



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Daniel Haack

Automatisierung und Evaluierung eines
Sensorsystems zur Messung des
Energiespektrums von XUV-Strahlung

Daniel Haack

Automatisierung und Evaluierung eines
Sensorsystems zur Messung des
Energiespektrums von XUV-Strahlung

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Masterstudiengang Automatisierung
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.Ing. Florian Wenck
Zweitgutachter : Prof. Dr.Ing. Jochen Maaß

Abgegeben am 30. Oktober 2018

Daniel Haack

Thema der Masterthesis

Automatisierung und Evaluierung eines Sensorsystems zur Messung des Energiespektrums von XUV-Strahlung

Stichworte

Automatisierung, Evaluierung, Regelung, XUV-Strahlung, Spektrometer

Kurzzusammenfassung

Diese Thesis befasst sich mit einem Spektrometer zur Messung von extrem ultravioletter Strahlung. Zunächst wird die Automatisierung der Messbereichsvorgabe beschrieben. Anschließend wird die im Spektrometer enthaltene Zeilenkamera evaluiert. Schließlich wird das Spektrometer für die Regelung der Wellenlänge des Freielektronen-Lasers in Hamburg eingesetzt und die Auslegung und Implementierung der Regelung beschrieben.

Daniel Haack

Title of the paper

Automation and evaluation of a sensor system to measure the energy spectrum of XUV radiation

Keywords

Automation, Evaluation, Control theory, XUV radiation, spectrometer

Abstract

This thesis is about a spectrometer that measures extreme ultraviolet radiation. The first part is a description of the automation of the measuring range setting and is followed by an evaluation of the spectrometer line camera. Finally the spectrometer is used to control the wavelength of the Free-electron laser in Hamburg and the design and implementation of the control software is explained.

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Hilfe einer Vielzahl von Menschen nicht möglich gewesen.

An erster Stelle bedanke ich mich für die herausragende Betreuung bei Dr. Stefan Düsterer. Durch seinen Einsatz ist das Thema der Arbeit und somit die Thesis überhaupt erst zustande gekommen. Des Weiteren gilt mein besonderer Dank meinem Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Florian Wenck für die ausgezeichnete Betreuung während der Bearbeitungszeit.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Dr. Christopher Gerth, Dr. Bernd Steffen, Dr. Christian Schmidt, Dr. Kai Tiedtke und Dr. Steffen Palutke für die Unterstützung bei meiner Arbeit.

Ich bedanke mich ebenfalls bei meiner Familie, die mir stets zur Seite steht.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Nomenklatur	XI
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Gliederung der Arbeit	2
2. Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1. DESY	4
2.2. Freier-Elektronen-Laser	4
2.3. Variable Line Spacing Spektrometer	7
2.3.1. Blazegitter	8
2.3.2. Cerium:Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall	10
2.3.3. KALYPSO Zeilendetektor	10
2.4. DOOCS	11
2.5. jddd	12
2.6. DAQ	12
3. Automatisierung des Variable-Line-Spacing Spektrometers	14
3.1. Automatisierung der Messbereichseinstellung	14
3.1.1. Aufgabenstellung	14
3.1.2. Analytische Beschreibung des Variable-Line-Spacing (VLS)	15
3.1.3. Beschreibung des Algorithmus	21
3.1.4. Simulation des Algorithmus	26
3.1.5. Status und Fehlermeldungen	29
3.1.6. Grafische Benutzeroberfläche	30
3.1.7. Ergebnisse	31
3.2. Berechnung der Spektralachse des KALYPSO	34
3.3. Berechnung von statistischen Größen der XUV-Lichtimpulse	38
3.3.1. Intensität	38

3.3.2. Massenschwerpunkt	39
3.3.3. Streuung	39
3.3.4. Schiefe	40
3.3.5. Wölbung	41
3.3.6. Umsetzung in C++ und MATLAB	41
3.4. Benutzeroberfläche zur Steuerung des KALYPSO	41
4. Evaluierung des KALYPSO	44
4.1. Dunkelrauschen	45
4.2. Verstärkung	49
4.3. Räumliche Charakterisierung	50
4.4. Zeitliche Charakterisierung	55
4.4.1. Zeitliche Charakterisierung des Ce:YAG-Kristalls	55
4.4.2. Zeitlicher Verlauf der Intensitätsmessung	56
4.4.3. Bias-Spannung	57
4.4.4. Belichtungszeit	59
4.5. Vergleich mit anderen Detektoren	60
4.5.1. Vergleich mit Spektralmessung	60
4.5.2. Vergleich mit Impulsenergie	60
4.5.3. Vergleich mit Elektronenenergie	61
5. Regelung der Wellenlänge des Freien-Elektronen-Lasers	65
5.1. Systembeschreibung	65
5.1.1. Regelgrößen	65
5.1.2. Stellgrößen	66
5.2. Systemsimulation	68
5.3. Linearisierung	70
5.4. Systementkopplung	72
5.5. Reglerentwurf mit IT1-Regler	74
5.6. Stabilitätsprüfung	77
5.7. Führungsgrößenaufschaltung	77
5.8. Implementierung	79
5.9. Ergebnisse	81
5.9.1. Führungsgrößensprung	81
5.9.2. Störgrößensprung	83
6. Fazit und Ausblick	85
6.1. Fazit	85
6.2. Ausblick	86
Literatur	87

A. Häufig verwendete Funktionen	89
A.1. GetAxisLambda	89
A.2. GetMoments	89

Tabellenverzeichnis

2.1. Parameter des KARlsruhe Linear arraY detector for MHz rePetition-rate SpectrOscopy (KALYPSO)	13
3.1. Gitterkonstanten des VLS	18
3.2. Status des VLS-Move Programms	29
3.3. Fehlermeldungen des VLS-Move Programms	29
4.1. Verhältnisse von zwei Verstärkungen des KALYPSO	49
4.2. Verstärkungen des KALYPSO	50

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Grundaufbau FLASH	4
2.2.	Wellenlänge in Abhängigkeit der Elektronenenergie	6
2.3.	Photonenenergie in Abhängigkeit der Wellenlänge	7
2.4.	Variable-Line-Spacing Spektrometer	8
2.5.	Funktionsprinzip des Blazegitters	9
2.6.	Screenshot des Java DOOCS data display (jddd)-Editors	12
3.1.	VLS Aufsicht mit eingezeichneter Fokalebene	15
3.2.	VLS Seiten- und Aufsicht	17
3.3.	Koordinatensystem des VLS	19
3.4.	Ausfallswinkel und Brennweite für $m = 1$	20
3.5.	Mögliche x- und y-Positionen des KALYPSO für Low energy grating (LEG) und High energy grating (HEG)	21
3.6.	Fehlerwinkel des VLS	22
3.7.	Auswahl des nächsten Motors und dessen Richtung	24
3.8.	Ablaufdiagramm der Messbereichsänderung	25
3.9.	Simulation der Messbereichsänderung mit $\beta_{err_{max}} = 0, 1^\circ$ (Aufsicht)	27
3.10.	Simulation der Messbereichsänderung mit $\beta_{err_{max}} = 0, 1^\circ$ (Motorpositionen)	28
3.11.	Benutzermodus VLS move	30
3.12.	Expertenmodus VLS move	31
3.13.	Reale Messbereichsänderung von 26 nm nach 10 nm	32
3.14.	Messbereichsänderung von 26 nm nach 10 nm	33
3.15.	Messbereichsänderung von 26 nm nach 10 nm in der GUI	34
3.16.	Ausfallswinkel für jedes Pixel	35
3.17.	Spektrale Achsen für verschiedene Messbereiche	36
3.18.	Absolute Länge der Spektralachse $\Delta \lambda$	37
3.19.	Relative Länge der Spektralachse $\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$	38
3.20.	KALYPSO-Graphical user interface (GUI) im Benutzermodus	42
3.21.	KALYPSO-GUI im Expertenmodus	43
4.1.	Messung von 400 Extreme ultraviolet (XUV)-Lichtimpulsen	44
4.2.	Messung von einzelnen XUV-Lichtimpulsen	45
4.3.	Mittelwert von Messungen bei Dunkelheit	46

4.4.	Mittelwert und Standardabweichung des Dunkelrauschens	47
4.5.	Standardabweichung des Dunkelrauschens in Abhängigkeit der Belichtungszeit und der Verstärkung	48
4.6.	Standardabweichung des Dunkelrauschens in Abhängigkeit der Belichtungszeit	49
4.7.	Labora Aufbau für die Analyse des KALYPSO	50
4.8.	Messung von normalverteiltem Licht einer light-emitting diode (LED) an verschiedenen Positionen des KALYPSO	51
4.9.	Messungen von verschiedenen LED-Positionen	52
4.10.	Offset-korrigierte Messungen bei verschiedenen LED-Positionen	53
4.11.	Vergleich der einzelnen Pixelverstärkungen für Verstärkung $Gain_0$	54
4.12.	Skalierte Messungen bei verschiedenen LED-Positionen	54
4.13.	Auswahl skaliertes Messungen bei verschiedenen LED-Positionen	55
4.14.	Impulsantwort des Cerium:Yttrium-Aluminium-Granat (Ce:YAG)-Kristalls	56
4.15.	Intensität über die Zeit bei 200 kHz am Freier-Elektronen-Laser Hamburg (FLASH)	57
4.16.	Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung und des Belichtungszeitpunkts	58
4.17.	Intensität in Abhängigkeit der Belichtungszeit	59
4.18.	Vergleich KALYPSO mit Spektralmessung	60
4.19.	Vergleich KALYPSO mit Gas monitor detector (GMD)-Intensität	61
4.20.	Korrelation von Elektronenenergie und Center of Mass (CoM)	62
4.21.	Mittlere Elektronenenergie über die Zeit im Vergleich mit der Beschleunigungsspannung	63
4.22.	Korrelation der mittleren Elektronenenergie und der Beschleunigungsspannung	64
5.1.	Verlauf der Beschleunigungsspannung	66
5.2.	Systembeschreibung	68
5.3.	K_{Mean} als Funktion der Wellenlängenbereich λ_0	71
5.4.	Linearisierte Systembeschreibung	72
5.5.	Systembeschreibung mit Systementkopplung	73
5.6.	Entkoppelte Systembeschreibung	74
5.7.	Regelungsstruktur eines Teilsystems	75
5.8.	Blockschaltbild mit Führungsgrößenaufschaltung	78
5.9.	Blockschaltbild der Regelung mit den Klassen <i>accFeedback</i> und <i>safeControl</i>	80
5.10.	Screenshot der GUI für die Bedienung der Regler	81
5.11.	Führungsgrößensprung von λ_{inc}	82
5.12.	Störgrößensprung des Wellenlängenversatzes	83
5.13.	Störgrößensprung des Wellenlängenversatzes	84

Nomenklatur

Abkürzungen

ADC	Analog-Digital-Converter
ASIC	Anwendungsspezifische integrierte Schaltung
Ce:YAG	Cerium:Yttrium-Aluminium-Granat
CoM	Center of Mass
DAQ	Data acquisition
DESY	Deutsches Elektronen Synchrotron
DOOCS	Distributed Object-Oriented Control System
FEL	Freie-Elektronen-Laser
FLASH	Freier-Elektronen-Laser Hamburg
FWHM	Full width at half maximum
GMD	Gas monitor detector
GOTTHARD	Gain Optimizing microTrip system with Analog Readout
GUI	Graphical user interface
HEG	High energy grating
ICCD	Intensified charge-coupled device
InGaAs	Indiumgalliumarsenid
jddd	Java DOOCS data display
KALYPSO	KARlsruhe Linear array detector for MHz repetition-rate Spectroscopy
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LED	light-emitting diode

LEG	Low energy grating
RPC	Remote Procedure Call
Si	Silizium
UV	Ultraviolett
XUV	Extreme ultraviolet
VLS	Variable-Line-Spacing
VLSPG	varied line-spacing plane grating
XML	Extensible Markup Language

Lateinische Formelzeichen

A_{Start}	Beschleunigungsspannung vor Beginn eines Lichtimpulszugs
A_{Inc}	Änderung der Beschleunigungsspannung in einem Lichtimpulszug über die Zeit
a_R	Regelungsparameter des PT1-Glieds
a_D	Polstelle der Störübertragungsfunktion
a_2	Steigung der Liniendichte
c_0	Lichtgeschwindigkeit
D	Abstand zwischen Blazegitter und Lichtquelle
d	Abstand zwischen Ce:YAG-Kristall und Blazegitter
e	Elementarladung
E_{ges}	Gesamtenergie des Elektrons
E_{kin}	Kinetische Energie des Elektrons
E_0	Ruheenergie des Elektrons
E_P	Photonenenergie
f	Brennweite
f_{Rep}	Repetitionsrate des FLASH
f_0	Brennweite des Wellenlängenbereichs
h	Plancksches Wirkungsquantum
I	Intensität
K	Undulatorparameter
K_{Mean}	Linearisierter Streckenparameter (mittlere Wellenlänge)
K_I	Regelungsparameter des Integrators
K_{Inc}	Linearisierter Streckenparameter (Wellenlängenversatz)
K_S	Streckenparameter
m	Beugungsordnung
m_E	Masse des Elektrons
N	Anzahl XUV-Lichtimpulse in einem Lichtimpulszug
Q	Ladung
s_x	Position des Motors M_x
s_y	Position des Motors M_y
s_r	Position des Motors M_r
T_D	Zeitkonstante der Störübertragungsfunktion
t_E	Belichtungszeit
T_S	Zykluszeit
U_{Acc}	Beschleunigungsspannung
U_{Acc_k}	Beschleunigungsspannung des Impulses k
$U_{AccMean}$	Mittlere Beschleunigungsspannung
U_{Offset}	Offset der Beschleunigungsspannung der FLASH-Simulation
W	Arbeit

Griechische Formelzeichen

α	Einfallswinkel
β	Ausfallswinkel
β_{error}	Fehlerwinkel zwischen Ausrichtung des KALYPSO und der Richtung des Blazegitters
$\beta_{err_{max}}$	Maximaler Fehlerwinkel
β_0	Austrittswinkel des Wellenlängenbereichs
γ	Lorentzfaktor
δ	Winkel zwischen x-Achse und Position des Ce:YAG-Kristalls
$\Delta\lambda$	Länge der Spektralachse
λ	Wellenlänge des Photons
λ_u	Undulatorperiode
λ_0	Wellenlängenbereich bzw. Zentralwellenlänge
σ	Liniendichte
φ	Winkel zwischen Pixel, Sensormitte und Blazegitter
φ_A	Elektrisches Potential

1. Einleitung

1.1. Motivation

FLASH ist ein Freie-Elektronen-Laser (FEL), der zur Erforschung von physikalischen Grundlagen dient. Beim FEL handelt es sich um einen Laser, der im Gegensatz zu einem klassischen Laser kein aktives Lasermedium besitzt. Mit den von FLASH erzeugten sehr kurzen Lichtimpulsen im zwei- bis dreistelligen Femtosekundenbereich und seinen kurzen Wellenlängen im Bereich zwischen $4,2 \text{ nm}$ und 51 nm wird FLASH als Röntgenmikroskop verwendet [1]. Für die Analyse der zu untersuchenden Materie werden Lichtimpulse mit verschiedenen Wellenlängen und Intensitäten benötigt. Das Verstärkungsprinzip von FLASH führt zu starken Fluktuationen in der zeitlichen und spektralen Struktur der XUV-Impulse. Daher wird eine genaue Messung der einzelnen Lichtimpulse benötigt. FLASH schießt mit einer Frequenz von 10 Hz mit Lichtimpulszügen. Ein Lichtimpulszug enthält eine einstellbare Anzahl von bis zu 800 Lichtimpulsen, welche mit einer Wiederholrate von bis zu 1 MHz emittiert werden.

Für die korrekte Auswertung der Versuche müssen die Lichtimpulse spektral quantifiziert und analysiert werden. Für diese Aufgabe steht das VLS-Spektrometer zur Verfügung. Das VLS-Spektrometer ist ein Sensorsystem, welches den Lichtimpuls mit einem Blazegitter in seine Energieanteile aufspaltet. Das für den Menschen nicht sichtbare XUV-Licht wird anschließend von einem Ce:YAG-Kristall in sichtbares (grünes) Licht gewandelt. Das vom Ce:YAG-Kristall emittierte Licht wird schließlich mit einer Intensified charge-coupled device (ICCD) Kamera aufgenommen und entsprechend ausgewertet. Mit dieser Kamera kann derzeit nur ein Lichtimpuls pro Lichtimpulszug ausgewertet werden. Um alle Lichtimpulse eines Lichtimpulszugs aufzunehmen und auszuwerten wird das VLS um eine Zeilenkamera mit der Bezeichnung KALYPSO erweitert. Der KALYPSO hat eine kontinuierliche Bildaufnahmerate von bis zu $2,7 \text{ MHz}$ und eignet sich daher für die spektrale Analyse aller FLASH-Lichtimpulse.

1.2. Zielsetzung

Je nach Messbereichsvorgabe des Benutzers muss das VLS den Ce:YAG-Kristall mit dem KALYPSO durch drei Motoren an eine entsprechende Position fahren, um die Lichtimpulse in dem vorgegebenen Frequenzbereich im Fokus aufnehmen zu können. Eine simple Vorgabe der Sollpositionen für die Motoren ist dabei für die Automatisierung nicht ausreichend, da die Motoren mechanisch aneinander gekoppelt sind und nur ein Motor gleichzeitig fahren kann. Werden die Motoren in einer falschen Reihenfolge gefahren, so kann dies eine Beschädigung des VLS zur Folge haben. In dieser Arbeit wird ein Algorithmus entwickelt und realisiert, der das VLS per Knopfdruck in seinen vorgegeben Messbereich fährt. Für den vorgegebenen Messbereich ist ebenfalls die Spektralachse des KALYPSO an seiner Position zu ermitteln. Daraus sollen wiederum weitere Kenngrößen wie die mittlere Wellenlänge oder die Bandbreite der XUV-Impulse berechnet werden.

Darüber hinaus ist die Evaluierung des KALYPSO-Detektors für seinen Einsatz im VLS vorzunehmen. Dafür werden verschiedene Versuche durchgeführt und ausgewertet, sodass der KALYPSO mit seinen Besonderheiten beschrieben werden kann. Insbesondere stehen hierbei die Analyse verschiedener Parameter wie der Verstärkung und der Belichtungszeit im Fokus.

Des Weiteren soll der KALYPSO für die Regelung der Wellenlänge bei FLASH eingesetzt werden. Dafür muss zunächst eine Systembeschreibung von FLASH durchgeführt werden. Aus der Systembeschreibung wird schließlich eine Regelung entwickelt, die einerseits die mittlere Wellenlänge eines Impulszuges und andererseits den Frequenzversatz innerhalb eines Impulszuges regelt. Unter dem Frequenzversatz ist in diesem Fall die Verschiebung der mittleren Wellenlänge vom ersten bis zum letzten Lichtimpuls in einem Lichtimpulszug zu verstehen. Ein Frequenzversatz in einem Lichtimpulszug hat den Vorteil, dass das zu untersuchende Medium mit einer breiten Frequenzverteilung durchleuchtet wird.

Um die Regelung zu implementieren und zu testen wird eine vereinfachte Simulation von FLASH samt der Messeinrichtung erstellt. Die Ergebnisse der Regelung von FLASH werden mit den Ergebnissen der Simulation verglichen und gegenübergestellt.

1.3. Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden die für diese Arbeit benötigten Grundlagen erläutert. Dazu gehört in erster Linie eine Erläuterung des FEL, des Sensorsystems VLS und das DESY-eigene Steuer- und Kontrollsystem DOOCS.

Im dritten Kapitel wird die Automatisierung des VLS beschrieben. Dazu gehört unter anderem die Fahrt des KALYPSO in den vorgegebenen Messbereich. Weitere Punkte sind die qualitative Aufbereitung der Daten des KALYPSO. Unter anderem wird dabei jedem Pixel eine Wellenlänge zugeordnet.

Das vierte Kapitel beschreibt die Evaluierung der Zeilenkamera KALYPSO. Der KALYPSO wird dabei in verschiedenen Laboraufbauten und am FLASH getestet.

Im fünften Kapitel wird schließlich die Regelung der emittierten Wellenlänge des FLASH beschrieben. Dabei wird neben der Wellenlänge auch der Wellenlängenversatz in einem Impulszug beschrieben.

Schließlich wird im Kapitel sechs die Arbeit zusammengefasst.

2. Grundlagen und Stand der Technik

2.1. DESY

Das Deutsche Elektronen Synchrotron DESY ist ein Forschungszentrum mit Hauptsitz in Hamburg und Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft. Mit den drei Forschungsschwerpunkten Teilchenbeschleuniger, Teilchenphysik und Forschung mit Photonen wird bei DESY naturwissenschaftliche Grundlagenforschung betrieben. DESY wurde am 18. Dezember 1959 in Hamburg gegründet [6].

2.2. Freier-Elektronen-Laser

Ein FEL ist ein Laser, bei dem das Laserlicht durch Abstrahlung von Elektronenpaketen in magnetischen Strukturen erzeugt wird. Die wesentlichen Bestandteile eines FEL sind die Elektronenquelle, die Beschleunigermodule und die Undulatoren. In Abbildung 2.1 ist der Aufbau von FLASH in Hamburg dargestellt.

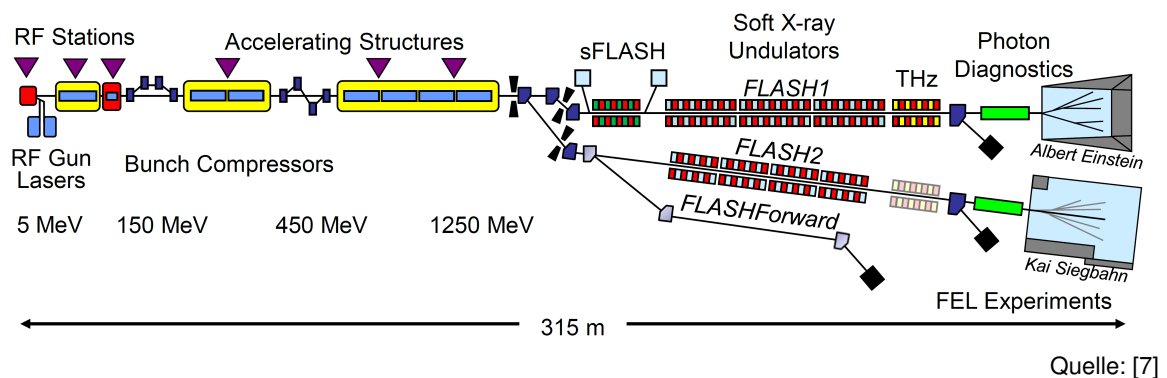


Abbildung 2.1.: Grundaufbau FLASH

Bei der Bestrahlung einer Photokathode mit UV-Licht werden Elektronen von der Kathode gelöst und anschließend beschleunigt. Im sogenannten Bunch Compressor werden die

Elektronenpakete dichter zusammengepresst um zeitlich kürzere Impulse zu erzeugen. In den Beschleunigermodulen werden die Elektronen durch das Anlegen eines hochfrequenten elektrischen Feldes (1,3 GHz) weiter beschleunigt. Der Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie und dem elektrischen Potential ist in Gleichung 2.1 gegeben [9, S. 434].

$$\varphi_A = \frac{W}{Q} \quad (2.1)$$

Dabei ist φ_A das elektrische Potenzial, W die Arbeit und Q die Ladung. Die Arbeit W entspricht in diesem Fall der kinetischen Energie, die Ladung Q entspricht der Ladung eines Elektrons e und das elektrische Potenzial φ_A der Beschleunigungsspannung U_{Acc} . Die Gleichung kann nach der kinetischen Energie umgestellt werden und ergibt dann die Gleichung 2.2. Die Ladung eines Elektrons e entspricht der elektrischen Elementarladung mit $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ [9, S. 417].

$$E_{kin} = e \cdot U_{Acc} \quad (2.2)$$

Mit der Ruheenergie eines Elektrons E_0 ergibt sich die Gesamtenergie des Elektrons in Gleichung 2.3 und der Lorentzfaktor γ in Gleichung 2.4.

$$E_{ges} = E_{kin} + E_0 \quad (2.3)$$

$$\gamma = \frac{E_{kin}}{E_0} + 1 \quad (2.4)$$

Die Ruheenergie ergibt sich aus der Einstein'schen Gleichung in Gleichung 2.5 [9, S. 537]. Dabei ist E_0 die Ruheenergie des Elektrons, $c_0 = 299792458 \frac{m}{s}$ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und $m_E = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ die Masse des Elektrons [9, S. 518]. Die Ruheenergie eines Elektrons beträgt somit $E_0 \approx 0,511 \text{ MeV}$.

$$E_0 = m_E \cdot c_0^2 \quad (2.5)$$

Durch die Beschleunigermodule des FLASH1 beschleunigen die Elektronen auf insgesamt ca. 350 MeV bis 1250 MeV. Die Elektronen erreichen danach die Undulatoren und werden dort senkrecht zur Bewegungsrichtung abgelenkt. Durch das Ablenken der Elektronen entsteht Synchrotronstrahlung, die mit dem Elektronenpaket wechselwirkt und schließlich zu laserartiger Strahlung führt. Das Laserlicht hat dabei eine Wellenlänge zwischen 4,2 nm und 51 nm [8]. Die Wellenlänge des Laserlichts λ ist von dem Undulatorparameter K , der Undulatorperiode λ_u und dem Lorentzfaktor abhängig (Gleichung 2.6) [5, S. 44]. Bei FLASH1

beträgt der Undulatorparameter $K = 1,17$ und die Undulatorperiode $\lambda_u = 23,7 \text{ mm}$ [11]. Die Photonenenergie E_P ergibt sich aus der Wellenlänge in Gleichung 2.7. Dabei ist $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ das Plancksche Wirkungsquantum und c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. In Abbildung 2.2 ist die Wellenlänge in Abhängigkeit der Elektronenenergie bei FLASH1 und in Abbildung 2.3 ist allgemein der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Energie eines Photons abgebildet.

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2 \cdot \gamma^2} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$E_P = \frac{h \cdot c_0}{\lambda} \quad (2.7)$$

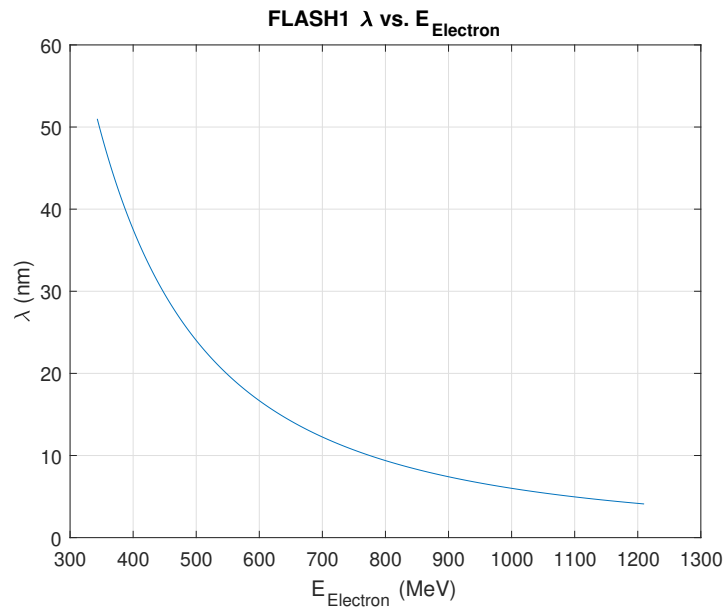


Abbildung 2.2.: Wellenlänge in Abhängigkeit der Elektronenenergie

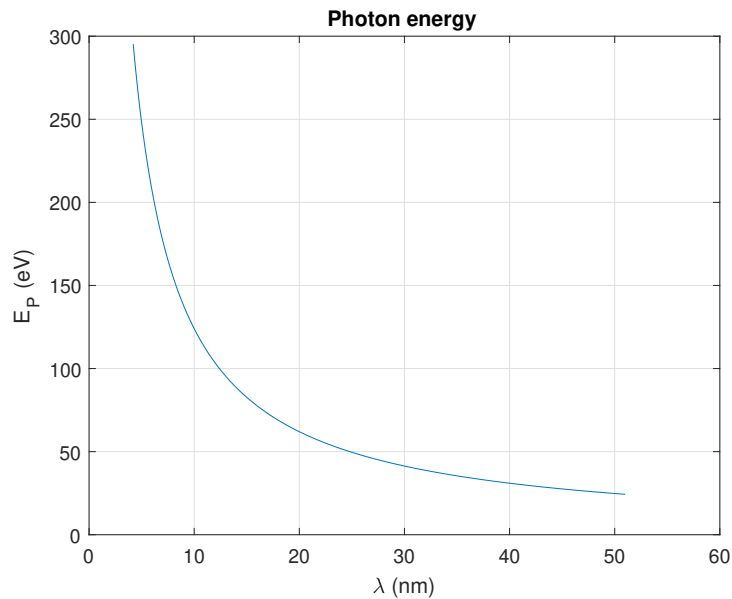
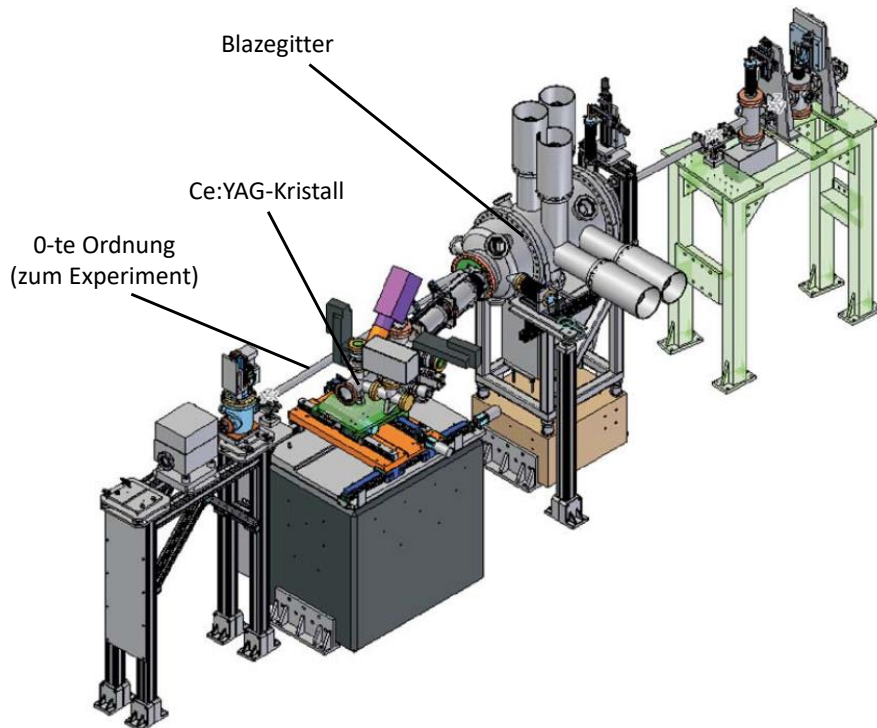


Abbildung 2.3.: Photonenenergie in Abhängigkeit der Wellenlänge

2.3. Variable Line Spacing Spektrometer

Das VLS-Spektrometer ist ein Sensorsystem zur Messung des Frequenzspektrums von XUV-Licht. Das VLS wurde bei DESY entwickelt [3]. Eine Zeichnung des VLS ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Kernkomponente des VLS ist ein optisches Gitter (Englisch: grating). Die im VLS eingesetzten Blazegitter haben eine variable Liniendichte. Daher stammt auch die Bezeichnung des Sensorsystems selbst. Eine variable Liniendichte bedeutet in diesem Fall, dass die Liniendichte entlang des Gitters keine konstanten Abstände, sondern nach komplexen Formeln berechnete unterschiedliche Abstände besitzt. Die variablen Abstände der Gitter führen zu einer Fokussierung der einzelnen Wellenlängen im gebeugten Strahl. Der Hauptteil des eintreffenden Lichtstrahls wird wie bei einem Spiegel von dem eingesetzten Blazegitter im gleichen Austrittswinkel wie dem Eintrittswinkel reflektiert und gelangt dann zum Experiment. Ein kleiner Teil des Lichtstrahls wird spektral aufgespaltet und in einem anderen Austrittswinkel reflektiert. Dieser Austrittswinkel ist abhängig von dem verwendeten Blazegitter und der Frequenz des eintreffenden XUV-Lichts.



Quelle: [4]

Abbildung 2.4.: Variable-Line-Spacing Spektrometer

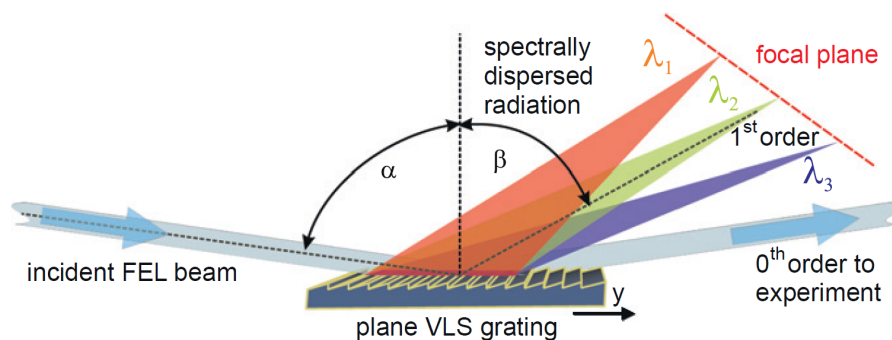
Beim VLS kann entweder ein Spiegel oder eins von drei Blazegittern ausgewählt werden. Diese werden dann mit Motoren an die Position des Lichtstrahls gefahren. Die XUV-Strahlung ist schwer direkt detektierbar. Daher wird ein Ce:YAG-Kristall verwendet. Dieser wandelt das nicht sichtbare XUV-Licht in sichtbares (grünes) Licht. Der Kristall wird von der bestrahlten Seite von einer ICCD-Kamera gefilmt. Mit dieser Kamera kann pro Lichtimpulszug ein Lichtimpuls ausgewertet werden. Ein Lichtimpulszug hat eine Wiederholrate von 10 Hz . Als Neuerung des VLS wird auf der anderen Seite des Ce:YAG Kristall eine Zeilenkamera verbaut. Diese Kamera mit dem Namen KALYPSO hat eine Bildrate von bis zu $2,7 \text{ MHz}$. Damit ist es möglich, das Energie- und Frequenzspektrum jedes einzelnen Lichtimpulses aufzunehmen und auszuwerten.

2.3.1. Blazegitter

Das Blazegitter ist die Kernkomponente des VLS. Ein Blazegitter ist ein Spiegel, auf dem in sehr kleinen Abständen (beim VLS je nach Gitter etwa ein bis drei μm) Gitterlinien eingeritzt

wurden. Dadurch wird eintreffendes Licht einerseits wie bei einem Spiegel normal reflektiert, andererseits durch die feinen Strukturen aber auch gebeugt, wodurch es abhängig von der Frequenz in verschiedenen Winkeln aus dem Gitter wieder austritt. Dieser Effekt ist von CDs und DVDs bekannt, die gegen weißes Licht gehalten werden.

Das Funktionsprinzip eines VLS-Gitters ist in Abbildung 2.5 abgebildet. Das auf das Gitter treffende Licht wird in verschiedenen Winkeln reflektiert. Der wesentliche Anteil des Lichts wird wie bei einem Spiegel im gleichen Austrittswinkel wie dem Eintrittswinkel reflektiert. Dieser Lichtstrahl stellt die Beugungsordnung null dar. Ein kleiner Teil des Lichts wird jedoch auch in anderen Beugungsordnungen reflektiert. Dadurch spreizt sich das Licht abhängig von seiner Frequenz in verschiedene Richtungen auf. Das aufgespreizte Licht kann dann zur spektralen Analyse des Lichtstrahls verwendet werden. Mit der variablen Liniendichte wird erreicht, dass das reflektierte Licht fokussiert auf die Detektoreinheit trifft eintrifft.



Quelle: [3]

Abbildung 2.5.: Funktionsprinzip des Blazegitters

Bei FLASH trifft der Photonenstrahl in einem festen Einfallswinkel von $\alpha = 88^\circ$ auf das Gitter. In einem Ausfallswinkel von $\beta = 88^\circ$ wird der überwiegende Teil des Photonenstrahls mit seinem kompletten Spektrum reflektiert und gelangt von dort aus zum Experiment.

Bei den im VLS eingesetzten Blazegittern handelt es sich um varied line-spacing plane gratings (VLSPG). Das bedeutet, dass die Blazegitter keine konstante Liniendichte haben, sondern diese entlang der Position variabel ist. Die Liniendichte beim VLSPG ist in Gleichung 2.8 als Polynom entlang der Länge des Gitters gegeben [12].

$$k(w) = k_0 + a_2 \cdot w + a_3 \cdot w^2 + a_4 \cdot w^3 + \dots \quad (2.8)$$

Dabei ist w die Position auf dem Gitter mit $w = 0$ der Mittelpunkt des Gitters. (w ist in Richtung des einfallenden Lichtstrahls negativ und in Richtung des reflektierten Lichtes positiv). Der Parameter k_0 gibt die Liniendichte im Mittelpunkt des Gitters an. Die Parameter a_i geben

die weiteren Koeffizienten des Polynoms an. Die für diese Arbeit relevanten Parameter sind die Parameter k_0 und a_2 . Der Parameter k_0 wird in der Literatur auch als σ bezeichnet. Im Folgenden wird ebenfalls die Liniendichte in der Mitte des Gitters als σ bezeichnet. Für die Arbeit sind die nachfolgenden zwei Gleichungen 2.9 und 2.10 relevant [12] [3].

$$0 = -\sigma \cdot m \cdot \lambda + \sin(\alpha) - \sin(\beta) \quad (2.9)$$

$$0 = \frac{\cos^2(\alpha)}{D} + \frac{\cos^2(\beta)}{f} - a_2 \cdot m \cdot \lambda \quad (2.10)$$

Dabei ist α der Einfallswinkel, m die Beugungsordnung, λ die Wellenlänge des eintreffenden Lichts, σ die Liniendichte in der Mitte des Gitters, a_2 die Steigung der Liniendichte (vgl. Gleichung 2.8) über die Position, β der Ausfallswinkel, D der Abstand zwischen dem Gitter und dem letzten Undulator und f die Brennweite. Gleichung 2.9 wird für die Berechnung des Ausfallswinkels und Gleichung 2.10 für die Berechnung der Brennweite benötigt.

2.3.2. Cerium:Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall

Ein Ce:YAG-Kristall ist ein Cerium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall. Er zieht die sehr kurzen Lichtimpulse wesentlich in die Länge und wandelt die XUV-Strahlung in sichtbares grünes Licht. Der Ce:YAG Kristall befindet sich im Abstand der Brennweite f und in einem Austrittswinkel β von dem Blazegitter entfernt. In Abhängigkeit der Frequenz trifft die vom Gitter aufgespreizte XUV-Strahlung auf unterschiedliche Positionen des Ce:YAG-Kristalls, wodurch dieser an den bestrahlten Stellen zum Leuchten gebracht wird. Die bestrahlte Seite des Ce:YAG-Kristalls wird von einer ICCD-Kamera gefilmt. Da diese Kamera wesentlich langsamer ist als die von FLASH emittierten Lichtimpulse, wird mit dieser Kamera nur ein Lichtimpuls pro Impulszug aufgenommen. Auf der anderen Seite des Ce:YAG-Kristalls befindet sich der Zeilendetektor KALYPSO. Der KALYPSO wird im nachfolgend vorgestellt.

2.3.3. KALYPSO Zeilendetektor

Der KALYPSO ist ein Zeilendetektor mit einer kontinuierlichen Bildaufnahme von bis zu $2,7 \text{ MHz}$, einer Tiefenauflösung von 14 Bit und einer Bildauflösung von 256 Pixeln. Der Bildsensor hat eine Pixelgröße von $50 \mu\text{m}$. Der KALYPSO ist ein Produkt, das in Kooperation von DESY und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entstanden ist [13].

Der KALYPSO wird durch zwei verschiedene Signale getriggert: Der eine Trigger signalisiert dem KALYPSO den Start eines Lichtimpulszugs. Mit diesem Signal startet er eine parametrierbare Anzahl an Messungen. Mit dem zweiten Trigger wird die Aufnahme der einzelnen Zeilenbilder getriggert. An FLASH hat der erstgenannte Trigger eine Frequenz von 10 Hz und der zweitgenannte eine Frequenz von 1 MHz.

Der KALYPSO ist in zwei verschiedenen Varianten verfügbar: Er kann entweder mit Silizium (Si)-Photodioden oder mit Indiumgalliumarsenid (InGaAs)-Photodioden bestückt sein. Mit den Si-Photodioden kann der KALYPSO sichtbares Licht aufnehmen und ist mit dem Ce:YAG-Kristall somit für das VLS-Spektrometer geeignet. Die InGaAs-Photodioden haben bei Infrarotlicht eine hohe Quanteneffizienz. Der KALYPSO mit InGaAs-Photodioden eignet sich daher gut für die Aufnahme von infrarotem Licht. Bei der Evaluierung des KALYPSO wird das Hauptaugenmerk auf den KALYPSO mit Si-Dioden gesetzt.

Der KALYPSO verwendet zwei Gain Optimizing microSTrip system with Analog ReadOut (GOTTHARD)-ASICs für die rauscharme Signalaufbereitung von jeweils 128 Photodioden. Die GOTTHARD-Chips laden mit dem Photostrom jeder Photodiode jeweils einen Kondensator auf. Die geladene Spannung der Kondensatoren wird anschließend von 16 Multiplexern mit jeweils 16 Eingängen an 16 Analog-Digital-Converter (ADC) weitergeleitet. Der KALYPSO verfügt über verschiedene Parameter, die in der Tabelle 2.1 beschrieben werden.

2.4. DOOCS

Das Distributed Object-Oriented Control System (DOOCS) ist ein DESY-eigenes objektorientiertes Kontrollsystem, welches in C++ programmiert ist. Mit verschiedenen Bibliotheken kann damit die Hardware bei DESY angesteuert werden. Für jedes Hardware Device wird eine Klasse erstellt, die dann beliebig oft instanziiert werden kann. DOOCS ist ein Client-Server-System, für das Serverprogramme und Clientprogramme erstellt werden können. Die Server steuern dabei die Hardware und werden in C++ programmiert. Die Clients übernehmen die Funktion der Benutzerschnittstelle und können zum Beispiel in Java programmiert werden. Die Kommunikation zwischen Server und Client findet über Remote Procedure Call (RPC) statt. Ein Clientprogramm ist zum Beispiel das jddd welches nachfolgend vorgestellt wird. DOOCS-Variablen werden bei (größeren) Änderungen automatisch protokolliert und können für einen gewissen Zeitraum zurückverfolgt werden [14].

2.5. jddd

jddd ist ein DOOCS-Client und dient als GUI. Mit dem jddd-Editor können GUI's programmiert werden. Diese werden in Form von Extensible Markup Language (XML)-Dateien gespeichert und können dann mit jddd geöffnet werden. Mit dem jddd-Editor können typische Steuerelemente wie Buttons, Textfelder, Combo- und Checkboxes usw. genutzt werden. Ein Screenshot des jddd-Editors ist in Abbildung 2.6 gegeben.

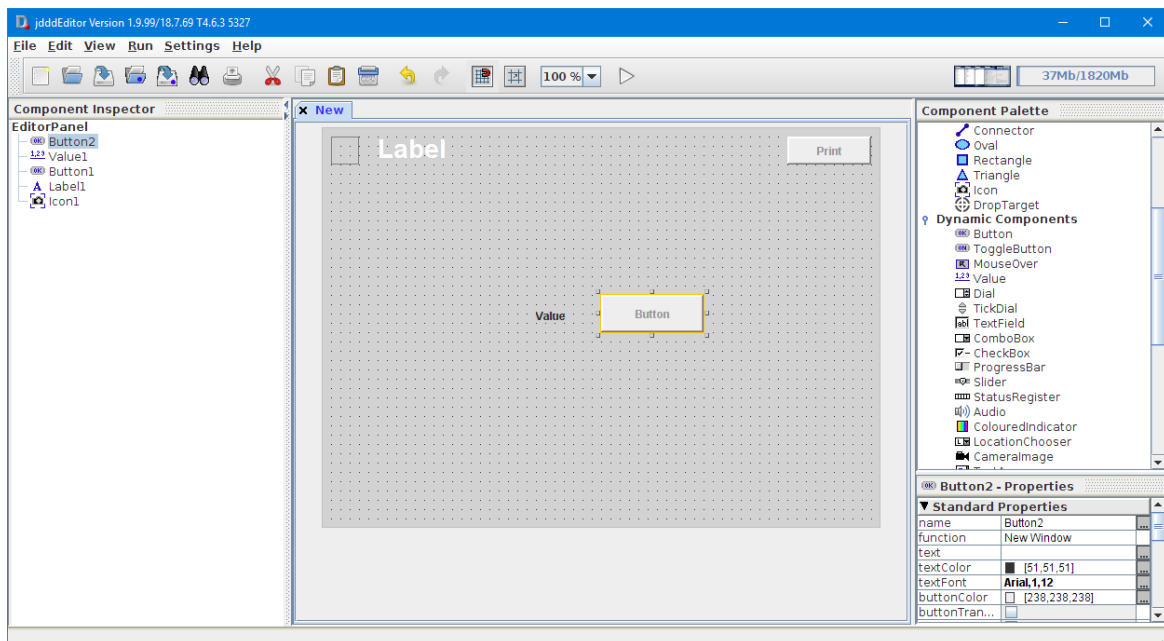


Abbildung 2.6.: Screenshot des jddd-Editors

2.6. DAQ

Das Data acquisition (DAQ) ist ein Datenerfassungssystem. Mit dem DAQ können DOOCS-Variablen synchron mit den Lichtimpulszügen gespeichert werden. Dadurch kann nachträglich eine Analyse der Daten stattfinden. Die Daten können nachträglich aus dem DAQ extrahiert und im HDF5-Format gespeichert werden.

Tabelle 2.1.: Parameter des KALYPSO

Parameter	Wertebereich	Beschreibung
Gain	0 ... 3	Gibt Indizes an, die das Signal innerhalb des KALYPSO verstärken. Ein kleiner Index steht dabei für eine große Verstärkung. Die Verstärkungen werden im Kapitel 4 gemessen.
Lines	0 ... 10000	Gibt die Anzahl der aufzunehmenden Bilder pro Lichtimpulszug an.
Exposure	0 ... 15	Index der Belichtungszeit des KALYPSO. Die Belichtungszeit ergibt sich aus $t_E = \frac{Exposure+1}{54 \text{ MHz}} = (Exposure+1) \cdot 18,52 \text{ ns}$
Ext. trigger	0 / 1	Durch diesen Parameter wird die Triggerquelle ausgewählt. Ist die Option ausgeschaltet, so verwendet der KALYPSO ein eigenes internes Triggersignal. Für eine Synchronisation mit FLASH muss die Option eingeschaltet sein, damit der KALYPSO von FLASH getriggert wird.
Pattern	None / Const / Altern / Random	Für erste Tests während der Inbetriebnahme kann der KALYPSO mit diesem Parameter getestet werden. <i>None</i> ist der normale Modus, in dem der KALYPSO die gemessenen Daten sendet. Die Einstellung <i>Const</i> simuliert ein konstantes Signal. <i>Altern</i> simuliert ein hin- und herspringendes (alternierendes) Signal. <i>Random</i> simuliert ein reales Spektrum. Dieses Signal ist nicht, wie der Name andeutet, tatsächlich zufällig.
Delay	0 ... 31	Delay gibt den Zeitpunkt an, bei dem die Multiplexer und ADC die geladenen Kondensatoren einer Messung auslesen. Der optimale Wert für Delay ist 16. Damit beginnt die Datenverarbeitung der Multiplexer und ADCs kurz nachdem die Kondensatoren der GOTTHARD-Chips geladen wurden.
Phase	0 ... 65535	Mit dem Phase-Parameter wird der Zeitpunkt der Analog-Digital-Konvertierung mit der Datenaufnahme des FPGA synchronisiert. Ein guter Wert liegt zwischen 270 und 300.
HV	0 ... 90	HV entspricht der an den Photodioden in Sperrrichtung angelegten Spannung. Diese Spannung wird auch als Bias-Spannung bezeichnet. Der Parameter HV gibt die Bias-Spannung für den KALYPSO mit Si-Photodioden an.
LV	0 ... 3	LV entspricht wie HV der Bias-Spannung der Photodioden. LV gibt die Bias-Spannung für den KALYPSO mit InGaAs-Photodioden an.

3. Automatisierung des Variable-Line-Spacing Spektrometers

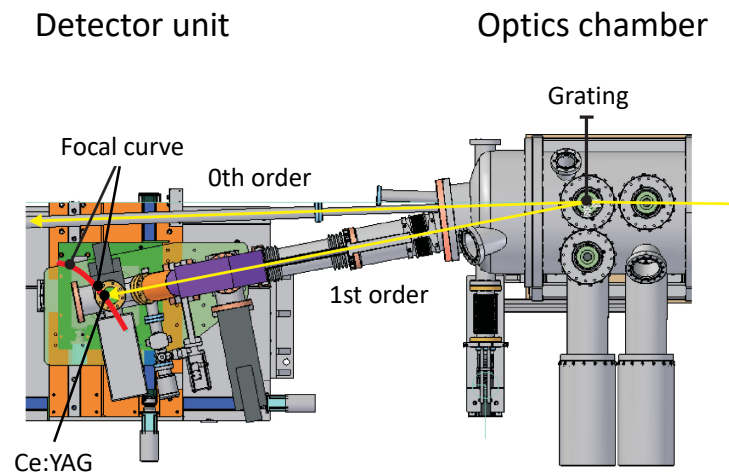
In diesem Kapitel wird die Automatisierung des VLS beschrieben. Zunächst wird ein Algorithmus entwickelt, der das VLS automatisch in eine vorgegebene Messbereichsposition fährt. Anschließend wird für den Messbereich jedem Pixel des KALYPSO seine entsprechende Wellenlänge berechnet und zugeordnet. Schließlich werden für die XUV-Lichtimpulse statistische Größen wie der Massenschwerpunkt und die mathematischen Momente berechnet.

3.1. Automatisierung der Messbereichseinstellung

3.1.1. Aufgabenstellung

Entsprechend den Gleichungen 2.9 und 2.10 muss der KALYPSO zusammen mit dem Ce:YAG-Kristall für eine vorgegebene Wellenlänge eine genau definierte Position einnehmen, damit die vorgegebene Wellenlänge die Mitte des Bildsensors des KALYPSO trifft. Der Messbereich wird als Wellenlänge λ_0 vorgegeben, welche in der Mitte des Bildsensors eintreffen soll.

In Abbildung 3.1 ist die vom VLS anzufahrende Fokalebene in der Detektoreinheit eingezeichnet. Diese gibt die Positionen an, zu denen der Ce:YAG-Kristall in Abhängigkeit des vorgegebenen Messbereichs gefahren werden muss.



Quelle: [4]

Abbildung 3.1.: VLS Aufsicht mit eingezeichneter Fokalebene

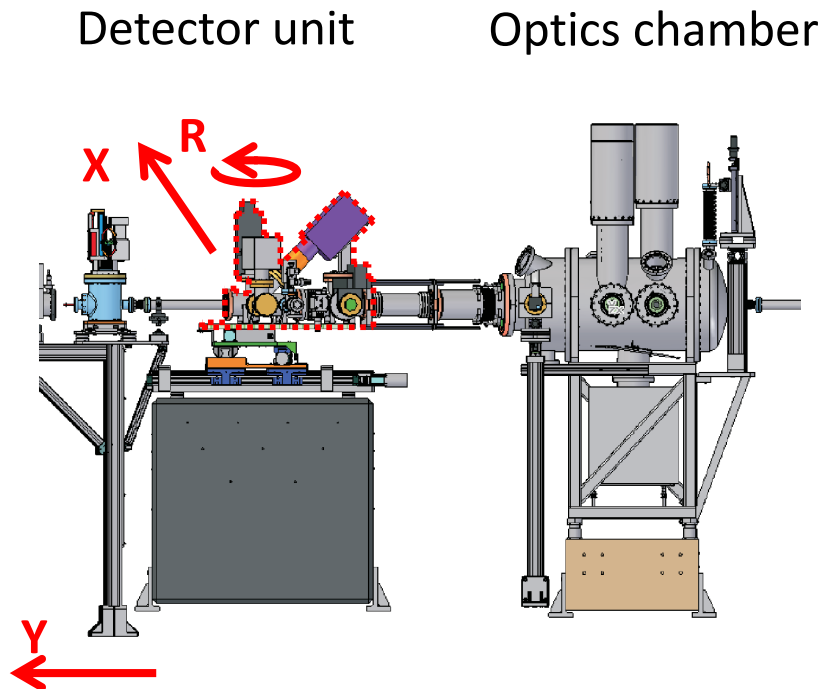
3.1.2. Analytische Beschreibung des VLS

In Abbildung 3.2a ist das VLS als Seitenansicht und in Abbildung 3.2b als Aufsicht dargestellt. Die Detektoreinheit auf der linken Seite der Abbildungen besteht aus einem fest mit dem Boden verbundenen Granitblock. Auf dem Granitblock befindet sich eine Metallplatte, die mit zwei Motoren in x- und y-Richtung verschoben werden kann (vgl. Koordinatensystem in den beiden Abbildungen). Mit einem weiteren Motor ist es möglich, die gesamte Metallplatte zu drehen. Der vom Motor M_r rotierbare Teil der Detektoreinheit ist in den Abbildungen rot gestrichelt umrandet.

Auf der Metallplatte befindet sich der Ce:YAG-Kristall, die ICCD-Kamera und der KALYPSO (der KALYPSO ist in diesen Abbildungen nicht eingezeichnet). Die Drehachse der Messvorrichtung verläuft durch den Ce:YAG-Kristall. Die Position des Ce:YAG-Kristalls entspricht der Position der Motoren M_x und M_y und wird als Punkt $(s_x|s_y)$ definiert. Bei den Motoren handelt es sich um 2-Phasen-Schrittmotoren, die die Metallplatte über Getriebe verschieben, bzw. drehen können. Den Schrittmotoren können Sollwerte vorgegeben werden, die dann automatisch angefahren werden. Durch das große Gewicht der Detektoreinheit ist die Geschwindigkeit in x- und y-Richtung auf ca. $20 \frac{mm}{min}$ beschränkt. Der Drehmotor M_r erreicht eine neue Sollposition hingegen teilweise in unter einer Sekunde. Dies liegt auch daran, dass eine Drehung immer nur in sehr kleinen Schritten von weniger als einem Grad erfolgt.

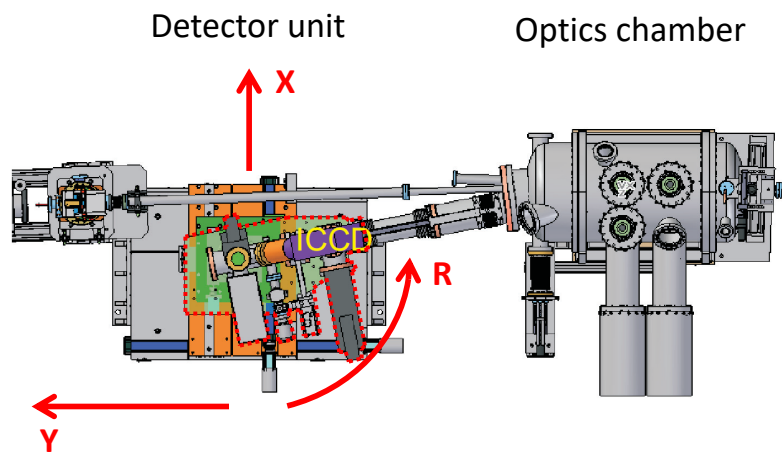
Die Motoren M_x und M_y sind so justiert, dass die Position $(s_x|s_y)$ der Position des Ce:YAG-Kristalls entspricht.

Der Ce:YAG-Kristall befindet sich so wie der gesamte XUV-Strahl im Vakuum. Da der Ausfallswinkel des vom Gitter reflektierten XUV-Lichtes frequenzabhängig ist, muss die Strahlführung zwischen der optischen Kammer und der Detektoreinheit für verschiedene Messbereiche variabel sein. Daher sind in der Strahlführung zwischen dem Gitter und dem Kristall zwei Bälge verbaut. Somit ist es möglich, die Detektoreinheit entlang der Fokalebene zu fahren. Die beiden Bälge sind mechanisch sehr empfindlich und dürfen jeweils nur leicht gebogen werden.



Quelle: [4]

(a) VLS Seitenansicht



Quelle: [4]

(b) VLS Aufsicht

Abbildung 3.2.: VLS Seiten- und Aufsicht

Die Ansterelektronik der Motoren kann nur einen der drei Motoren M_x , M_y oder M_r gleichzeitig fahren. Daraus folgt, dass während der Fahrt in einen anderen Messbereich der KALYPSO nicht immer in Richtung des Gitters ausgerichtet sein kann. Das führt zu Spannungen in der Strahlführung, sodass die beiden Bälge zwischen der optischen Kammer und der Detektoreinheit gebogen werden. Die Detektoreinheit muss so gefahren werden, dass die Biegung in den beiden Bälgen unterhalb von einem vorgegebenen Limit bleibt.

Die beiden Gleichungen 2.9 und 2.10 können nach dem Austrittswinkel β und der Brennweite f umgestellt werden. Aus diesen lassen sich die Sollpositionen für die Motoren berechnen. (Gleichung 3.1 und 3.2)

$$\beta(\lambda) = \arcsin(\sin(\alpha) - m \cdot \lambda \cdot \sigma) \quad (3.1)$$

$$f(\lambda) = \frac{D \cdot \cos^2(\beta(\lambda))}{\cos^2(\alpha) - D \cdot m \cdot a_2 \cdot \lambda} \quad (3.2)$$

Für das VLS steht ein Low energy grating (LEG) und zwei High energy grating (HEG) zur Verfügung, welche je nach genutztem Wellenlängenbereich ausgewählt werden können. Diese haben die Eigenschaften in Tabelle 3.1 [3].

Tabelle 3.1.: Gitterkonstanten des VLS

	LEG	HEG
λ (nm)	20...60	6...20
σ ($\frac{1}{mm}$)	300	900
a_2 ($\frac{1}{mm^2}$)	0,3342	1,0026

Die Position des Gitters ist im Koordinatenursprung definiert und entlang der y-Achse ausgerichtet (Abbildung 3.3). Die Quelle des XUV-Lichtes kommt aus dem dritten Quadranten und trifft das Gitter im Koordinatenursprung. Von dort aus reflektiert es in den zweiten Quadranten. Dort befindet sich der KALYPSO.

Durch Vorgabe einer Sollposition kann der KALYPSO vom Motor M_x an die Position $x = s_x$ und vom Motor M_y an die Position $y = s_y$ gefahren werden. Der Motor M_r kann den KALYPSO im mathematischen Drehsinn drehen. Eine Ausrichtung entlang der negativen x-Achse ist als Position $s_r = 0^\circ$ definiert. Die Positionen s_x und s_y sind jeweils in mm angegeben, die Position s_r des Motors M_r ist in Grad angegeben.

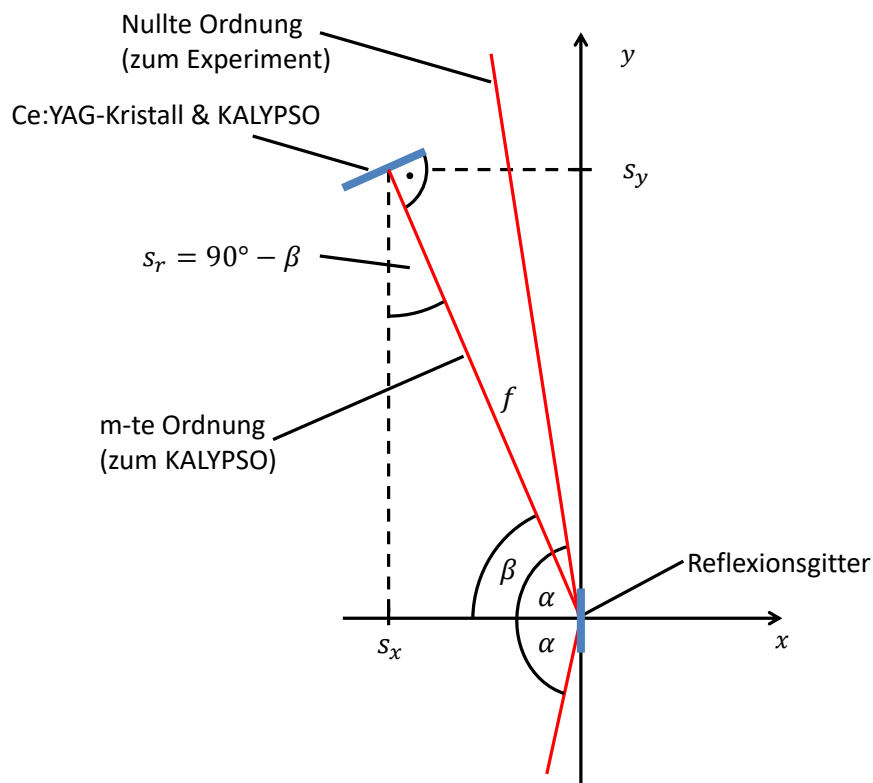
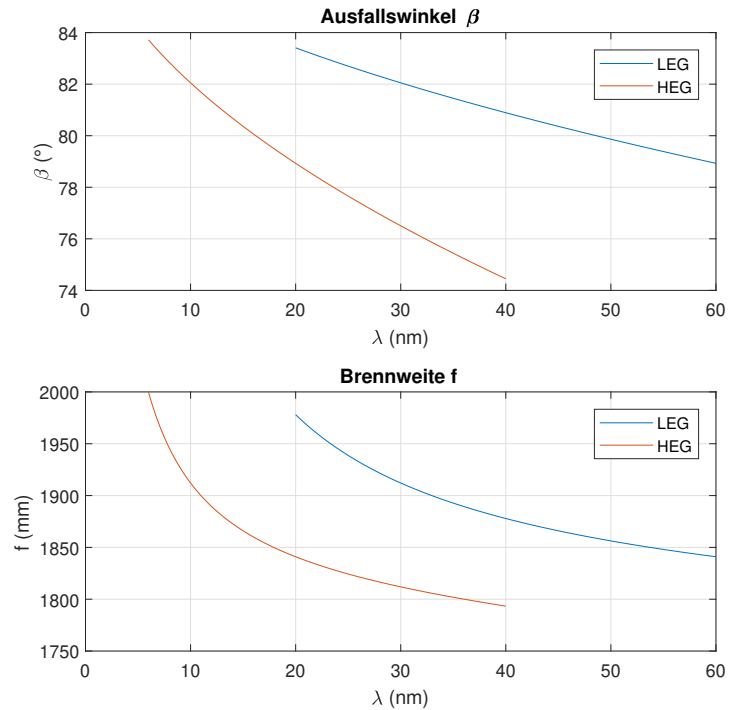


Abbildung 3.3.: Koordinatensystem des VLS

Bei FLASH beträgt der Abstand von der Lichtquelle (Ende der Undulatorstrecke) zum VLS $D = 52 \text{ m}$. Der Einfallswinkel auf das Gitter beträgt $\alpha = 88^\circ$. Mit dem LEG und HEG lassen sich nach den Gleichungen 3.1 und 3.2 damit Ausfallswinkel zwischen $78,9^\circ$ und $83,4^\circ$ und Brennweiten zwischen $1,79 \text{ m}$ und 2 m erreichen.

In Abbildung 3.4 ist jeweils für das LEG und das HEG der Ausfallswinkel β und die Brennweite f in Abhängigkeit der Wellenlänge λ für eine Beugungsordnung $m = 1$ dargestellt.

Abbildung 3.4.: Ausfallswinkel und Brennweite für $m = 1$

Die Sollpositionen s_x und s_y lassen sich mit trigonometrischen Funktionen berechnen. Daraus ergeben sich für die beiden Gitter die Motorpositionen in Abbildung 3.5.

$$s_x = -f(\lambda) \cdot \cos(\beta(\lambda)) \quad (3.3)$$

$$s_y = f(\lambda) \cdot \sin(\beta(\lambda)) \quad (3.4)$$

$$s_r = 90^\circ - \beta(\lambda) \quad (3.5)$$

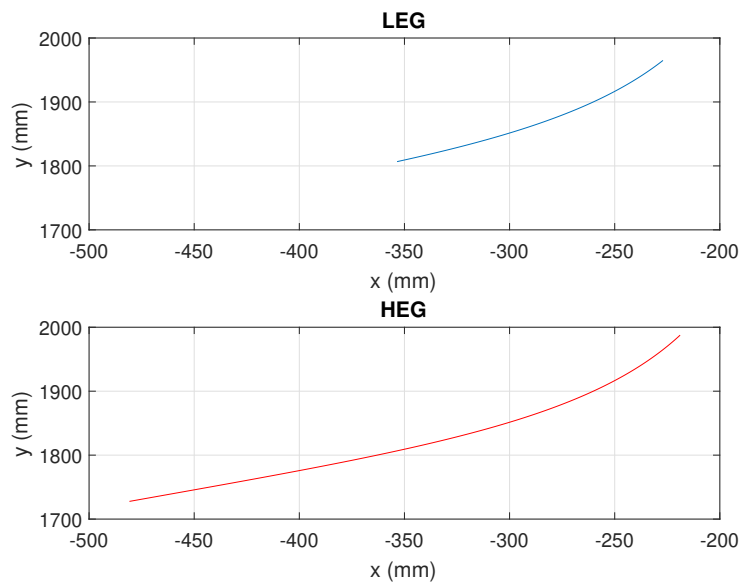


Abbildung 3.5.: Mögliche x- und y-Positionen des KALYPSO für LEG und HEG

3.1.3. Beschreibung des Algorithmus

Da der Wechsel zwischen zwei Motoren Zeit kostet (insbesondere wegen der Beschleunigung und dem Bremsvorgang), macht es Sinn jeden Motor so weit wie möglich fahren zu lassen, ohne dabei die Bälge des VLS in eine zu große Spannung zu versetzen. Dafür wird ein maximaler absoluter Fehlerwinkel $\beta_{err_{max}}$ definiert. Bekommt ein Motor einen Sollwert, so fährt er so weit, bis der maximale absolute Fehlerwinkel erreicht ist. Danach wird die dadurch entstandene Spannung von dem Motor M_r wieder entspannt und so weit gefahren, bis der Fehlerwinkel mit negativem Vorzeichen wieder erreicht ist. Danach kann wieder ein Motor M_x oder M_y so weit fahren, bis wieder der maximale absolute Fehlerwinkel erreicht ist.

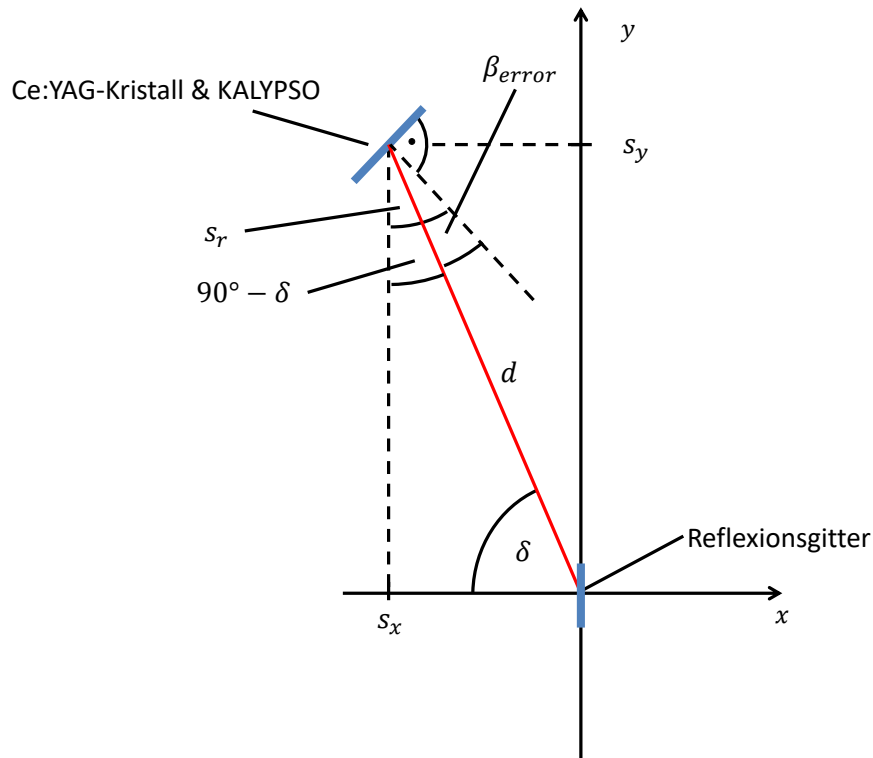


Abbildung 3.6.: Fehlerwinkel des VLS

Für die Fahrt des VLS wird der Abstand des KALYPSO zum Blazegitter als d definiert. Der Ausfallswinkel, der vom Gitter zum KALYPSO führt, wird als δ definiert. Der Fehlerwinkel zwischen der Ausrichtung des KALYPSO und der Richtung des Blazegitters wird als β_{error} bezeichnet. Der Abstand d vom Gitter zum Kristall ist abhängig von den beiden Motorpositionen und kann nach dem Satz des Pythagoras berechnet werden. Die mathematischen Zusammenhänge sind in den Gleichungen 3.6 bis 3.8 gegeben.

$$\delta = \arctan\left(\frac{s_y}{-s_x}\right) \quad (3.6)$$

$$d = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (3.7)$$

$$\beta_{error} = s_r - (90^\circ - \delta) \quad (3.8)$$

Gleichung 3.6 kann in 3.8 eingesetzt werden, womit der Fehlerwinkel in Abhängigkeit der drei Motorpositionen erhalten wird (Gleichung 3.9).

$$\beta_{error} = s_r - \arctan\left(\frac{s_y}{s_x}\right) - 90^\circ \quad (3.9)$$

Der Algorithmus soll nacheinander die Motoren an ihre vorgegebenen Positionen fahren, ohne dabei einen maximalen Fehlerwinkel zu überschreiten. Beim Anfahren eines höheren Wellenlängenbereichs erhöht sich der Fehlerwinkel unabhängig davon, ob Motor M_x oder Motor M_y diesen Bereich anfährt. Entsprechend verkleinert sich der Fehlerwinkel beim Anfahren eines kleineren Messbereichs. Für beide Motoren gilt, dass jeweils die korrekte Position in Abhängigkeit der vorgegebenen Wellenlänge bijektive Funktionen sind. Daraus folgt, dass es bei einer Veränderung des Wellenlängenbereichs in eine Richtung nicht sinnvoll ist, die Motoren M_x und M_y hintereinander zu fahren, da zwischendurch der absolute Fehlerwinkel wieder verkleinert werden muss. Sofern nicht einer der Motoren an seiner Sollposition angekommen ist, muss nach dem Erreichen des absoluten maximalen Fehlerwinkels $\|\beta_{err_{max}}\|$ die mechanische Konstruktion durch den Motor M_r entspannt werden. Dieser dreht die Vorrichtung so weit, bis der maximale Fehlerwinkel mit umgedrehtem Vorzeichen erreicht wird. Anschließend kann wieder Motor M_x oder M_y ausgewählt und gestartet werden, um seiner Sollposition näher zu kommen.

Um insgesamt die Detektoreinheit bei ihrer Fahrt in einen anderen Wellenlängenbereich möglichst dicht an der Fokalebene zu halten, wird bei der Auswahl zwischen den Motoren M_x und M_y derjenige gewählt, welcher bei seiner Fahrt in Richtung der Sollposition außerdem in die Richtung der Fokalebene fährt. In Abbildung 3.7 ist für alle Motorpositionen $(s_x|s_y)$ dargestellt, welcher Motor nach dem vorgestellten Algorithmus als nächstes ausgewählt wird.

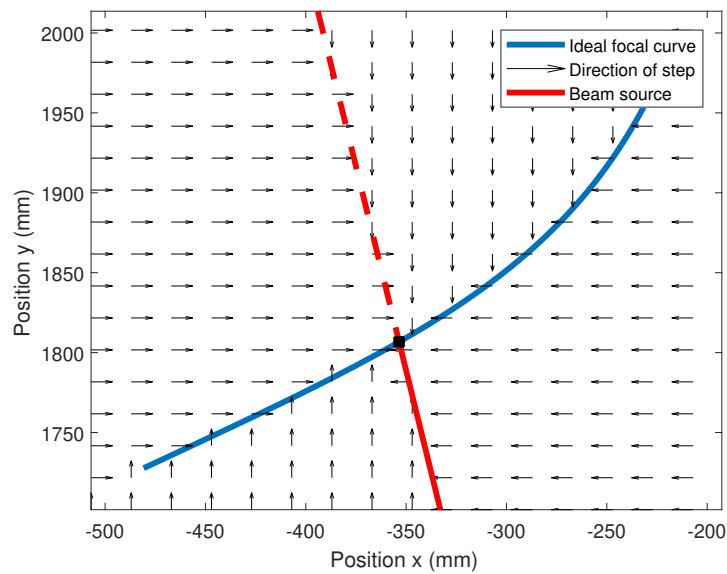


Abbildung 3.7.: Auswahl des nächsten Motors und dessen Richtung

Im Programmablaufplan in Abbildung 3.8 ist der Algorithmus des Programms bei einer neuen Messbereichsvorgabe dargestellt. Vor jeder Fahrt eines Motors wird in Abhängigkeit der Motorpositionen der jeweils anderen beiden Motoren die Position errechnet, bei der der absolute maximale Fehlerwinkel erreicht wird. Der Motor bekommt dann den Befehl, diese Position anzufahren. Sollte dabei bereits vorher die Endsollposition erreicht werden, so wird diese Position angefahren.

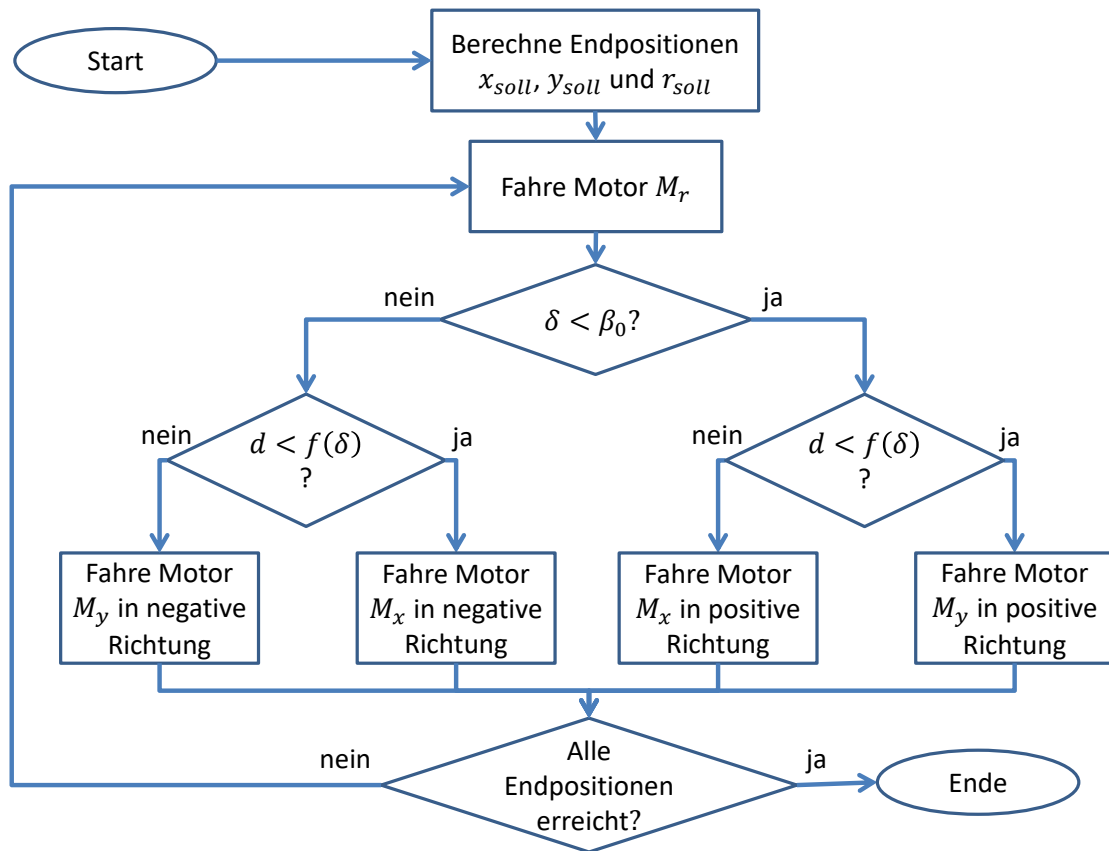


Abbildung 3.8.: Ablaufdiagramm der Messbereichsänderung

Um die Positionen zu berechnen, die einen absoluten maximalen Fehlerwinkel zur Folge haben, kann die Gleichung 3.9 nach den jeweiligen Motorpositionen umgestellt werden.

$$s_x = \frac{s_y}{\tan(s_r - 90^\circ - \beta_{error})} \quad (3.10)$$

$$s_y = s_x \cdot \tan(s_r - 90^\circ - \beta_{error}) \quad (3.11)$$

$$s_r = \arctan\left(\frac{s_y}{s_x}\right) + 90^\circ + \beta_{error} \quad (3.12)$$

Der maximale absolute Fehlerwinkel ist erreicht, wenn $\beta_{error} = \pm \|\beta_{error_{max}}\|$. Somit ergeben sich die Positionen in den Gleichungen 3.13 bis 3.15, bei denen der absolute Fehlerwinkel dem absoluten maximalen Fehlerwinkel entspricht.

$$s_{x_{bounds}} = \frac{s_y}{\tan(s_r - 90^\circ \pm \|\beta_{error_{max}}\|)} \quad (3.13)$$

$$s_{y_{bounds}} = s_x \cdot \tan(s_r - 90^\circ \pm \|\beta_{error_{max}}\|) \quad (3.14)$$

$$s_{r_{bounds}} = \arctan\left(\frac{s_y}{s_x}\right) + 90^\circ \pm \|\beta_{error_{max}}\| \quad (3.15)$$

3.1.4. Simulation des Algorithmus

Der vorgestellte Algorithmus wird in einem MATLAB-Programm simuliert. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass der Istwert eines Motors dem ihm gegebenen Sollwert entspricht. Das zeitliche Verhalten der Motoren wird also nicht simuliert. Es können alle Parameter wie zum Beispiel die Startposition, die Sollwellenlänge oder der maximale absolute Fehlerwinkel vorgegeben werden. Aufgrund numerischer Ungenauigkeiten können die Startpositionen der realen Motoren minimal von der theoretischen Startposition abweichen. Dies wird bei der Simulation berücksichtigt, indem zu den theoretischen Startpositionen der Motoren M_x und M_y eine Zufallszahl im Mikrometerbereich addiert wird. In Abbildung 3.9 wird eine Fahrt von 26 nm nach 10 nm simuliert. Die schwarzen Kreise stehen für eine Rotation des Motors M_r . Entsprechend den Erwartungen fährt das VLS in x-Richtung wesentlich kleinere Schritte als in y-Richtung, da der Winkel δ deutlich größer als 45° ist.

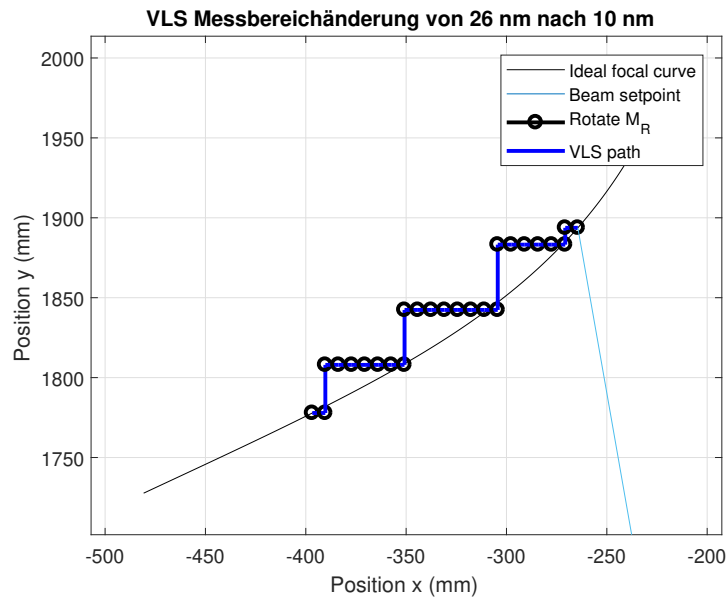


Abbildung 3.9.: Simulation der Messbereichsänderung mit $\beta_{err_{max}} = 0,1^\circ$ (Aufsicht)

Die Positionen der einzelnen Motoren sind in der Simulation von 26 nm auf 10 nm in Abbildung 3.10 dargestellt. Auch hier sind die größeren Schritte des Motors M_y gegenüber dem Motor M_x zu erkennen. Das Simulationsprogramm ist auf der beiliegenden CD unter *Programme/Automatisierung/VLS move/Simulation/testVlsMove.m* enthalten. Die CD kann bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wenck eingesehen werden.

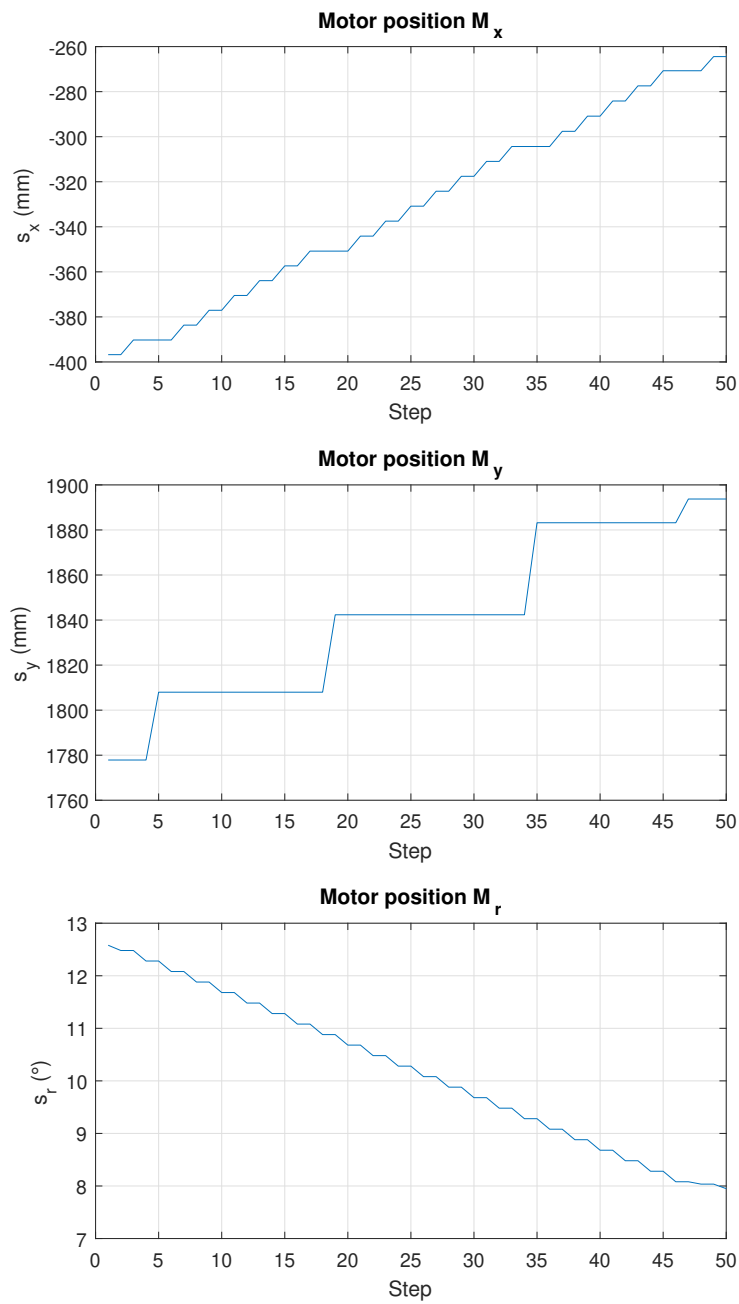


Abbildung 3.10.: Simulation der Messbereichsänderung mit $\beta_{err_{max}} = 0,1^\circ$ (Motorpositionen)

3.1.5. Status und Fehlermeldungen

Meldungen des VLS, die nicht zu einem sofortigen Stopp der VLS-Fahrt führen, werden über die Benutzeroberfläche ausgegeben. Werden die Parameter so eingestellt, dass der Sollwert von mindestens einem Motor außerhalb seines zulässigen Bereichs liegt, so wird dies als Meldung ausgegeben und der Start-Button gesperrt. Die Sperrung findet sowohl auf der Benutzeroberfläche als auch in dem C++-Programm selbst statt. Die Statusmeldungen sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2.: Status des VLS-Move Programms

Statusindex	Warnung
0	VLS move server ready
1	Setpoint X out of range
2	Setpoint Y out of range
3	Setpoint R out of range
4	VLS is moving

Zusätzlich zu den Statusmeldungen gibt es noch Fehlermeldungen. Im Gegensatz zu den Statusmeldungen gehören die Fehlermeldungen zum Gerüst der DOOCS-Serverprogramme. Eine Fehlermeldung wird damit automatisch in einem Logbuch eingetragen und bei der Überwachung der DOOCS-Serverprogramme angezeigt. Die Ursache für einen Fehler ist eine nicht erlaubte Motorposition. Dies ist entweder der Fall, wenn einer der Motoren M_x oder M_y außerhalb von seinem anfahrbaren Bereich liegt oder wenn der absolute Fehlerwinkel mehr als 50% größer ist als der maximale absolute Fehlerwinkel. Die Fehler müssen nicht zurückgesetzt werden. Sobald alle Fehlerursachen beseitigt sind, kann die VLS-Fahrt wieder gestartet werden. Die Fehlermeldungen können der Tabelle 3.3 entnommen werden.

Tabelle 3.3.: Fehlermeldungen des VLS-Move Programms

Fehlerindex	Fehler
0	VLS move server ready (kein Fehler)
1	Error motor M_x : Position out of focal area.
2	Error motor M_y : Position out of focal area.
3	Error motor M_r : Sensor doesn't point to beam source.

3.1.6. Grafische Benutzeroberfläche

Mit dem jddd-Editor wird eine grafische Benutzeroberfläche erstellt. Für diese gibt es einen Benutzermodus und einen Expertenmodus. Diese werden nachfolgend vorgestellt. Das jddd-Programm ist auf der beigefügten CD unter *Programme/Automatisierung/VLS move/-GUI/vls_detector_movement.xml* enthalten.

Für die Änderung des Messbereichs wurde eine GUI erstellt, die im Benutzermodus in Abbildung 3.11 dargestellt ist. Im oberen Bereich wird die Statusmeldung ausgegeben. Im Panel *Wavelength* kann ein Messbereich in 0,01 nm Schritten vorgegeben werden. Abhängig von dem ausgewählten Sollwert des Messbereichs werden die dazugehörigen Sollpositionen für die Motoren im Panel *Motors* entsprechend angezeigt. Mit dem *Move*-Button im Panel *Control* wird die Änderung des Wellenlängenbereichs gestartet. Dabei leuchtet die LED in dem *Control*-Panel und der *Move*-Button wird deaktiviert. Im *Motors*-Panel leuchtet entsprechend eine LED für den Motor, der gerade fährt. Die aktuellen Positionen werden dort ebenfalls angezeigt. Mit dem *Stop*-Button wird die Fahrt angehalten. Auf der rechten Seite wird der historische Verlauf der Motorpositionen grafisch dargestellt.

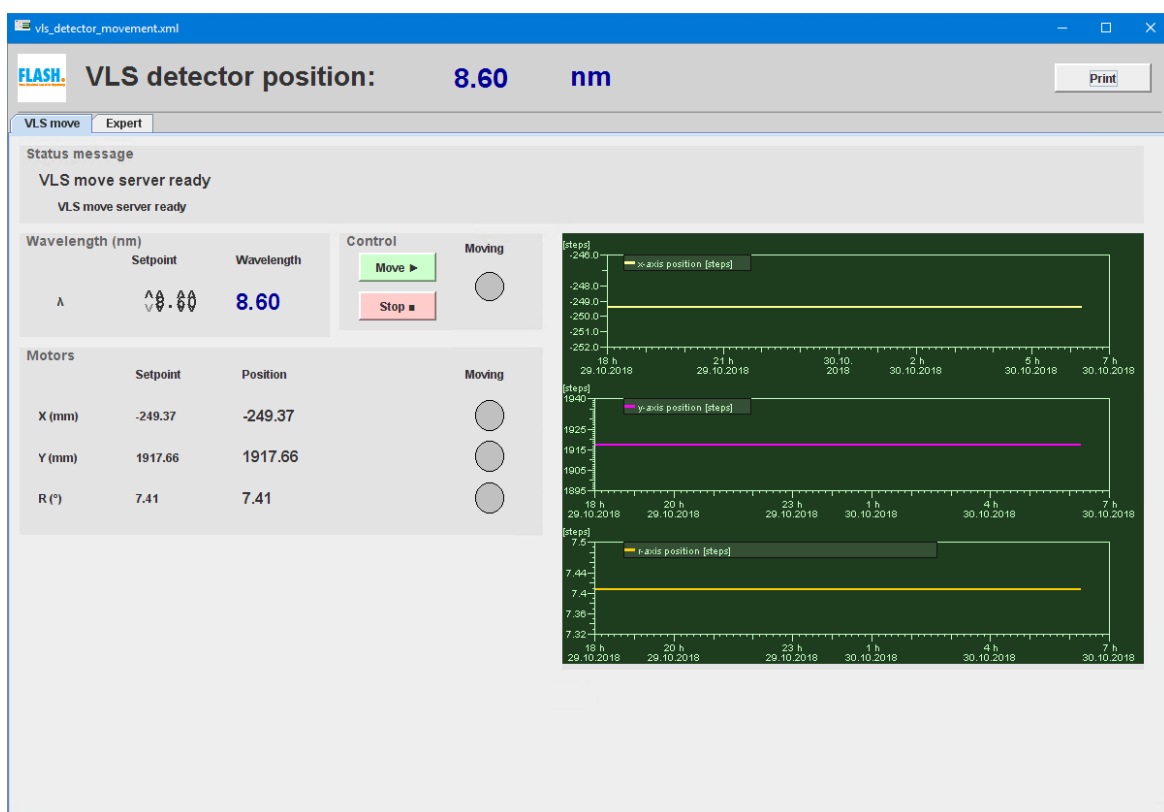


Abbildung 3.11.: Benutzermodus VLS move

Im Expertenmodus wird die GUI erweitert. Es können zusätzlich für die Motoren Offsets vorgegeben werden. Unter dem Panel *Settings* wird das aktuelle eingesetzte Gitter angezeigt. Dazu kann das Gitter ausgewählt werden, dessen Parameter für die Berechnung der Motorpositionen und der Wellenlänge verwendet wird. Im Panel *Error R* wird der aktuelle Fehlerwinkel β_{error} angezeigt und der maximale Fehlerwinkel $\beta_{error_{max}}$ kann vorgegeben werden. Ein praxistauglicher Wert für den maximalen Fehlerwinkel liegt bei $\beta_{error_{max}} = 0, 1^\circ$.

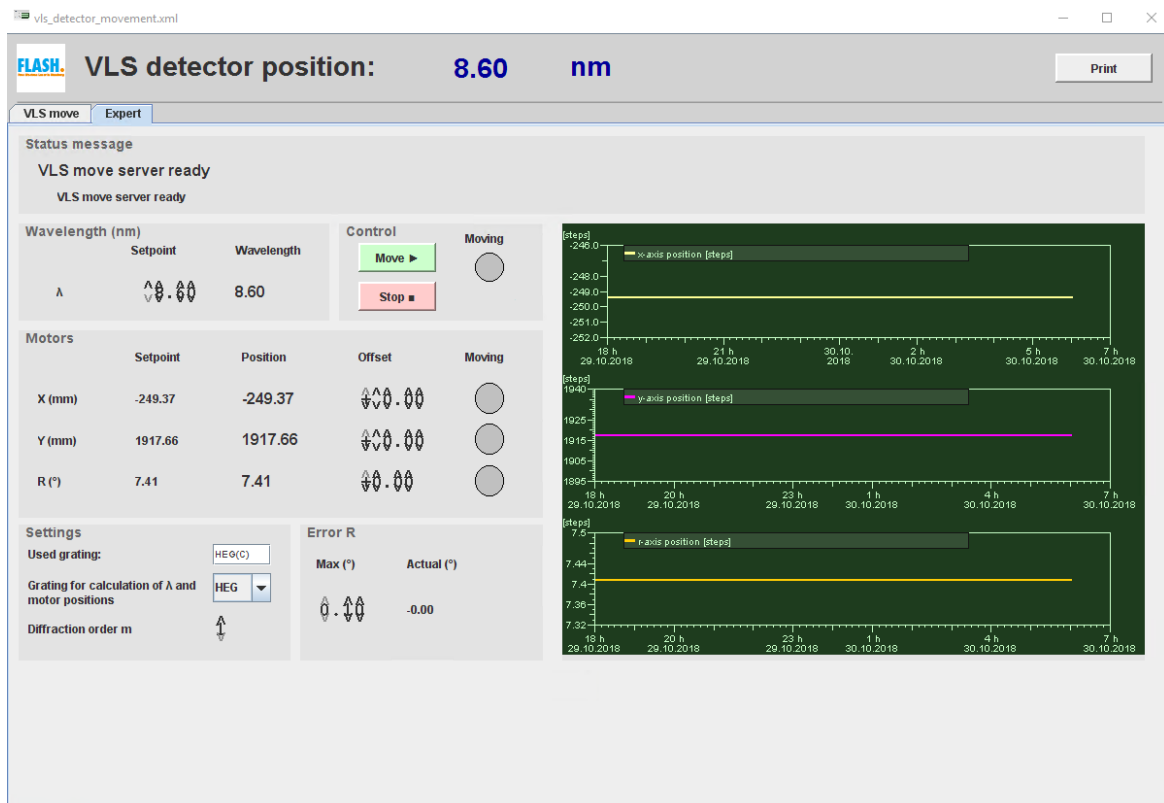


Abbildung 3.12.: Expertenmodus VLS move

3.1.7. Ergebnisse

Das Programm wurde vielfach getestet und ist jetzt für alle Benutzer freigegeben. In der Abbildung 3.13 ist wie bei der Simulation eine Fahrt von 26 nm nach 10 nm dargestellt. Die reale Fahrt entspricht im Wesentlichen der der Simulation. Im Vergleich zu Abbildung 3.9 ist optisch kein Unterschied zwischen dem Weg der Simulation und der realen Fahrt zu erkennen.

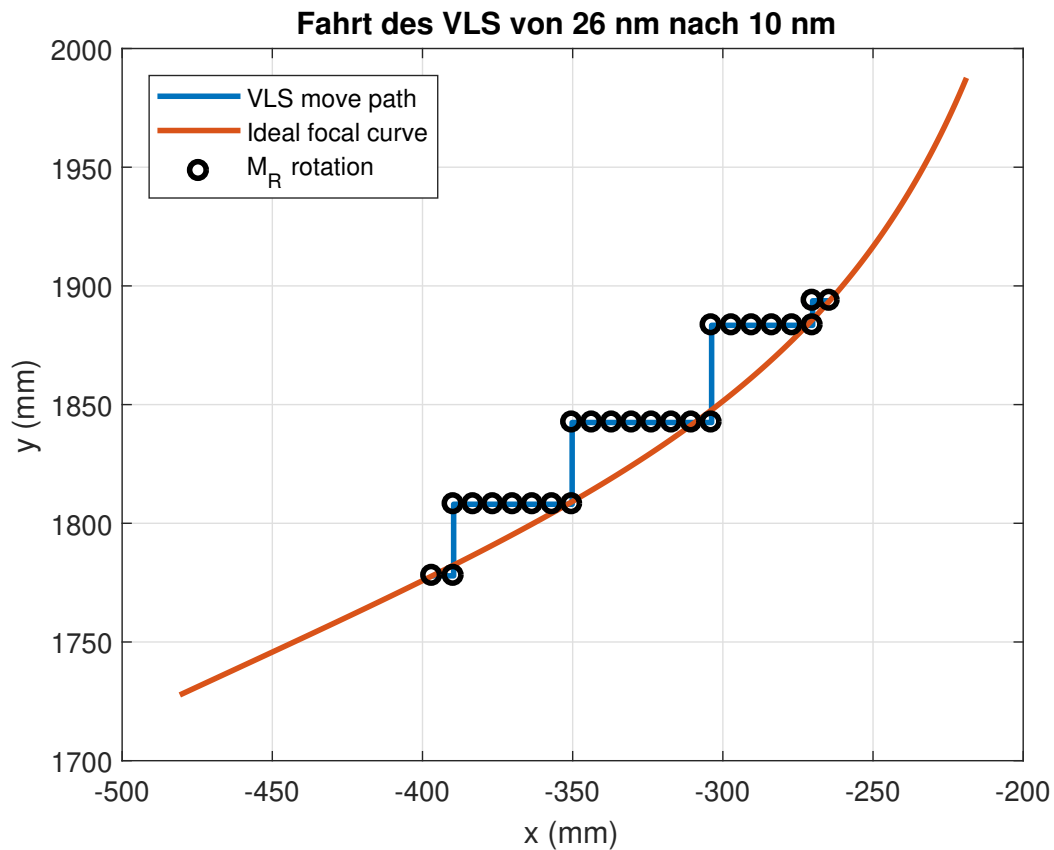


Abbildung 3.13.: Reale Messbereichsänderung von 26 nm nach 10 nm

In der Abbildung 3.14 sind die Motorpositionen der Fahrt über die Zeit dargestellt. Im Vergleich zur Simulation wurde bei der Simulation das zeitliche Verhalten der Motoren nicht berücksichtigt, sondern nur die Anzahl der Schritte des Algorithmus. Trotzdem kann die Simulation in Abbildung 3.10 gut mit der realen Fahrt verglichen werden. Beim negativen Fehlerwinkel ist ein hardwarebedingtes Überfahren des maximalen absoluten Fehlerwinkels im Bereich von etwa $0,02^\circ$ zu erkennen.

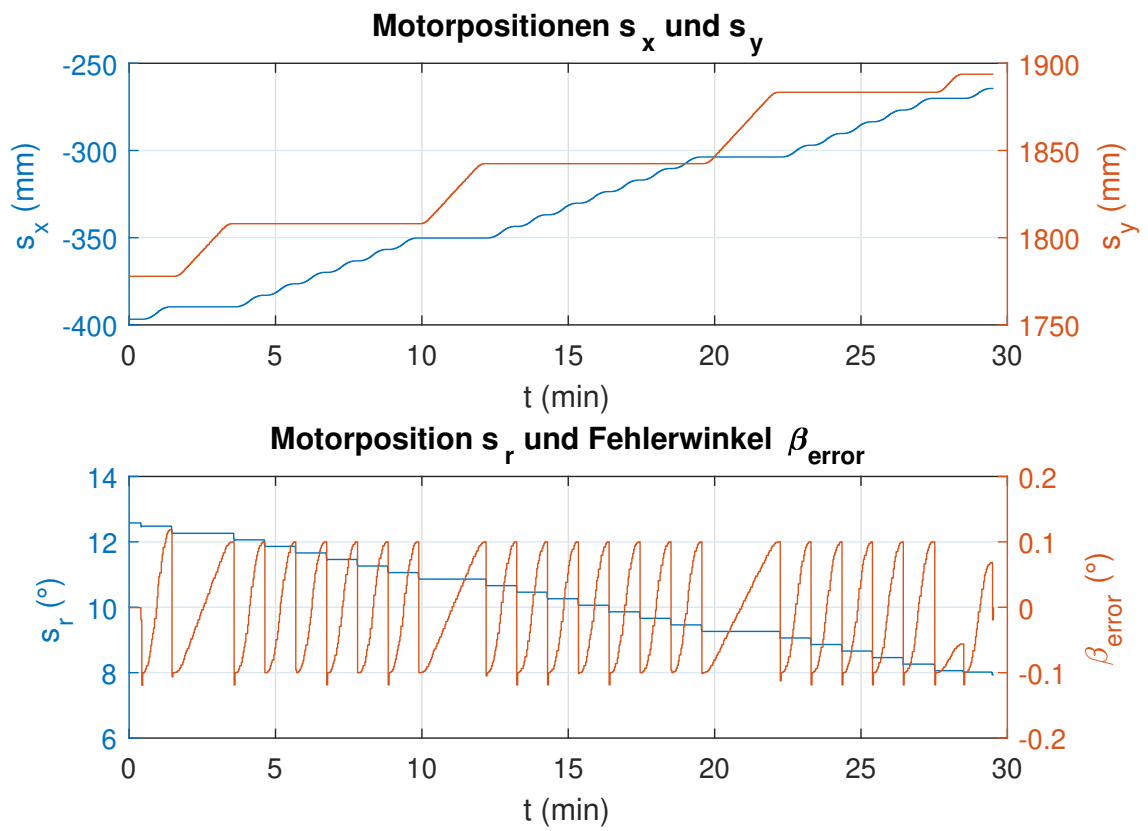


Abbildung 3.14.: Messbereichsänderung von 26 nm nach 10 nm



Abbildung 3.15.: Messbereichsänderung von 26 nm nach 10 nm in der GUI

3.2. Berechnung der Spektralachse des KALYPSO

Der Ausfallswinkel des Blazegitters β ist abhängig von der Wellenlänge λ des einfallenden XUV-Lichtes. Um jedem Pixel eine Wellenlänge zuzuordnen, muss also der Winkel zwischen dem einzelnen Pixel und dem Blazegitter bekannt sein. Der Messbereich wird als Wellenlänge λ_0 vorgegeben. Im Abstand der Brennweite $f_0 = f(\lambda_0)$ und im Winkel $\beta_0 = \beta(\lambda_0)$ steht der KALYPSO mittig zum vorgegebenen Messbereich (Abbildung 3.16). Der Winkel φ kann wie folgt berechnet werden.

$$\varphi = \arctan \left(\frac{(127,5 - k) \cdot 50 \mu m}{f_0} \right) \quad (3.16)$$

Dabei gibt k den Pixelindex zwischen 0 und 255 an, f_0 die Brennweite des vorgegebenen Messbereichs und φ den Winkel, der zwischen dem Pixel k und der Sensormitte vom Bla-

zегitter umschlossen wird. Der Ausfallswinkel ist entsprechend aus dem Ausfallswinkel des gegebenen Wellenbereichs β_0 und dem Winkel φ durch Addition berechenbar (Gleichung 3.17).

$$\beta = \beta_0 + \varphi \quad (3.17)$$

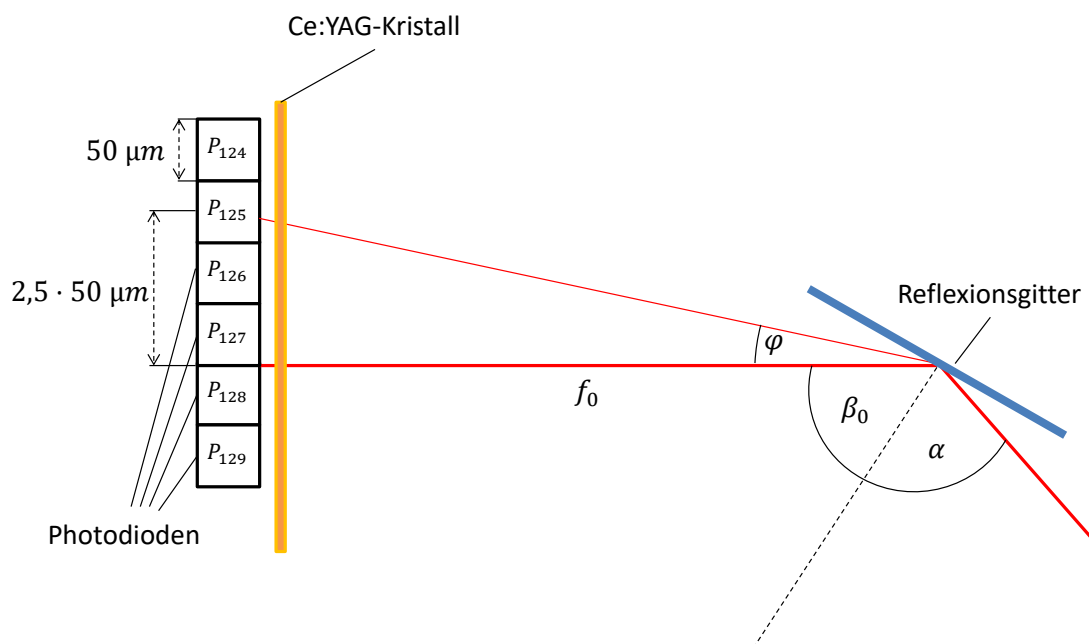


Abbildung 3.16.: Ausfallswinkel für jedes Pixel

Gleichung 3.1 kann nach der Wellenlänge umgestellt werden und damit für jeden Pixel seine dazugehörige Wellenlänge bestimmt werden.

$$\lambda = \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{m \cdot \sigma} \quad (3.18)$$

$$\lambda = \frac{\sin \alpha - \sin(\beta_0 + \varphi)}{m \cdot \sigma} \quad (3.19)$$

$$\lambda = \frac{\sin \alpha - \sin(\beta_0 + \arctan\left(\frac{(127,5-k) \cdot 50 \mu m}{f_0}\right))}{m \cdot \sigma} \quad (3.20)$$

Für das HEG und einer Beugungsordnung von $m = 1$ ist in Abbildung 3.17 die Wellenlänge in Abhängigkeit des Pixels für einen Messbereich von $\lambda_0 = 6 \text{ nm}$ und $\lambda_0 = 40 \text{ nm}$ dargestellt. Die Berechnung der Wellenlängenachse ist ein Teil eines entwickelten C++ Programms zur Berechnung der statistischen Größen und auf der beigefügten CD unter *Programme/Automatisierung/Moments* zu finden. Die Spektralachse wird ebenfalls in verschiedenen MATLAB-Programmen benötigt. Die MATLAB-Funktion für die Berechnung der spektralen Achse ist im Anhang A.1 und auf der beiliegenden CD unter *Programme/Automatisierung/Spectral axis/GetAxisLambda.m* enthalten.

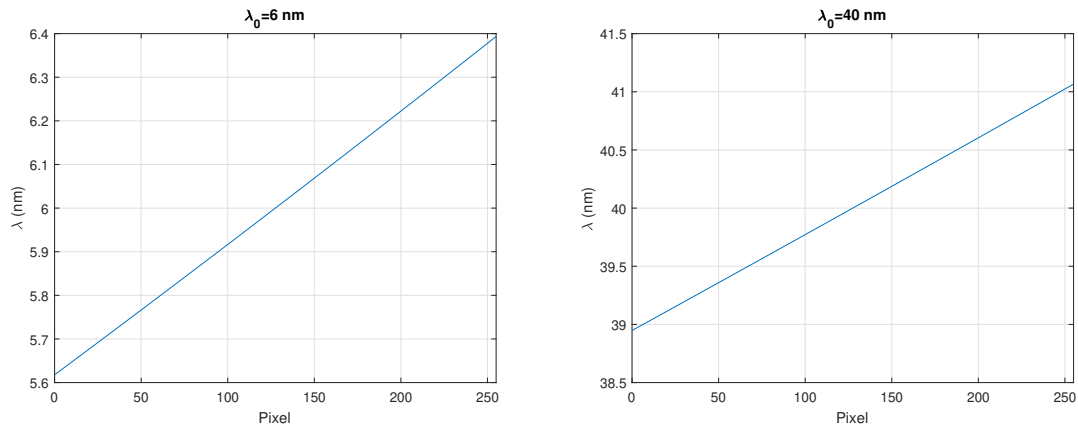
(a) Spektralachse für $\lambda_0 = 6 \text{ nm}$ (b) Spektralachse für $\lambda_0 = 40 \text{ nm}$

Abbildung 3.17.: Spektrale Achsen für verschiedene Messbereiche

Die FLASH-XUV-Lichtimpulse haben eine Halbwertsbreite (Englisch: Full width at half maximum (FWHM)) von ungefähr einem Prozent der mittleren Wellenlänge. Daher ist es ebenfalls von Interesse, wie groß das Verhältnis von der Länge der Spektralachse zum Messbereich λ_0 ist. Die Länge der Spektralachse wird mit Gleichung 3.21 berechnet.

$$\Delta \lambda = \frac{\sin \alpha - \sin(\beta_0 + \arctan\left(\frac{(-128) \cdot 50 \mu m}{f_0}\right))}{m \cdot \sigma} - \frac{\sin \alpha - \sin(\beta_0 + \arctan\left(\frac{(128) \cdot 50 \mu m}{f_0}\right))}{m \cdot \sigma} \quad (3.21)$$

$$\Delta \lambda = \frac{\sin\left(\arctan\left(\frac{(128) \cdot 50 \mu m}{f_0}\right) - \beta_0\right)}{m \cdot \sigma} + \frac{\sin\left(\arctan\left(\frac{(128) \cdot 50 \mu m}{f_0}\right) + \beta_0\right)}{m \cdot \sigma} \quad (3.22)$$

Mit der Beziehung $\sin(x_1) \cdot \cos(x_2) = \frac{1}{2} \cdot (\sin(x_1 - x_2) + \sin(x_1 + x_2))$ kann die Gleichung weiter vereinfacht werden und ergibt die Gleichung 3.23 [9, S. 399].

$$\Delta\lambda = \frac{2 \cdot \cos(\beta_0) \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{(128) \cdot 50 \mu m}{f_0}\right)\right)}{m \cdot \sigma} \quad (3.23)$$

Die absolute Länge der Spektralachse $\Delta\lambda$ ist in Abbildung 3.18 und die relative Länge $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ in Abbildung 3.19 dargestellt.

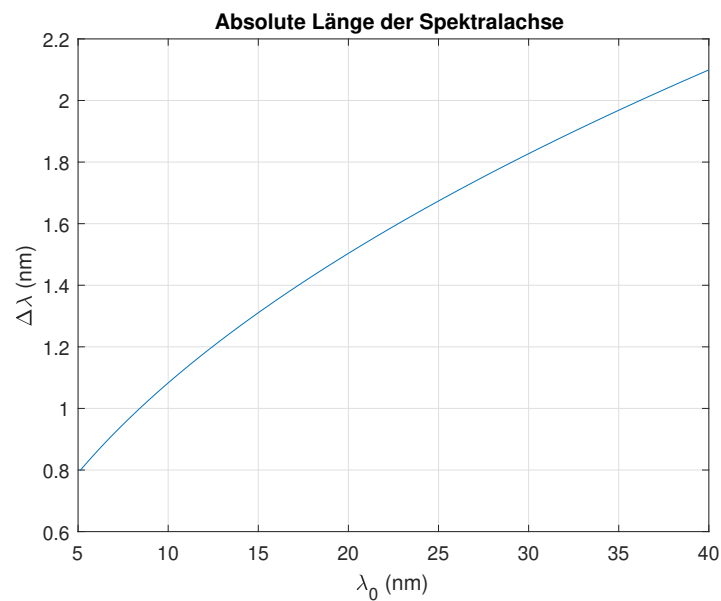
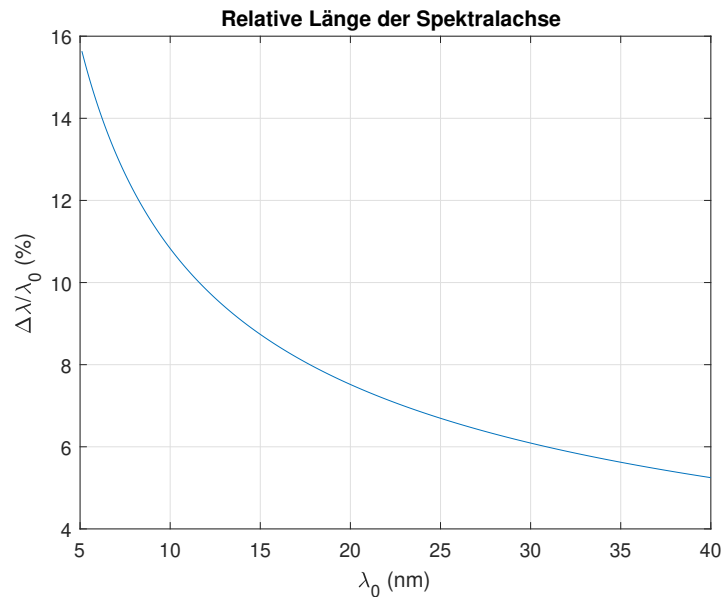


Abbildung 3.18.: Absolute Länge der Spektralachse $\Delta\lambda$

Abbildung 3.19.: Relative Länge der Spektralachse $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$

3.3. Berechnung von statistischen Größen der XUV-Lichtimpulse

Zur Analyse der mit KALYPSO gemessenen XUV-Spektren werden relevante statistische Größen berechnet. Diese werden in den folgenden Kapiteln für die Evaluierung des KALYPSO und die Regelung des FLASH verwendet. In diesem Unterkapitel wird erläutert, wie die statistischen Größen berechnet werden. Die statistischen Größen werden dabei rein mathematisch und zunächst unabhängig von ihrer physikalischen Umgebung berechnet.

3.3.1. Intensität

Die Intensität eines Zeilenbildes wird in dieser Arbeit definiert als die Summe aller Messwerte von allen Pixeln von einem Zeilenbild (Gleichung 3.24).

$$I = \sum_{k=1}^N y(k) \quad (3.24)$$

I gibt die Intensität der Zeilenmessung an, $y(k)$ ist der Messwert des Pixels k und N ist die Anzahl der Pixel. Abgesehen von Nichtlinearitäten und Ungenauigkeiten in der Messung ist die Intensität proportional zur Anzahl der Photonen des eintreffenden XUV-Lichtimpulses. Im Kapitel vier wird sie daher verwendet, um sie mit der vom GMD gemessenen Photonenanzahl zu vergleichen. Die Intensität wird darüber hinaus benötigt, um das gemessene Spektrum als Gaußkurve zu approximieren. Ein Vergleich der Intensität mit einem festgelegten Schwellwert gibt außerdem an, ob überhaupt ein Signal anliegt.

3.3.2. Massenschwerpunkt

Die Formel für die Berechnung des Massenschwerpunkts (Englisch: Center of mass) ist in Gleichung 3.25 gegeben.

$$CoM = \frac{\sum_{k=1}^N x(k) \cdot y(k)}{\sum_{k=1}^N y(k)} \quad (3.25)$$

Dabei gibt $x(k)$ die Position des Messwertes auf der Abszisse an. Dies kann zum Beispiel der Pixelindex oder die entsprechende Wellenlänge sein. Da die Intensität bereits zuvor berechnet wurde, kann diese bei der Berechnung des CoM verwendet werden.

$$CoM = \frac{\sum_{k=1}^N x(k) \cdot y(k)}{I} \quad (3.26)$$

3.3.3. Streuung

Die Streuung gibt an, wie stark das eintreffende XUV-Licht spektral verteilt ist. Sie kann zum Beispiel als Standardabweichung s , Varianz s^2 oder als Halbwertsbreite FWHM angegeben werden.

Um die Streuung zu berechnen, wird ein Zeilenbild als eine Folge von Zufallszahlen betrachtet. Die Größe des Messwertes eines Pixels gibt dabei die Anzahl an, wie oft der jeweilige Pixelindex bzw. die jeweilige Wellenlänge als Zufallszahl generiert wurde. Die Anzahl der insgesamt generierten Zufallszahlen entspricht damit der Summe aller Messwerte, also der Intensität. Der Erwartungswert μ ist demnach der Mittelwert aller Zufallszahlen.

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.27)$$

Die Anzahl der Zufallszahlen x_i , die den Wert $x(k)$ haben, entspricht dabei dem Messwert $y(k)$. Somit ist der Erwartungswert in Gleichung 3.28 gegeben und entspricht dem CoM.

$$\mu = \frac{1}{I} \cdot \sum_{k=1}^N y(k) \cdot x(k) = CoM \quad (3.28)$$

Die Varianz kann entsprechend berechnet werden.

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (3.29)$$

$$s^2 = \frac{1}{I} \cdot \sum_{k=1}^N y(k) \cdot (x(k) - CoM)^2 \quad (3.30)$$

Die Standardabweichung ist die Wurzel aus der Varianz (Gleichung 3.31).

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N y(k) \cdot (x(k) - CoM)^2} \quad (3.31)$$

Die Halbwertsbreite FWHM lässt sich aus der Standardabweichung berechnen [15].

$$FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma \quad (3.32)$$

3.3.4. Schiefe

Analog zur Berechnung der Streuung wird ebenfalls die Schiefe γ_1 berechnet [2, S. 705].

$$\gamma_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (3.33)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{I \cdot \sigma^3} \cdot \sum_{k=1}^N y(k) \cdot (x(k) - CoM)^3 \quad (3.34)$$

3.3.5. Wölbung

Das vierte zentrale Moment γ_2 wird ebenfalls analog zur Streuung und Schiefe berechnet [2, S. 705].

$$\gamma_2 = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \right) - 3 \quad (3.35)$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{1}{I \cdot \sigma^4} \cdot \sum_{k=1}^N y(k) \cdot (x(k) - CoM)^4 \right) - 3 \quad (3.36)$$

3.3.6. Umsetzung in C++ und MATLAB

Die Zeilenbilder eines XUV-Lichtimpulszuges stehen im DOOCS als zweidimensionales Array (C++) bzw. als Matrix (MATLAB) zur Verfügung. Im Anhang A.2 ist in MATLAB die Funktion *GetMoments(x,y)* enthalten. Dieser Funktion werden die Spektralachse aus Kapitel 3.2 und alle Zeilenbilder als Matrix übergeben. Als Rückgabewerte werden alle statistischen Größen jeweils als Array zurückgegeben. Das Besondere an der Funktion ist, dass sie trotz komplexer Berechnungen ohne eine Schleife auskommt und somit die Rechenoperationen vergleichsweise schnell ausführt.

Die Berechnung der Intensität und des CoM ist in dem C++-Programm *Programme/Automatisierung/Moments* auf der beigegeführten CD enthalten. Bei dem Programm wird der CoM zunächst als Pixelindex berechnet. Da die Messwerte als Integer zur Verfügung stehen und die Pixelindizes ebenfalls ganzzahlig sind, ist dadurch eine höhere Geschwindigkeit bei der Berechnung zu erwarten. Erst bei der einmaligen Division durch die Intensität wird die Berechnung als Gleitkommazahl durchgeführt. Aus dem Pixelindex wird schließlich mit der einmalig zuvor berechneten Spektralachse die Wellenlänge berechnet.

3.4. Benutzeroberfläche zur Steuerung des KALYPSO

Für die Parametrierung des KALYPSO und als Visualisierung der Messdaten wird eine GUI mit dem jddd-Editor erstellt. Die jddd-GUI kann von allen Nutzern bedient werden. In der GUI kann der KALYPSO parametrierung werden. Verschiedene Daten sind in Diagrammen dargestellt und werden ständig aktualisiert. Die GUI benötigt drei DOOCS-Serverprogramme. Das erste Programm mit der Bezeichnung *HOLD DMA HW control* ist ein Treiber, der die Daten des KALYPSO im DOOCS zur Verfügung stellt und die Parametrierung des KALYPSO

ermöglicht. Das zweite Programm namens *EOD HOLD processing control* hat die Funktion, die Messdaten aufzubereiten. Das dritte Programm *Moments* errechnet die statistischen Größen. Die beiden erstgenannten Programme standen bereits zur Verfügung. Das letztgenannte ist im Rahmen der Masterthesis vom Autor erstellt worden.

Die GUI steht im Übersichts-, Benutzer- und Expertenmodus zur Verfügung. Im Benutzermodus (Abbildung 3.20) kann der KALYPSO gestartet bzw. neugestartet und ausgeschaltet werden. Darüber hinaus kann die Belichtungszeit und die Verstärkung eingestellt und das DAQ ein- bzw. ausgeschaltet werden, um die Messdaten aufzuzeichnen. Desweiteren kann ein Lichtimpulsindex ausgewählt werden, um das Spektrum eines einzelnen Zeilenbildes anzuzeigen. Die Benutzeroberfläche ist als jddd-Programm auf der beigefügten CD unter *Programme/Automatisierung/KALYPSO GUI* enthalten. Die Datei *kalypso_overview.xml* enthält die Kernoberfläche, welche von der GUI im Benutzer- und Expertenmodus (*kalypso.xml*) eingebettet wird.

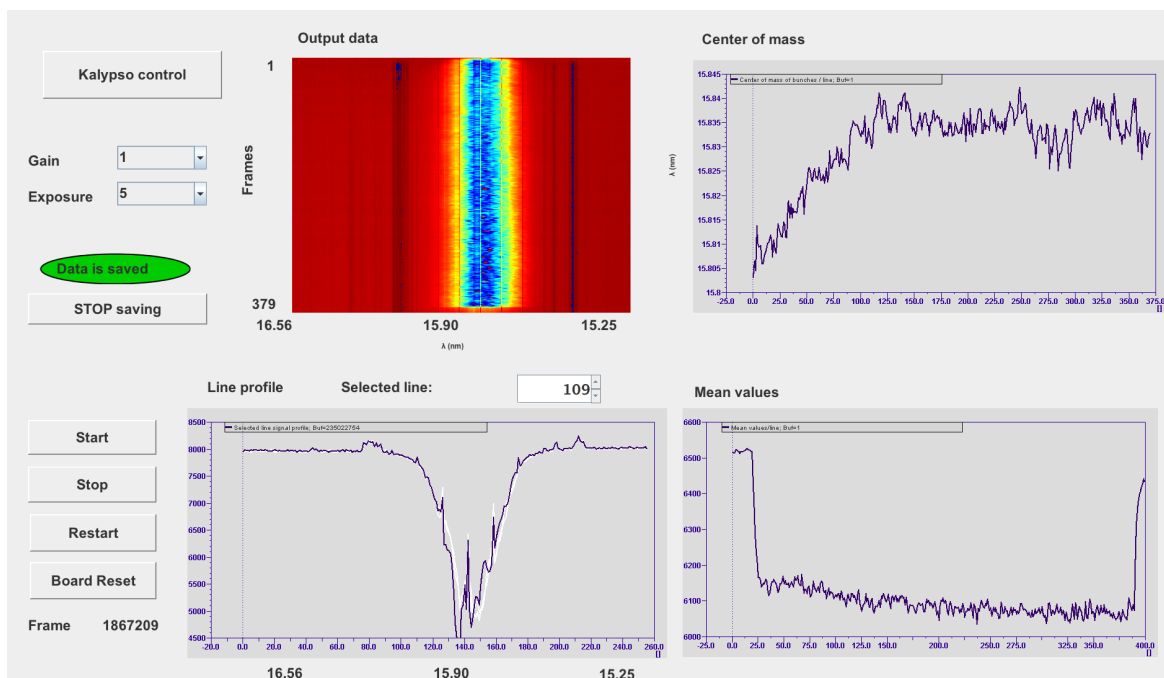


Abbildung 3.20.: KALYPSO-GUI im Benutzermodus

Der Expertenmodus erweitert den Benutzermodus. Damit können weitere Parameter wie zum Beispiel die *Phase*, das *Delay* oder die *Bias-Spannung* vorgegeben werden. Ein Screenshot des Expertenmodus ist in Abbildung 3.21 gegeben. Unter dem Parameter *Lines* wird die Anzahl aufzunehmender Zeilenbilder pro Lichtimpulszug vorgegeben. Unter *Background* und *Bunches* kann jeweils der Startindex und die Anzahl der Hintergrund-Zeilenbilder und der Zeilenbilder der Lichtimpulse vorgegeben werden. Die Parameter *High level* und *Low*

level werden für die Umrechnung eines Messwerts in einen Farbwert für die Ausgangsbilder unter *Output data* verwendet. Mit dem Parameter *Intensity min* wird die minimale Intensität angegeben, die für die Berechnung des CoM benötigt wird. Ist die Intensität kleiner als die minimale Intensität, so wird der CoM für das jeweilige Zeilenbild auf null gesetzt.

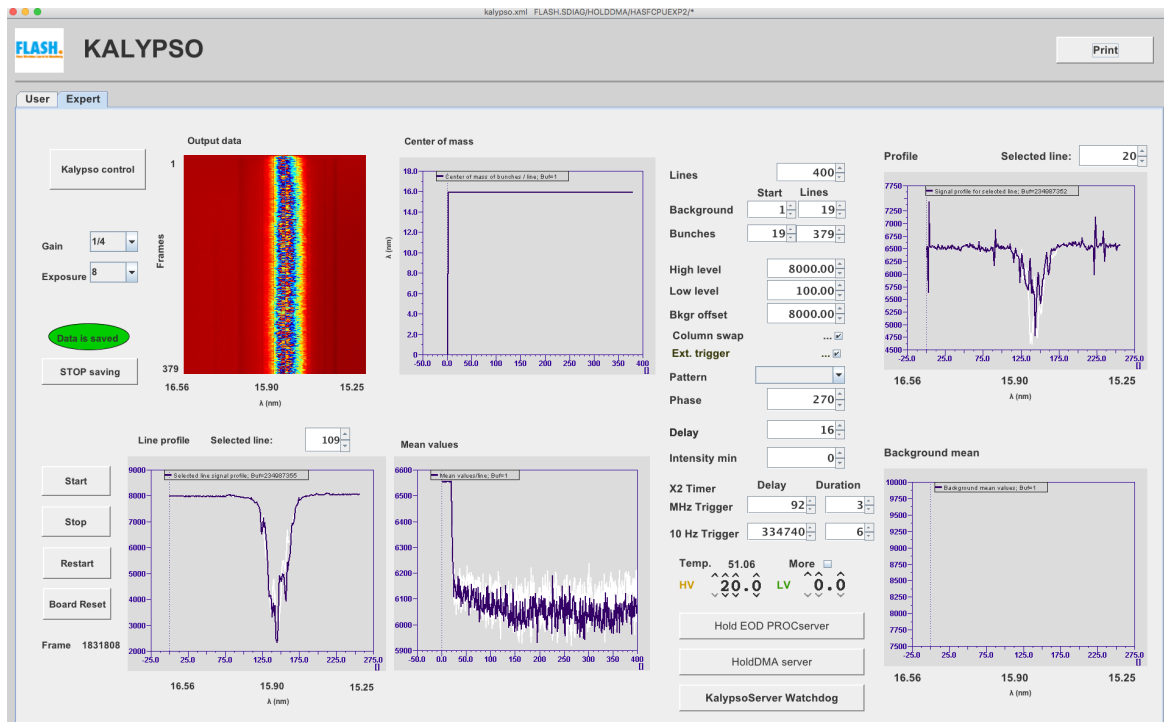


Abbildung 3.21.: KALYPSO-GUI im Expertenmodus

4. Evaluierung des KALYPSO

In diesem Kapitel wird die Evaluierung des KALYPSO-Detektors beschrieben. Dafür werden verschiedene Versuche mit dem KALYPSO durchgeführt. Die Versuche finden sowohl mit XUV-Strahlung an FLASH als auch mit einer optischen Strahlquelle im Labor mit idealen Bedingungen statt. In diesem Kapitel wird zunächst das Dunkelrauschen des KALYPSO analysiert. Bei allen danach folgenden Messungen werden die gemessenen Zeilenbilder von dem jeweils kurz zuvor aufgenommenen Dunkelbild subtrahiert. Diese aufbereiteten Daten werden im Folgenden *Prozessdaten* genannt. Die Verstärkungsstufen mit den Indizes null bis drei erhalten die Bezeichnung $Gain_0$ bis $Gain_3$. Je kleiner der Verstärkungsindex, desto größer ist die Verstärkung. In Abbildung 4.1 ist exemplarisch die Messung von 400 Lichtimpulsen als Heatmap dargestellt.

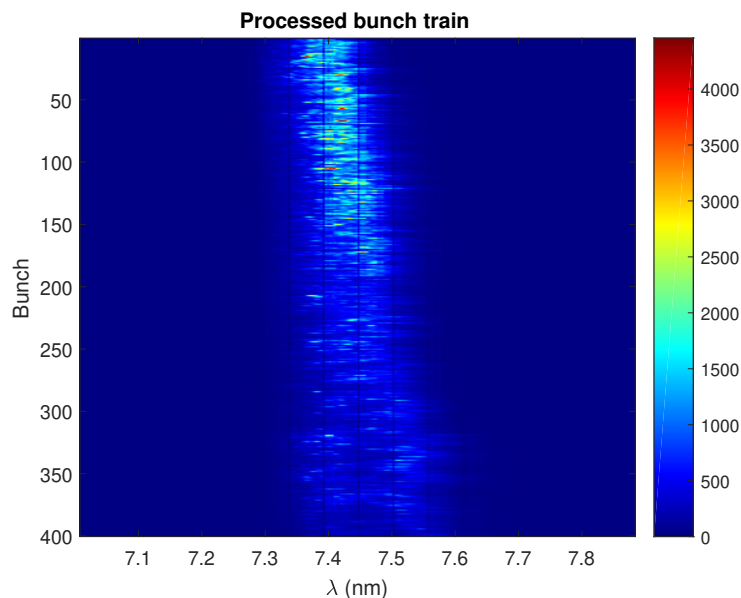


Abbildung 4.1.: Messung von 400 XUV-Lichtimpulsen

In Abbildung 4.2 sind die XUV-Lichtimpulse 1, 100, 200 und 400 der Heatmap aus Abbildung 4.1 dargestellt.

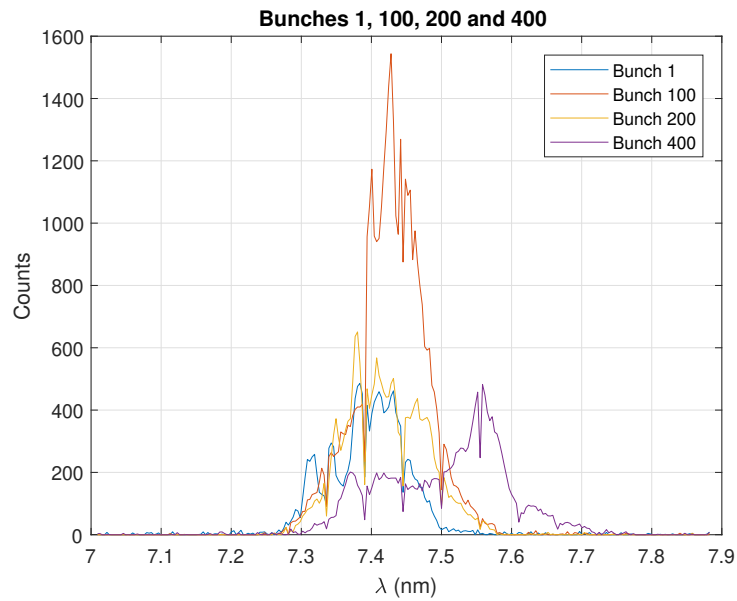


Abbildung 4.2.: Messung von einzelnen XUV-Lichtimpulsen

4.1. Dunkelrauschen

Das Dunkelrauschen wird bestimmt, indem vom KALYPSO 40.000 Zeilenbilder bei Dunkelheit aufgenommen werden. Für jedes Pixel wird anschließend das Rauschen bestimmt, indem die Standardabweichung der Messwerte des Pixels berechnet wird. Der Mittelwert der Standardabweichungen der verschiedenen Pixel ergibt das mittlere Dunkelrauschen. Dieses wird nachfolgend für alle Belichtungszeiten und für alle Verstärkungen gemessen.

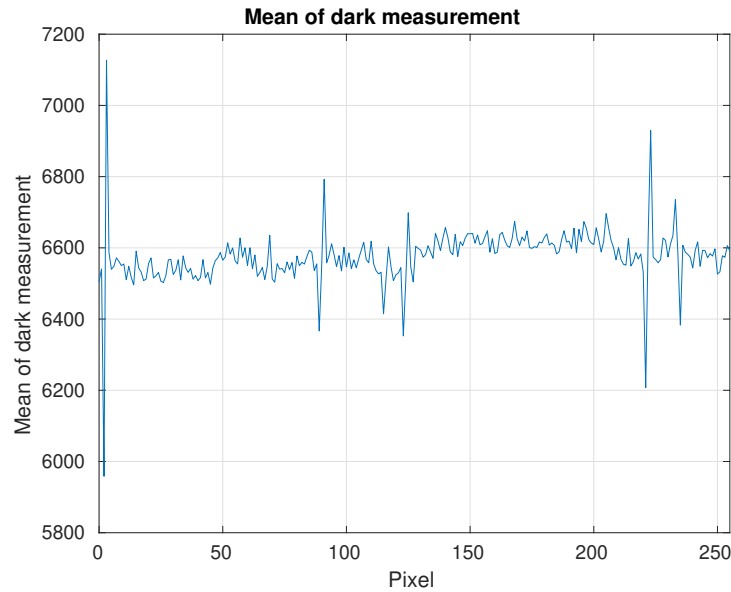
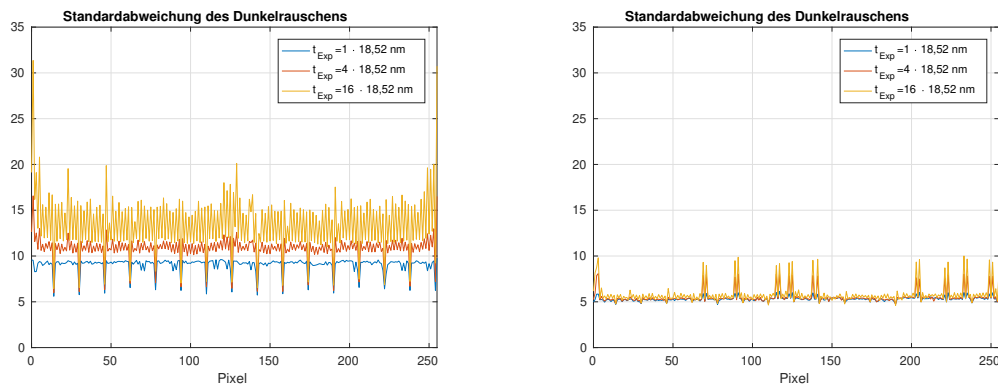


Abbildung 4.3.: Mittelwert von Messungen bei Dunkelheit

In Abbildung 4.3 sind zunächst die Mittelwerte der Messungen für die einzelnen Pixel dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese deutliche Unterschiede zueinander haben. Exemplarisch ist für die Verstärkungen $Gain_0$ und $Gain_1$ und für die Belichtungszeiten 18,52 ns, 74,07 ns und 296,3 ns die Standardabweichung des Dunkelrauschens in den Abbildungen 4.4a und 4.4b dargestellt. Die Pixelindizes 1 und 255 haben bei der Verstärkung $Gain_0$ eine besonders hohe Standardabweichung. Bei jedem 16. Pixel (Indices 15, 31, 47, ...) sind die Standardabweichungen deutlich kleiner als bei den anderen Pixeln. Was darüber hinaus bei den Belichtungszeiten 74,07 ns und 296,3 ns über die Pixel auf den ersten Blick wie weißes Rauschen aussieht, ist bei näherer Betrachtung ein systematischer Fehler zu erkennen: Jeder zweite Pixel hat eine ähnliche Standardabweichung und ist deutlich größer bzw. kleiner als seine Nachbarpixel.

Bei der Verstärkung $Gain_1$ sind die Standardabweichungen erwartungsgemäß kleiner. Neben den beiden Pixeln 1 und 255 sind hier noch weitere Pixel zu erkennen, bei denen die Standardabweichung deutlich größer ist als bei den anderen Pixeln. Dies ist insbesondere bei höheren Belichtungszeiten der Fall. Eine kleinere Standardabweichung ist bei jedem 16. Pixel hier kaum bis gar nicht mehr zu erkennen. Während bei der Verstärkung $Gain_0$ das Rauschen mit der Versechzehnfachung der Belichtungszeit noch um ca. 50% größer ist, vergrößert sich die Störung bei der Verstärkung $Gain_1$ nur um ca. 11%.



(a) Standardabweichung des Dunkelrauschens ($Gain_0$)

(b) Standardabweichung des Dunkelrauschens ($Gain_1$)

Abbildung 4.4.: Mittelwert und Standardabweichung des Dunkelrauschens

In Abbildung 4.5 ist die Standardabweichung des Dunkelrauschens für alle Verstärkungen und Belichtungszeiten als Heatmap dargestellt.

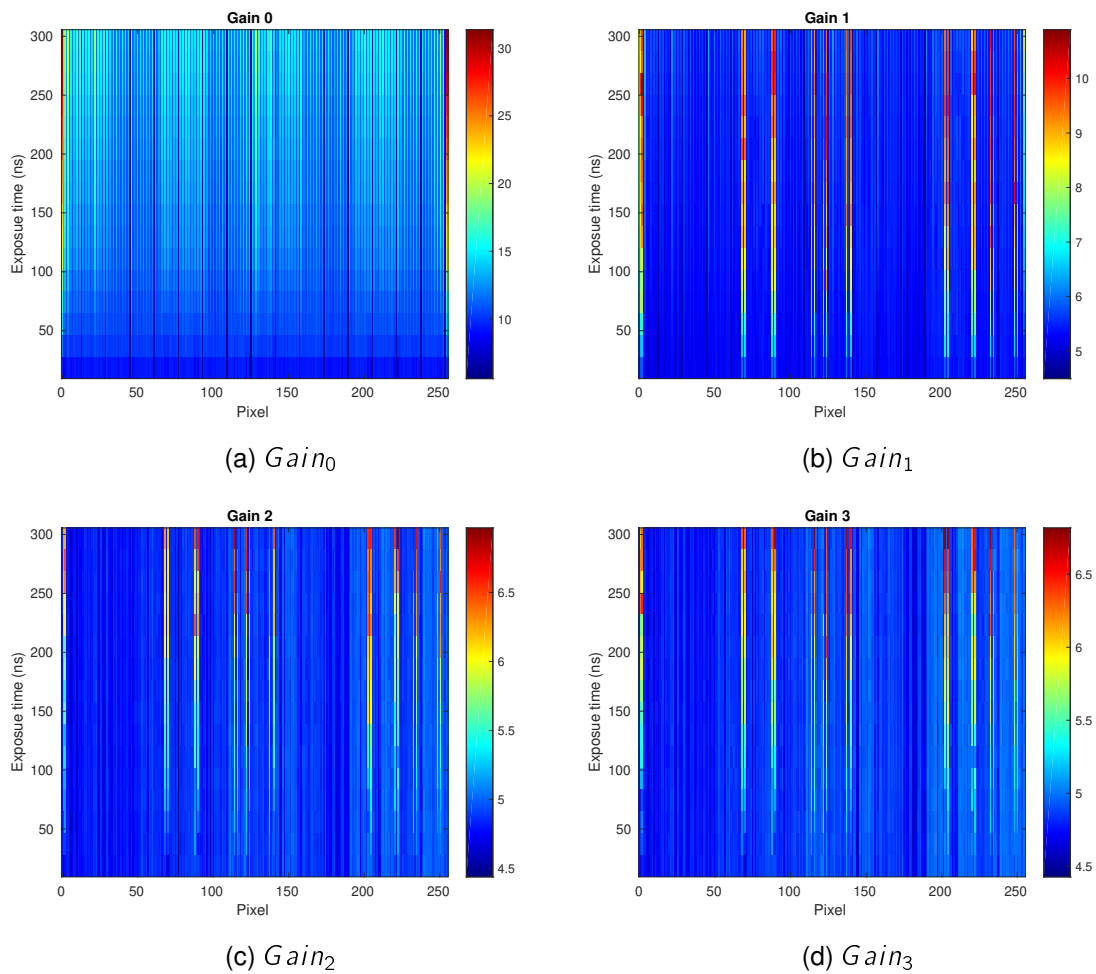


Abbildung 4.5.: Standardabweichung des Dunkelrauschens in Abhängigkeit der Belichtungszeit und der Verstärkung

Die Mittelwerte der Standardabweichungen aller Pixel sind über die Belichtungszeit in Abbildung 4.6 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass sich insbesondere bei der Verstärkung $Gain_0$ die Störung mit der Belichtungszeit vergrößert.

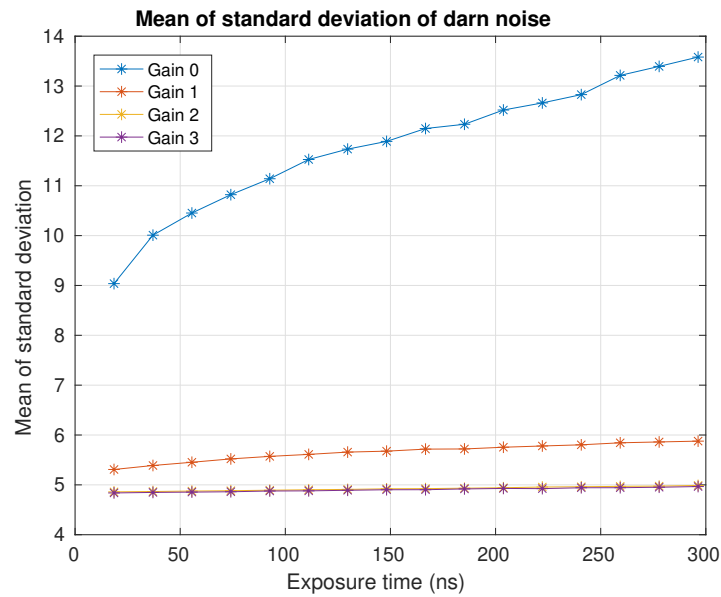


Abbildung 4.6.: Standardabweichung des Dunkelrauschens in Abhängigkeit der Belichtungszeit

4.2. Verstärkung

Mit dem *Gain*-Parameter kann die Verstärkung des KALYPSO eingestellt werden. Die relativen Verstärkungen zueinander werden ermittelt, indem der KALYPSO mit einer Laserdiode beleuchtet wird. Der Strom der Laserdiode wird so eingestellt, dass bei einer eingestellten Verstärkungsstufe ein hohes Signal gemessen wird, welches jedoch noch nicht in der Sättigung ist. Wird die Verstärkungsstufe anschließend auf eine kleinere Verstärkung gestellt, so ist das Verhältnis zwischen diesen beiden Stufen bekannt, indem das Verhältnis der gemessenen Intensitäten berechnet wird. Alle Verhältnisse werden auf die Verstärkung $Gain_1$ bezogen und sind in Tabelle 4.1 enthalten.

Tabelle 4.1.: Verhältnisse von zwei Verstärkungen des KALYPSO

Verhältnis Verstärkungsstufe	Verhältnis Verstärkung
$Gain_0/Gain_1$	1,977
$Gain_1/Gain_2$	10,48
$Gain_1/Gain_3$	11,08

Wird die Verstärkungsstufe $Gain_3$ als Verstärkung eins definiert, so ergeben sich für alle Verstärkungsstufen die Verstärkungen in Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2.: Verstärkungen des KALYPSO

Bezeichnung	Verstärkung
$Gain_0$	21,92
$Gain_1$	11,08
$Gain_2$	1,058
$Gain_3$	1

4.3. Räumliche Charakterisierung

Für die räumliche Charakterisierung wird der KALYPSO mit einer LED beleuchtet. Die LED ist auf den KALYPSO ausgerichtet und kann von einem Motor parallel zu den Photodioden bewegt werden. Die LED hat ein gaußförmiges Strahlprofil. Damit ist es möglich, die Verstärkung der einzelnen Pixel zu bestimmen. Ein Foto des Laboraufbaus ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

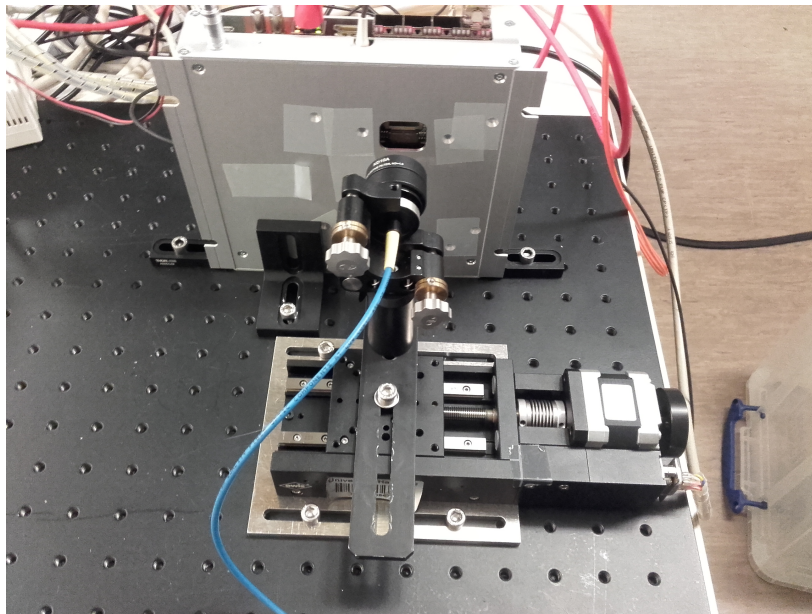


Abbildung 4.7.: Laboraufbau für die Analyse des KALYPSO

In Abbildung 4.8 ist das Resultat für die Verstärkung $Gain_0$ und für die kleinste einstellbare Belichtungszeit von 18,52 ns gegeben. Für jeden Pixel wird zusätzlich der CoM der LED-Position berechnet und eingezeichnet. Zwischen den Pixelpositionen 127 und 128 ist ein deutlicher Sprung des CoM zu erkennen.

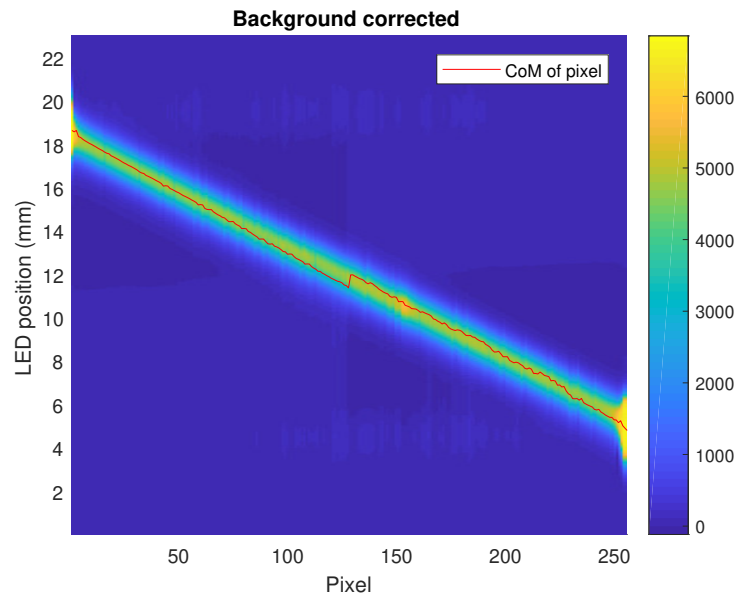


Abbildung 4.8.: Messung von normalverteiltem Licht einer LED an verschiedenen Positionen des KALYPSO

Die Messungen für ausgewählte LED-Positionen ist in Abbildung 4.9 gegeben. Auch hier ist ein Sprung zwischen den Pixeln 127 und 128 zu erkennen. Jeder 16. Pixel (Pixel-Indizes 15, 31, 47, ...) hat teilweise deutlich abweichende Messergebnisse im Vergleich zu den anderen Pixel.

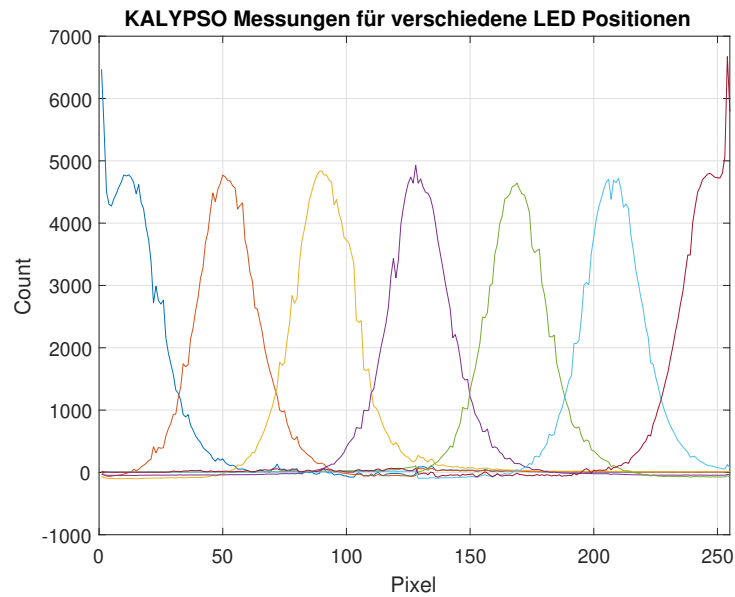


Abbildung 4.9.: Messungen von verschiedenen LED-Positionen

Die Stufen zwischen den beiden Pixeln 127 und 128 sind durch die beiden verbauten GOTTHARD-Chips zu erklären. Sobald ein Pixel eines GOTTHARD-Chips beleuchtet wird, verschiebt sich anscheinend die Referenzspannung durch zu- bzw. abfließende Ströme des GOTTHARD-Chips. Dadurch wird an diesen Pixeln weniger gemessen. In verschiedenen Versuchen wurde dieses Verhalten mit verschiedenen Verstärkungen, Belichtungsintensitäten und Impulsdauern getestet. Die Messungen der Pixel eines GOTTHARD-Chips haben durch die Beleuchtung der Pixel einen Offset, der ungefähr proportional zur Intensität dieser Pixel ist. Bei verschiedenen Verstärkungen, Belichtungsauern, Belichtungsintensitäten kann dieser Fehler in der Anwendung korrigiert und damit deutlich reduziert werden. In Abbildung 4.10 ist dieselbe Messung aus Abbildung 4.8 mit der Korrektur des GOTTHARD-Fehlers abgebildet. Jeder Messwert hat sich dabei um ca. das 0,0008-fache der Intensität der Pixel des GOTTHARD-Chips erhöht, um die Offsetverschiebung zu kompensieren.

$$I_0 = \sum_{k=0}^{127} y(k) \quad (4.1)$$

$$I_1 = \sum_{k=128}^{255} y(k) \quad (4.2)$$

$$y_{corr}(k) = \begin{cases} y(k) + I_0 \cdot 0,0008 & \text{für } k \leq 127 \\ y(k) + I_1 \cdot 0,0008 & \text{für } k > 127 \end{cases} \quad (4.3)$$

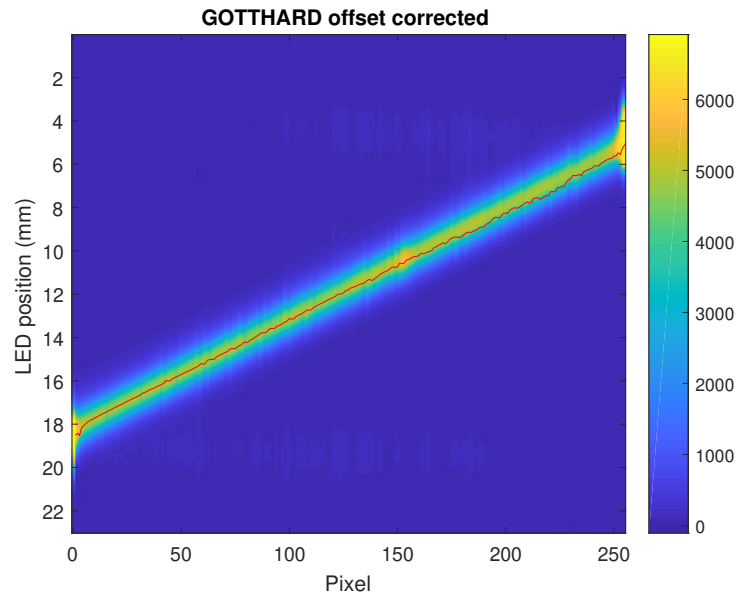


Abbildung 4.10.: Offset-korrigierte Messungen bei verschiedenen LED-Positionen

In Abbildung 4.11 sind die nach der vorherigen Korrektur maximalen Messwerte der einzelnen Pixel dargestellt. Diese können für eine Skalierung der Messwerte verwendet werden.

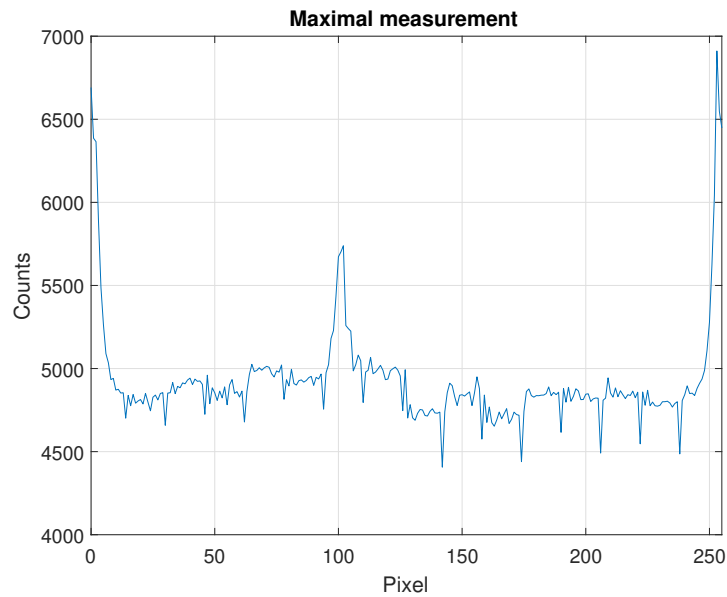


Abbildung 4.11.: Vergleich der einzelnen Pixelverstärkungen für Verstärkung $Gain_0$

Werden nun die Messungen aller Pixel durch ihren jeweiligen maximalen Wert aus Abbildung 4.11 geteilt, so kann die Messung normiert werden. In Abbildung 4.12 ist die normierte Messung dargestellt.

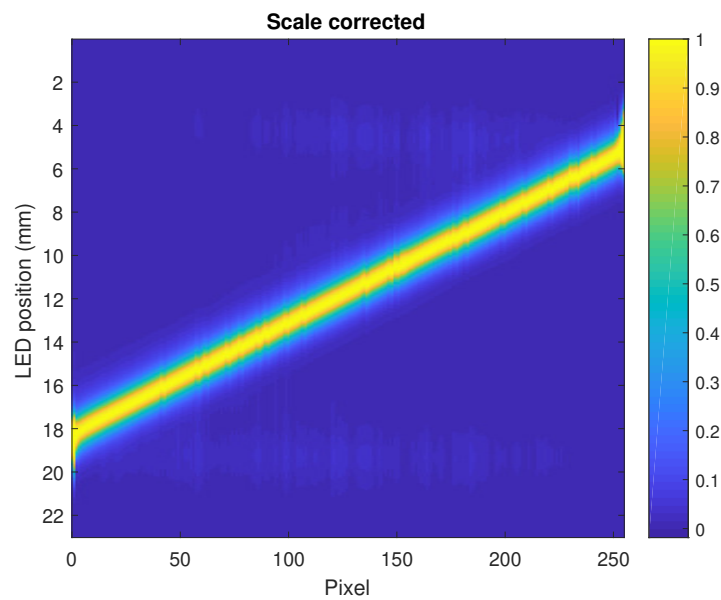


Abbildung 4.12.: Skalierte Messungen bei verschiedenen LED-Positionen

In Abbildung 4.13 sind die Messungen verschiedener LED-Positionen dargestellt. Trotz der vorherigen Normierung sind an einigen Pixelpositionen Abweichungen der Signalverläufe zu erkennen.

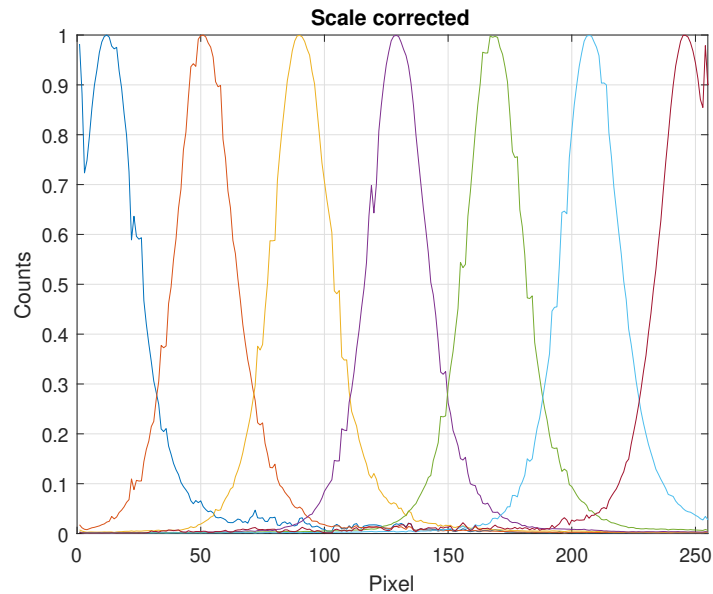


Abbildung 4.13.: Auswahl skaliertener Messungen bei verschiedenen LED-Positionen

4.4. Zeitliche Charakterisierung

4.4.1. Zeitliche Charakterisierung des Ce:YAG-Kristalls

Zunächst wird die zeitliche Charakterisierung des Ce:YAG-Kristalls untersucht. In Abbildung 4.14 ist die Impulsantwort des Ce:YAG-Kristalls dargestellt. Die Aufzeichnung erfolgt durch eine Bestrahlung des Ce:YAG-Kristalls mit FLASH. Eine Photodiode nimmt den zeitlichen Verlauf der optischen Fluoreszenzstrahlung auf. Der Strom durch die Photodiode ist dabei proportional zum eintreffenden Licht und wird über einen Messwiderstand vom Oszilloskop aufgezeichnet. Der Ce:YAG-Kristall hat eine Zeitkonstante von ungefähr 148 ns . Dieser Zeitpunkt ist in der Abbildung in rot eingezeichnet.

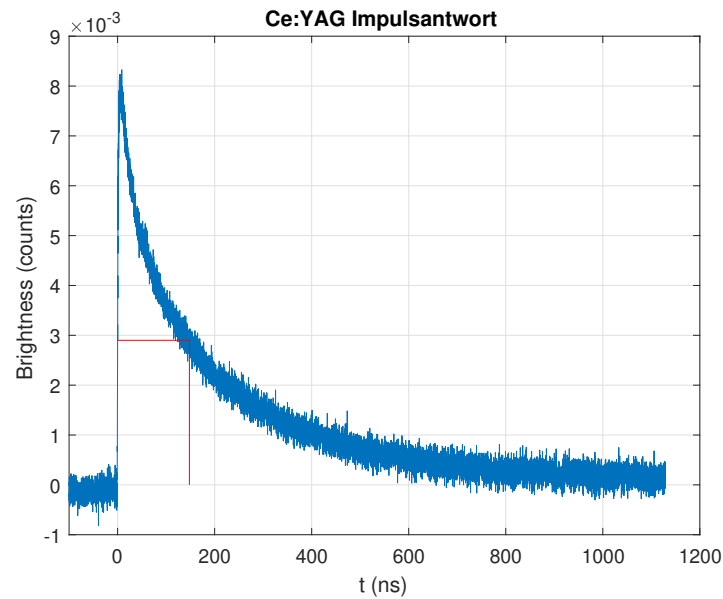


Abbildung 4.14.: Impulsantwort des Ce:YAG-Kristalls

4.4.2. Zeitlicher Verlauf der Intensitätsmessung

Im Folgenden wird der KALYPSO zeitlich charakterisiert. In Abbildung 4.15 ist die Intensität von XUV-Pulsen gemessen an FLASH mit einer Impulsfrequenz von 200 kHz über die Zeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der KALYPSO auch bei nicht vorhandenen XUV-Lichtimpulsen noch Intensitäten von vorherigen XUV-Lichtimpulsen misst. Bei den Intensitätsmessungen nach dem eigentlichen Lichtimpuls handelt es sich nicht um Exponentialfunktionen. Daher ist eine Software-Korrektur mit einem PDT1-Glied nicht sinnvoll.

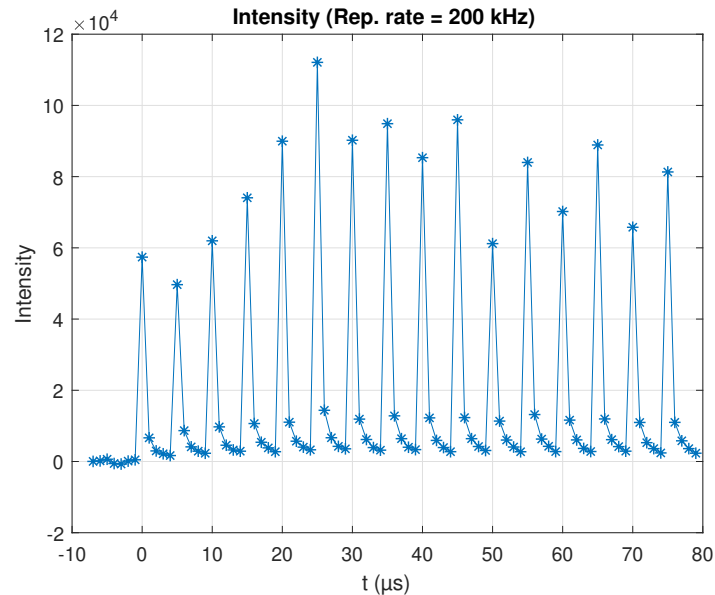
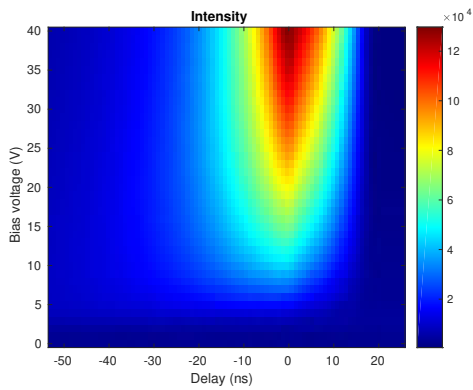


Abbildung 4.15.: Intensität über die Zeit bei 200 kHz am FLASH

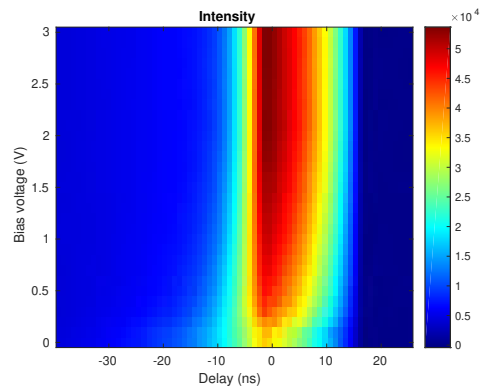
4.4.3. Bias-Spannung

In den Abbildungen 4.16 ist der Einfluss der Bias-Spannung und des Belichtungszeitpunkts auf die Intensität dargestellt. Dabei wird der KALYPSO mit einer LED mit einer Impulszeit im Pikosekundenbereich und einer Frequenz von 1 MHz bestrahlt. Mit dem Parameter *Delay* wird die Intensität an verschiedenen Belichtungszeitpunkten und mit verschiedenen Bias-Spannungen und einer Belichtungszeit von 18, 52 ns gemessen. Je größer der Parameter *Delay*, desto später findet der Lichtimpuls statt. Der Nullpunkt der *Delay*-Achse ist so gewählt, dass dort die größte Intensität gemessen wird.

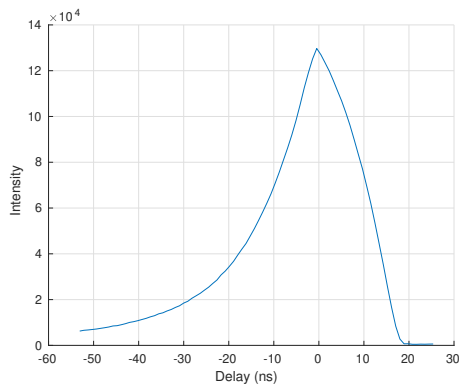
In den Abbildungen 4.16a (Si-KALYPSO) und 4.16b (InGaAs-KALYPSO) sind die gemessenen Intensitäten für verschiedene Belichtungszeitpunkte und Bias-Spannungen dargestellt. In den Abbildungen 4.16c und 4.16d ist die Intensität bei maximaler Bias-Spannung in Abhängigkeit des Belichtungszeitpunktes dargestellt. In den Abbildungen 4.16e und 4.16f ist die Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung bei dem Belichtungszeitpunkt mit maximaler Intensität dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei dem Si-KALYPSO die maximale Intensität auch bei einer Bias-Spannung von 40 V noch nicht erreicht ist. Bei dem InGaAs-KALYPSO ist die maximale Intensität hingegen ab ca. zwei Volt erreicht.



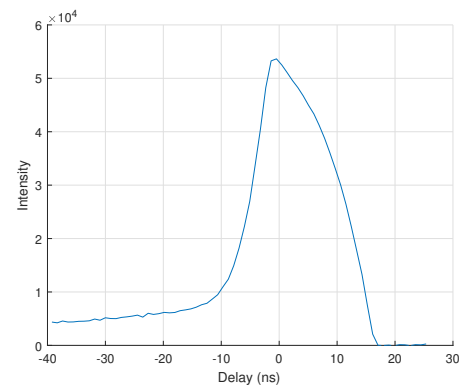
(a) Si: Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung und des Belichtungszeitpunkts



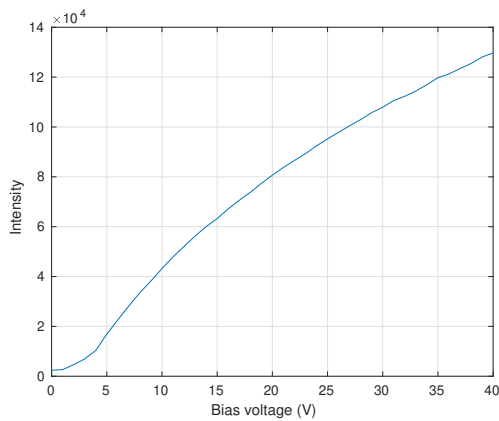
(b) InGaAs: Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung und des Belichtungszeitpunkts



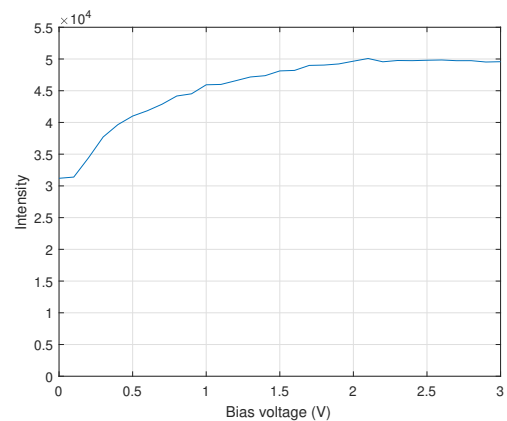
(c) Si: Intensität in Abhängigkeit des Belichtungszeitpunkts (Bias-Spannung=40 V)



(d) InGaAs: Intensität in Abhängigkeit des Belichtungszeitpunkts (Bias-Spannung=3 V)



(e) Si: Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung (optimaler Belichtungszeitpunkt)



(f) InGaAs: Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung (optimaler Belichtungszeitpunkt)

Abbildung 4.16.: Intensität in Abhängigkeit der Bias-Spannung und des Belichtungszeitpunkts

4.4.4. Belichtungszeit

In Abbildung 4.17 ist die gemessene Intensität in Abhängigkeit der Belichtungszeit für den Laborversuch bei konstantem Licht, für den Versuch mit ultrakurzen XUV-Impulsen gemessen an FLASH und das Integral der Impulsantwort des Ce:YAG-Kristalls aus Kapitel 4.4.1 gegenübergestellt. Da bei den Versuchen die Lichtquellen eine unterschiedliche und nicht bekannte Lichtstärke haben, sind die Kurven so skaliert, dass sie bei der kleinsten Belichtungszeit ungefähr denselben Wert haben.

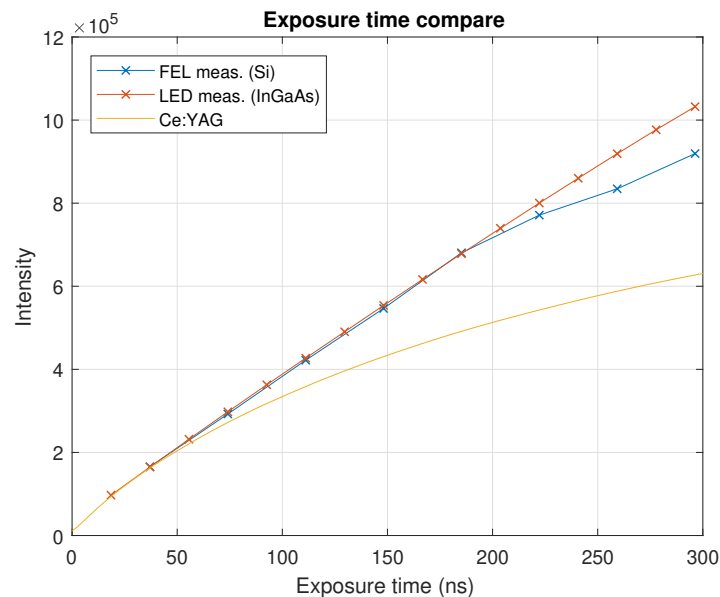


Abbildung 4.17.: Intensität in Abhängigkeit der Belichtungszeit

Entsprechend der Erwartung hat die Intensität bei der Messung mit konstantem Licht über die Belichtungszeit einen mehr oder weniger proportionalen Anstieg. Bei der Messung an FLASH wird der Mittelwert der Intensität von ca. 48.000¹ XUV-Lichtimpulsen für verschiedene Belichtungszeiten berechnet. Im Vergleich der Messung mit konstantem Licht hat die Intensitätsmessung an FLASH bei hohen Belichtungszeiten einen abflachenden Verlauf. Im Vergleich zur theoretisch erwarteten Kurve, die der Kurve des Ce:YAG-Kristalls entspricht, ist jedoch eine deutliche Differenz zu erkennen.

¹Eine Minute mit 80 XUV-Lichtimpulsen pro Impulszug und zehn Impulszügen pro Sekunde.

4.5. Vergleich mit anderen Detektoren

Nachfolgend werden die Messungen des KALYPSO mit anderen Detektoren verglichen.

4.5.1. Vergleich mit Spektralmessung

Die ICCD-Kamera misst für einen Lichtimpuls in einer Impulsfolge das Spektrum des Impulses. Die Kamera filmt die bestrahlte Seite des Ce:YAG-Kristalls, der KALYPSO nimmt die Lichtemission der anderen Seite auf. In Abbildung 4.18 ist die Korrelation der Intensität und des CoM von der ICCD-Kamera mit dem KALYPSO dargestellt.

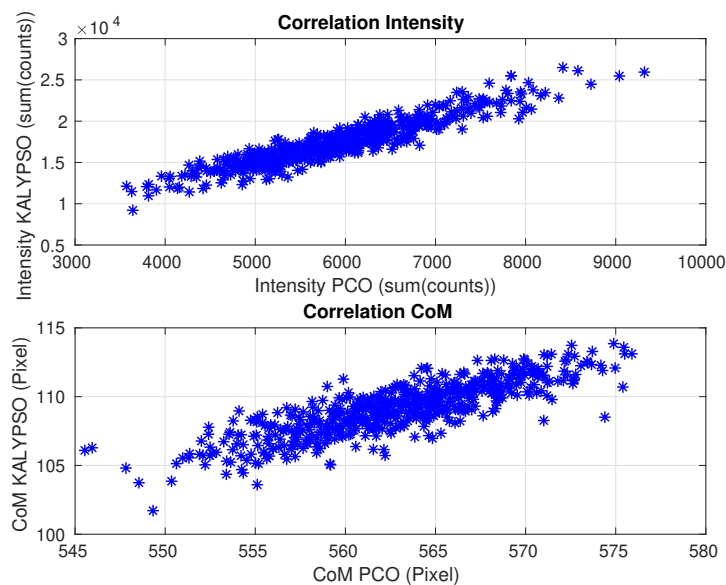


Abbildung 4.18.: Vergleich KALYPSO mit Spektralmessung

4.5.2. Vergleich mit Impulsenergie

Der GMD misst die Energie der XUV-Lichtimpulse. In Abbildung 4.19 ist für die Verstärkung $Gain_0$ und eine Belichtungszeit von $5 \cdot 18,52 \text{ ns} = 92,59 \text{ ns}$ die Korrelation zwischen der Intensität des KALYPSO und der Impulsenergie des GMD dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich beide Messgeräte im unteren Messbereich proportional zueinander verhalten. Im oberen Messbereich misst der KALYPSO die Intensität überproportional.

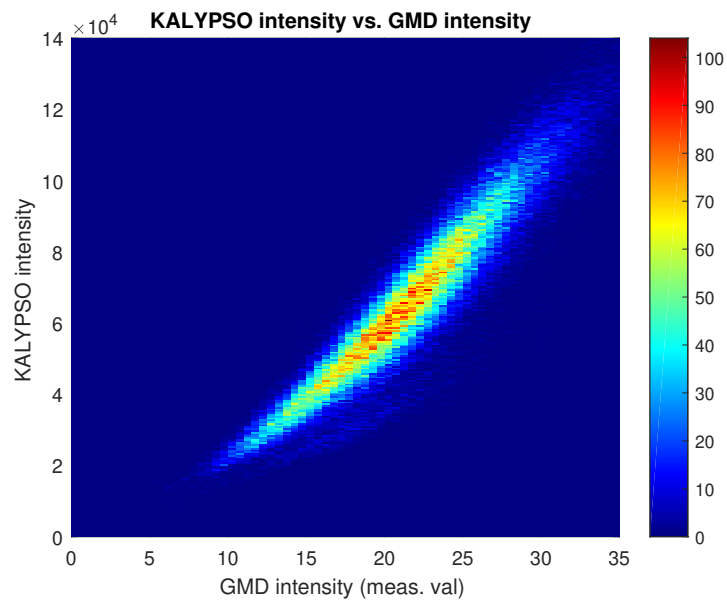


Abbildung 4.19.: Vergleich KALYPSO mit GMD-Intensität

4.5.3. Vergleich mit Elektronenenergie

Im Folgenden wird der errechnete CoM der Wellenlänge mit der vom sogenannten *Energy Server* gemessenen Elektronenenergie verglichen. Die Elektronenenergie wird dabei auf der Abszisse als Kehrwert des Quadrates der Elektronenenergie dargestellt. Dadurch ist als Resultat eine Gerade zu erwarten. In Abbildung 4.20 ist die Korrelation zwischen beiden Messgeräten als Heatmap dargestellt.

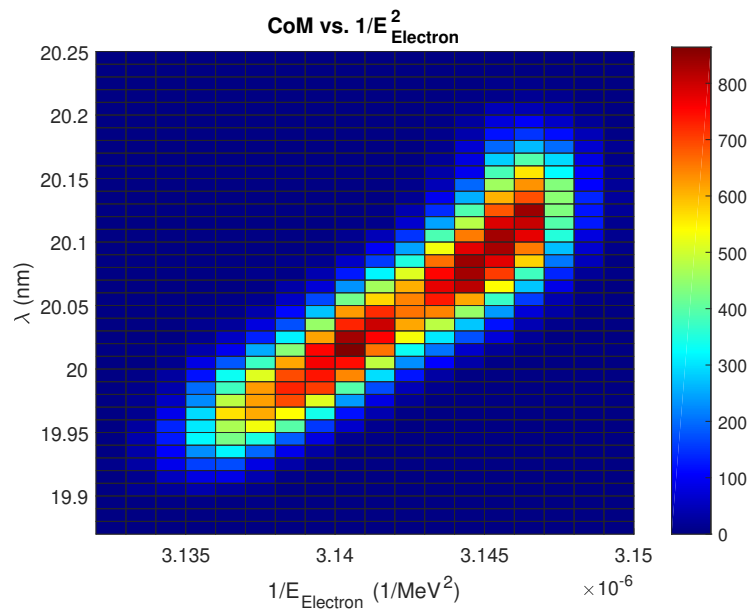


Abbildung 4.20.: Korrelation von Elektronenenergie und CoM

Für die Messung der Elektronenenergie muss das Messgerät vor der Messung kalibriert werden. Diese Kalibrierung wurde vor der Messung jedoch nicht durchgeführt. Daher hat die Messung erhebliche Abweichungen von den erwarteten Messwerten. Dies wird in den Abbildungen 4.21 und 4.22 verdeutlicht. In Abbildung 4.21 ist der Verlauf der Beschleunigungsspannung des Beschleunigermoduls und der gemessenen mittleren Elektronenenergie dargestellt.

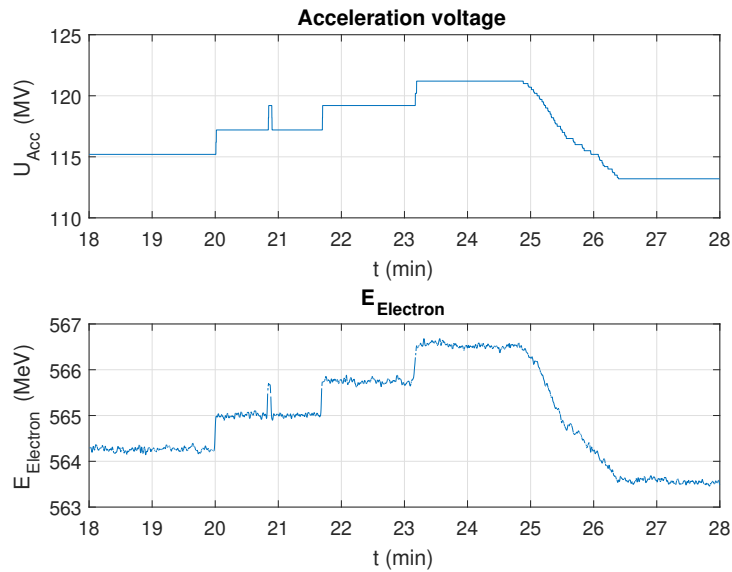


Abbildung 4.21.: Mittlere Elektronenenergie über die Zeit im Vergleich mit der Beschleunigungsspannung

In Abbildung 4.22 ist für diesen Zeitraum die Elektronenenergie über die Beschleunigungsspannung dargestellt. Mit der theoretisch erwarteten Steigung $\frac{\partial E_{kin}}{\partial U_{Acc}} = 1 e$ wird bei den verschiedenen Messungen der Elektronenenergie über die Beschleunigungsspannung per Regression eine Steigung von $\frac{\Delta E_{kin}}{\Delta U_{Acc}} = 0,3708 e$ ermittelt.

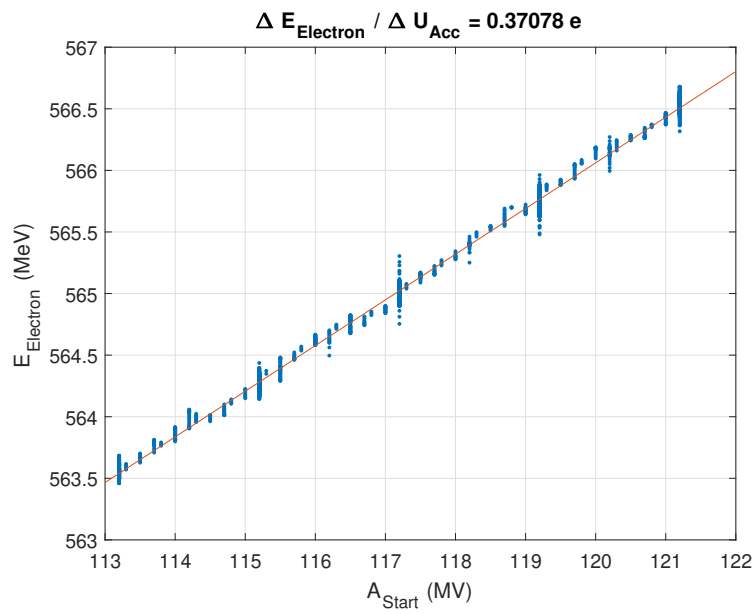


Abbildung 4.22.: Korrelation der mittleren Elektronenenergie und der Beschleunigungsspannung

5. Regelung der Wellenlänge des Freien-Elektronen-Lasers

Der KALYPSO soll dafür eingesetzt werden die mittlere Wellenlänge sowie die Änderung der mittleren Wellenlänge in einem XUV-Lichtimpulszug des FLASH zu regeln. In diesem Kapitel wird zunächst das zu regelnde System beschrieben und das Konzept für die Regelung vorgestellt. Anschließend wird die vorgestellte Regelung in der Praxis getestet und das Systemverhalten mit der Theorie verglichen.

5.1. Systembeschreibung

Aus Kapitel 2 sind bereits die physikalischen Grundlagen für diese Arbeit bekannt. Mit einer Zykluszeit von 100 ms werden vom FLASH1 eine variable Anzahl von XUV-Lichtimpulsen $N \leq 400$ mit einer Frequenz von bis zu 1 MHz emittiert. Die XUV-Lichtimpulse können dabei eine Wellenlänge zwischen 4,2 nm und 51 nm haben. Mit einem internen Regler wird bereits die Beschleunigungsspannung in den Beschleunigermodulen während eines XUV-Lichtimpulszugs geregelt. Der Stellgrößenverlauf über den XUV-Lichtimpulszug wird für diesen Regler durch zwei DOOCS-Parameter vorgegeben. Die hier entworfene Regelung nutzt die Führungsgröße dieses Reglers als Stellgröße, um die Wellenlänge der XUV-Lichtimpulse zu regeln.

5.1.1. Regelgrößen

Es werden zwei Regelgrößen geregelt. Einerseits wird der Mittelwert der mittleren Wellenlänge aller Lichtimpulse eines Lichtimpulszugs geregelt, andererseits die Änderung der mittleren Wellenlänge vom ersten bis zum letzten Lichtimpuls eines Lichtimpulszugs.

Zunächst wird für jeden Lichtimpuls, der auf den KALYPSO trifft der CoM berechnet (vgl. Kapitel 3.3). Die erste Regelgröße λ_{Mean} ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Massenschwerpunkte der Lichtimpulse eines Lichtimpulszugs. Die zweite Regelgröße λ_{Inc} gibt

den Wellenlängenversatz in einem Lichtimpulszug an. Dafür wird die Steigung der Massenschwerpunkte über einen Lichtimpulszug mittels linearer Regression bestimmt. Dabei wird für die x-Werte der Lichtimpulsindex verwendet und für die y-Werte der jeweilige CoM. Der daraus resultierende Steigungsparameter ergibt multipliziert mit der Anzahl der Lichtimpulse minus eins den Wellenlängenversatz λ_{Inc} vom ersten bis zum letzten Lichtimpuls.

5.1.2. Stellgrößen

Als Stellgrößen für die Regelung stehen zwei Parameter im DOOCS-System zur Verfügung. In den Beschleunigermodulen von FLASH lädt sich die Beschleunigungsspannung $40 \mu s$ vor dem ersten XUV-Lichtimpuls auf A_{Start} auf. A_{Start} ist eine DOOCS-Variable und gibt die Beschleunigungsspannung zu diesem Zeitpunkt in Megavolt an. Mit einem weiteren Parameter A_{Inc} wird die Beschleunigungsspannung daraufhin für $600 \mu s$ jede Mikrosekunde weiter erhöht bzw. bei einem negativen Wert kleiner. Die Änderung der Beschleunigungsspannung beträgt $\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{1}{75} \cdot A_{Inc}$ ¹. Nach $600 \mu s$ endet der Lichtimpulszug und die Beschleunigungsspannung fällt wieder Richtung Null Volt ab. In Abbildung 5.1 ist der Verlauf der Beschleunigungsspannung für einen Lichtimpulszug jeweils für eine Impulswiederholfrequenz von $200 kHz$ und $500 kHz$ dargestellt.

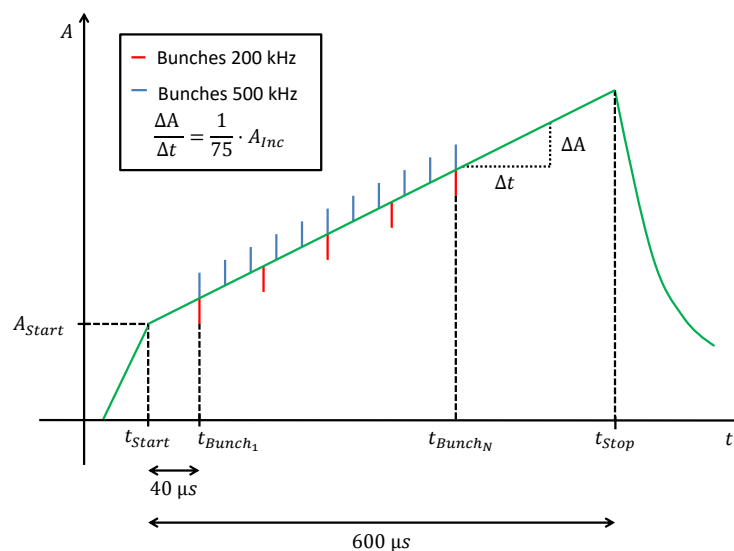


Abbildung 5.1.: Verlauf der Beschleunigungsspannung

¹Der Vorfaktor $\frac{1}{75}$ ergibt sich aus dem Quotienten der Zahl 8, welche bei der Berechnung in Festkomma-Arithmetik verwendet wird und der Zeitdauer $600 \mu s$. A_{Inc} hat die Einheit $\frac{MV}{\mu s}$.

Die Beschleunigungsspannung eines Lichtimpulses k lässt sich mit Gleichung 5.1 aus den beiden Stellgrößen und der Impulswiederholfrequenz f_{Rep} berechnen.

$$U_{Acc_k} = A_{Start} + \frac{(k-1) \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc}}{f_{Rep}} + 40 \mu s \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc} \quad (5.1)$$

Die mittlere Beschleunigungsspannung kann entsprechend mit Gleichung 5.2 berechnet werden.

$$U_{Acc_{Mean}} = A_{Start} + \frac{\frac{N-1}{2} \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc}}{f_{Rep}} + 40 \mu s \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc} \quad (5.2)$$

Der Anstieg der Beschleunigungsspannung vom ersten bis zum letzten Lichtimpuls lässt sich mit Gleichung 5.3 berechnen.

$$U_{Acc_{Inc}} = \frac{\frac{1}{75} \cdot A_{Inc}}{f_{Rep}} \cdot (N-1) \quad (5.3)$$

In Abbildung 5.2 ist die Systembeschreibung des zu regelnden Systems dargestellt.

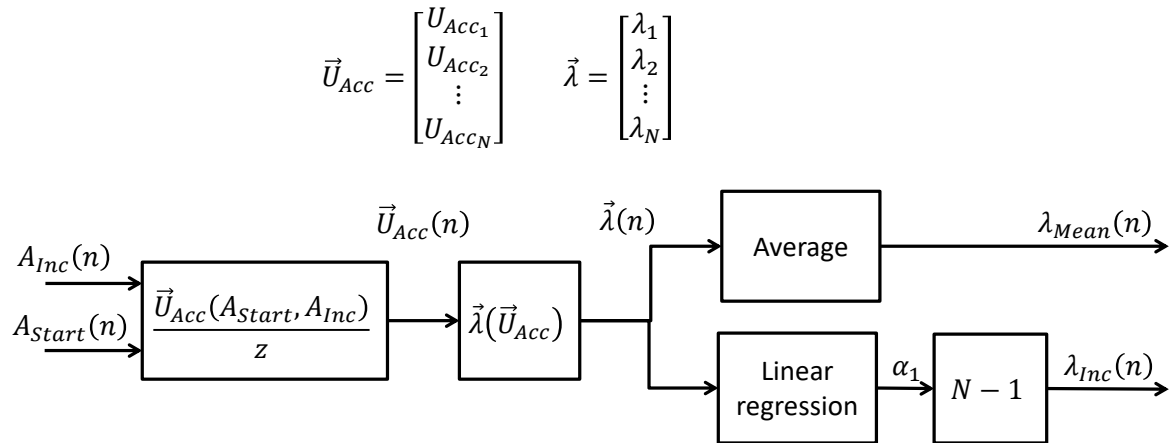


Abbildung 5.2.: Systembeschreibung

5.2. Systemsimulation

Die Nutzung von FLASH ist im Rahmen dieser Arbeit nur selten für Tests nutzbar. Außerdem kann ein Fehler in der Regelungssoftware zu einer Beschädigung von Teilen von FLASH führen. Daher ist es sinnvoll, das Verhalten des Systems zunächst in einer vereinfachten Simulation nachzubilden. Mit der Simulation ist es möglich, die Regelungssoftware ausgiebig zu testen.

Zunächst wird der direkte Zusammenhang zwischen der Beschleunigungsspannung und der Wellenlänge der Photonen ermittelt. Dafür wird Gleichung 2.2 in Gleichung 2.4 eingesetzt und ergibt damit Gleichung 5.4.

$$\gamma = \frac{e \cdot U_{acc}}{E_0} + 1 = \frac{E_0 + e \cdot U_{acc}}{E_0} \quad (5.4)$$

Gleichung 5.4 kann wiederum in Gleichung 2.6 eingesetzt werden, womit in Gleichung 5.5 der Zusammenhang zwischen Beschleunigungsspannung und Photonenwellenlänge hergestellt ist.

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \cdot \frac{E_0^2}{(E_0 + e \cdot U_{acc})^2} \quad (5.5)$$

Wird Gleichung 5.5 nach der Beschleunigungsspannung umgestellt, kann aus der vorgegebenen Wellenlänge die Beschleunigungsspannung aller Beschleunigermodule ermittelt werden.

$$U_{Acc}(\lambda) = \frac{E_0}{e} \left(\sqrt{\frac{\lambda_u}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} - 1 \right) \quad (5.6)$$

Bei der Initialisierung der Systemsimulation wird der aktuelle Startwert der Beschleunigungsspannung A_{Start_0} des Beschleunigermoduls übergeben. Mit dem ebenfalls übergebenen Wellenlängenbereich λ_0 kann die Spannung aller anderen Beschleunigermodule mit Gleichung 5.6 bestimmt werden. Die Differenz aus der gesamten Beschleunigungsspannung U_{Acc} und der Beschleunigungsspannung des Beschleunigungsmoduls wird in der Simulation als U_{Offset} gespeichert.

$$U_{Offset} = U_{Acc}(\lambda_0) - A_{Start_0} \quad (5.7)$$

$$U_{Offset} = \frac{E_0}{e} \left(\sqrt{\frac{\lambda_u}{2 \cdot \lambda_0} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} - 1 \right) - A_{Start_0} \quad (5.8)$$

Die gesamte Beschleunigungsspannung für die Simulation der einzelnen Zeilenbilder wird schließlich aus der Stellgröße A_{Start} und dem Offset berechnet.

$$U_{Acc_k} = A_{Start} + \frac{(k-1) \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc}}{f_{Rep}} + 40 \mu s \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc} + U_{Offset} \quad (5.9)$$

Aus den Beschleunigungsspannungen der Impulse können mit Gleichung 5.5 schließlich die einzelnen Wellenlängen berechnet werden.

Mithilfe der Spektralachse, die aus dem Wellenlängenbereich λ_0 bei der Initialisierung berechnet wird (Kapitel 3.2) und der MATLAB-Funktion *normpdf* können schließlich die einzelnen Zeilenbilder simuliert werden. Damit haben die Simulation und das reale System

dieselbe Schnittstelle und die gesamte Regelungssoftware kann an der Simulation getestet werden.

5.3. Linearisierung

Die Regelung arbeitet stets in einem sehr engen Wellenlängenbereich. Daher wird das System an einem Arbeitspunkt linearisiert. Dieser Arbeitspunkt entspricht dem vorgegebenen Wellenlängenbereich aus Kapitel 3.

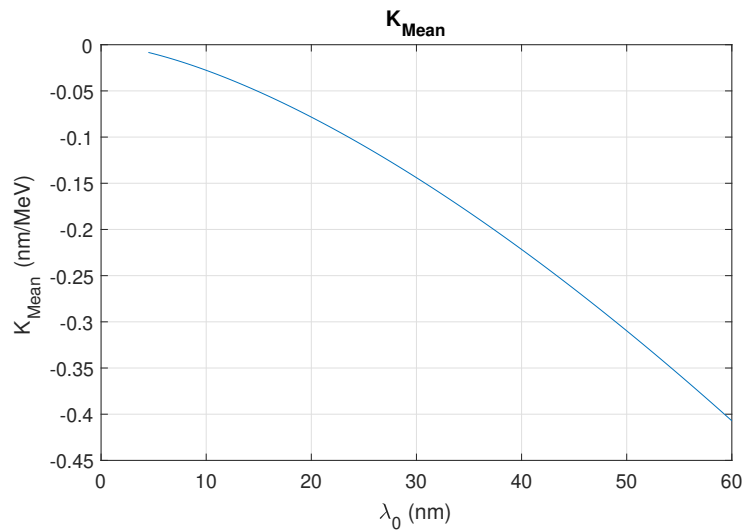
Die Änderung der Wellenlänge durch eine Änderung der Beschleunigungsspannung lässt sich durch die partielle Ableitung berechnen. Die partielle Ableitung von Gleichung 5.5 nach der Beschleunigungsspannung ergibt sich in Gleichung 5.10 und wird als K_{Mean} definiert. K_{Mean} gibt an, wie sich die mittlere Wellenlänge eines Lichtimpulszuges λ_{Mean} in Abhängigkeit einer Änderung der Beschleunigungsspannung ändert.

$$K_{Mean} = \frac{\partial \lambda}{\partial U_{acc}} = -\frac{\lambda_u}{2} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \cdot E_0^2 \cdot \frac{2 \cdot e}{(E_0 + e \cdot U_{acc})^3} \quad (5.10)$$

Der Arbeitspunkt soll sich aus dem vorgegebenen Wellenlängenbereich λ_0 ergeben, daher wird Gleichung 5.5 nach der Beschleunigungsspannung umgestellt und in Gleichung 5.10 eingesetzt. Die Wellenlänge λ wird durch die Wellenlänge am Arbeitspunkt λ_0 ersetzt. K_{Mean} lässt sich dann mit Gleichung 5.11 berechnen.

$$K_{Mean} = -\frac{2 \cdot e}{E_0 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_u}{2} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)}} \cdot \lambda_0^{3/2} \quad (5.11)$$

In Abbildung 5.3 ist K_{Mean} als Funktion der Wellenlänge λ dargestellt.

Abbildung 5.3.: K_{Mean} als Funktion der Wellenlängenbereich λ_0

Da nun die Änderung der Wellenlänge aus der Änderung der Beschleunigungsspannung bekannt ist, kann ebenfalls die Änderung des Wellenlängenversatzes λ_{Inc} aus der Änderung des Parameters A_{Inc} berechnet werden. Aus dem Parameter K_{Mean} lässt sich mit Gleichung 5.3 der Parameter K_{Inc} berechnen (Gleichung 5.12 und 5.13).

$$K_{Inc} = K_{Mean} \cdot U_{AccInc} \quad (5.12)$$

$$K_{Inc} = K_{Mean} \cdot \frac{\frac{1}{75} \cdot A_{Inc}}{f_{Rep}} \cdot (N - 1) \quad (5.13)$$

Nach der Linearisierung vereinfacht sich das Blockschaltbild. Dieses ist in Abbildung 5.4 gegeben.

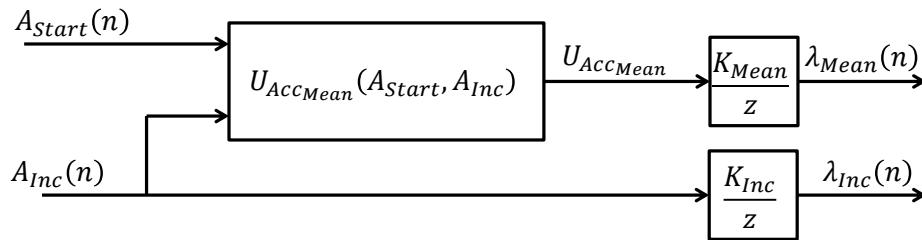


Abbildung 5.4.: Linearisierte Systembeschreibung

5.4. Systementkopplung

Gleichung 5.2 kann nach A_{Start} umgestellt werden (Gleichung 5.14). Somit können die mittlere Beschleunigungsspannung $U_{AccMean}$ und die Differenzspannung U_{AccInc} vorgegeben werden, um die Stellgröße A_{Start} zu errechnen.

$$A_{Start} = U_{AccMean} - \frac{\frac{N-1}{2} \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc}}{f_{Rep}} - 40 \mu s \cdot \frac{1}{75} \cdot A_{Inc} \quad (5.14)$$

Mit der Systementkopplung vereinfacht sich das System zu zwei voneinander unabhängigen diskreten Systemen erster Ordnung.

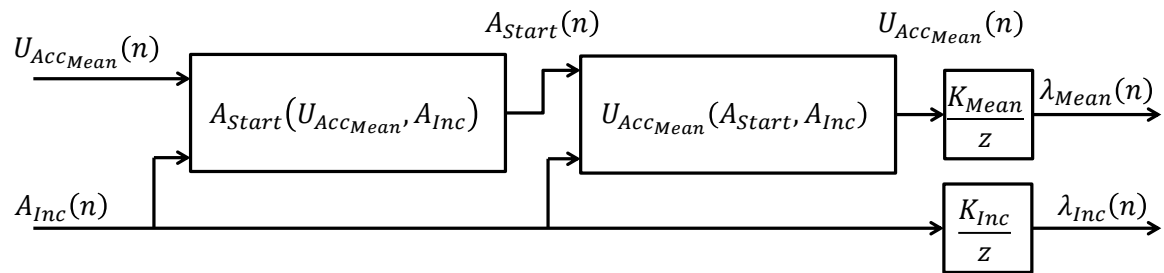


Abbildung 5.5.: Systembeschreibung mit Systementkopplung

Durch die Linearisierung und die Systementkopplung entstehen zwei gleiche diskrete Systeme erster Ordnung mit unterschiedlichen Verstärkungen. Das hat den Vorteil, dass die Auslegung und die Implementierung der Regelung nur einmalig stattfinden muss. Die entkoppelten Teilsysteme sind in der Abbildung 5.6 abgebildet.

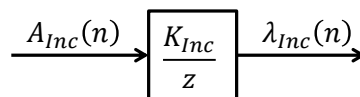
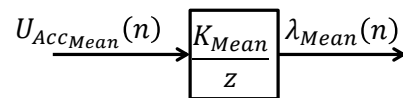


Abbildung 5.6.: Entkoppelte Systembeschreibung

5.5. Reglerentwurf mit IT1-Regler

In Abbildung 5.6 ist das zu regelnde System beschrieben. Beide Teilsysteme haben dieselbe Struktur, daher wird im Folgenden die Regelungsstruktur für ein Teilsystem vorgestellt. Jedes Teilsystem hat die diskrete Übertragungsfunktion in Gleichung 5.15.

$$G_S(z) = \frac{K_S}{z} \quad (5.15)$$

Dabei entspricht der Verstärkungsfaktor K_S je nach Teilsystem dem Faktor K_{Mean} oder K_{Inc} aus den Gleichungen 5.11 bzw. 5.13.

Als Ansatz für die Regelung wird ein PT1-Glied in Reihe mit einem I-Regler gewählt. Eine Regelung nur mit einem I-Regler wäre ebenfalls möglich. Da die zu regelnden Signale jedoch

sehr störbehaftet sind, bietet sich eine zusätzliche Filterung mit einem PT1-Glied an. Die Übertragungsfunktion des Reglers ist in Gleichung 5.16 gegeben [10, S. 679].

$$G_R(z) = K_I \cdot \frac{z}{z - a_R} \cdot \frac{z}{z - 1} \quad (5.16)$$

Das Blockschaltbild des geregelten Teilsystems ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

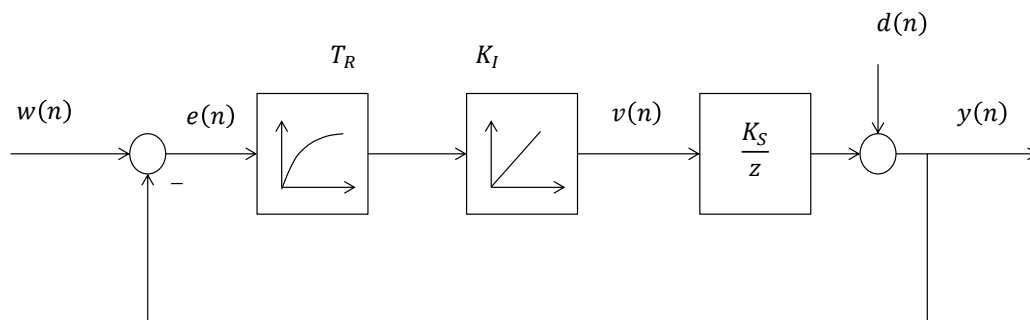


Abbildung 5.7.: Regelungsstruktur eines Teilsystems

Der offene Regelkreis ergibt sich aus der Multiplikation der Übertragungsfunktion des Reglers mit der Strecke (Gleichung 5.17).

$$G_O(z) = G_R(z) \cdot G_S(z) = K_I \cdot K_S \cdot \frac{z}{(z - a_R) \cdot (z - 1)} \quad (5.17)$$

Dabei ist a_R eine Substitution, die sich aus der Zykluszeit $T_S = 100 \text{ ms}$ und der Zeitkonstante T_R des PT1-Gliedes ergibt [10, S. 679].

$$a_R = e^{-\frac{T_S}{T_R}} \quad (5.18)$$

Die Regelung wird nach der Störübertragungsfunktion mittels Polplatzierung ausgelegt.

$$Y(z) = D(z) - G_O(z) \cdot Y(z) \quad (5.19)$$

$$G_D(z) = \frac{Y(z)}{D(z)} = \frac{1}{1 + G_O(z)} \quad (5.20)$$

$$G_D(z) = \frac{z^2 - z \cdot (1 + a_R) + a_R}{z^2 - z \cdot (1 + a_R) + a_R + K_S \cdot K_I \cdot z} \quad (5.21)$$

Das charakteristische Polynom ist der Nenner der Störübertragungsfunktion und in Gleichung 5.22 gegeben.

$$N(z) = z^2 - z \cdot (1 + a_R) + a_R + K_S \cdot K_I \cdot z \quad (5.22)$$

Durch Polvorgabe können nun die Reglerparameter mit $z_{1,2} = a_D$ bestimmt werden.

$$N(z) \stackrel{!}{=} (z - a_D) \cdot (z - a_{D2}) \quad (5.23)$$

Bei a_D handelt es sich um eine Substitution, die sich aus der Zeitkonstante T_D und der Zykluszeit T_S ergibt [10, S. 679].

$$a_D = e^{-\frac{T_S}{T_D}} \quad (5.24)$$

$$N(z) = z^2 - z \cdot 2 \cdot a_D + a_D^2 \quad (5.25)$$

Mittels Koeffizientenvergleich der Gleichungen 5.22 und 5.25 können nun die Reglerparameter a_R und K_I berechnet werden.

$$a_R = a_D^2 \quad (5.26)$$

$$K_I = \frac{1}{K_S} \cdot (1 + a_R - 2 \cdot a_D) \quad (5.27)$$

Wird Gleichung 5.26 in Gleichung 5.27 eingesetzt, so entsteht ein Binom und K_I kann entsprechend mit Gleichung 5.28 berechnet werden.

$$K_I = \frac{1}{K_S} \cdot (a_D - 1)^2 \quad (5.28)$$

Um eine leicht verständliche Parametrierung der Regler zu ermöglichen, wird eine Zeit $T_{1/2}$ definiert. Diese gibt an, nach welcher Zeit eine sprunghafte Störung zur Hälfte ausgeregelt wird. Die Zeitkonstante T_D wird aus $T_{1/2}$ und dem empirisch ermittelten Faktor 0,5952 errechnet.

$$T_D = 0,5952 \cdot T_{1/2} \quad (5.29)$$

5.6. Stabilitätsprüfung

Die Nullstellen des charakteristischen Polynoms wurden bereits in Gleichung 5.23 mit $z_{1,2} = a_D$ vorgegeben. Der geschlossene Kreis ist E/A-stabil, wenn alle Pole betragsmäßig kleiner als eins sind [10, S. 524].

$$|a_D| < 1 \quad (5.30)$$

Durch Rücksubstitution von a_D ergibt sich Gleichung 5.31.

$$\left| e^{-\frac{T_S}{T_D}} \right| < 1 \quad (5.31)$$

Gleichung 5.31 gilt für $T_D > 0$. Somit ist der Regelkreis für $T_D > 0$ E/A-stabil.

5.7. Führungsgrößenaufschaltung

Die Reglerstruktur aus Abbildung 5.7 wird um eine Führungsgrößenaufschaltung erweitert, damit Änderungen der Führungsgröße direkt auf die Stellgröße wirken. Bei der Führungsgrößenaufschaltung wird ein Proportionalglied verwendet. Dieses erhält als Verstärkung den Kehrwert der Verstärkung der Regelstrecke. Damit ist es möglich, Führungsgrößenänderungen innerhalb von einem Zyklus am Ausgang zu erhalten. Der Regler hat damit nur noch die

Funktion, Störgrößen auszuregeln. Die Steuerung des Systems erfolgt über die Führungsgrößenaufschaltung. Die Führungsgröße muss vor der Berechnung der Regelabweichung $e(n)$ um einen Zyklus verschoben werden, damit bei einer Änderung der Führungsgröße die Regelabweichung nicht aus der Differenz der neuen Führungsgröße und der aktuellen Regelgröße berechnet wird. Das Blockschaltbild des Regelkreises mit Führungsgrößenaufschaltung und dem Verzögerungsglied der Führungsgröße auf die Regelabweichung ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

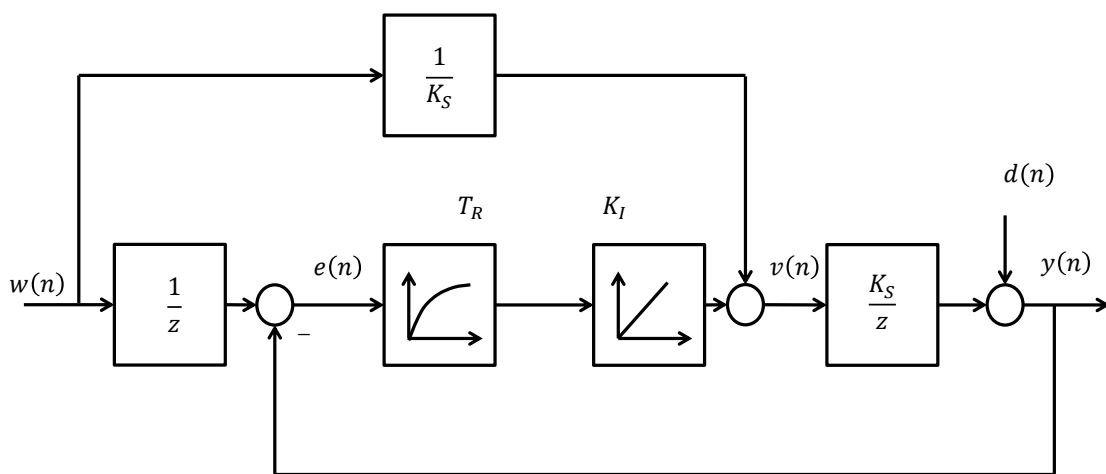


Abbildung 5.8.: Blockschaltbild mit Führungsgrößenaufschaltung

Aus dem Blockschaltbild kann mittels Z-Transformation die Gleichung 5.32 aufgestellt werden.

$$Y(z) = \frac{K_S}{z} \cdot \left(\frac{W(z)}{K_S} + G_R(z) \cdot \left(\frac{W(z)}{z} - Y(z) \right) \right) \quad (5.32)$$

$$Y(z) \cdot \left(1 + \frac{K_S}{z} \cdot G_R(z)\right) = W(z) \cdot \frac{1}{z} \cdot \left(1 + \frac{K_S}{z} \cdot G_R(z)\right) \quad (5.33)$$

Es ist zu erkennen, dass die Führungsübertragungsfunktion $G_W(z) = \frac{Y(z)}{W(z)}$ mit der Führungsgrößenaufschaltung $G_{FF}(z) = \frac{1}{K_S}$ unabhängig von der Übertragungsfunktion des Reglers $G_R(z)$ ist. Die Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises mit Führungsgrößenaufschaltung ist in Gleichung 5.34 gegeben.

$$G_W(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = \frac{1}{z} \quad (5.34)$$

5.8. Implementierung

Die gesamte Regelung ist in einer MATLAB-Klasse *felFeedback* umgesetzt. Auf der beiliegenden CD ist die Software für die Regelung der Simulation unter *Programme/Regelung/Simulation* und die Regelung des FLASH unter *Programme/Regelung/Programm* zu finden. Zunächst werden mit der Funktion *GetMoments* die Massenschwerpunkte der einzelnen XUV-Lichtimpulse berechnet. Mit der Funktion *mean* wird die mittlere Wellenlänge λ_{Mean} und mithilfe der Funktion *polyfit* der Wellenlängenversatz λ_{inc} berechnet (Kapitel 5.1.1). Die IT1-Regelung mit Führungsgrößenaufschaltung findet jeweils in der Klasse *accFeedback* statt. Diese wird jeweils für die beiden entkoppelten Teilsysteme in der Hauptklasse instanziiert und verwendet. Eine weitere Klasse *safeControl* begrenzt die Stellgrößen jeweils auf einen vordefinierten Bereich. Sobald ein Regler an eine Begrenzung kommt, werden von der Hauptklasse beide Regelungen sicherheitshalber ausgeschaltet. Die Klassen *accFeedback* und *safeControl* sind in dem Blockschaltbild in Abbildung 5.9 dargestellt.

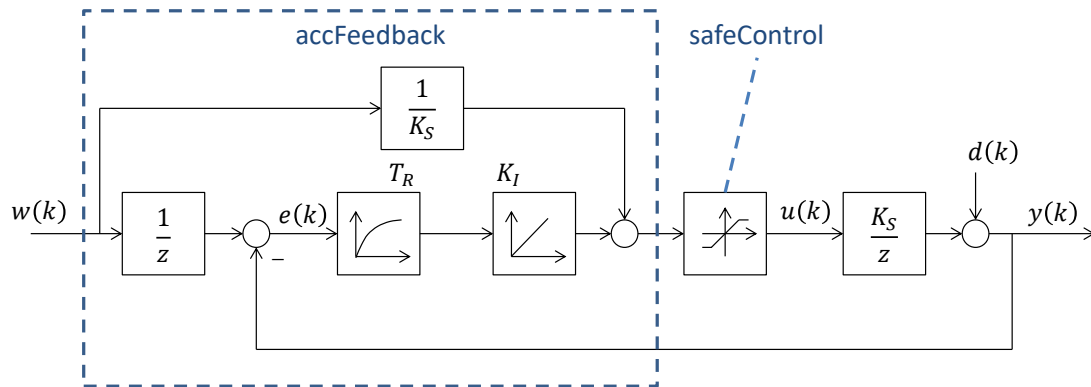


Abbildung 5.9.: Blockschaltbild der Regelung mit den Klassen *accFeedback* und *safeControl*

Ein C++ Programm dient zur Definition von Schnittstellenvariablen für die grafische Benutzeroberfläche. Ein Screenshot der GUI ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Das Programm ist auf der beiliegenden CD unter *Programme/Regelung/Interface* zu finden.

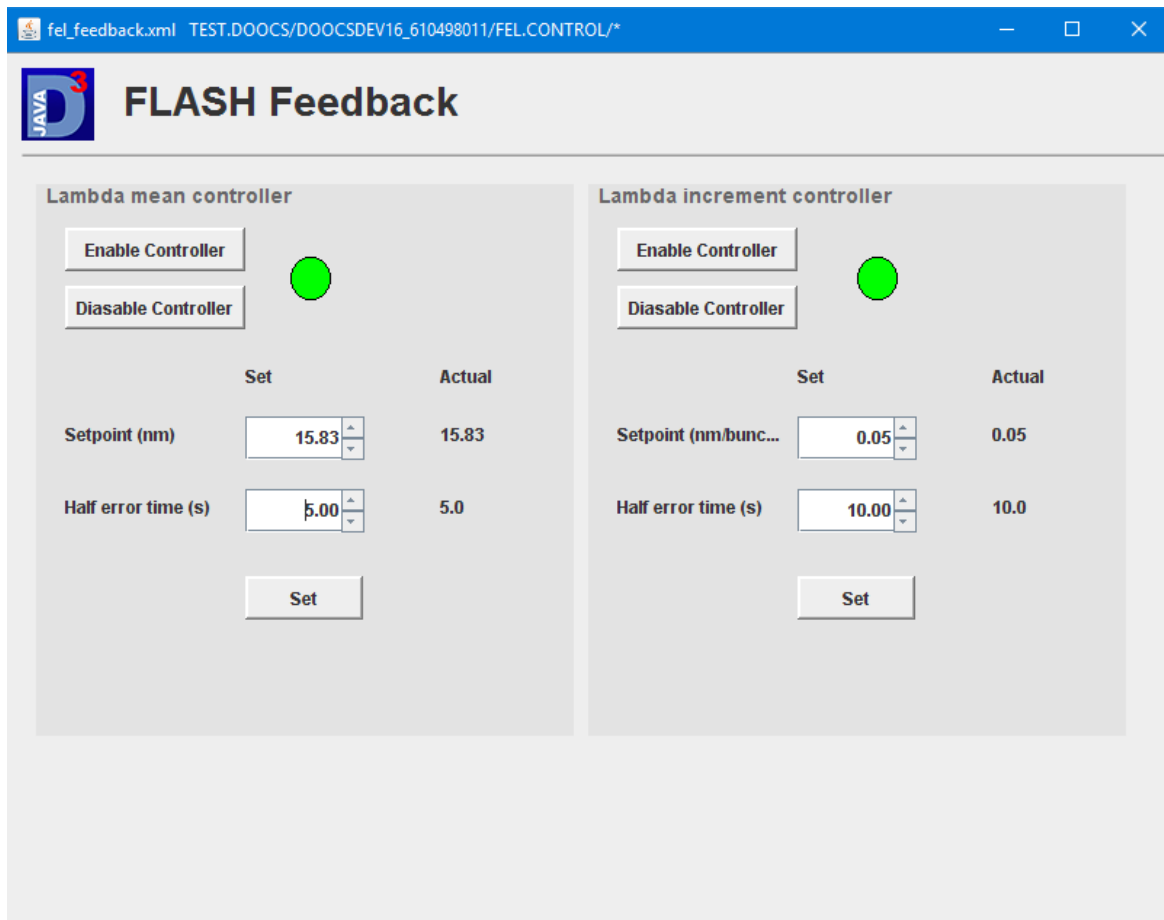
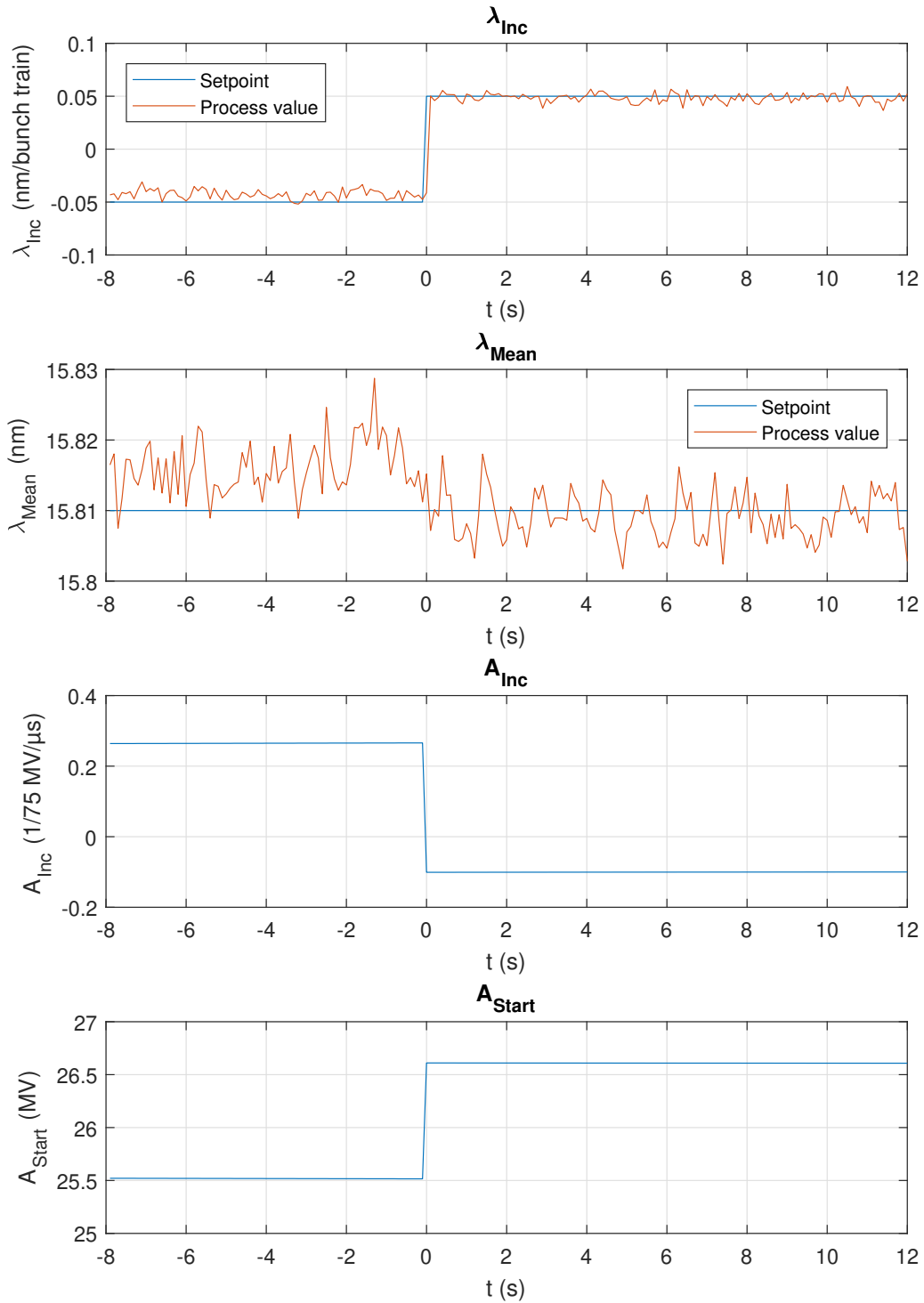


Abbildung 5.10.: Screenshot der GUI für die Bedienung der Regler

5.9. Ergebnisse

5.9.1. Führungsgrößensprung

In Abbildung 5.11 ist ein Führungsgrößensprung des Wellenlängenversatzes von $-0,05 \frac{nm}{bunch\ train}$ auf $0,05 \frac{nm}{bunch\ train}$ abgebildet. Entsprechend der Entkopplung der beiden Systeme ändern sich beide Stellgrößen sprunghaft, um die mittlere Wellenlänge auf ihrem Sollwert bei $15,81\ nm$ zu halten. Durch die Führungsgrößenaufschaltung ist der neue Sollwert des Wellenlängenversatzes von $-0,05 \frac{nm}{bunch\ train}$ auf $0,05 \frac{nm}{bunch\ train}$ innerhalb von einem Zyklus erreicht.

Abbildung 5.11.: Führungsgrößensprung von λ_{Inc}

5.9.2. Störgrößensprung

In Abbildung 5.12 ist die Antwort auf einen Störgrößensprung des Wellenlängenversatzes dargestellt. Bei einem anderen Beschleunigermodul (*ACC45*) wird der Parameter A_{Inc} sprunghaft geändert, was eine sprunghafte Veränderung des Wellenlängenversatzes zur Folge hat. Die Regelung des Wellenlängenversatzes ist so eingestellt, dass eine Störung nach zehn Sekunden zur Hälfte ausgeregelt wird. Die reale Störspungantwort hat einen ähnlichen Verlauf, wie in der Simulation.

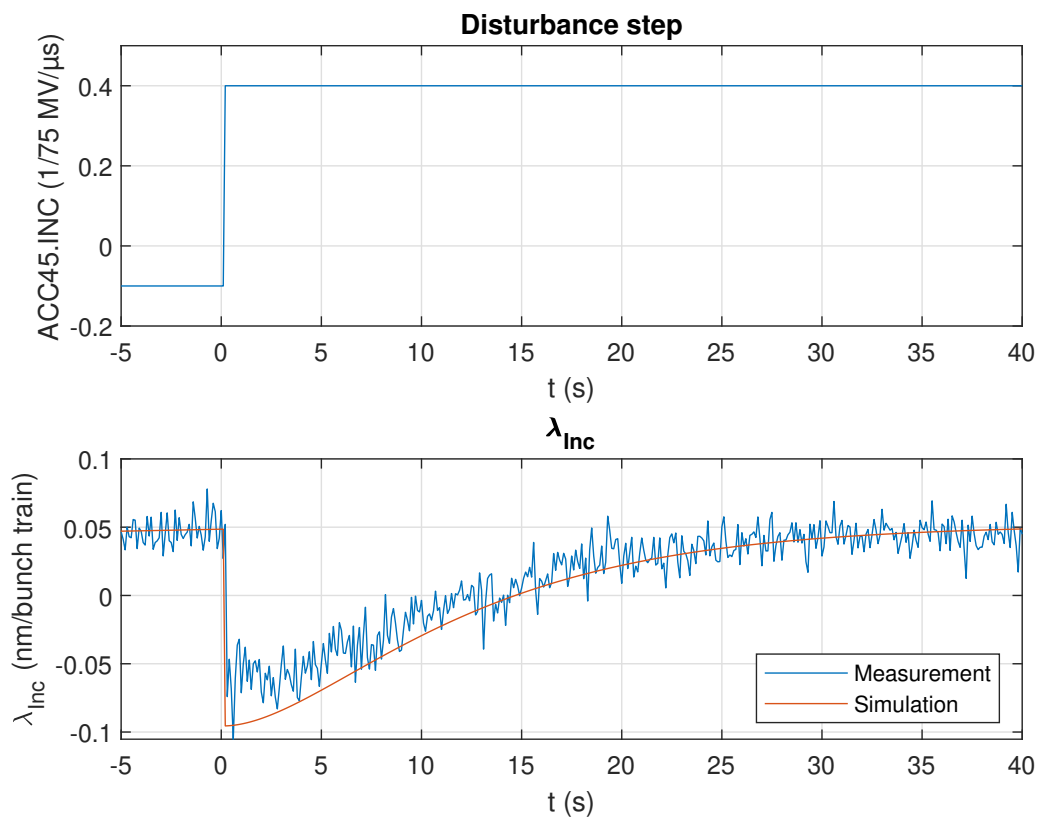


Abbildung 5.12.: Störgrößensprung des Wellenlängenversatzes

In Abbildung 5.13 ist die entsprechende Störspungantwort der mittleren Wellenlänge dargestellt. Mit dem Parameter A_{Inc} des Beschleunigermoduls *ACC45* wird eine Störung der Beschleunigungsspannung von 1 MV erzeugt. Der Regler ist so eingestellt, dass eine sprunghafte Störung innerhalb von fünf Sekunden zur Hälfte ausgeregelt wird. Auch hier hat die Störspungantwort einen ähnlichen Verlauf, wie die entsprechende Störspungantwort der Simulation.

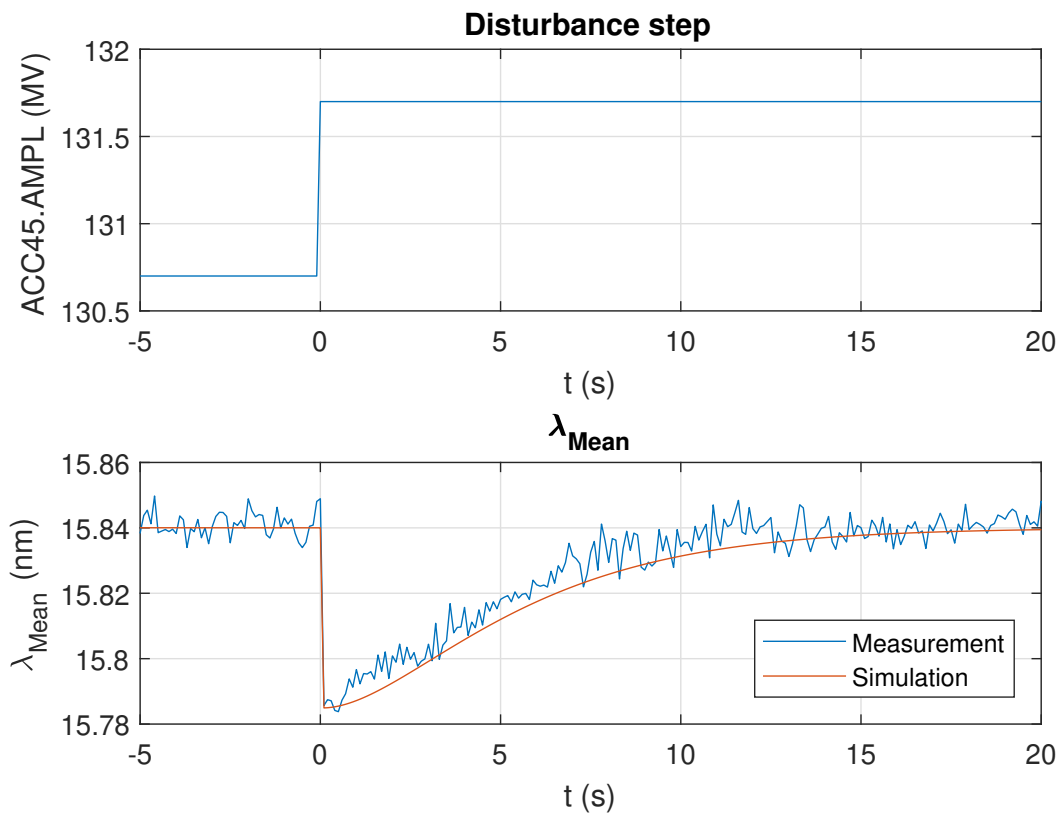


Abbildung 5.13.: Störgrößensprung des Wellenlängenversatzes

6. Fazit und Ausblick

6.1. Fazit

In dieser Arbeit wurde das VLS Spektrometer um den Zeilendetektor KALYPSO erweitert.

Das VLS-Sensorsystem wurde für die Messbereichsvorgabe automatisiert. Durch ein in dieser Arbeit erstelltes C++ Programm kann beim VLS der Messbereich vorgegeben und automatisch angefahren werden. Dadurch kann ein Experte entlastet werden, der die Messbereichsänderung zuvor manuell und sehr zeitaufwändig durchführen musste. Da durch eine fehlerhafte Software das VLS beschädigt werden kann und nur selten für einen Test der implementierten Software zur Verfügung steht, wurde der in der Software eingesetzte Algorithmus zuvor in MATLAB simuliert. Die Simulation des Algorithmus wurde mit der realen Fahrt in einen anderen Messbereich gegenübergestellt, wobei der reale Algorithmus dieselben Schritte ausführte wie die Simulation.

Für den jeweils angefahrenen Messbereich wurde mit einem weiteren C++ Programm für jedes Pixel der in Betrieb genommenen Zeilenkamera die an dieser Position entsprechende Wellenlänge berechnet. Daraus konnten schließlich statistische Größen der Spektren berechnet werden. Mit einer erstellten GUI werden die Messungen visualisiert. Mit einem entwickelten C++-Programm konnte die Berechnung von statistischen Größen wie dem CoM der Wellenlänge realisiert werden.

Bei der Evaluierung des KALYPSO wurde dieser in vielen Versuchen getestet. Von den 14 Bit können je nach eingestellter Verstärkung ca. zehn bis elf Bit effektiv genutzt werden, da das Dunkelrauschen des KALYPSO ungefähr zwei bis drei Bit unbrauchbar macht und ein weiteres Bit hardwarebedingt nicht genutzt wird. Bei dem KALYPSO mit Si-Photodioden hat sich herausgestellt, dass jedes zweite Pixel mit seinem benachbarten Pixel falsch verdrahtet ist. Per Software konnte diese Besonderheit behoben werden. Des Weiteren hat bei beiden KALYPSO-Versionen jeder sechzehnte Pixel einen nicht zu den jeweils anderen Pixeln passenden Messwert. Es stellte sich heraus, dass in der Firmware des KALYPSO jeder sechzehnte Pixel doppelt so viel Zeit bei der ADC-Abtastung hat wie die anderen Pixel. Dadurch sind erkennbare Abweichungen in den Messwerten dieser Pixel vorhanden. Durch einen weiteren Test wurde festgestellt, dass die Messwerte der einzelnen Pixel von den Messwerten

der anderen Pixel beeinflusst werden. Dies lässt sich durch eine minimale Änderung der Referenzspannung bei Beleuchtung erklären. Dieser Fehler konnte systematisch bestimmt und per Software minimiert werden.

Die Erweiterung des VLS durch den KALYPSO ermöglicht eine Spektroskopie von XUV-Lichtimpulsen im MHz-Bereich. Dadurch kann das Energie- und Frequenzspektrum aller XUV-Lichtimpulse aufgenommen werden.

Die impulsgenaue Messung und Auswertung der XUV-Lichtimpulse konnte für die Regelung des FLASH eingesetzt werden. Dabei wurde einerseits die mittlere Wellenlänge und andererseits die Differenzwellenlänge vom ersten bis zum letzten XUV-Lichtimpuls in einem Impulszug geregelt. Nachdem das zu regelnde System beschrieben wurde, konnte es nach der Linearisierung und der Systementkopplung in zwei voneinander unabhängige Teilsysteme vereinfacht werden. Beide Teilsysteme haben dieselbe Struktur, wodurch die Auslegung der Regelung und die Implementierung von beiden Systemen dieselbe ist. Die Regelung der Teilsysteme wurde mit einem IT1-Regler realisiert. Mit einer zusätzlichen Führungsgrößen-aufschaltung wurde die Führungsübertragungsfunktion $G_W(z) = \frac{1}{z}$ erreicht, wodurch ein Führungsgrößensprung innerhalb von einem Zyklus erreicht wurde. Die Regelungen wurden mit Stör- und Führungsgrößensprüngen erfolgreich getestet und zeigten das erwartete Verhalten.

6.2. Ausblick

Anknüpfend an diese Arbeit kann die bisher in MATLAB umgesetzte Regelung der Wellenlänge und des Wellenlängenversatzes in einem C++-Programm implementiert werden. Des Weiteren kann aufbauend auf die Systembeschreibung und Linearisierung in fortführenden Arbeiten die impulsgenaue Messung des CoM für eine separate Regelung der einzelnen XUV-Lichtimpulse eines Lichtimpulszugs verwendet werden.

Literatur

- [1] W. Ackermann et al. "Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window". In: *Nature Photonics* (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.76. URL: <http://dx.doi.org/10.1.1/jpb001>.
- [2] H.-J. Bartsch. *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Fachbuchverlag Leipzig, 2004.
- [3] G. Brenner et al. *First results from the online variable line spacing grating spectrometer at FLASH*. Techn. Ber. Okt. 2010.
- [4] G. Brenner. *The Online Variable Line Spacing Grating Spectrometer at FLASH*. Techn. Ber.
- [5] J. Des McMorro. *Elements of Modern X-Ray Physics*. Wiley, 2001.
- [6] desy.de. *Free-electron laser FLASH*. [Online; Abruf 29-Oktober-2018]. URL: http://www.desy.de/infos__services/presse/pressemeldungen/2009/pm_181209/index_ger.html.
- [7] flash.desy.de. *DESY - FLASH - Recent FLASH Upgrades*. [Online; Abruf 15-Oktober-2018]. URL: https://flash.desy.de/recent_flash_upgrades.
- [8] flash.desy.de. *Free-electron laser FLASH*. [Online; Abruf 11-Oktober-2018]. URL: <http://flash.desy.de>.
- [9] H. Kuchling. *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2004.
- [10] J. Lunze. *Regelungstechnik 2*. Vieweg, 2016.
- [11] photon-science.desy.de. *Key Parameters of Undulators Operated at FLASH*. [Online; Abruf 11-Oktober-2018]. URL: http://photon-science.desy.de/research/technical_groups/undulators/undulators_at_flash/index_eng.html.
- [12] R. Reiniger. *Design of the VLS Gratings for the FEL Spectrometer*. Techn. Ber. Juli 2005.
- [13] Rota et al., L. *KALYPSO, a novel detector system for high-repetition rate and real-time beam diagnostics*. [Online; Abruf 19-Oktober-2018]. URL: <https://ufo.kit.edu/dis/index.php/2017/07/26/kalypso-a-novel-detector-system-for-high-repetition-rate-and-real-time-beam-diagnostics>.

-
- [14] tesla.desy.de. *DOOCS Architecture*. [Online; Abruf 23-Oktober-2018]. URL: <http://tesla.desy.de/doocs/doocs.html>.
- [15] Weisstein, E. W. *Full Width at Half Maximum*. [Online; Abruf 15-Oktober-2018]. URL: <http://mathworld.wolfram.com/FullWidthatHalfMaximum.html>.

A. Häufig verwendete Funktionen

A.1. GetAxisLambda

```
function [ lambda ] = ...
    GetAxisLambda(lambda0, sigma, a2, m, alpha, D, countOfPixels, sensorSize)
    beta = asin(sin(alpha)-m*lambda0*sigma/1e6);
    focalLength = -1000.0*cos(beta)^2/ ...
        (cos(alpha)^2/D*1000.0-m*a2*lambda0/1000.0);
    pixelSize = sensorSize/countOfPixels;
    s1 = (-(countOfPixels - 1)/2:1:(countOfPixels - 1)/2)*pixelSize;
    phi = atan2(s1, focalLength);
    lambda = 1e6*(sin(alpha)-sin(beta-phi))/(m*sigma);
end
```

A.2. GetMoments

```
function [com, fwhm, intensity, stdDev, variance, skew, kurt] ...
    = GetMoments(x,y)
    intensity=sum(y,2);
    com=y*x'./intensity;
    dif=x-com;
    variance=sum(y.*dif.^2,2)./intensity;
    stdDev=sqrt(variance);
    skew=sum(y.*dif.^3,2)./(stdDev.^3.*intensity);
    kurt=sum(y.*dif.^4,2)./(stdDev.^4.*intensity)-3;
    fwhm=stdDev*2*sqrt(2*log(2));
end
```

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 30. Oktober 2018

Ort, Datum

Unterschrift