgerechnet. Über die vertikale Bewegungsachse ist dann der Radiuswert r veränderbar, die horizontale Achse bestimmt den Kippwinkel φ .

Für die horizontale Achse muss der berechnete Winkel in eine Auslenkung des Motors umgerechnet werden. Hierfür wird ein Dreieck zwischen 3 Kippscharnieren am Gerüst der CKrS aufgespannt (siehe Abbildung 4.17). Bei diesem Dreieck ändern sich zwei Seitenlängen während der Kippbewegung nicht. Anhand der Änderung der dritten Seitenlänge kann mit den gegebenen Maßen die Winkeländerung über den Kosinussatz

$$c^2 = a^2 + b^2 + 2ab \cos(\gamma) \quad (4.6)$$

berechnet werden.

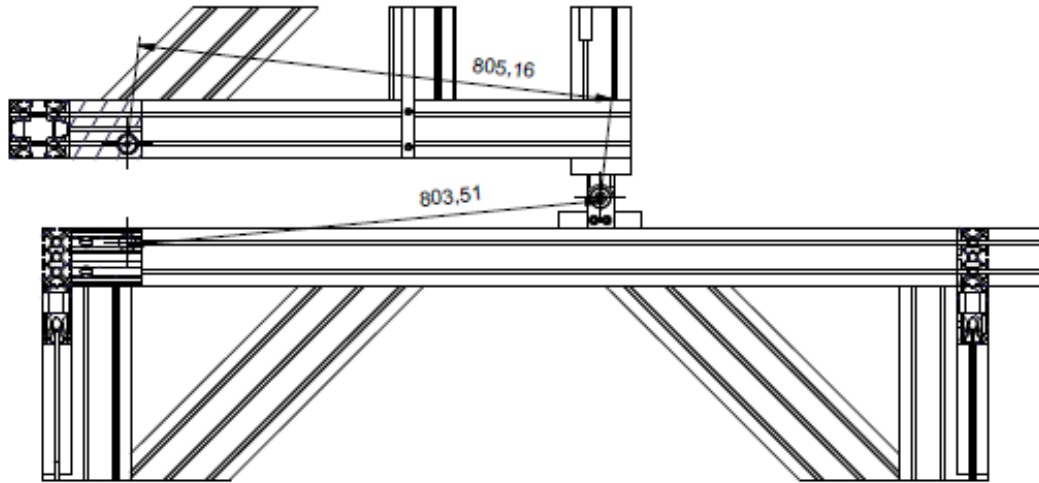


Abbildung 4.17: Ausschnitt aus der Skizze des Gestells der CKrS. Zu sehen sind die drei Kipp-scharniere als Eckpunkte eines Dreiecks. Die beiden eingezeichneten Strecken mit 805,16 mm und 803,51 mm bleiben bei der Kippbewegung konstant und spannen einen Winkel γ auf. Der Abstand der beiden vertikal versetzten Scharniere auf der linken Seite bestimmt den Kippwinkel und kann durch das Positionssystem verändert werden.

Die eingezeichneten Abstände von $a = 803,51 \text{ mm}$ und $b = 805,16 \text{ mm}$ sind konstant. Das liegt daran, dass die beiden linken Scharniere durch die Spindel des Motors für die Kippbewegung verbunden sind und der Motor inklusive Spindel die leichten Kippbewegungen nachvollzieht. Der einzige Abstand der sich bei Verkipfung der Quelle ändert ist also der, zwischen diesen beiden Scharnieren. Aus der Nullposition heraus muss die Kryptonquelle um $3,6^\circ$ in beide Richtungen verkippt werden, um den gesamten Flussschlauch mit einem Durchmesser von 15 cm auf Höhe der CKrS erreichen zu können. Die Nullposition befindet sich bei einem Abstand von $\approx 14,5 \text{ cm}$ zwischen den beiden linken Scharnieren, dies entspricht einem Winkel $\gamma \approx 10,3^\circ$. Der Winkelbereich der Verkipfung liegt dementsprechend zwischen $6,7^\circ$ und $13,9^\circ$. Ebenfalls über den Kosinussatz konnte das Verhältnis zwischen Auslenkung der Spindel und Winkeländerung bestimmt werden. In dem Bereich in dem sich die Quelle bewegt entspricht eine Auslenkungsänderung von 13,99 mm einer Winkeländerung von $\Delta\gamma = 1^\circ$.

4.2.3 Struktur der Programme und Sub-VIs

Die drei Hauptprogramme sind prinzipiell gleich strukturiert. Beim Start eines jeden Programms werden die Motoren initialisiert. Bei dieser Initialisierung wird jedem Positioniermodul ein Port der CAN-Schnittstellenkarte zugewiesen. Über diesen Port werden dann die motorspezifischen Parameter übergeben und der Motor wird in den betriebsbereiten Zustand versetzt. Danach befindet sich das Programm in einer while-Schleife, in der bei jedem Durchlauf die Bedienelemente überprüft werden. Außerdem werden verschiedene Werte des Motors abgefragt. Neben der Encoderposition beider Motoren werden die Zustände der Endlagenschalter überprüft. Sollte einer dieser Schalter aktiviert sein leuchtet wie in 4.2.1 beschrieben die entsprechende Kontrollleuchte auf. Außerhalb dieser Schleife werden die Auslesen für beide Renishaw-Messköpfe zeitgleich mit der Motorinitialisierung aktiviert. Dies führt dazu, dass die Messkopf-Positionen in Echtzeit ausgelesen und angezeigt werden können, während dies für die Motorencoder nur nach abgeschlossenen Positionsfahrten geschieht. Sowohl die Hauptschleife, als auch die Auslesen der Messköpfe werden beendet, sobald entweder das Bedienelement „Programm beenden“ oder „NOT-AUS“ betätigt werden. Auch die Abfrage dieser beiden Elemente wird jeweils separat in einer while-Schleife außerhalb der Hauptschleife vorgenommen, sodass eine Änderung des Wertes³ auch während einer Aktion innerhalb der Hauptschleife registriert werden. Die Funktion NOT-AUS startet darüber hinaus einen Ablauf von Befehlen, die die Motoren unabhängig von der aktuellen Aktion, die sie gerade ausführen stoppen und die Quelle bei maximaler Geschwindigkeit gleichzeitig senkrecht kippen ($\varphi = 0$) und in den oberen Endlagenschalter der vertikalen Achse fahren.

Wird eines der anderen Bedienelemente betätigt, so werden in der Regel Unterprogramme, die sogenannten **Sub-VIs**, aufgerufen. Dies kann auf mehreren Ebenen geschehen, indem jedes Sub-VI weitere Sub-VIs aufruft, bis auf der untersten Ebene die eigentlichen Funktionen, die das Positioniermodul bereit stellt durchgeführt werden. Die Positioniermodule besitzen ein Objektverzeichnis mit Variablen und Parametern, die über das Kommunikationsprotokoll CanOpen bearbeitet werden können. Hierfür ermöglichen Servicedatenobjekte den Zugriff auf die verschiedenen Objekte, die über einen Index und einen Sub-Index adressiert werden. Über die SDOs können die Variablen und Parameter⁴ gelesen oder umgeschrieben werden. In der Regel ist eine SDO-Nachricht 8 Byte lang. Das erste Byte legt fest, ob es sich um einen Lese- oder Schreibbefehl handelt. Bei der Programmierung wird diese Unterscheidung vom „SDO Read.vi“ oder „SDO Write.vi“ übernommen (siehe Abbildung 4.19). Die nächsten drei Bytes werden genutzt, um das entsprechende Objekt zu adressieren. Hierbei sind zwei Bytes

³Die Bedienelemente liefern allesamt einen boolschen Wert zurück. Während der Wert „true“ ein aktiviertes Bedienelement anzeigt, entspricht „false“ einem deaktivierten

⁴Dabei handelt es sich beispielsweise um die Einstellung der gewünschten Betriebsart oder um die Auslese der Motorencoder

für den Index und eines für den Sub-Index reserviert. Die Übertragung der Daten erfolgt über die letzten 4 Bytes⁵. Der schematische Aufbau einer SDO-Nachricht ist in Abbildung 4.18 oben gezeigt. In derselben Abbildung ist im unteren Bereich eine Nachricht in Hexadezimal-Darstellung als zu sehen. Der Command Specifier 0x40 startet eine Lesebefehl. Der Index des SDOs, hier 0x60 und 0x64, wird durch die beiden folgenden Bytes (geordnet nach Low Byte und High Byte Index) festgelegt, gefolgt von der Angabe des Sub-Index 0x00. Durch den Lesebefehl werden keine Daten übermittelt. Die vier hierfür vorgesehenen Bytes haben jeweils den Wert 0x00. In dem Beispiel wird also das SDO mit dem Index 6460 und dem Sub-Index 0 adressiert, was der Anfrage der aktuellen Motorposition entspricht. Diese wird dann auf dieselbe Art und Weise von dem Positioniermodul als Server an das PXI-System als Client übermittelt.

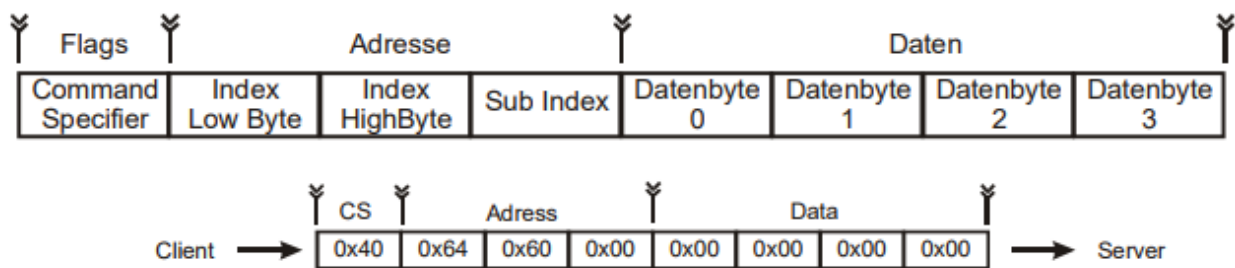


Abbildung 4.18: Oben: Schematischer Aufbau einer SDO-Nachricht. Im ersten Byte, dem Command Specifier wird festgelegt, ob es sich um ein Lese- oder Schreibbefehl handelt. Die nächsten drei Bytes sind für den Index (mit 2 Bytes) und den Sub-Index reserviert, die das SDO adressieren. Die letzten vier Bytes beinhalten die Daten der Übertragung. Unten: Beispiel einer SDO-Nachricht zur Abfrage der IST-Position des Motors. Die Bytes der SDO-Nachricht werden in Hexadezimal-Darstellung als ASCII-Zeichen übertragen [Ise09].

Zur Erstellung eines SDOs und einer SDO-Nachricht stellt die LabView-Bibliothek CanOpen vorgeschriebene Programme zu Verfügung. Abbildung 4.19 zeigt den Ausschnitt aus dem Sub-VI „Referenzfahrt“ der Motorsteuerung bei dem ein Schreibbefehl ausgeführt wird. Zunächst werden die nötigen Parameter (a) zur Erstellung eines CanOpen-Interfaces an das „Canopen Interface Create.vi“ (b) übergeben. Hierbei handelt es sich um den Port der Schnittstellenkarte (rosa) und der Baud-Rate, die die Anzahl der übertragenen Symbole pro Sekunde bei der Kommunikation zwischen PXI-System und Positioniermodul bestimmt. Innerhalb dieses Interfaces wird dann ein SDO erzeugt (c), welchem eine Knotenadresse und eine SDO-Konfiguration (rot) zugeordnet wird. Hierfür wird das Programm „SDO Create.vi“ genutzt. Die Art des Befehls wird über „SDO Read.vi“ beziehungsweise „SDO Write.vi“ (d) festgelegt. In Abbildung 4.19 wird über den Index 6098 und den Sub-Index 0 die Betriebsart Referenzfahrt ausgewählt. Der dritte Wert entspricht den zu übermittelnden Daten

⁵Bei Lesebefehlen werden in diesen Bytes die Antwortdaten von den Positioniermodulen an das PXI-Modul übermittelt.

und bestimmt bei der Referenzfahrt, welcher Endlagenschalter angefahren wird und wo der Nullpunkt gesetzt werden soll. In diesem Fall steht der Wert 2 für die Anfahrt des oberen Endlagenschalters. Als Nullpunkt wird das nächste Indexsignal nach dem Endschalter beim Rausfahren gesetzt. Eine Änderung des Wertes von 2 auf 34 führt dazu, dass die aktuelle Position als Nullpunkt gesetzt wird. Ein Endlagenschalter wird in dem Fall nicht angefahren. Diese Methode wird beispielsweise am Ende der Nullpunktsuche genutzt.

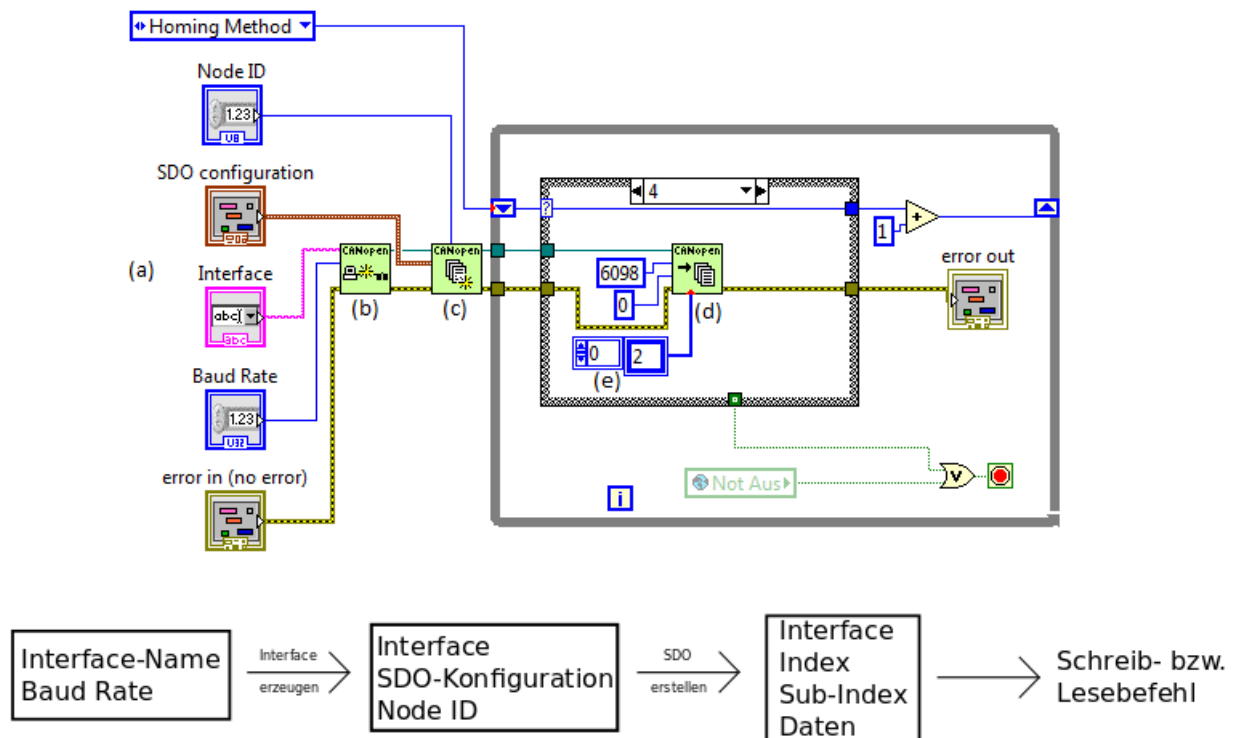


Abbildung 4.19: Oben: Ausschnitt aus dem Sub-VI „Referenzfahrt“ zur Veranschaulichung eines Schreibbefehls. Innerhalb eines CanOpen-Interface (b) wird ein Servicedatenobjekt erstellt (c). Hierfür werden Interface-Name, Baud Rate, SDO-Konfiguration und Node ID eingelesen (a). Der zu beschreibende Parameter wird über den zugehörigen Index und Sub-Index mit dem „SDO Write.vi“ (d) adressiert und die entsprechenden Daten werden übergeben (e). Unten: Diagramm zur Erläuterung der Parameterverarbeitung. Zunächst wird der Interface-Name, der dem Port der CAN-Schnittstellenkarte entspricht und die Baud-Rate zur Erzeugung des Interfaces genutzt. Danach wird innerhalb des Interfaces mit der SDO-Konfiguration und der Node ID ein Servicedatenobjekt erstellt. Im letzten Schritt werden über einen Index und einen Sub-Index die Kommunikationsparameter aus dem Objektverzeichnis der Positioniermodule adressiert und ein Lese- bzw. Schreibbefehl ausgeführt. Auch die Daten eines Schreibbefehls werden an dieser Stelle eingelesen.

Um eine Funktion des Positioniermoduls zu nutzen müssen mehrere Variablen und Parameter verarbeitet werden. Hierfür besitzt LabView verschiedene Programmstrukturen. In der Motorsteuerungssoftware von Richard Bottesch [Bot12] wurden dafür sogenannte „Flat Sequence Structures“ verwendet. Hierbei werden die Befehle in der angegebenen Reihenfol-

ge abgearbeitet, was prinzipiell zu einer korrekten Ausführung der gewünschten Funktion führt. Allerdings hat der Nutzer während des Ablaufs der Flat Sequence Structure keinen Zugriff auf das Programm. Dies ist vor allem bei der Notfall-Funktion bei Betätigung des Not-Aus-Knopfes notwendig. Wird der Knopf betätigt, so würde eine Auslese frühestens im Hauptprogramm nach Beendigung der laufenden Aktion stattfinden. Da einige Funktionen eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen (beispielsweise die Nullpunktsuche) ist die Auslese nach Beendigung der Aktion inakzeptabel. Außerdem wird bei Funktionen bei denen die Motoren bewegt werden nach Übergabe der Parameter und dem Starten der jeweiligen Funktion der Status des Motors solange abgefragt, bis die Fahrt beendet ist⁶, bevor sich das Programm wieder in der Hauptschleife befindet. Auch diese Abfrage kann bei der genutzten Struktur nicht vorzeitig beendet werden. Die Sub-VIs der alten Motorsteuerung mussten also umgeschrieben werden, wobei nur die Reihenfolge der Lese- oder Schreibbefehle weiterhin genutzt werden konnte.

Den benötigten Zugriff auf die Sub-VIs auch während der Ausführung einer Aktion stellte die „State Machine“ dar. In LabView kann diese durch die Kombination einer äußeren while-Schleife und einer „Stacked sequence structure“ realisiert werden. Dies ist in Abbildung 4.20 am Beispiel des Sub-VIs für die Nullpunktsuche des vertikalen Motors gezeigt.

Zur Erzeugung des Interfaces und des SDO werden erneut die nötigen Parameter (a) außerhalb der while-Schleife (b) eingelesen. Innerhalb der Schleife befindet sich eine Stacked sequence structure (d), die die Lese- oder Schreibbefehle, die nacheinander ausgeführt werden sollen, beinhaltet. Mit Hilfe einer Enum-Konstante (c) kann jedem Element einer Textliste eine Nummer zugeordnet werden, die die Reihenfolge der Liste festlegt. Die in 4.2.1.2 beschriebenen Schritte der Nullpunktsuche sind in Abbildung 4.20 eingeblendet. Zum Start des Programms befindet sich die Stacked sequence structure in dem Default-Fall mit der zugeordneten Startnummer 0. Die Parameter (a) werden an das Sub-VI innerhalb der Struktur übergeben (e) und der Befehl (hier eine Referenzfahrt) wird ausgeführt. Nach der Ausführung wird die aktuelle Fallnummer um eins erhöht (f), wodurch die Stacked sequence structure zum nächsten Fall übergeht. Bevor das geschieht wird zusätzlich noch die globale Variable „Not Aus“ ausgelesen (h). Ist das Signal „true“ (Not-Aus-Knopf betätigt) so wird die while-Schleife und dadurch auch das Sub-VI beendet. Das Programm reagiert so im Notfall direkt, auch innerhalb einer Befehlsabfolge. Sollte das Sub-VI den letzten Fall (Nullpunkt setzen) abgeschlossen haben, so wird ein logisches true-Signal für das Beenden der while-Schleife gegeben (g). Wie erwähnt ist dieses Sub-VI nur eine Zwischenebene, die Referenzfahrt (e) ist wiederum ein Sub-VI, das hier nur aufgerufen wird. Strukturell ist aber auch die Refe-

⁶Nach Beendigung einer Fahrt geht der Motor in einen speziellen Zustand „Position erreicht“ über, der abgefragt werden kann und zur Beendigung des Sub-VIs führt

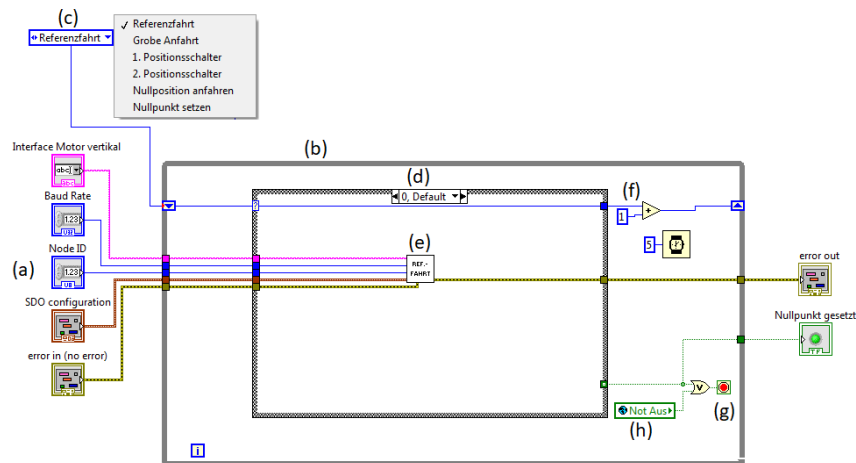


Abbildung 4.20: Die State-Machine der Sub-VIs. Die Parameter (a) zur Erzeugung eines CanOpen-Interface und eines SDOs werden außerhalb der while-Schleife (b) eingelesen und bis in die Stacked Sequence Structure (d) übergeben. Innerhalb dieser Struktur befindet sich der aktuell ausgeführte Programmcode (e). Über eine Enum-Konstante (c) wird die Reihenfolge der verschiedenen Arbeitsschritte des Sub-VIs festgelegt. Nach Verarbeitung des Programmcodes geht die Enum-Konstante zum nächsten Fall über, indem die den Arbeitsschritten zugeordnete aufsteigende Nummerierung um eins erhöht wird (f). Die State-Machine endet, indem die äußere while-Schleife durch ein Signal nach Ablauf des gesamten Codes oder durch das Not-Aus Signal (h) beendet wird (g). Bei erfolgreichem Ablauf des Sub-VIs wird in dem Fall noch ein Signal für die weitere Verarbeitung im Hauptprogramm gespeichert („Nullpunkt gesetzt“).

renzfahrt und jedes andere Sub-VI des Programms so aufgebaut.

Wird in der Zwischenebene ein weitere Sub-VI aufgerufen, so erscheint dem Benutzer ein Fenster, das den aktuellen Zustand der Prozedur angibt. Abbildung 4.21 zeigt dieses Fenster für eine Referenzfahrt, für die Suche nach den Positionsschaltern verhält es sich mit angepasstem Text genauso.

Um zu verstehen, wie das Positioniermodul arbeitet, ist es notwendig sich die Sub-VIs auf der untersten Ebene zu betrachten. Auf dieser Ebene bestehen die Unterprogramme nicht mehr aus dem Aufruf von Sub-VIs, sondern aus der direkten Kommunikation zwischen dem PXI-System und dem Positioniermodul. Das Positioniermodul besitzt eine Statemachine in der festgelegt ist, in welchem Betriebszustand es sich befindet und welcher Zustand eingenommen werden kann. Diese Änderungen können über das Controlword⁷ vorgenommen werden. Das Controlword wird über den Index 6040 und den Sub-Index 0 adressiert, die Zustandsänderungen werden durch die übermittelten Daten vorgenommen. Bevor das Modul Parameter einlesen oder Funktionen starten kann muss der Betriebszustand auf „Operation enable“ gesetzt werden. Dafür muss das Modul verschiedene Zustände durchlaufen (siehe Abbildung 4.22). Dies geschieht zu Beginn jedes Sub-VIs der untersten Ebene.

⁷Das Controlword ist ein weiteres Objekt aus dem Verzeichnis der Positioniermodule

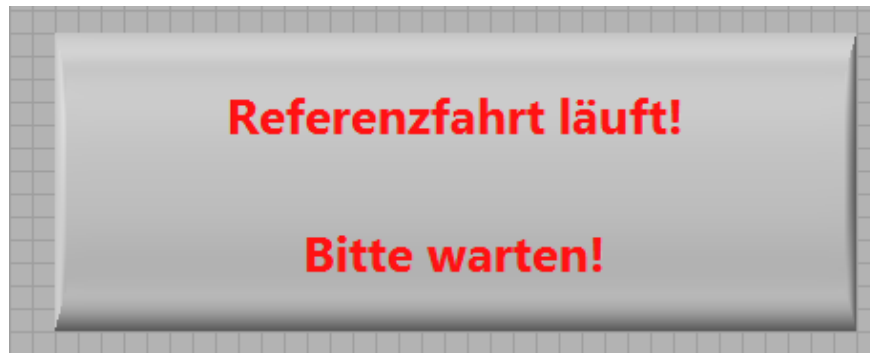


Abbildung 4.21: Einblendung während der Referenzfahrt. Um dem Benutzer anzuzeigen, welcher Befehl gerade ausgeführt wird öffnen sich Fenster, die bei den automatisierten Programmroutinen zur Nullpunktsuche über ein Textfeld den aktuellen Zustand der Prozedur angeben.

Je nach gewünschter Funktion wird dann eine von drei Betriebsarten eingestellt. Für die Freifahrt aus den Endlagenschaltern ist eine eigene Betriebsart vorhanden. Das Objekt zur Einstellung der Betriebsart wird über den Index 6060 und den Sub-Index 0 aufgerufen. Außerdem muss zwischen einer Referenzfahrt und der Positionsfahrt, also der Anfahrt einer durch den Anwender gegebenen Zielposition, unterschieden werden. Im Anschluss daran werden je nach Betriebsart verschiedene Parameter wie die Geschwindigkeit, Beschleunigung oder im Falle der Positionsfahrt die Zielposition übernommen. Für sämtliche Parameter müssen die entsprechenden Objekte der Positioniermodule adressiert und die gewünschten Wert übergeben werden. Nach dem Einlesen der Parameter wird dann die Motorbewegung erneut über das Controlword gestartet. Während auf das Controlword ausschließlich geschrieben werden kann, ist das Statusword zum Auslesen der Betriebszustände vorhanden und kann somit auch nur Lesebefehle verarbeiten. Dies wird nach dem Start der Motorbewegung genutzt, um zu verhindern, dass der Anwender die Ausführung einer Motorfunktion unterbricht, indem er eine weitere startet. Der Status des Positioniermoduls wird ausgelesen und solange die Motorbewegung aktiv ist, erlischt die Anzeige „Betriebsbereit“ auf der Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 4.13). Erst wenn die

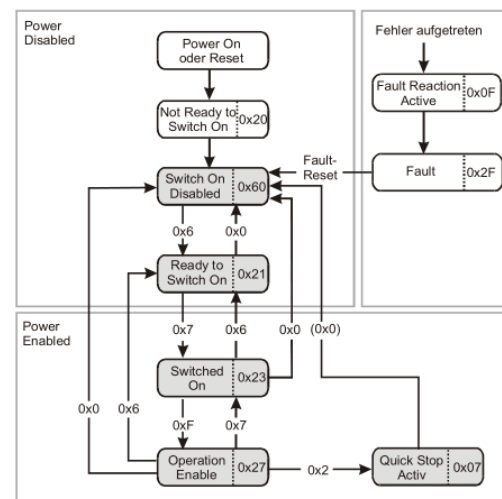


Abbildung 4.22: Zustandsdiagramm der Positioniermodule IMD20 und IMD 40. Eine Änderung des Zustands kann über das Statusword vorgenommen werden. Bis zum Zustand „Operation Enable“ muss eine Abfolge von Zustandsänderungen vorgenommen werden. Nach Einschalten der Module befinden diese sich in „Switch on Disabled“. Die möglichen Übergänge sind durch Pfeile markiert [Ise09].

Bewegung abgeschlossen ist, beispielsweise bei erfolgreicher Referenzfahrt oder bei erreichter Zielposition, wird das Signal zur Betriebsbereitschaft gegeben und der Anwender kann erneut eine Funktion starten.

4.2.4 Funktionstest

Bevor die gesamte CKrS nach Karlsruhe transportiert wurde, wurde die Motorsteuerung am Aufbau in Münster getestet. Zunächst wurde das Schaltersystem durch manuelles betätigen der Endschalter überprüft. Nachdem beide Positioniermodule wie gewünscht reagierten, indem sie keine Bewegung des Motors bei ausgelöstem Endschalter zuließen und auch die entsprechenden Kontrollleuchten der Software die ausgelösten Endlagenschalter auf der korrekten Bewegungsachse anzeigten, konnte die Funktion vertikalen Motor freifahren bzw. horizontalen Motor freifahren genutzt werden, um die Module wieder betriebsbereit zu schalten. Mit der Sicherheit, dass die Schalter funktionieren wurden die Motoren in die entsprechenden Haltepositionen gefahren, auch hier lösten die Endlagenschalter korrekt aus und die Bewegung wurde automatisch gestoppt. Diesmal wurde das Freifahren genutzt um die Position direkt unterhalb der Endlagenschalter anzufahren und dann die Motoren wieder freizugeben. Dies entspricht exakt dem Vorgehen in Karlsruhe, sollte einer der Endlagenschalter ausgelöst worden sein. Darüber hinaus konnte durch manuelles Umschalten zwischen den beiden unteren Endlagenschalter der vertikalen Bewegungsachse eine Statusänderung des CPS-Ventils simuliert und die korrekte Aktivierung des jeweiligen Endlagenschalters bestätigt werden. Dadurch, dass beim Umschalten der Schalter beide für einen kurzen Moment nicht mit Strom versorgt sind, registriert das Positioniermodul einen Auslösen in unterer Endlage. Soll der Motor direkt im Anschluss an das Umschalten bewegt werden, so muss zunächst die Funktion Freifahren genutzt werden. Geschieht das Umschalten des Ventilstatus bei ausgeschaltetem Motorsystem wird keine Auslösung registriert.

Die Positionsschalter zur automatisierten Nullpunktsuche konnten ausgelesen und die eingestellten Nullpunkte beider Achsen reproduzierbar angefahren werden. Sowohl die Suche ausschließlich für die vertikale Achse, als auch die automatisierte Suche beider Bewegungsachsen funktionierten wie beschrieben. Die Positionen der Schalter wurden in Münster auf fiktive Nullpunkte gesetzt, da die CKrS nach der Integration in die CPS in Karlsruhe weiter abgesenkt werden kann als bei dem Aufbau in Münster. Die korrekte Funktion des Antastschalters für die Justage der Positionsschalter und das Programm der Antastfahrt waren ebenfalls Teil der Funktionstests. Das Stoppen der Motoren bei Berührung zwischen der Feder und der Antastdose war hierbei der wichtigste Punkt, um Beschädigungen der CPS und

der CKrS zu vermeiden. Sowohl bei der Absenkung als auch bei der Verkipfung in beide Richtungen erfolgte dieses stoppen verlässlich und auch die angedachten Nullpunkte wurden reproduzierbar gefunden.

Die hardwareseitigen Endschalter, die die Stromversorgung der Motoren unterbrechen konnten an dem Aufbau in Münster nicht getestet werden, da das dazugehörige Relais noch nicht fertiggestellt war. Die Fertigstellung erfolgte während des Aufbaus der Kryptonquelle in Karlsruhe, sodass die Funktionstest vor Ort durchgeführt werden konnten. Sowohl das Unterbrechen der Stromversorgung durch Auslösen der Schalter, als auch die erneute Freigabe der Stromversorgung konnten realisiert werden.

Die Not-Aus Fahrt als eine wichtige Sicherheitsfunktion des Positionssystems konnte ebenso erfolgreich durchgeführt werden. Nach dem Umbau der Sub-VIs zu einer State Machine wurde das Betätigen des Not-Aus Bedienelements zuverlässig innerhalb der Sub-VIs registriert, die Motoren wurden gestoppt und die Fahrt in die Parkposition gestartet. Sicherheitshalber fand die Überprüfung dieser Funktion für jedes Sub-VI statt. Hierzu wurde die Not-Aus Fahrt während einer Referenzfahrt, der Suche nach den Positionsschaltern, einer normalen Positionierung und dem betriebsbereiten Zustand erfolgreich gestartet.

Zuletzt wurde die Abdeckung des gesamten Flussschlauchs durch Anfahrt der äußersten Detektorpixel geprüft. Da durch die Antastfahrt gesichert war, dass die Quelle tief genug abgesenkt werden konnte, mussten hier noch die Positionen der maximalen Verkipfung in beide Richtungen angefahren werden. Anstelle des HOPG-Substrats wurde ein Marker am unteren Ende des Kaltkopfes montiert. Ein Ausdruck des Detektors im Maßstab 1 : 1,⁸ wurde so vor dem Marker platziert, dass die Bewegung auf dem Detektor nachvollzogen werden konnte. Ein Foto des Testaufbaus mit dem Ergebnis der maximalen Verkipfungen ist in Abbildung 4.23 gezeigt.

Nachdem die äußersten Detektorpixel sowohl vertikal als auch horizontal erreicht werden konnten, bestand der finale Test als Vorbereitungen auf die Kalibrationsmessungen darin, einen Kreis auf dem Detektor abzufahren. Dabei wurde der Radius r konstant gehalten, während der Winkel φ zwischen 0° und 360° in 20° -Schritten geändert wurde. Die Ergebnisse dieses Tests zeigten, dass eine weitere Anpassung der Software notwendig war, da eine Positionsanfahrt immer mit der Änderung des Radius und anschließend mit der Verkipfung stattfand. Befindet sich das Substrat allerdings am äußeren Ring des Detektors und soll diesen abrastern, so muss im ersten und dritten Quadranten zunächst der Winkel geändert werden, da das Substrat sonst den Detektorbereich verlässt. Aufgrund des begrenzten Platzes innerhalb der CPS ist dieser Bereich durch die Endlagenschalter gesperrt. Die Rei-

⁸Der Durchmesser des Flussschlauchs auf Höhe der CKrS beträgt 15 cm und ist somit um $\approx 1,7$ mal größer, als der Durchmesser am Detektor mit 9 cm. Dadurch muss die Quelle um die kompletten 15 cm verkippt sein.

henfolge der Motorbewegungen wird nach Anpassung des Programms über einen Vergleich der aktuellen und angestrebten Position des Substrates festgelegt. So konnte das Verlassen des Detektorbereichs verhindert werden. Das Ergebnis der Abrasterung eines Detektorrings bei einem festen Radius von $r = 6\text{ cm}$ ⁹ ist in Abbildung 4.24 zu sehen.

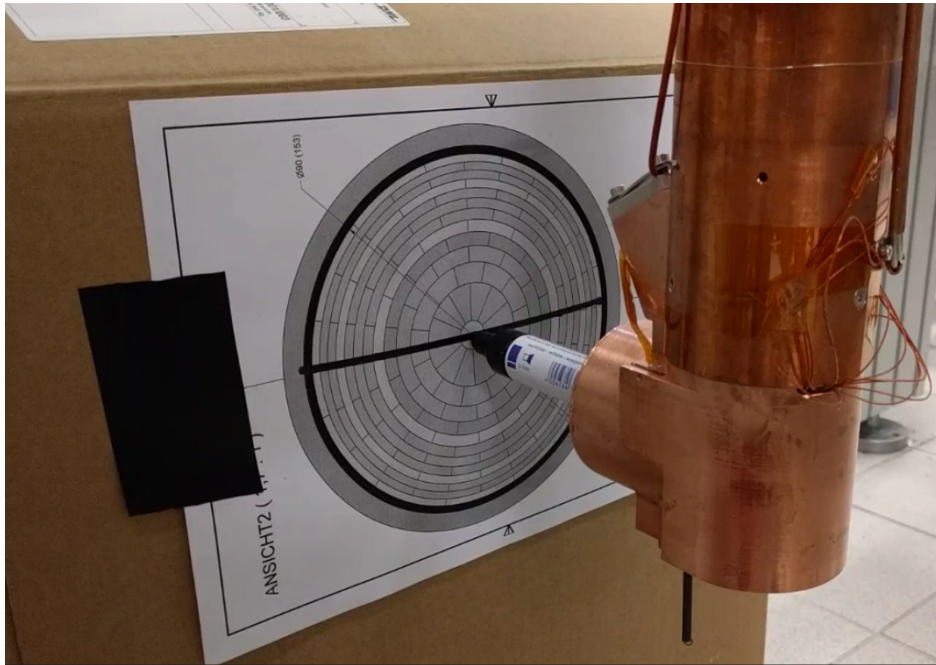


Abbildung 4.23: Foto des Testaufbaus um die Bewegung des Motors auf dem Detektor nachzuvollziehen. Zu sehen ist das kupferne äußere Kaltschild und der Antastschalter unterhalb des Substrats. Vor das Substrat ist ein schwarzer Marker montiert. Ein Ausdruck des Detektors wurde auf einen Karton geklebt und so vor dem Marker platziert, dass dieser die Fahrt des Substratbereichs auf dem Detektorausdruck sichtbar macht. Die schwarze Linie zeigt, dass durch Verkippung beide Seiten des Detektors erreicht werden können. Außerdem ist zu erkennen, dass durch die Kippbewegung ein Bogen und keine gerade Linie gefahren wird.

⁹Dies entspricht einem Radius von $r \approx 3,53\text{ cm}$ mit dem angegebenen Maßstab

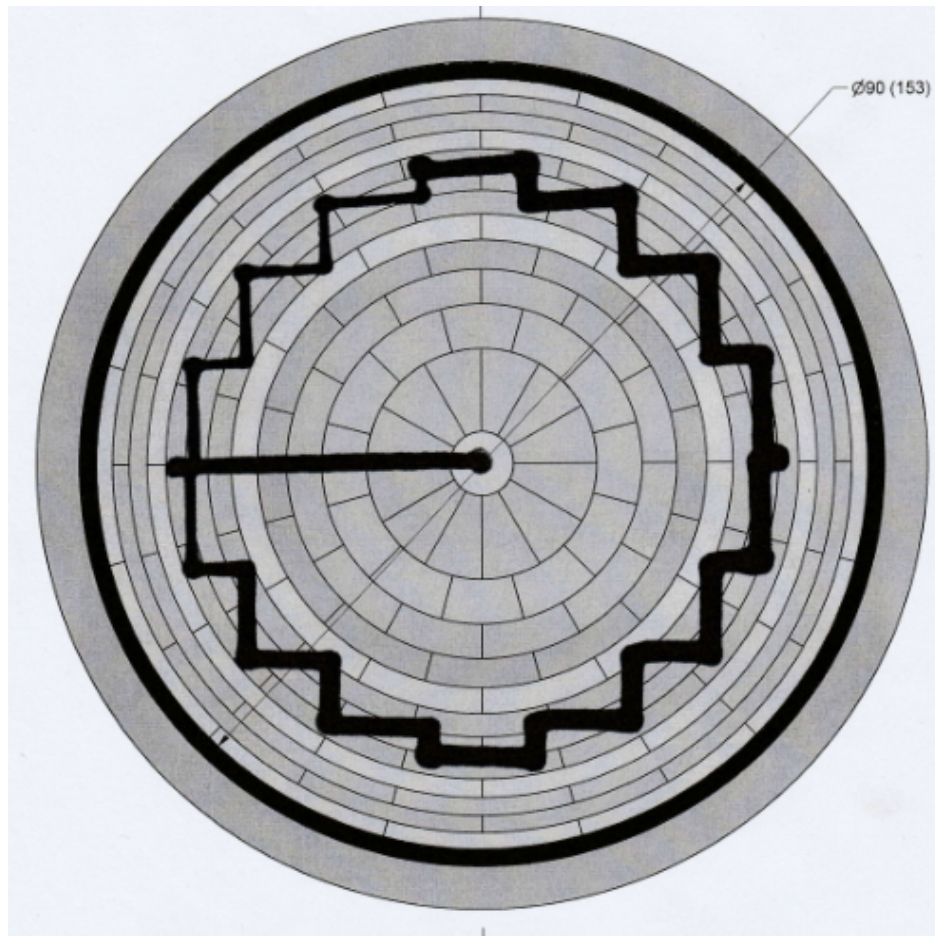


Abbildung 4.24: Abrasterung eines Detektorrings bei einem Radius von $r = 6$ cm. Durch den Maßstab $1 : 1,7$ der Detektorabbildung entspricht das einem Radius von $r \approx 3,53$ cm. Der Winkel φ wurde in 20° -Schritten zwischen 0° und 360° variiert.

5 Abschätzung der Elektronenrate im ^{83m}Kr -Betrieb

Im Zuge der Funktionstests der gesamten CKrS vor dem Abbau in Münster und dem Transport nach Karlsruhe wurde radioaktives Krypton erfolgreich auf das HOPG-Substrat aufgefroren und ein erstes Elektronenspektrum mit einer Silizium PIN Photodiode S3590-09 der Firma Hamamatsu aufgenommen. Dafür wurde das Substrat über die Steuerungssoftware auf Höhe eines Fensters, das während der Funktionstests als optischer Zugang zu Kaltfinger und Substrat diente, gefahren. An diesem Zugang wurde anstelle des Fensters die Photodiode als Detektor montiert. Zur Aufnahme des Spektrums wurde der Multichannel Analyzer 926-M-USB der Firma Ortec genutzt. Der 926-M-USB stellt 8192 Kanäle zur Aufnahme eines Spektrums zur Verfügung, diese Kanäle entsprechen mit aufsteigender Nummer einer größeren Elektronenenergie, sodass den Peaks des aufgenommenen Spektrums verschiedene Energien zugeordnet werden können. Mit Hilfe des Spektrums soll in diesem Kapitel die Aktivität des aufgefrorenen Kryptons bei bekannter Aktivität des Mutterisotops ^{83}Rb berechnet werden.

Das aufgenommene Spektrum ist in Abbildung 5.1 zu sehen. Aufgetragen ist die Anzahl der Elektronen gegen den Kanal, in dem sie registriert wurden. Im vorderen Bereich des Spektrums ist eine abfallende Gerade zu erkennen. Diese entspricht durch die logarithmische Darstellung dem exponentiell abfallenden elektronischen Untergrundsignal der Messung. Durch Anpassen dieses Bereichs mit einer Exponentialfunktion¹ sind die Parameter weiterer Anpassungen im Spektrum vom Untergrund bereinigt. Der $\Delta E = 32,15 \text{ keV}$ -Übergang von ^{83m}Kr besitzt unterschiedliche Zerfallskanäle im Bereich von $E_{L,M,N} \approx 30 \text{ keV}$ die mit der genutzten Diode nicht einzeln aufgelöst werden können. Die unterschiedlichen Zerfälle entsprechen den Konversionselektronen der L-, M- und N-Schale. Das Signal der Elektronen dieser Zerfälle kann im Spektrum als breiter Peak nahe des Endpunktes identifiziert werden. Ein weiterer Peak entsteht durch die Konversionselektronen der K-Schale im Bereich von $E_K = 17,8 \text{ keV}$ und kann im Spektrum zwischen dem elektronischen Rauschen und

¹Für die Auswertung des Spektrums wurde das Programm Fityk 1.2.1 genutzt

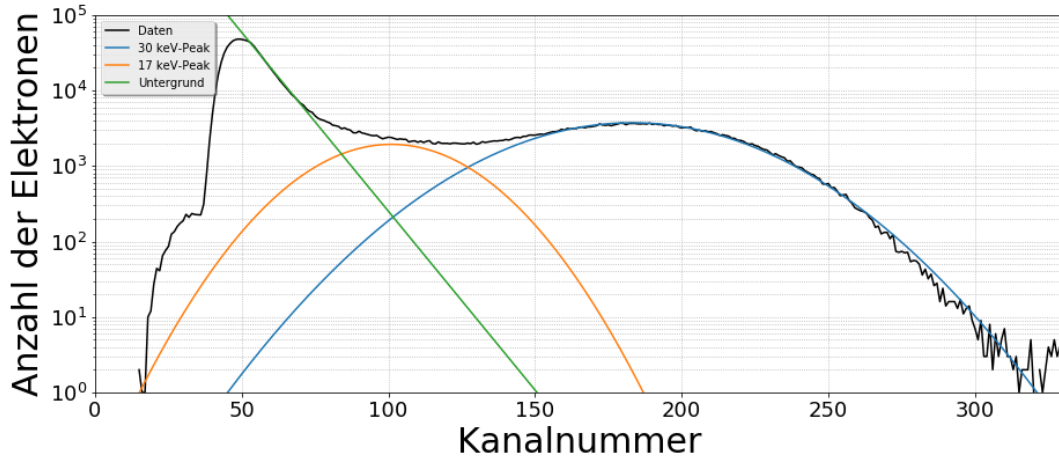


Abbildung 5.1: Elektronenspektrum der Testmessung in Münster zur Bestimmung der Zerfallsrate der CKrS im ^{83m}Kr -Betrieb. Durch die logarithmische Auftragung ist das exponentiell abfallende elektrische Untergrundsignal als Gerade im vorderen Bereich des Spektrums zu erkennen. Die zur Bereinigung der Daten vom Untergrundsignal angepasste Fit-Funktion in diesem Bereich ist in grün eingezeichnet. Außerdem wurden der 17,8 keV-Peak (orange) und der 30 keV-Peak (blau) durch eine Gaußkurve angepasst.

dem 30 keV-Peak zugeordnet werden. Die Konversionselektronen des 9,4 keV-Peaks können durch die Überlagerung des elektronischen Untergrunds nicht aufgelöst werden. Unter Berücksichtigung der drei Funktionen, die in das Spektrum eingefügt werden lassen sich dann die Parameter des 30 keV-Peaks nutzen, um die Anzahl der registrierten Elektronen zu berechnen. Die Gaußkurven werden gemäß $y = A \cdot \exp\left(-\ln(2) \left(\frac{x-B}{C}\right)^2\right)$ angepasst, wobei es sich bei A um die Amplitude, bei B um das Zentrum und bei C um die Halbwertsbreite (HWHM, half width at half maximum) der Kurve handelt. Folgende Parameter konnten dem Spektrum entnommen werden:

$$A = 3740 \pm 22$$

$$B = 183,2 \pm 0,4$$

$$C = 40,05 \pm 0,26$$

Die Fläche Unterhalb der Gaußkurve lässt sich mit diesen Parametern über

$$F_{\text{Gauss}} = A \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot C^2 \quad (5.1)$$

berechnen und gibt die Anzahl der detektierten Elektronen N_{Messung} an. Um die Elektronenrate R_{Gesamt} abzuschätzen sind dann folgende Überlegungen notwendig:

1. Die gemessene Anzahl der Elektronen N_{Messung} bezieht sich auf die gesamte Messdauer t_{Messung} und muss zunächst durch diese geteilt werden, um die Anzahl der Elektronen pro Sekunde

$$R_{e^-} = \frac{N_{\text{Messung}}}{t_{\text{Messung}}} \quad (5.2)$$

zu erhalten.

2. Der Detektor besitzt eine quadratische aktive Fläche mit der Seitenlänge $a = 10 \text{ mm}$. Nur auf dieser Fläche von $A_{\text{Detektor}} = a^2 = 100 \text{ mm}^2$ können Elektronen gemessen werden. Aufgrund der isotropen Emission von Elektronen beim Kryptonzerfall muss diese Fläche im Verhältnis zu einer Kugeloberfläche $O_{\text{Kugel}} = 4\pi r^2$, deren Radius dem Abstand von Detektor und Substrat entspricht, betrachtet werden, da es so möglich ist, einen Wert für die abgestrahlten Elektronen im gesamten Raum zu berechnen. Der Abstand zwischen Substrat und Detektor beträgt bei dieser Messung $d = 163 \text{ mm}$.
3. Das Mutterisotop ^{83}Rb geht über den Elektroneneinfang nicht zu 100 % in ^{83m}Kr über. Dieser Übergang entspricht nur einem Anteil von $\Omega_{Rb} = 77,9 \%$. Bei den restlichen 22,1 % geschieht der Übergang direkt in den stabilen ^{83}Kr -Zustand. Kryptonatome dieses Übergangs liefern keine Elektronen, da kein weiterer Zerfall stattfindet. Sie müssen allerdings berücksichtigt werden, da keine weitere Selektion der Kryptonatome existiert, sodass auch ein Anteil von stabilem Krypton zu dem Film auf dem Substrat beiträgt.
4. Auch beim Krypton muss das Verzweigungsverhältnis betrachtet werden. Wie erwähnt ist der 30 keV-Peak eine Überlagerung der Konversionselektronen der L-, M- und N-Schalen. Summiert man die Wahrscheinlichkeit dieser Zerfallskanäle auf, so entspricht dies einem Anteil von $\Omega_{Kr} = 0,752$ an der Abregung von ^{83m}Kr in den Grundzustand. Die Energien und Intensitäten der beteiligten Zerfallskanäle sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Die Zerfallsrate des Kryptonfilms auf dem Substrat lässt sich also zusammenfassend über

$$R_{\text{Gesamt}} = R_{e^-} \cdot \frac{O_{\text{Kugel}}}{A_{\text{Detektor}}} \cdot \Omega_{Kr}^{-1} \quad (5.3)$$

Tabelle 5.1: Zerfallskanäle der Konversionselektronen im Bereich des 30 keV-Peaks im ^{83m}Kr -Spektrum

Schale	Energie [keV]	Intensität [%]
L	30,23	63,7
M	31,86	10,7
N	32,13	0,8

ermitteln. Der Multichannel Analyzer gibt nach Aufnahme des Spektrums die Messdauer an. Hierbei ist die Totzeit der Elektronik², die $\tau = 8 \frac{\mu\text{s}}{\text{Ereignis}}$ beträgt noch nicht bedacht. Die reale Ereignisrate R kann aus der gemessenen Ereignisrate R' und der Totzeit τ über

$$R = R' \cdot (1 + R' \cdot \tau) \quad (5.4)$$

berechnen werden.

Um die Formel 5.3 anwenden zu können wird also zunächst der Flächeninhalt der Gaußkurve aus den angegebenen Parametern berechnet. Daraus ergibt sich die Anzahl der gemessenen Elektronen zu

$$N_{\text{Messung}} = 318887 \pm 2793 \quad (5.5)$$

Über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung gemäß

$$\Delta N_{\text{Messung}} = \Delta F_{\text{Gauss}} = \sqrt{\left(\frac{\partial F_{\text{Gauss}}}{\partial A} \Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{\text{Gauss}}}{\partial C} \Delta C\right)^2} \quad (5.6)$$

wurde der Fehler mit Hilfe der angegebenen Unsicherheiten der Parameter und den partiellen Ableitungen

²Durch Abklingeffekte innerhalb des Detektors oder auch Verzögerungen durch die Datenauslese kann der Detektor für eine gewisse Zeit τ kein weiteres Signal mehr registrieren. Man spricht hierbei von der Totzeit.

$$\frac{\partial F_{\text{Gauss}}}{\partial A} = \sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot C^2 \quad \text{und}$$

$$\frac{\partial F_{\text{Gauss}}}{\partial C} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{AC}{\sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot C^2}$$

ermittelt. Die Messdauer ist mit $t_{\text{Messung}} = 861 \text{ s}$ angegeben. Die Elektronenrate ohne Totzeitkorrektur beträgt dadurch $R_{\text{realzeit}} = (370,4 \pm 3,2) \frac{e^-}{\text{s}}$. Setzt man diesen Wert in ein 5.4 erhält man eine Rate von $R_{e^-} = (371,5 \pm 7,5) \frac{e^-}{\text{s}}$.

Über 5.3 ergibt sich somit eine Aktivität des aufgefrorenen ^{83m}Kr von

$$R_{\text{Gesamt}} = (1,65 \pm 0,33) \text{ MBq}^3. \quad (5.7)$$

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die errechnete Aktivität scheint mit $R_{\text{Gesamt}} = (1,65 \pm 0,33) \text{ MBq}$ zu groß zu sein, wenn man von einer Ausgangsaktivität des Mutterisotops von $A_{\text{Rb}} = 7 \text{ MBq}^4$ ausgeht. Trotz der Berücksichtigung der Verzweungsverhältnisse der Zerfallskanäle sollten die Verluste durch den Transport des Kryptons bis hin zum Substrat eine größere Auswirkung auf die Menge des Kryptons am Substrat haben. Die Verluste entstehen einerseits durch die Abregung von Krypton innerhalb des Kapillare⁵ und dem Auffrieren auf der Innenseite des inneren Kältschildes, andererseits durch den Verbleib von gasförmigen Krypton im Quellvolumen. In der Diplomarbeit von Jürgen Smollich [Smo08] wurde berechnet, dass lediglich 15 % des produzierten ^{83m}Kr die Düse am Ende der Kapillare erreicht. Bei der Aktivität des Mutterisotops entspricht das mit $8,2 \cdot 10^5$ radioaktiven Kryptonatomen (der Übergang von Rubidium in den stabilen Kryptonzustand ist hierbei berücksichtigt) einer zu geringen Menge für die errechnete Zählrate.

Auch der Vergleich zu Messungen der Elektronenrate der CKrS in Karlsruhe liefert einen kleineren Wert. Eine genaue Auswertung der Daten steht noch aus, allerdings kann durch eine erste Abschätzung eine Elektronenrate von $R_{\text{Gesamt, KIT}} \approx 8 \cdot 10^4 \text{ Bq}$ angenommen werden. Dieser Wert entspricht den Erwartungen und ist um 2 Größenordnungen kleiner als die

³Die Einheit Becquerel (Bq) gibt die mittlere Anzahl von Zerfällen pro Sekunde von radioaktiven Stoffen an

⁴Durch den Zerfall in stabiles Krypton von 22,1 % verringert sich dieser Wert zu $A_{\text{Rb, kor}} = 5,45 \text{ MBq}$

⁵Zur Erinnerung: Der angeregte Zustand hat eine geringe Halbwertszeit von 1,83 h.

Rate in Münster. Ein wichtiger Unterschied zwischen den beiden Messungen ist allerdings die Anwesenheit eines Magnetfeldes bei den Messungen in Karlsruhe. Eine erneute Messung des Spektrums in Münster um mögliche Fehler bei der Messung aufzudecken ist leider nicht mehr möglich, da das ausgewertete Spektrum unmittelbar vor dem Abbau der CKrS aufgenommen wurde. Ausgehend von einer korrekten Messungen lassen sich nun verschiedene Ansätze diskutieren, die zu einer erhöhten Elektronenrate führen.

Zunächst einmal ist die Geometrie des Aufbaus in Betracht zu ziehen. Der angegebene Abstand d zwischen Substrat und Detektor hat durch die quadratische Abhängigkeit der Kugeloberfläche von d einen großen Einfluss auf den Anteil des durch den Detektor abgedeckten Raumwinkels. Dieser Abstand wurde beim Abbau vermessen und sollte dem angegebenen Wert von $d = 163\text{ mm}$ entsprechen. Sollte hierbei ein Messfehler vorliegen ist dieser leider nicht mehr zu korrigieren.

Außerdem wurde bei den Berechnungen von einer Punktquelle ausgegangen, in der Realität liegt aber ein ausgedehntes HOPG-Substrat vor und somit ist auch der Kryptonfilm keine Punktquelle. Eine genauere Berechnung ausgehend von einer ausgedehnten Elektronenquelle würde die gemessene Elektronenrate verringern, allerdings wäre diese Korrektur nicht in dem gewünschten Maß von 2 Größenordnungen. Ein genauer Wert wurde im Zuge dieser Arbeit aufgrund der erwarteten geringen Korrektur nicht ermittelt.

Eine weitere Erklärung wäre das Auffrieren von Krypton innerhalb des Substratbereichs, aber nicht am Substrat selbst. Hierbei haben sowohl der Ausgang der Kapillare, also die Düse, als auch die Apertur, als runde Öffnung vom Substratbereich Richtung Detektor (siehe Abbildung 4.6) Temperaturen im Bereich der Substrattemperatur, sodass sich auch an diesen, dem Detektor näher befindlichen Stellen das gasförmige Krypton anlagern könnte. Dies würde dazu führen, dass quantitativ mehr Krypton als Quelle für die Elektronen in Betracht gezogen werden muss. Ein Auffrieren von Krypton auf dem Detektor selbst konnte ausgeschlossen werden, da dieser sich auf Raumtemperatur befand.

Eine weitere mögliche Ursache für die erhöhte Rate wäre gasförmiges Krypton im Substratbereich. Friert das aus der Düse austretende Kryptongas nicht auf dem Substrat auf, so verteilt es sich isotrop im Bereich vor dem Detektor. Auch dadurch ist die Menge des Kryptons als Elektronenquelle größer als angenommen und der Abstand d verringert sich rapide. In Karlsruhe wäre dieser Effekt vernachlässigbar, da die Distanz zwischen Substrat und Detektor dort ca. $32,2\text{ m}$ entspricht. So wäre auch die unterschiedliche Zählrate der Messungen in Münster und Karlsruhe zu erklären.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Sensitivität der Masse des Elektron-Antineutrinos von 0,02 eV zu gewährleisten werden bei dem KATRIN-Experiment mehrere Kalibrationsquellen, die auf einem natürlichen Standard basieren eingesetzt. Eine dieser Kalibrationsquellen ist die in dieser Arbeit vorgestellte kondensierte Kryptonquelle. Ein Testaufbau dieser Quelle befand sich zu Beginn der Arbeit in horizontaler Position im Institut für Kernphysik der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster. Um die Funktionalität der Kryptonquelle im Einsatz am KATRIN-Experiment simulieren zu können wurde dieser Testaufbau in die vertikale Position gebracht, was der Ausrichtung am Einsatzort entspricht. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme sämtlicher Systeme der CKrS in dieser Position konnte diese in Münster demontiert und am KIT in Karlsruhe in die CPS integriert werden.

Während der Kalibrationsmessungen sollen die Konversionselektronen der Zerfalls von ^{83m}Kr genutzt werden, um die Transmissionsfunktionen der Spektrometer zu vermessen. Dazu muss die Quelle in der Lage sein den gesamten Flussschlauch abrastern zu können. Hierfür wurde ein Positionssystem entwickelt, dessen Inbetriebnahme den Hauptbestandteil dieser Arbeit bildet. Um eine zweidimensionale Bewegung zu ermöglichen werden zwei Bewegungsachsen, eine vertikale Aufzugbewegung und eine Kippbewegung zur Änderung der horizontalen Position genutzt. Zunächst musste die Hardware für beide Achsen installiert werden. Die Bewegungen erfolgen mit Hilfe eines Servomotors der Firma ISEL pro Bewegungsachse und den dazugehörigen Positioniermodulen. Dem Aufbau wurden zusätzlich zu den motorinternen Positionencodern Linarmessköpfe der Firma Renishaw hinzugefügt. Diese besitzen eine Auflösung im μm -Bereich und verbessern so die Genauigkeit des Positionssystems.

Um den befahrbaren Bereich der Quelle zu begrenzen und um die Nullposition der Kalibrationsmessungen, welcher der Mitte des Flussschlauchs entspricht, reproduzierbar anfahren zu können wurde für jede Achse ein Schaltersystem bestehend aus Endlagenschalter, die softwareseitig durch die Positioniermodule ausgelesen werden und Positionsschaltern, die zur Nullpunktbestimmung in der programmierten Motorsteuerung genutzt werden aufgebaut. Den größten Unterschied zwischen den beiden Schaltersystemen für die horizontale und vertikale Bewegungsachse besteht in dem zusätzlichen unteren Endlagenschalter der Aufzugbe-

wegung, da diese, je nach Status des CPS-Zugangsventils zwei verschiedene untere Endlagen besitzt. Hierbei soll das Statussignal des Ventils genutzt werden, um den zu überbrückenden Schalter zu deaktivieren. Da dieses Signal nur am Aufbauort zugänglich ist, wurde bei den Tests in Münster ein manueller Schalter genutzt um zwischen den unteren Endlagenschaltern wechseln zu können. In Karlsruhe muss dieser manuelle Schalter noch durch das CPS-Signal ersetzt werden. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme bestand in der Installation der Hardware-Endschalter, die die Stromversorgung der Positioniermodule unterbrechen, sobald sie ausgelöst werden. Die Hardware-Endschalter konnten fertigungsbedingt erstmals in Karlsruhe erfolgreich getestet werden.

Die Kommunikation zwischen Anwender-PC und den Positioniermodulen übernimmt eine PXI-Einheit über das CanOpen-Kommunikationsprotokoll. Mit Hilfe der CanOpen-Bibliothek für das Programmiersystem LabView2013 wurde ein Live-Projekt zur Nutzung des Positionssystems entwickelt. Aufgrund der verschiedenen Betriebsmodi der Kryptonquelle wurden drei verschiedene Programme geschrieben. Das Programm Antastfahrt.vi kann genutzt werden, um die Nullposition einmalig zu bestimmen. Hierzu wird der Antastschalter und die bekannten Abmessungen der CPS genutzt, um die Nullposition anzufahren und dann die Positionsschalter symmetrisch um diese Position zu montieren. In Münster konnte diese Funktion erfolgreich implementiert und getestet werden. In Karlsruhe allerdings erreichte der Antastschalter nicht mehr die Innenwand der CPS. Die Abmessungen, die für die Entwicklung der gesamten Antastprozedur genutzt werden sind demnach in Karlsruhe nicht ausreichend genau bekannt. Dieses Problem konnte bis zur Fertigstellung dieser Arbeit nicht gelöst werden, eine Verlängerung des Antastschalters scheint hier aber die einzige Lösung zu sein.

Ein weiteres Programm kann genutzt werden, um die Funktionalität der Hardware zu testen. Dieses Programm wurde so konzipiert, dass der Anwender eine genaue Vorstellung von den Zielpositionen der beiden Motoren hat. Dadurch konnten nach dem Aufbau in Karlsruhe kleine Strecken gefahren werden und sowohl die Funktion der Motoren und Positioniermodule, als auch die der Endlagenschalter überprüft werden. Die Signale der Positionsschalter wurden durch manuelles Auslösen registriert, da die Auslöser durch den gesperrten Zugang zur CPS zunächst noch nicht korrekt justiert waren. Außerdem wurden die verschiedenen Funktionen der Motorsteuerung, wie das Freifahren aus Endlagenschaltern, das Ausschalten der Motoren, das Beenden des Programms und, als wichtige Sicherheitsfunktion, die Not-Aus Prozedur erfolgreich getestet. Ähnlich wie beim Umschalten der unteren Endlagenschalter der vertikalen Bewegungsachse wurde die Not-Aus Prozedur in Münster nur manuell durch einen eingebauten Schalter in der Software getestet. Diese Funktion soll im späteren Verlauf der Messungen ein Not-Signal von der KATRIN-Software übernehmen, sodass im Notfall die

Kryptonquelle automatisch und so schnell wie möglich in die Parkposition oberhalb der CPS gefahren wird und das CPS-Ventil geschlossen werden kann. Der Umbau der Software um sensitiv auf das Signal der KATRIN-Software zu sein ist eine wichtige Maßnahme, die im Zuge dieser Arbeit nach dem Aufbau der Quelle in Karlsruhe aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt werden konnte.

Das dritte Programm dient während der Kalibrationsmessungen zur Anfahrt einzelner Pixel des Detektors des KATRIN-Experiments, denen Positionen im Flussschlauch zugeordnet werden können. Diese Pixel sind ausgehend vom Bullseye des Detektors in ebenen Polarkoordinaten angegeben. Der Anwender übergibt der Software genau diese Angaben. Die Umrechnung in Zielpositionen für die Motoren übernimmt die Software ausgehend von der übergebenen Radius- und Winkelangabe. Die durchgeführten Tests des Positionssystems haben gezeigt, dass sowohl vertikal als auch horizontal die äußersten Detektorpixel erreicht werden konnten. Somit ist der gesamte Detektorbereich anfahrbar.

Bei den Funktionstest des Positionssystems in Karlsruhe wurde festgestellt, dass der interne Speicher der PXI-Einheit mit 128 MB für den Langzeitbetrieb nicht ausreicht. Der Grund dafür lag in der Erzeugung eines Servicedatenobjektes vor jeder Ausführung einer Funktion, ohne das SDO im Anschluss wieder zu löschen. Im Fall eines vollen Speichers trennt das PXI-System die Verbindung zu den Positioniermodulen und die Motoren konnten nicht mehr gesteuert werden. Das System muss daraufhin neu gestartet werden, um die Verbindung erneut herstellen zu können. Um dies während des Messbetriebs zu verhindern ist eine Änderung der Software notwendig. Es ist möglich, nach Initialisierung der Motoren ein SDO-Interface und ein SDO einmalig zu erzeugen und innerhalb der Sub-VIs ausschließlich die Schreib- und Lesebefehle auszuführen. So wird der Speicher durch die Steuerungsfunktionen nicht weiter beansprucht.

Nachdem die einzelnen Systeme der Kryptonquelle erfolgreich in Münster getestet wurden, wurde ein Elektronenspektrum bei Betrieb der Quelle mit ^{83m}Kr aufgenommen. Anhand dieses Spektrums wurde die Elektronenrate berechnet. Der errechnete Wert von $R_{\text{Gesamt}} = (1,65 \pm 0,33) \cdot 10^6 \frac{e^-}{\text{s}}$ ist bei einer Aktivität des Mutterisotops von $A_{\text{Rb}} = 7 \text{ MBq}$ beziehungsweise $A_{\text{Rb, kor}} = 5,45 \text{ MBq}$ unrealistisch, da durch den Verbleib von Krypton im Quellvolumen und durch den Verlust während der Propagation zum Substrat mit Verlusten von bis zu 85 % gerechnet werden muss. Eine mögliche Ursache für die erhöhte Zählrate bildet das Auffrieren von radioaktivem Krypton am Ausgang der Apertur, wodurch die Distanz zum Detektor verringert wird. Außerdem ist es möglich, dass sich gasförmiges Krypton isotrop im Substratbereich verteilt. Auch dadurch ist die Distanz zwischen Elektronenquelle und Detektor nicht genau zu bestimmen, aber in jedem Fall geringer als die gemessene Distanz zwischen Substrat und Detektor.

Literaturverzeichnis

- [AA02] Q. R. Ahmad and R. C. et algo Allen. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the sudbury neutrino observatory. *Phys. Rev. Lett.*, 89:011301, Jun 2002.
- [Azz87] R. M. Azzam. *Ellipsometry and Polarized Light (North-Holland Personal Library)*. Elsevier Science Ltd., 1987.
- [Bau13] Stephan Bauer. *Energy calibration and stability monitoring of the KATRIN experiment*. PhD thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2013.
- [Bot12] Richard Bottesch. Set-up of the motion control and characterization of the ablation laser for the condensed ^{83m}Kr conversion electron source of the katrin experiment. Master's thesis, Westfälische Wilhelms-Universität, 2012.
- [GD13] C. Weinheimer G. Drexlin, V. Hannen. Current direct neutrino mass experiments. *Adv. High Energy Phys.*, 2013.
- [Hö16] Melanie Hörschele. Weiterentwicklung der laser-ellipsometrie für den aufbau der neuen krypton-quelle an der cps. Master's thesis, Institut für Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2016.
- [IB17] IMD-Bedienungsanleitung. https://www.isel.com/de/downloads/dl/file/id/3816/imd20_imd40_bedienungsanleitung.pdf, July 2017.
- [iS17] Science in School. <http://www.scienceinschool.org/de/2011/issue19/neutrinos>, July 2017.
- [Ise09] Isel. *AC-Servo Positioniermodul mit CanOpen Interface*, October 2009.
- [KAT17] Homepage KATRIN. <https://www.katrin.kit.edu/>, July 2017.
- [Kol04] KATRIN Kollaboration. Katrin design report 2004. Technical report, Karlsruher Institut für Technologie, 2004.

- [OW08] E W Otten and C Weinheimer. Neutrino mass limit from tritium β decay. *Reports on Progress in Physics*, 71(8):086201, 2008.
- [Pet15] Simon-Nis Peters. Adaption of the pc-ellipsometry for the condensed krypton calibration source setup, converted for the operation at the katrin-experiment. Master's thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2015.
- [Pra05] Matthias Prall. *Aufbau und Test des Gaseinlasssystems für die kondensierte ^{83m}Kr -Kalibrationsquelle des KATRIN-Experimentes*. PhD thesis, Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik, 2005.
- [Sch97] Norbert Schmitz. *Neutrinophysik*. Vieweg+Teubner Verlag, 1997.
- [SdT17] Wikipedia Standardmodell der Teilchenphysik. <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>, July 2017.
- [Smo08] Jürgen Smollich. Zählratenoptimierung und hochspannungsmodifikation der kondensierten konversionselektronen-kryptonquelle (ckrs) für das katrin-experiment. Master's thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2008.
- [Thu07] Thomas Thuemmler. *Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment*. PhD thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2007.
- [Val09] Kathrin Valerius. *Spektrometeruntergrund und seine Unterdrückung beim KATRIN Experiment*. PhD thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009.
- [Weg10] Anne Wegmann. Laserellipsometrie für die kondensierte ^{83m}Kr -konversionselektronenquelle des katrin-experiments. Master's thesis, Westfälische Wilhelms-Universität, 2010.
- [Wei03] Christian Weinheimer. *Laboratory Limits on Neutrino Masses*, pages 25–52. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2003.

Anhang

isel® EC-Servomotor 86 (bürstenlos) 440W

isel® EC-Servomotor 86 (bürstenlos) 660W

isel® EC-Servomotor 86 (bürstenlos) 880W

Art.-Nr. **474440 0310**

Art.-Nr. **474660 0310**

Art.-Nr. **474880 0310**

Merkmale

- elektronisch kommutierter 3-Phasen-Servomotor
- bürstenloser Antrieb
- hohe Abgabeleistung bei gleichzeitig kompakter Bauform
- inkrementales Messsystem
- Hallsensoren
- Einsatzgebiete: Positioniersteuerungen, Drehzahlsteuerung
- Anschluss über Rundsteckverbinder
- Encoder: 1000 Inc/Umdrehung, RS 422, Spannung: +5VDC



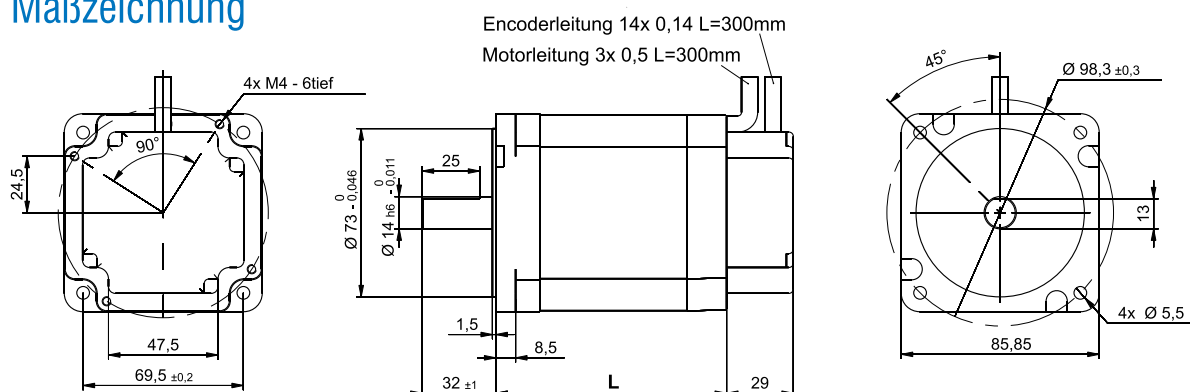
EC-Servomotor EC 86

Technische Daten

Artikel-Nr.	Nennleistung [W]	Nennspannung [V DC]	Strom [A]	Anzahl der Pole	Nenn-drehzahl [U/min.]	Drehmoment bei Nenn-drehzahl [Nm]	Spitzen-drehmoment [Nm]	Induktivität Phase zu Phase [mH]	Widerstand Phase zu Phase [Ohm]	Länge L [mm]	Gewicht [kg]
474440 0310	440	310	3,4	8	3000	1,4	5,0	8	2,8	100	2,6
474660 0310	660	310	3,6	8	3000	2,1	7,4	5	1,7	125	4,0
474880 0310	880	310	3,8	8	3000	2,8	8,4	9,6	4,2	150	5,2

Der Encoder hat 1000 Impulse pro Umdrehung, RS422, digital, Spuren A, /A, B, /B, Z, /Z weiterhin Hall 1, Hall 2, Hall3 – 5V Ausgang – GND-Bezug, auf Empfängerseite PULL-UP. Versorgungsspannung Encoder und Hall 5V

Maßzeichnung



Anschlussbelegung

Encoderkabel

Pin	Signal	Farbe
1	Schirmung	Schirm
2	Gnd	schwarz
3	Vcc + 5V	rot
4	Encoder B	grau
5	Encoder /B	grau / schwarz
6	Encoder A	braun
7	Encoder /A	braun / schwarz
8	Encoder Z	orange
9	Encoder /Z	orange / schwarz
10	Hall A	gelb
11	Hall B	weiß
12	Hall C	grün

Steckverbinder: 12pol. Buchsenleiste
Typ: JST PHR-12

Motorkabel

Signal	Farbe
Motor U	gelb
Motor V	blau
Motor W	grün
PE	grün / gelb

Technische Änderungen vorbehalten.

isel® EC-Servomotor 60 (bürstenlos) 156W
isel® EC-Servomotor 60 (bürstenlos) 156W, mit Bremse
isel® EC-Servomotor 60 (bürstenlos) 235W, 48V
isel® EC-Servomotor 60 (bürstenlos) 235W, 48V, mit Bremse
isel® EC-Servomotor 60 (bürstenlos) 235W, 310V
isel® EC-Servomotor 60 (bürstenlos) 235W, 310V, mit Bremse

Art.-Nr. **474156 0048**
 Art.-Nr. **474156 1048**
 Art.-Nr. **474235 0048**
 Art.-Nr. **474235 1048**
 Art.-Nr. **474235 0310**
 Art.-Nr. **474235 1310**

Merkmale

- elektronisch kommutierter 3-Phasen-Servomotor
- bürstenloser Antrieb
- hohe Abgabeleistung bei gleichzeitig kompakter Bauform
- inkrementales Messsystem
- Hallsensoren
- Einsatzgebiete: Positioniersteuerungen, Drehzahlsteuerung
- Anschluss über Rundsteckverbinder
- Bremse: 24VCD
- Encoder: 1000 Inc/Umdrehung, RS 422, Spannung: +5VCD

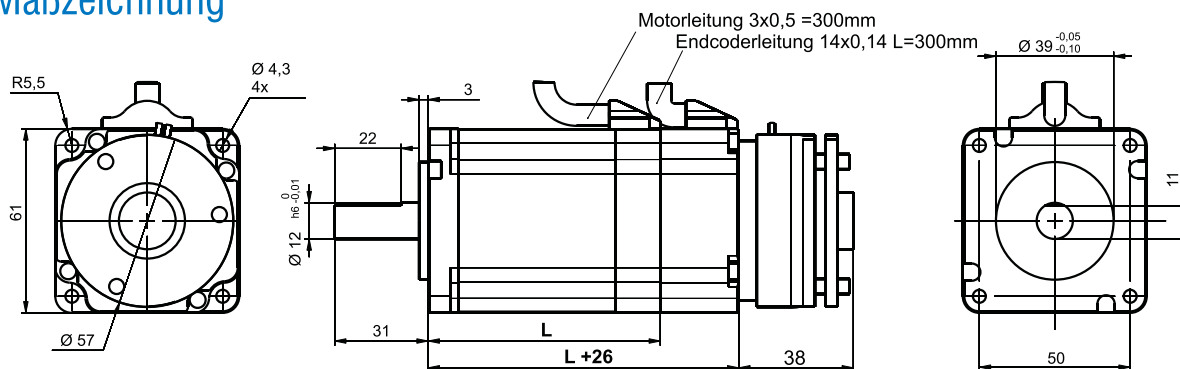


EC-Servomotor EC 60

Technische Daten

Artikel-Nr.	Nennleistung [W]	Nennspannung [V DC]	Strom [A]	Anzahl der Pole	Nenn Drehzahl [U/min.]	Drehmoment bei Nenn Drehzahl [Nm]	Spitzen-drehmoment [Nm]	Länge L [mm]	Gewicht [kg]
474156 0048	156	48	6,9	8	3000	0,5	1,75	73	1,25
474156 1048	156	48	6,9	8	3000	0,5	1,75	73 + Bremse	2,0
474235 0048	235	48	10,5	8	3000	0,75	2,25	94	1,6
474235 1048	235	48	10,5	8	3000	0,75	2,25	94 + Bremse	2,35
474235 0310	235	310	1,6	8	3000	0,75	2,25	94	1,6
474235 1310	235	310	1,6	8	3000	0,75	2,25	94 + Bremse	2,35

Maßzeichnung



Anschlussbelegung

Encoderkabel

Pin	Signal	Farbe
1	Schirmung	Schirm
2	Gnd	schwarz
3	Vcc + 5V	rot
4	Encoder B	grau
5	Encoder /B	grau / schwarz
6	Encoder A	braun
7	Encoder /A	braun / schwarz
8	Encoder Z	orange
9	Encoder /Z	orange / schwarz
10	Hall A	gelb
11	Hall B	weiß
12	Hall C	grün

Steckverbinder: 12pol. Buchsenleiste
 Typ: JST PHR-12

Motorkabel

Signal	Farbe
Motor U	gelb
Motor V	blau
Motor W	grün
PE	grün / gelb

Technische Änderungen vorbehalten.

Deutsch

isel®
 www.isel-germany.de

isel Germany AG ■ Untere Röde 2 ■ D-36466 Dermbach

Tel.: (06659) 981-0 ■ Fax: (06659) 981-776 ■ E-Mail: automation@isel.com ■ Internet: www.isel.com

The Complete, Economical, and Easy to Install Multichannel Analyzer System

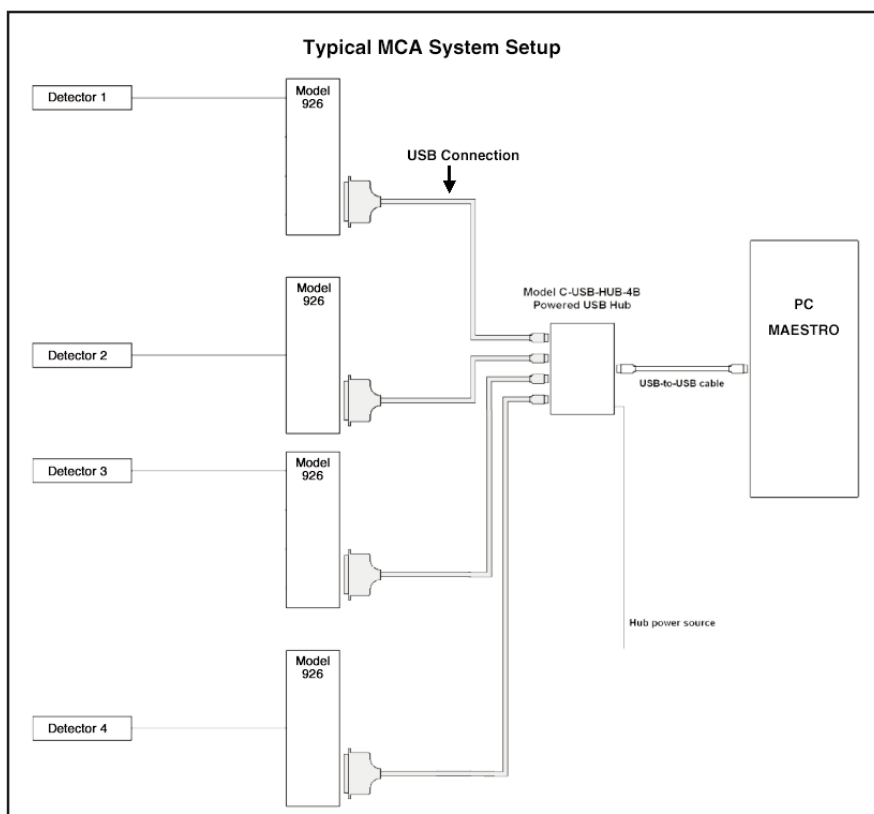
- **926 MCB in a one-wide NIM**
 - 8000-channel ADC ($8\ \mu\text{s}$)
 - Two methods for Dead-Time correction
 - 2 billion counts/channel
 - Multiple presets
 - Multiple computer interfaces
 - GATE, BUSY, and PUR Inputs
- **USB connectivity**
 - Simple to install USB Interface
- **MAESTRO MCA emulation software**
 - Windows 7 (32- and 64-bit) and Windows XP compatible
 - Intuitive User Interface
 - Advanced “SMART” analysis functions
 - Multiple detector interface
 - Automated JOBS



The ORTEC Model 926 Multichannel Buffer (MCB) is a single-wide NIM module designed for high performance in real-time data acquisition. The 926 is a hardware component that provides Analog-to-Digital Conversion (ADC) and Memory. A personal computer is interfaced, through the provided USB connector, to utilize the data acquisition, storage, display, and analysis functions. This is accomplished by issuing ASCII commands from the PC to the 926 MCB's internal 80C188 microprocessor.

Extended Live-Time correction according to the Gedcke-Hale method,¹ or Simple Live-Time correction with the clock turned off during the conversion time, can be selected using printed wiring board jumpers.

MAESTRO MCA Emulation software and quantitative analysis software are available for use with a variety of personal computers in the Windows environment. The easy-to-use command language complies with the standard NIM digital bus NIM/488 per DOE/ER-0457T (formerly NIM/GPIB) protocol definitions.² Control of all functions, including acquisition, presets, and ADC conversion gain are provided using this protocol.



926-M-USB

Multichannel Analyzer

Specifications

PERFORMANCE

ADC Successive-approximation type with sliding-scale linearization.

MAX RESOLUTION 8192 channels, software selectable as 8192, 4096, 2048, 1024, and 512.

DEAD TIME PER EVENT 8 μ s, including memory transfer.

INTEGRAL NONLINEARITY $\leq \pm 0.025\%$ over the top 99% of the dynamic range.

DIFFERENTIAL NONLINEARITY $< \pm 1\%$ over the top 99% of the dynamic range.

GAIN INSTABILITY $\leq \pm 50$ ppm/ $^{\circ}$ C.

DEAD TIME CORRECTION Printed wiring board jumper selects either Extended Live Time correction according to the Gedcke-Hale method, or Simple Live Time correction with the clock turned off during the conversion time.

DATA MEMORY 8k channels of battery backed-up memory; $2^{31}-1$ counts per channel (over 2 billion).

PRESETS

Real Time/Live Time Multiples of 20 ms.

Region of Interest Peak count/Integral count.

Data Overflow Terminates acquisition when any channel exceeds $2^{31}-1$.

MICROPROCESSOR Intel 80C188; 32k Dual-Port RAM with battery backup; 16k "scratchpad" RAM with battery backup. 32k program memory.

FRONT-PANEL INDICATORS AND CONTROLS

CPU BUSY Red, busy-rate LED; intensity indicates the relative activity of the microprocessor.

ADC BUSY Red, busy-rate LED flashes once for each pulse digitized by ADC.

ADC ZERO Screwdriver potentiometer, ± 250 mV.

ADC LLD Screwdriver potentiometer, from 0 to 10% full scale.

INPUTS AND OUTPUTS

INPUT Accepts positive unipolar, positive gated-integrator, or positive-leading bipolar analog pulses in the dynamic range from 0 to +10 V; +12 V maximum; semi-Gaussian-shaped or gated-integrator-shaped time constants from 0.25 to 30 μ s, or delay-line-shaped with width > 0.25 μ s. $Z_{in} \approx 1$ k Ω , dc-coupled. No internal delay. BNC connectors on front and rear panel.

ADC GATE Optional, slow-positive NIM input. Computer-selectable Coincidence or Anticoincidence. Signal must occur prior to and extend 0.5 μ s beyond the peak of the pulse; front-panel BNC connector. $Z_{in} \sim 1$ k Ω .

PUR Pile-up rejection input; accepts slow-positive NIM signal; signal must occur prior to peak detect. $Z_{in} > 1$ k Ω . BNC connector on rear panel.

BUSY Busy input used by live-time correction circuits. Accepts slow-positive NIM signal; signal must occur prior to peak detect. $Z_{in} > 1$ k Ω . BNC connector on rear panel.

DUAL-PORT MEMORY (ORTEC) 37-pin D-connector provides the PC with a communication link and direct access to the Model 926's internal data memory.

PARALLEL PORT Provides for control of the instrument and access to the data memory from a standard IBM PC printer port; male 25-pin D-connector.

PRINTER User installed connection provided to attach either another 926 MCB or a printer to the system; jumper selectable; female 25-pin D-connector.

ELECTRICAL AND MECHANICAL

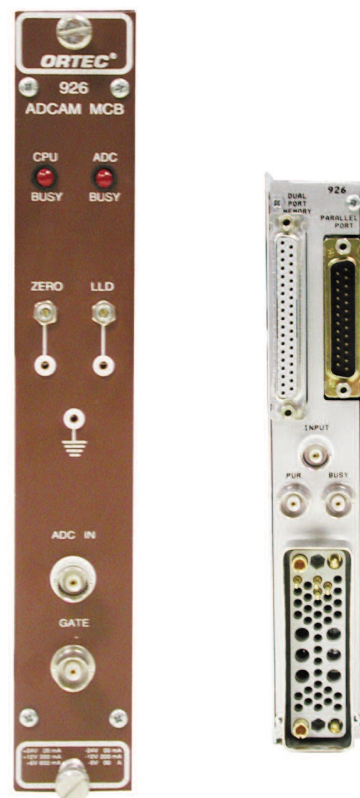
POWER REQUIRED +12 V, 200 mA; -12 V, 200 mA; +6 V, 600 mA.

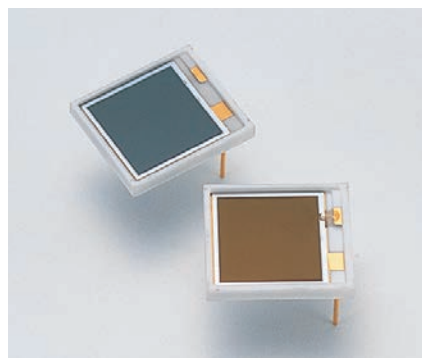
WEIGHT

Net 0.9 kg (2 lb).

Shipping 2.25 kg (5 lb).

DIMENSIONS NIM-standard single-wide 3.43 x 22.13 cm (1.35 x 8.714 in.) front panel per DOE/ER0457T.





Si PIN photodiode

S3590-08/-09/-18/-19

Large active area Si PIN photodiode

Features

- ➔ Sensitivity matching with BGO and CsI (TI) scintillators: S3590-08/-09
- ➔ Sensitivity matching with blue scintillator (LSO, GSO, etc.): S3590-18/-19
- ➔ Bare chip type (unsealed): S3590-09/-19
- ➔ High quantum efficiency: S3590-09 ($\lambda=540$ nm)
S3590-19 ($\lambda=400$ nm)
- ➔ Low capacitance
- ➔ High-speed response
- ➔ High stability
- ➔ Good energy resolution

Applications

- ➔ Scintillation detectors
- ➔ Hodoscopes
- ➔ TOF counters
- ➔ Radiation detection
- ➔ X-ray detection

Structure / Absolute maximum ratings

Type No.	Window material	Active area (mm)	Depletion layer thickness (mm)	Absolute maximum ratings			
				Reverse voltage V_R max	Power dissipation P (mW)	Operating temperature T_{opr} (°C)	Storage temperature T_{stg} (°C)
S3590-08	Epoxy resin	10 × 10	0.3	100	100	-20 to +60	-20 to +80
S3590-09	Unsealed						
S3590-18	Epoxy resin						
S3590-19	Unsealed						

Note: Exceeding the absolute maximum ratings even momentarily may cause a drop in product quality. Always be sure to use the product within the absolute maximum ratings.

Electrical and optical characteristics (Typ. $T_a=25$ °C, unless otherwise noted)

Type No.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (nm)	Photo sensitivity S				Short circuit current I_{sc} 100 lx (μ A)	Dark current I_D $V_R=70$ V		Temp. coefficient of I_D T_{CID} $V_R=70$ V (times/°C)	Cut-off Frequency f_c $V_R=70$ V (MHz)	Terminal capacitance C_t $f=1$ MHz $V_R=70$ V (pF)	NEP $V_R=70$ V ($W/Hz^{1/2}$)
			$\lambda=\lambda_p$ (A/W)	LSO 420 nm (A/W)	BGO 480 nm (A/W)	CsI(Tl) 540 nm (A/W)		Typ.	Max.				
S3590-08	340 to 1100	960	0.66	0.20	0.30	0.36	100	2	6	1.12	40	40	3.8×10^{-14}
S3590-09				0.22	0.33	0.41	90						
S3590-18			0.65	0.28	0.34	0.38	100	4	10				
S3590-19			0.58	0.33	0.37	0.4	86						

Danksagung

Ich möchte mich bei der gesamten Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Weinheimer für eine sehr lehrreiche und angenehme Zeit während meiner Masterarbeit bedanken. Ein besonderer Dank gilt hier Prof. Weinheimer für die Möglichkeit an einer internationalen Kollaboration mitzuwirken und wertvolle Erfahrungen mit dem spannenden Thema meiner Arbeit zu sammeln. Ich danke Prof. Dr. Kappes für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Ein besonderer Dank gilt der CKrS-Gruppe um Dr. Volker Hannen, der immer Zeit für Fragen hatte und mit vielen wichtigen Ratschlägen zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Stephan Dyba danke ich für die sehr gute Betreuung vor Ort in Münster und für die Anstrengungen mit denen er mich tatkräftig unterstützt hat. Außerdem danke ich ihm für das Korrekturlesen der Arbeit.

Hierbei sollen Simon Peters und Oliver Rest als Bürokollegen nicht unerwähnt bleiben. Der Arbeitsalltag war mit euch immer wieder eine Freude.

Ich danke Hans-Werner Ortjohann, ohne dessen Fachwissen diese Arbeit nicht in diesem Maße hätte angefertigt werden können.

Dr. Philipp Ranitzsch danke ich für die Unterstützung, gerade zu Anfang meiner Zeit als Masterstudent in der AG. Aber auch nach seinem Umzug nach Karlsruhe war er immer erreichbar und konnte an der ein oder anderen Stelle noch den entscheidenden Hinweis zu Problemlösungen beisteuern.

Außerdem bedanke ich mich bei meiner Familie die mich stets unterstützt und ermutigt haben, das Studium auch bis zum Ende durchzuziehen und außerhalb der Uni für den nötigen Ausgleich in meinem Leben gesorgt haben.

Ein letzter aber größter Dank geht an Inken Sander für ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums. Besonders in stressigen Zeiten half sie mir, nicht von meinem Weg abzukommen und hat dadurch maßgeblichen Anteil an dem erfolgreichen Abschluss dieses Lebensabschnitts.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und nur mit Hilfe der im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen verfasst habe. Zitate wurden kenntlich gemacht.

Münster, den 13. September 2017