

WESTFÄLISCHE
WILHELMS-
UNIVERSITÄT
MÜNSTER



**Auslese und Ansteuerung eines UHV Manipulators für
Kalibrationsmessungen am KATRIN Hauptspektrometer**

**Readout and control of a UHV manipulator for calibration
measurements at the KATRIN main spectrometer**

Bachelorarbeit

Eingereicht von: Lorenz Josten
Themensteller: Prof. Dr. Christian Weinheimer
Zweitgutachter: Dr. Christian Klein-Bösing

Westfälische Wilhelmsuniversität Münster
Institut für Kernphysik
AG Prof. Dr. Christian Weinheimer

Inhaltsverzeichnis

1. Das KATRIN Experiment	1
1.1. Physikalische Zielsetzung	1
1.2. Übersicht des Experiments	1
1.3. Hauptspektrometer und focal plane detector	4
1.3.1. Funktionsweise des MAC-E-Filters	4
1.3.2. Aufbau des Hauptspektrometers	5
1.3.3. Aufbau und Funktionsprinzip des focal plane detector	7
1.4. Die Elektronenkanone	9
1.5. Geplante Messungen	9
1.6. Anforderungen an den Manipulator	10
2. Modifikationen des UHV-Manipulators der Elektronenkanone	13
2.1. Hardwarekomponenten und Verkabelung des Manipulators	14
2.2. Erweiterung des Winkelbereichs	16
2.3. Montage der optischen Auslese zur Positionsbestimmung	17
2.4. Montage der Lichtschranken als Absolutmaßgeber	18
3. Ansteuerung und Auslese der Manipulatorkomponenten	19
3.1. Programm zur Erstellung von Bahnkurven	19
3.2. Manuelle und automatisierte Steuerung des Manipulators	21
3.2.1. Beschreibung und Bedienung des Programms „computer_main.vi“	21
3.2.2. Erstellung von Protokolldateien	23
3.2.3. Beschreibung und Bedienung des Programms „cFP2020_main.vi“	23
4. Beschreibung und Auswertung der Testmessungen	27
4.1. Genauigkeit der Positionierung	27
4.1.1. Bestimmung des Vorschubs der Achsen	27
4.1.2. Einfluss der Rechenzeit auf die Positionierung	29
4.1.3. Restbewegung nach dem Schließen der Ventile	37
4.2. Präzision des Schrittalgorithmus	42
4.2.1. Präzision und Dauer der Positionierung	53
4.3. Reproduzierbarkeit des Schaltpunktes der Lichtschranken	55
5. Diskussion und Ausblick	61
A. Anhang	63
A.1. Programmausschnitte	63
A.1.1. „Create_Trajectories.vi“	63
A.1.2. „computer_main.vi“	65
A.1.3. „cFP2020_main.vi“	68

A.2. Datenblätter	70
-----------------------------	----

Quellenangaben	87
----------------	----

1. Das KATRIN Experiment

1.1. Physikalische Zielsetzung

Seit der Beobachtung von Neutrinooszillationen durch das Super-Kamiokande¹ [Fa98] ist sicher, dass Neutrinos eine Masse $m(\nu_e) > 0$ besitzen [CGL09]. Mit dem KATRIN-Experiment (Karlsruhe Tritium Neutrino-Experiment) soll, wie in beiden Vorgängerexperimenten in Mainz und Troitsk, $m(\nu_e)$ direkt bestimmt werden. Durch das verwendete MAC-E-Filter² Prinzip kann die bestehende obere Schranke für die Neutrinomasse um eine Größenordnung nach unten auf $0,2 \frac{\text{eV}}{c^2}$ (90% Konfidenzintervall) verbessert werden. Eine Bestimmung der Masse im Konfidenzintervall von 3σ gelingt, falls $m(\nu_e) \geq 0,35 \frac{\text{eV}}{c^2}$ [TKb].

1.2. Übersicht des Experiments

Das KATRIN-Experiment wird am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) aufgebaut. In Abbildung 1.1 ist der 70 m lange Aufbau des Experiments zu sehen. Im Folgenden sollen die dargestellten Komponenten der Kennzeichnung nach knapp erläutert werden.

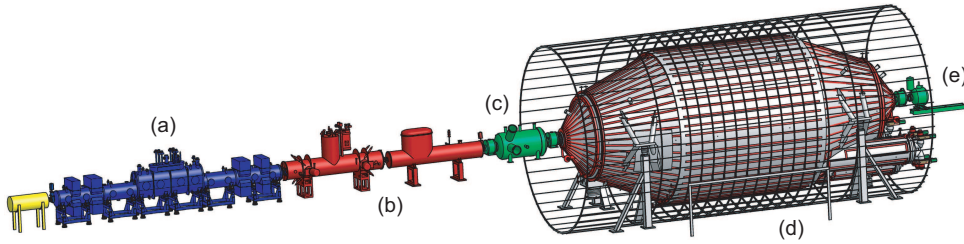


Abbildung 1.1. – Der Aufbau des KATRIN Experiments: (a) Kalibrations- und Überwachungssystem (CMS) und fensterlose gasförmige Tritiumquelle (WGTS), (b) Transport- und Pumpstrecke (differentielle Pumpstrecke (DPS) und kryogene Pumpstrecke (CPS)), (c) Vorspektrometer, (d) Hauptspektrometer und (e) Focal Plane Detector (FPD) [Val09].

- (a) Im Tritiumlabor des KIT ist die fensterlose Tritiumquelle (WGTS) untergebracht. Tritium hat eine Halbwertszeit von 12,3 a. In der WGTS entstehen bei einer Temperatur von $T = 27 \text{ K}$ durch den β^- -Zerfall

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

Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ und die im Experiment detektierten Elektronen. Es wird nicht die gesamte Zerfallsenergie von $E_0(T_2) = (18571,8 \pm 1,2) \text{ eV}$ in kinetische Energie der Elektronen umgewandelt. Ein Teil der Energie wird auch auf das $\bar{\nu}_e$

¹Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment

²Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter

übertragen. Darin liegt der Grund für das charakteristische, kontinuierliche Emissionsspektrum des β^- -Zerfalls. Die Differenz von berechneter Endpunktsenergie der Verteilung bei einer theoretischen Neutrinomasse $m(\nu_e) = 0 \frac{\text{eV}}{c^2}$ und gemessener Endpunktsenergie entspricht der gesuchten Neutrinomasse [Val09] (vgl. Abbildung 1.2). Über ein Magnetfeld der Stärke $B = 3,6 \text{ T}$ werden die Zerfallselektronen adiabatisch aus der Quelle transportiert, während ein Großteil des Tritiumgases am Ende der WGTS abgepumpt wird.

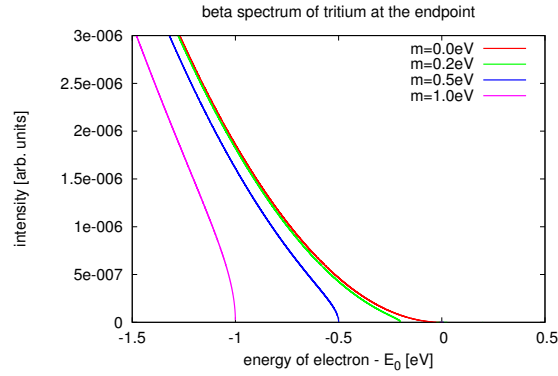


Abbildung 1.2. – Elektronen-Emissionsspektrum des Tritiums für den Fall $m_\nu = 0 \text{ eV}c^2$ und $m_\nu > 0 \text{ eV}c^2$ [Hil11].

- (b) Die Transport- und Pumpstrecke gliedert sich in zwei Hauptabschnitte. In der differentiellen Pumpstrecke (DPS) wird mit Turbomolekularpumpen der Tritiumfluss von $\sim 3 \cdot 10^{17} \frac{\text{Moleküle}}{\text{s}}$ um fünf Größenordnungen auf ca. $3 \cdot 10^{12} \frac{\text{Moleküle}}{\text{s}}$ reduziert. Außerdem werden beim Tritiumzerfall entstandene Ionen durch Absorption an der Außenwand der Pumpstrecke am Verlassen des Systems gehindert. Dafür werden elektrische Dipole genutzt. Neutrale Tritiummoleküle werden durch einen Knick der Pumpstrecke von ca. 20° von der Propagation abgehalten. An die DPS schließt sich die kryogene Pumpstrecke (CPS) an. Dort befinden sich mit 6 K kaltem Argonfrost beschichtete Goldoberflächen, an denen das restliche Tritiumgas ausgefroren wird. Um diffus gestreute Moleküle aus der Flugbahn abzulenken und die Wahrscheinlichkeit ihrer Kollision mit der Wand zu erhöhen, wird ein Magnetfeld von 5,6 T angelegt, dem die Elektronen adiabatisch folgen, ohne mit der Wand in Berührung zu kommen. Insgesamt wird mit der CPS und DPS der Partialdruck des Tritiums um einen Faktor 10^{14} reduziert.
- (c) Mit dem Vorspektrometer werden niedrigenergetische Elektronen aus dem magnetischen Flussschlauch gefiltert. Dazu wird das MAC-E-Filter Prinzip verwendet, das in Abschnitt 1.3.1 näher erläutert wird. Das Vorspektrometer hat einen äußeren Durchmesser von 1,70 m und eine Länge von 3,38 m. Zwei supraleitende Magnete im Abstand von 4,3 m sorgen unter Berücksichtigung der Wirkung anderer Magnete des Setups für ein Streufeld von 0,027 T in der Analysierebene. Die Hülle des elektrisch isolierten Hauptspektrometers wird auf Hochspannung gelegt. Um das Eindringen niedrigenergetischer Elektronen, die z.B. durch kosmische Höhenstrahlung in

der Tankwand entstehen, in den magnetischen Flussschlauch zu vermeiden, werden zwei zylindrisch und konisch angeordnete Elektrodensysteme im Innenbereich des Spektrometers eingesetzt. Aufgrund einer Potentialdifferenz von $\Delta U \approx 100 \text{ V}$ zur Außenhülle werden in der Tankwand entstandene Elektronen zurück reflektiert. Wie Messungen am Mainzer Spektrometer gezeigt haben, führt das Elektrodensystem zu einer Reduktion des Elektronenuntergrunds. Außerdem kann damit das Potential der Außenwand stabilisiert werden und Penningfallen innerhalb des Spektrometers vermieden werden.

- (d) Hauptspektrometer und Vorspektrometer funktionieren nach den gleichen Prinzipien. Das 200 t schwere und 23,28 m lange Hauptspektrometer hat einen inneren Durchmesser von 9,8 m bei einem Gesamtvolumen von 1400 m^3 . Beim Ausheizen bei 350 °C kommt es zu einer Längenänderung von 20 cm. Deshalb ist das Spektrometer auf zwei Gleitlagern montiert. Mit dem Hauptspektrometer werden Elektronen nahe der Endpunktsenergien des β^- -Zerfalls von Tritium untersucht. Die Außenhülle des Spektrometers ist analog zum Vorspektrometer auf Hochspannung gelegt und dient somit als Hauptelektrode für die Grundfunktion des MAC-E-Filters. Die exakte Form des elektrischen und magnetischen Feldes wird durch ein Drahtelektrodensystem im Inneren und Luftspulen außerhalb des Spektrometers gebildet. Durch das Drahtelektrodensystem werden quellenfremde Elektronen zurück zur Tankwand reflektiert. Die Messungen am Hauptspektrometer sollen bei einem Druck von $\approx 8 \cdot 10^{-11} \text{ bar}$ durchgeführt werden. Dazu werden zwei Vorpumpen, Turbomolekularpumpen und Getterpumpen eingesetzt [TKb].
- (e) Der Focal Plane Detector (FPD) soll die durch das Hauptspektrometer gelangten Elektronen detektieren. Er befindet sich in einer supraleitenden Magnetspule, die Magnetfelder bis zu einer Stärke von 6 T erzeugt. Damit kann der Detektor vor Hintergrundelektronen geschützt werden. Durch die Unterteilung des Detektors in einzelne Segmente erreicht man eine positionsaufgelöste Messung. Es kann somit die Bahn eines Elektrons im Spektrometer rekonstruiert werden. Weiterhin wird damit der Potentialdurchgriff, die Potentialänderung $U = U(r)$, in der Analysierebene kompensiert. Um den Detektor vor intrinsischen Hintergrundsignalen zu schützen, befindet sich um diesen herum eine Stahl- und Kupferschicht. Kosmische Hintergrundstrahlung, die das aufgezeichnete Signal beeinflusst, wird mit Szintillationsdetektoren nachgewiesen.

1.3. Hauptspektrometer und focal plane detector

1.3.1. Funktionsweise des MAC-E-Filters

Der MAC-E-Filter (Magnetic Adiabatic Collimation combined with Electrostatic Filter) wurde konzipiert um eine hohe Luminosität bei gleichzeitig hoher Energieauflösung zu erreichen. In Abbildung 1.3 ist die Funktionsweise des Filters schematisch dargestellt.

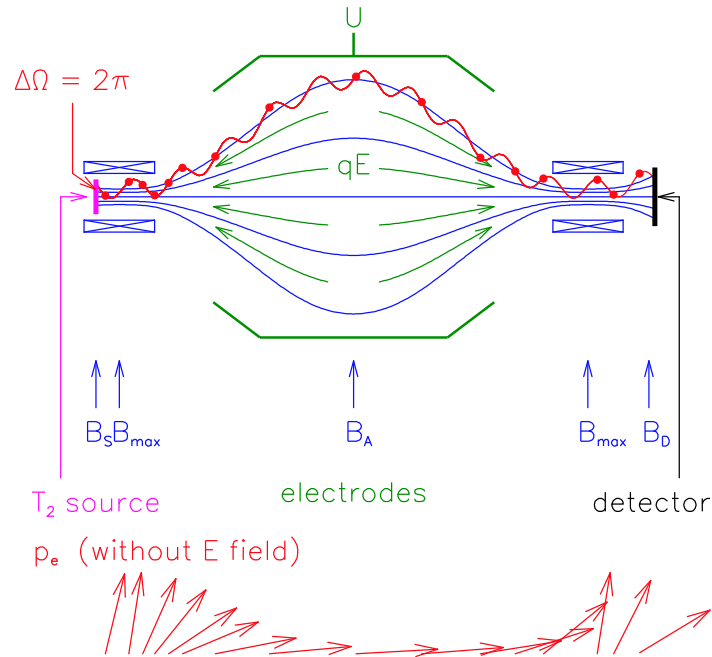


Abbildung 1.3. – Schematische Darstellung der Funktionsweise eines MAC-E-Filters. Oben: Experimentelle Anordnung. Unten: Änderung des Impulses aufgrund adiabatischer Invarianz des magnetischen Moments im inhomogenen Magnetfeld [Ost08].

Am Anfang und Ende des Spektrometers befindet sich je ein supraleitender Magnet. Diese erzeugen ein inhomogenes Feld B (blau), dem die Elektronen unter Ausführung einer Zyklotronbewegung folgen. Entlang der Achse durch die Öffnungen der Magnete weiten sich die Feldlinien nach außen auf bis sie in der Mitte des Tanks ihre maximale Ausdehnung erreicht haben. Gleichzeitig nimmt mit wachsendem Abstand zu den Magneten die Feldstärke um mehrere Größenordnungen ab. Der Feldstärkegradient wandelt die Transversalkomponente des Elektronenimpulses wie in Abbildung 1.3 unten dargestellt in einen longitudinalen Impuls um. Entlang der Außenwand sind zylindrische Elektroden angebracht. Diese bilden einen Potentialwall aus, der die Elektronen abbremst und nur von Zerfallselektronen mit ausreichender Energie überwunden werden kann. Anschließend werden diese auf ihre ursprüngliche Geschwindigkeit beschleunigt. Alle anderen Elektronen werden reflektiert. Der MAC-E-Filter agiert als Hochpassfilter und erlaubt durch Variation des elektrostatischen Potentials die Vermessung des integrierten β -Spektrums. Im KATRIN Experiment wird das Potential um die Endpunktsenergie des β^- -Spektrums von Tritium variiert.

Das magnetische Moment der Elektronen

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B}$$

bleibt aufgrund der langsamen Änderung der Magnetfeldstärke erhalten. $E_{\perp} = E_{kin} \cdot \sin^2(\theta)$ bezeichnet hier den Energieanteil der transversalen Bewegung, θ den Winkel zwischen Impuls- und Magnetfeldvektor. Da die Magnetfeldstärke abnimmt und die Gesamtenergie der Elektronen

$$E_{ges} = E_{\perp} + E_{\parallel}$$

erhalten bleibt, nimmt der longitudinale Impuls der Elektronen zu. Die maximale relative Energieauflösung

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_A}{B_{max}}$$

ist abhängig von dem Verhältnis der minimalen Magnetfeldstärke B_A im Zentrum des Spektrometers zu der maximalen Feldstärke B_{max} am Eingang des Spektrometers. Für das KATRIN Experiment beträgt die Energieauflösung

$$\Delta E = \frac{B_{max}}{B_{min}} \cdot E = \frac{6 \text{ T}}{3 \cdot 10^{-6} \text{ T}} \cdot 18,6 \cdot 10^3 \text{ eV} = 0,93 \text{ eV}.$$

[TKa]

1.3.2. Aufbau des Hauptspektrometers

Das 23,3 m lange Hauptspektrometer hat einen Durchmesser von 10 m und ist eine der Schlüsselkomponenten des KATRIN Experiments.



Abbildung 1.4. – Foto vom Transport des Tanks des Hauptspektrometers [Val09].

Aufgrund seiner günstigen magnetischen Eigenschaften und Robustheit, wurde der Tank aus rostfreiem Stahl (316LN) gefertigt. Der limitierte Kobalt- und Nickelgehalt des Materials soll für geringe Zerfallsaktivitäten in der Tankwand sorgen. Für den großen Tank wurde ein spezielles Vakuumsystem mit Pumpraten bis zu $10^4 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ entwickelt, so dass ein Druck von ca. 10^{-11} bar erzeugt werden kann.

Durch zwei supraleitende Magnetspulen am Anfang und Ende des Spektrometers wird ein stark inhomogenes Magnetfeld im Inneren erzeugt, das den magnetischen Flussschlauch in der Analysierebene auf einen Durchmesser von 9 m aufweitet. 20 Luftspulen außerhalb des Spektrometers erlauben eine feinere Kalibrierung des Magnetfelds. Die auf Hochspannung gelegte Außenhülle des Hauptspektrometers fungiert als Hauptelektrode, über ein doppel-lagiges Drahtelektrodensystem im Inneren wird für den benötigten Verlauf des Potentials gesorgt. Das Elektrodensystem besteht aus 248 Drahtmodulen, welche von der Tankwand elektrisch isoliert angebracht wurden. Die innere Schicht der doppel-lagigen Konstruktion schirmt das Potential der Haltestruktur der Drahtsysteme ab. Mit dem Aufbau soll die Untersuchung des Endpunkts des Emissionsspektrum des β^- -Zerfalls mit einer Energieauflösung von 0,93 eV ermöglicht werden. Die Transmissionsfunktion für Elektronen ist sensitiv auf das Potential in der Analysierebene. In einem idealen Spektrometer verläuft die Transmissionsfunktion wie in Abbildung 1.5 dargestellt [TKa].

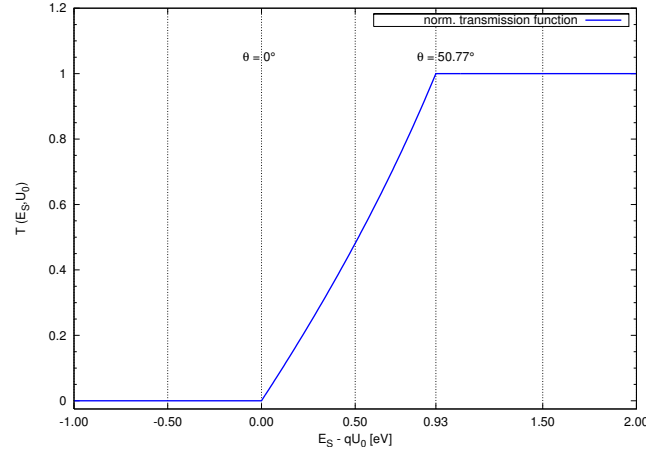


Abbildung 1.5. – Winkelabhängige Transmissionsfunktion des Hauptspektrometers für Elektronen aus der Tritiumquelle [Ost08]

1.3.3. Aufbau und Funktionsprinzip des focal plane detector

Der focal plane detector (FPD) befindet sich innerhalb einer gesonderten Zylinderspule am Ende des Hauptspektrometers. Er muss daher mit Magnetfeldstärken bis zu 6 T kompatibel sein. Für das geplante Experiment müssen Elektronen aus dem β^- -Zerfall, die Energien bis zu 18,6 keV besitzen, detektiert werden. Des Weiteren sollen auch Koverselektronen des ^{38}Kr mit Energien von 17,8 keV bis zu 32 keV erkannt werden. Für Flugzeitmessungen der Elektronen muss der Detektor eine entsprechende zeitliche Auflösung besitzen. Zusätzlich darf das Ultrahochvakuum nicht verunreinigt werden. Die daraus entstehenden Anforderungen werden durch auf Halbleitertechnologie basierende Detektoren abgedeckt. Es werden monokristalline PIN-Dioden verwendet, welche auf einem 5"-wafer untergebracht sind. Die Elektronik für die Auslese wird in einem von hochreinem Kupfer geschirmten, separaten Bereich außerhalb des Ultrahochvakuums untergebracht. Durch die Unterteilung des Detektors in 148 Segmente mit einer Energieauflösung einzelner Pixel von ≈ 1 keV (HWB) können den Pixeln Koordinaten in der Analysierebene zugeordnet werden. Das erlaubt die Rekonstruktion der gesamten Trajektorie adiabatisch geleiteter Elektronen und das Aufzeichnen von Inhomogenitäten des elektrostatischen Retadierungspotentials in der Analysierebene. Weiterhin kann die Homogenität des Quellenpotentials bei Messungen mit der Tritiumquelle bestimmt werden und Ursprünge von Hintergrundsignalen aufgefunden werden (Design Report 2004). Abbildung 1.6 zeigt den Siliziumwafer des Detektors [TKb].

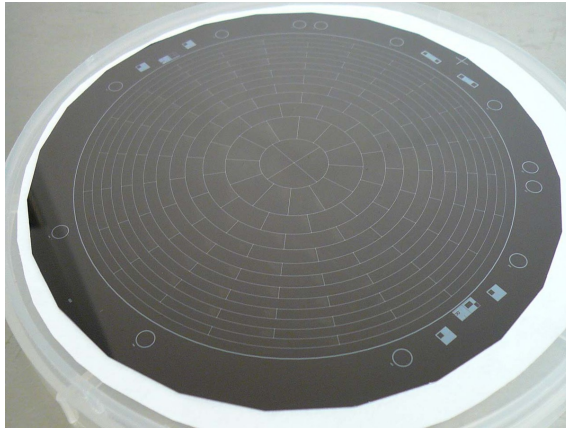


Abbildung 1.6. – Siliziumwafer des FPD [TKb].

1.4. Die Elektronenkanone

Eine Elektronenkanone wurde bereits für Kalibrationsmessungen am Spektrometer in Mainz verwendet. Sie dient als winkelselektive Elektronenquelle mit definiertem Energiespektrum. In Abbildung 1.7 ist eine schematische Darstellung der Elektronenkanone zu sehen. Abbildung 1.8 zeigt ein Foto der Kathoden zur Beschleunigung der Elektronen.

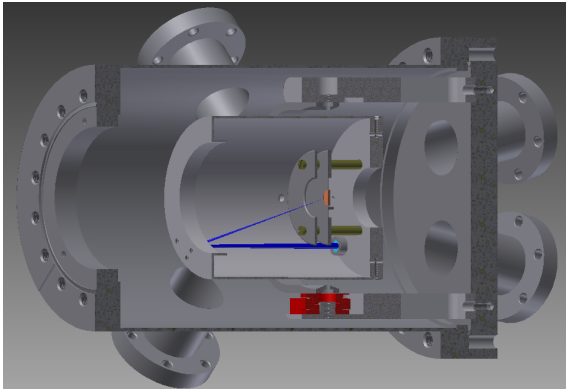


Abbildung 1.7. – Schematische Darstellung der Elektronenkanone [Han13]

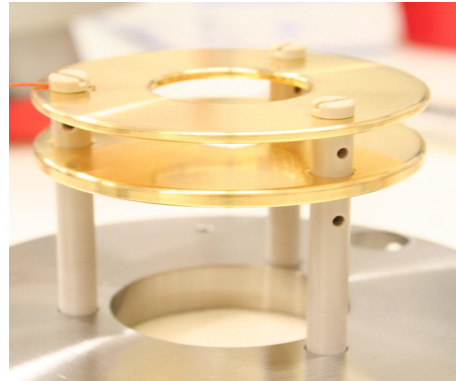


Abbildung 1.8. – Fotografie der Elektroden der Elektronenkanone [Han13]

Durch eine Kathode auf Hochspannung U_c werden unter Ausnutzung des Photoeffekts Elektronen emittiert. Diese werden anschließend in zwei Schritten beschleunigt, zuerst durch eine zweite Elektrode auf positiveren Potential $U_{acc} = U_C + \Delta U$, im nächsten Schritt durch die Potentialdifferenz zwischen der zweiten Elektrode und dem Grundpotential der Hülle. Zur Erzeugung der Elektronen wird ein Glasfaserleiter verwendet, der mit einer 40 nm-Schicht Silber bedampft wurde. Dieser wird zentral in einer Stahlplatte fixiert und von einem gepulsten UV-Laser mit einer Wellenlänge $\lambda = 266 \text{ nm}$ beleuchtet. Die Stahlplatte wird als erste Kathode verwendet. Mit diesem Aufbau wird ein scharfer, zentrierter Elektronenstrahl erzeugt, der sich durch geringe Streuung auszeichnet. Entscheidend für die Bahn der Elektronen durch das Hauptspektrometer am KATRIN-Experiment ist der Eintrittswinkel θ des emittierten Elektronenstrahl in das Magnetfeld der Spulen, aus dem die Winkelselektivität für die kinetische Energie der Elektronen folgt [Han13]:

$$\begin{aligned} E_{\parallel} &= E_{kin} \cdot \sin^2(\theta) \\ E_{\perp} &= E_{kin} \cdot \cos^2(\theta) \end{aligned}$$

1.5. Geplante Messungen

Die Elektronenkanone eignet sich aufgrund ihrer Winkelselektivität für verschiedene Kalibrations- und Testmessungen am Hauptspektrometer:

- Es soll jedes Pixel des Detektors kalibriert werden. Diese sind in verschieden große Segmente unterteilt und werden mit dem UHV-Manipulator für die Elektronenkanone einzeln angefahren. Bei bekannter Elektronenrate kann damit die Sensitivität und Funktionalität der PIN-Dioden des Detektors überprüft werden.

- Die Pixelgrenzen des Detektors werden vermessen, um Detektorcharakteristika wie z.B. Crosstalk zu verstehen.
- Der gesamte magnetische Flussschlauch wird abgerastert und ein Profil des Potentialverlaufs erstellt. Somit können Auswirkungen von Schwankungen im Retardierungspotential auf die Zerfallselektronen berücksichtigt werden.
- Aus dem Verhalten der Elektronen beim Durchlaufen des Tanks können außerdem Aussagen über die Ausrichtung der internen Komponenten zueinander getroffen werden. Asymmetrische Anordnungen führen zu einer Inhomogenität des Retardierungspotentials.
- Durch einen Materialfehler ist das Drahtelektrodensystem beim Ausheizen beschädigt worden. Durch Abrastern der äußeren Bereiche des Spektrometers kann dessen Integrität überprüft werden [TKc].

1.6. Anforderungen an den Manipulator

Die Elektronenkanone soll von dem Manipulator über einen Winkelbereich von -23° bis 23° bewegt werden um den gesamten magnetischen Flussschlauch abzudecken. Für die Kalibrations- und Testmessungen wird dabei eine Winkelauflösung von weniger als $0,01^\circ$ benötigt. Um den Detektor vermessen zu können, sollte die Steuerungssoftware sowohl kreisförmige, als auch lineare Bewegungen des Manipulators unterstützen.

Ein Überfahren des vorgegebenen Winkelbereichs führt zum Auslösen von zweistufigen Sicherheitsendschaltern. In erster Instanz wird ein Softwarealarm ausgelöst. Im Falle eines Defekts der ersten Lage wurde für jeden Endpunkt ein zusätzlicher Hardwareendschalter montiert, der für ein hardwareseitiges Schließen der Ventile sorgt [Han13]. In Abbildung 1.9 ist die Elektronenkanone mit dem UHV-Manipulator am Eingang des Hauptspektrometers schematisch dargestellt.

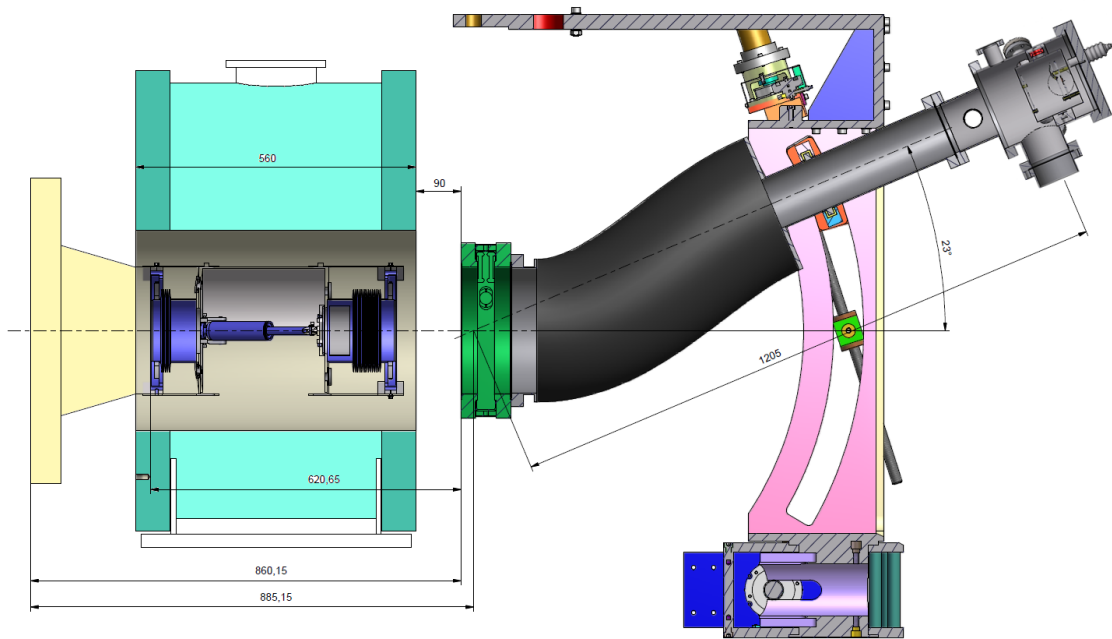


Abbildung 1.9. – Schematische Darstellung des Aufbaus der Elektronenkanone am Eingang des Hauptspektrometers.

2. Modifikationen des UHV-Manipulators der Elektronenkanone

Der UHV-Manipulator wurde in Mainz gebaut und dort für Kalibrationsmessungen am Spektrometer eingesetzt. Auch das Vorspektrometer am KATRIN-Experiment wurde damit kalibriert. Für die in Kapitel 1.5 aufgelisteten Messungen am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments wurde der Manipulator im Rahmen dieser Bachelorarbeit durch verschiedene Komponenten erweitert und eine Software zur Automatisierung der Messungen entwickelt. Mit den neuen Komponenten soll die Bestimmung der Absolutposition des Manipulators auf mindestens $0,01^\circ$ ermöglicht werden. In Abbildung 2.1 ist ein Foto des Aufbaus im Hochspannungslabor des Instituts für Kernphysik in Münster zu sehen.

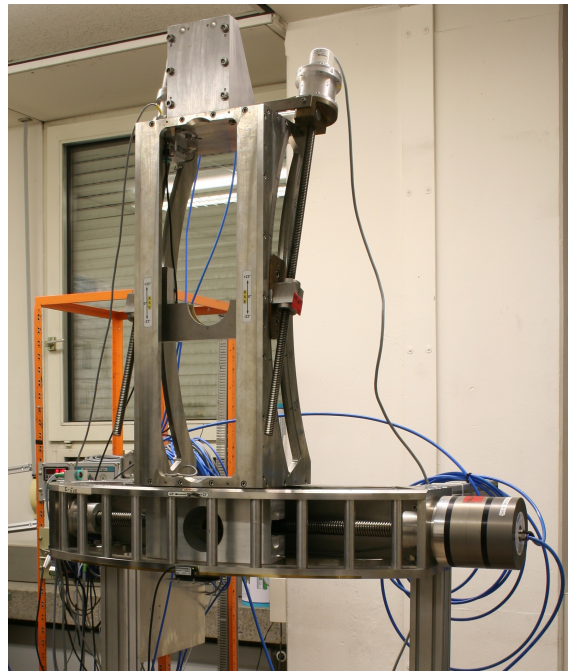


Abbildung 2.1. – Aufbau des Manipulators im Institut für Kernphysik in Münster.

2.1. Hardwarekomponenten und Verkabelung des Manipulators

Abbildung 2.2 zeigt die Steuereinheit des Manipulators. In dem oberen Chassis ist die Hardware für die manuelle Steuerung des Manipulators und zur Statusüberprüfung der Manipulatorkomponenten untergebracht. Mit dem Schlüssel kann zwischen manueller Steuerung und Softwaresteuerung umgeschaltet werden. Auf den ERMA-Anzeigegeräten wird die aktuelle Position des Manipulators in der Kleinwinkelnäherung $\sin(\theta) = \theta$ angezeigt. Zur Berechnung der Werte werden die Encoder am Ende der Achsen ausgelesen. Diese erhöhen ihre Inkrementwerte bei Drehung der Achsen. Die untere Haltevorrichtung trägt Steuermodule und Controller der Firma National Instruments (NI):

- Ein NI cFP-2020 (compact Field Point) Modul übernimmt die Datenübertragung und Kommunikation mit dem Computer und den einzelnen Steuerblöcken. Es handelt sich dabei um eine Ethernet-Controller-Schnittstelle, auf der Programme zur Steuerung des Manipulators gespeichert und ausgeführt werden können. Über die Ethernet-Schnittstelle erfolgt die Kommunikation mit dem lokalen Computer. Eine integrierte RS-485-Schnittstelle kann genutzt werden um die Werte der ERMA-Anzeige auszuwerten.
- An die NI cFP-DI-301 Einheit wird der Status der Sicherheitsendschalter, des Faltenbalks, der neu montierten Lichttaster und die Schlüsselstellung weitergeleitet.
- Das NI cFP-RLY-421 Modul sendet Steuersignale für das Öffnen und Schließen der Druckluftventile, über die die Motoren betrieben werden.
- Mit dem NI cFP-Quad-510, der in Münster eingebaut wurde, werden die optischen Encoder ausgelesen und zurückgesetzt.



Abbildung 2.2. – Foto der Steuereinheit des Manipulators. Oben: Hardware zur Auslese der Encoder an den Achsen, Statusüberprüfung von Faltenbalk und der Sicherheitsendschalter und zum Umschalten zwischen manueller und softwareseitiger Steuerung des Manipulators. Unten: Controller der Firma National Instruments zur softwareseitigen Ansteuerung und Auslese der Manipulatorkomponenten.

Die Verkabelung des Manipulators mit der Steuereinheit ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Sie lässt sich durch die farbliche Kodierung in drei Bereiche aufteilen:

- Mit roten Aufklebern markierte Anschlüsse sind für die Verkabelung der Komponenten des horizontalen Schwenkarms vorgesehen. Oben links befindet sich ein überbrückter Ausgang **X16**, der mit dem Ausgang **X11** auf der rechten Seite zusammengelegt wurde.
Über den mittleren Eingang **X15** liest das Gerät den Encoder des horizontalen Schwenkarms aus, die Ausgänge **X12** und **X13** werden verwendet um Steuerbefehle zu den Druckluftventilen zu schicken. Durch das Kabel im Ausgang **X14** wird der Stromkreis zu den Endschaltern des horizontalen Schwenkarms geschlossen.
- Gelbe Aufkleber kennzeichnen Verbindungen zu Komponenten des vertikalen Schwenkarms. Über die Leitung in der Buchse **X11** kann das Field Point-Modul auf die Werte der ERMA-Anzeigen zugreifen. Das Kabel in **X10** wird zum Auslesen des Encoders der vertikalen Achse benötigt. Über die Ausgänge **X7** und **X8** können Steuerbefehle an die Ventile für die Motoren der vertikalen Achse gesendet werden.
- Der blau markierte Eingang **X17** wird verwendet um Befehle von dem NI cFP-RLY-421 im softwaregesteuerten Betrieb des Manipulators zu empfangen. Die Buchse **X18** dient zur Übermittlung der Statusinformationen von Sicherheitsendschaltern, Faltenbalk (**X19**) und der Schlüsselstellung an das cFP-DI-301 Modul.



Abbildung 2.3. – Foto der Verkabelung der Manipulatorkomponenten mit der Steuereinheit.

2.2. Erweiterung des Winkelbereichs

Um die in Kapitel 1.5 beschriebenen Messungen durchführen zu können, muss der Manipulator im Winkelbereich von -23° bis 23° beweglich sein. Nachdem der Manipulator in Münster aufgebaut worden war, konnte die vertikale Achse zwischen -23° und 20° bewegt werden. Ausschlaggebend für die Restriktion war ein Offset des Absolutencoders an der vertikalen Achse (auf dem Foto in Abbildung 2.4 gekennzeichnet). Damit der gesamte Winkelbereich verwendet werden kann, wurde der Schlitten der vertikalen Achse bis zur 23° -Position gefahren und anschließend der Encoder mit dem dafür vorgesehenen Knopf zurückgesetzt. Das zugehörige Anzeigegerät der Firma ERMA wurde zurückgesetzt, nachdem der Schlitten der vertikalen Achse in Mittelstellung gebracht wurde. Abbildung 2.4 zeigt ein Foto des Encoders der vertikalen Achse.



Abbildung 2.4. – Foto des Encoders der vertikalen Achse.

2.3. Montage der optischen Auslese zur Positionsbestimmung

Die Auflösung der Encoder an den Achsen, welche die Position des Manipulators über die Zahl der Umdrehung der Achsen bestimmen, beläuft sich auf 10^{-2}° . Durch das Spiel in der horizontalen Achse stimmt der Wert des zugehörigen Encoders in den Umkehrpunkten nicht mit der tatsächlichen Position überein. Für die Berechnung der Position des Schlittens der vertikalen Achse ist die Kleinwinkelnäherung $\sin(\theta) = \theta$ sehr ungenau. Damit die Kalibration des Hauptspektrometers wie geplant durchgeführt werden kann, wurden deshalb optische Encoder der Marke Renishaw an beiden Schwenkarmen angebracht. Das entsprechende Datenblatt ist im Anhang zu finden. Die Halterungen für die Encoder der vertikalen und horizontalen Achse sind in Abbildungen 2.5 und 2.6 dargestellt. Abbildung 2.7 zeigt ein Foto des optischen Encoders mit dem zugehörigen, vergoldeten optischen Maßband an dem horizontalen Schwenkarm.

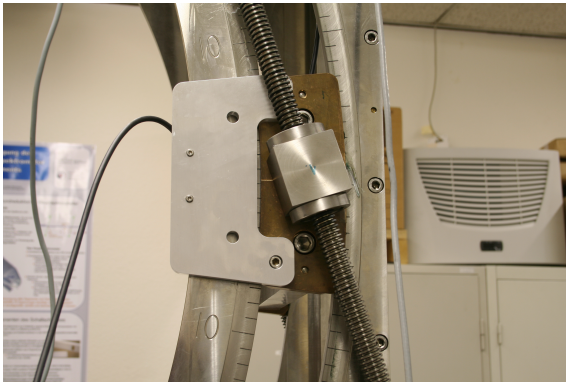


Abbildung 2.5. – Halterung für den optischen Encoder der vertikalen Achse.



Abbildung 2.6. – Halterung für den optischen Encoder der horizontalen Achse.



Abbildung 2.7. – Foto des optischen Encoders und dem optischen Maßband an der horizontalen Achse.

Die optischen Encoder besitzen eine Auflösung $A = 10^{-3}$ mm. Der Außenradius des horizontalen Schwenkarms beträgt mit dem für die optische Auslese angebrachten Maßband

$r_h = 860,2 \text{ mm}$. Daraus ergibt sich ein Umrechnungsfaktor

$$d_h = r_h \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \approx 1501,33 \text{ Inkrement}/^\circ$$

von Encoderinkrementen zu Grad. Analog erhält man mit einem Innenradius des vertikalen Schwenkarms $r_v = 659,8 \text{ mm}$ den Umrechnungsfaktor

$$d_v \approx 1151,57 \text{ Inkrement}/^\circ.$$

Bei den Encodern handelt es sich um Relativencodern. Bei einem Neustart der Hardware wird der Encoder zurückgesetzt und die Encoderinkremente relativ zu der Ausgangsposition erhöht.

2.4. Montage der Lichtschranken als Absolutmaßgeber

Während der Messungen am Hauptspektrometer soll die absolute Position des Manipulators bekannt sein. Damit Referenzfahrten zur Positionsbestimmung durchgeführt werden können, wird ein Fixpunkt benötigt, der wiederholt angefahren werden kann. Zu diesem Zweck wurden Reflexions-Lichttaster der Marke Pepperl+Fuchs an dem Manipulator befestigt. Das zugehörige Datenblatt befindet sich im Anhang. Durch ein Potentiometer, dass über einen Kreuzschlitz an der Oberseite des Gehäuses verstellt werden kann (in Abbildung 2.8 gekennzeichnet), wird der Tastbereich des Lichttasters variiert. Die Lichttaster weisen ein Hystereseverhalten auf. Dadurch entstehen zwei Schaltpunkte für die Lichtschranken, deren Schaltverhalten in Kapitel ?? näher untersucht wird. Abbildungen 2.8 und 2.9 zeigen Fotos der Lichttaster mit Befestigung an der horizontalen und vertikalen Achse.



Abbildung 2.8. – Lichttaster mit Halterung an der horizontalen Achse.

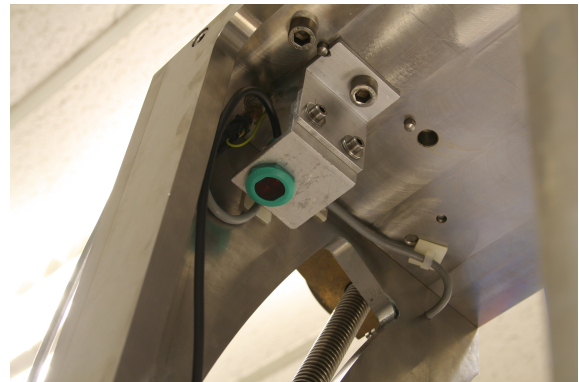


Abbildung 2.9. – Lichttaster mit Halterung an der vertikalen Achse.

3. Ansteuerung und Auslese der Manipulatorkomponenten

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde eine Software für die Ansteuerung und Auslese der Manipulatorkomponenten entwickelt. Die Messungen mit der Elektronenkanone am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments können damit zum Teil automatisiert werden. Die Software wird auf zwei Systemen ausgeführt. Mit den auf dem lokalen Computer laufenden Programmen kann der Benutzer Dateien mit Bahnkurven für die Bewegung des Manipulators erstellen und auslesen. Ein weiteres Programm für den Betrieb der Manipulatorkomponenten wird auf dem in Kapitel 2.1 beschriebenen cFP-2020-Modul ausgeführt. Die Programme können über Ethernet kommunizieren und Daten austauschen.

3.1. Programm zur Erstellung von Bahnkurven

Die Kalibrationsmessungen am KATRIN-Hauptspektrometer sollen automatisiert werden, indem der Benutzer Bahnkurven vorgibt, entlang derer sich der Manipulator bewegt. Mit LABView, einem grafischen Programmiersystem von National Instruments, wurde ein Programm für die Erstellung solcher Bahnkurven entwickelt.

Öffnet der Benutzer die Projektdatei „**manipulator_control.lvproj**“ kann das Programm durch einen Doppelklick auf den Eintrag „**create_trajectory.vi**“ im Projek Explorer geladen werden. Die Benutzeroberfläche ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

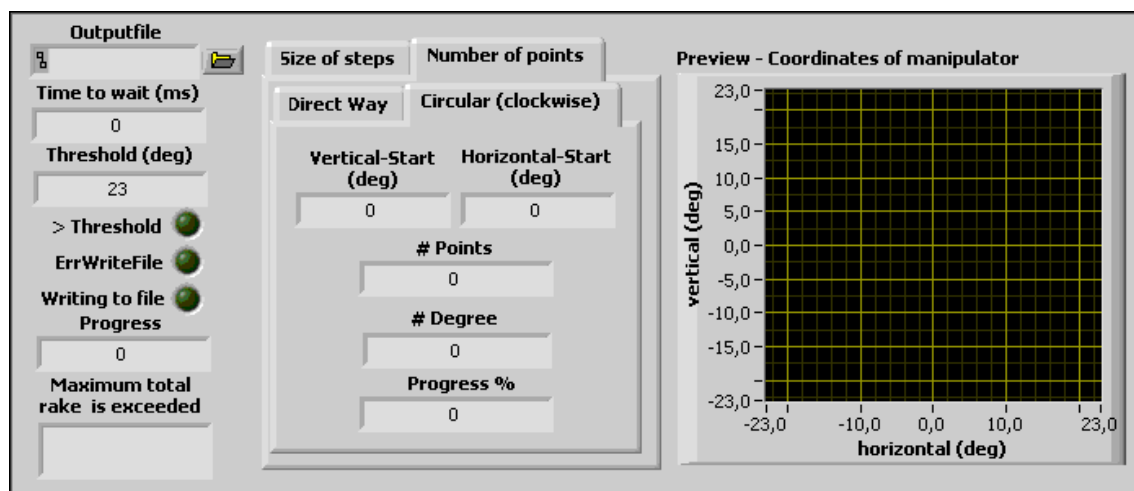


Abbildung 3.1. – Benutzeroberfläche der Programms zur Erstellung von Bahnkurven.

Auf der linken Seite der Benutzeroberfläche sind drei Eingabefelder zu sehen:

- Der Wert im Feld „**Time to wait (ms)**“ entspricht der Zeit in Millisekunden, die der Manipulator an seiner Zielposition verharret, bevor er die nächste Position anfährt.
- Der Wert im Feld „**Threshold (deg)**“ wird bei der Berechnung der Koordinaten als Maximalwert für die Gesamtneigung des Manipulators in der Bewegung verwendet. Treten bei der Berechnung Werte auf, die größer als der eingegebene Maximalwert sind, wird dies durch die Anzeige „>**Threshold**“ signalisiert und die entsprechenden Koordinaten in dem Textfeld „**Maximum total rake is exceeded**“ angezeigt. In diesem Fall wird keine Datei mit Datenpunkten erstellt.
- Die Schaltfläche mit dem Ordnersymbol neben dem Feld „**Outputfile**“ ermöglicht dem Benutzer eine Datei auszuwählen, in die die anzufahrenden Koordinaten geschrieben werden sollen. Das Format der gespeicherten Daten ist in Tabelle 3.1 dargestellt. h_p bzw. v_p bezeichnen die anzufahrende Position des horizontalen bzw. vertikalen Schwenkarms. t_w steht für die oben genannte Wartezeit des Manipulators.

$$h_p \quad v_p \quad t_w$$

Tabelle 3.1. – Format der vom Benutzer erstellten Bahnkurven.

Der Benutzer kann über die Reiter in der Mitte der Benutzeroberfläche zwischen verschiedenen Typen von Trajektorien wählen:

- Mit der Option „**Direct Way**“ werden Trajektorien erzeugt, die den Manipulator auf kürzestem Weg zwischen zwei Punkten fahren lassen.
- Mit der Auswahlmöglichkeit „**Circular (clockwise)**“ erstellte Trajektorien lassen den Manipulator auf einer Kreisbahn mit konstanter Gesamtneigung im Uhrzeigersinn fahren. Für eine Bewegung gegen den Uhrzeigersinn muss eine negative Schrittweite gewählt werden.
- Die Option „**Size of steps**“ erlaubt dem Benutzer den horizontalen und vertikalen Abstand benachbarter Punkte anzugeben, die der Manipulator zwischen Start- und Endpunkt der Bewegung anfährt.
- Der Reiter „**Number of points**“ ermöglicht dem Benutzer die Bahnkurve in eine vorgegebene Anzahl äquidistanter Punkte zu unterteilen.

In einem Koordinatensystem werden die berechneten Bahnkurven anschließend graphisch dargestellt, bevor sie in die ausgewählte Datei geschrieben werden. Ein Screenshot des Programmausschnitts für die Berechnung der Bahnkurvenpunkte ist im Anhang zu finden.

3.2. Manuelle und automatisierte Steuerung des Manipulators

Die vom Benutzer erstellten Bahnkurven sind als Folge von Koordinaten des Manipulators in Dateien auf der Festplatte des lokalen Computers abgespeichert. Diese sollen vom Manipulator nacheinander angefahren werden. Da vom Field Point Modul aus kein direkter Zugriff auf die Festplatte des Computers möglich ist, wurden zwei Programme geschrieben, die über Ethernet kommunizieren und Daten austauschen. Die Software zur Steuerung der Manipulatorkomponenten wird auf dem cFP-2020 Modul ausgeführt, die Auslese der Dateien erfolgt am lokalen Computer. Gestartet wird die Software indem das LABView-Projekt „**Manipulator_control.lvproj**“ geöffnet wird und das Programm „**computer_main.vi**“ durch einen Doppelklick geöffnet und anschließend gestartet wird.

3.2.1. Beschreibung und Bedienung des Programms „computer_main.vi“

Abbildung 3.2 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms „**computer_main.vi**“. Damit können Dateien, die Bahnkurven enthalten, ausgewählt und ausgelesen werden. Die gelesenen Koordinaten für den Manipulator werden über Ethernet an das Field Point Modul gesendet.

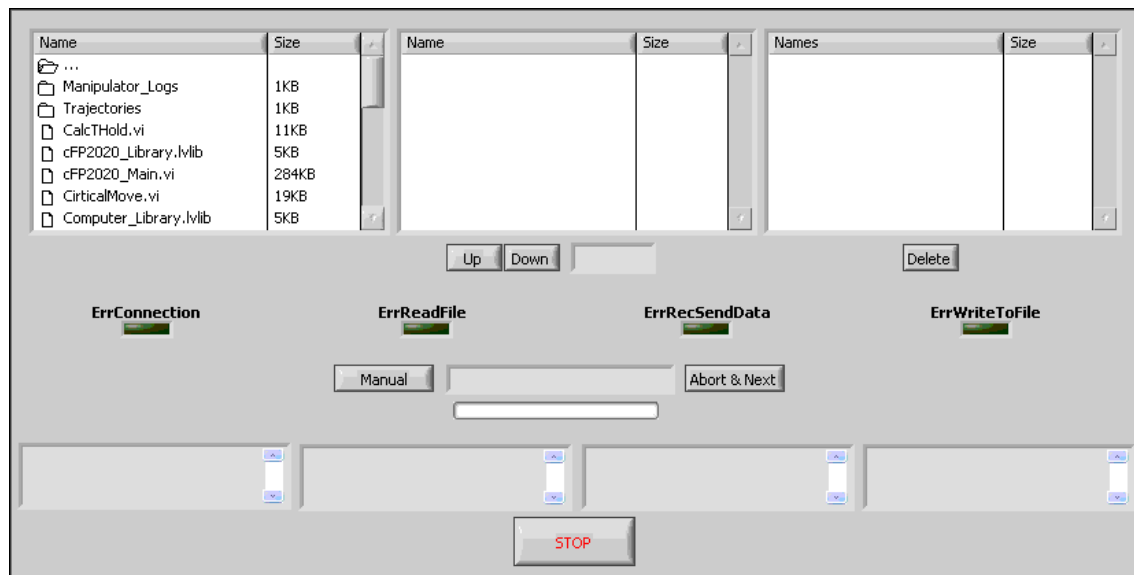


Abbildung 3.2. – Benutzeroberfläche des Programms „computer_main.vi“.

Im oberen Bereich der Benutzeroberfläche befinden sich drei Listen. Mit diesen kann der Benutzer durch Mausektionen interagieren:

- In der **linken Liste** wird nach dem Programmstart der Inhalt des Ordners angezeigt, in dem das Programm hinterlegt wurde. Ein Doppelklick auf einen Ordner listet diesen auf. Durch einen **Doppelklick** auf den obersten Eintrag der Liste gelangt man in der Ordnerhierarchie eine Ebene zurück. Ein Doppelklick auf eine Datei fügt diese der mittleren Liste hinzu. Durch einfaches Klicken wird die Datei markiert, gleichzeitiges Drücken der **Steuerungstaste** behält zusätzlich die bisherigen Markierungen bei.

Die **Shifttaste** in Kombination mit einem Mausklick kann benutzt werden um alle Dateien zwischen der zuletzt markierten und der geklickten Datei auszuwählen. Lässt der Benutzer die Maustaste nach Auswahl der gewünschten Dateien gedrückt, kann er diese mittels „**Drag & Drop**“ in die mittlere Liste verschieben. Dateien können mehrfach der mittleren Liste hinzugefügt werden.

- Die **mittlere Liste** beinhaltet die Dateien, aus denen die Koordinaten für den Manipulator gelesen werden sollen. Links neben dem Dateinamen erscheint ein leeres **Kästchen**. Nach einem Klick auf das Kästchen, erscheint in diesem ein Haken und die Datei wurde „aktiviert“, wiederholtes Klicken „deaktiviert“ die Datei. Läuft das Programm, wird die oberste aktivierte Datei der Liste aus der Liste entfernt, von dem Programm geöffnet und ausgelesen. Die nächste aktive Datei wird dann bearbeitet, wenn keine neue Daten in der Datei gefunden werden oder der Nutzer durch einen Klick auf den Schalter „**Abort & Next**“ die aktuelle Bearbeitung abbricht. Die aktuelle Zielposition wird von dem Manipulator angefahren, bevor Daten aus der nächsten Datei zum Programm auf dem cFP-2020 gesendet werden. Die Dateien können analog zu dem Vorgehen in der linken Liste markiert werden. Durch Drücken des Schalters „**up**“ bzw. „**down**“ können diese einen Eintrag nach oben bzw. unten verschoben werden. Bei gehaltener Maustaste können mehrere markierte Dateien durch „**Drag & Drop**“ in die rechte Liste verschoben werden. Ein **Doppelklick** auf einen Eintrag fügt nur diesen der rechten Liste hinzu. Es werden alle markierten Dateien „aktiviert“ sobald der Benutzer in das leere Kästchen einer Datei klickt. Andererseits kann diese Funktion auch zum „Deaktivieren“ mehrerer „aktivierter“ Dateien verwendet werden.
- Dateien in der **rechten Liste** repräsentieren vom Benutzer aus der mittleren Liste entfernte Dateien. Diese werden nicht ausgelesen und können durch einen **Doppelklick** entfernt werden. Dazu kann auch der Schalter „**delete**“ geklickt werden, woraufhin alle mit einem Haken versehenen Dateien in der Liste entfernt werden. Analog zum Vorgehen in der mittleren Liste können Dateien ausgewählt, per „**Drag & Drop**“ in die mittlere Liste zurückverschoben werden und „aktiviert“ bzw. „deaktiviert“ werden.

Vier Leuchtanzeigen signalisieren das Auftreten eines Fehlers. Ein entsprechender Warnhinweis und eine kurze Beschreibung des Problems wird in einem der vier Textfelder im unteren Bereich der Benutzeroberfläche angezeigt. Die Anzeige „**ErrConnection**“ leuchtet, falls die Verbindung zum cFP2020-Modul nicht aufgebaut werden konnte. Leuchtet die Anzeige „**ErrReadFile**“ bzw. „**ErrWriteToFile**“ konnte die aktuell bearbeitete Datei nicht gelesen werden bzw. die zugehörige Protokolldatei nicht geschrieben werden. Ist die Anzeige „**ErrWriteToFile**“ aktiviert, wurde die Netzwerkverbindung zwischen Computer und Fieldpoint unterbrochen, so dass die Software keine Daten mehr austauschen kann.

Die entwickelten Programme bieten außerdem die Möglichkeit den Benutzer durch direkte Eingabe in ein Textfeld die Zielposition vorgeben zu lassen. Mit dem Bedienelement „**manual**“ kann der Benutzer den Transfer von neuen Koordinaten aus den Textdateien unterbinden. Die Eingaben werden dann in dem unten beschriebenen Programm „cFP2020_main.vi“ getätigt.

Das Senden und Empfangen der Koordinaten erfolgt in einer dauerhaft ausgeführten Schleife.

fe. Ein Screenshot dieser Schleife mit Erklärungen zur Programmierung befindet sich im Anhang.

3.2.2. Erstellung von Protokolldateien

Nach dem Start des Programms „**computer_main.vi**“ wird ein neuer Ordner mit dem Namen „**Manipulator_Logs**“ erstellt. Dieser befindet sich in dem Ordner, in welchem die Programmdatei gespeichert ist. Für jede lesbare Datei, die der Benutzer von dem Programm bearbeiten lässt, wird in dem Ordner eine Protokolldatei mit dem Namen der Quelldatei und der Dateiergung $_x.log$ erstellt. x bezeichnet hier einen fortlaufenden Index, der erhöht wird, sobald der Dateiname der neuen Logdatei schon verwendet wird. In der Datei wird die horizontale und vertikale Zielposition h_Z bzw. v_Z und die horizontale und vertikale Position des Manipulators nach dem Anhalten des Manipulators h_P bzw. v_P abgespeichert. Das Format der Protokolldateien ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

$$h_Z \quad h_P \quad v_Z \quad v_P$$

Tabelle 3.2. – Format der Protokolldateien der Manipulatorbewegung.

3.2.3. Beschreibung und Bedienung des Programms „cFP2020_main.vi“

Die Ansteuerung der Manipulatorkomponenten wird durch ein Programm auf dem cFP-2020-Modul bewerkstelligt. Dieses wird nach dem Start des Programms „**computer_main.vi**“ automatisch auf das Field Point System geladen und dort ausgeführt. Die Benutzeroberfläche des Programms ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

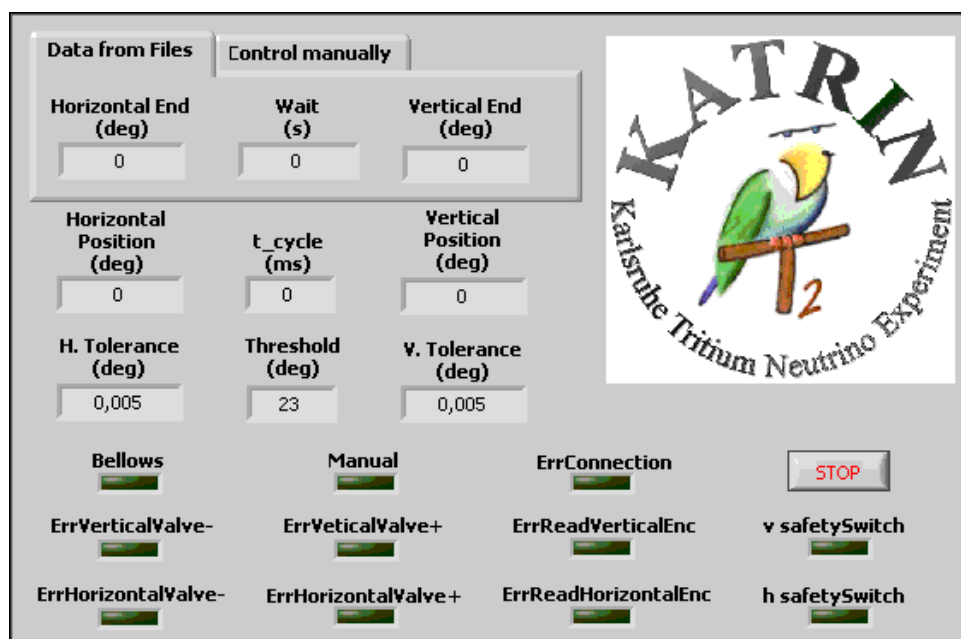


Abbildung 3.3. – Benutzeroberfläche des Programms „cFP2020_main.vi“

Der Benutzer hat die Möglichkeit den Manipulator durch manuelle Eingabe der Zielposition zu steuern oder Koordinaten aus den Dateien, die mit dem Programm „create_trajectory.vi“ erzeugt wurden, anfahren zu lassen. Dazu wählt er zwischen den beiden Reitern „**Data from Files**“ und „**Control manually**“ aus.

Um manuell die Zielposition vorgeben zu können muss zuerst im Programm „computer_main.vi“ der Schalter „manual“ betätigt werden. Anschließend können in dem Reiter „**Control manually**“ die anzufahrenden Koordinaten für die horizontale und die vertikale Achse eingegeben werden. Nach Umlegen des Kippschalters „**Go**“ wird der Manipulator zu der Zielposition bewegt.

Wird der Reiter „**Data from Files**“ gewählt, empfängt das Field Point Modul die Zielposition von dem Computer. Die anzufahrenden Koordinaten werden in den Feldern „**Horizontal End (deg)**“ bzw. „**Vertical End (deg)**“ angezeigt. Zudem kann im Feld „**Wait (s)**“ abgelesen werden wie lange der Manipulator an der Stelle verharret bevor eine neue Position angefahren wird.

Unterhalb der Reiter wird in den Feldern „**Horizontal Position (deg)**“ und „**Vertical Position (deg)**“ die aktuelle Position des horizontalen und vertikalen Schwenkarms angezeigt. In den Feldern „**H. Tolerance (deg)**“ bzw. „**V. Tolerance (deg)**“ kann die Präzision der Positionierung des Manipulators bezüglich der Zielposition eingestellt werden. Ein guter Wert für diese Felder wird in Kapitel 4 erarbeitet.

Auf der Programmebene wird die Bewegung des Manipulators in zwei verschachtelten „While-Schleifen“ realisiert. In der inneren Schleife werden die optischen Encoder ausgelesen und mit der Zielposition verglichen. Ist die Zielposition nicht erreicht, werden die entsprechenden Druckluftventile geöffnet und die Druckluftmotoren sorgen für Vorschub. Die Dauer einer Schleifeniteration t_{cyc} in Millisekunden wird in dem Feld „**t_cycle (ms)**“ angezeigt. Das Programm kann zwei Bewegungsmodi ausführen:

- „**Kontinuierliche Bewegung**“ des horizontalen oder vertikalen Schwenkarms erfolgt wenn in jeder Schleifeniteration die Druckluftventile einer Achse entweder einmal geöffnet oder geschlossen werden. Hat sich der Schwenkarm des Manipulators bis auf den Winkel $\Delta\varphi$ an die Zielposition angenähert wird in den anderen Bewegungsmodus umgeschaltet. $\Delta\varphi$ ist als Konstante im Programm eingetragen und wird im Folgenden als Schwellwert bezeichnet.
- „**Schrittweise Bewegung**“ wird ausgeführt sobald der Schwellwert überschritten wurde. In jeder Iteration der inneren Schleife werden die Druckluftventile nun für eine im Programm fest vorgegebene Zeit geöffnet und anschließend wieder geschlossen. Ist die Zielposition innerhalb der vorgegebenen Toleranz erreicht worden, bleiben die Druckluftventile der Achse geschlossen.

Durch die Trennung der Ansteuerung von horizontaler und vertikaler Achse kann es zur Überschneidung von kontinuierlicher Bewegung einer Achse und schrittweiser Bewegung der anderen Achse kommen.

In der äußeren Schleife findet die Kommunikation mit dem lokalen Rechner statt. Sobald eine neue Zielposition gesendet wurde, wird wieder die innere Schleife ausgeführt. Damit

der Manipulator nicht über den vorgegebenen Winkelbereich hinausfährt, wird das Programm beendet sobald ein Fehler auftritt und eine entsprechende Leuchtanzeige auf der Benutzeroberfläche wird aktiviert:

- **„Bellows“** zeigt den Status des Faltenbalks an.
- **„Manual“** leuchtet auf, sobald an der Steuereinheit des Manipulators der manuelle Betrieb eingestellt wurde.
- **„ErrConnection“** signalisiert den Status der Netzwerkverbindung zu dem Rechner. Wurde die Verbindung unterbrochen, wird die Anzeige aktiviert.
- **„ErrVerticalValve-“** oder **„ErrVerticalValve+“** leuchtet auf, falls beim Senden des Steuerbefehls zu einem der Luftdruckventile der vertikalen Achse ein Fehler aufgetreten ist.
- **„ErrHorizontalValve-“** oder **„ErrHorizontalValve+“** leuchtet auf, falls beim Senden des Steuerbefehls zu einem der Luftdruckventile der horizontalen Achse ein Fehler aufgetreten ist.
- **„v safetySwitch“** wird aktiviert, falls der Manipulator in einen Softwareendschalter der vertikalen Achse gefahren ist.
- **„h safetySwitch“** wird aktiviert, falls der Manipulator in einen Softwareendschalter der horizontalen Achse gefahren ist.
- **„ErrReadVerticalEnc“** bzw. **„ErrReadHorizontalEnc“** sind Indikatoren für Fehler, die beim Auslesen des optischen Encoders an der vertikalen bzw. horizontalen Achse aufgetreten sind.

Über die Taste **„STOP“** kann die Ausführung des Programms angehalten werden. Im Anhang sind wichtige Ausschnitte des Programms mit einigen Erklärungen angefügt.

4. Beschreibung und Auswertung der Testmessungen

Um die in Kapitel 2 erläuterten Messungen mit der benötigten Genauigkeit durchführen zu können, soll eine Winkelauflösung des Manipulators $\leq 10^{-2}^\circ$ erreicht werden. Für ein effizientes und zeitoptimiertes Anfahren der Zielposition unter dieser Rahmenbedingung müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. - So ist die Präzision der Positionierung unmittelbar abhängig von der Schließzeit der verwendeten Druckluftventile, welche sich laut Datenblatt im Anhang auf 20 ms beläuft. Außerdem wird - je nach Bewegungsmodus des Manipulators - pro Iteration der in Kapitel 3.2.3 beschriebenen inneren Schleife des Programms „cFP2020_main.vi“ ein unterschiedlich großer Winkel überfahren.

Das Überfahren der Zielposition soll vermieden werden. Andernfalls riskiert man, gerade bei der Vermessung der äußeren Segmente des Detektors am KATRIN-Hauptspektrometer, eine Fahrt in die Sicherheitsendschalter. Ein Bewegungsstop erzwingt ggf. eine Unterbrechung der Messungen. Zudem kann ein Überfahren der Sollposition die Anfahrdauer - wie im letzten Abschnitt dieses Kapitels gezeigt wird - durch das Spiel in der horizontalen Achse deutlich verlängern.

Bei der Vermessung der Pixelgrenzen des Detektors werden einzelne Bereiche fein abgerastert. Ausschlaggebend für die Dauer dieser Messung wird also die Zahl der Iterationen des Schrittalgorithmus bis zum Erreichen der Endposition sein. Aufgrund der beschriebenen Arbeitsweise leuchtet unmittelbar ein, dass pro Iteration ein geringerer Vorschub erreicht wird. Zudem verlängern vermehrte Lese- und Schreibprozesse die Iterationsdauer der Schleife deutlich. Es muss also eine gute Abschätzung für die Öffnungszeit der Ventile im Schrittalgorithmus gefunden werden, um die gewünschte Präzision bei genügend großem Vorschub einzuhalten.

Werden weit auseinander liegende Positionen angefahren, ist für die Dauer der Anfahrt und die Positionierungsgenauigkeit der Schwellwert des Umschaltens von der kontinuierlichen Bewegung auf den Schrittalgorithmus entscheidend. Wird der Manipulator zu früh schrittweise bewegt, werden mehrere Iterationen im Schrittalgorithmus benötigt. Spätes Umschalten hingegen kann zum Überfahren der Zielposition führen.

In den folgenden Abschnitten werden die angeführten Aspekte unter Verwendung der Programme aus dem vorigen Kapitel untersucht.

4.1. Genauigkeit der Positionierung

4.1.1. Bestimmung des Vorschubs der Achsen

Sei t_{th} der Zeitpunkt zu dem der Manipulator den in Kapitel 3.2.3 definierten Schwellwert $\Delta\varphi$ für den Wechsel auf den Schrittalgorithmus überfährt und t_i die Iterationsdauer der zu diesem Zeitpunkt ausgeführten Schleife im Programm „cFP2020_main.vi“. Bis zum softwareseitigen Umschalten auf den neuen Bewegungsmodus legt der Manipulator also eine

Strecke $v_h \cdot (t_i - t_{th})$ bzw. $v_s \cdot (t_i - t_{th})$ zurück. v_h und v_s stehen hier für die Geschwindigkeit der horizontalen bzw. der vertikalen Achse. Ist der Schwellwert zu klein gewählt führt diese Differenzstrecke zu einem Überfahren der Sollposition. Um einen guten Schwellwert für das Umschalten der Bewegungsmodi zu berechnen, muss also die Geschwindigkeit der Schwenkarme des Manipulators und die mittlere reale Laufzeit \bar{t}_i bekannt sein. Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, ist diese von dem Bewegungsmodus des Manipulators abhängig, so dass ein großer Schwellwert gewählt werden muss, um in jedem Fall ein Überfahren zu vermeiden.

Die Geschwindigkeit der Manipulatorachsen wurde bestimmt, indem sie jeweils zwischen 20° und -20° bewegt wurden. Protokolliert wurde sowohl die Position des Manipulators als auch die Iterationsdauer der Schleifendurchgänge. In Abbildungen 4.1 und 4.2 sind die Ergebnisse der Messung für die Horizontale aufgetragen. Die Geschwindigkeit der Achse bei der Bewegung mit durchgängig geöffneten Ventilen kann über die Steigung der Ausgleichsgeraden $m = v_h = 195,873 \pm 0,013$ Inkremente/s in der linken Abbildung gut abgeschätzt werden. Die rechte Abbildung illustriert den positionsabhängigen Vorschub der Achse. Ein Punkt beschreibt den aus 20 Iterationen berechneten mittleren Vorschub einer Iteration aufgetragen gegen das Mittel der Position des Manipulators vor der ersten Iteration und nach der letzten Iteration.

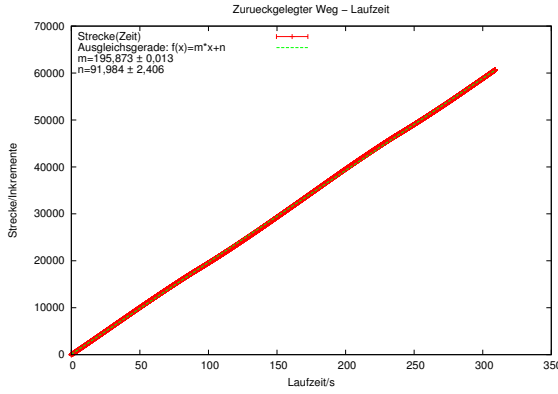


Abbildung 4.1. – Position des Encoders gegen die Laufzeit

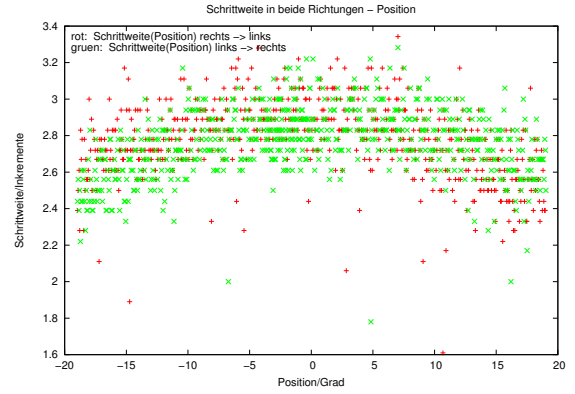


Abbildung 4.2. – Positionsabhängiger Vorschub der horizontalen Achse

Wie man am rechten Graph erkennen kann handelt es sich bei der ermittelten Geschwindigkeit der Achse um einen gemittelten Wert, da der Vorschub in den Randbereichen gegenüber dem Bereich um die Mittelposition geringer ausfällt. Das wird auch durch den Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Achse für den zurückgelegten Weg des Manipulators sichtbar. Dieser liegt nicht, wie zu erwarten bei 0 Inkrementen. Der Effekt lässt sich auf die unterschiedliche Verteilung des Schmiermittels und die Rauigkeit der Auflagefläche des Schlittens entlang der Achse erklären. Für die Vermessung des Vorspektrometers des KATRIN-Experiments wurde ein kleinerer Winkelbereich benötigt als für die Messungen am Hauptspektrometer. Daher ist insbesondere der mittlere Bereich der Achse gut eingelaufen, wo ein Großteil der Bewegung ausgeführt wurde.

Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen die Ergebnisse der Messung für die vertikale Achse. Die über die Ausgleichsgerade bestimmte Geschwindigkeit beträgt nach unten (vom positiven

in den negativen Winkelbereich) $m = v_{s1} = 67,351 \pm 0,005$ Inkremente/s und nach oben $a = v_{s2} = 81,968 \pm 0,003$ Inkremente/s. Dabei sind hier Inkremente der optischen Encoder der Schwenkarme gemeint.

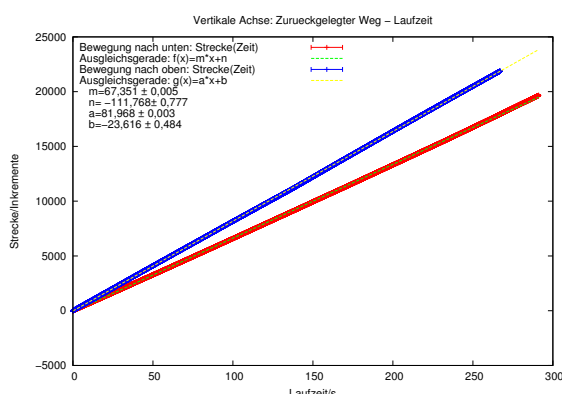


Abbildung 4.3. – Position des Encoders gegen die Laufzeit

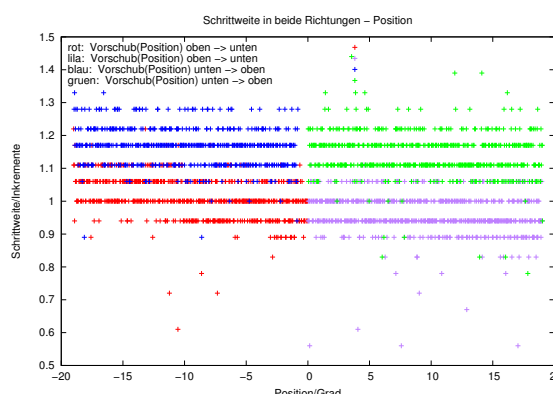


Abbildung 4.4. – Positionsabhängiger Vorschub der vertikalen Achse

Die Bewegung nach oben erfolgt, wie man an Abbildung 4.1 und der Verteilung der Datenpunkte in Abbildung 4.2 sieht, mit einem größeren Vorschub als die Bewegung in Gegenrichtung. Das ist unintuitiv, weil das Eigengewicht der Aufhängung für das Setup der Elektronenkanone auf der Achse liegt. Der Vorschub nach unten sollte daher größer sein. Ausschlaggebend wird ein richtungsabhängiger Vorschub des Motors sein, der für die Bewegung nach oben eine größere Zugkraft aufbringen kann.

4.1.2. Einfluss der Rechenzeit auf die Positionierung

Um den Einfluss der Iterationszeit eines Schleifendurchgangs t_i auf die Positionierung zu untersuchen wurde das Programm „cFP2020_main.vi“ zur Steuerung des Manipulators erweitert. Es kann eine Mindestlaufzeit t_{min} für die Dauer einer Schleifeniteration vorgeben werden, die nicht unterschritten wird. Durch eine spezielle Datennahme werden die Position des Manipulators unmittelbar vor und nach dem Schließen der Ventile in eine Datei geschrieben. Zudem wird die vorgegebene Mindestlaufzeit t_{min} einer Iteration und die Reallaufzeit $t_{rl} \geq t_{min}$ mitprotokolliert. Der Manipulator wird in $0,2^\circ$ -Schritten zwischen 14° und -14° bewegt.

In Abbildungen 4.5 bis 4.9 sind die Abweichungen $t_{rl} - t_{min}$ aller Iterationen des Programms in Histogrammen aufgetragen.

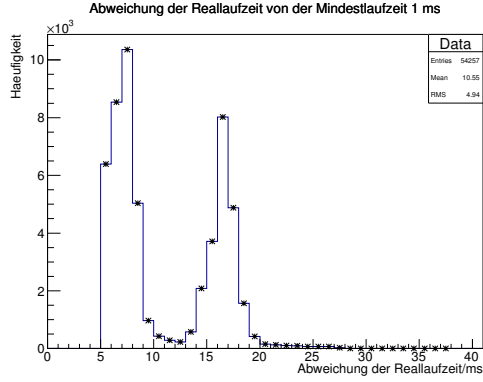


Abbildung 4.5. – Abweichung der Iterationsdauer bei einer Mindestlaufzeit von 1 ms

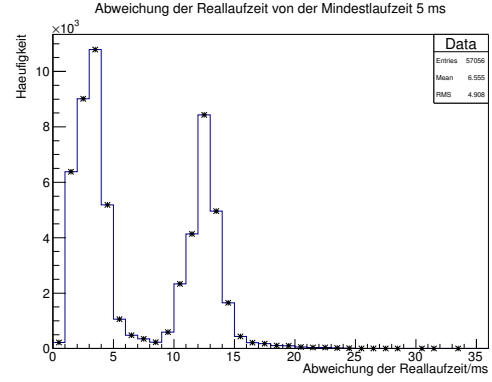


Abbildung 4.6. – Abweichung der Iterationsdauer bei einer Mindestlaufzeit von 5 ms

Anhand der Histogramme für $t_{min} = 1$ ms und $t_{min} = 5$ ms lässt sich erkennen, dass eine Reallaufzeit $t_{rl} = 5$ ms nicht unterschritten wird. Mit dieser unteren Grenze für t_s ist auch eine Mindestschrittweite $v_h \cdot 5$ ms = $0,979 \pm 0,196$ Inkremente für die kontinuierliche Bewegung des Manipulators verbunden. Der angegebene Fehler ergibt sich aus der gaußschen Fehlerfortpflanzungsrechnung.

Für $t_{min} > 25$ ms betragen die Abweichungen von der Mindestlaufzeit im Regelfall weniger als 4 ms. Die Laufzeit des Programms ist in diesem Bereich also annähernd stabil.

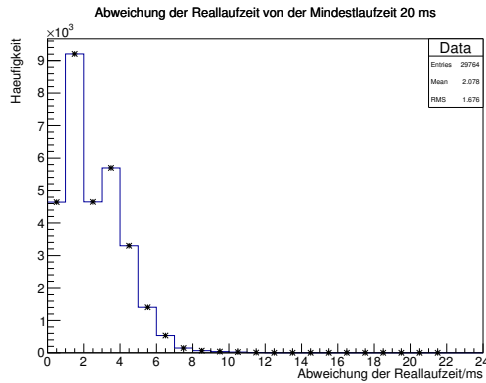


Abbildung 4.7. – Abweichung der Iterationsdauer bei einer Mindestlaufzeit von 20 ms

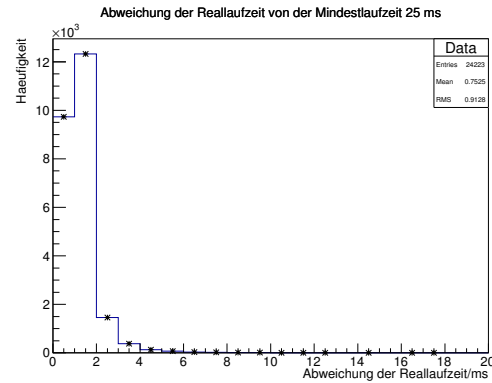


Abbildung 4.8. – Abweichung der Iterationsdauer bei einer Mindestlaufzeit von 25 ms

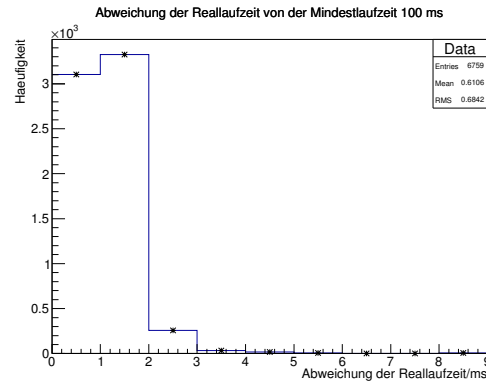


Abbildung 4.9. – Abweichung der Iterationsdauer bei einer Mindestlaufzeit von 100 ms

Entgegen der Erwartung lassen sich bei Werten von $t_{min} < 20$ ms zwei Peaks erkennen. Um deren Lage genauer bestimmen und das Phänomen besser untersuchen zu können sind die Daten für $t_{min} = 1$ ms, 5 ms und 10 ms wie in Abbildungen 4.10 bis 4.12 zu sehen durch die Methode der kleinsten Quadrate durch zwei Gaußkurven angepasst.

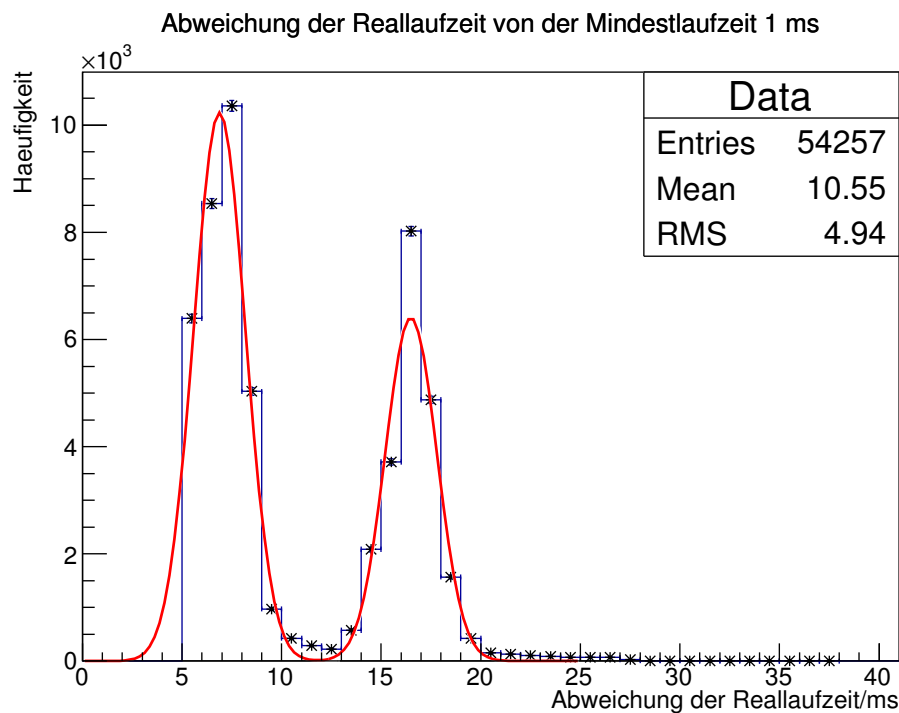


Abbildung 4.10. – Mit Gaußkurven angepasstes Histogramm zur Mindestlaufzeit von 1 ms

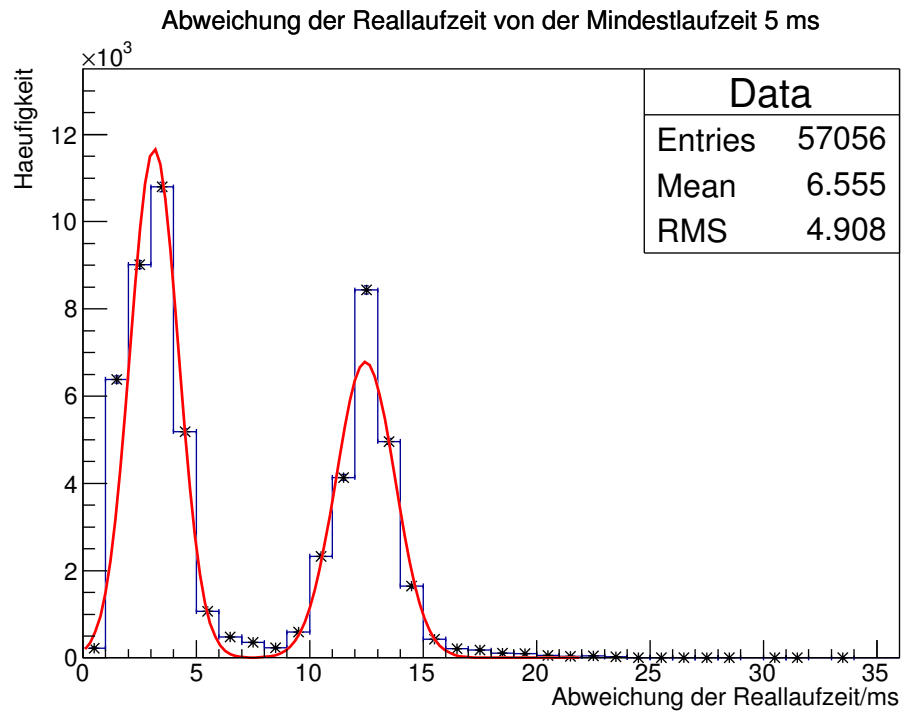


Abbildung 4.11. – Mit Gaußkurven angepasstes Histogramm zur Mindestlaufzeit von 5 ms

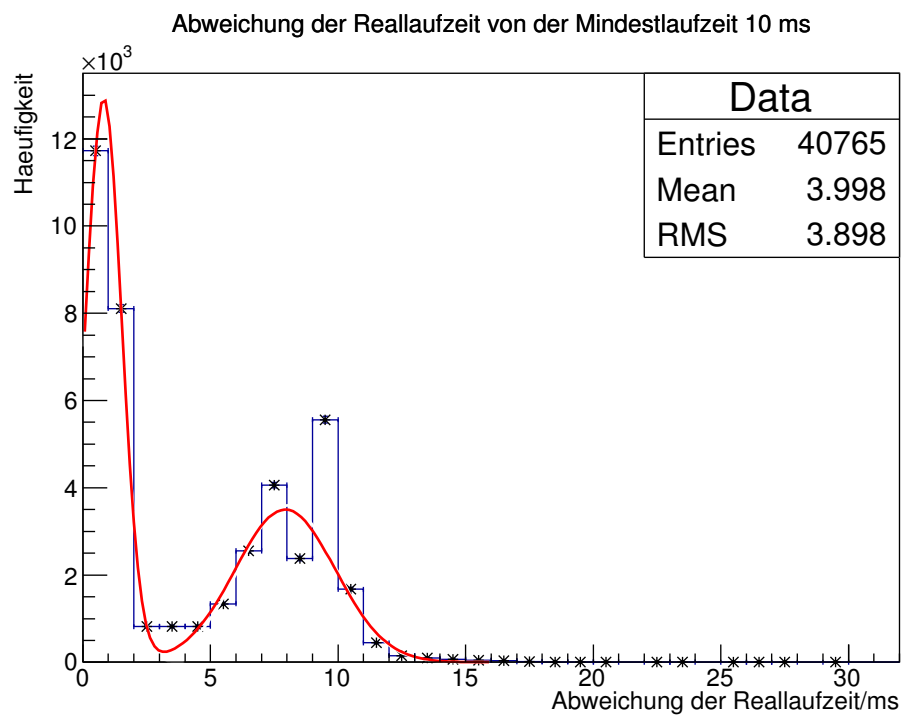


Abbildung 4.12. – Mit Gaußkurven angepasstes Histogramm zur Mindestlaufzeit von 10 ms

In Tabelle 4.1 sind die Peakpositionen t_{p1} und t_{p2} der Gaußkurven aus den Histogrammen mit der jeweiligen Standardabweichung als Fehler eingetragen. $t_p = t_{min} + t_{p2}$ bezeichnet die Position des zweiten Peaks ohne Abzug der Mindestlaufzeit.

t_{min}/ms	t_{p1}/ms	t_{p2}/ms	t_p/ms
1	$6,883 \pm 1,302$	$16,496 \pm 0,009$	$17,496 \pm 0,009$
5	$3,148 \pm 0,006$	$12,459 \pm 0,009$	$17,459 \pm 0,009$
10	$0,812 \pm 0,709$	$7,932 \pm 0,017$	$17,932 \pm 0,017$

Tabelle 4.1. – Peakpositionen für verschiedene Mindestlaufzeiten

Wie die Einträge t_p der Tabelle zeigen, scheint sich der zweite Peak in allen Fällen bei $t_{rl} \approx 18\text{ms}$ auszuprägen. Es ergibt sich aus den Daten der Tabelle ein Mittelwert von $\bar{t}_p = 17,911 \pm 0,496\text{ms}$. Die geringe Streuung der Lage des Peaks in den drei Messreihen lässt auf einen periodisch auftretenden Effekt schließen, der laufzeitunabhängig die berechnete Verzögerung bewirkt. Da Grundrechenoperationen und Vergleichsoperationen keine Laufzeitunterschiede in den Schleifeniterationen verursachen sollten, ist die auftretende Verzögerung höchstwahrscheinlich auf wiederholte Geräteauslese- oder -schreibprozesse des LABView-Programms zurückzuführen, was mit einer gewisse Latenzzeit des angesprochenes Gerät verbunden sein könnte und die Laufzeitumgebung das Programm erst nach einer Antwort des Geräts weiter ausführt.

Graph 4.13 zeigt exemplarisch die Reallaufzeiten von 50 Iterationen für $t_{min} = 1\text{ms}$, 5ms , 25ms und 50ms . Es wird deutlich, dass es ungefähr bei jeder zweiten Iteration zu einem Sprung in der Iterationsdauer des Programms kommt. Für große Mindestiterationszeiten legt sich das Verhalten. Ein Zusammenhang zwischen der Position des Manipulators und der Verzögerung der Programmausführung ist - wie in Abbildung 4.14 exemplarisch für $t_{min} = 1\text{ms}$, 5ms und 10ms dargestellt - also nicht gegeben.

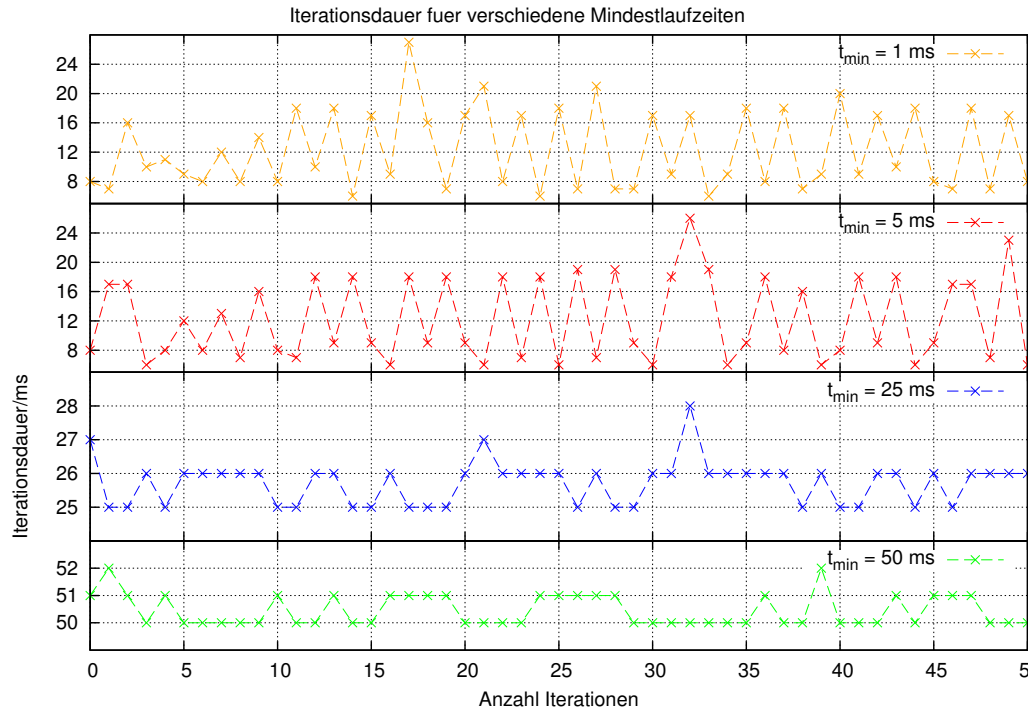


Abbildung 4.13. – Reallaufzeit von 50 Iterationen für verschiedene Mindestlaufzeiten

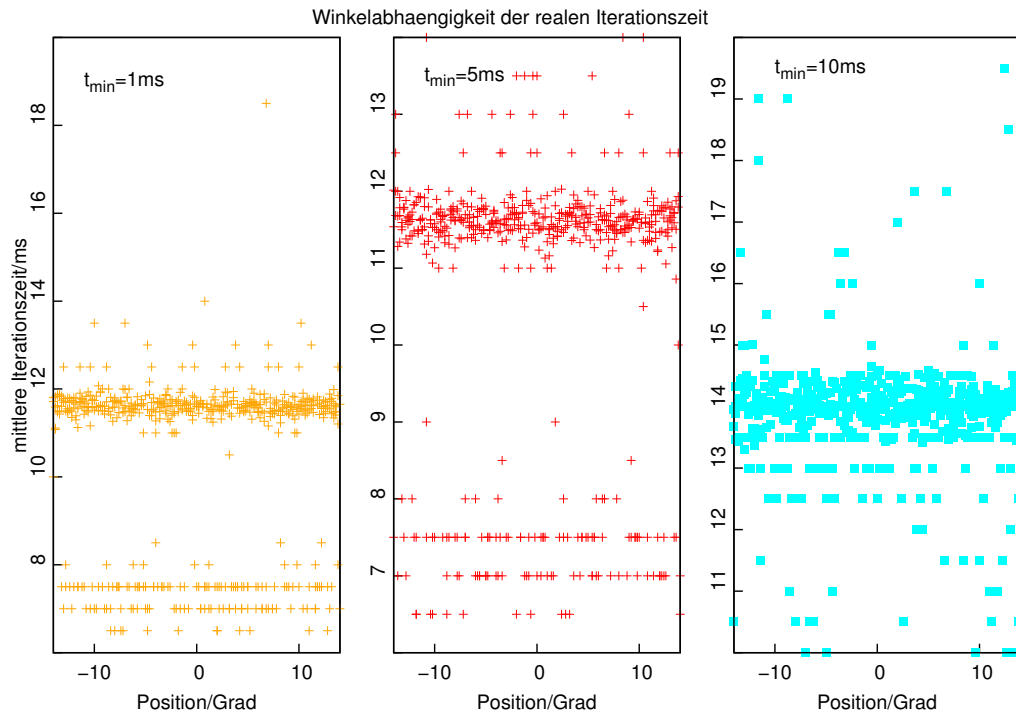


Abbildung 4.14. – Winkelabhängigkeit der Reallaufzeit für $t_{\min} = 1 \text{ ms}, 5 \text{ ms}, 10 \text{ ms}$

Tabelle 4.2 beinhaltet die benötigte mittlere Rechenzeit des Programms mit Standardabweichungen für verschiedene vorgegebene Mindestlaufzeiten. Die Werte sind den Histogrammen 4.5 bis 4.9 entnommen, welche die gesamte Datenmenge enthalten.

Mindestlaufzeit/ms	reale mittlere Laufzeit/ms
1	$11,55 \pm 4,94$
5	$11,555 \pm 4,908$
10	$13,990 \pm 3,898$
15	$18,714 \pm 2,359$
20	$22,078 \pm 1,676$
25	$25,752 \pm 0,913$
30	$30,613 \pm 0,756$
35	$35,620 \pm 0,696$
50	$50,607 \pm 0,695$
100	$100,611 \pm 0,684$

Tabelle 4.2. – Vorgegebene Mindestlaufzeiten und reale mittlere Laufzeiten

Der mit gnuplot erstellte Graph in Abbildung 4.15 visualisiert die Daten aus der obigen Tabelle. Die eingezeichneten Fehlerbalken sind die jeweiligen Standardabweichungen des Mittelwerts der Messdaten. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate wurden zwei Geraden in den Graphen eingezeichnet. Damit soll zum einen die lineare Zunahme von t_{rl} für große Mindestlaufzeiten verdeutlicht werden. Andererseits kann ein Grenzwert der Reallaufzeit von 11,549 ms für kleine t_{min} abgelesen werden. Zur Anpassung der Grenzwertgeraden wurden lediglich die beiden Punkte für $t_{min} = 1$ ms und 5 ms von dem Algorithmus berücksichtigt. Für ein genaueres Ergebnis wären mehr Messungen erforderlich.

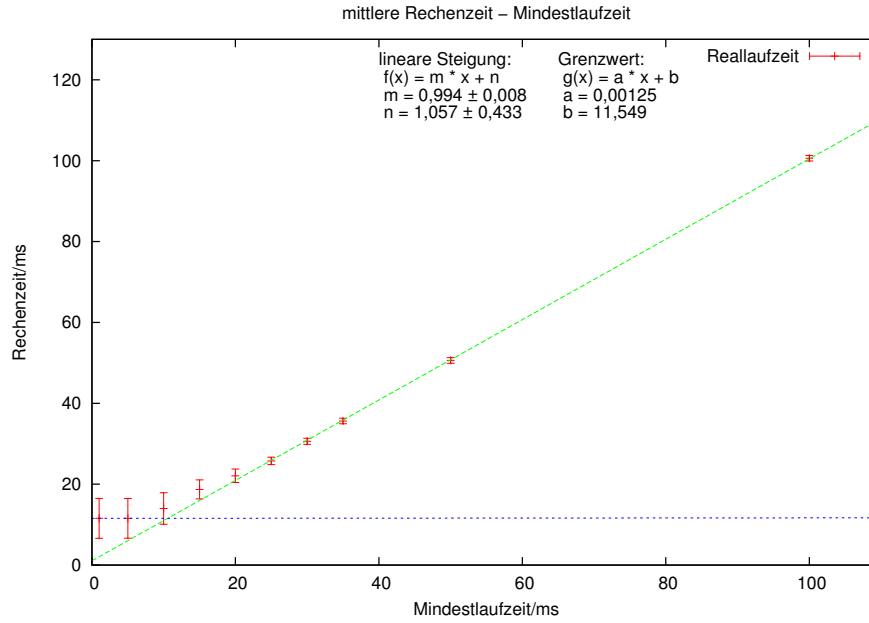


Abbildung 4.15. – Benötigte Laufzeit bei vorgegebener Mindestlaufzeit

Die Streuung um die Mittelwerte der Reallaufzeit nimmt für große Mindestlaufzeiten erwartungsgemäß ab. Es kann für das Programm wie bereits erwähnt für große Iterationszeiten eine stabile Mindestlaufzeit gefunden werden, deren Abweichung im Bereich unter einer Millisekunde liegt. Dies ist, wie in Tabelle 4.2 einsehbar ab 25 ms der Fall. Die für $t_{min} > 20$ ms auftretende Abweichungen in den Plots zur Abweichung $t_{rl} - t_{min}$ und in den Graphen in Abbildung 4.13 lassen sich auf die Auflösung von einer Millisekunde des LABView-internen VIs zur Zeitnahme zurückführen. Dieses rundet die Werte dementsprechend.

Der Schwellwert $\Delta\varphi$ für das Umschalten auf den Schrittalgorithmus soll für beide Schwenkarme möglichst nah bei der Zielposition liegen. Dann kann die Anzahl der Schleifeniterationen im Schrittalgorithmus gering gehalten werden. Für den Fall, dass sich beide Manipulatorachsen mit kontinuierlich geöffneten Ventilen bewegen, wurde gezeigt, dass durch die auftretende periodische Störung eine Mindestlaufzeit $t_{min} = 11,549$ ms des Programms angenommen werden muss. Um ein Überfahren der Endposition s_{end} zu vermeiden muss jedoch die Streuung der realen Iterationszeit Δt_{rl} miteinbezogen werden: Die im Zeitintervall $t_{rl} + \Delta t_{rl}$ zurückgelegte Strecke darf nicht größer sein, als der Abstand $\Delta varphi$. Mathematisch ist die gleichbedeutend mit dem Ausdruck

$$(v + \Delta v) \cdot (t_{rl} + \Delta t_{rl}) \stackrel{!}{\leq} \Delta\varphi.$$

Es wurde außerdem schon gezeigt, dass ein Schleifendurchgang mindestens 5 ms dauert, sodass kleinere Mindestiterationszeiten zu der gleichen Bewegung führen. Nimmt man für die minimale Schrittweite das Streumaß $\Delta t_1 = 4,94$ ms der Messung für 1 ms an, muss also gelten $\Delta s \geq (v + \Delta v) \cdot (t_{min} + \Delta t_1)$.

Mit der Geschwindigkeit $v + \Delta v = 195,873 + 0,013$ Inkremente/s ergibt sich für die horizontale Achse der Schwellwert $\Delta\varphi_h = 3$ Inkremente. Unter Verwendung des vertikalen

Vorschubs $v_{s2} = 81,968 + 0,003 \frac{\text{Inkrement}}{\text{s}}$ ergibt sich für die vertikale Achse der Schwellwert $\Delta\varphi_v \geq 2 \text{ Inkremente}$. Diese Ergebnisse berücksichtigen nicht, dass sich eine der Achsen schon im Schrittmodus bewegen könnte und die Laufzeit somit verlängert wird. Im folgenden wird die Restbewegung des Manipulators nach Schließen der Ventile untersucht. Diese erfordert, wie sich zeigen wird, eine Vergrößerung der Schwellwerte.

4.1.3. Restbewegung nach dem Schließen der Ventile

Aus der gleichen Messung können noch weitere Erkenntnisse über das Verhalten der kontinuierlichen Bewegung des Manipulators gewonnen werden. Im folgenden wird die Schrittweite nach Schließen der Ventile für verschiedene Mindestlaufzeiten untersucht. Die Schrittweite berechnet sich dabei aus der Differenz der Position vor dem Schließen der Ventile und der Position nach dem Schließen der Ventile, bei der der Manipulator zum Stehen gekommen ist. Dabei wurden die Messdaten in den Umkehrpunkten des Manipulators nicht mit einbezogen, um eine Verfälschung der tatsächlichen Schrittweite während der Bewegung zu vermeiden. Das Spiel in der horizontalen Achse würde den Mittelwert der Schrittweite sonst stark beeinflussen. Abbildungen 4.16 bis 4.19 zeigen die Schrittweite für die horizontale Achse von links nach rechts, Abbildungen 4.17 bis 4.21 zeigen die Schrittweite für die entgegengesetzte Bewegungsrichtung. Die Plots für Hin- und Rückrichtung wurden für die jeweilige Mindestlaufzeit gegenübergestellt. Die Daten wurden mit dem Programm root ausgewertet und eine Gaußfunktion mit der Methode der kleinsten Quadrate angepasst.

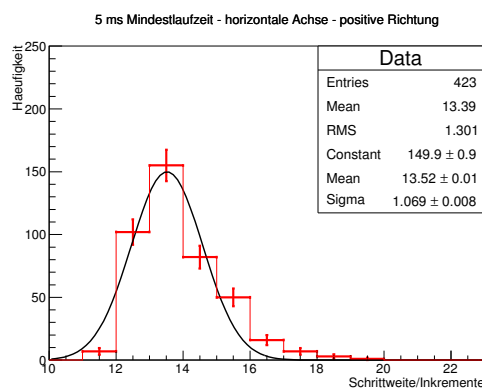


Abbildung 4.16. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 5 ms Mindestlaufzeit bei positiver Bewegungsrichtung

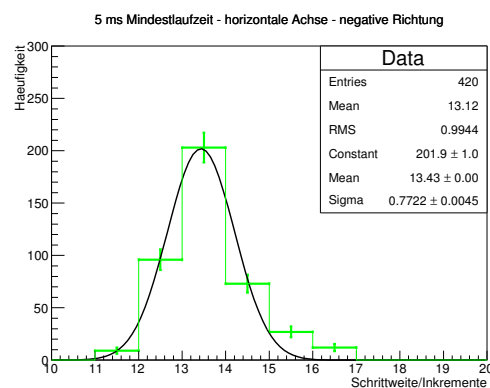


Abbildung 4.17. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 5 ms Mindestlaufzeit bei negativer Bewegungsrichtung

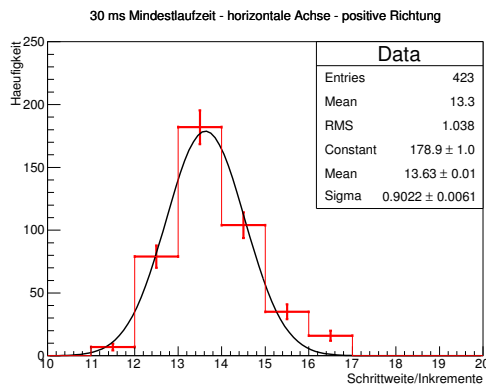


Abbildung 4.18. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 30 ms Mindestlaufzeit bei positiver Bewegungsrichtung

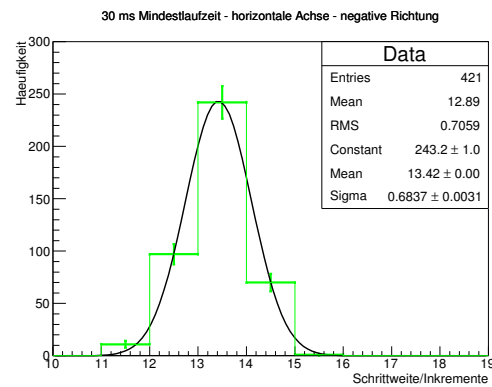


Abbildung 4.20. – Schrittweite in negativer Bewegungsrichtung nach Schließen der Ventile für 30 ms Mindestlaufzeit

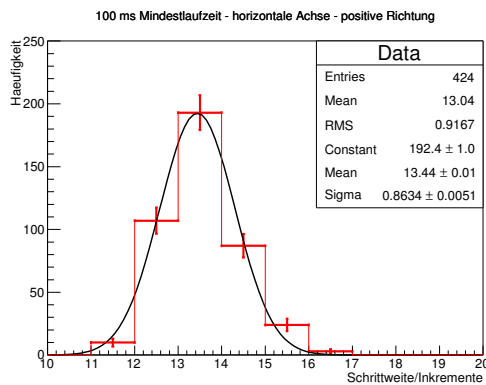


Abbildung 4.19. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 100 ms Mindestlaufzeit bei positiver Bewegungsrichtung

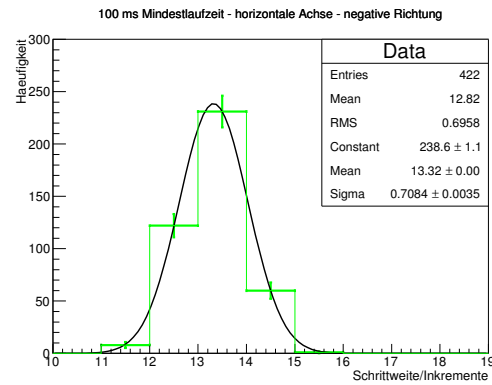


Abbildung 4.21. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 100 ms Mindestlaufzeit bei negativer Bewegungsrichtung

In Tabelle 4.5 und 4.6 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Gaußfunktionen aus den Plots zu den einzelnen Messungen in positiver und negativer Bewegungsrichtung für die horizontale Achse zusammenfassend eingetragen. Die Daten sind in Abbildung 4.22 graphisch dargestellt.

Laufzeit/ms	Schrittweite/Inkremente
5	$13,52 \pm 1,07$
10	$13,43 \pm 0,84$
15	$13,6 \pm 1,07$
20	$13,66 \pm 0,91$
30	$13,63 \pm 0,89$
35	$13,53 \pm 0,91$
50	$13,45 \pm 0,78$
100	$13,44 \pm 0,86$

Tabelle 4.3. – Mittlere Schrittweite mit Standardabweichung nach Schließen des Ventils für verschiedene Mindestlaufzeiten bei positiver Bewegungsrichtung

Laufzeit/ms	Schrittweite/Inkremente
5	$13,43 \pm 0,77$
10	$13,25 \pm 0,69$
15	$13,34 \pm 0,69$
20	$13,44 \pm 0,66$
30	$13,42 \pm 0,68$
35	$13,49 \pm 0,75$
50	$13,34 \pm 0,67$
100	$13,32 \pm 0,71$

Tabelle 4.4. – Schrittweite mit Standardabweichung nach Schließen des Ventils für verschiedene Mindestlaufzeiten bei negativer Bewegungsrichtung

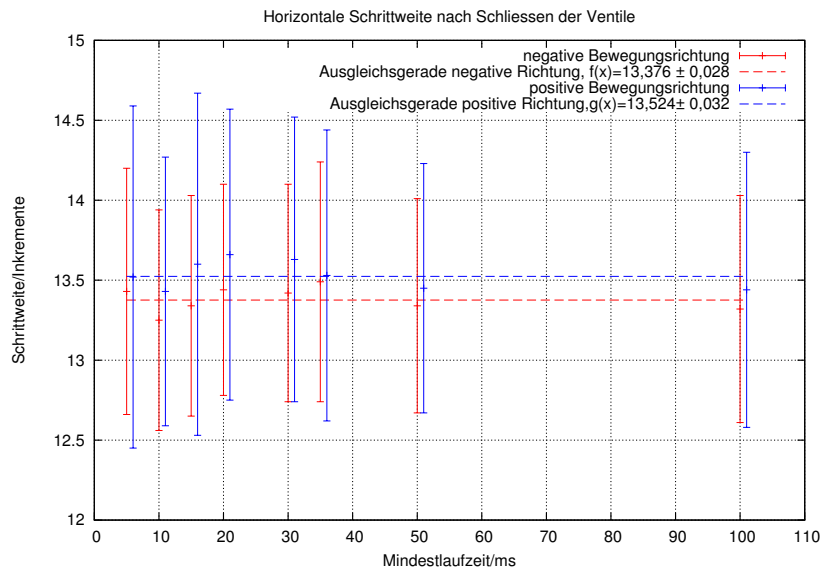


Abbildung 4.22. – Mittlere horizontale Schrittweite des Manipulators nach Schließen der Ventile für verschiedene Iterationszeiten

Beim Betrachten der Histogramme und des Graphen 4.22 fällt auf, dass die Schrittweite für Iterationszeiten $t_{min} \in (5 \text{ ms}, 100 \text{ ms})$ nahezu konstant ist. Dieses Ergebnis ist naheliegend, da der Druck während der Messungen konstant bei $6 \pm 0,2 \text{ bar}$ gehalten wurde. Folglich ist der Vorschub der Achsen des Manipulator nach softwareseitigen Schließen der Ventile in allen Messdurchgängen nur noch abhängig von der Trägheit des Systems und der Pressluft, die durch die sich schließenden Ventile strömt. Daher ist den Messergebnissen zufolge für Iterationszeiten des Programms zwischen 5 ms und 100 ms eine konstante Schrittweite von $13,376 \text{ Inkrementen} = 0,008^\circ$ anzunehmen. In diesem Fall scheint die getrennte Betrachtung der Bewegungsrichtungen keinen Unterschied zu machen. Bei der Untersuchung der vertikalen Achse wird herausgestellt, dass sich die Achse für Hin- und Rückrichtung nicht

unbedingt gleich verhält, so dass eine getrennte Darstellung auch hier notwendig ist, um eventuell auftretende Unregelmäßigkeiten nicht durch Mittelwertbildung zu unterschlagen. Die Analyse der Schrittweite nach dem Schließen der Ventile wurde auch für die vertikale Achse durchgeführt. Abbildungen 4.23 bis 4.28 zeigen das Ergebnis der Messungen.

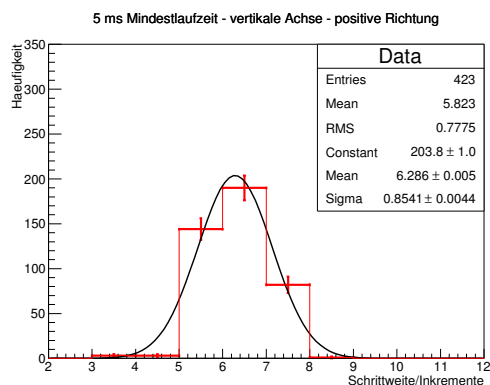


Abbildung 4.23. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 5 ms Mindestlaufzeit bei positiver Bewegungsrichtung

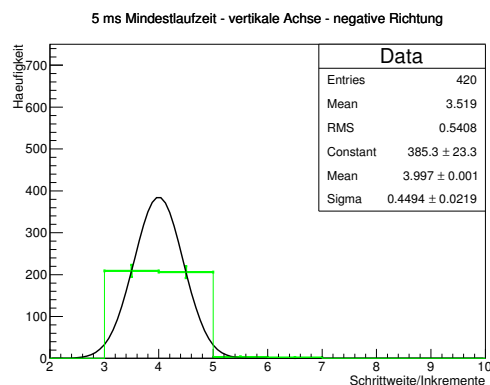


Abbildung 4.25. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 5 ms Mindestlaufzeit bei negativer Bewegungsrichtung

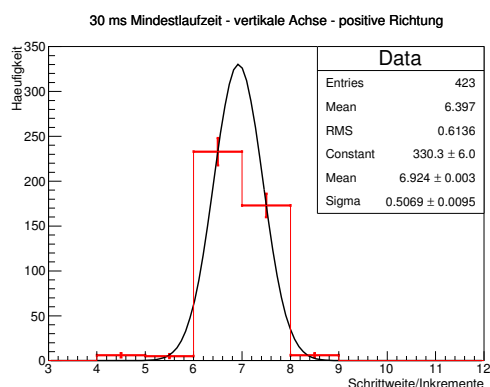


Abbildung 4.24. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 30 ms Mindestlaufzeit bei positiver Bewegungsrichtung

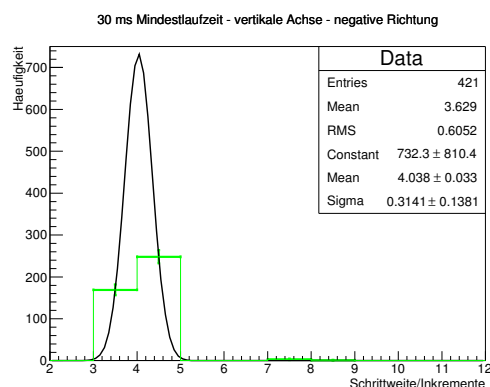


Abbildung 4.26. – Schrittweite in negativer Bewegungsrichtung nach Schließen der Ventile für 30 ms Mindestlaufzeit

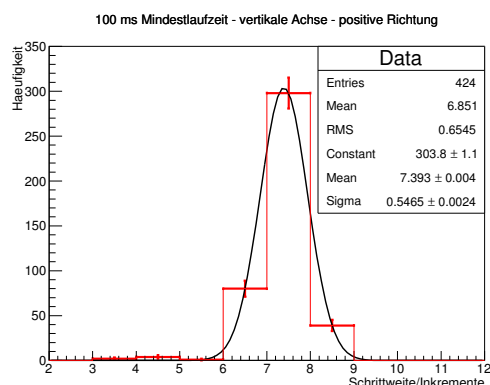


Abbildung 4.27. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 100 ms Mindestlaufzeit bei positiver Bewegungsrichtung

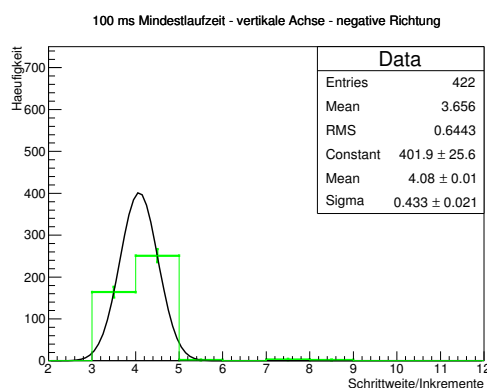


Abbildung 4.28. – Schrittweite nach Schließen der Ventile für 100 ms Mindestlaufzeit bei negativer Bewegungsrichtung

In Tabelle 4.5 und 4.6 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Gaußfunktionen aus den Plots zu den einzelnen Messungen in positiver und negativer Bewegungsrichtung für die vertikale Achse zusammenfassend eingetragen. In Abbildung 4.29 sind die Daten der Tabelle graphisch dargestellt

Laufzeit/ms	Schrittweite/Inkremente
5	$6,29 \pm 0,86$
10	$5,91 \pm 0,81$
15	$6,29 \pm 0,86$
20	$6,74 \pm 0,59$
30	$6,93 \pm 0,49$
35	$6,94 \pm 0,51$
50	$7,13 \pm 0,38$
100	$7,43 \pm 0,57$

Tabelle 4.5. – Mittlere Schrittweite mit Standardabweichung nach Schließen des Ventils für verschiedene Mindestlaufzeiten bei positiver Bewegungsrichtung

Laufzeit/ms	Schrittweite/Inkremente
5	$13,43 \pm 0,77$
10	$13,25 \pm 0,69$
15	$13,34 \pm 0,69$
20	$13,44 \pm 0,66$
30	$13,42 \pm 0,68$
35	$13,49 \pm 0,75$
50	$13,34 \pm 0,67$
100	$13,32 \pm 0,71$

Tabelle 4.6. – Mittlere Schrittweite mit Standardabweichung nach Schließen des Ventils für verschiedene Mindestlaufzeiten bei negativer Bewegungsrichtung

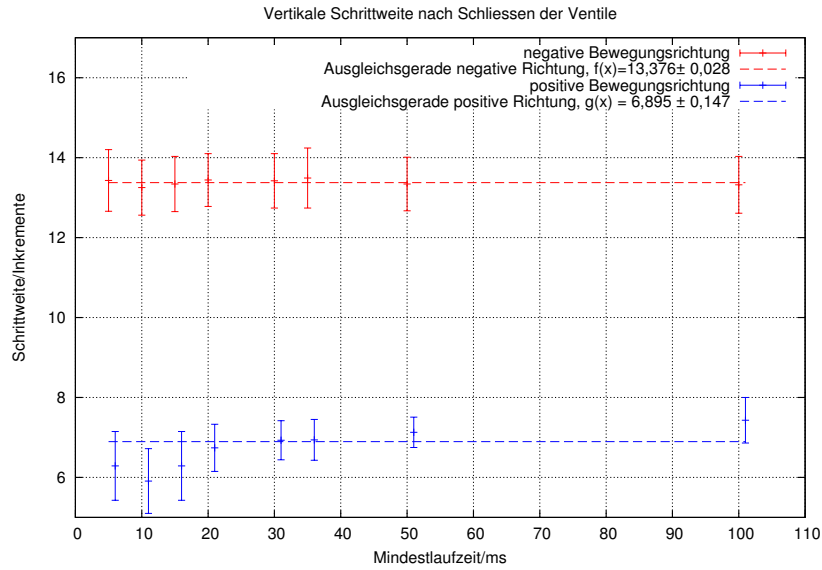


Abbildung 4.29. – Vertikale Schrittweite für verschiedene Iterationszeiten

Analog zur Auswertung der Messungen der horizontalen Schrittweite ist für Laufzeiten zwischen 5 ms und 100 ms ein konstanter vertikaler Schritt von $13,376 \pm 0,028$ Inkrementen $\approx 0,012^\circ$ nach Schließen der Ventile anzunehmen. Offensichtlich ist für die vertikale Achse der Unterschied zwischen der Bewegung nach unten und oben nicht zu vernachlässigen. Dass die Schrittweite nach unten deutlich größer ausfällt, als für die Bewegung in positive Richtung lässt sich durch das Gewicht der Aufhängung für den Faltenbalg der Elektronenkanone erklären, welches permanent für einen Zug nach unten sorgt. Im Gegensatz zu den Messungen bei kontinuierlicher Bewegung, ist hier der Motorvorschub zu vernachlässigen, da das Schließen der Ventile nur 20 ms dauert. Selbst bei vollem Druck würde dies bspw. nur für einen horizontalen Schritt $s = v_h \cdot 20 \text{ ms} \approx 4$ Inkremente bewirken. Im Vergleich zu dem mittleren Schritt von ca. 14 Inkrementen ist das ein vergleichbar kleiner Wert. Für die Messungen am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments ist mit noch größeren Unterschieden zu rechnen, da zusätzlich zur Aufhängung das Setup der Elektronenkanone und das Vakuum im Faltenbalg Kraft auf den Manipulator ausüben.

4.2. Präzision des Schrittalgorithmus

Um die schrittweise Bewegung untersuchen zu können wurden beide Achsen des Manipulator zwischen 15° und -15° bewegt und die Schrittweite pro Iteration für die in Kapitel ?? erklärte Ventilöffnungszeit $t_v = 30 \text{ ms}, 35 \text{ ms}, 40 \text{ ms}, 45 \text{ ms}, 50 \text{ ms}, 60 \text{ ms}, 75 \text{ ms}, 100 \text{ ms}, 150 \text{ ms}, 300 \text{ ms}$ und 500 ms protokolliert. In Abbildungen 4.30 bis ?? werden die Ergebnisse der Untersuchung für die horizontale Achse in beiden Richtungen gegenübergestellt. Die Histogramme zeigen die Häufigkeit der auftretenden Schrittweite in Encoderwerten und sind nach Öffnungszeiten t_v der Ventile sortiert. Werte, die eine Schrittweite von 0 Grad aufweisen, resultieren aus dem Spiel der horizontalen Achse, dass in den Umkehrpunkten überwunden werden muss. Für große Ventilöffnungszeiten wurde daher auf die Darstellung

verzichtet, da der Schrittalgorithmus im Allgemeinen nicht in den Umkehrpunkten ausgeführt wird.

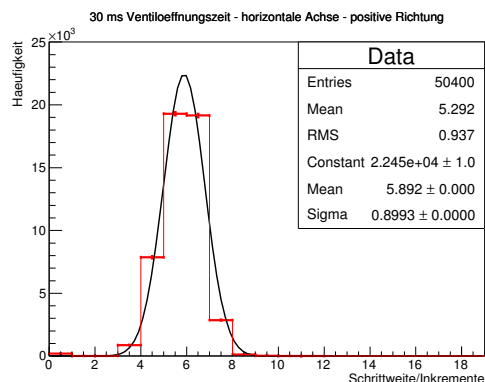


Abbildung 4.30. – Schrittweite in positiver Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 30 ms

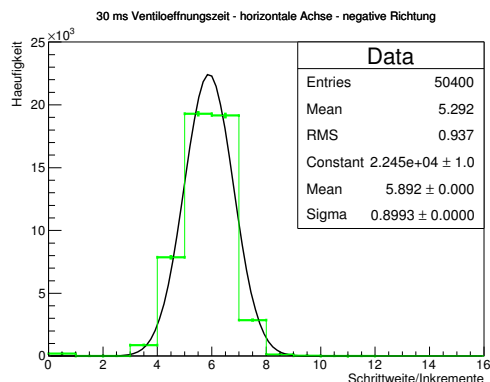


Abbildung 4.32. – Schrittweite in negativer Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 30 ms

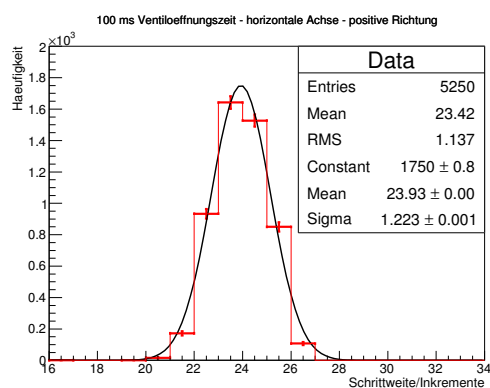


Abbildung 4.31. – Schrittweite in positiver Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 100 ms

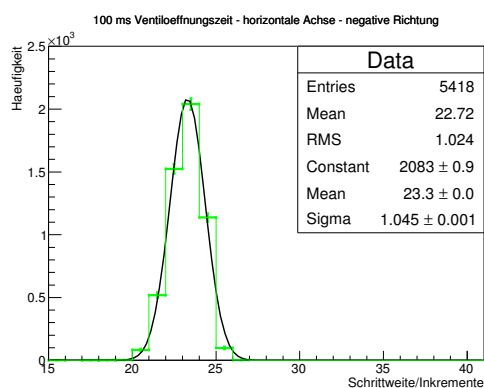


Abbildung 4.33. – Schrittweite in negativer Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 100 ms

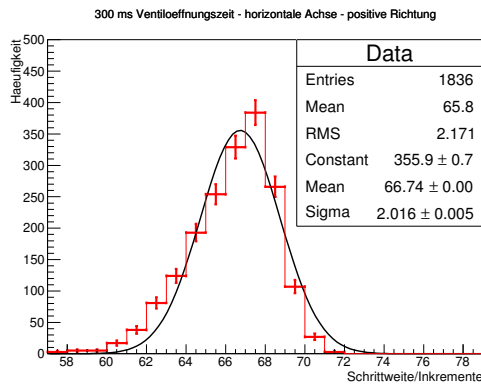


Abbildung 4.34. – Schrittweite in positiver Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 300 ms

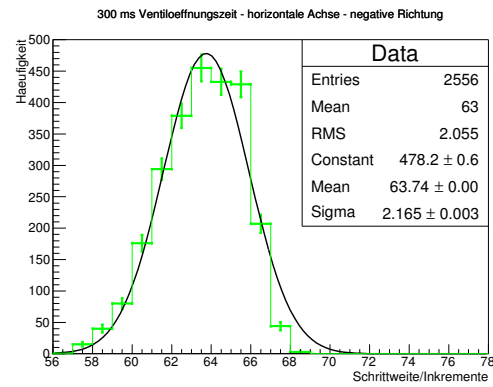


Abbildung 4.35. – Schrittweite in negativer Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 300 ms

Über die Gaußkurven in den Histogrammen wurden die mittleren Schrittweiten in beiden Richtungen bestimmt. Diese sind in Tabellen 4.7 und 4.8 zusammengefasst, in Abbildung 4.36 in einem Graphen visualisiert und mit Ausgleichsgeraden versehen worden.

t_v/ms	Schrittweite/Inkremente
30	$5,805 \pm 0,870$
35	$7,641 \pm 0,686$
40	$9,371 \pm 0,960$
45	$10,690 \pm 0,851$
50	$12,600 \pm 0,972$
75	$18,690 \pm 0,942$
100	$23,920 \pm 1,137$
150	$34,570 \pm 1,397$
200	$45,040 \pm 1,501$
300	$66,360 \pm 1,949$
500	$108,100 \pm 2,514$

Tabelle 4.7. – Mittlere horizontale Schrittweite in positive Richtung

t_v/ms	Schrittweite/Inkremente
30	$5,805 \pm 0,869$
35	$7,641 \pm 0,686$
40	$8,397 \pm 0,806$
45	$10,690 \pm 0,851$
50	$11,900 \pm 0,823$
75	$17,920 \pm 0,913$
100	$23,220 \pm 0,998$
150	$33,860 \pm 1,178$
200	$44,320 \pm 1,455$
300	$63,510 \pm 2,090$
500	$103,600 \pm 2,581$

Tabelle 4.8. – Mittlere horizontale Schrittweite in negative Richtung

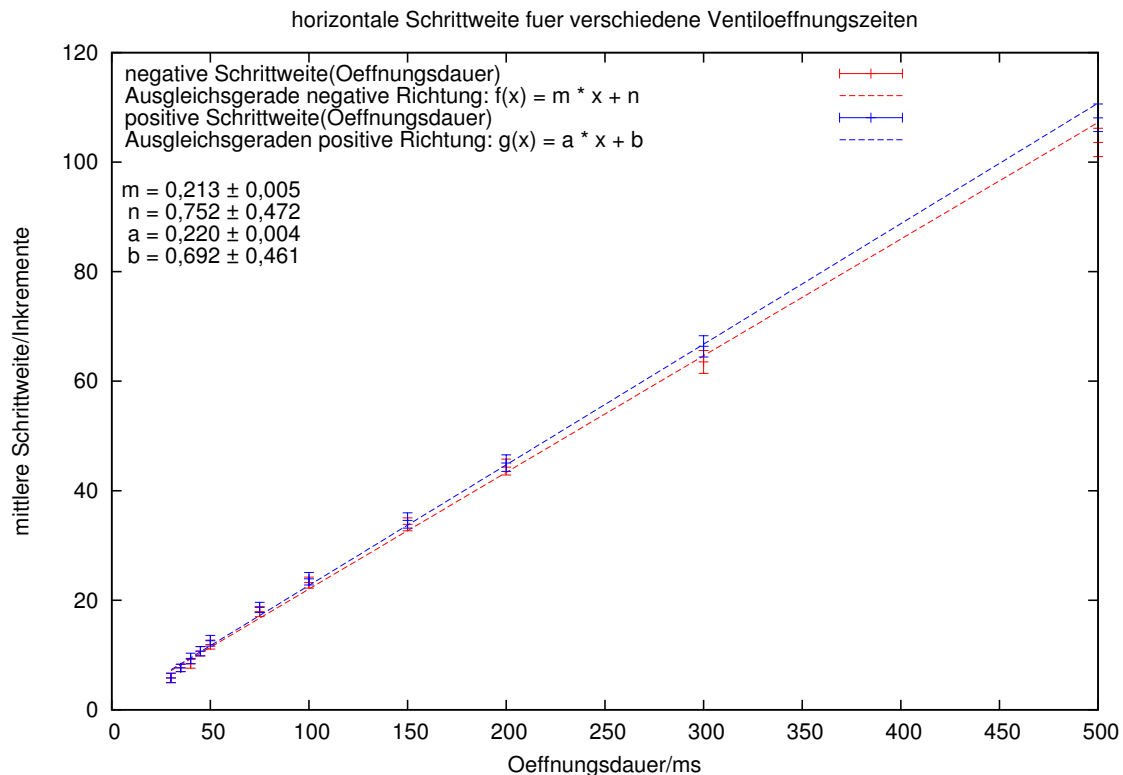


Abbildung 4.36. – Mittlere horizontale Schrittweite in positive und negative Richtung für verschieden Ventilöffnungsdauern

Man erkennt an den Daten eine gute Übereinstimmung der Schrittweite in beiden Richtungen. Der Vorschub des Manipulators in der Horizontalen scheint demnach richtungsunabhängig zu sein. Für große t_v legt der Manipulator pro Iteration größere Strecken zurück. Bewegungshemmende Bereiche der Achse werden somit einen größeren Einfluss auf die Schrittweite des Manipulators pro Iteration haben. Ein erstes Indiz für deren Existenz ist die Zunahme der Streuung der mittleren Schrittweite - wie sie in Graph 4.36 zu sehen ist. Betrachtet man die Histogramme für große Ventilöffnungszeiten fällt außerdem auf, dass sich diese nur annähernd durch eine Gaußkurve beschreiben lassen, da große Schrittweiten in beiden Richtungen bevorzugt auftreten. Eine mögliche Erklärung für diese Phänomene ist ein positionsabhängiger Vorschub. Wie im vorigen Abschnitt schon erwähnt wurde könnte die Schmierung der Achse ungleichmäßig verteilt oder die Materialabnutzung an einzelnen Stellen größer sein, sodass der Manipulator in gewissen Bereichen durch erhöhte Reibung abgebremst wird. Diese Vermutung wird durch die Graphen in Abbildung 4.37 gestützt. Darin ist die mittlere Schrittweite von je 20 Iterationen für Ventilöffnungszeiten $t_v = 500$ ms, 300 ms, 200 ms und 150 ms gegen die Position der Manipulators nach Beenden der 20 Iterationen des Schrittalgorithmus aufgetragen. Man erkennt, dass für die äußeren Bereiche kleinere Schritte gemacht werden, als im Bereich um die Mittelposition des Manipulators. Dort treten folglich Bremskräfte auf, deren Ursprung die oben genannte Schmierung oder mechanische Verluste bei der Übertragung des Drehmoments von der

Achse auf den Schlitten des Manipulators sein könnten.

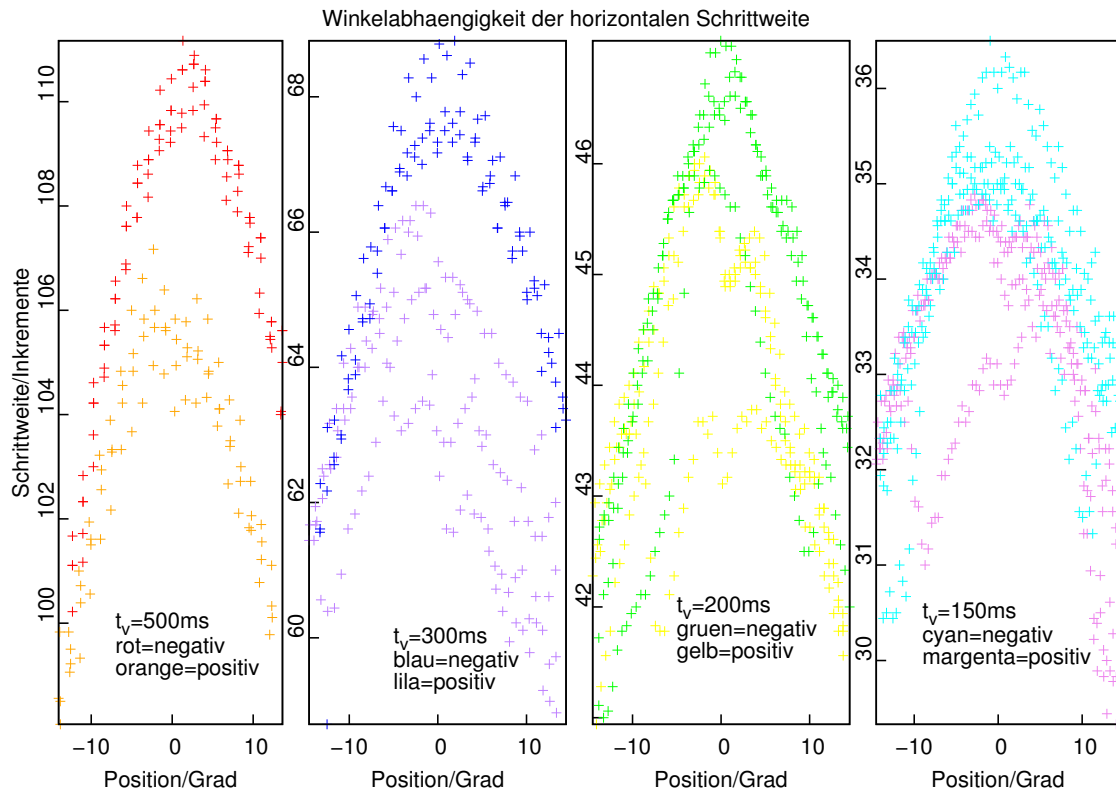


Abbildung 4.37. – Abhängigkeit der horizontalen Schrittweite von der Position des Manipulators

In Abbildungen 4.38 bis ?? sind die Messdaten für die vertikale Achse in Histogrammform dargestellt.

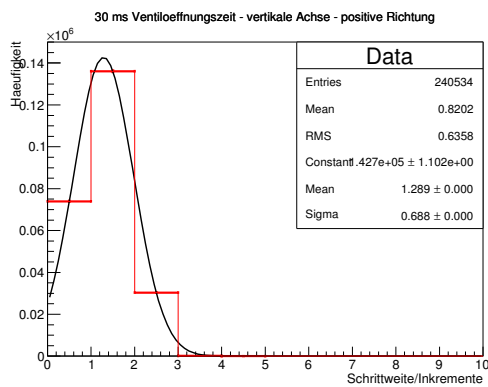


Abbildung 4.38. – Schrittweite in positiver Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 30 ms

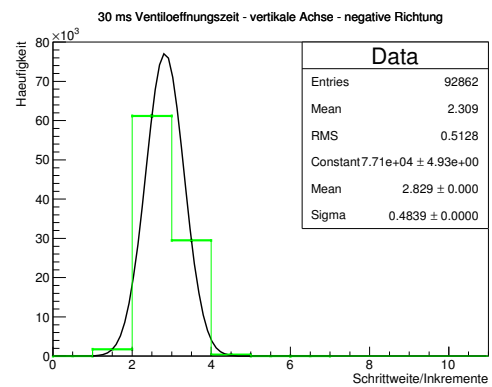


Abbildung 4.39. – Schrittweite in negativer Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 30 ms

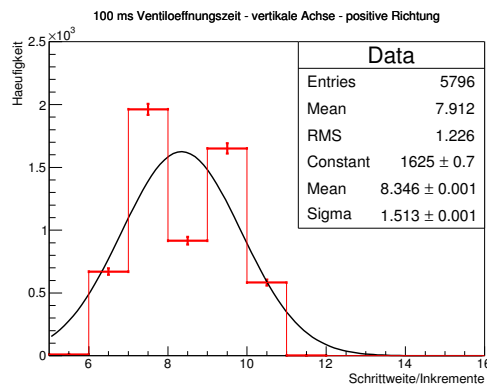


Abbildung 4.40. – Schrittweite in positiver Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 100 ms

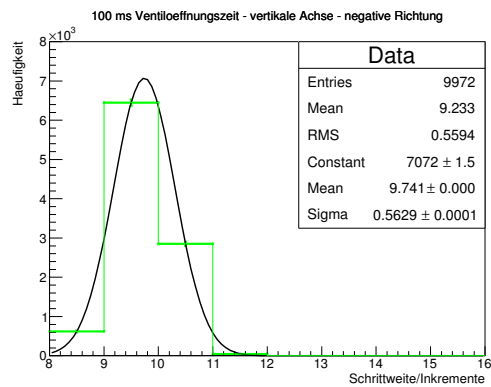


Abbildung 4.42. – Schrittweite in negativer Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 100 ms

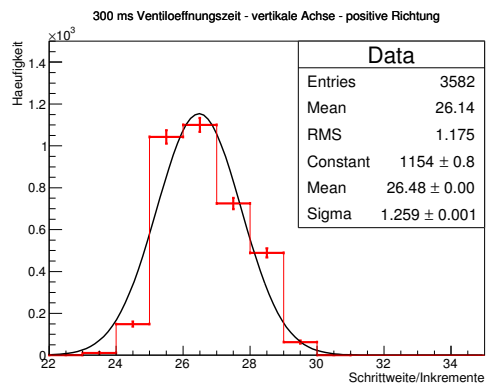


Abbildung 4.41. – Schrittweite in positiver Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 300 ms

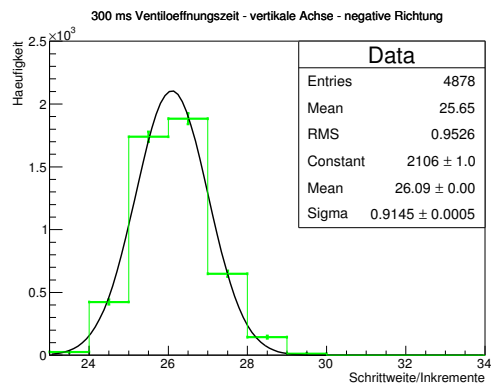


Abbildung 4.43. – Schrittweite in negativer Richtung bei einer Ventilöffnungsdauer von 300 ms

In Tabellen 4.9 und 4.10 sind die von den Gaußkurvenpeaks gekennzeichneten mittleren Schrittweiten eingetragen. Graph 4.44 illustriert den linearen Zusammenhang zwischen t_v und der Schrittweite des Manipulators.

t_v /ms	Schrittweite/Inkremente
30	$1,281 \pm 0,658$
35	$2,100 \pm 0,660$
40	$2,542 \pm 0,763$
45	$3,200 \pm 0,716$
50	$3,546 \pm 0,823$
75	$5,635 \pm 1,009$
100	$8,349 \pm 1,042$
150	$12,960 \pm 1,071$
200	$17,610 \pm 1,368$
300	$26,650 \pm 1,126$
500	$44,150 \pm 1,136$

Tabelle 4.9. – Mittlere vertikale Schrittweite in positive Richtung

t_v /ms	Schrittweite/Inkremente
30	$2,830 \pm 0,487$
35	$3,451 \pm 0,496$
40	$3,984 \pm 0,511$
45	$4,633 \pm 0,523$
50	$5,058 \pm 0,491$
75	$7,398 \pm 0,539$
100	$9,740 \pm 0,561$
150	$14,120 \pm 0,646$
200	$18,320 \pm 0,753$
300	$26,13 \pm 0,924$
500	$41,47 \pm 1,067$

Tabelle 4.10. – Mittlere vertikale Schrittweite in negative Richtung

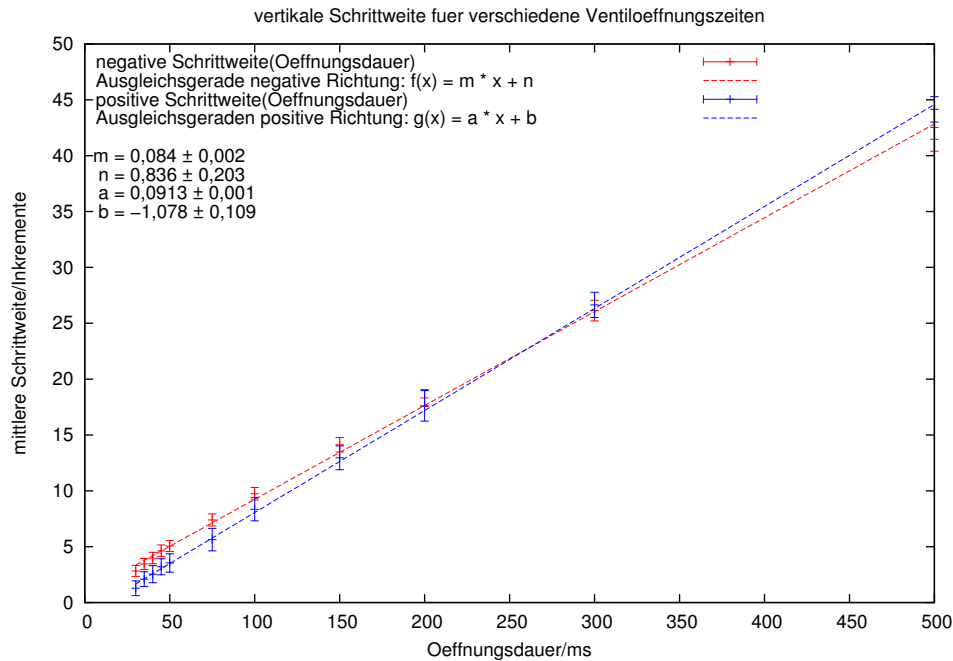


Abbildung 4.44. – Mittlere vertikale Schrittweite in positive und negative Richtung für verschiedene Ventilöffnungsdauern

Wie schon bei der Untersuchung der kontinuierlichen Bewegung des Manipulators ist bei der vertikalen Achse zwischen den beiden Bewegungsrichtungen zu unterscheiden: Abbildung 4.44 zeigt, dass für kleine t_v die Schrittweite in die negative Richtung größere Werte annimmt, als für die Bewegung in die positive Richtung. Für große Zeiten scheint es sich jedoch genau umgekehrt zu verhalten. Das steht stimmt mit dem in Kapitel 4.1 erarbeiteten

Ergebnis überein, dass der Motor eine größere Zugkraft in die positive Richtung ausübt. Auffällig ist auch, dass sich in den Histogrammen für die Bewegung in den positiven Winkelbereich für $t_v > 100$ ms zwei Peaks ausbilden. Analog zum Vorgehen bei der Auswertung der horizontalen Schrittweite sollte man auch hier die Winkelabhängigkeit der Schrittweite untersuchen. In Abbildung 4.45 sind die mittleren Schrittweiten von 20 Iterationen für $t_v = 150$ ms, 200 ms, 300 ms und 500 ms gegen die Position des Manipulators aufgetragen. Den Plots sollen dabei keine konkreten Daten entnommen werden, sie sollen lediglich Hilfsmittel für eine heuristische Erklärung für das anfangs widersprüchlich anmutende Verhalten der Bewegung dienen.

Besonders markant ist die sprunghafte Zunahme der Schrittweite der positiven Bewegung im Bereich der Null-Grad-Position der vertikalen Achse, während sich die Schrittweite in die negative Richtung wenig zu ändern scheint. Dieses Phänomen ist auch ausschlaggebend für das Auftreten eines zweiten Peaks in den oben abgebildeten Histogrammen für die positive Bewegungsrichtung, während ein solcher in den Histogrammen zur negativen Bewegung nicht zu beobachten ist.

Mit großer Wahrscheinlichkeit ist die Ursache für die beobachteten Effekte die Konstruktion des Antriebs der vertikalen Achse. Der Druckluftmotor ist oben auf dem senkrechten Schwenkarm angebracht. Eine neigbare Vorrichtung erlaubt dabei das Kippen des Motors, um die Antriebsachse entsprechend der Manipulatorposition ausrichten zu können. Die Führung für den Schlitten, an dem das Setup für die Elektronenkanone befestigt wird, ist hingegen mit einer Krümmung versehen. Im Idealfall bildet die Antriebsachse also eine Tangente an die Führung der vertikalen Schwenkvorrichtung. Ist das der Fall, wird die Reibung von Schlitten an der Führungssinnenseite minimal und damit die Schrittweite des Manipulators maximal. Jedoch ist der Winkel zwischen Tangente an die Krümmung der Führung bei der 23° -Position am kleinsten. In Abbildung 4.45 ist die Schrittweite bei der Null-Grad-Position in beiden Bewegungsrichtungen am größten. Erklären lässt sich das wiederum über die unterschiedlich verteilte Schmierung der Achse. Wie bereits erwähnt wurde für die Vermessung des Vorspektrometers insbesondere der mittlere Winkelbereich befahren. Materialabnutzung in diesem Bereich könnte die Schrittweite zusätzlich vergrößern.

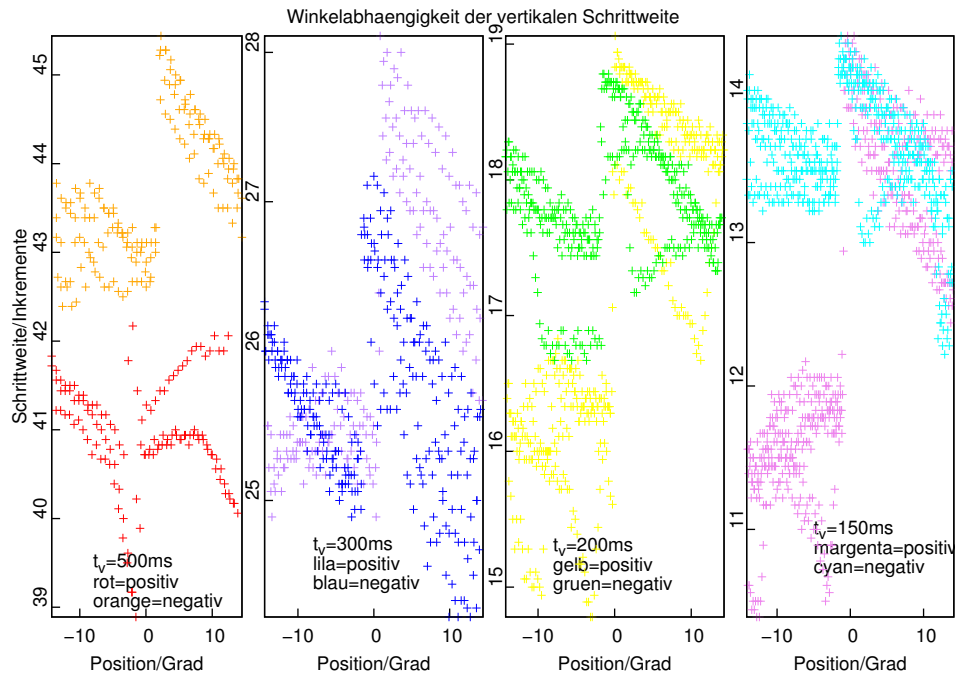


Abbildung 4.45. – Schrittweiten in positive und negative Richtung für $t_v = 500$ ms, 300 ms, 200 ms und 150 ms

Die Messungen zeigen, dass bei kurzen Ventilöffnungszeiten kleine Schrittweiten erreicht werden. Die Präzision des Schrittalgorithmus ist damit besonders hoch. Dies impliziert aber auch eine hohe Zahl an Iterationen um eine gegebene Strecke zurückzulegen. In Abbildungen 4.46 bis ?? ist die Iterationszeit t_i der Hauptschleife des Algorithmus bei verschiedenen Ventilöffnungszeiten t_v aufgetragen. Dabei sind links die Messdaten zu sehen, die bei der schrittweisen Bewegung einer einzelnen Achse aufgenommen wurden. Auf der rechten Seite sind Histogramme für t_i , für den Fall, dass sich beide Schwenkarme schrittweise bewegen. In Tabelle 4.10 bzw. 4.12 sind die durch die Gaußfits bestimmten Mittelwerte mit Standardabweichung eingetragen und in Abbildung 4.50 bzw. ?? visualisiert.

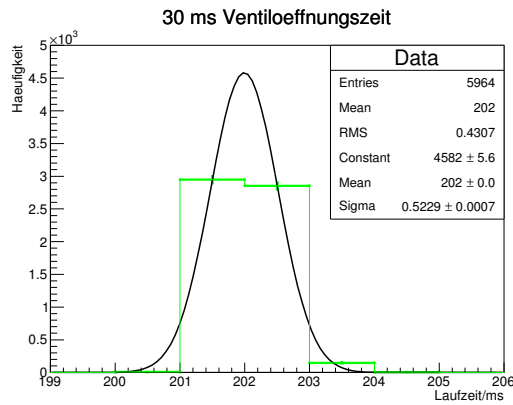


Abbildung 4.46. – Iterationszeit t_i der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für $t_v = 30$ ms

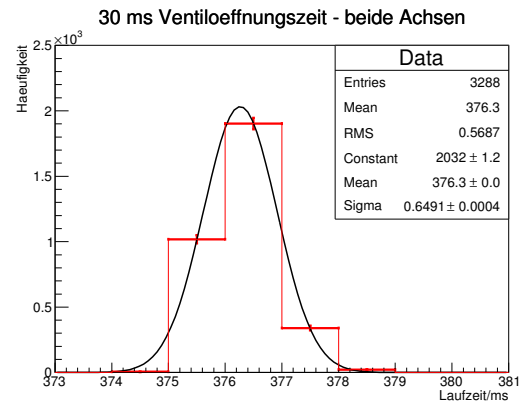


Abbildung 4.48. – Iterationszeit t_i der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für $t_v = 50$ ms

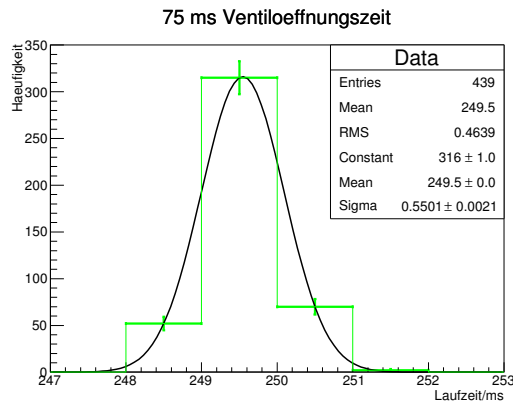


Abbildung 4.47. – Iterationszeit t_i der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für $t_v = 35$ ms

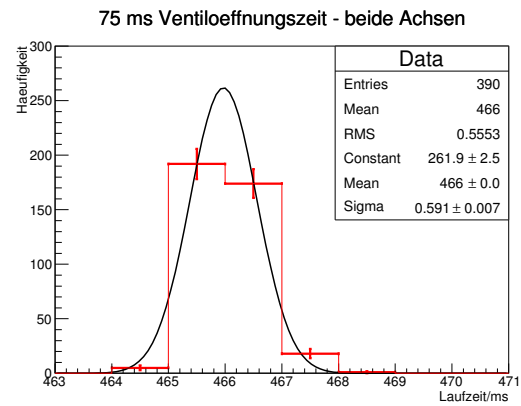


Abbildung 4.49. – Iterationszeit t_i der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für $t_v = 75$ ms

t_v /ms	t_i /ms
30	202 ± 1
35	$207,4 \pm 0,6$
40	$212,7 \pm 0,5$
45	$217,9 \pm 0,5$
50	$223,3 \pm 0,6$
55	$228,3 \pm 0,5$
75	$249,5 \pm 0,6$

Tabelle 4.11. – Mittlere Iterationszeiten t_i der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für verschiedene Ventilöffnungszeiten t_v bei Bewegung einer Achse

t_v /ms	t_i /ms
30	$376,3 \pm 0,6$
35	$385,8 \pm 0,6$
40	$396,1 \pm 0,6$
45	$405,9 \pm 0,6$
50	$416,3 \pm 0,6$
55	$425,8 \pm 0,5$
75	466 ± 1

Tabelle 4.12. – Mittlere Iterationszeiten t_i der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für verschiedene Ventilöffnungszeiten t_v bei Bewegung beider Achse

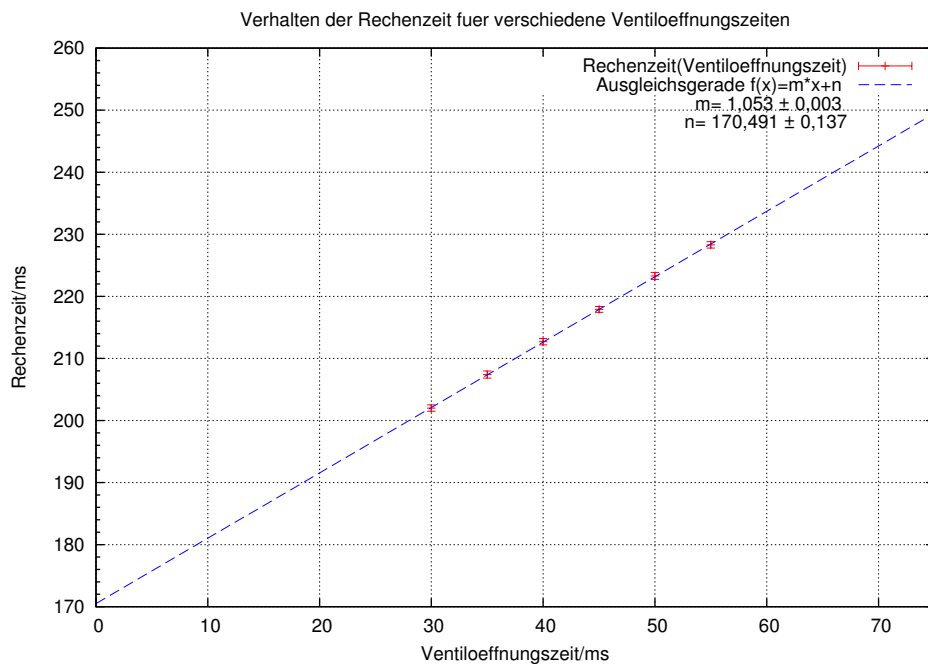


Abbildung 4.50. – Iterationszeiten der inneren Schleife des Programms „cFP2020_main“ für verschiedene Ventilöffnungszeiten

Der Schwellwert φ für den Schrittalgorithmus muss so gewählt werden, dass kein Schwenkarm sich über die Zielposition hinausbewegt. Falls ein Schwenkarm schon schrittweise, der andere aber noch kontinuierlich bewegt wird, kann die verlängerte Laufzeit zu einem Überfahren der Zielposition führen. Der bisherige Schwellwert, der sich aus der Mindestiterationsdauer einer Schleife und dem Schritt nach dem Schließen der Ventile ergibt, muss in diesem Fall also nach oben korrigiert werden. Wie bereits gezeigt wurde ergibt sich die beste Präzision für kleine Ventilöffnungszeiten:

Angenommen die vertikale Achse wird im Schrittmodus bei einer Ventilöffnungszeit von 30 ms betrieben und der horizontale Schwenkarm hat den Schwellwert für den Schrittmodus

noch nicht überschritten. Dann legt dieser pro Schleifeniteration eine Strecke von

$$\begin{aligned} s &= t_i(t_v = 30 \text{ ms}) \cdot v_h \\ &= 202 \text{ ms} \cdot 195,873 \text{ Inkremente/s} \\ &= 39,57 \text{ Inkremente} \\ &= 2,64 \cdot 10^{-2} \circ \end{aligned}$$

zurück. Mit s wurde eine untere Schranke für den Schwellwert $\Delta\varphi_h$ gefunden. Wird für die schrittweise Bewegung der horizontalen Achse ebenfalls $t_v = 30 \text{ ms}$ angenommen, müssen noch

$$\begin{aligned} N &= 39,57 \text{ Inkremente} / dv_h(t_v = 30 \text{ ms}) \\ &= 39,57 \text{ Inkremente} / 5,805 \text{ Inkremente/Iteration} \\ &\approx 7 \text{ Iterationen} \end{aligned}$$

durchlaufen werden. Dabei bezeichnet $dv_h(t_v)$ den Vorschub der horizontalen Achse in Abhängigkeit von t_v . Der Wert wurde Tabelle 4.7 entnommen. Das entspricht im Fall, dass beide Achsen gleichlange schrittweise bewegt werden, also $t_i(t_v = 30 \text{ ms}) \approx 376 \text{ ms}$ (vgl. Tabelle 4.12 einer Laufzeit

$$\Delta t = t_i \cdot N = 376 \text{ ms} \cdot 7 \approx 3 \text{ s.}$$

Analog ergibt sich für den Fall, dass der horizontale Schwenkarm bereits über den Schwellwert gefahren ist, aber der vertikale Schwenkarm nicht, eine untere Schranke $\Delta\varphi = 0,014 \circ$. Es werden dann noch 11 Iterationen bis zum Erreichen der Zielposition benötigt. Die Restlaufzeit beträgt

$$\Delta t = 11 \cdot 376 \text{ ms} \approx 4 \text{ s.}$$

Damit wurde gezeigt, dass Dauer der Positionierung davon abhängt, welcher Schwenkarm zuerst über den Schwellwert fährt.

4.2.1. Präzision und Dauer der Positionierung

Für den Aufbau des Manipulators in Münster sind in Tabelle ?? die berechneten optimalen Werte für ein Umschalten auf den Schrittalgorithmus φ_h bzw. φ_v und die Toleranz Δs_h bzw. Δs_v bezüglich der Zielposition für die horizontale bzw. vertikale Achse eingetragen. Die Konstanten für die Öffnungsdauer der Luftdruckventile muss in dem Quellcode noch auf 30 ms geändert werden.

φ_h / \circ	$\Delta s_h / \circ$	φ_v / \circ	$\Delta s_v / \circ$
0,03	0,009	0,015	0,012

Die optimalen Werten für den Aufbau in Karlsruhe werden abweichen, da dort die Elektrotenkanone und Vakuumkräfte im Faltenbalg für eine wesentlich größere Zugkraft an den Achsen sorgen.

Die Dauer der Positionierung kann über den Vorschub der Achsen berechnet werden. In Tabelle ?? ist der Vorschub der horizontalen Achse v_h und vertikalen Achse v_s für die beiden

Bewegungsmodi eingetragen. Dabei bezieht sich der Wert für die schrittweise Bewegung auf eine Ventilöffnungszeit von 30 ms.

Modus	$v_h/^{\circ}/\text{ms}$	$v_s/^{\circ}/\text{ms}$
kontinuierlich	$195,873 \pm 0,013$	$81,968 \pm 0,003$
schrittweise	$5,805 \pm 0,870$	$2,830 \pm 0,487$

4.3. Reproduzierbarkeit des Schaltpunktes der Lichtschranken

Durch die in Kapitel 2 beschriebene Erweiterung des Manipulators mit Reflexions-Lichttastern der Marke Pepperl+Fuchs, soll die Bestimmung der Absolutposition des Manipulators ermöglicht werden. Dazu sollen vor Beginn einer Messung am KATRIN Hauptspektrometer Referenzfahrten in die Schaltpunkte der Lichttaster durchgeführt werden.

Um eine Aussage über der Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Schaltpunkte der Lichttaster treffen zu können, wurde im Münsteraner Labor die beiden Schaltpunkte der Lichttaster 500 Mal angefahren und jeweils die Encoderwerte und die Gesamtlaufzeit aufgezeichnet.

Um die Präzision der Auslese zu erhöhen und ein schnelles Rücksetzen des Encoders beim Schalten des Lichttasters zu gewährleisten wurde das zur Messung genutzte Programm ohne die LABView interne automatische Fehlerbehandlung ausgeführt. Zum Vergleich wurden die die Messung anschließend ein weiteres Mal mit automatischer Fehlerbehandlung durchgeführt.

In Abbildung 4.53 ist der Verlauf der Messungen der Schaltpunkte für den Lichttaster der horizontalen Achse ohne automatische Fehlerbehandlung dargestellt. Abbildung 4.54 zeigt das Ergebnis der Messung mit automatischer Fehlerbehandlung. Aufgetragen ist die Absolutposition der Schaltpunkte in Inkrementen der optischen Encoder gegen die Zeit. Es ist zu erkennen, dass das Ausschalten der automatischen Fehlerbehandlung keine signifikanten Verbesserung bezüglich der Streuung der Messpunkte bewirkt. Daher bietet sich an, eine Software für die Referenzfahrt mit aktiver Fehlerbehandlung zu implementieren. Damit können Fahrten in die Sicherheitsendschalter vermieden werden.

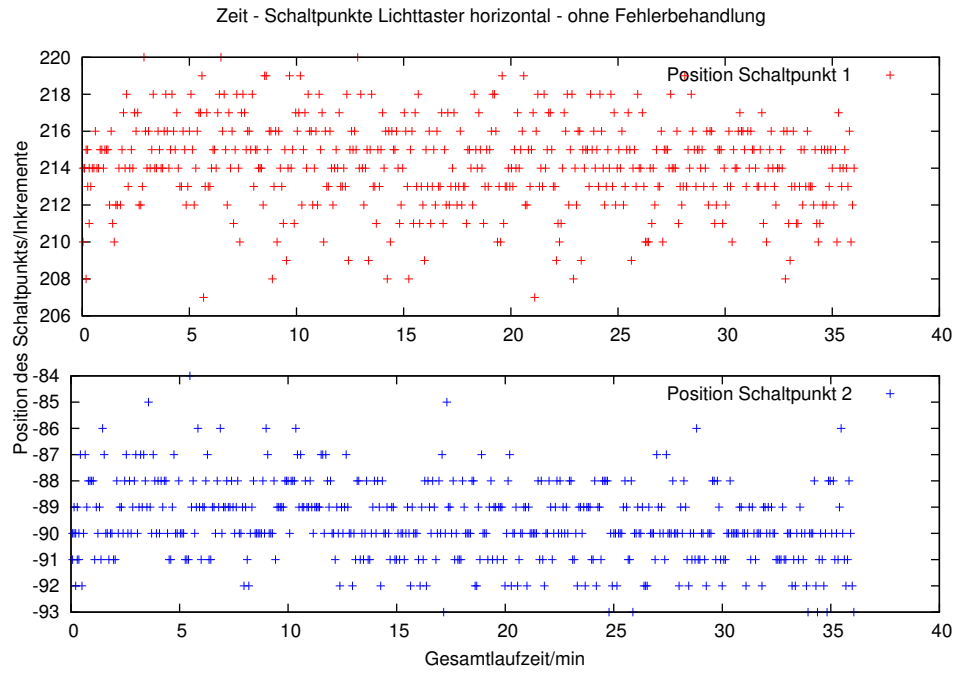


Abbildung 4.51. – Verlauf der Messung zur Reproduzierbarkeit der Schaltpunkte des Lichttasters der horizontalen Achsen ohne Fehlerbehandlung

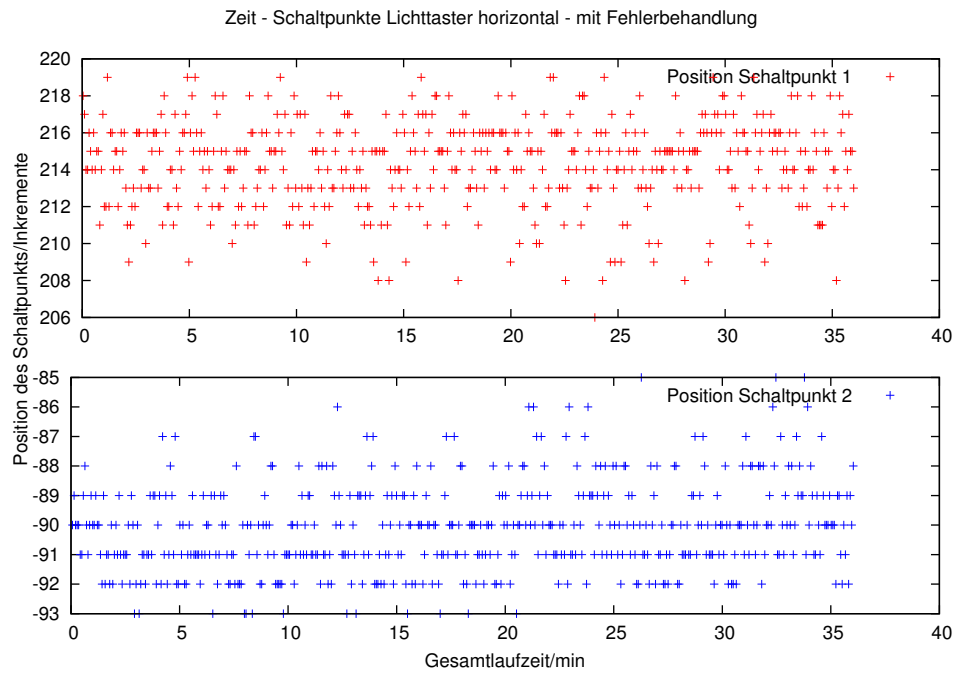


Abbildung 4.52. – Verlauf der Messung zur Reproduzierbarkeit der Schaltpunkte des Lichttasters der horizontalen Achsen mit Fehlerbehandlung

Abbildungen 4.57 und ?? zeigen die Lage der Schaltpunkte als Histogramme aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass die Streuung um den Mittelwert für den zweiten Schaltpunkt,

der näher an dem Lichttaster liegt, geringer ist als für den ersten Schaltpunkt. Die aus den angepassten Gaußkurven berechnete Standardabweichung beträgt für den ersten Schaltpunkt

$$\sigma_1 = 2,323 \pm 0,110 \text{ Inkremente.}$$

Für den zweiten Schaltpunkt ergibt sich eine Streuung von

$$\sigma_2 = 1,475 \pm 0,066 \text{ Inkremente}$$

um den Mittelwert. Die angegebenen Fehler ergeben sich aus dem Binning der Daten und werden von dem verwendeten Programm berechnet. Für eine Referenzfahrt sollte also der zweite Schaltpunkt verwendet werden. In einem Konfidenzintervall von 1σ muss bei einer Referenzfahrt in den zweiten Schaltpunkt eine Abweichung von $2 \text{ Inkremente} / 1501,33 \text{ Inkremente} / ^\circ \approx 1,332 \cdot 10^{-3} ^\circ$ angenommen werden.

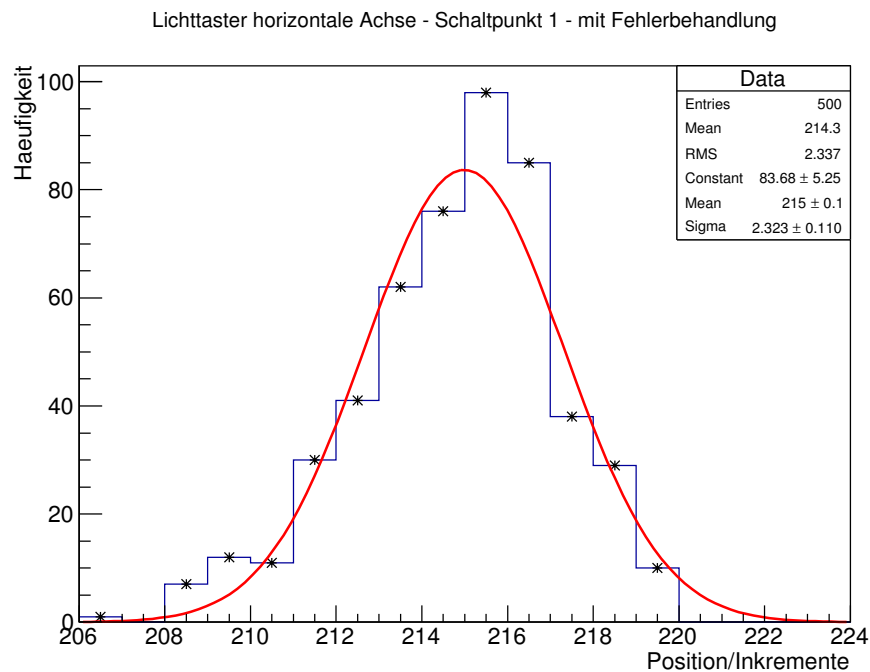


Abbildung 4.53. – Position des ersten Schaltpunktes des Lichttasters der horizontalen Achse

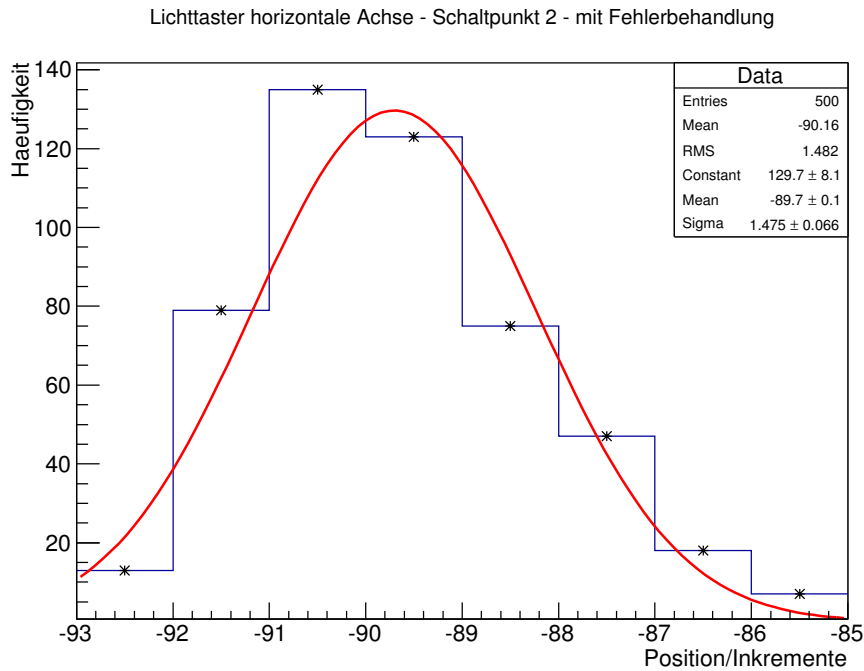


Abbildung 4.54. – Position des zweiten Schalterpunkts des Lichttasters der horizontalen Achse

Die gleiche Messung wurde für den Lichttaster der vertikalen Achse durchgeführt. Abbildung 4.57 zeigt die zeitliche Abhängigkeit der Schalterpunkte. Der Verlauf der Lage der Schalterpunkte zeigt eine große Abhängigkeit der Position Schalterpunkte von der Zeit. Dieser Effekt lässt sich möglicherweise auf Temperaturschwankungen zurückführen, da sich die Messungen über einen langen Zeitraum erstreckt haben. Zum Beispiel könnte die dauerhafte Beleuchtung den NPN-Transistors mit offenem Kollektor, der zum Umwandeln der Lichthelligkeit in Signalströme verwendet wird, erwärmt haben. Die Kabel vom Lichttaster zur Steuereinheit waren nur provisorisch befestigt. Unter Umständen könnte die Bewegung des Kabels die Lichttaster gegenüber der Reflexionsfläche verkippt und damit eine Verschiebung des Tastbereichs bewirkt haben.

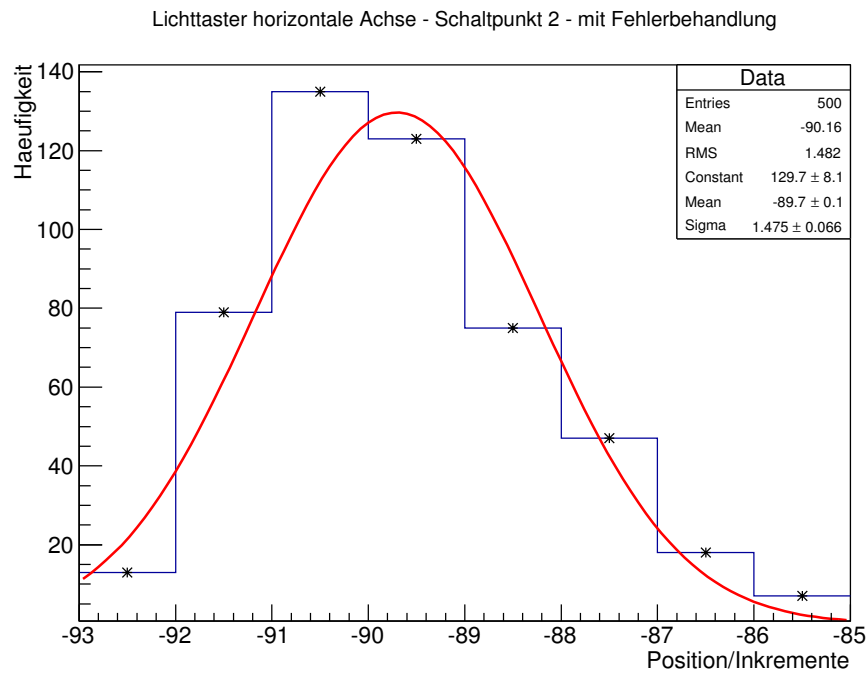


Abbildung 4.55. – Position des zweiten Schaltpunktes des Lichttasters der horizontalen Achse

Aus dem Messverlauf ist ersichtlich, dass sich eine Anpassung der Lage der Schaltpunkte mit Gaußkurven nicht anbietet. Mit dem Programm „root“ wurden Histogramme für beide Schaltpunkte aus der gesamten Datenmenge erstellt und die Streuung um die Mittelwerte berechnet (siehe Abbildungen ?? und ??). Anhand derer lässt sich im Rahmen der vierstündigen Messung im Münsteraner Labor für den ersten Schaltpunkt eine Standardabweichung von

$$\sigma_1 = 5,929 \text{ Inkremente}$$

angeben. Für den zweiten Schaltpunkt ergibt sich eine Streuung von

$$\sigma_2 = 9,213 \text{ Inkremente}$$

um den Mittelwert. Bei Referenzfahrten in den ersten Schaltpunkt muss mit einer Abweichung von ca. 6 Inkremente/1151,57 Inkremente/ $^\circ \approx 5,2 \cdot 10^{-3} ^\circ$ von der tatsächlichen Position gerechnet werden (1σ -Konfidenzintervall). Interessant ist, dass in dieser Messung der Schaltpunkt in der Nähe des optischen Taster die größere Streuung aufweist. Daher sollten weitere Messungen zum Verhalten der Schaltpunkte bei Referenzfahrten durchgeführt werden.

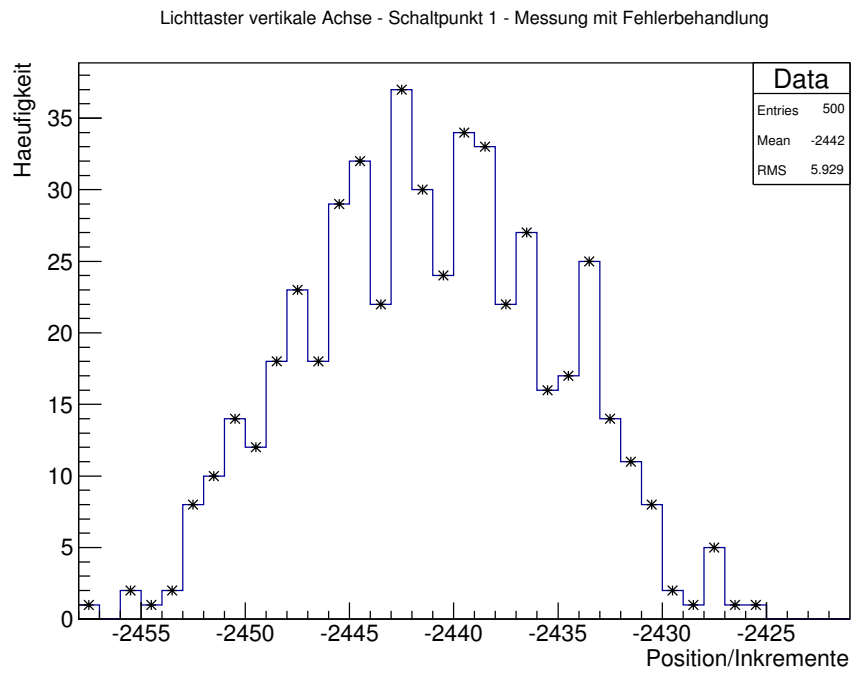


Abbildung 4.56. – Position des ersten Schaltpunkts des Lichttasters der vertikalen Achse

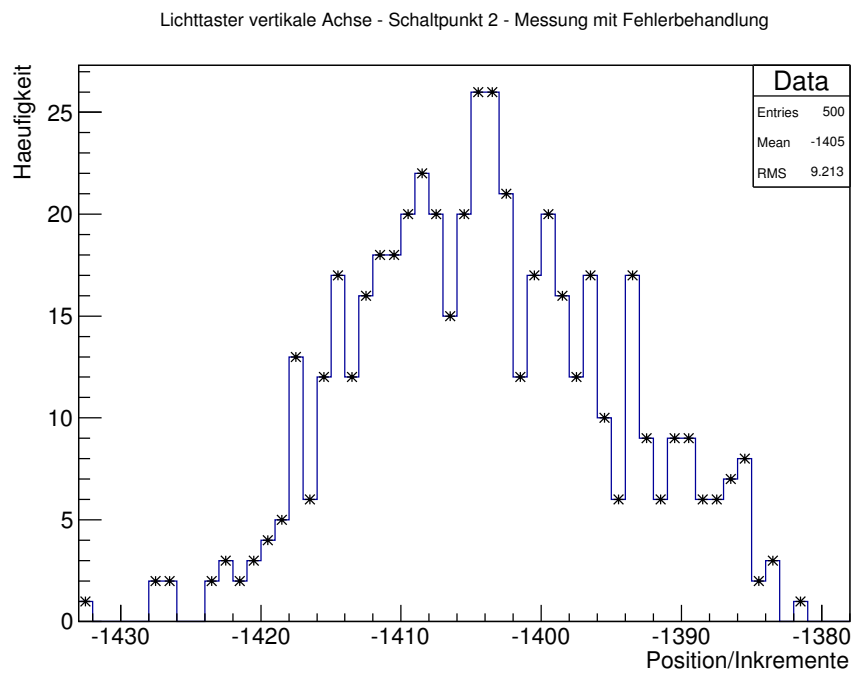


Abbildung 4.57. – Position des zweiten Schaltpunkts des Lichttasters der vertikalen Achse

5. Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der UHV-Manipulator der Elektronenkanone des KATRIN-Experiments modifiziert. Durch neue elektronische Komponenten und einer mit LabView neu entwickelten Software wird das Anfahren von Zielpositionen mit einer Genauigkeit von weniger als $0,01^\circ$ ermöglicht. Damit können die Kalibrations- und Testmessungen am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments wie geplant durchgeführt werden. Die berechneten optimalen Eingabeparameter für die Ansteuerungssoftware sind nur begrenzt für die Experimente in Karlsruhe gültig, da die Messungen ohne das Setup der Elektronenkanone durchgeführt wurden. Zusätzliche Zugkräfte durch das Vakuum und das Gewicht der Elektronenkanone, konnten somit nicht berücksichtigt werden. Vor den Messungen in Karlsruhe sollten die Antriebsachsen des Manipulators neu geschmiert werden, da eine ungleichmäßige Verteilung des Schmiermittels eine Verlangsamung der Bewegung der Schlitten des Manipulators bedingt.

Mit den optischen Encodern der Marke Renishaw ist die Bestimmung der horizontalen Position bis auf $7 \cdot 10^{-4}^\circ$ möglich. Für den vertikalen Schwenkarm ergibt sich eine Auflösung von $9 \cdot 10^{-4}^\circ$. Der Schalterpunkt des neu montierten Lichttasters der Marke Pepperl+Fuchs an der horizontalen Achse kann im 1σ -Konfidenzintervall auf $1,332 \cdot 10^{-3}^\circ$ genau reproduziert werden. Bei der Messung der Reproduzierbarkeit der Schalterpunkte des Lichttasters an der vertikalen Achse konnte ein stark oszillierendes Signal beobachtet werden. Eine dementsprechend große Streuung der Werte, schränkt die Reproduzierbarkeit eines Schalterpunktes ein. Im 1σ -Konfidenzintervall führt dies zu einer Unsicherheit der Positionsbestimmung von $5,2 \cdot 10^{-3}^\circ$.

Die Software zur Steuerung des Manipulators ist sehr unübersichtlich geworden, da mir die Programmierparadigma von LabView anfangs nicht bekannt waren. Viele Teile des Programms hätten kompakter und funktionaler gestaltet werden können. Eine Neuprogrammierung wurde angefangen, konnte aber in der vorgesehenen Zeit nicht fertiggestellt werden. In der Software fehlt deshalb weiterhin die Möglichkeit zur Positionsbestimmung Referenzfahrten in die angebauten Lichttaster zu tätigen. Außerdem war geplant die Werte der optischen Encoder beim Beenden der Software in eine Datei zu schreiben und bei einem Neustart des Systems wieder einzulesen, um Referenzfahrten zu vermeiden. Leider ist auch diese Funktion nicht vollständig implementiert worden.

A. Anhang

A.1. Programmausschnitte

A.1.1. „Create_Trajectories.vi“

In den folgenden Abbildungen werden Programmausschnitte zur Berechnung der Koordinaten für die Bahnkurven dargestellt.

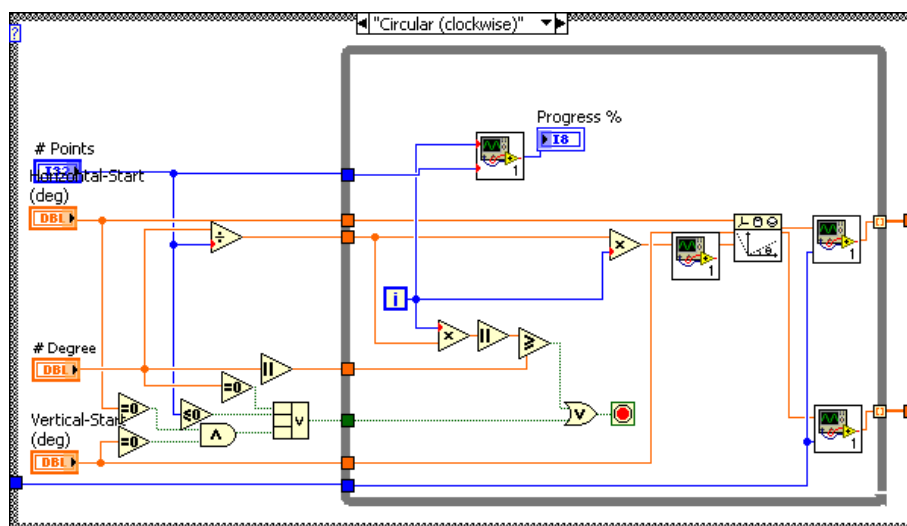


Abbildung A.1. – Berechnung der Koordinaten für die kreisförmige Bewegung bei vorgegebener Anzahl an Punkten

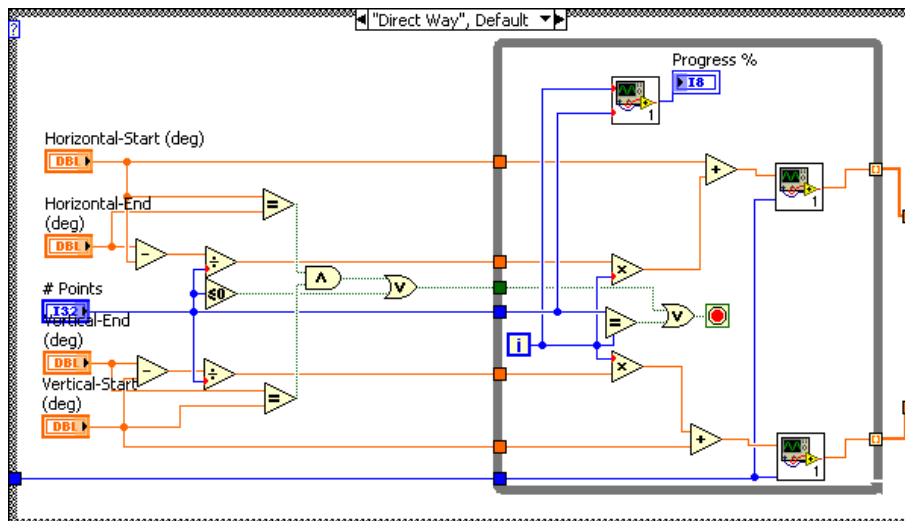


Abbildung A.2. – Berechnung der Koordinaten für die lineare Bewegung bei vorgegebener Anzahl an Punkten

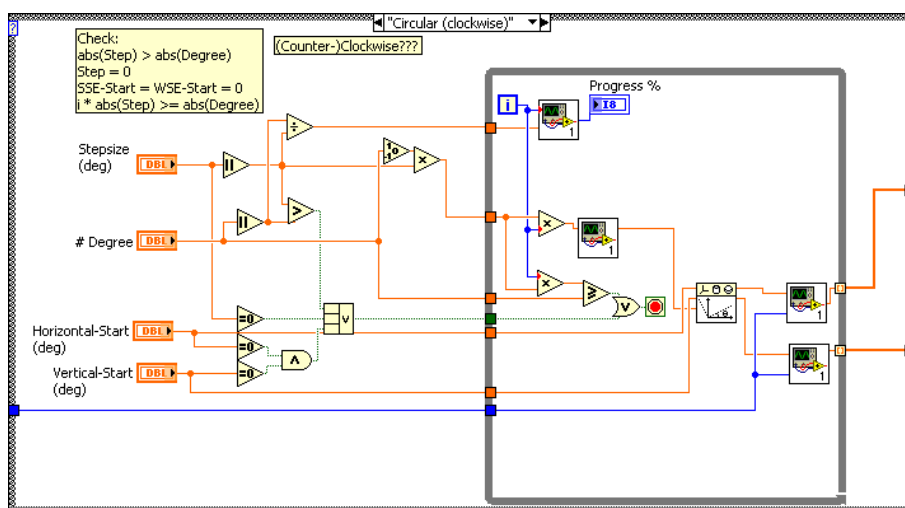


Abbildung A.3. – Berechnung der Koordinaten für die kreisförmige Bewegung bei vorgegebener Schrittweite

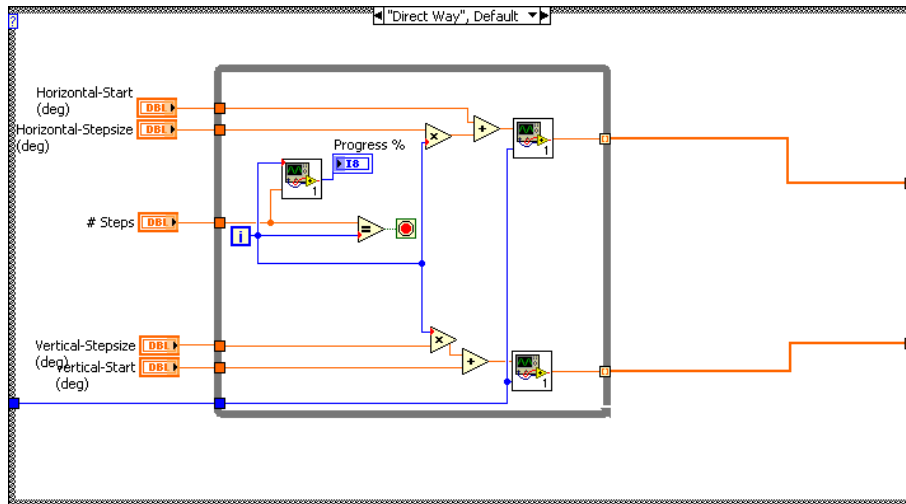


Abbildung A.4. – Berechnung der Koordinaten für die lineare Bewegung bei vorgegebener Schrittweite

A.1.2. „computer_main.vi“

In der folgenden Abbildung wird dargestellt, wie eine neue Datei mit Bahnkurven geöffnet und ein neues Logfile erstellt wird. Oben links wird die oberste „aktivierte“ Datei der mittleren Liste aus der Liste entfernt. Der Pfad der „aktivierten“ Datei wird in das VI zum Öffnen von Textdateien eingegeben. Der Dateiname wird unten mit der Endung „.log“ als Name für die neue Logdatei verwendet. Diese wird im Ordner „Manipulator_Logs“ abgespeichert.

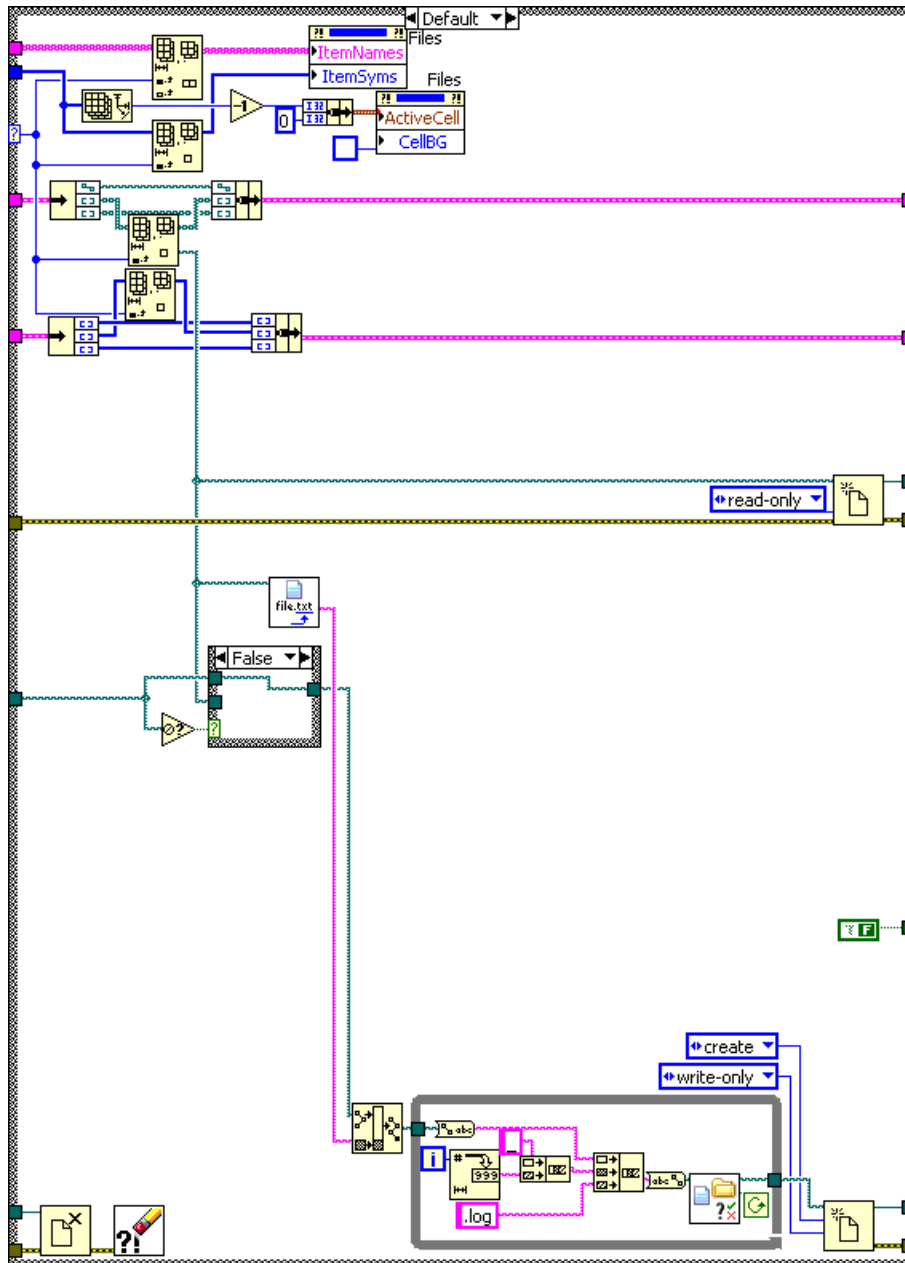


Abbildung A.5. – Programmlogik zum Öffnen einer neuen Datei mit Manipulatorkoordinaten

Die Abbildung zeigt die Programmlogik zur Kommunikation zwischen Computer und Field-point auf Rechnerseite. Neue Koordinaten werden nur dann gelesen und gesendet, wenn von der der Case-Struktur links falsch ausgegeben wird. Dazu muss das Field Point Modul eine „1“ senden und der Schalter „Manual“ darf nicht aktiviert sein. Ist dies der Fall, wird aus der aktuell geöffneten Datei die nächste Zeile ausgelesen, die Größe des entsprechenden Strings in Byte und anschließend die Zeile selbst über eine TCP/IP Verbindung versandt. Danach wird auf die Nachricht vom Fiel Point mit den aktuellen Koordinaten des Manipulators gewartet, welche anschließend in die Protokolldatei eingeschrieben werden.

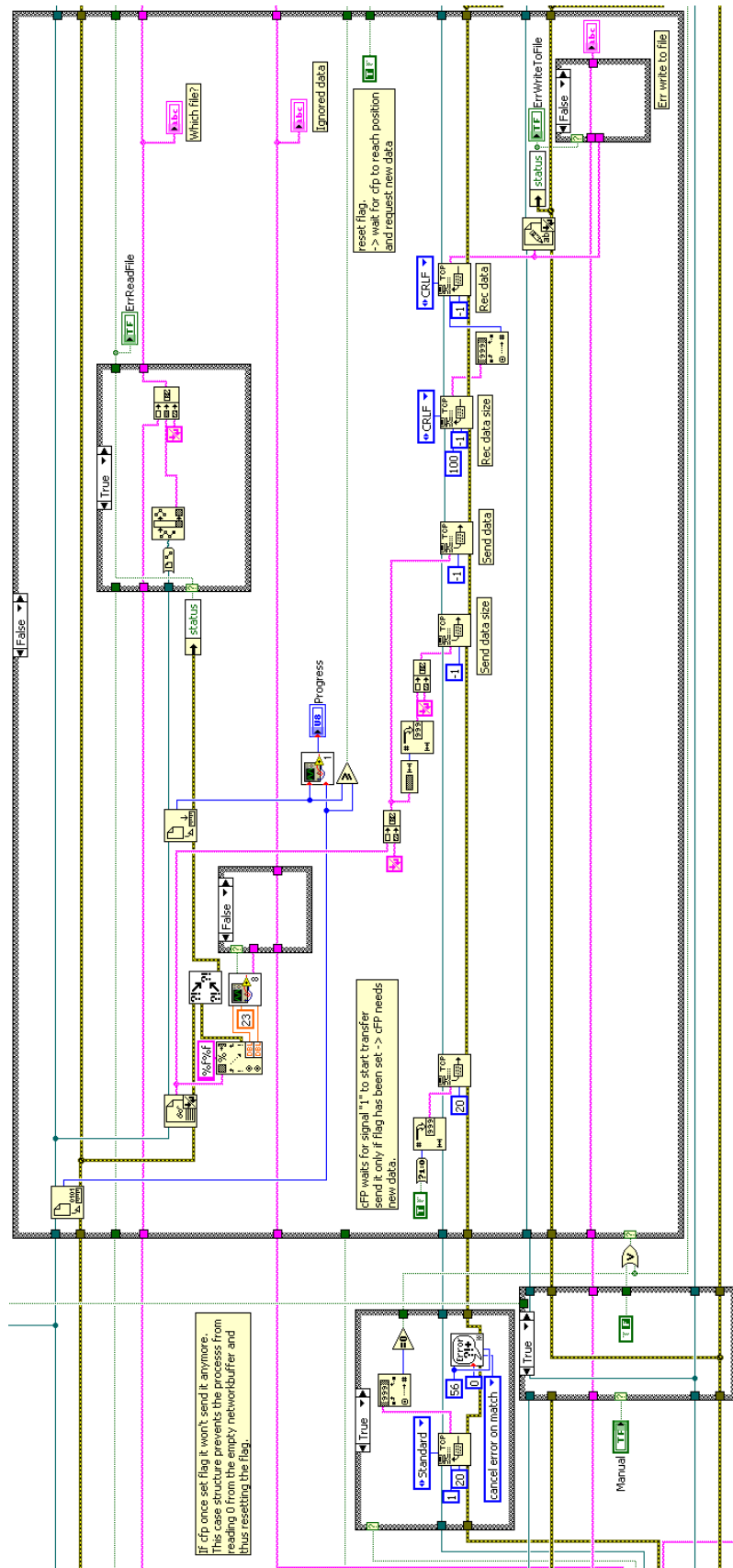


Abbildung A.6. – Programmlogik der Kommunikation zwischen Rechner und Field Point Modul

A.1.3. „cFP2020_main.vi“

Im Folgenden ist die Kommunikation auf Seite des Field Point Systems dargestellt. Ist der Manipulator am Ziel angekommen sendet er dem Computer einmalig eine „1“ als Nachricht. Antwortet der Computer mit einer „1“ werden die neuen Koordinaten empfangen und die aktuelle Position des Manipulators gesendet. Wird der Manipulator vom Benutzer durch direkte Eingabe von Koordinaten gesteuert, wird überprüft ob diese mit der vorgegebenen Maximalneigung des Manipulators verträglich sind. Ist das der Fall, werden die neuen Zielkoordinaten entsprechend gesetzt.

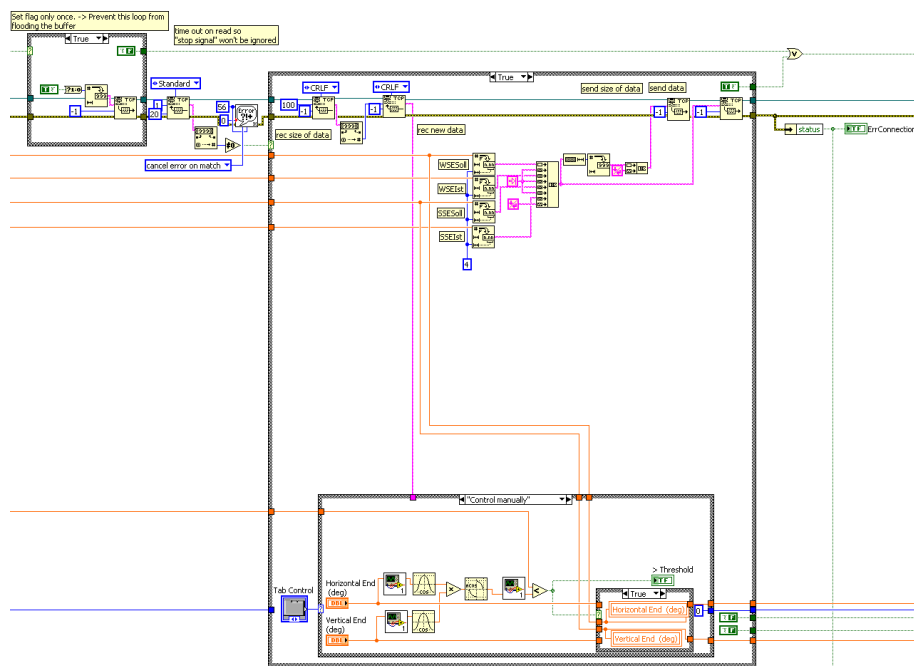


Abbildung A.7. – Programmlogik der Kommunikation zwischen Rechner und Field Point Modul

Die nächste Abbildung zeigt die Programmlogik zur Erzeugung der schrittweisen Bewegung für eine Achse. Erst wird anhand der aktuellen Position überprüft in welche Richtung der Manipulator bewegt werden muss. Die entsprechenden Ventile werden anschließend geöffnet. Nun wird gewartet, bis die vorgegebene Zeit in Millisekunden abgelaufen ist (hier 50 ms). Danach werden die Ventile wieder verschlossen. Um die Restbewegung des Manipulators abzuwarten, wird vor der nächsten Positionsauslese 150 ms gewartet. Ist der Manipulator innerhalb der vorgegebenen Toleranz an dem Zielpunkt angekommen, bleiben die Ventile in der nächsten Iteration geschlossen.

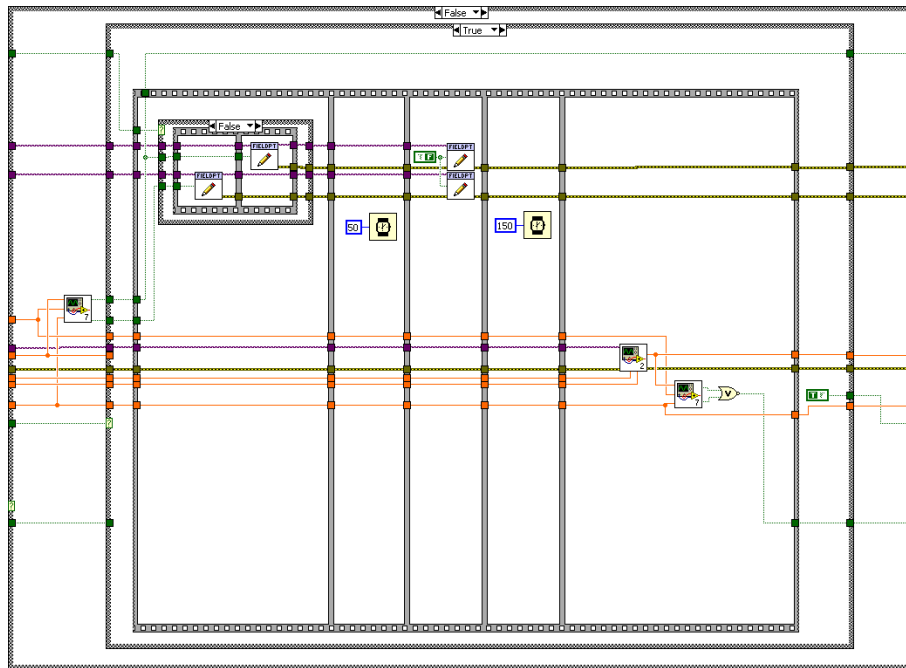
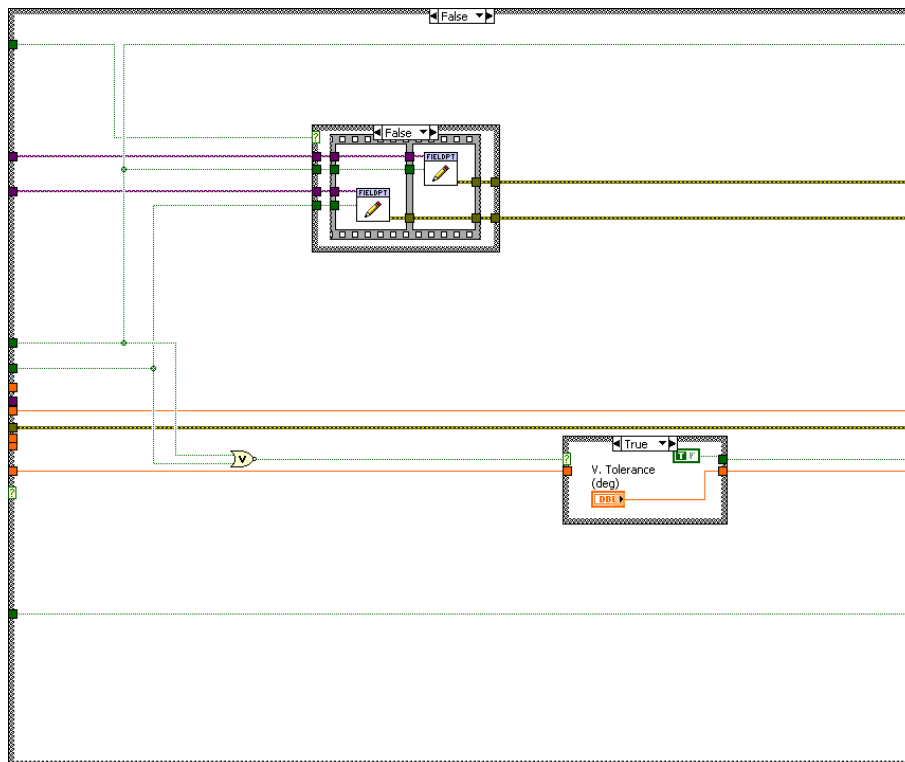


Abbildung A.8. – Programmlogik zur Realisierung von Schrittbewegungen

In der folgenden Abbildung ist die Programmlogik zur Erzeugung von kontinuierlicher Bewegung dargestellt. Im Vorfeld wurde berechnet, welche Ventile geöffnet werden müssen. Die entsprechenden Befehle werden an die Druckluftventile gesandt. Ist der Manipulator über den Schwellwert hinausgefahren wird die Toleranz für die Zielposition auf den vom Benutzer vorgegebenen Wert herabgesetzt.



A.2. Datenblätter



Bestellbezeichnung

GLV18-8-450-3820

Reflexions-Lichttaster
mit 2 m Festkabel

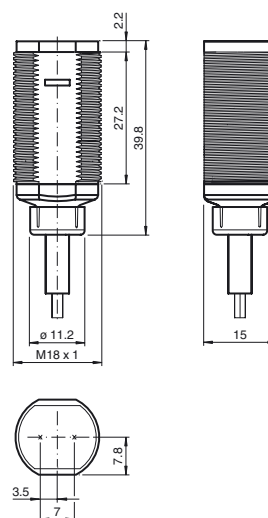
Merkmale

- Kurze Bauform im M18-Kunststoffgehäuse
- 4 Anzeige LEDs für 360° Sichtbarkeit
- Optimales Preis-/Leistungsverhältnis

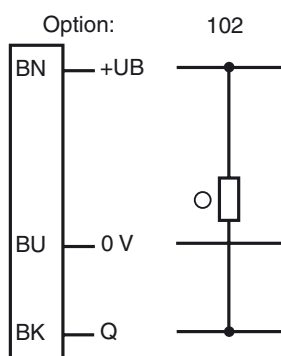
Produktinformation

Einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit von Maschinen und Anlagen leistet die Sensoren der Familie GLV/GLK18. Die Gehäusebauform im M18-Kunststoff-Gehäuse, die Anschlusstechnik und sensorischen Eigenschaften sind weitestgehend standardisiert. Durch Konzentration auf die wesentlichen Anforderungen an die Sensorik wurde eine robuste und zuverlässige Produktfamilie geschaffen für DC und AC/DC-Spannungen, in der jegliches Over Engineering vermieden wurde. Für eine schnelle Montage und einfache Einstellung sorgen das im Lieferumfang enthaltene Montagezubehör und das optimierte Potentiometer-Design.

Abmessungen



Elektrischer Anschluss



- = Hellschaltung
● = Dunkelschaltung

**Technische Daten****Allgemeine Daten**

Tastbereich	50 ... 450 mm fest
Tastbereich max.	0 ... 450 mm
Referenzobjekt	100 mm x 100 mm Kodak weiss
Lichtsender	LED
Lichtart	rot, Wechsellicht , 640 nm
Lichtfleckdurchmesser	ca. 30 mm bei 400 mm
Öffnungswinkel	ca. 4 °
Lichtaustritt	frontal
Fremdlichtgrenze	30000 Lux
Hysterese	H < 15 %

Kenndaten funktionale Sicherheit

MTTF _d	920 a
Gebrauchsdauer (T _M)	20 a
Diagnosedeckungsgrad (DC)	0 %

Anzeigen/Bedienelemente

Betriebsanzeige	LED grün, statisch leuchtend Power on
Funktionsanzeige	LED gelb: leuchtet bei erkanntem Objekt ; blinkt bei Unterschreiten der Funktionsreserve

Elektrische Daten

Betriebsspannung	U _B	10 ... 30 V DC
Leerlaufstrom	I ₀	< 20 mA

Ausgang

Schaltungsart	hellschaltend	
Signalausgang	1 NPN, kurzschlussfest, offener Kollektor	
Schaltspannung	max. 30 V DC	
Schaltstrom	max. 100 mA	
Spannungsfall	U _d	≤ 1,5 V DC
Schaltfrequenz	f	500 Hz
Ansprechzeit	≤ 1 ms	

Umgebungsbedingungen

Umgebungstemperatur	-25 ... 60 °C (-13 ... 140 °F)
Lagertemperatur	-40 ... 70 °C (-40 ... 158 °F)

Mechanische Daten

Schutzart	IP67
Anschluss	Festkabel 2 m
Material	
Gehäuse	PC
Lichtaustritt	PMMA
Kabel	PVC
Masse	ca. 75 g

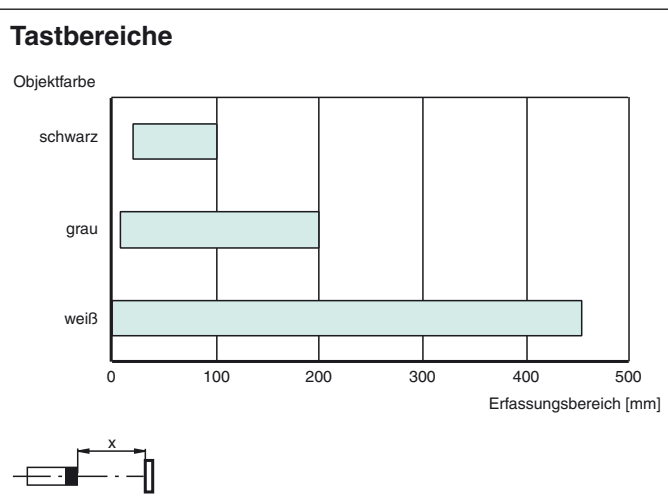
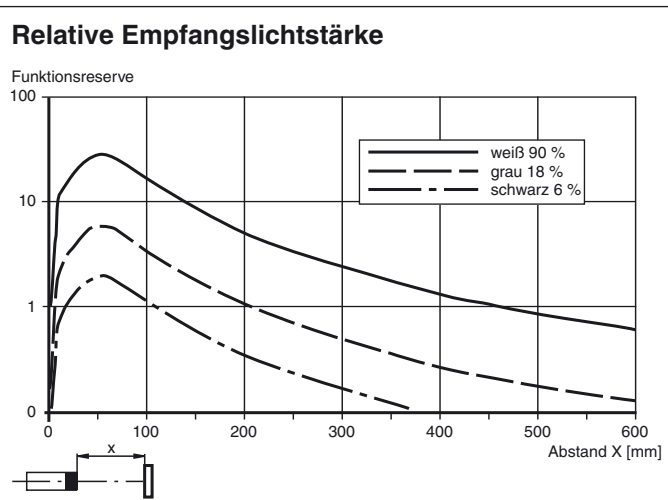
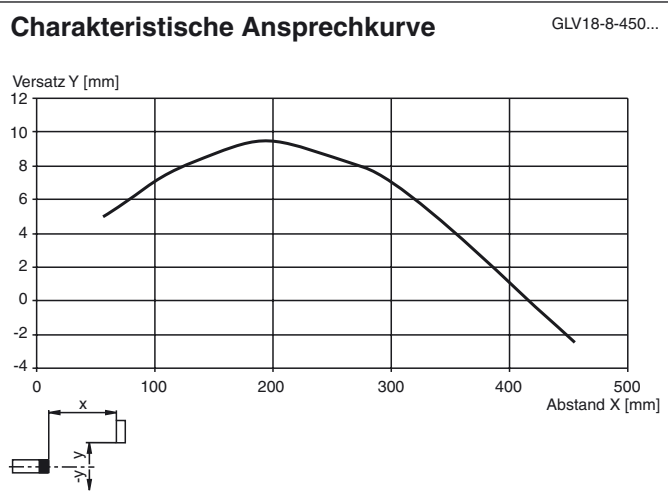
Normen- und Richtlinienkonformität

Normenkonformität	
Produktnorm	EN 60947-5-2:2007 IEC 60947-5-2:2007

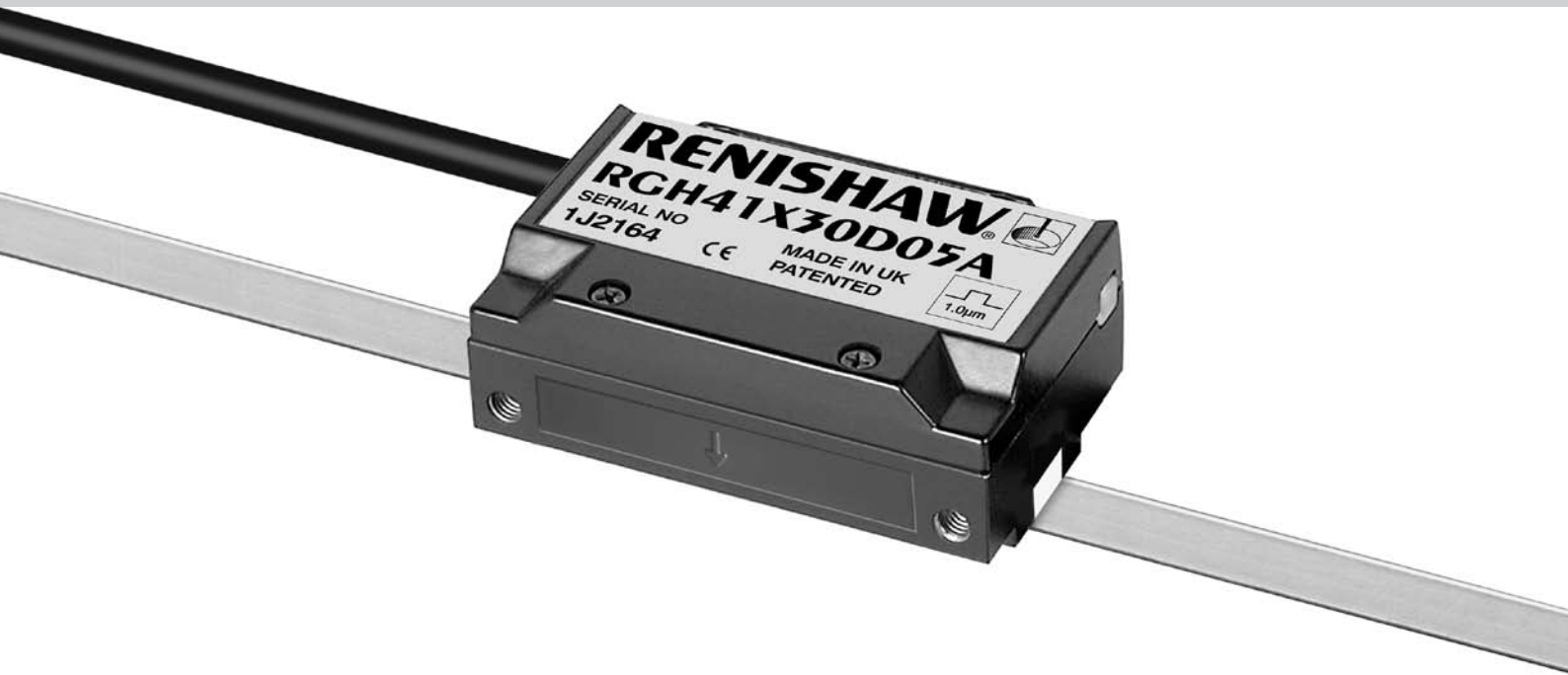
Zulassungen und Zertifikate

Schutzklasse	II, Bemessungsisolationsspannung ≤ 250 V AC bei Verschmutzungsgrad 1-2 nach IEC 60664-1
UL-Zulassung	cULus Listed, Class 2 Power Source
CCC-Zulassung	Produkte, deren max. Betriebsspannung ≤ 36 V ist, sind nicht zulassungspflichtig und daher nicht mit einer CCC-Kennzeichnung versehen.

Kurven/Diagramme



RGH41 series readhead



Renishaw's 40 µm RGH41 series readheads offer all the benefits of the established 20 µm RG2 linear encoder system, such as reflective tape scale, patented filtering optics, set-up LED, good dirt immunity and high speed.

These compact readheads with integral interpolation provide an increased range of resolutions to match the demands of a wide range of applications, whilst their high speed enables an increase in the productivity of the end-user's system.

The 40 µm RGH41 increases the already generous set-up tolerances of the RG2, whilst maintaining Renishaw's famous contamination immunity.

For added flexibility, dual limit switch sensing is included as standard to enable dedicated signals for each end-of-axis indication, along with a repeatable reference or datum mark.

These benefits give the RGH41 greater flexibility complementing the breadth of applications in which the RG2 is already used, from co-ordinate measuring and layout machines to electronics assembly and test, linear motors and a host of custom linear motor solutions.

Digital range

RGH41T - 10 µm resolution
RGH41D - 5 µm resolution
RGH41G - 2 µm resolution
RGH41X - 1 µm resolution
RGH41N - 0.4 µm resolution
RGH41W - 0.2 µm resolution
RGH41Y - 0.1 µm resolution
RGH41H - 50 nm resolution

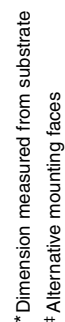
Analogue range

RGH41B - 1 Vpp differential (single limit)
RGH41A - 1 Vpp differential (dual limit)

- **Non-contact open optical system**
- **Large installation tolerances**
- **High speed operation up to 15 m/s**
- **Industry standard digital and analogue output options**
- **Resolutions from 10 µm to 50 nm**
- **Integral reference and dual limit sensors**
- **Integral set-up LED**
- **Uses Renishaw RGS40-S self-adhesive scale**

RGH41 series readhead

Dimensions and tolerances in mm.

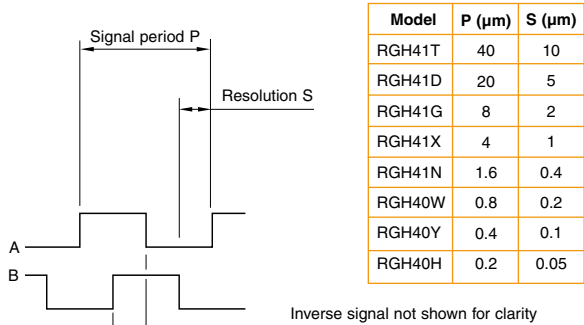


Output specifications

Digital output signals - RGH41T, D, G, X, N, W, Y, H

Form - square wave differential line driver to EIA RS422A (except limit switch P, Q, Alarm E- and external set-up signal X)

Incremental 2 channels A and B in quadrature (90° phase shifted)

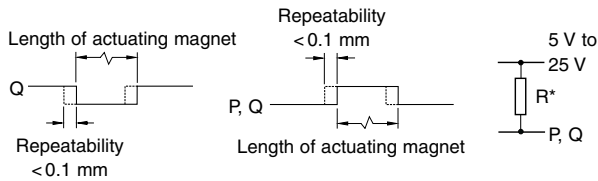


Reference

Synchronised pulse Z, duration as resolution S. Repeatability of position (uni-directional) maintained within $\pm 20^\circ\text{C}$ from temperature at time of phasing and for speeds $< 0.5\text{ m/s}$. For RGH40W, Y, H only Z pulse re-synchronised at power-up with any one of the quadrature states (00, 01, 11, 10). Inverse signal not shown for clarity

Limit open collector output

Single limit (option 03/04) **Dual limit (option 05/06)** **Termination**



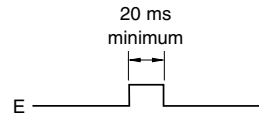
Asynchronous pulse P, Q.

Actuation device A-9531-0251, A-9531-2052, A-9531-2054.

*Select R so that the maximum current does not exceed 20 mA.

Alternatively, a suitable relay or opto-isolator may be used.

Alarm single limit readheads - differential line driven output
dual limit readheads - single-ended line driven output



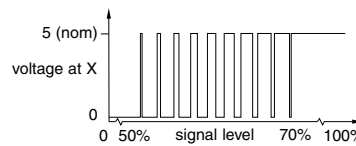
Inverse signal not shown for clarity
E- only on dual limit readheads (option 05/06)

For RGH41T, G, X alarm asserted for signal amplitude $< 15\%$. Either asynchronous pulse E as shown (options 03/05) or line driver channels 3-state (options 04-06).

For RGH41N, W, Y, H - alarm E- asserted when:
- Signal amplitude $> 150\%$
- Readhead exceeds specified maximum speed

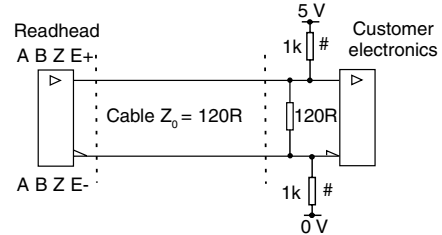
Also, outputs are 3-stated at signal amplitude $< 15\%$

External set-up



Between 50% and 70% signal level, X is a duty cycle, 40 μm duration. Time spent at 5 V increases with signal level. At $> 70\%$ signal level X is nominal 5V.

Recommended signal termination

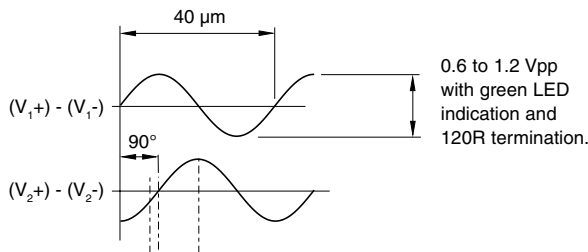


Standard RS422A line receiver circuitry.

#Only required on alarm channel E for fail safe operation and to ensure alarm signal is asserted at low signal amplitude on RGH41N, W, Y, H when output is 3-stated

Analogue output signals - RGH41A, B (1Vpp)

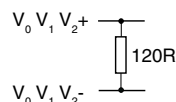
Incremental 2 channels V_1 and V_2 differential sinusoids in quadrature (90° phase shifted)



Reference

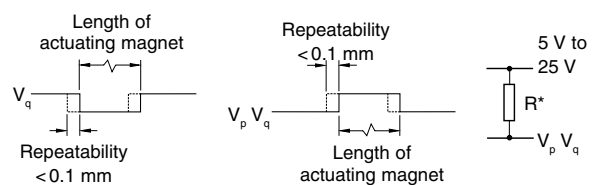
Differential pulse V_0 - 18° to 108° . Duration 126° (electrical). Repeatability of position (uni-directional) maintained within $\pm 20^\circ\text{C}$ from temperature at time of phasing, and for speeds $< 0.5\text{ m/s}$. Actuation device A-9531-0250.

Recommended signal termination



Limit open collector output

Single limit RGH41B **Dual limit RGH41A** **Termination**



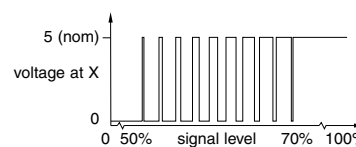
Asynchronous pulse P, Q.

Actuation device A-9531-0251, A-9531-2052, A-9531-2054.

*Select R so that the maximum current does not exceed 20 mA.

Alternatively, a suitable relay or opto-isolator may be used.

External set-up



Between 50% and 70% signal level, X is a duty cycle, 20 μm duration. Time spent at 5 V increases with signal level. At $> 70\%$ signal level X is nominal 5V.

Operating and electrical specifications

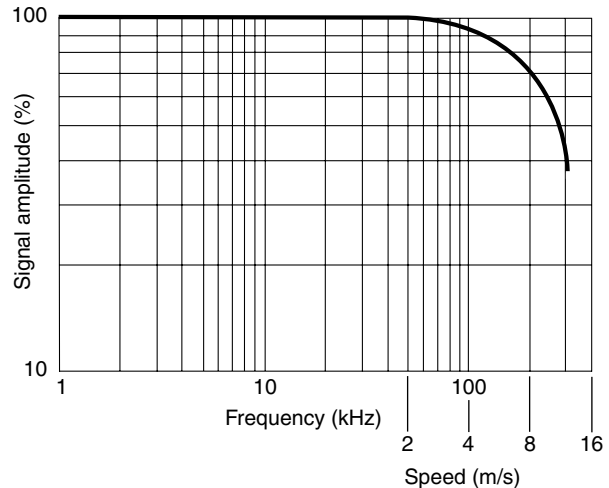
Speed performance

Clocked output readheads

The RGH41N, W, Y, H readheads are available with a variety of different clocked outputs. The clocked options have been designed to prevent fine edge separations being missed by receiving electronics utilising slower clock speeds. Depending on the clock frequency chosen, each option has a different maximum speed and associated minimum recommended counter clock frequency.

Digital readheads						
Head type	Maximum speed (m/s)		Minimum recommended counter clock frequency (MHz)			
T	15		$\left(\frac{\text{Encoder velocity (m/s)}}{\text{Resolution } (\mu\text{m})}\right) \times 4$ safety factor			
D	12					
G	10					
X	6					
N, W, Y, H option	N	W	Y	H	Minimum recommended counter clock frequency (MHz)	
61	3.0	2.5	1.3	0.6	20	
62	2.6	1.3	0.7	0.3	10	
63	1.3	0.7	0.35	0.15	5	

Analogue type A/B readheads

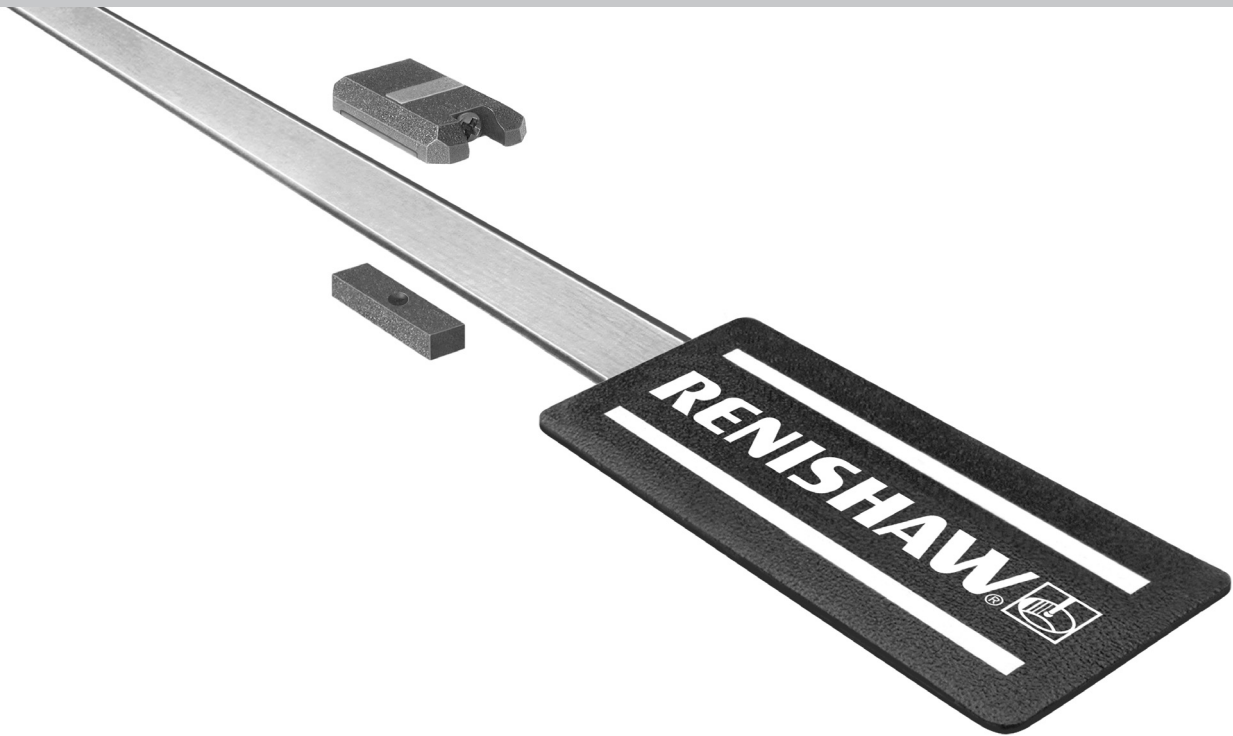


Power supply	5 V ± 5% 120 mA (typical), 175 mA (RGH41N, W, Y, H) NOTE: For digital outputs, current consumption figures refer to unterminated readheads/interfaces. A further 25 mA per channel pair (eg A+, A-) will be drawn when terminated with 120 Ω. Renishaw encoder systems must be powered from a 5 V dc supply complying with the requirements for SELV of standard EN (IEC) 60950. Ripple <200 mVpp maximum @ frequency up to 500 kHz maximum	
Temperature	Storage -20 °C to +70 °C Operating 0 °C to +55 °C	
Humidity	Storage 95% maximum relative humidity (non-condensing) Operating 80% maximum relative humidity (non-condensing)	
Sealing	IP50	
Acceleration	Operating 500 m/s ² BS EN 60068-2-7:1993 (IEC 68-2-7:1983)	
Shock (non-operating)	1000 m/s ² , 6 ms, ½ sine BS EN 60068-2-27:1993 (IEC 68-2-27:1987)	
Vibration (operating)	100 m/s ² max @ 55 Hz to 2000 Hz BS EN 60068-2-6:1996 (IEC 68-2-6:1995)	
Mass	Readhead 50 g Cable 38 g/m	
EMC compliance (system)	BS EN 61000 BS EN 55011	
Cable	12 core, double-shielded, maximum outside diameter 4.7 mm Flex life >20 x 10 ⁶ cycles at 50 mm bend radius	
Connector options	Code - connector type D - 15 pin 'D' type plug L - 15 pin 'D' type plug V - 12 pin circular plug W - 12 pin circular coupling plug F - Flying lead X - 16 pin in line connector	Application RGH41T, D, G, X, N, W, Y, H RGH41A, B RGH41B RGH41B All readheads All readheads

For worldwide contact details, please visit our main website at www.renishaw.com/contact



RGS20-S, RGS20-PC, RGS40-S, RGS40-PC scale



Renishaw's patented RGS20-S scale comprises 20 μm graduations on a steel strip 6 mm wide and 0.2 mm thick and features a thin gold surface layer to enhance reflectivity.

A lacquer coating provides protection against handling and contamination.

The 20 μm pitch scale is suitable for use with all Renishaw RG2 series readheads: RGH22, RGH24, RGH25 and RGH26.

Whilst the 40 μm RGS40-S is suitable for use with the RGH34 and RGH41 readheads.

The scale is supplied with a specially formulated adhesive backing tape.

Installation is quick, easy and suits both high volume production and one-off field service installations.

To simplify customer inventory and maximise production flexibility, the scale can be supplied on a reel for 'cut-to-suit' convenience at the point of installation.

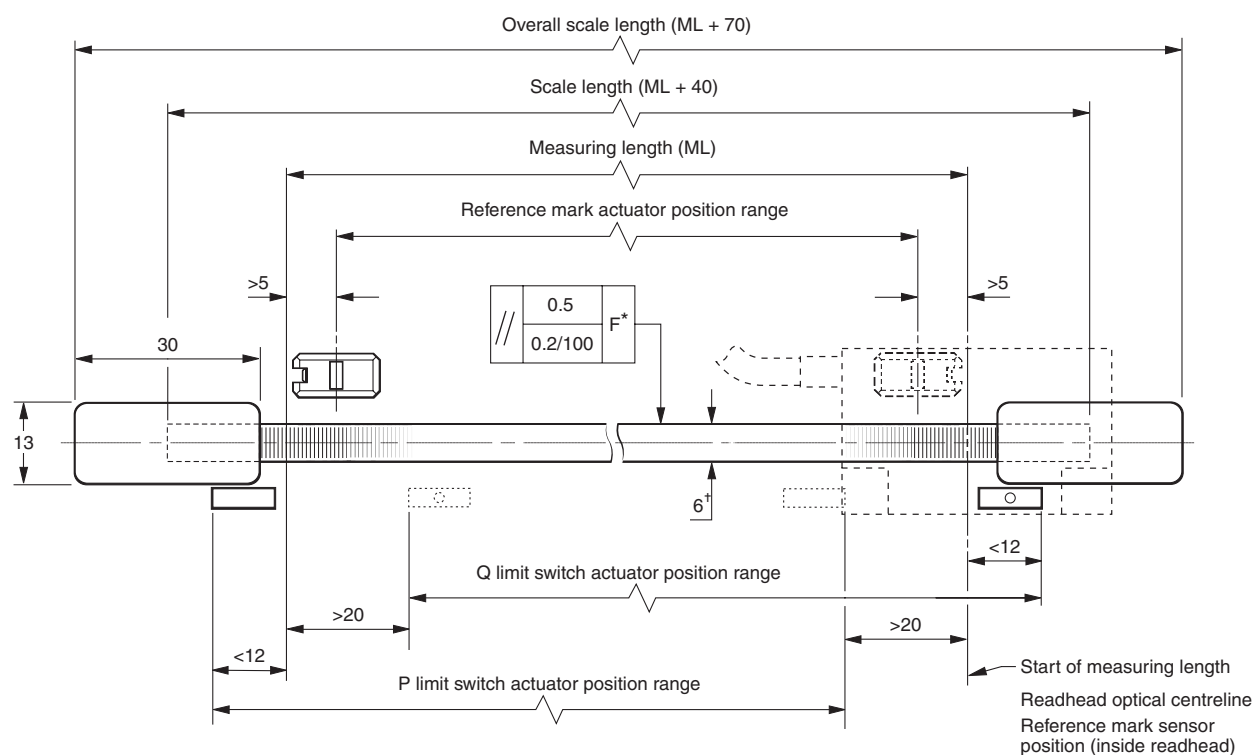
RGS20-S and RGS40-S are suitable for mounting to most common engineering materials including metals, granites, ceramics and composites, whilst RGS20-PC and RGS40-PC polyester coated versions have an increased resilience to solvent and lubricant attack.

The scale ends are rigidly fixed to the axis substrate by means of epoxy fastened end clamps, eliminating the need to drill holes. Because the scale has a very small cross section, it is 'mastered' to the substrate and matches its thermal expansion. Differential movement between the scale and the substrate is close to zero, even throughout significant temperature swings.

- **RGS20 20 μm tape scales for RGH22, RGH24, RGH25 and RGH26 readheads**
- **RGS40 40 μm tape scales for readheads RGH34 and RGH41**
- **'Cut-to-length' flexibility**
- **Lengths from 100 mm to over 50 m**
- **Protective lacquer or tough polyester coating option for applications using harsh solvents**
- **Efficient, accurate installation**
- **Affixes to most common engineering materials**
- **Self-adhesive**
- **Automated application**

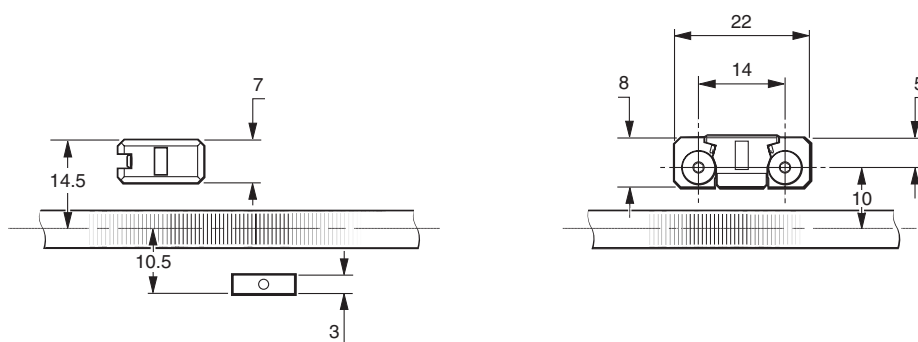
General outline and dimensions

Dimensions in mm



*F = axis guideway

[†]For RGS20-PC and RGS40-PC scale width = 6.3



NOTE 1: RGH22 dual limit switch installation shown – for RGH24, RGH25, RGH26, RGH34 and RGH41 installations refer to specific data sheets or readhead installation guide.

NOTE 2: The surface roughness of the axis guideway must be $\leq 3.2 \mu\text{m}$. The parallelism of the scale surface to the axis guideway (readhead ride height variation) must be within 0.05 mm.

Technical specifications

Scale

Type	Reflective gold plated steel tape with protective lacquer coating or tough polyester coating option for applications using harsh solvents and self-adhesive backing	
Scale pitch	RGS20-S, RGS20-PC = 20 µm	RGS40-S, RGS40-PC = 40 µm
Linearity	RGS20-S = ± 3 µm/m, ± 0.75 µm/60 mm RGS20-PC = ± 5 µm/m, ± 1.5 µm/60 mm	RGS40-S = ± 3 µm/m, ± 1 µm/60 mm RGS40-PC = ± 5 µm/m, ± 1.5 µm/60 mm
Scale length	100 mm - 50 m (>50 m by special order)	
Substrate materials	Metals, ceramics and composites with expansion coefficients between 0 and 22 µm/m/°C (steel, aluminium, invar, granite, ceramic etc.)	
Expansion coefficient	Matches that of substrate material with scale ends fixed by epoxy mounted end clamps	
End fixing	Epoxy mounted end clamps (A-9523-4015) using 2 part epoxy adhesive (A-9531-0342) Scale end movement <1 µm over temperature range -20 to 50 °C	
Operating specification	Temperature: -10 to 120 °C (Scale only, also refer to readhead Data sheet) Minimum installation temperature 10 °C Humidity: 80% maximum RH (non-condensing)	

Reference mark

Type	Magnetic actuator	
Mounting options	Adhesive mounted Screw mounted Adhesive or screw mounted 90° actuator for use with RGH24, RGH25 or RGH34	A-9531-0250 A-9531-0287 A-9541-0037
Position	One or more at user selected locations	
Repeatability	Output synchronised with incremental channels Repeatability of position (uni-directional) maintained within these conditions: Temperature range: RGS20-S, RGS20-PC - ±10 °C from installation temperature RGS40-S, RGS40-PC - ±20 °C from installation temperature Speed: Refer to individual readhead specifications Magnetic field: steady ±0.02 T or changing ±7.5 T/s	

Limit switch

Type	Magnetic actuator	
Mounting options	Adhesive mounted 10 mm actuator Adhesive mounted 24.35 mm actuator Adhesive mounted 50 mm actuator Flush mounted actuator Adhesive or screw mounted 90° actuator for use with RGH24, RGH25 and RGH34	A-9531-0251 A-9531-2052 A-9531-2054 A-9531-0285 A-9541-0040
Position	One or more at user selected locations	
Repeatability	0.1 mm	

Renishaw plc
New Mills, Wotton-under-Edge,
Gloucestershire GL12 8JR
United Kingdom

T +44 (0)1453 524524
F +44 (0)1453 524901
E uk@renishaw.com
www.renishaw.com

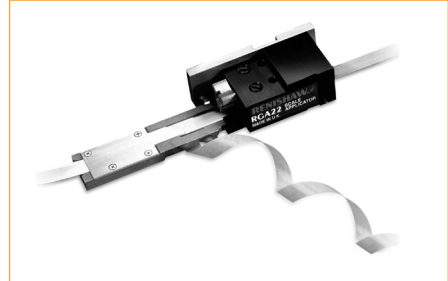
RENISHAW 
apply innovation™

RGA applicators

RGA applicators are mounted in place of the readhead and use the motion of the axis to apply the scale parallel to the guideway - a one-hit, one-man operation.

RGA22

The RGA22 is available in kit form complete with adaptors and tools to enable efficient and accurate scale application with RGH22, RGH26 and RGH41 installations. It is particularly suited to long axes or limited access installations as the backing paper is automatically removed during scale application requiring minimal manual intervention.



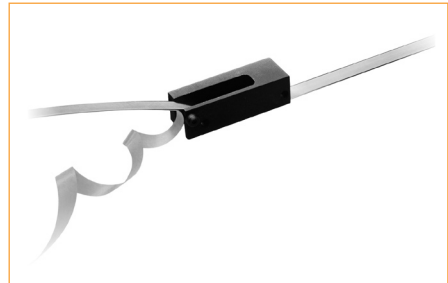
RGA22G scale applicator

The RGA22G is also for use with RGH22, RGH26 and RGH41 installations. It offers the benefits as the RGA22 in a simplified form, and is ideally suited to shorter axes.



RGA245 scale applicator

The RGA245 is for use with RGH24 and RGH25 installations. It offers the benefits as the RGA22 in a simplified form and is ideally suited to shorter axes.



**For worldwide contact details, please visit our
main website at www.renishaw.com/contact**

RENISHAW HAS MADE CONSIDERABLE EFFORTS TO ENSURE THE CONTENT OF THIS DOCUMENT IS CORRECT AT THE DATE OF PUBLICATION BUT MAKES NO WARRANTIES OR REPRESENTATIONS REGARDING THE CONTENT. RENISHAW EXCLUDES LIABILITY, HOWSOEVER ARISING, FOR ANY INACCURACIES IN THIS DOCUMENT.

RENISHAW® and the probe emblem used in the RENISHAW logo are registered trademarks of Renishaw plc in the UK and other countries. **apply innovation** is a trademark of Renishaw plc.

© 2001-2008 Renishaw plc All rights reserved Issued 1008

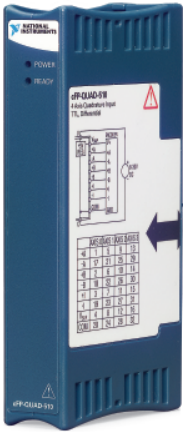


L - 9517 - 0160 - 05

Quadrature Encoder Input Module for Compact FieldPoint

NI cFP-QUAD-510

- 4-axis quadrature encoder inputs
 - Differential or single-ended inputs
 - 5 to 30 VDC
- 32-bit position registers
- 16-bit velocity registers
- Onboard 5 V regulated power supply
- 2,300 V_{rms} bank isolation for transient overvoltage protection
- Hot-swappable with autoconfiguration
- -40 to 70 °C operating range



Module	Number of Quadrature Encoder Inputs	Position Resolution	Velocity Resolution	Lowpass Filter Cutoff	Voltage Inputs	Regulated Power Output
cFP-QUAD-510	4	32-bit	16-bit	250 kHz	5 to 30 VDC	5 V at 600 mA

Overview

The National Instruments cFP-QUAD-510 is a versatile quadrature encoder input module for Compact FieldPoint that you can use to directly measure position and velocity in a motion control application. This module can connect to differential and single-ended quadrature encoders with inputs between 5 and 30 VDC. It is commonly used in motion control applications with cFP-PWM-520 modules, Compact FieldPoint relay modules, cFP-PG-522 modules, or an external serial motor controller. The NI cFP-QUAD-510 includes onboard diagnostics to ensure trouble-free installation and maintenance.

Quadrature Encoder Input Module

The cFP-QUAD-510 accepts up to four channels of single-ended or differential quadrature encoder inputs and can measure position and velocity in both forward and reverse directions. The module also provides a regulated power supply to power 5 V encoders.

Position Operation

The module has four independent 32-bit position counters. You can easily accommodate encoders with various phase relationships by swapping the phase A and phase B signals. Each position counter has an index input. You can program the counter to reset when the index is turned on. The encoder can record frequencies as high as 1 MHz.

Velocity Operation

The cFP-QUAD-510 has four independent 16-bit velocity counters. The module returns the velocity as the number of counts per microsecond. A positive number indicates motion in the forward direction, and a negative number indicates motion in the reverse direction. There are eight selectable resolution ranges, so you can read the velocity average over a long period of time or read an instantaneous velocity reading.

Isolation

The cFP-QUAD-510 features optical bank isolation with 2,300 V_{rms} of breakdown isolation. It does not have channel-to-channel isolation.

Power Requirements

Because the cFP-QUAD-510 requires up to 1.2 W of power, it can limit the number of I/O modules that you can connect to a single network interface module. Controllers and network interface modules supply up to 9 W to power I/O modules.

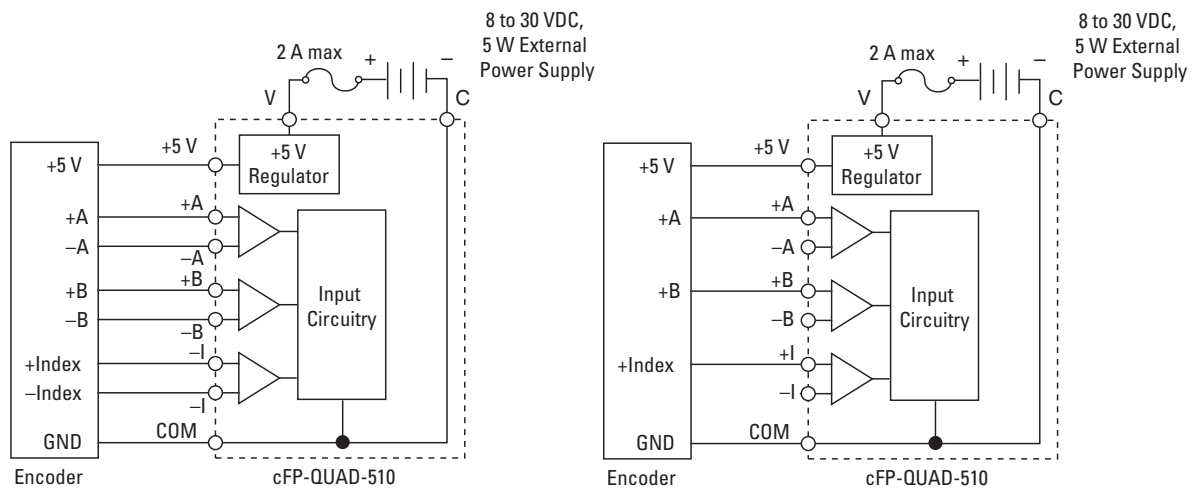
Field I/O Connections

Compact FieldPoint modules include a built-in power distribution bus that provides multiple power connections on the modules. A field-wired power supply connected to the voltage (V) and common (C) terminals is internally regulated to 5 VDC and is connected to a power distribution bus that offers additional breakout terminals for voltage supply (+5 V) and common (COM). These terminals deliver a convenient way to distribute power to field devices that require external power.

Quadrature Encoder Input Module for Compact FieldPoint

Each input channel on the cFP-QUAD-510 has eight terminals:

1. Encoder A+ input (A+)
2. Encoder A- input (A-)
3. Encoder B+ input (B+)
4. Encoder B- input (B-)
5. Encoder I+ input (I+)
6. Encoder I- input (I-)
7. Common (COM)
8. 5 VDC regulated power connection to power field devices (V_{SUP})



Wiring Schematics for the cFP-QUAD-510 Module

Ordering Information

NI cFP-QUAD-510777318-510

Recommended Compact FieldPoint System Products

NI cFP-2120777317-2120

NI cFP-BP-4778617-04

NI cFP-CB-1778618-01

NI PS-5 power supply778805-90

NI Developer Suite Professional Control Edition777906-03

BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call 800 813 3693 (U.S.) or go to ni.com/compactfieldpoint.

BUY ONLINE at ni.com or **CALL 800 813 3693 (U.S.)**

Quadrature Encoder Input Module for Compact FieldPoint

Specifications

Typical for -40 to 70 °C unless otherwise noted.

Encoder Input

Number of channels	4
Input type	
Single-ended.....	$V_{IL} = 0$ to 0.8 V $V_{IH} = 2.0$ to 30.0 V (external pull up required)
Differential	
High	$(V_{IN-} + 0.3 \text{ V}) \leq V_{IN+} \leq 30 \text{ V}$ $0 \text{ V} \leq V_{IN-} \leq 3.0 \text{ V}$
Low	$(V_{IN+} + 0.3 \text{ V}) \leq V_{IN-} \leq 30.0 \text{ V}$ $0 \text{ V} \leq V_{IN+} \leq 3.0 \text{ V}$
Maximum protected input voltage	$\pm 250 \text{ VDC}$ on each input
Input bandwidth	250 kHz for each input
Encoder frequency	1 million counts
Minimum input pulse width	2 μs
Counter widths.....	32 bits, 4 billion counts
External supply voltage (V)	8 to 30 VDC at 5 W, user-provided
I/O supply voltage (V_{SUP}).....	5 VDC at 600 mA maximum
Maximum isolation voltage	250 V_{rms} , Installation Category II
Channel-to-channel isolation.....	No isolation between channels
Transient overvoltage.....	2,300 V_{rms}

Physical Characteristics

LED indicators	Green POWER and READY indicators
Dimensions.....	127.0 by 65.9 by 23.9 mm (5.00 by 2.60 by 0.94 in.)
Weight.....	113 g (4.0 oz)

Environment

Operating temperature	-40 to 70 °C
Storage temperature.....	-55 to 85 °C
Relative humidity	10 to 90%, noncondensing

Power Requirement

Power from network module	1.2 W maximum
---------------------------------	---------------

Shock and Vibration

Operating vibration, random (IEC 60068-2-64)	10 to 500 Hz, 5 g_{rms}
Operating vibration, sinusoidal (IEC 60068-2-6)	10 to 500 Hz, 5 g
Operating shock (IEC 60068-2-27)	50 g, 3 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations; 30 g, 11 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations

Safety and Compliance

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1

Note: For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 EMC requirements; Minimum Immunity
- EN 55011 Emissions; Group 1, Class A
- CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 Emissions; Class A

Note: For EMC compliance, operate this device according to product documentation.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Note: Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

EU Customers: At the end of their life cycle, all products must be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

NI Services and Support



NI has the services and support to meet your needs around the globe and through the application life cycle — from planning and development through deployment and ongoing maintenance. We offer services and service levels to meet customer requirements in research, design, validation, and manufacturing. Visit ni.com/services.

Training and Certification

NI training is the fastest, most certain route to productivity with our products. NI training can shorten your learning curve, save development time, and reduce maintenance costs over the application life cycle. We schedule instructor-led courses in cities worldwide, or we can hold a course at your facility. We also offer a professional certification program that identifies individuals who have high levels of skill and knowledge on using NI products. Visit ni.com/training.

Professional Services

Our NI Professional Services team is composed of NI applications and systems engineers and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 600 independent consultants and



integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

OEM Support

We offer design-in consulting and product integration assistance if you want to use our products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Local Sales and Technical Support

In offices worldwide, our staff is local to the country, giving you access to engineers who speak your language. NI delivers industry-leading technical support through online knowledge bases, our applications engineers, and access to 14,000 measurement and automation professionals within NI Developer Exchange forums. Find immediate answers to your questions at ni.com/support.

We also offer service programs that provide automatic upgrades to your application development environment and higher levels of technical support. Visit ni.com/ssp.

Hardware Services

NI Factory Installation Services

NI Factory Installation Services (FIS) is the fastest and easiest way to use your Compact FieldPoint systems right out of the box. Trained NI technicians install the software and hardware and configure the system to your specifications. NI extends the standard warranty by one year on hardware components (controllers, backplanes, modules) purchased with FIS. To use FIS, simply configure your system online with ohm.ni.com/advisors/ctf.

Calibration Services

NI recognizes the need to maintain properly calibrated devices for high-accuracy measurements. We provide manual calibration procedures, services to recalibrate your products, and automated calibration software specifically designed for use by metrology laboratories. Visit ni.com/calibration.

Repair and Extended Warranty

NI provides complete repair services for our products. Express repair and advance replacement services are also available. We offer extended warranties to help you meet project life-cycle requirements. Visit ni.com/services.



ni.com • 800 813 3693

National Instruments • info@ni.com



©2008 National Instruments Corporation. All rights reserved. FieldPoint, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, NI Developer Suite, and SCXI are trademarks of National Instruments. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from NI and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with NI.

Quellenangaben

- [CGL09] COHEN, A. G. ; GLASHOW, S. L. ; LIGETI, Z.: Disentangling neutrino oscillations. In: *Physics Letters B* 678 (2009)
- [Fa98] FUKUDA, Y. ; AL. et: *Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos*. 1998
- [Han13] HANNEN, V.: *Main Spectrometer Electron-Gun Specification*. Feb 2013
- [Hil11] HILLEN, B.: *Untersuchung von Methoden zur Unterdrückung des Spektrometeruntergrunds beim KATRIN Experiment*, Diss., 2011
- [Ost08] OSTRICK, B.: *Eine kondensierte ^{83m}Kr -Kalibrationsquelle für das KATRIN-Experiment*, Diss., 2008
- [TKa] THE KATRIN collaboration: *Design Report 2004*.
<http://www-ik.fzk.de/katrin/publications/documents/DesignReport2004-12Jan2005.pdf>
- [TKb] THE KATRIN collaboration: *KATRIN-experiment*.
<http://www.katrin.kit.edu/>
- [TKc] THE KATRIN collaboration: *SDS Commissioning Document*.
[http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d768287/SDS Commissioning Document](http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d768287/SDS%20Commissioning%20Document)
- [Val09] VALERIUS, Kathrin: *Spektrometeruntergrund und seine Unterdrückung beim KATRIN Experiment*. 2009

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit direkt und indirekt unterstützt haben.

Prof. Weinheimer möchte ich für die freundliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe und die Befürwortung bei der Anfertigung meiner Arbeit danken! Auch für die Möglichkeit am KATRIN Kollaborationstreffen in Karlsruhe teilnehmen zu dürfen möchte ich mich bedanken!

Meinem Betreuer Michael Zacher danke ich für die große Mühe, die Unterstützung und Befürwortung in jeder Phase der Bachelorarbeit, den lockeren Umgang und die Zeit, die er sich auch außerhalb gewöhnlicher Arbeitszeiten für mich genommen hat!

Großer Dank gebührt auch Herrn Ortjohann und Roland Berendes, die mir bei technischen Problemen nicht nur geholfen haben, sondern von denen ich während meiner Zeit in der Arbeitsgruppe auch einiges lernen konnte!

Ich möchte mich auch bei allen anderen Mitglieder der AG Weinheimer für die freundliche Aufnahme, den guten Umgang und die schöne Zeit bedanken!

Meinen Freunden möchte ich für die gemeinsam durchlebte unterhaltsame und aufregende Zeit während des gesamten Grundstudiums danken!

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Geschwistern Johanna und Mareike, die mich während meines Studiums immer unterstützt, gefördert und gestärkt haben. Auch bei meiner Freundin Marina möchte ich mich für ihre Geduld, ihr Verständnis und die Unterstützung bedanken. Es ist ein tolles Gefühl zu wissen, dass ich immer auf euch zählen kann!!!

Vielen Dank!

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über die Ansteuerung und Auslese eines UHV-Manipulators für Kalibrationsmessungen am KATRIN Hauptspektrometer selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken - auch elektronischen Medien - dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

(Datum, Unterschrift)

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

(Datum, Unterschrift)