

## **Bachelorarbeit zum Thema:**

Erstellen einer LabVIEW-Applikation zur Kanalisierung  
von Messdaten und Verifizierung der Messgenauigkeit  
des optischen AIV Testaufbaus für BELA

Armin Hoffmann

geboren am:  
15.10.1987 in Jena  
Matrikel-Nummer: 630113  
Seminargruppe: 082

Hochschulbetreuer:  
Prof. Dr.-Ing. J. Bliedtner  
Mentor:  
Dipl.-Ing. Kay Lingenauber

Datum der Themenausgabe:  
09.05.2011  
Abgabedatum:



# Autoreferat

Die vorliegende Bachelorarbeit thematisiert die Erstellung einer Anwendung auf Basis des LabVIEW-Programmiersystems, mit der die Messdaten des BELA AIV Testaufbaus erfasst und kanalisiert und die Messgenauigkeit hinsichtlich der Anforderungen verifiziert werden sollen.

Zunächst werden die Grundlagen und Rahmenbedingungen der BepiColombo-Mission sowie der Laseraltimetrie dargelegt. Dabei erfolgt eine Analyse des technologischen Stands anhand diverser in der Raumfahrt bereits eingesetzter Laseraltimeter. Im Rahmen dessen ist das BepiColombo Laser Altimeter hervorzuheben, welches den Gegenstand dieser Arbeit darstellt. Darauf aufbauend gibt die Arbeit einen Einblick in die Methodik zur Erstellung der LabVIEW-Applikation. Im Hinblick auf den zweiten Teil der Arbeit, werden das Messprinzip des AIV Messaufbaus sowie wichtige Komponenten im Detail vorgestellt. Daran knüpft, in Anbetracht des noch im Bau befindlichen Messsystems, die Realisierung der Genauigkeitsuntersuchungen an einem Testaufbau an. Die Darstellung und Diskussion der erzielten Ergebnisse charakterisiert abschließend den beschriebenen Testaufbau hinsichtlich der Anforderungen an das endgültige AIV Messsystem.

Als wesentliches Resultat dieser Arbeit sei die erfolgreiche Verifizierung des Testaufbaus zu nennen. Damit kann die Integration des AIV Aufbaus in den Reinraum erfolgen. Darüber hinaus wird die Möglichkeit der Kanalisierung verschiedener Messgrößen in LabVIEW dargelegt und die Funktionalität des VIs unter Laborbedingungen bewiesen.

Die obigen Ausführungen erfolgen, gestützt durch 38 Abbildungen und 10 Tabellen, auf insgesamt 69 Seiten. Zur Erläuterung hinzu gezogenen Informationen entstammen 36 Quellen.



# Inhaltsverzeichnis

<u>AUTOREFERAT</u>	<u>III</u>
<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	<u>V</u>
<u>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</u>	<u>VIII</u>
<u>LISTE DER SYMBOLE</u>	<u>XII</u>
<u>1 EINFÜHRUNG</u>	<u>1</u>
1.1 DIE ESA UND DER RUF DES MERKURS	1
1.2 DER PLANET MERKUR	2
1.3 FRÜHERE MISSIONEN ZUM MERKUR	4
1.3.1 MARINER 10	4
1.3.2 MESSENGER	4
1.4 PROBLEMSTELLUNG	5
<u>2 STAND DER TECHNIK</u>	<u>6</u>
2.1 GRUNDLAGEN LASERTECHNIK	6
2.1.1 LASERPRINZIP	6
2.1.2 EIGENSCHAFTEN DES LASERLICHTES	8
2.2 LASERALTIMETRIE-PRINZIP	9
2.3 EINGESETZTE ODER IM EINSATZ BEFINDLICHE LASERALTIMETER	11
2.3.1 MOLA – MARS OBSERVER LASER ALTIMETER	11
2.3.2 GLAS – GEOSCIENCE LASER ALTIMETER SYSTEM	12
2.3.3 MLA – MERCURY LASER ALTIMETER	13
2.3.4 LOLA – LUNAR ORBITER LASER ALTIMETER	15
2.4 BEPICOLOMBO UND BELA	16
2.4.1 BEPICOLOMBO	16
2.4.2 BEPICOLOMBO LASER ALTIMETER	18
2.4.3 BELA TRANSMITTER LASER	21

---

<b>3</b>	<b><u>METHODIK UND UMSETZUNG</u></b>	<b>24</b>
3.1	LABVIEW-INTERFACE	24
3.1.1	ANFORDERUNGEN	24
3.1.2	LÖSUNG	27
3.2	MESSPRINZIP	38
3.2.1	THEODOLIT-KONZEPT	38
3.2.2	REFERENZLASER-KONZEPT	39
3.2.3	MESSAUFBAU UND WICHTIGE KOMPONENTEN	40
<b>4</b>	<b><u>ERGEBNISSE</u></b>	<b>49</b>
4.1	FINALER TESTAUFBAU	49
4.2	MESSERGEBNISSE	51
4.2.1	ÜBERBLICK	51
4.2.2	OPTOMECHANISCHE STABILITÄT DES TESTAUFBAUS	52
4.2.3	EINFLUSS DES OAP AUF DIE STABILITÄT	54
4.2.4	EINFLUSS DES OAP AUF DEN DURCHMESSER DES TESTLASERSTRAHLS	58
4.2.5	EINFLUSS DIVERSER FILTERELEMENTE	61
4.2.6	ENERGIEKALIBRIERUNG DES WEDGE	65
<b>5</b>	<b><u>KRITISCHE BETRACHTUNG DER EIGENEN ARBEIT</u></b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b><u>SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK</u></b>	<b>68</b>
	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS</u></b>	<b>V</b>
	<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b>IX</b>
	<b><u>TABELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b>XII</b>
	<b><u>ANHANG</u></b>	<b>XIII</b>
	<b><u>ERKLÄRUNG DER SELBSTSTÄNDIGKEIT</u></b>	<b>XXII</b>
	<b><u>THESEN</u></b>	<b>XXIII</b>



## Abkürzungsverzeichnis

AEU	-	Analogue Electronics Unit
AIV	-	Assembly, Integration and Verification
AKF	-	Autokollimationsfernrohr
AlSiO	-	Aluminium-Siliziumoxid
AM	-	Aktives Medium
APD	-	Avalanche-Photodiode
API	-	application programming interface
AV	-	Auflösungsvermögen
BELA	-	BepiColombo Laser Altimeter
BEO	-	Back-End Optics
BEX	-	Beamexpander
BG	-	BeamGage
BOL	-	Begin of Life
BPU	-	Base Plate Unit
Bsp.	-	Beispiel
bzgl.	-	bezüglich
bzw.	-	beziehungsweise
ca.	-	circa
CCD	-	Charge-Coupled Device
COM-port	-	Communications port (Kommunikationsschnittstelle)
CPU	-	Central Processing Unit
csv	-	comma-separated values
cw	-	continuous wave
DLR	-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ELU	-	Electronics Unit
EOL	-	End of Life
ESA	-	European Space Agency
FOV	-	Field of View (Bildfeld)
FPA	-	Focal Plane Assembly
GLAS	-	Geoscience Laser Altimeter System
GmbH	-	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	-	Global Positioning System



---

GSFC	-	Goddard Space Flight Center
GUI	-	graphical user interface
HDF5	-	Hierarchical Data Format
ICESat	-	Ice, Cloud and Elevation Satellite
JAXA	-	Japan Aerospace Exploration Agency
LASER	-	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LEU	-	Laser Electronics Unit
LHB	-	Laser Head Box
LIDAR	-	Light Detection and Ranging
LOLA	-	Lunar Orbiter Laser Altimeter
LRO	-	Lunar Reconnaissance Orbiter
LV	-	LabVIEW 2010 SP 1
MASER	-	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MB	-	Megabyte
MCS	-	Mercury Composite Spacecraft
MGS	-	Mars Global Surveyor
MLA	-	Mercury Laser Altimeter
MMO	-	Mercury Magnetospheric Orbiter
MOLA	-	Mars Observer Laser Altimeter
MOSIF	-	MMO Sunshield and Interface Structure
MPO	-	Mercury Planetary Orbiter
MTM	-	Mercury Transfer Module
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
ND	-	Neutraldichte
Nd:YAG	-	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Kristall
Nd:Cr:YAG	-	zusätzlich mit Chrom dotierter Nd:YAG-Kristall
NIR	-	nahes Infrarot
opt.	-	optisch
RBU	-	Receiver Baffle Unit
RMU	-	Range Measurement Unit
ROI	-	Range of Interest
RTL	-	Receiver Telescope
RTP	-	Rubidium Titanyl Phosphate
Rx	-	Receiver

---

s-pol.	-	senkrecht polarisiert
SPU	-	Straylight & Contamination Protection Unit
S/C	-	Spacecraft
TBU	-	Transmitter Baffle Unit
TEC	-	Thermo-Electric Cooler
TEM	-	Transversal Electromagnetic Mode
TV	-	Television
TVK	-	Thermal-Vakuum-Kammer
Tx	-	Transmitter
u.a.	-	unter anderem
u.U.	-	unter Umständen
UV	-	Ultraviolett
vgl.	-	vergleiche
VI	-	Virtuelles Instrument
WSA	-	Weltraumsimulationsanlage
z.B.	-	zum Beispiel
z.T.	-	zum Teil



## Liste der Symbole

$c$	-	Lichtgeschwindigkeit
$D4\sigma$	-	Zweite Momentbreite
$f$	-	Frequenz des Photons
$f'$	-	Brennweite
$h$	-	Planck'sches Wirkungsquantum
$H$	-	Topografische Erhebung vom Referenzellipsoiden
$M^2$	-	Beugungsmaßzahl
$n$	-	Brechzahl
$p$	-	Druck
$R_0$	-	Radius des Sondenorbits
$R_{Ref}$	-	Radius des Referenzellipsoiden
$\Delta t$	-	Lichtlaufzeit
$W_1$	-	Energie im ersten Energieniveau
$W_2$	-	Energie im zweiten (höheren) Energieniveau
$x_1$	-	x-Wert des LHB-Zentroiden
$x_2$	-	x-Wert des Referenz-Zentroiden
$y_1$	-	y-Wert des LHB-Zentroiden
$y_2$	-	y-Wert des Referenz-Zentroiden
$z$	-	Entfernung von Laseraltimeter zu Oberfläche
$\delta$	-	Standardabweichung der Messungen
$\Delta$	-	Abstand der Spot-Zentroide
$\zeta$	-	Winkelstabilität des Referenzlasers
$\lambda$	-	Wellenlänge
$\sigma$	-	Standardabweichung
$\emptyset$	-	Durchmesser



# 1 Einführung

## 1.1 Die ESA und der Ruf des Merkurs

Die Erforschung fremder Planeten und Himmelskörper durch Sonden ist eine Entwicklung, die vor etwa 52 Jahren mit der Raumsonde Lunik 1 ihren Anfang nahm. Verfehlte die sowjetische Raumsonde zwar das Ziel auf dem Erdtrabanten aufzuschlagen, flog sie jedoch als erste Raumsonde der Welt am Mond vorbei und drang infolgedessen erstmals in den interplanetaren Raum vor [1].

Im Vergleich zu damals hat die Technologie enorme Sprünge vollzogen, die Hintergründe bleiben dennoch in vielerlei Hinsicht gleich. So sind wir bestrebt, mehr über unser Sonnensystem und darüber hinaus zu erfahren. Wir sind auf der Suche nach unseren eigenen Wurzeln und versuchen die Physik des Universums zu verstehen. Natürlich nehmen weiterhin auch ökonomische und politische Interessen großen Einfluss auf die Ambitionen tiefer ins All vorzustoßen. Dennoch ist eine Sache nicht zu vernachlässigen – die Neugier. Allein in unserem Sonnensystem gibt es vieles zu erkunden. Besonders lohnt sich ein Blick auf den innersten Planeten. Der Merkur ist nicht so umfangreich erforscht wie die anderen Planeten im inneren Ring – Venus, Mars und Erde. Das liegt im Wesentlichen an seiner Nähe zu unserem Zentralgestirn, welches die Erfassbarkeit mit erdgebundenen Teleskopen äußerst schwierig macht. Infolgedessen kamen bereits zwei Raumsonden der NASA erfolgreich bei der Erforschung des Merkurs zum Einsatz. In den folgenden Jahren wollte die ESA ihre eigenen Erfahrungen bei der Erkundung von Planeten ausbauen. Schon 1993 schlug André Balogh, als Antwort auf eine sogenannte „call of ideas“ der ESA – eine Art Ideensammlung für künftige Operationsziele – eine Mission zum Merkur vor. 1996 wurde diese als Kandidat für eine „Meilenstein-Mission“ im sogenannten „Horizont 2000“ Forschungsprogramm festgelegt. Dieses Programm beinhaltet große Projekte, die in ihren Kosten äquivalent zum Zweijahresbudget der ESA sind, bzw. kleinere Projekte, die ein Einjahresbudget beanspruchen. Trotz der Schwierigkeiten, die eine Mission zum Merkur mit sich bringt, wie z.B. das Erreichen eines stabilen Orbits im Schwerfeld der Sonne, wurde eine Durchführbarkeitsstudie in Auftrag gegeben. Schließlich wurde 2003 die BepiColombo-Mission von der ESA bewilligt [2].

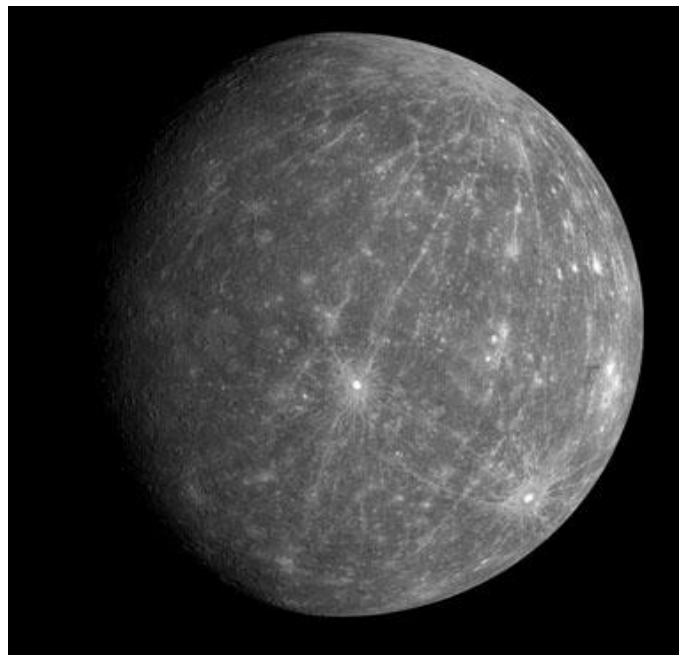
Mit an Bord der Raumsonde wird ein Laseraltimeter sein, das in Zusammenarbeit vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Universität Bern gefertigt wird. Die Verifizierung eines Testaufbaus zur Stabilitätsüberprüfung des Laseraltimeters mit Hilfe der Messwerterfassung über LabVIEW ist Teil dieser Arbeit. Doch bevor auf die Lösung des Messproblems in LabVIEW sowie die Verifizierung durch Messungen am Testaufbau eingegangen wird, werden zunächst sowohl ein paar Fakten zum Merkur und den damit verbundenen NASA-Missionen, als auch zum technologischen Stand der Laseraltimetrie an Bord von Raumsonden dargelegt.

## 1.2 Der Planet Merkur

Der Merkur ist der kleinste und innerste Planet unseres Sonnensystems und mindestens seit der griechischen Antike als Himmelskörper bekannt. Hier wurde er jedoch in Abhängigkeit des Beobachtungszeitpunktes unterschiedlich bezeichnet. So bekam das Morgengestirn den Namen Apoll und das Abendgestirn den Namen Hermes. Erst die Römer benannten den sonnennahen Planeten nach ihrem schnellen Götterboten

Merkur, aufgrund seiner gleichsam schnellen Bewegung am Himmel [3].

Die Nähe seiner Bahn zur Sonne macht es daher schwierig, ihn von der Erde aus zu beobachten. Mit bloßem Auge ist das nur in den Morgen- bzw. Abendstunden in geringer Höhe über dem dunstfreien Horizont möglich. Auch bei der Erkundung durch Satelliten wirft die geringe Entfernung zur Sonne Probleme auf, da die Raumsonde zum Einschwenken in die Umlaufbahn stark abgebremst werden muss und die Mitführung



**Abbildung 1.1:** Aufnahme des Merkur durch die Raumsonde Messenger am 07.10.2008 [4]

eines großen Treibstoffreservoirs voraussetzt [4]. Der Abstand des Planeten zur Sonne schwankt zwischen dem sonnennächsten Punkt mit 46 Millionen Kilometern (dem Perihel) und dem sonnenfernsten Punkt mit 69,82 Millionen Kilometern (dem Aphel). Diese Veränderung ist bedingt durch die starke numerische Exzentrizität oder Bahnexzentrizität des Orbits von 0,2056. Die Rotation um die eigene Achse, die senkrecht auf der Orbitalebene steht, dauert umgerechnet 58,65 Erdentage (siderische Rotationszeit) und ein Umlauf um die Sonne ca. 87,97 Erdentage (siderische Umlaufzeit). Die siderische Umlaufzeit ist die Zeit, die ein Objekt für einen vollständigen Umlauf, gemessen an einem nahezu unendlich weit entfernten Fixstern, benötigt, um sich wieder an der gleichen Position relativ zu diesem Fixstern zu befinden. Demnach beträgt die Eigenrotation des Merkurs etwa  $2/3$  seiner Umlaufzeit, d.h. während zwei voller Sonnenumläufe rotiert der Merkur dreimal um seine eigene Achse. Infolgedessen dauert der Merkurtag (Zeit zwischen zwei Sonnenaufgängen an einem Punkt) rund 176 Erdentage. Diese Art des Umlaufs ist keine einfach gebundene Rotation ähnlich der unseres Erdenmondes, wie es anfänglich vermutet wurde. Dabei würde der Merkur der Sonne immer die gleiche Seite zuwenden. Vielmehr vollführt er eine gebrochen gebundene Rotation, bei der die Eigenrotation in einem bestimmten Verhältnis zur Sonnenumlaufzeit steht [3][5].

Der Durchmesser des Merkurs beträgt durchschnittlich ca. 4880 km und macht ihn damit zum kleinsten Planeten in unserem Sonnensystem. Weiterhin ist er mit rund  $0,33 \cdot 10^{24}$  kg auch der Leichteste unserer acht Planeten. Dennoch hat er überraschenderweise eine mittlere Dichte von  $5427 \text{ kg / m}^3$ . Diese ist der Erddichte von  $5515 \text{ kg / m}^3$  sehr ähnlich, was Wissenschaftler zu der Vermutung veranlasste, dass der Merkur, wie auch die Erde, einen Eisenkern besitzt. Verstärkt wird diese Annahme dadurch, dass Merkur als terrestrischer Planet ein selbst erzeugtes intrinsisches Magnetfeld besitzt, welches wahrscheinlich durch Konvektion im teilweise flüssigen Inneren des Planeten oder aber durch eisenhaltige Gesteine an der Merkuroberfläche generiert wird. Des Weiteren besitzt der Merkur eine dünne Gashülle ( $p \approx 10^{-15}$  bar). In Anlehnung an die äußerste Schicht der Erdatmosphäre wird diese auch als Exosphäre bezeichnet. Die auf dem Merkur vorherrschenden Temperaturen variieren von  $-183^\circ\text{C}$  auf der Nachtseite bis zu  $467^\circ\text{C}$  auf der Tagseite. Die Bestrahlungsstärke ist mit  $9126,6 \text{ W/m}^2$  etwa sechseinhalb Mal größer als die der Erde [3][4][6].

Diese besonderen Umweltbedingungen bergen für die Missionen zum innersten Planeten unseres Sonnensystems einige Herausforderungen.



## 1.3 Frühere Missionen zum Merkur

### 1.3.1 Mariner 10

Die erste Mission zum Merkur fand in den Jahren 1974 und 1975 statt und legte den Grundstein für weitere Missionen. Als erste Sonde nutzte Mariner 10 ein Swing-by-Manöver an der Venus, bevor sie am 29. März 1974 den Merkur im Rahmen eines Vorbeifluges erreichte und die ersten hochauflösenden Bilder des Planeten aufnahm. Hierfür kam eine TV-Kamera zum Einsatz, die für diese Mission entwickelt wurde. Bis dahin konnte der Merkur von der Erde aus durch seine Nähe zu unserem Zentralgestirn nur schlecht beobachtet werden. Demzufolge erhofften sich die Wissenschaftler von der Mariner 10 Mission neue Erkenntnisse. Zwei weitere Vorbeiflüge am 21. September 1974 und am 16. März 1975 lieferten Bilder von nur etwa 45 % der Merkuroberfläche. Diese Aufnahmen hatten ein durchschnittliches Auflösungsvermögen von 1-2 km. Zusätzlich wurden einige Bilder mit einem AV von ca. 100 m von der Merkuroberfläche aufgenommen. Neben der Kamera waren zudem sieben Messgeräte an Bord der Mariner 10 Sonde. Diese sollten sowohl die Existenz eines selbsterzeugten Magnetfeldes sowie einer dünnen Atmosphäre um den Merkur nachweisen, als auch die vorherrschenden Umweltbedingungen charakterisieren [3].

### 1.3.2 MESSENGER

Die MESSENGER-Sonde wurde am 3. August 2004 von der Erde aus gestartet. Ziel der Mission ist es, die noch unbekanntenen Regionen Merkurs zu kartografieren. Des Weiteren sollen das Magnetfeld, die Exosphäre, die Oberfläche und das Planeteninnere detailliert charakterisiert werden. Nach mehreren Swing-bys an Mars, Venus und auch Merkur selbst, schwenkte Messenger schließlich am 18. März 2011 in einen elliptischen Orbit um Merkur ein. Dies markiert den Beginn der Operationsphase der Sonde. Diese wird, abhängig von der Funktionalität MESSENGERs, bis zum März 2012 und darüber hinaus andauern[10].

## 1.4 Problemstellung

Wie eingangs beschrieben wird, ist das BepiColombo Laser Altimeter ein Gemeinschaftsprojekt Deutschlands und der Schweiz. An der Universität Bern wird der Empfänger des Altimeters konstruiert. Der Transmitter hingegen wird am DLR in Berlin gebaut. Zusammengesetzt und justiert wird das Gerät schließlich ebenfalls in Bern. Davor werden beide Komponenten jedoch an ihren jeweiligen Konstruktionsstandorten im Einzelnen überprüft, so dass sie den vorgegebenen Parametern und Anforderungen entsprechen [7].

Der am DLR getestete Teil umfasst den von der Carl Zeiss Optronics GmbH gebauten Transmitter in der Laser Headbox (LHB), die Straylight & Contamination Protection Unit (SPU) und die Transmitter Baffle Unit (TBU). Die für die Verifizierung wichtigen Parameter sind die Strahldivergenz, Pulsenergie, Pulseigenschaften, Strahlprofil und Richtungsstabilität, welche Auskunft über die Leistung der Transmittereinheit geben. Ihre Überprüfung soll die Funktionalität des Instrumentes unter den widrigen Umweltbedingungen in der Nähe des Merkurs gewährleisten. Infolgedessen wird die Verifizierung nicht nur am vorhandenen Testaufbau, sondern in einer noch im Bau befindlichen Thermalvakuumkammer unter realitätsnahen Bedingungen erfolgen, so dass eine vollständig geprüfte und integrierbare Komponente an die Universität Bern geliefert werden kann. Zusätzlich lassen sich mit den Messungen Schwachstellen bei den Komponenten heraus filtern und u.U. beseitigen, um eine bestmögliche Leistung des Instruments zu garantieren.

Unzweckmäßig stellt sich bei der Vielfalt an aufzunehmenden Parametern allerdings die Menge an notwendiger Software und Messapparatur heraus. Die Kanalisierung dieser Daten in einer einzigen Instanz zur Vereinfachung der Messung sowie die Verifizierung des vorhandenen Testaufbaus und Messprinzips sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

## 2 Stand der Technik

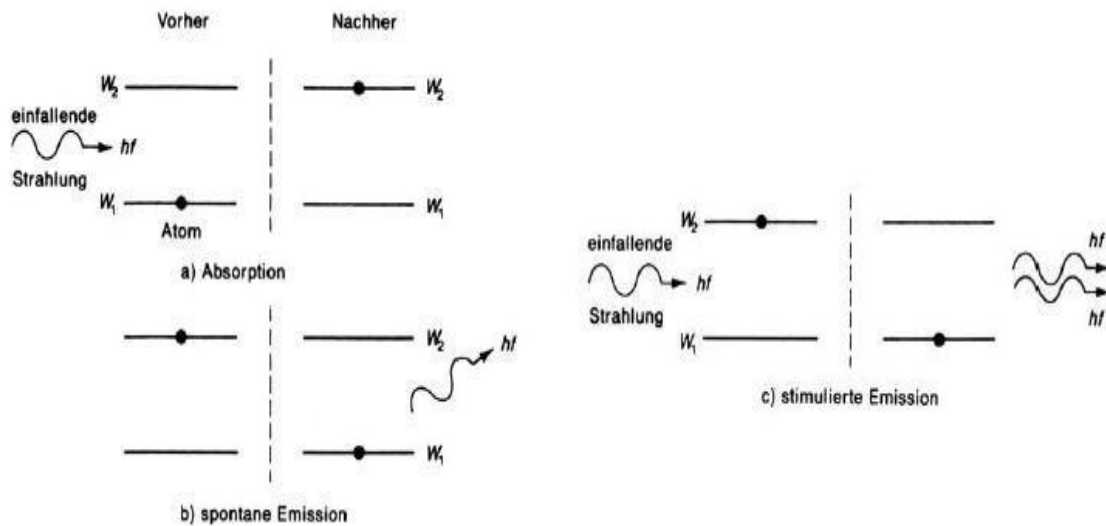
### 2.1 Grundlagen Lasertechnik

#### 2.1.1 Laserprinzip

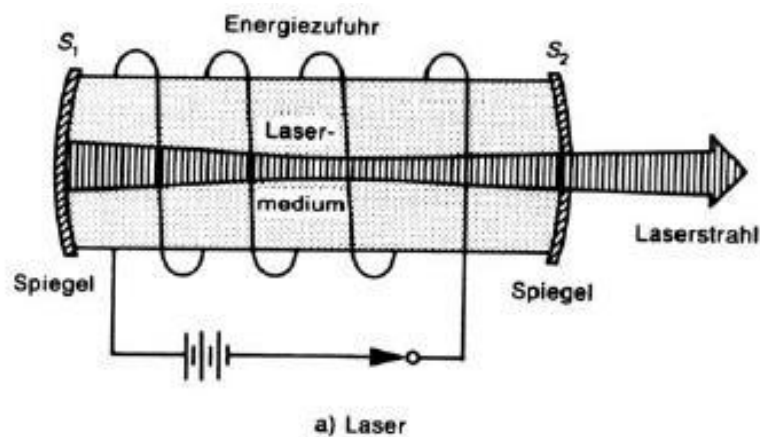
Schon 1916 entwickelte Albert Einstein den theoretischen Hintergrund des Laserprinzips. Er postulierte einen Strahlungsprozess, welchen er erzwungene oder stimulierte Emission nannte. Diese findet sich in dem Akronym LASER wieder – light amplification by stimulated emission of radiation. Die Umsetzung seiner Theorie findet erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts Anwendung in der Entwicklung des MASERs durch C.H. Townes. Schon kurze Zeit später – in den 60er Jahren – werden neben dem Rubinlaser bei einer Wellenlänge von 694,3 nm immer weitere Aktive Medien (AM) identifiziert. Die Bedeutung dessen wurde der Industrie erst Ende der 1960er, Anfang der 1970er Jahre bewusst. Das Anwendungsspektrum ist seit dieser Zeit enorm gewachsen und fand so u.a. Einzug in die Messtechnik, Fertigungstechnik, Analytik und Medizintechnik. Die AM decken einen Spektralbereich von Ultraviolett bis zum fernen Infrarot ab [8].

Einstein zufolge gibt es drei Prozesse, die die Wechselwirkung der Strahlung mit der Materie beschreiben. Zum einen kann ein Atom Strahlung bzw. ein Photon absorbieren, wodurch das Atom in einen angeregten Zustand versetzt wird (Absorption). Die Energiedifferenz aus der Energie im angeregten Zustand  $W_2$  und der Energie im Grundzustand  $W_1$  ist in diesem Falle genauso groß wie die Energie  $h \cdot f$  des einfallenden Photons. Zum anderen geht ein im angeregten Zustand befindliches Atom von selbst wieder in den Grundzustand über. Die bei diesem als spontane Emission bezeichneten Vorgang freiwerdende Energie  $W_2 - W_1$  entspricht der Energie des dabei emittierten Photons  $h \cdot f$ . Dieses Photon wird allerdings in beliebiger Richtung und Polarisation ohne zeitliche Korrelation zu anderen Photonen ausgestrahlt. Die für den Laserprozess wichtige dritte Variante ist die stimulierte Emission, im Rahmen derer durch externe Strahlung ein im angeregten Zustand befindliches Atom zur Degradation, d.h. zum Einnehmen eines niederen Energieniveaus und somit zur Freigabe der entsprechenden Energiedifferenz, stimuliert wird. Dabei wird analog zur spontanen

Emission ein Photon mit der Energie  $h \cdot f = W_2 - W_1$  frei, jedoch mit der gleichen Ausbreitungsrichtung und Polarisation wie das stimulierende Photon. Durch diese Intensitätserhöhung wird die Verstärkung des Lichtes im aktiven Medium erzielt [8].



**Abbildung 2.1:** die 3 Grundprozesse nach Einstein: a) Absorption, b) spontane und c) stimulierte Emission [8]



**Abbildung 2.2:** Prinzipskizze eines Laserresonators [8]

Um die erläuterten Effekte effizient zu verstärken, wird das AM in einer Kavität aus einem Endspiegel mit einer Reflexivität gegen 100 % und einem Auskoppelspiegel mit einer geringeren Reflektivität positioniert. Die Pumpenergie kann verschiedentlich zugeführt werden, beispielsweise radial wie in Abbildung 2.2. Bei der Verstärkung durch einen Resonator sind prinzipiell zwei Bedingungen zu erfüllen: als erste

Bedingung muss eine Besetzungsinversion des oberen Energieniveaus erzeugt werden. Das geschieht durch das sogenannte Pumpen. Dieses kann optisch, elektrisch oder chemisch erfolgen und führt dem AM beständig Energie zu. Die zweite Bedingung besagt, dass die Verstärkung des Resonators immer größer als die inneren Verluste sein muss. Wenn das der Fall ist, fängt der Laser an zu „schwingen“ und sich selbst zu verstärken [8].

### 2.1.2 Eigenschaften des Laserlichtes

Die zahlreichen Vorteile des Laserlichtes werden durch dessen Eigenschaften definiert, die den Laser von anderen Lichtquellen deutlich hervorhebt. Zu nennen sind [9]:

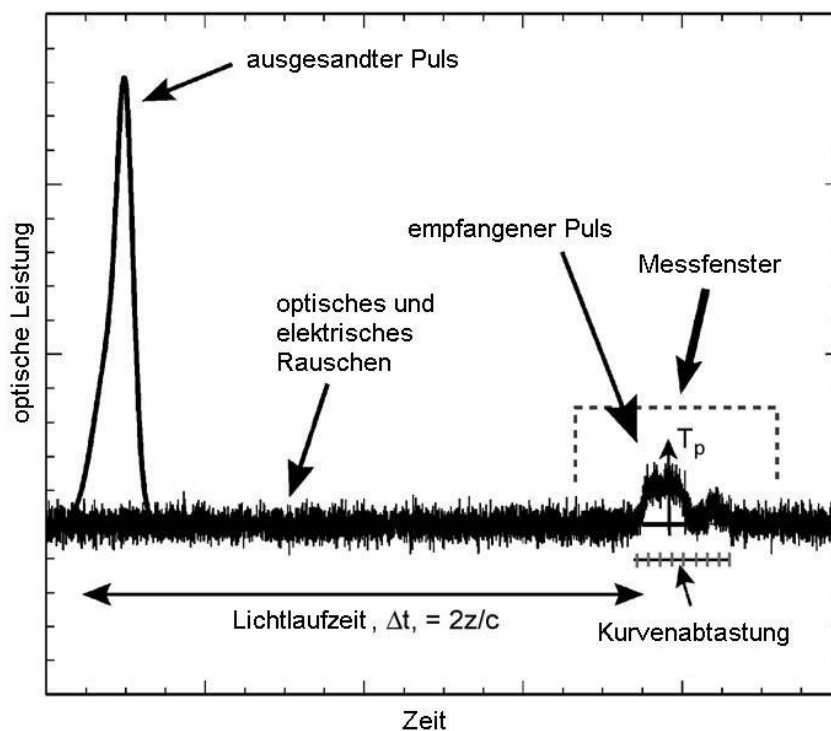
- räumliche und zeitliche Kohärenz der Photonen
- große Kohärenzlängen
- Monochromasie
- sehr geringe Divergenz von wenigen  $\mu\text{rad}$
- Möglichkeit sehr hoher Intensitäten
- Möglichkeit der Erzeugung äußerst kurzer Pulse
- gleiche Polarisation der emittierten Photonen

## 2.2 Laseraltimetrie-Prinzip

Trotz der Einfachheit des Prinzips stellt die Laseraltimetrie eine äußerst effektive Technologie zur Fernerkundung dar. Dabei wird die Lichtlaufzeit zwischen einem emittierten Laserpuls und der Aufnahme des vom Körper reflektierten Lichtes gemessen. Über die so erhaltene Zeit lässt sich die Entfernung des Messgerätes zur vermessenen Oberfläche über die Formel

$$z = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad \text{Formel 1}$$

bestimmen. Das  $z$  steht dabei für die Entfernung des Altimeters zum Objekt,  $\Delta t/2$  ist die Zeit für den Weg vom Sender zum Objekt und  $c$  gibt die Lichtgeschwindigkeit von 299.792.458 m/s an [11].



**Abbildung 2.3:** schematische Darstellung vom Senden und Empfangen des Lichtes [11]



## 2.3 Eingesetzte oder im Einsatz befindliche Laseraltimeter

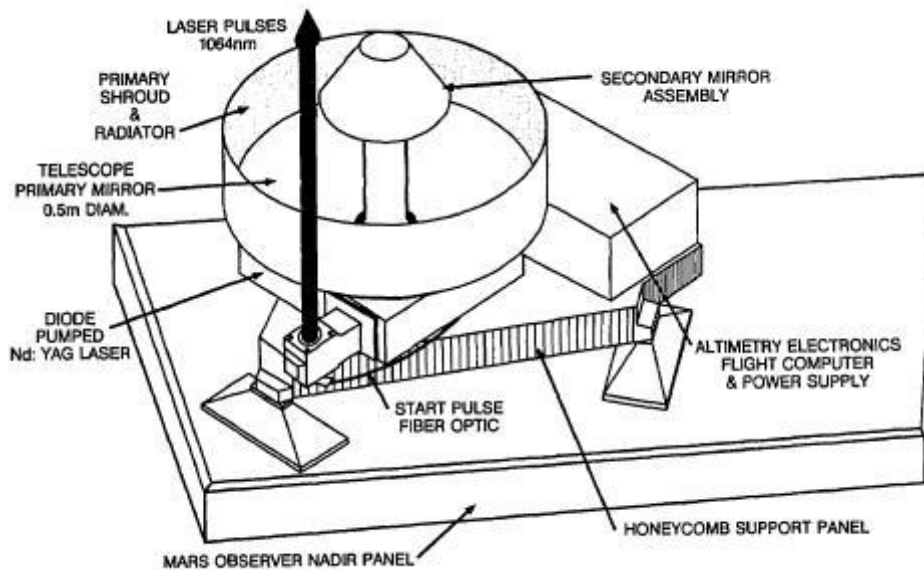
### 2.3.1 MOLA – Mars Observer Laser Altimeter

Das Mars Observer Laseraltimeter war eines von sieben Instrumenten an Bord des Mars Observer, der 1992 seine Mission zum Mars begann. Entwickelt wurde es von 1988 bis 1991 am Goddard Space Flight Center (GSFC). Zum Einsatz kam MOLA an Bord des Mars Observers jedoch nie, da dieser wenige Tage vor dem Einschwenken in die Mars Umlaufbahn den Kontakt zur Erde verlor [13].

1996 wurde das Laseraltimeter erneut Teil einer Raumsonde mit dem Ziel Mars. Die Mars Global Surveyor (MGS) Mission erreichte unseren roten Nachbarn dann im September 1997 nach zehnmonatiger Flugzeit. Die kartografische Aufzeichnung der Planetenoberfläche begann allerdings erst im Jahr 1999 [14].

Um dieser Aufgabe gerecht zu werden nutzte MGS das Laseraltimetrie-Prinzip mit dem für Mars Observer entwickelten MOLA. Dieses bestand im Wesentlichen aus der optischen Anordnung, den Elektronikkomponenten und dem Tragwerk. Die optische Anordnung setzte sich wiederum aus dem Emitter und dem Empfänger zusammen. Als Emitter kam ein mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser – kurz Nd:YAG-Laser – zum Einsatz, der bei einer Wellenlänge von 1064 nm im nahen Infrarot (NIR) arbeitet. Der Kristall wurde dabei radial von Laserdioden gepumpt, um ein möglichst homogenes Strahlprofil zu erhalten. Zusätzlich kam ein Güteschalter zum Einsatz, welcher die Pulse verkürzt und höhere Leistungen ermöglicht. So wurden Energien von 30 bis 40 mJ bei Pulslängen von ca. 8 ns erreicht. Die Pulsfrequenz des Lasers betrug dabei 10 Hz. Die bestrahlte Fläche (Spot) auf der Marsoberfläche hatte einen Durchmesser von etwa 120 m. Um die reflektierten Photonen zu detektieren, fokussierte ein Spiegelteleskop mit einer relativ großen Apertur von 0,5 m diese auf eine Avalanche-Photodiode (APD). Damit ließ sich eine Tiefenauflösung von 1 bis 10 m und eine horizontale Auflösung von rund 330 m realisieren [14].





**Abbildung 2.5:** Designskizze des Mars Observer Laser Altimeters [14]

### 2.3.2 GLAS – Geoscience Laser Altimeter System

Im Rahmen des NASA Erdbeobachtungssystems entstand ebenfalls am GSFC der Ice, Cloud and Elevation Satellite auch ICESat genannt, welcher am 12.01.2003 ins All befördert wurde. Teil dessen ist das Geoscience Laser Altimeter System, mit dem weltweit die Dicken der Eispanzer, vor allem an den Polen, und deren Veränderung aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurden u.a. hochauflösende Daten zur Landtopografie übermittelt. Dazu bewegte sich ICESat in einem nahezu zirkularen und polaren Orbit in ca. 600 km Höhe um die Erde [16].

GLAS arbeitete dabei mit drei identischen diodengepumpten und gütegeschalteten Nd:YAG-Lasern. Davon befand sich immer nur einer im Einsatz. Die anderen Laser waren als Sicherheit integriert, falls ein Laser ausfallen sollte. Somit wurde die effektiv mögliche Nutzungsdauer des Gerätes erhöht, um die Mindestlaufzeit von 3 Jahren erreichen zu können. Die Laser arbeiteten bei 1064 nm Wellenlänge. Durch einen nichtlinearen Frequenzverdopplerkristall konnte diese auf 532 nm reduziert werden. Die kürzere Wellenlänge fand vor allem bei den Messungen zur Bestimmung der Ausdehnung von Wolken und Aerosolen Anwendung. Die topografischen Daten wurden mit 1064 nm aufgenommen. Die Pulsfrequenz lag bei GLAS bei 40 Hz, mit einer Pulsdauer von 6 ns und einer Energie von ungefähr 75 mJ

bei 1064 nm und 35 mJ bei 532 nm. Als Empfänger fungierte auch hier eine APD, die bei GLAS im Fokus eines Beryllium-Spiegelteleskops mit 1 m Durchmesser lag. Die Empfängereinheit registrierte auf der Erdoberfläche Spots von 60 m im Durchmesser. Diese Spots lagen jeweils etwa 172 m auseinander. Die resultierende Tiefenaufklärung betrug rund 15 cm [16].

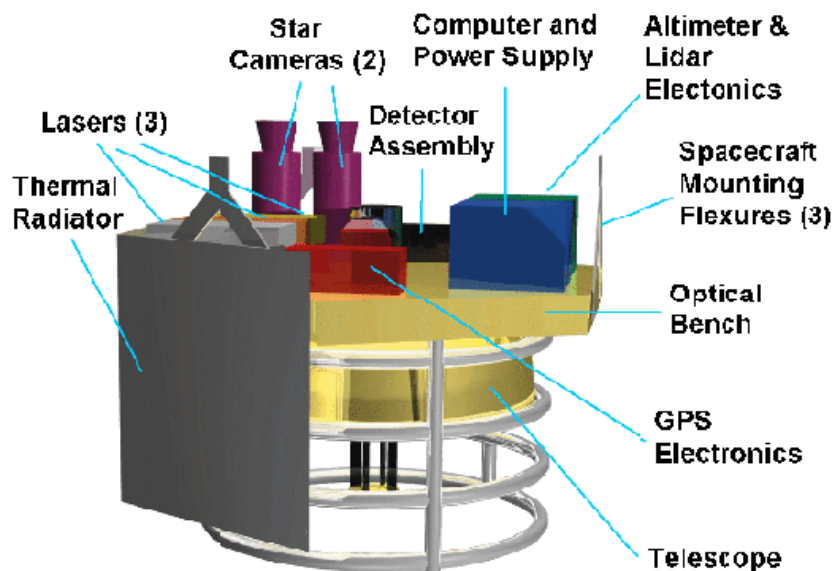


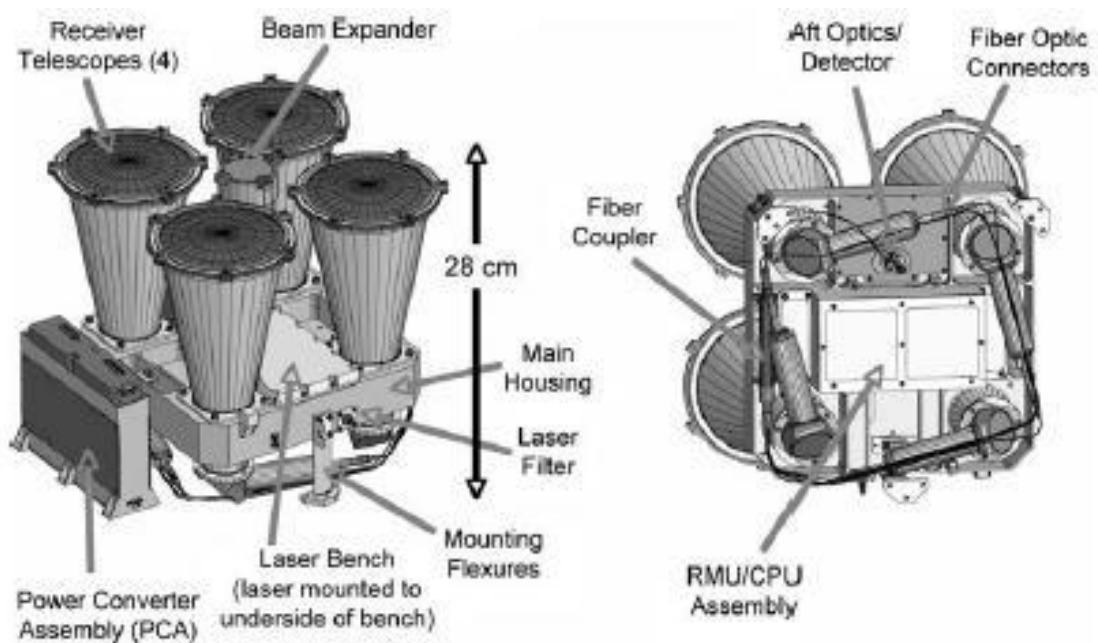
Abbildung 2.6: Modellskizze vom GLAS [17]

### 2.3.3 MLA – Mercury Laser Altimeter

Am 3. August 2004 startete die zweite und bisher letzte Mission zum Merkur mit der Raumsonde Messenger. An Bord der Sonde ist unter anderem das Mercury Laser Altimeter (MLA), welches ebenfalls unter dem Einfluss der gewonnenen Erfahrung durch die vorangegangenen Laseraltimeter am GSFC entwickelt wurde [18].

Das MLA hat vorrangig die Aufnahme der Topografie der nördlichen Hemisphäre des Merkurs zur Aufgabe. Zusätzlich wird dabei die Reflektivität der Planetenoberfläche – auch als Albedo bezeichnet – gemessen. Sie ist ein Indiz für die elementare Zusammensetzung der Oberfläche, sowie deren strukturelle Beschaffenheit. Des Weiteren werden die Messungen dazu verwendet, die physikalische Libration des Merkurs zu bestimmen. Um diese Ziele zu erreichen nutzt das MLA, genau wie seine Vorgänger, einen Nd:YAG-Laser, der radial durch Halbleiterdiodenlaser gepumpt wird.

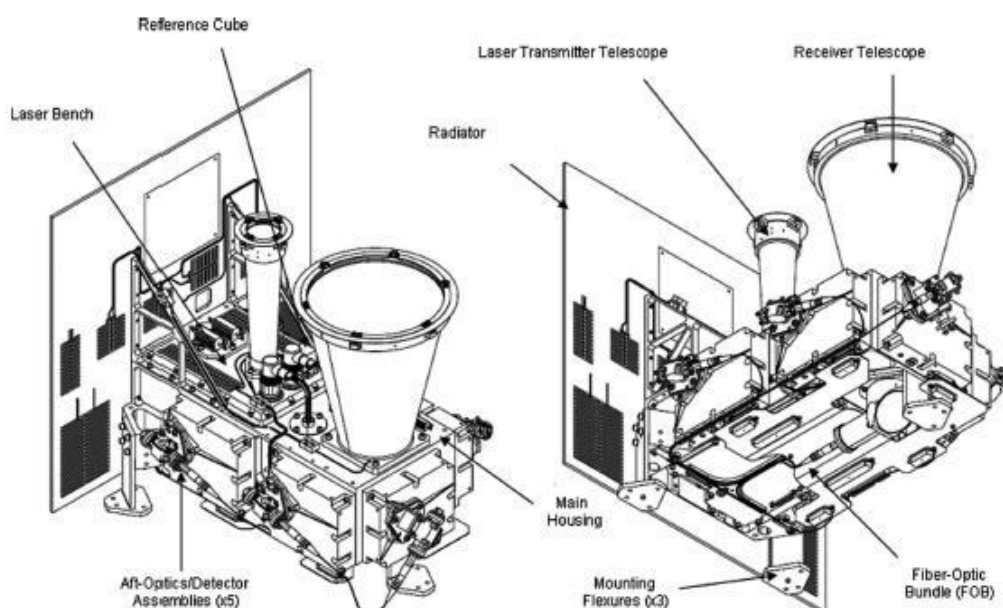
Die Slablaser-Struktur und die zusätzliche Dotierung des Aktiven Mediums mit Chrom zu einem Nd:Cr:YAG-Kristall dienen vor allem der Stabilität gegen Vibrationen und thermische Spannungen. Bei einem Slablaser hat das AM die Form einer Platte (engl.: slab), wobei die Strahlung das AM im Zickzack durchläuft, begrenzt von schmalen Spiegeln. Großer Vorteil dieses Prinzips ist die wirksamere Kühlung des AM. Dies berücksichtigend erzielt der Laser etwa 20 mJ, bei 8 Hz Pulsfrequenz und einer Pulslänge von 5 ns. Beim MLA kommt im Gegensatz zum Vorgänger GLAS ausschließlich eine Wellenlänge von 1064 nm zum Einsatz. Der besondere Unterschied zu seinen Vorgängern liegt im Empfängerenteil. Im MLA kommt kein Spiegelteleskop zum Einsatz, sondern vier refraktive Teleskope, die zusammen in etwa die Wirkung eines Spiegelteleskops mit 0,25 m Durchmesser erzielen. Der Vorteil eines solchen Multiapertur-Teleskops ist die thermische Beständigkeit. Zwar sind Cassegrain-Teleskope athermisch und würden prinzipiell den Gegebenheiten am Merkur standhalten, doch ist das Problem nicht die Temperatur an sich, sondern vielmehr sind es die großen Temperatursprünge, z.B. beim Wechsel von Tag zu Nacht. Diesen Umstand kann ein refraktives Teleskop wesentlich besser kompensieren als ein äquivalentes Beryllium-Cassegrain-Teleskop [18][19].



**Abbildung 2.7:** Mercury Laser Altimeter Designskizze [19]

### 2.3.4 LOLA – Lunar Orbiter Laser Altimeter

Das Lunar Orbiter Laser Altimeter ist das zweite noch im Einsatz befindliche Laseraltimeter, welches in eine Raumsonde integriert ist. Es ist Teil des Lunar Reconnaissance Orbiters (LRO), der am 18. Juni 2009 gestartet wurde, um am 23. Juni 2009 den Mond zu erreichen. Nach einer einjährigen Erkundungsphase befindet sich die Sonde zwischenzeitlich in der Phase der wissenschaftlichen Messungen und wird noch bis etwa September 2012 Daten senden. Ziel des Orbiters ist es, die Mondoberfläche mit einer Tiefenauflösung von ca. 0,1 m zu vermessen, die immerschattigen Krater an den Polen auf Eis zu untersuchen und sichere Landezonen für künftige, bemannte Mondmissionen zu finden. Im Vergleich zu den anderen Laseraltimetern arbeitet LOLA zwar auch mit einem einzelnen Nd:YAG-Laser als Quelle, spaltet dessen Strahl allerdings über refraktive Optiken zu 5 Strahlen auf. Die an der Mondoberfläche reflektierten Photonen werden von einem multiplen FOV-Empfänger, bestehend aus 5 unabhängigen Detektoren, aufgenommen. Damit erhöhen sich die Abdeckung und die Aufnahmemenge. Die Parameter des Lasers unterscheiden sich deutlich z.B. vom MLA, da die Orbits beider Sonden stark voneinander abweichen. So erzielt LOLA etwa 2,7 mJ Pulsenergie mit einer Pulsdauer von 6 ns und bei einer Pulsfrequenz von 28 Hz. Zudem setzt der LRO 532 nm als zweite Wellenlänge ein, um mit der Erde zu kommunizieren. Dies dient der Positions- und Orbitbestimmung der Sonde von der Erde aus [20].



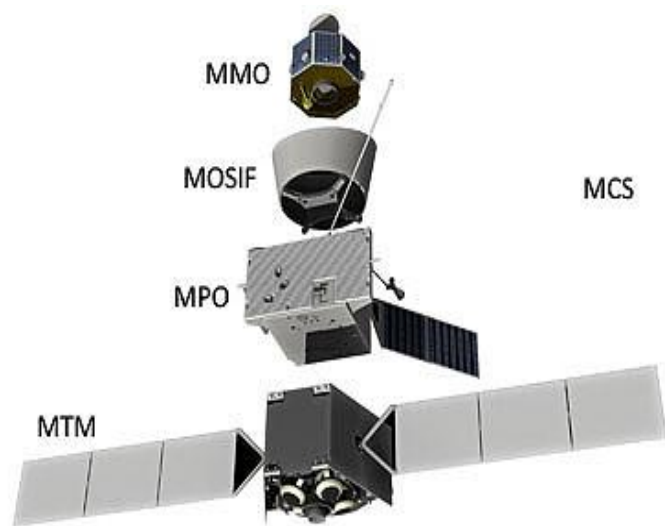
**Abbildung 2.8:** Lunar Orbiter Laser Altimeter Modellskizze [20]

## 2.4 BepiColombo und BELA

### 2.4.1 BepiColombo

Als Gemeinschaftsprojekt zwischen der European Space Agency (ESA) und der Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) wird die nunmehr dritte unbemannte Mission zum Merkur im Sommer 2014 von der Erde aus starten. Nach sechsjähriger Flugzeit und diversen Swing-by's an Erde, Venus und Merkur soll die Raumsonde dann im Mai 2020 in einen Orbit um den innersten Planeten unseres Sonnensystems einschwenken [21].

Namensgebend für die Mission ist der italienische Mathematiker und Ingenieur Giuseppe „Bepi“ Colombo (1920 – 1984), der maßgeblich an der Bestimmung der Bahn für die erste Merkur Mission Mariner 10 mitgewirkt hat. Die Raumsonde besteht im Wesentlichen aus drei Modulen: zum einen aus dem Mercury Planetary



**Abbildung 2.9:** Mercury Composite Spacecraft (MCS) [22]

Orbiter (MPO), der die Instrumente der ESA transportiert und zum anderen aus dem Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) der JAXA sowie dem Antriebsmodul Mercury Transfer Module (MTM). Der MMO ist hinter einem Sonnenschild verborgen und über das MMO Sunhild and Interface Structure (MOSIF) mit dem MPO verbunden. Nach Erreichen eines Orbits um Merkur trennt sich der MMO von der Sonde, um in einem größeren Orbit zu agieren. Der MPO mit dem BepiColombo Laser Altimeter – kurz BELA – an Bord verbleibt am MTM, der es in die geplante Umlaufbahn bringt. Beide Orbiter sollen sich auf einer polaren Umlaufbahn um den Planeten bewegen. Die Operationsphase der Orbiter soll ein Erdenjahr betragen und kann um ein weiteres verlängert werden [22].

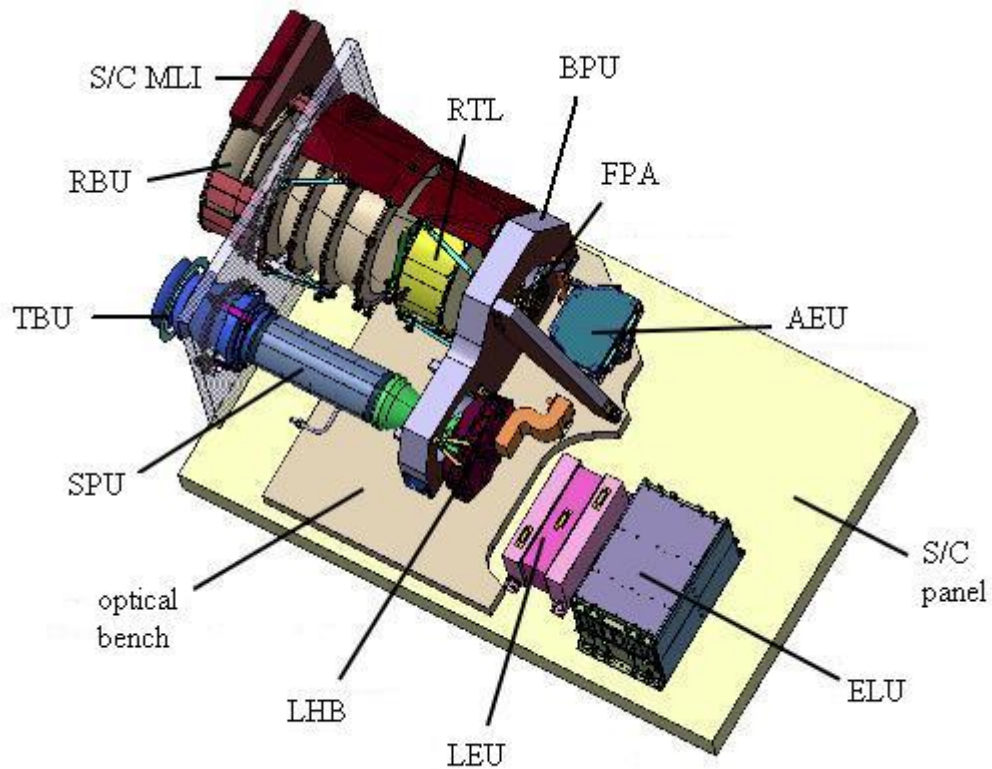
Um den bisher am wenigsten erforschten Planeten unseres Sonnensystems besser zu verstehen sind u.a. folgende Punkte für die Mission von besonderem Interesse [21]:

- vollständige Kartierung Merkurs Topografie
- Untersuchung der hohen Dichte Merkurs sowie dessen geologische Entwicklung
- Messen des Tidenhubs zum Auffinden eines möglichen flüssigen äußeren Kerns und damit u.U. den Ursprung des Magnetfelds
- Untersuchung der Zusammensetzung der Merkuroberfläche
- Analyse der Exosphäre
- Nachweis von Wassereis an den Polen
- Nachweis von Einsteins Gravitationstheorie

## 2.4.2 BepiColombo Laser Altimeter

Ein wichtiges Instrument zur Beantwortung dieser Fragen ist das BepiColombo Laser Altimeter, kurz auch als BELA bezeichnet, das im MPO-Modul untergebracht wird. Es entsteht als Kooperation zwischen dem Physikalischen Institut der Universität Bern in der Schweiz und dem Institut für Planetenforschung des DLR's in Berlin. Dabei wird in Bern der Empfängerteil des Altimeters entwickelt, wohingegen in Berlin der Transmitter entsteht. Zusammengesetzt wird das Instrument letztendlich von der Universität Bern, bevor es dann 2014 als erstes europäisches Laseraltimeter auf seine Reise zum Merkur geschickt wird [23].

BELA nutzt, ebenso wie die anderen Laseraltimeter in Raumsonden, als Transmitter einen aktiv gütegeschalteten Nd:YAG-Laser mit 1064 nm. Betrieben wird der Laser bei 10 Hz, wobei etwa 50 mJ starke, ca. 2 bis 8 ns kurze Laserpulse abgefeuert werden. Je kürzer der Puls, desto verlässlicher wird die Wiedergabe der Oberfläche, da das reflektierte Signal weniger gestreut empfangen wird. Der Spot auf der Oberfläche des Merkurs hat in etwa die Abmessung von 20 bis 50 m Durchmesser. Die Laufzeit vom Senden des Pulses bis zum Empfangen des Reflexes wird über die Detektion durch die APD und die folgende Nachprozessierung mittels Elektronik gemessen. Der Empfänger ist bei BELA ein Spiegelteleskop mit 20 cm Durchmesser und hat ein Sichtfeld von etwa 180 bis 450 m im Durchmesser auf der Planetenoberfläche. Zum Schutz sitzt die APD hinter einer Reihe von Bandpass-Interferenz-Filtern. Durch eine entsprechende Abschirmung (Baffle) und thermische Kontrolle kann BELA auch auf der Tagseite mit nur geringfügig reduziertem Signalrauschverhältnis arbeiten, um so die Datenerfassung zu optimieren. BELA erreicht daher eine Tiefenauflösung von  $< 1$  m, analog zur erwarteten Sondenposition. Bis zu einer Entfernung von 1000 km zur Oberfläche ist eine optimale Datenerfassung zu erwarten. Die Messpunkte befinden sich etwa alle 250 m auf der Bodenspur. Letztere haben am Äquator einen Abstand von ca. 25 km und schneiden sich an den Polen. Dieser Abstand wird infolge veränderter Messbahnen mit der Laufzeit der Mission auf 6 km reduziert [7].



**Abbildung 2.10:** die BELA Komponenten, zusammen mit BPU montiert auf die Raumsonden Konsole [7]

Wie in Abbildung 2.10 erkennbar ist, sind der Transmitter- (Tx) und der Empfängerteil (Rx) voneinander separiert. Das macht eine noch exaktere Justage der Komponenten notwendig. Der emittierte Laserpuls muss mit sehr engen Toleranzgrenzen in jedem Fall koaxial zur optischen Achse des Empfängerteleskops sein. Die Winkelabweichung der Instrumente darf maximal 5 mrad betragen. Das generiert auf der Merkuroberfläche eine Messpunktabweichung von 35 km von Umrundung zu Umrundung. Weiterhin muss die optische Achse des Transmitters koaxial zur z-Achse der Raumsonde sein. Die maximale Abweichung beträgt hierbei 30  $\mu\text{m}$ , was auf der Oberfläche zu einer Verschiebung von einem halben Spot-Durchmesser führt. Tabelle 1 stellt alle relevanten Komponenten BELAs zusammenfassend dar [7].



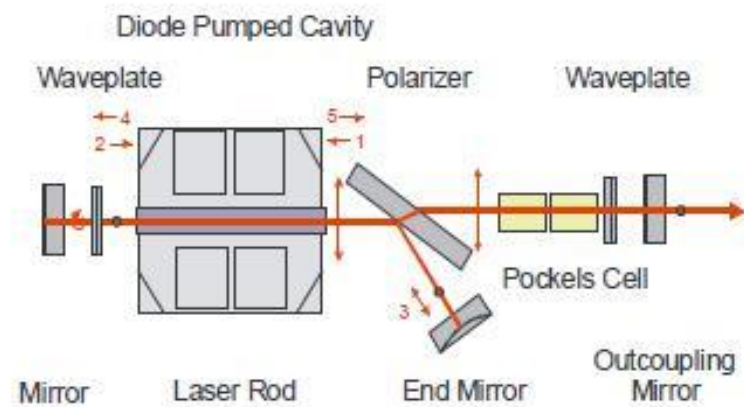
**Tabelle 1:** Zusammenfassung der Komponenten von BELA [7]

<b>Komponente</b>	<b>Funktion</b>	
Electronics Unit (ELU)	enthält das Digital Processing Modul, das Spannungswandler Modul, sowie das Modul zur Entfernungsbestimmung; ELU hat die einzige direkte elektrische Verbindung zur Raumsonde; sie sorgt für die elektrische Versorgung der Instrumente sowie der Kontrollfunktionen und verbindet den Transmitter mit dem Empfänger	
Laser Electronics Unit (LEU)	steuert den Laser und versorgt ihn mit Strom	
Transmitter Baffle Unit (TBU)	hat keine mechanische/thermische Verbindung zu BELA, ist jedoch über eine Konsole an der Raumsonde befestigt; hindert Strahlung am Eindringen in den Tx	
Straylight & Contamination Protection Unit (SPU)	auf der Optikbank der Sonde befestigt; schließt die Lücke zwischen der Transmitter Apertur und der TBU; schützt vor Streulicht und Verunreinigung	
Receiver Baffle Unit (RBU)	hat keine mechanische/thermische Verbindung zu BELA, ist jedoch über eine Konsole an der Raumsonde befestigt; hindert Strahlung am Eindringen in den Rx	
Analogue Electronics Unit (AEU)	enthält eine Hochspannungsquelle für die APD und Elektronik für den Entfernungsmesser	
Base Plate Unit (BPU)	Base Plate	ist an der optischen Bank der Sonde befestigt; dient zur Befestigung anderer Komponenten
	Receiver Telescope (RTL)	empfängt die an der Planetenoberfläche reflektierten Photonen und leitet sie zur APD
	Focal Plane Assembly (FPA)	besteht aus der Back-End Optics (BEO), welche einen Interferenzfilter zur Isolation der Wellenlänge von 1064 nm enthält, und der Avalanche Photodiode (APD)
	Laser Head Box (LHB)	beinhaltet den Oszillator und den Verstärker des Lasers, sowie den 18x-Strahlaufweiter (BEX) zum Erreichen des notwendigen Spots, zwei optische Fasern leiten einen Teil des Lichtes zur FPA zur Detektion der Zeit des emittierten Pulses

### 2.4.3 BELA Transmitter Laser

Der Laser von BELA wird von der Carl Zeiss Optronics GmbH gefertigt und setzt sich im Wesentlichen aus der LHB und der LEU zusammen. Der zur Pulserzeugung eingesetzte Laser befindet sich dabei in der LHB gemeinsam mit dem 18x-Strahlaufweiter (BEX) und dem Oszillator.

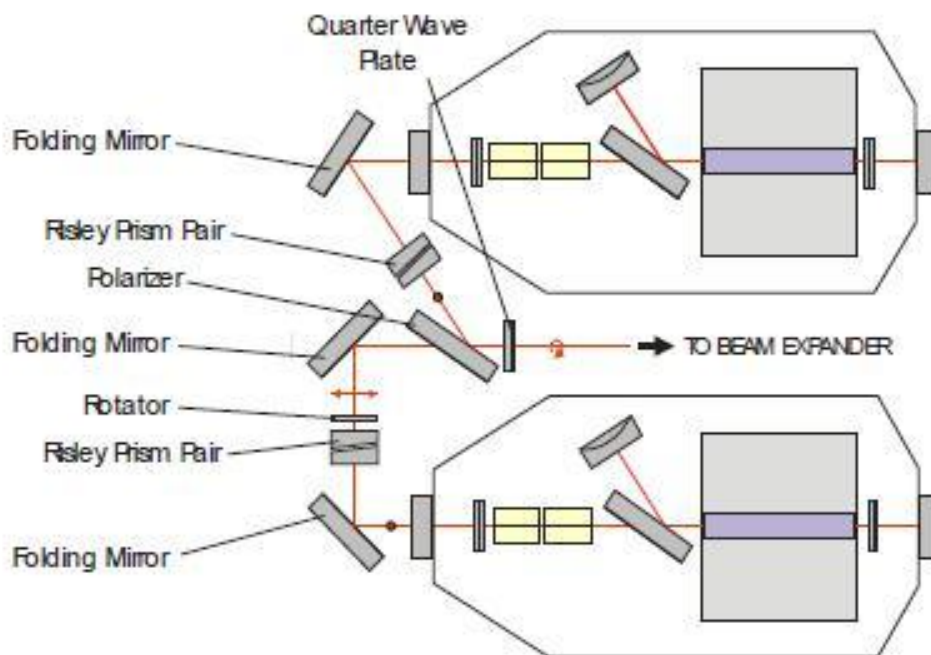
Die Laserquelle ist hierbei ein von zwei Diodenbänken gepumpteter Nd:YAG-Laser, dessen Kavität in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt ist.



**Abbildung 2.11:** BELA Tx Nd:YAG-Resonator (Schema) [24]

Die Pumpdioden arbeiten mit einer Wellenlänge von 808,4 nm, da der Nd:YAG-Kristall bei dieser Wellenlänge Photonen am besten absorbiert. Durch die radiale Anordnung der Pumpdioden wird ein hinreichend homogenes Strahlprofil erzeugt, was die Detektion durch den Rx verbessert. Durch Laservorgänge im Kristall emittiert der Nd:YAG-Laser bei einer Wellenlänge von 1064 nm. Zwar ist die Effizienz der Detektoren bei 532 nm höher, doch nimmt diese Effizienz durch die Frequenzverdopplung des langwelligeren Lichtes wieder ab, so dass die besten Ergebnisse bei 1064 nm zu erzielen sind. Zudem wird die Detektion der kürzeren Wellenlänge durch den großen Anteil an Streulicht durch das Sonnenspektrum degradiert. Der Grund hierfür liegt im Signalrauschverhältnis, das durch die Albedo der Merkuroberfläche bei 1064 nm am besten ist. Im Weiteren kommt im Laser ein optoelektrischer RTP Q-Switch zum Einsatz (Pockels Zelle) sowie Optiken zur Erzeugung eines instabilen Laserresonators mit reflexionsverstärktem Auskoppel-

spiegel. Damit sollen geringe transversale Moden und eine nahezu nur von Beugung begrenzte Beugungsmaßzahl mit  $M^2 < 3$  erreicht werden [24].



**Abbildung 2.12:** BELA Tx Strahlengang (schematisch) [24]

Zur Sicherheit werden in der LHB zwei identische Laser verbaut, die jedoch nicht zeitgleich in Betrieb sind. Durch die Anordnung von Risley Prismen in jedem Strahlengang und der unterschiedlichen linearen Polarisation der jeweiligen Strahlung kann das Licht dieser Kavitäten auf eine gemeinsame optische Achse zusammengeführt werden, so dass im Ausfallszenario umgehend der andere Laser einspringen kann, ohne noch Änderungen am Aufbau notwendig zu machen. Durch einen Polarisator und eine Lambda-Viertel-Platte wird das Licht zirkular polarisiert, um Rückreflexionen und unterschiedliche Polarisationsrichtungen der Strahlung zu verhindern. Die Laser selbst sind unempfindlich gegen rückgestreute Störstrahlung von optischen Elementen. Das wird durch Antireflexbeschichtungen dieser Elemente mit Reflektivitäten von  $\leq 0,5\%$  und einer  $0,5^\circ$  Verkipfung des Austrittfensters der LHB zusätzlich unterstützt. Das BELA Tx Design ist so ausgelegt, dass die LHB mindestens 300 Millionen Schüsse abfeuern kann. Dies entspricht einem Jahr Dauerbetrieb bei 10 Hz Pulsfrequenz [24][25].

**Tabelle 2:** Instrumenten Datenblatt der Tx Laserquelle [7]

Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
Aktives Medium		Nd:YAG
Q-Switch		Aktiv
Pumpquelle		radial gepumpt durch Halbleiter-Laserdioden
Wellenlänge	nm	1064
Pulsenergie BOL	mJ	$\geq 50$
Pulsenergie EOL	mJ	$\geq 40$
Pulsfrequenz	Hz	10 (von Bodenkontrolle änderbar)
Pulslänge	ns	3 - 8
Strahldivergenz	$\mu$ rad	$50 \pm 10$
Strahldurchmesser	mm	$\leq 74 (1/e^2)$ an der BEX Apertur ( $\varnothing = 85$ mm)

**Tabelle 3:** Instrumenten-Datenblatt der Rx- und APD-Komponente [7]

Komponente	Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
<b>Rx</b>	Teleskop Apertur	mm	204
	Brennweite	mm	1250
	Design		Ritchey-Chrétien-Cassegrain-Teleskop
	Material		Beryllium
	Beschichtung		Gold
	Transmission	%	$> 70$
<b>APD</b>	Detektortyp		Silizium Avalanche Photodiode
	digitale Auflösung	bit	8
	zeitliche Auflösung	ns	2
	Ansprechvermögen	A/W	$> 50$
	Kühlung		Peltier TEC

## 3 Methodik und Umsetzung

### 3.1 LabVIEW-Interface

#### 3.1.1 Anforderungen

Zur Verifizierung der vorgegebenen Anforderungen an die Instrumente besteht, wie bereits erläutert, die Notwendigkeit, eine Fülle an Parametern unterschiedlicher Quellen aufzunehmen und auszuwerten. Zum Einsatz kommen dabei eine CCD-Kamera von der Firma Spiricon, deren Daten über die Spiricon-eigene Software BeamGage (BG) abgerufen werden sowie ein Leistungsmessgerät der Firma gentec-eo, dessen Informationen direkt über die Anbindung an den PC abgerufen werden können. Zudem bedient man sich zum Feststellen der Wellenlänge der Laserstrahlung eines Wavemeters von HighFinesse, ebenfalls mit eigener Software-Schnittstelle.

Die Bedingungen an die Leistungsfähigkeit, die an BELA gestellt werden, bestimmen dabei die Anforderungen an den Testaufbau zur Überprüfung des Transmitters. Zielsetzung ist es einen Laserspot auf der Oberfläche des Merkurs erzeugen, der nicht größer als 100 m im Durchmesser ist. Tatsächlich wird BELA in Abhängigkeit vom Abstand der Raumsonde zur Planetenoberfläche nur einen Spot von 20 bis 50 m generieren. Dementsprechend hat die Strahldivergenz von 50  $\mu$ rad eine maximal zulässige Abweichung von  $\pm 10$   $\mu$ rad. Die relative Genauigkeit der Tiefenauflösung auf dem Planeten von Schuss zu Schuss soll kleiner 1,0 m betragen. Das entspricht dem durchschnittlich zu erwartenden Wert für die Oberflächenrauigkeit. Dabei sollen die Pulse mit einer maximalen Abweichung von 1 % aufeinander abgestimmt werden. Die Winkelabweichung der Instrumentenachse soll im Maximum 5 mrad betragen. Das zieht einen Abstand der Messbahnen von 35 km von Orbit zu Orbit nach sich. Überdies muss ein gutes Strahlprofil garantiert werden, so dass möglichst ein Gauß – Profil ( $TEM_{00}$ ) von der Laserquelle erzeugt wird. Dadurch erhöht vor allem die Detektierbarkeit von Photonen mit dem Empfänger. Die Qualität des Strahlprofils wird jedoch mitunter stark von einer homogenen Injektion der Pumpenergie in das AM beeinflusst. Während der Operationsphase von einem Jahr soll der Laser theoretisch durchgehend in Betrieb sein können, was etwa 300 Millionen Schuss bei 10 Hz

Pulsfrequenz entsprechen würde. Damit die BepiColombo-Mission als erfolgreich beendet gelten kann, soll BELA ungefähr 80 % der Planetenoberfläche des Merkurs erfassen und mit einem topografischen Netz aus 26 km auseinander liegenden Messpunkten überziehen. Das entspricht grob 100.000 vom Empfänger registrierten Laserpulsen [7][25].

Zur Einhaltung der angestrebten Leistungsziele unter den vorgegebenen Bedingungen, ist im Wesentlichen die Bestimmung der von den schon genannten Messgeräten ausgegebenen Parameter ausreichend. Die von BELA zu verifizierenden Parameter sind:

- Strahlrichtungsstabilität und Justierung
- Strahlprofil
- Strahlqualität
- Divergenz
- Pulsenergie, -länge und -form
- Wellenlänge
- Repetitionsrate

Um die für diese Menge an Parametern notwendige Software übersichtlich benutzen zu können, liegt es nahe, eine einzige und gemeinsame Instanz zu schaffen, die das Abrufen, Kontrollieren und Archivieren aller notwendigen Parameter ermöglicht. Das hierfür eingesetzte Interface trägt den Namen LabVIEW 2010 SP 1 der Firma National Instruments in der Version 10.0.1, nachfolgend kurz als LabVIEW (LV) bezeichnet. LV ist ein grafisches Programmiersystem, wobei das Akronym für Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench steht. Die notwendigen Messgeräte verfügen über ein integriertes Interface zur Implementierung in die LV-Programmiersoberfläche. Dadurch gestaltet sich die Programmierung mit Hilfe von Blockschaltbildern und deren Verknüpfung auf der grafischen Programmiersoberfläche LabVIEWs sehr intuitiv. Die im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit an das zu entwerfende Programm gestellten Anforderungen umfassen die Aufnahme, Wiedergabe und angemessene Archivierung von fünf Parametern, mit Hilfe derer die von BELA zu verifizierenden Parameter ermittelt werden können. Dabei sind sowohl vom Nd:YAG-Laser als auch vom Referenzlaser die Positionen der Spotmittelpunkte (Zentroide) zu erfassen, die der BG-Software entnommen werden. Aus diesen Daten wird der Abstand  $\Delta$  zwischen den

beiden Spots errechnet, der als Maß für die Richtungsstabilität des Nd:YAG-Laserstrahls gilt. Außerdem werden der BG-Software der  $D4\sigma$ -Strahldurchmesser sowie die als Goodness-of-Fit bezeichnete Strahlqualität als Maß für die Ähnlichkeit des realen Strahls zu einem idealen Gaußstrahl entnommen. Aufgrund der Uneinigkeit über die Berechnung dieser Art Strahlqualität, wurde diese temporär aus der entsprechenden ISO entfernt. BG verwendet sie dennoch auf Basis von Spiricons Interpretation der Definition aus der ISO weiter.  $D4\sigma$  bezeichnet den Durchmesser, der das Vierfache von  $\sigma$  ist, wobei  $\sigma$  die Standardabweichung von der horizontal oder vertikal begrenzten Verteilung darstellt. Sinnvoll ist diese Art der Durchmesserbestimmung bei multimodal begrenzten Verteilungen. Zusätzlich wird die Pulsenergie bzw. die Pulsleistung dem Leistungsmessgerät SOLO PE von gentec-eo direkt (ohne Software) entnommen. Die Wellenlängenbestimmung erfolgt über das anfangs genannte Wavemeter von HighFinesse.

Neben der Aufnahme der Daten aus diversen Datenquellen und deren Ausgabe auf einer gemeinsamen Oberfläche, ist die Archivierung der Daten von höchster Priorität. Bei Langzeitmessungen fallen mitunter große Datenmengen an, was eine entsprechend sinnvolle Speicherung eben dieser unabdingbar macht. Da die Informationen, die den Programmen entnommen werden jedoch schon von der Software nachbehandelte Daten darstellen, ergab sich als eine weitere Anforderung an das Programm, ebenfalls die Rohdaten speichern zu können. Aus den einzelnen Pixelinformationen der CCD-Kamera lassen sich bis auf die Wellenlänge und die Energie nachträglich alle Parameter nachprozessieren. Um die Datenmenge so gering wie möglich zu halten, soll die Erfassung dieser Daten allerdings nur für kurze Zeiträume ermöglicht werden und nicht konstant neben der restlichen Datenerfassung stattfinden. Zur Vereinfachung der Handhabung ist außerdem die in BG als ULTRACAL bezeichnete Kalibrierung der BG-Messungen von LV aus zu ermöglichen, um die Untergrundstrahlung auszugleichen. Wie die Anforderungen in LV umgesetzt werden, ist Thema des folgenden Abschnitts [26].

### 3.1.2 Lösung

Voraussetzung für die fehlerfreie Integration von Messgeräten in die LV-Programmierungsumgebung ist das bereits erwähnte Bereitstellen einer Schnittstelle durch die Hersteller der entsprechenden Geräte. So werden in diesem Fall bereits existierende Algorithmen von Spiricon, gentec-eo und HighFinesse genutzt. Im Folgenden werden die Lösungen für die Funktionalität der einzelnen Geräte unter LV dargestellt.

Die Integration der BG-Software zur Strahlanalyse in LV gestaltet sich am schwierigsten, vorwiegend aufgrund der größeren Menge auszulesender Parameter. Spiricon stellt auch den besten Support bei Integrationsfragen, so dass Probleme über eine mit der Software ausgelieferte Dokumentation zur Automation BeamGages, das Nutzerhandbuch sowie die Kundenbetreuung ausreichend gelöst werden können. Bestandteil der Dokumentation sind zudem Programmbeispiele, anhand derer man die Integration der Software nachvollziehen kann. Eines dieser Programmbeispiele wurde als Grundstein für das zu entwerfende Programm verwendet, so dass der Einstieg in das BG-Interface vereinfacht werden konnte. Prinzipiell findet die Erstellung des Programms – auch als Virtuelles Instrument (VI) bezeichnet – in LV auf dem Front Panel sowie dem Blockdiagramm statt. Auf dem Front Panel ordnet man Elemente wie Schalter und Ausgabegraphen an, wohingegen auf dem Blockdiagramm die Programmblöcke entsprechend der gewünschten Funktion angeordnet und verknüpft werden. Für das Beispiel-VI zum Abrufen der Gesamt- und Spitzenleistung ist das in Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 dargestellt.



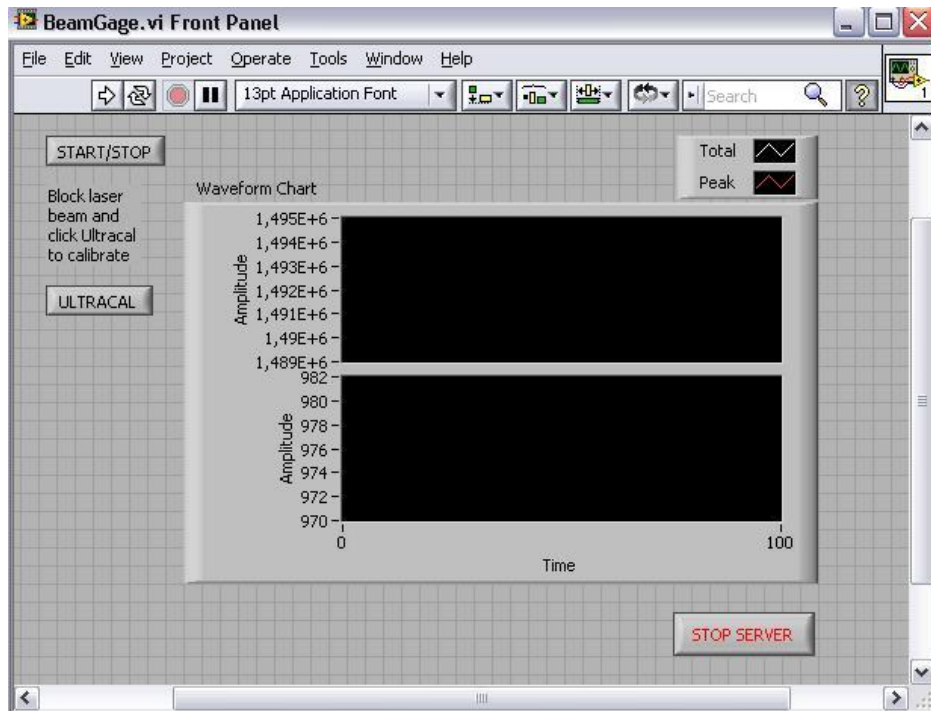


Abbildung 3.1: Front Panel des Beispiel-VI

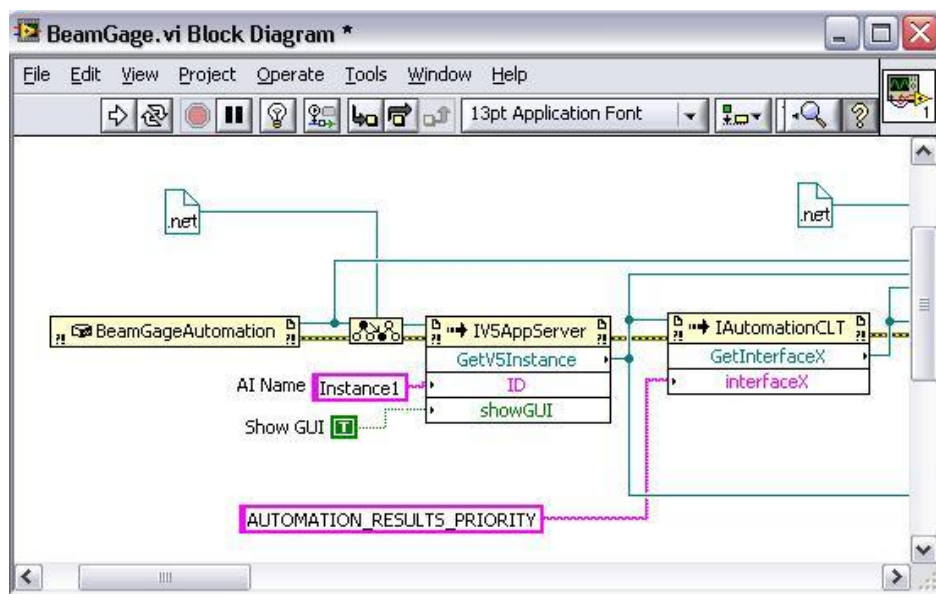
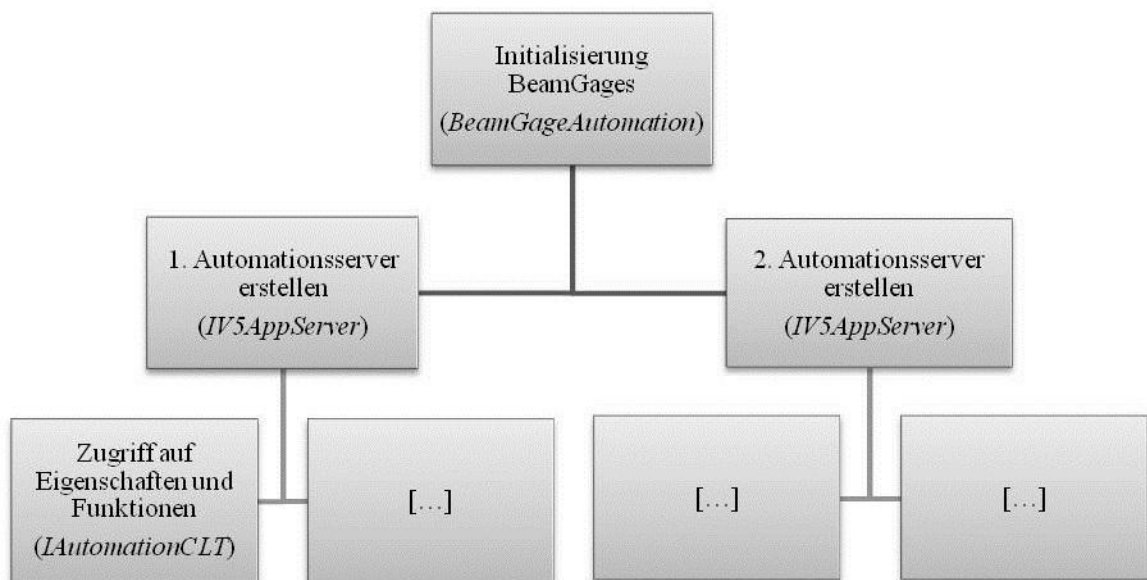


Abbildung 3.2: Blockdiagramm des Bsp.-VI

In Abbildung 3.2 ist der Beginn des sogenannten logischen Kernpfades zu erkennen. Dieser beginnt mit der Initialisierung von BG über die *BeamGageAutomation*-Klasse in LV, um Zugriff auf alle Funktionen der Software zu erhalten. Die türkisfarbenen Verbindungen stellen dabei die weitergegebene Information dar und über die gelben Verbindungen werden auftretende Fehler weitergereicht. Nach der Initialisierung können Methoden oder Eigenschaften von BG aufgerufen werden. So ist es als nächstes

notwendig, einen neuen Automations-Server über den *IV5AppServer*-Aufruf zu erstellen. Damit ist es später möglich, mehrere BG-Server zeitgleich zu nutzen, wobei jeder für sich abrufbar bleibt. Die Funktion *Show GUI* ermöglicht das Anzeigen des BG-Fensters, wenn der Server erstellt wird und ist hier mit *T* für true eingestellt. Zwischen der *BeamGageAutomation*-Klasse und dem *IV5AppServer*-Aufruf befindet sich ein Block mit der Bezeichnung *To More Specific Class*, mit dem die Ebenen der Automation aufgerufen werden. Die Automation *BeamGages* in LV ist hierarchisch aufgebaut, so dass zuerst BG initialisiert und dann ein Server erstellt werden muss, um im Weiteren auf einzelne Funktionen oder Eigenschaften zugreifen zu können (siehe Abbildung 3.3).



**Abbildung 3.3:** schematische Darstellung des Datenzugriffs auf BG über LabVIEW

Schließlich ist es notwendig, eine bestimmte Gruppe von Methoden und Eigenschaften aufzurufen, wodurch man Zugang zu diesen erhält. Dies geschieht mit dem *IAutomationCLT*-Aufruf. Über den *interfaceX*-Eingang lassen sich über einen String die verschiedenen Gruppen ansprechen, unter denen z.B. die verschiedenen Parameter abrufbar sind – so wie die Werte für Gesamt- und Spitzenleistung unter der Gruppe *AUTOMATION\_RESULTS\_POWER\_ENERGY* zu finden sind. Ein großer Vorteil dieser Struktur ist, dass über einen einzelnen Zugriffspunkt die Möglichkeit besteht, das Programm nahezu unbegrenzt zu erweitern, ohne dabei den bereits existierenden Code zu unterbrechen. Am Ende des Logikpfades müssen die einzelnen Instanzen, Methoden

und Aufrufe wieder geschlossen und die BG-Server beendet werden. Dazwischen werden die Operationen angeordnet, die das VI ausführen soll – Abgreifen der Daten aus der jeweiligen Software, Ausgeben in Form von Graphen und Zahlenwerten und Speichern [27][28].

Auf Grundlage dieses VIs werden die gesuchten Parameter wie beschrieben aufgerufen und im Anschluss verarbeitet. Die aus BG entnommenen Informationen stellen sich folgendermaßen dar:

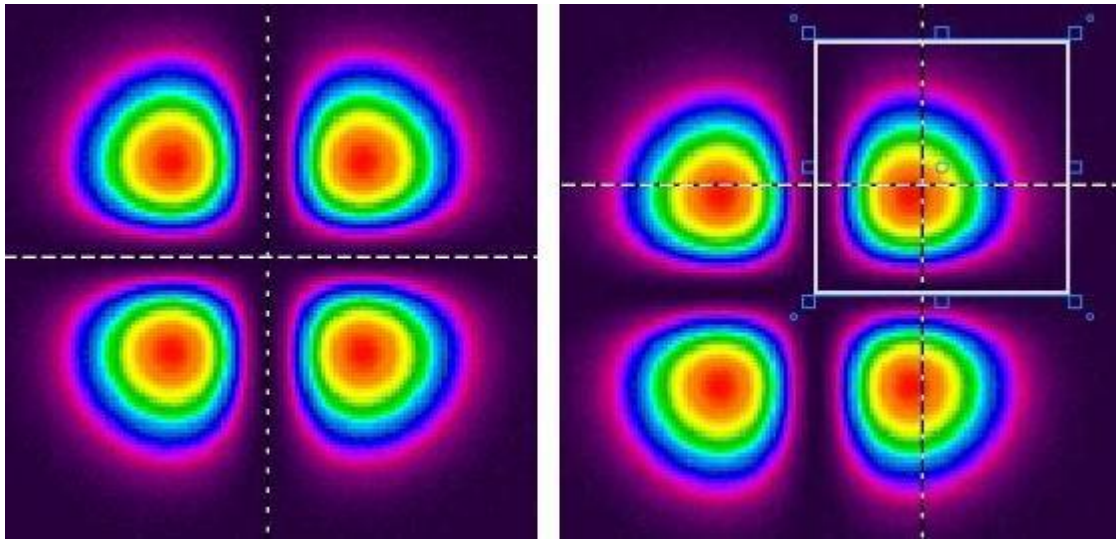
- Spot-Zentroid (centroidx, centroidy)
- $D4\sigma$ -Durchmesser
- Güte der Gauß-Annäherung (Goodness-Of-Fit)

In den nächsten Abschnitten wird die Programmstruktur für die Erfassung und Verarbeitung dieser Parameter detailliert beschrieben.

### **Bestimmung des Abstandes $\Delta$**

Diese werden dann im Haupt-VI über Graphen ausgegeben, woraufhin während des Betriebs Änderungen im Verhalten der Strahlen, wie z.B. ein Wandern (Drift) oder übermäßiges Zittern (Jitter) des Spots, umgehend bemerkt werden können. Eine Schwierigkeit bei der Programmierung war dabei die Detektion der beiden Laserspots, zum einen jener vom Nd:YAG-Laser und zum anderen der vom Referenzlaser. Wichtigste zu erfassende Größe dabei stellt der Abstand der beiden Spots voneinander dar, da dieses  $\Delta$  in gewissen Grenzen konstant bleiben soll. In der BG Software existiert eine Funktion, mit der sich für jeden Spot ein Messbereich festlegen lässt und dieses  $\Delta$  automatisch ermittelt wird. Nach Rücksprache mit dem Hersteller Ophir-Spiricon wurde jedoch deutlich, dass diese Funktion noch nicht im Automations-API integriert ist. Um das Problem zu umgehen, ist das Erzeugen eines zweiten Automationsserver erforderlich. Es ist zurzeit nicht möglich, definierte Messbereiche via LV festzulegen. Jedoch lässt sich in BG eine sogenannte manuelle Apertur über einen Spot legen und diese Einstellung als Setup abspeichern. Über LV ist es im Folgenden möglich, dieses Setup im Zusammenhang mit einem neu erstellten Automationsserver aufzurufen. Die von LV angeforderten Informationen über die Zentroide werden durch das aufgerufene Setup ausschließlich in der gesetzten Apertur abgerufen und nicht aus dem gesamten

Bild der Kamera, wie zuvor. Damit lassen sich für zwei unterschiedlich positionierte Spots, über zwei verschiedene Setups die Zentroide beider Spots bestimmen [29].



**Abbildung 3.4:** Bsp. der Zentroid Position eines  $TEM_{11}$ : links ohne und rechts mit manueller Apertur

Aus den so gewonnenen Zentroid-Positionen beider Spots lässt sich das  $\Delta$  mit folgender Formel errechnen:

$$\Delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad \text{Formel 2}$$

Anhang A1 zeigt den Aufbau im Blockdiagramm zur Erzeugung eines zweiten Servers und des Einbindens eines zuvor gespeicherten Setups. In der unteren Hälfte des Blockdiagramms ist der logische Kernpfad für den zweiten Server zu erkennen. Dieser Server wird parallel zum Ersten über den *IV5AppServer*-Aufruf gestartet, so dass bei Ausführung des VIs nun zwei BG-Instanzen geöffnet werden. Der untere *IAutomationCLT*-Aufruf ermöglicht den Zugriff auf die aktuellen Bilddaten – die gesuchten Parameter. Über den oberen Aufruf wird mit dem String *AUTOMATION\_SAVELOAD\_SETUP* auf die Funktion der Setup-Kontrolle zugegriffen. Letztlich wird über die Methode *IASaveLoadSetup* die Eigenschaft *LoadSetup* ausgelöst. Diese ruft die Datei am Ende des Pfades auf, der mit dem Eingang *fileName* verbunden ist. Dabei gibt die Methode den Status des Ladens (Erfolg, Misserfolg) in einem Textfeld auf das Front Panel aus. Unmittelbar nachdem der Server gestartet wurde, wird somit das erforderliche Setup geladen.

### Rohdatenspeicherung der CCD-Kamera

Schließlich ist für BG weiterhin die Aufzeichnung der rohen Kamerainformationen von Bedeutung. Diese sollen über die Betätigung eines Schalters für eine gewisse Zeit aufgenommen werden können, um die Datenmenge gering zu halten. Bei einer Bildgröße von ungefähr 4 MB pro Einzelbild und 10 Bildern pro Sekunde stößt die Rechnerkapazität schnell an ihre Grenzen. Da die Aufzeichnung nicht permanent laufen soll, befindet sich der Aufruf in einer *Event Loop* – einer Ereignisschleife (vgl. Abbildung 3.5). Entsprechend befindet sich eine Ereignisstruktur innerhalb einer *While*-Schleife bis zur Terminierung dieser. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie das Betätigen eines Schalters, löst die *event structure* ein definiertes Ereignis aus. In diesem speziellen Fall bedeutet das, die Schleife wird aktiv, wenn der Schalter für die Rohdaten-Speicherung betätigt wird. Auch hier wird der Zugriff auf die Funktionen BGs durch die *IAutomationCLT* Klasse bereit gestellt, wobei das Speichern der Rohdaten unter dem *intefaceX*-String *AUTOMATION\_LOGGER* kodiert ist. Auf diesem Weg kann die Logging-Funktion von BG angesteuert werden, wobei die Rohdaten aus BG in einer Datei im HDF5 Format gespeichert werden. In der ersten verknüpften Methode in Abbildung 3.5 wird der Speicherpfad sowie die Art der Datenentnahme deklariert – in diesem Fall werden die Daten binär aufgezeichnet. Die folgende Verknüpfung ist die Methode zum Start des Rohdatenexports. Wird der Schalter für die Rohdatenaufnahme im VI erneut betätigt, wird die Schleife terminiert und die Rohdaten verbleiben im Zwischenspeicher bis die Aufzeichnung der restlichen Daten angehalten oder gestoppt wird. Der Speicherpfad für die Daten muss dabei allerdings vorher im Front Panel deklariert werden.



### **Ermittlung der Wellenlänge**

Der Zugriff auf das Wellenlängenmessgerät kommt hingegen mit weniger VIs aus. Hierbei wird vom Hersteller HighFinesse lediglich eine einzelne DLL-Datei zur Verfügung gestellt. DLL steht in der Informatik für Dynamic Link Library – eine dynamische Verbindungsbibliothek, die den benötigten Speicherplatz reduzieren soll. Dazu wird ein Programmcode, der von mehreren Programmen benötigt wird, in eine einzelne Datei geschrieben, die von mehreren Programmen zeitgleich aufgerufen werden kann. Auf eine solche Datei kann man in LV über einen Bibliotheksaufruf zugreifen und jede zur Verfügung stehende Information auslesen. Auch hier ist der Nachteil, dass die Software von HighFinesse in Betrieb sein muss, denn die Informationen werden im Gerät selbst nicht vorprozessiert. Dafür wird die Instanz für das Wavemeter automatisch mit dem Bibliothekszugriff initialisiert und ebenfalls selbstständig geschlossen. So fällt der Programmieraufwand hierbei am geringsten aus.

### **Archivierung**

Die letzte Funktion, wohl aber nicht von geringerer Bedeutung, ist die Archivierung der Daten. Wie bereits erwähnt, soll diese in angemessener Form erfolgen, d.h. die gespeicherten Daten sollen hinreichend gut nachprozessierbar sein und kein Speicherproblem nach sich ziehen. Die Abbildung des Blockdiagramms in Anhang A2 zeigt den Ausschnitt des Diagramms, in dem die Speicherung der Daten erfolgt. Ohne zu sehr ins Detail gehen zu wollen, lässt sich sagen, dass die Archivierung auf der linken Seite des Diagramms ihren Anfang nimmt. Über dem Rechteck auf der linken Seite – der Entsprechung einer *case structure* – sind einige Blöcke angeordnet, mit denen in erster Linie ein neues Tabellendokument im csv-Format angelegt bzw. an ein bereits bestehendes Dokument angehängt wird. Dazu muss bei Programmstart ein Speicherpfad angegeben werden. Daraufhin wird das Dokument überprüft, ob es bereits Daten enthält. Ist das nicht der Fall, werden im Folgenden Überschriften für die aufzunehmenden Parameter erstellt. Sind allerdings schon Informationen in der Datei gespeichert, wird davon ausgegangen, dass diese Header schon vorhanden sind und sie werden nicht erneut geschrieben. Der anfangs ausgewählte Dateipfad wird in die Speicherschleife übergeben. Die von oben kommenden Verbindungen sind auf der einen Seite mit den Ausgängen der jeweiligen

noch gebündelten Parameter verbunden und werden auf der anderen Seite in die Schleife geleitet, in der sie aufgeschlüsselt und nachfolgend in ein Array – im Diagramm oben orange dargestellt – geschrieben werden. Die orange Farbe steht dabei für den Datentyp Double der Parameter. In der Mitte der Schleife ist die Berechnung des  $\Delta$  über Bool'sche Operatoren zu sehen. Dieser Wert wird ebenfalls in das Array geschrieben. Darunter ist die Ausgabe der Daten des Leistungsmessers und des Wavemeters sichtbar, die analog zu den anderen Daten in das obige Array gegeben werden. Schließlich wird das Array im Gesamten an das VI *Write to Spreadsheet File* übergeben, wobei es im Vorfeld wegen Konvertierungsproblemen von Double in String umgewandelt wird. Das genannte VI speichert die Daten im Array anschließend in das vorher angelegte csv-Dokument, welches sich komfortabel mit Excel öffnen und nachbearbeiten lässt.

### **Erläuterung der Handhabung des VIs**

Die generelle Handhabung des VIs ist so einfach wie möglich gehalten. Das VI wird in LV über den *Run*-Button gestartet. Ein Kompilieren des VIs zu einer selbstständigen Anwendung ist nicht vorgesehen und auch nicht notwendig. Mit dem Start des VIs werden zeitgleich die beiden im Blockdiagramm festgelegten Setups für die manuellen Aperturen geladen und die zwei Server gestartet. Außerdem wird vor Beginn der Aufnahme der Daten nach einem Dateipfad für die Speicherung in der csv-Datei gefragt. Der Dateipfad ist vollständig und mit der Endung .csv anzugeben. Sobald alle Server vollständig geladen sind und der Speicherpfad bekannt ist, beginnt die Aufnahme und Speicherung der Daten. In Abbildung 3.6 wird die Programmoberfläche dargestellt. Auf dem Front Panel werden die Werte für die Zentroid-Positionen numerisch ausgegeben und daneben der für das  $\Delta$  berechnete Wert. Das  $\Delta$  wird zudem in dem oberen, linken Diagramm grafisch dargestellt. Rechts daneben wird der  $D4\sigma$ -Durchmesser in einem Diagramm präsentiert. Unter den beiden oberen Diagrammen befindet sich die Bedienung zur Speicherung der Rohdaten. Im weißen Feld auf der rechten Seite ist der vollständige Dateipfad anzugeben und über den Button darunter lässt sich die Aufnahme starten. Im unteren Drittel des VIs befindet sich die Steuerung für den Leistungs- bzw. Energiemesser. Vor Start des VI über den *Run*-Button muss über das linke Menü *VISA Resource Name* der COM-Port ausgewählt werden, an dem das Messgerät angeschlossen ist. Konnte eine erfolgreiche Verbindung hergestellt



werden, wird der Name des Messkopfes in dem Feld darunter angezeigt. Im Falle eines Fehlers kann die Fehlerursache in dem Feld rechts daneben überprüft werden. Während die Messung läuft wird die aktuelle und durchschnittliche Energie, respektive Leistung im Fenster ausgegeben. Das Diagramm auf der linken Seite gibt zusätzlich einen Überblick über die aktuellen Leistungswerte pro Schuss. Die Bedienelemente auf der linken oberen Seite haben bis auf die *ULTRACAL* Funktion Einfluss auf das gesamte VI. Über den Button *ULTRACAL* wird die Messung in BG kalibriert, d.h. die vorhandene Untergrundstrahlung wird von den Werten abgezogen. Hierfür müssen die Laserstrahlen blockiert werden. Letztlich macht es Sinn die Kalibrierung schon vor Start der VI durchzuführen, da sonst anfangs unkalibrierte Werte aufgenommen werden. Die Aufzeichnung von Daten wird während der Kalibrierung ausgesetzt. Der *START/STOP*-Button hält die aktuelle Messung an bzw. startet diese wieder. Dabei wird die aktuelle Datei nicht geschlossen, sondern die Aufzeichnung der Daten lediglich angehalten. Das gilt auch für die Aufzeichnung der Energie. Zudem wird mit Betätigung dieses Schalters, d.h. mit dem Pausieren der Messung, u.a. auch das Abspeichern der Rohdaten aus dem Zwischenspeicher initiiert. Der untere Schalter *STOP SERVER* beendet das VI und kehrt zur LV Programmoberfläche zurück. Damit wird die Speicherung in das aktuelle Dokument beendet, wodurch beim nächsten Start des VIs ein neuer Dateipfad angegeben werden kann. Trotzdem lässt sich die vorhandene Datei erneut als Speicherort auswählen, wobei die neuen Messdaten angehängt werden, ohne die Vorigen zu überschreiben.

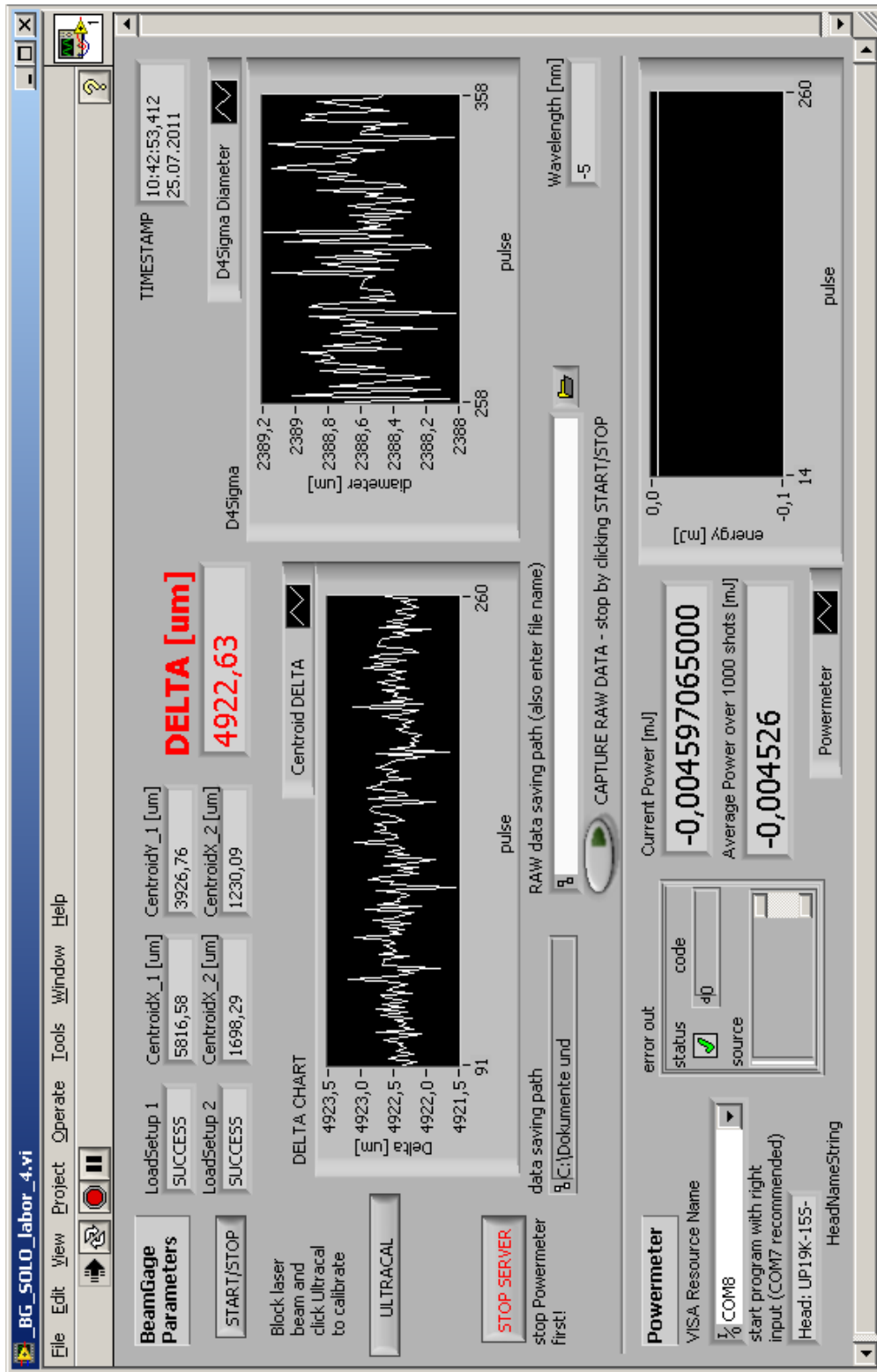


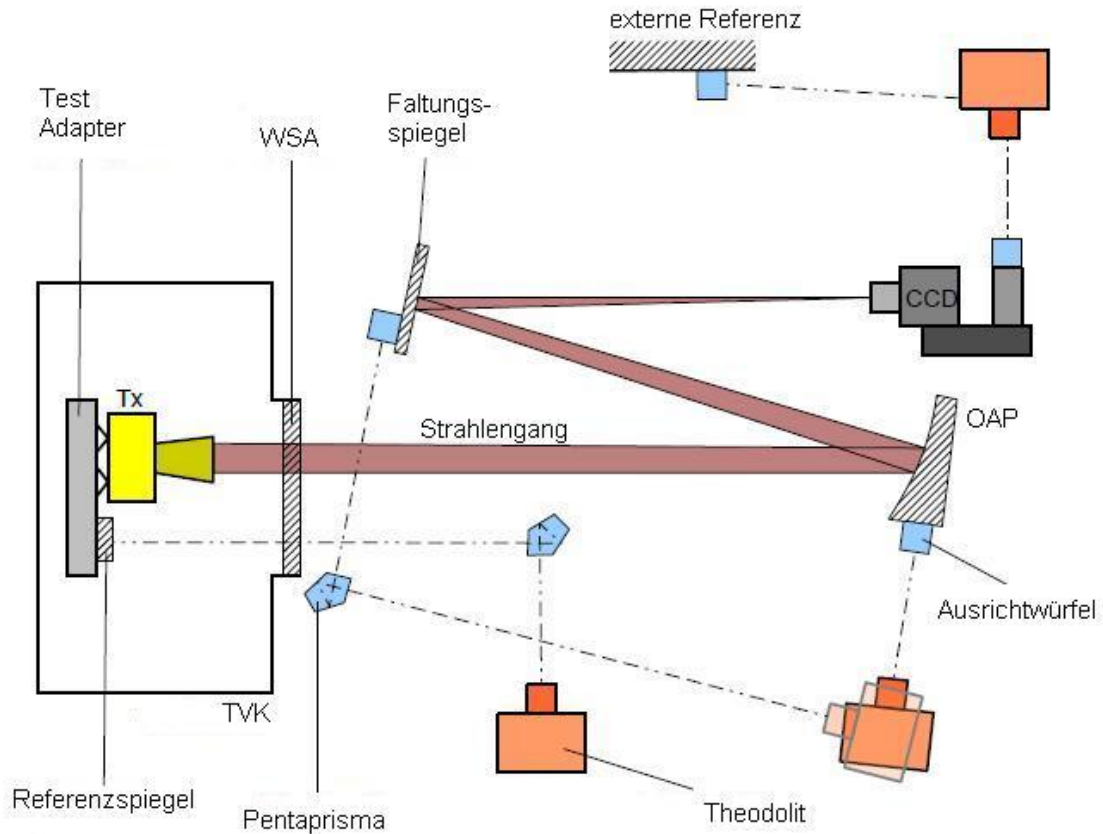
Abbildung 3.6: Überblick über das Front Panel des VIs; Ausgegeben werden die Zentroid-Positionen, das daraus errechnete  $\Delta$ , der Durchmesser des BELA-Spots sowie dessen Wellenlänge; unten wird die Pulsenergie dargestellt; an der linken Seite sind zudem diverse Kontrollen zum Starten und Stoppen sowie zum Kalibrieren des VIs platziert

## 3.2 Messprinzip

### 3.2.1 Theodolit-Konzept

Um die Richtungsstabilität des Lasers korrekt klassifizieren zu können, müssen einige Dinge beachtet werden. Zum einen ist es notwendig, die am Merkur vorherrschenden Bedingungen realitätsnah zu simulieren. Dazu wird die endgültige Verifizierung, wie bereits in Abschnitt 1.4 erwähnt, in einer Thermal-Vakuum-Kammer (TVK) erfolgen. Zum anderen ist die Wahl der Messmethode ein kritischer Punkt.

Eine Möglichkeit die Stabilität des Lasers zu überprüfen, ist die Verwendung von Theodoliten. Auf Grund ihrer Messgenauigkeit und der Möglichkeit sehr kleine Winkel zu messen, liegt ihre Verwendung nahe. Im Folgenden würde der Laserstrahl über einen Off-axis Parabolic Mirror – einen außeraxialen Parabolspiegel (OAP) – auf die CCD-Kamera fokussiert werden. Über die Zentroid-Daten lässt sich dann die Strahlstabilität bestimmen. Die Bewegungen der Spots auf der Kamera beinhalten allerdings schon die Bewegungen durch andere Elemente im Aufbau – z.B. der LHB, des optischen Fensters an der TVK, der Faltungsspiegel und der Befestigung des Lasers in der TVK. Um den translatorischen und rotatorischen Einfluss dieser Elemente ausschließen zu können, ist es notwendig, jedes Element mit Hilfe eines Theodoliten zu untersuchen. Damit eine Verifizierung erfolgen kann, darf sich nach Beginn der Messungen bis zum Ende dieser die Konfiguration der optischen Elemente nicht verändern. Auch muss die Messung so oft wiederholt werden, bis die letzte Komponente für diesen einen Messdurchgang auf Abweichungen untersucht wurde. Ein weiterer kritischer Punkt ist, dass die Messung nur zu diskreten Zeitpunkten möglich ist, womit eine Echtzeit-Kalibration entfällt. Das bedeutet, dass eventuelle Veränderungen zwischen diesen diskreten Punkten nicht aufgenommen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass für jeden Theodoliten Personal notwendig ist. Um schnell Abweichungen bemerken zu können, müsste eine den Theodoliten entsprechende Anzahl an Personen nahezu durchgehend den Aufbau im Auge behalten. Das Tragen von geeigneter Reinraumkleidung, Schutzbrillen sowie die wechselnden Klimaverhältnisse erschweren die Messung über einen längeren Zeitraum. Zusätzlich ist der Einsatz von Theodoliten im Strahlengang eines starken Lasers nicht ungefährlich [30].



**Abbildung 3.7:** schematischer Messaufbau zur Stabilitätsmessung mit Theodoliten [30]

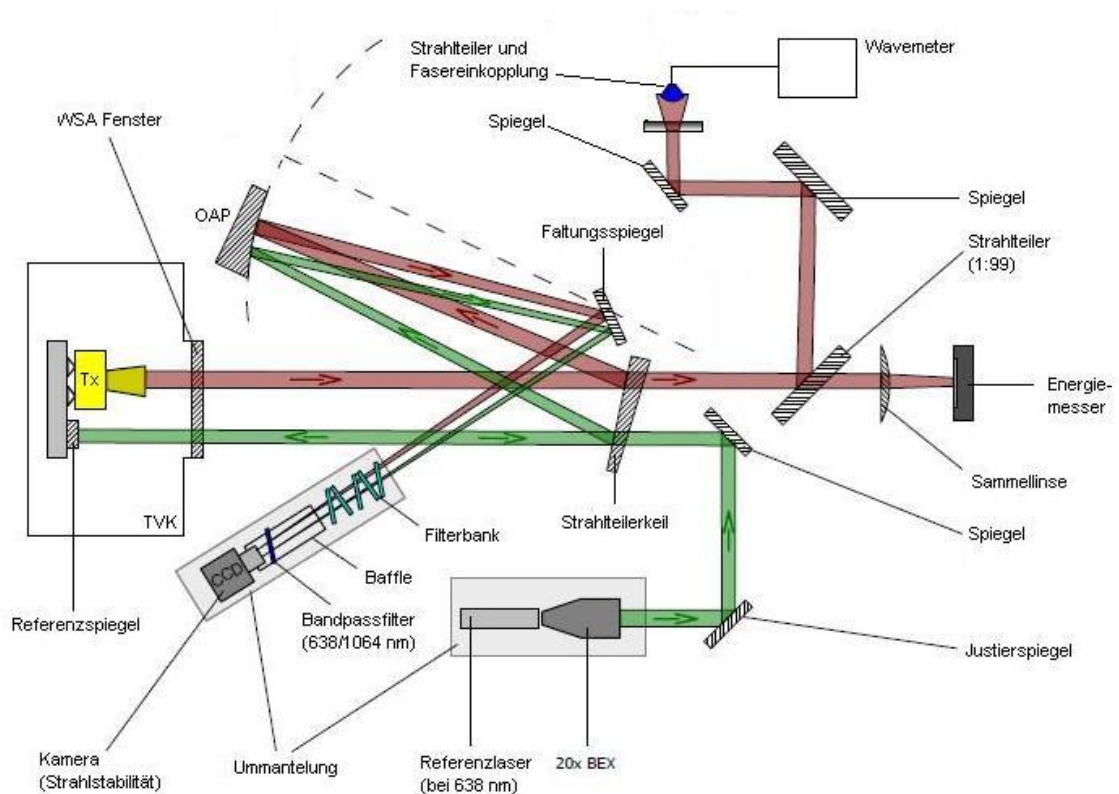
Letztlich wurde das vorgestellte Messprinzip aus den genannten Gründen verworfen. Zudem findet die Positionsbestimmung der Einzelkomponenten lediglich absolut statt, so dass die Messung der Strahlbewegung im Gesamten ebenfalls als absolut betrachtet werden kann. Als Alternative dazu wurde ein differentielles Messkonzept entwickelt, das einen Referenzlaser einsetzt. Dieses Konzept basiert auf den Erkenntnissen und Erfahrungen der NASA, die diese bereits mit ihren früheren Projekten auf dem Gebiet der Laseraltimetrie erlangt haben.

### 3.2.2 Referenzlaser-Konzept

Durch die optomechanischen Elemente im AIV-Messaufbau sowie durch die Lagerung des Lasers auf einer separaten Befestigung innerhalb der TVK und durch andere Einflüsse, wie Streulicht und Luftzirkulation, werden in die Messungen eine

Reihe systematischer und zufälliger Fehler eingebracht. Um ein Signal zu erhalten, das möglichst frei von diesen Störquellen ist, liegt es nahe eine Referenz, welche denselben Fehlern unterliegt, vom eigentlichen Signal abzuziehen. Im Folgenden erhält man ein Differenzsignal, das einige der störenden Einflüsse kompensiert. Die in diesem Aufbau eingesetzte Referenz ist ein zweiter Laser, der in seiner Strahlstabilität um einige Größenordnungen besser ist, als die eigentliche Strahlquelle. Um die Stabilität untereinander vergleichen zu können, strahlt der Referenzlaser auf einen planen Referenzspiegel, der am LHB Testadapter befestigt ist. Die Bewegungen des reflektierten Strahls sind ein Maß für die Bewegungen des Testadapters in der TVK. Da in den Anforderungen an den Tx eine Referenzebene gefordert wird, stellt der Referenzspiegel am Testadapter eben diese Ebene dar, sodass sowohl die Justierung als auch die Strahlstabilität in Abhängigkeit von dieser Ebene gemessen werden können [30].

### 3.2.3 Messaufbau und wichtige Komponenten



**Abbildung 3.8:** schematischer Aufbau des AIV Testsystems mit Referenzlaser

In Abbildung 3.8 ist schematisch der Messaufbau zur Verifizierung der Strahlstabilität des BELA Tx Lasers dargestellt. Die Laserquelle in der TVK emittiert bei 1064 nm mit einer Pulsfrequenz von 10 Hz Strahlung durch das WSA-Fenster. Im Inneren der TVK werden die Umgebungsverhältnisse Merkurs nachgebildet. Nach dem Austreten aus der TVK trifft der Strahl auf einen Strahlteilerkeil (Wedge) mit einer Transmission von rund 95 %. Die transmittierte Strahlung trifft hinter dem Wedge wiederum auf den Energiemesser, wobei davon 1 % über einen weiteren Strahlteiler in eine Faser eingekoppelt wird, die das Licht in das Wavemeter führt, um die Wellenlänge exakt zu bestimmen. Die am Wedge reflektierten 5 % treffen auf den OAP, der das nahezu parallele Bündel über einen Faltungsspiegel auf die Kamera fokussiert. Dabei durchläuft der Strahl unmittelbar vor der Apertur der CCD-Kamera eine Filterbank mit diversen Neutraldichte-Filtern sowie einem Bandpassfilter für die Wellenlängen der beiden Laserquellen zur Abschwächung der Strahlungsintensität. Während der BELA Tx Strahlung emittiert, sendet, wie unter Abschnitt 3.2.2 erläutert, der Referenzlaser ebenfalls Licht aus. Die Referenzquelle arbeitet bei 638 nm im Dauerstrichbetrieb, d.h. sie sendet kontinuierlich Strahlung aus. Der Strahl wird im Vorfeld direkt hinter der Referenzlaserquelle über einen Beamexpander aufgeweitet, um die Divergenz bzw. dann die Fokussierbarkeit zu verbessern. Das Licht wird über Justierspiegel durch den Wedge auf den Referenzspiegel am Testadapter in der TVK umgelenkt. Das reflektierte Bündel ist hinreichend kollimiert und trifft parallel zur Tx-Quelle auf den Wedge. Der Reflex fällt ebenfalls auf den OAP und wird über den Faltungsspiegel auf die Kamera fokussiert, so dass beide Strahlen auf dem Chip der CCD-Kamera, der eine Fläche von 0,5 cm<sup>2</sup> einnimmt, über BG zu sehen sind. Über die von der Software ermittelten Zentroid-Positionen können Instabilitäten, Drift und Abstand der Strahlen ermittelt werden. Die Instabilitäten enthalten dabei sowohl die Eigenschwingung der emittierten Laserstrahlung, als auch die durch den Aufbau und die optischen Elemente im Strahlengang eingebrachten Unsicherheiten und Fehler. Da allein die Bewegung des BELA Tx keinen Aufschluss über die Stabilität des BELA Tx geben kann, sondern vielmehr über jene des gesamten Aufbaus, wird der Referenzlaser dazu in Verhältnis gesetzt. Damit lassen sich die optomechanisch induzierten Fehler vom Signal abziehen und es darf lediglich die Schwingung des BELA Tx als Fehlerquelle übrig bleiben. Auch der Referenzlaser bringt eine gewisse Instabilität durch die Eigenschwingung in die Messergebnisse ein. Dies macht eine äußerst stabile Laserquelle notwendig, damit die Fehler so gering wie möglich ausfallen. Die

Instabilität des Referenzlasers ist mit  $1,05 \mu\text{rad}$  im Schnitt deutlich kleiner als die des BELA Tx. Durch den Einsatz des Beamexpanders im Referenzstrahlengang wird diese Unsicherheit zusätzlich noch um den Faktor 20 verringert. In Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Platzes ist der aktuelle Testaufbau hinter dem Wedge über einen zweiten Faltungsspiegel ein weiteres Mal gefaltet.

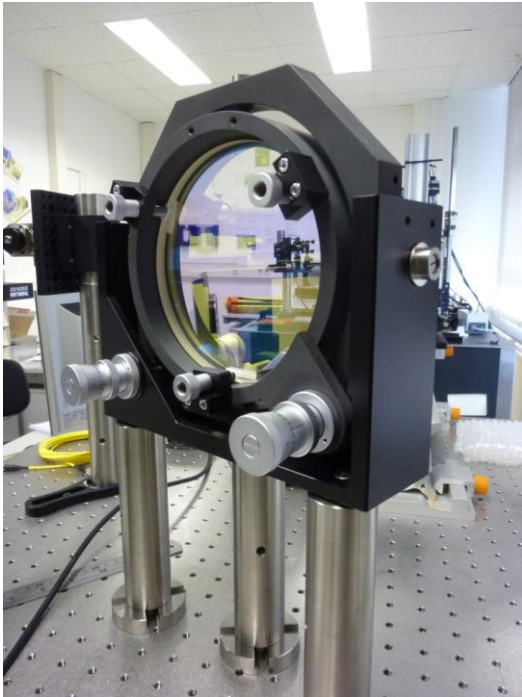
### Testlaserquelle

Ebenso wie die TVK, befindet sich der BELA Tx noch in der Fertigung, weshalb dieser im aktuellen Testaufbau nicht zum Einsatz kommen kann. Die Auslieferung des Tx wird etwa zeitgleich mit der Fertigstellung des Messplatzes mit der TVK erfolgen. Infolgedessen kommt zur Simulation des BELA Tx ein ähnlicher Emitter zum Einsatz. Der von der Firma Litron Lasers hergestellte gütegeschaltete Nd:YAG-Laser sollte die Spezifikationen des BELA Lasers hinreichend erfüllen. Im Gegensatz zu BELA wird das AM des Litron Lasers durch eine Blitzlampe gepumpt. Dadurch erhält man ein teilweise inhomogenes Strahlprofil, welches für die Messungen dennoch nutzbar ist. Mit einer maximalen Pulsfrequenz von 20 Hz und einer Pulsenergie von etwa 50 mJ im Singlemode-Betrieb wird der BELA Tx für einen Testaufbau ausreichend simuliert. Tabelle 4 fasst die wichtigsten Parameter des Lasers zusammen [34].

**Tabelle 4:** Spezifikationen Testlaser Litron NANO-275-20 [34]

Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
Aktives Medium		Nd:YAG
Q-Switch		Aktiv
Pumpquelle		radial gepumpt durch 1 Blitzlampe
Wellenlänge	nm	1064
Pulsenergie multimode	mJ	< 250
Pulsenergie singlemode	mJ	< 50
Pulsfrequenz	Hz	$\leq 20$
Pulslänge	ns	7 - 11
Strahldivergenz	mrad	< 0,8
Strahldurchmesser	mm	5 ( $1/e^2$ ) vor dem BEX
Lebensdauer Lampe	Pulse	$5 \cdot 10^{-7}$

### Strahlteilerkeil



**Abbildung 3.9:** Strahlteilerkeil in seiner Justagefassung

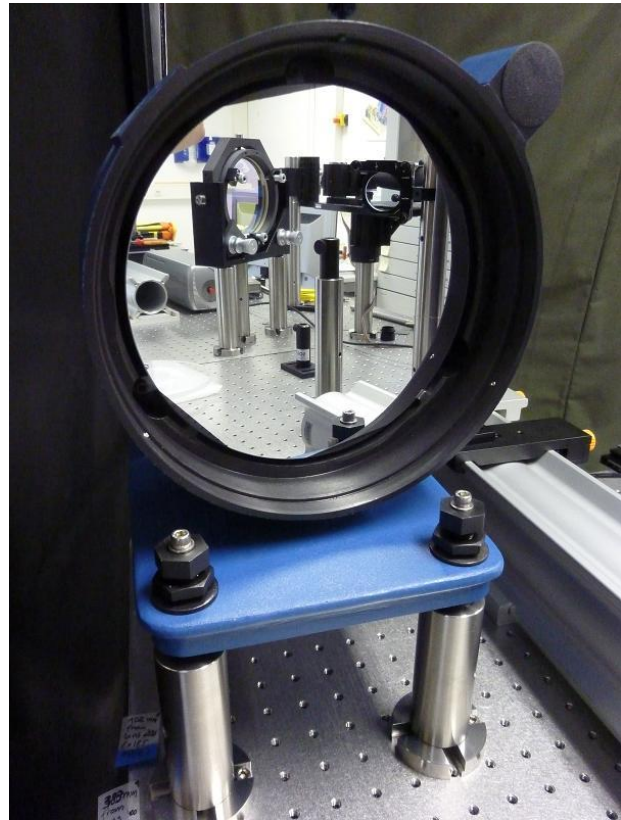
Der Strahlteilerkeil (Wedge) hat die Aufgabe die Strahlengänge des BELA Tx Lasers und des Referenzlasers zu verbinden und beide zum OAP zu leiten. Dabei steht er in einem Winkel von etwa  $30^\circ$  zur optischen Achse der eintreffenden Strahlenbündel, um diese auf den ersten Faltungsspiegel zu reflektieren. Der Keilwinkel beträgt  $2^\circ$ . Dadurch werden etwaige Geisterbilder deutlich reduziert, da bei Tests mit einer planparallelen Teilerplatte die Reflexe von der Rückseite des Strahlteilers ebenfalls auf dem Chip detektiert wurden. Für die Wellenlänge  $638\text{ nm}$  des Referenzlasers ist die Front des Keils so beschichtet, dass etwa  $50\%$

reflektiert werden. Dies ist bei jedem Durchlauf der Fall, zum einen wenn der Strahl die Referenzquelle Richtung Referenzspiegel am Testadapter verlässt und zum anderen wenn der Reflex vom Referenzspiegel wieder auf den Wedge trifft. Für  $1064\text{ nm}$  ist die erste Fläche des Wedge so beschichtet, dass nur etwa  $5\%$  zum OAP und schließlich zum CCD-Chip reflektiert werden. Der Rest wird wie bereits erwähnt auf einen Energiemesser, bzw. in das Wavemeter geführt. Die Rückseite des Wedge ist für beide Wellenlängen antireflexbeschichtet, so dass die Reflektivität  $< 0,4\%$  beträgt [30]. Alle Beschichtungen halten den hohen Energiedichten der Laser stand.



### Offaxis – Parabolspiegel

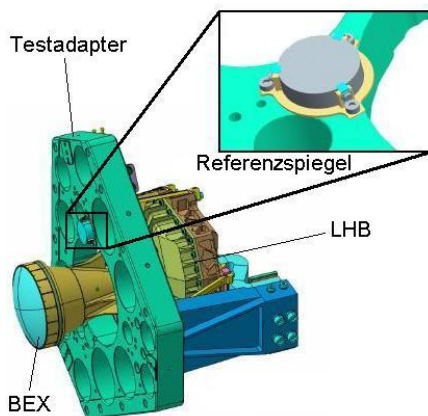
Um den Anforderungen der Stabilität und Empfindlichkeit gerecht werden zu können, ist es unumgänglich eine große Brennweite für den OAP zu wählen. Dementsprechend kommt ein OAP mit einer Brennweite von  $f' = 4000$  mm zum Einsatz. Die Exzentrizität des Spiegels zur optischen Achse beträgt 300 mm, die nutzbare Apertur 200 mm im Durchmesser. Das Trägermaterial ist aus thermisch beständigem AstroSitall CO-115M gefertigt, um den Einfluss der Verformung des Spiegels auf die Ergebnisse möglichst gering zu halten [30].



**Abbildung 3.10:** Offaxis-Parabolspiegel

Aufgrund des Widerstandes gegen die Strahlungsenergie, kommt als Beschichtung AlSiO mit einer Reflexivität von  $> 80$  % für 638 und 1064 nm zum Einsatz. Die Oberflächengüte ist mit  $\lambda/8$  angegeben, gemessen bei einer Wellenlänge von 633 nm.

### Referenzspiegel

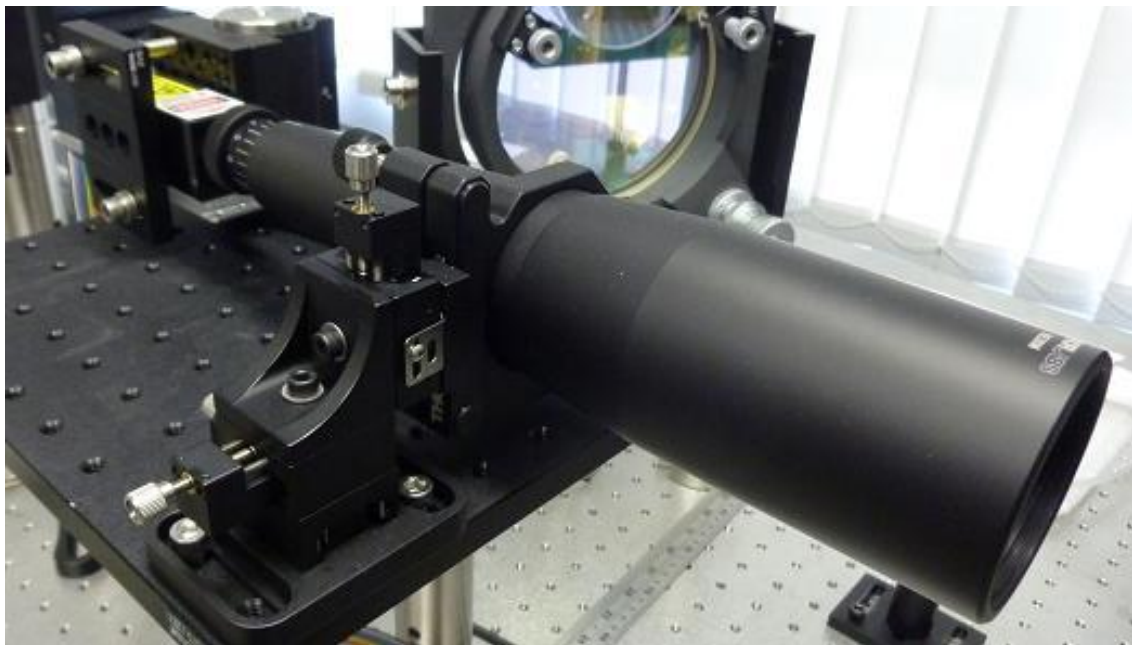


**Abbildung 3.11:** Testadapter mit LHB, BEX und Referenzspiegel

Der Referenzspiegel ist am Testadapter innerhalb der TVK angebracht und dient als Referenz für Strahlrichtungsmessungen innerhalb des LHB-Teils. Eingesetzt wird ein gewöhnlicher Spiegel, der für Laserstrahlung geeignet ist. Für Wellenlängen im Bereich von 350 bis 900 nm reflektiert er 98,5 % Strahlung. Seine optische Achse ist parallel zu der des BELA Tx [30].

### Referenzlaser und Beamexpander

Der Referenzlaser ist eines der wichtigsten Elemente im Aufbau, da er die Qualität der Ergebnisse vorgibt. Idealerweise sollte der Spot auf dem Chip letztlich nur die Fehler und Einflüsse der optomechanischen Elemente im Messaufbau enthalten und so wenig Eigenfehler wie möglich erzeugen. Angesichts dieser Anforderungen wird ein diodengepumpter Festkörperlaser von CrystaLaser eingesetzt. Die Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Aufgrund der großen Brennweite des OAP ist ein gutes Strahlprofil wichtig. Der CrystaLaser hat eine Strahldivergenz von 1 mrad. Um diese auf die notwendigen 50  $\mu$ rad zu reduzieren, wird der Strahl unmittelbar hinter der Austrittsapertur mit einem Beamexpander um das 20fache aufgeweitet. GleichermäÙen werden die bereits erwähnten Instabilitätseffekte um den Faktor 20 verringert. Ein weiterer Vorteil eines Strahls großen Durchmessers, ist die niedrigere Empfindlichkeit gegenüber nicht planen Flächen und kleinen Defekten, z.B. auf spiegelnden Elementen. Die Daten des BEX können in Tabelle 6 verglichen werden.



**Abbildung 3.12:** CrystaLaser DL638-050 und BEX

**Tabelle 5:** Daten des Referenzlasers [31]

Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
Modell		DL638-050
Wellenlänge	nm	638±2
Pumpquelle		diodengepumpt
optische Leistung	mW	50
spektrale Linienbreite	nm	1
Transversalmoden		annähernd TEM <sub>00</sub> , $M^2 = 1,1 \dots 1,3$
Betriebsart		cw
Strahldurchmesser ( $1/e^2$ )	mm	1,1
Divergenz	mrad	1
Strahlstabilität	mrad/K	< 0,005
Polarisation		100:1, vertikal polarisiert
Abmessungen	mm	30 x 36 x 135

**Tabelle 6:** Parameter des Referenz-BEX [31]

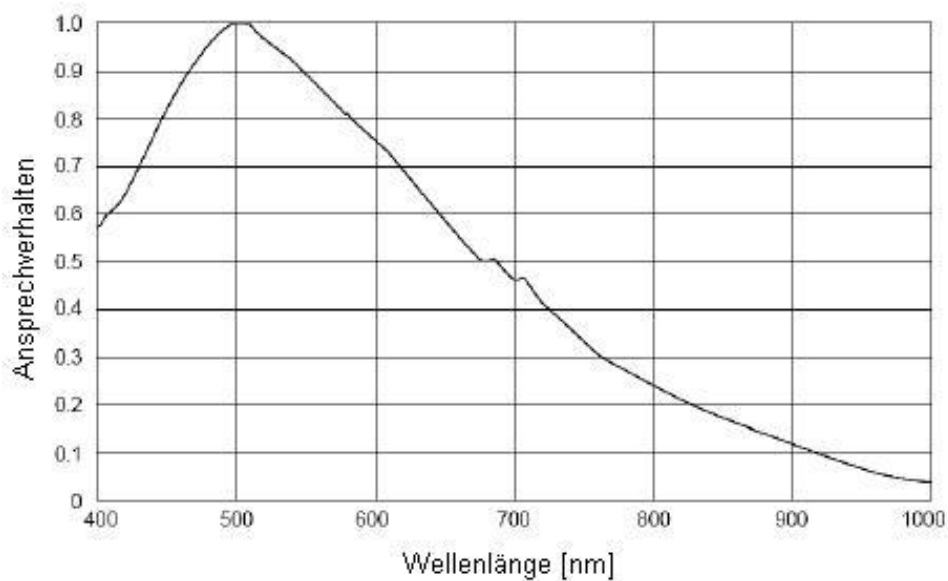
Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
Modell		BE20M-A
Vergrößerung		20
Eintrittspupille	mm	4,5
maximaler Eingang	mm	2,25
AR Beschichtung	nm	350...650
AR Reflexivität	%	< 0,5
Belastungsgrenze	W/cm <sup>2</sup> (cw)	100

## CCD Kamera

Die Technologie der Charge-Coupled Devices ist für die Charakterisierung von Laserstrahlen und Strahlprofilen von großem Interesse. Nicht nur die breite spektrale Empfindlichkeit vom UV bis in das NIR und die spektrale Dynamik machen die CCD-Kamera auf diesem Gebiet so leistungsstark. Auch die hohe Auflösung bei kleinen Fokussdurchmessern sprechen für den Einsatz dieser Technik. Die Fähigkeit, die Informationen in Echtzeit aufzuzeichnen und wiederzugeben, erleichtert überdies Arbeiten, bei denen permanent Daten über die Strahlqualität benötigt werden.



**Abbildung 3.13:** Gras-20S4M/C CCD Kamera  
der Firma Point Grey



**Abbildung 3.14:** spektrale Empfindlichkeit einer CCD Kamera [32]

Im Messaufbau kommt die in Abbildung 3.13 gezeigte CCD-Kamera zum Einsatz und ist zusätzlich mit einem Filterrevolver von Spiricon verbunden, der der Abschwächung der hohen Strahlenergien dient. Die Pixel dieser Kamera haben eine Größe von  $19,36 \mu\text{m}^2$  und eine rechteckige Form. Die Repetitionsrate beträgt 15 Hz bei maximaler Auflösung und ist damit für die 10 Hz Pulsfrequenz des BELA Tx geeignet. Die Eigenschaften der zum Einsatz kommenden Kamera sind in Tabelle 7 aufgelistet.

**Tabelle 7:** Parameter der GRAS-20S4M/C CCD Kamera von Point Grey

Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
Modell		GRAS-20S4M/C
Anwendung		Format: 1/1,8"; cw YAG; einstellbare ROI
Spektrale Empfindlichkeit	nm	190...1320
Abmessungen Chip	mm	7,1 x 5,4
Abmessungen Pixel	$\mu\text{m}$	4,4 x 4,4
Dynamikbereich	dB	61
Leistungslinearität	%	$1 \pm 1$
Genauigkeit Strahlprofil	%	$1 \pm 2$
max. Bildrate	Hz	15
Sättigungsintensität	$\mu\text{W} / \text{cm}^2$	0,3
Mindestintensität	$\text{nW} / \text{cm}^2$	0,4
Belastungsgrenze	$\text{W} / \text{cm}^2$ ( $\text{J} / \text{cm}^2$ )	50 (1 für <100 ns Pulslänge)
Maße	mm	35 x 44 x 65
Arbeitsweise		zwischenzeilig, progressiv übertragendes CCD

## 4 Ergebnisse

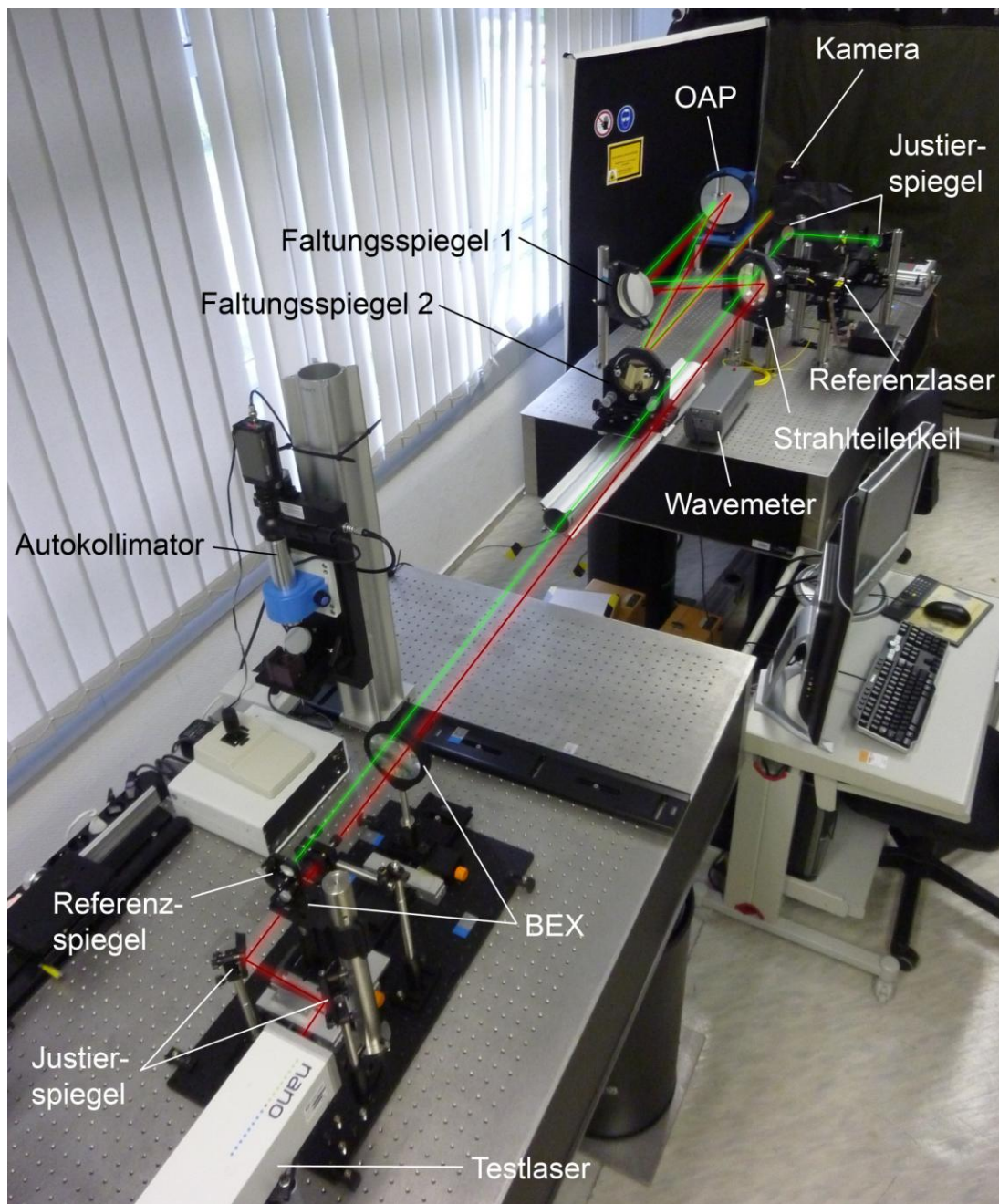
### 4.1 Finaler Testaufbau

Neben der Erstellung einer LV-Applikation soll mit dieser Arbeit der bestehende AIV Testaufbau für BELA hinsichtlich seiner Genauigkeit überprüft und verifiziert werden. Der endgültige Messaufbau zur Überprüfung der Parameter des BELA Transmitters wird letztendlich in einem Reinraum zusammen mit der TVK aufgebaut. Der bestehende Testaufbau wurde zu dem Zweck im Rahmen einer früheren Diplomarbeit am DLR entworfen, um eventuelle Probleme mit den Komponenten und unvorhergesehene Effekte festzustellen und zu beseitigen. Dieser Testaufbau wird nun im Weiteren den Anforderungen des finalen Messaufbaus sowie den Bedingungen im Labor angepasst. Die Realisierung des Aufbaus auf zwei optischen Bänken simuliert im Wesentlichen die unabhängige Befestigung des BELA Tx am Testadapter in der TVK und soll den Aufbau so flexibel wie möglich gestalten. Eventuell auftretende Effekte, hervorgerufen durch Bewegungen oder Schwingungen der Komponenten auf diesem optischen Tisch, sollten allein durch die Komponenten hervorgerufen werden, die auch im Tx von BELA integriert sein werden. Die hohe Brennweite des OAP wird durch die Faltung des Strahlenganges über die Faltungsspiegel ermöglicht. Dadurch gehen Schwingungseffekte stärker in die Spotabweichungen ein, was die Detektion vereinfacht. Über den Referenzspiegel auf dem ersten optischen Tisch, der im endgültigen Messaufbau am Testadapter in der TVK befestigt sein wird, wird der Referenzlaserstrahl zum Tx ins Verhältnis gesetzt. So werden, wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, die größten externen Störfaktoren wie Schwingungen und Luftströmungen maßgeblich reduziert. Aus Platzmangel sind das Wavemeter und der Energiemesser zurzeit nur provisorisch im Strahlengang integriert. Die entsprechenden Werte werden im derzeitigen Aufbau hinter dem Wedge aufgenommen, die Energie direkt über die Fokussierung der transmittierten Strahlung auf den Messkopf und die Wellenlänge über einen Spiegel, der das Licht auf die Einkoppeloptik für die Faser lenkt. Durch diese Positionierung wird jedoch z.T. der Strahl des Referenzlasers blockiert. Im Endeffekt können nicht alle Messungen zeitgleich stattfinden und der Energiemesser muss daher zumeist demontiert werden.



Im AIV-Messaufbau hingegen wird auf einer wesentlich größeren Optikbank für diese Parameter ein eigener Strahlengang geschaffen. Die mit dem Testaufbau durchgeführten Messungen sollen eine Orientierung darstellen und zeigen, dass, auch wenn der Aufbau auf zwei optischen Bänken noch nicht das Optimum darstellt, mit diesem die notwendigen Anforderungen an die Empfindlichkeit erreicht werden können. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse dieser Messungen präsentiert.

Abbildung 4.1 zeigt den aktuellen Testaufbau mit allen seinen Komponenten.



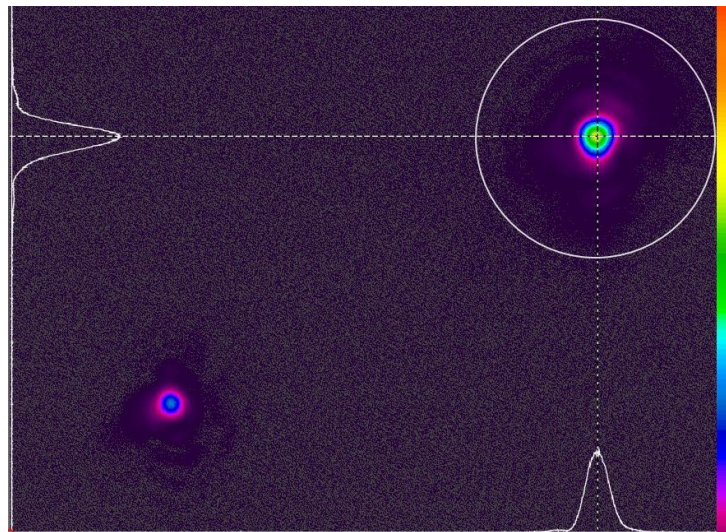
**Abbildung 4.1:** Finaler Testaufbau zur Verifizierung der Empfindlichkeit und Genauigkeit des Setups, aufgebaut auf zwei optischen Bänken

## 4.2 Messergebnisse

### 4.2.1 Überblick

Nachdem der Testaufbau in Anpassung an die Laborverhältnisse und Anforderungen modifiziert wurde, ist es notwendig, die optischen Achsen des Ersatzlasers und des Referenzlasers parallel zueinander auszurichten. Zu diesem Zweck wird der in Abbildung 4.1 ebenfalls dargestellte Autokollimator verwendet. Dabei wird dieser in den Strahlengang des Testlasers verfahren, so dass das Autokollimationsfernrohr (AKF) auf die optische Achse des aus dem BEX austretenden Strahlenbündels justiert werden kann. Danach wird der Apparat in Opposition zum Referenzspiegel gebracht. Die nun auftretende Abweichung wird über die Justierschrauben an der Spiegelfassung kompensiert. Im Ergebnis sind die optischen Achsen des Referenzspiegels und des Testlasers parallel zueinander. Im Folgenden sollen beide Strahlen über den Wedge, die Faltungsspiegel und schließlich über den OAP auf die Kamera gelenkt werden. Der OAP fokussiert die beiden Strahlbündel abschließend auf den CCD-Chip.

Nach der Justage der optischen Elemente auf dem optischen Tisch mit dem Testlaser werden diese nicht wieder verändert. Eine Manipulation optischer Elemente erfolgt jetzt nur noch im Faltungsstrahlengang. Im realen Messaufbau ist die Veränderung der optischen Konfiguration des BELA Tx in der TVK ebenfalls nur schwer durchführbar.



**Abbildung 4.2:** Ausgabe der Kameradaten über BG, rechts oben der Testlaserspot in einer manuellen Apertur, links unten der Referenzlaserstrahl

Bereits bekannt ist, dass der größte Einfluss auf die Stabilität des Gesamtsystems vom OAP ausgehen dürfte. Die Faltungsspiegel werden bei Verkippung zwar die Strahlen



im schlechtesten Fall vom Chip herunter bewegen, jedoch keine signifikanten Effekte auf die Stabilität der Spots haben. Interessant ist auch der Einfluss von zusätzlichen Elementen im Strahlengang. Hier stehen vor allem Filter im Vordergrund, da eine Filterbank zur Abschwächung der BELA Tx Pulse zum Einsatz kommen soll. Dabei ist darauf einzugehen, inwieweit die Wahl auf wenige, starke Neutralsdichte-Filter (ND-Filter) oder auf mehrere, schwächere ND-Filter fallen sollte. Zusätzlich ist der Einfluss des Wedge auf die Energieverteilung zu prüfen, da dieses Element unter verschiedenen Winkelstellungen zur optischen Achse des Strahlengangs verschiedene Reflexions- und Transmissionswerte aufweist. Vorab soll jedoch die Gesamtstabilität des Systems analysiert werden.

#### 4.2.2 Optomechanische Stabilität des Testaufbaus

Zunächst erscheint es sinnvoll, die Stabilität des optomechanischen Aufbaus im Gesamten zu betrachten, d.h. welche Abweichungen in der Stabilität treten auf, wenn am eigentlichen Aufbau nichts verändert wird? So wird mit dem Referenzlaser eine Langzeitmessung über 60 Minuten durchgeführt, um die erhaltenen Werte zu mitteln. Da die BG-Software auf etwa 10 Hz Aufnahme Frequenz eingestellt ist, ergeben sich dementsprechend ca. 36.000 Werte. Das Mittel über diese Werte sollte eine realistische Orientierung für die Gesamtstabilität des Systems liefern. Die Messungen werden mit dem Referenzlaser durchgeführt, da dieser für sich schon eine hohe Stabilität aufweist, im Gegensatz zum Testlaser und dem BELA Tx. Die Abweichungen des Referenzlasers sind in Tabelle 8 zusammen gefasst.

**Tabelle 8:** Stabilität des Referenzlasers mit und ohne BEX

Winkelstabilität $\zeta$ [ $\mu\text{rad}$ ]		
ohne BEX	$\zeta_x$	1,3
	$\zeta_y$	0,8
mit BEX	$\zeta_x$	0,065
	$\zeta_y$	0,04

Die ohnehin schon geringe Winkelabweichung wird durch den BEX um den Faktor 1/20 verringert, da ein aufgeweiteter Strahl wesentlich weniger Abweichung in Bezug auf seine Richtungsstabilität aufweist als ein Strahl vor dem BEX. Der Einfluss der Eigenschwingung des Referenzlasers auf die Messungen ist demnach vernachlässigbar.

Für die Stabilitätsbestimmung des Systems werden im Folgenden die Werte für die Zentroid-Position des Referenzspots aufgenommen. Über die 36.000 Messwerte gemittelt, stellen sich die Ergebnisse wie folgt dar:

$$\text{Zentroid X} = (1,7048 \pm 0,0205) \text{ mm} \quad \approx \quad 1,2 \% \text{ Abweichung}$$

$$\text{Zentroid Y} = (0,4811 \pm 0,0145) \text{ mm} \quad \approx \quad 3 \% \text{ Abweichung}$$

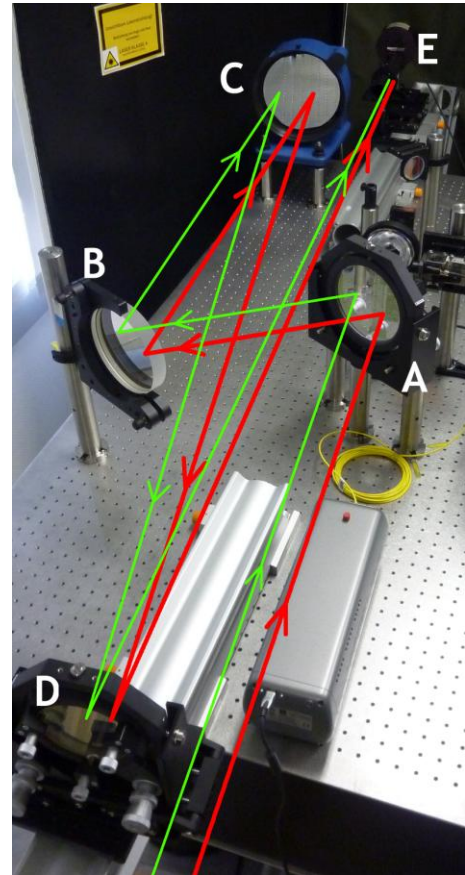
Da sich die Zentroid-Positionen abhängig von der Lage der Spots auf dem Chip ändern und in den nachfolgenden Messungen nicht unbedingt die gleiche Lage einnehmen, können die absoluten Mittelwerte der Zentroid-Position vernachlässigt werden. Von Interesse sind die Standardabweichungen der Werte, über die gemittelt wurde. Diese geben den Bereich an, in dem die gemessenen Werte schwanken und spiegeln im Wesentlichen die Stabilität des Systems wider. Um die Winkelstabilität  $\zeta$  zu ermitteln, wird diese über Formel 3 errechnet, wobei  $\delta$  die Standardabweichung der Messungen und  $f'_{OAP}$  die Brennweite des OAP darstellen.

$$\zeta = \frac{\delta}{f'_{OAP}} \quad \text{Formel 3}$$

Für die Streuung der x-Position ergibt sich damit, bei einer Brennweite des OAP von 4000 mm, eine Winkelabweichung von etwa 5  $\mu\text{rad}$ , für die der y-Position ca. 3,6  $\mu\text{rad}$ . Der durch die Eigenschwingung des Referenzlasers hinzugefügte Anteil ist dabei wie erwähnt zu vernachlässigen. Infolgedessen sind die Effekte, die diese Abweichung hervorrufen, der Unsicherheit des Aufbaus zuzuordnen. Aufgrund des gewählten Referenzlaserprinzips sollte diese Abweichung die Strahlrichtungsstabilität des Testlasers- bzw. des BELA-Lasers nicht beeinflussen.

### 4.2.3 Einfluss des OAP auf die Stabilität

Durch die Rekonfiguration des Testaufbaus wurde der OAP entsprechend der Strahlengänge neu ausgerichtet, was in Abschnitt 4.2.1 z.T. dargelegt wurde. In Abbildung 4.3 ist der Faltungsstrahlengang zu erkennen. Die Strahlen kommen auf dem Bild von unten aus Richtung des optischen Tisches, auf dem der Testlaser sowie der Referenzspiegel montiert sind. Sie treffen zunächst auf den Wedge bei A. Von dort werden sie über den Faltungsspiegel bei B weiter zum OAP bei C geführt. Auf dem Spiegel treffen die Strahlen dann sowohl zueinander, als auch zur optischen Achse des OAP parallel auf, so dass sie, abhängig von der Wellenlänge, in den Brennpunkt des Spiegels fokussiert werden. Aus Platzgründen wird die Brennweite durch den Faltungsspiegel D noch einmal gefaltet, wodurch der Brennpunkt noch hinter dem OAP liegt. Die Kamera befindet sich an eben diesem Brennpunkt bei E.



**Abbildung 4.3:** Faltungsstrahlengang; rot=Testlaser; grün=Referenzlaser

Im Verlauf der Messungen wird festgestellt, dass der Testlaser nicht annähernd die erwartete Pulsenergie liefert. Dieser hat schon bei Einsatzbeginn im früheren Testaufbau die theoretisch angegebenen Energiewerte von 50 mJ nicht erreicht. Bei optimaler Pumpenergie, Pulsfrequenz und Warmlaufphase wurde ein Maximum von 44 mJ erreicht [30]. Dieser Energieabfall auf durchschnittlich etwa 2,7 mJ Pulsenergie war trotzdem überraschend. Damit beträgt die emittierte Energie pro Puls nur noch ein Zwanzigstel des angegebenen Wertes. Die Ursache dieses Effektes ist vermutlich die Degradation der Pump-Blitzlampe. Der soeben beschriebene Umstand zieht ein weiteres Problem nach sich. Auf dem CCD-Chip erscheint der Strahl des Testlasers signifikant schwächer als zuvor. Darüber hinaus ist der Strahl schwächer als der des

Referenzlasers. In der Folge muss der Referenzlaserstrahl deutlich abgeschwächt werden, damit beide Strahlen simultan auf dem Chip detektierbar sind. Hierfür wird ein ND-Filter zwischen den beiden Justagespiegeln des Referenzstrahlengangs platziert. In Tabelle 9 werden die Parameter dieses Filters aufgeführt.

**Tabelle 9:** Kenndaten des Referenzstrahl-ND-Filters

Parameter	Einheit	Wert / Beschreibung
Typ		NG5 Neutral Grauglas
Hersteller		SCHOTT AG
ND		0,5
ND Wellenlängenbereich	nm	638
AR Beschichtung		beidseitig
Reflexivität AR	%	< 0,3
AR Wellenlängenbereich	nm	638 und 1064
Abmessungen	mm	50 x 50

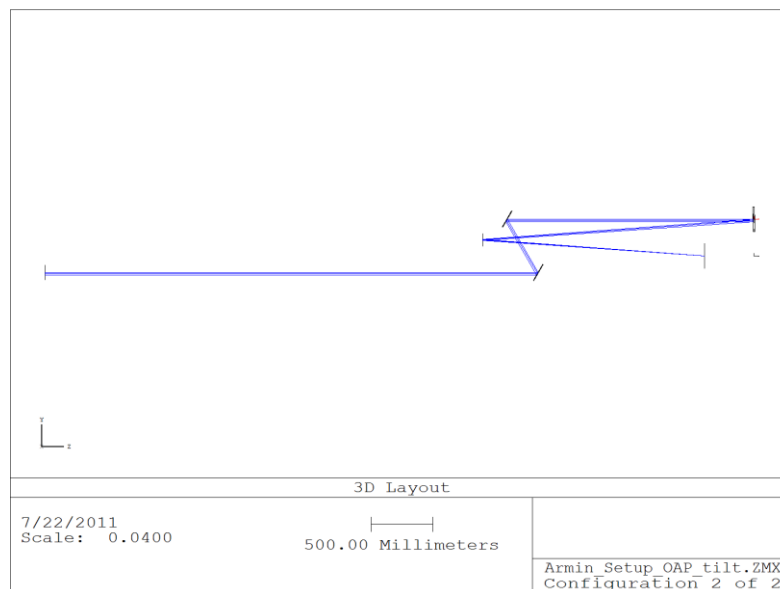
Im Folgenden wird die Verkippung des OAP um die y- bzw. die x-Achse in ihrem Einfluss auf die Stabilität des Systems untersucht. Die y-Achse ist hierbei senkrecht und die x-Achse parallel zur optischen Bank definiert. Es ist wichtig zu wissen, wie groß die Winkelverkippung bei Drehung der Stellschrauben an der OAP-Fassung ausfällt, da an diesen Elementen keine Skala angebracht ist. Mittels AKF kann die Verkippung bei höchstens einer halben Umdrehung eines der Stellräder erfasst werden. Die Ergebnisse werden deshalb auf eine ganze Umdrehung hochgerechnet. Damit beträgt die Winkelverkippung für eine volle Umdrehung einer der Justierschrauben  $(0,25 \pm 0,006)^\circ$ . Dies berücksichtigend wird die Stabilität in Abhängigkeit der Verkippung in den Diagrammen in Anhang A3 dargestellt. Die Grafiken zeigen zum einen die Abweichungen der Zentroid-Positionen des Testlasers, welcher hier als *Litron X* und *Y* bezeichnet wird und zum anderen die des Referenzlasers, bezeichnet als *Ref X* und *Y*. Das *Delta* bezeichnet die Streuung des Abstandes der beiden Spots voneinander. Der Spiegel wurde in Viertelumdrehungen der Stellschraube verkippt, was  $0,0625^\circ$  Kippung zur Nominalposition entspricht. Die Werte für die Verkippung um die y-Achse lassen für beide Laser eine leichte Tendenz vermuten. Beim Testlaser sieht es so aus, als wäre die größte Abweichung bei der Nominalstellung des OAP. Dabei wird die Streuung der Werte bereits in Betracht gezogen. Für den Referenzlaser gilt der umgekehrte Fall, so dass die Stabilität bei der Ausgangsstellung des OAP am größten

ist. Eine Erklärung für die gegenläufigen Tendenzen der beiden Laserquellen könnte die Fokusverschiebung bei Verkippung des OAP um die y-Achse sein. Je nach Verkippung wird sich der Fokus weiter vor oder hinter den Brennpunkt bewegen. Grund dafür sind Koma, da die Strahlen nicht mehr parallel zur optischen Achse des OAP auf den Spiegel treffen. Dadurch wird sich die Form der Spots verändern, was zu dem beobachteten Effekt führen kann. Alternativ ist die errechnete Fokusslage, an der sich die Kamera befindet, nicht ganz korrekt, bzw. die Kamera nicht optimal positioniert. So lässt sich das Stabilitätsmaximum des Referenzlasers an dieser Position erklären, wobei die Stabilität des Testlaser-Spots erst mit Verschiebung dessen Fokus verbessert wird. Insgesamt beträgt die maximale Abweichung etwa  $7,5 \mu\text{m}$ . Insofern ist die Verkippung des OAP um die y-Achse als bedeutender, wenn auch kleiner Faktor zu betrachten. Die Kippung sollte allerdings so gewählt werden, dass die Foki der beiden Laser longitudinal möglichst dicht beisammen in der Brennebene des OAP liegen. Die Werte für das  $\Delta$  verändern sich während der Kippung kaum und zeigen auch keine Tendenz. Die maximale Strahlrichtungsstabilität beträgt hier ca.  $3 \mu\text{m}$  oder nach Formel  $3 \cdot 0,75 \mu\text{rad}$ , weshalb die Empfindlichkeit der beiden Spots als konstant angesehen werden kann.

Das rechte Diagramm in Anhang A3 zeigt die Verkippung des OAP um die x-Achse. Im Gesamten betrachtet, kann durch die Verkippung kein signifikanter Einfluss auf die Stabilität der optischen Messung nachgewiesen werden. Die hohe Abweichung des Wertes des Referenzlasers bei  $-0,0625^\circ$  ist einzigartig und wird deshalb als Ausreißer betrachtet und ignoriert. Die Konstanz wird lediglich durch die leicht erhöhten Werte der anderen Parameter bei  $-0,0625^\circ$  und  $0^\circ$  durchbrochen. Dabei entsteht eine maximale Abweichung von  $7 \mu\text{m}$ , bzw.  $2,25 \mu\text{rad}$ . Begründet werden kann dies mit der Reaktion der Spots auf die Verkippung des OAP um die x-Achse. Da im Vorfeld bei der Inzidenz der Strahlen auf dem OAP darauf geachtet wurde, dass beide Bündel den OAP in der Vertikale mittig treffen, kann davon ausgegangen werden, dass eine Verkippung um die Horizontale lediglich zu einer lateralen Verschiebung der Spots in vertikaler Richtung führt. Dabei sollten die Foki ungefähr im Brennpunkt des OAP verbleiben.

Zur Erweiterung der Ergebnisse um einen Vergleich mit den theoretischen Erwartungen, wird die beschriebene Manipulation des OAP zusätzlich in ZEMAX simuliert. Hierzu wird die Stabilität der Strahlen in Nominalposition des OAP als Richtungsstabilität vorausgesetzt. Der Einfachheit halber wird der OAP dabei lediglich in  $1/8^\circ$ -Schritten verkippt. Die optische Konfiguration ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Tabelle 10 zeigt die Werte, die mittels ZEMAX für die Verkippung ermittelt wurden. Die Verkippung nimmt dabei mit höchstens 3  $\mu\text{m}$  Abweichung in der Strahlrichtungsstabilität keinen signifikanten Einfluss. Zusätzlich werden Abweichungen durch die numerische Rundung der Werte hervorgerufen. Durch die Simulation werden die gemessenen Werte bestätigt.



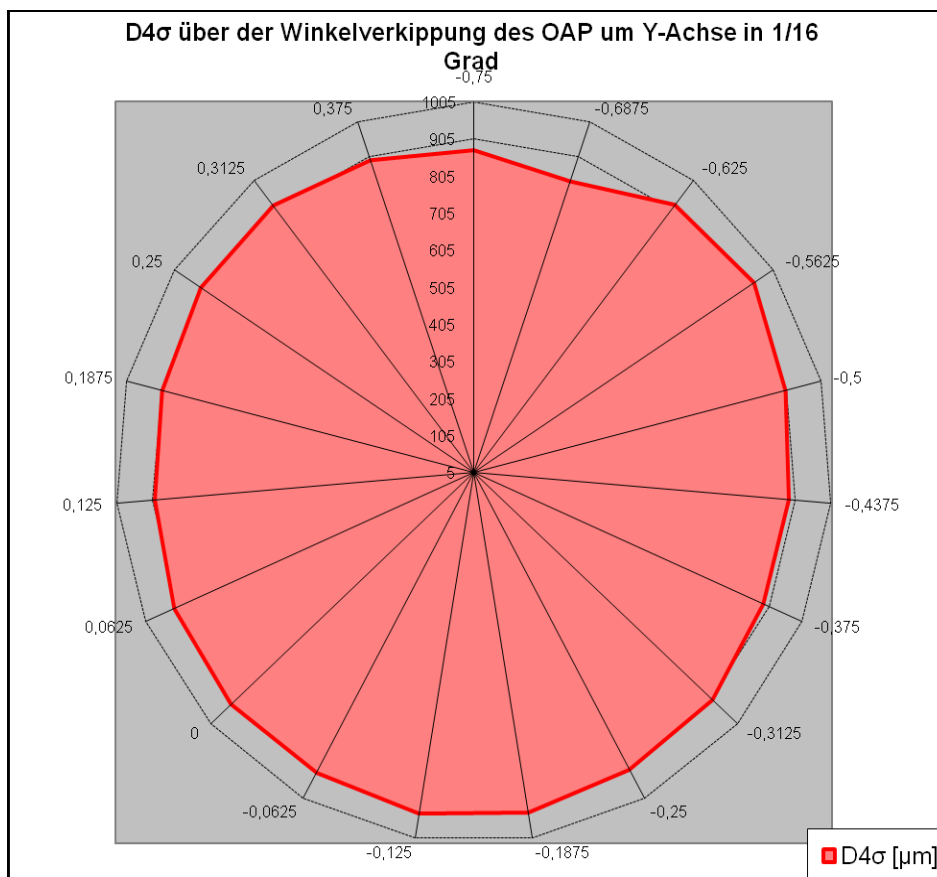
**Abbildung 4.4:** opt. Konfiguration in ZEMAX für Wedge, Faltungsspiegel, OAP und die Bildebene der CCD-Kamera

**Tabelle 10:** Stabilitätswerte für OAP-Verkippung aus ZEMAX-Simulation

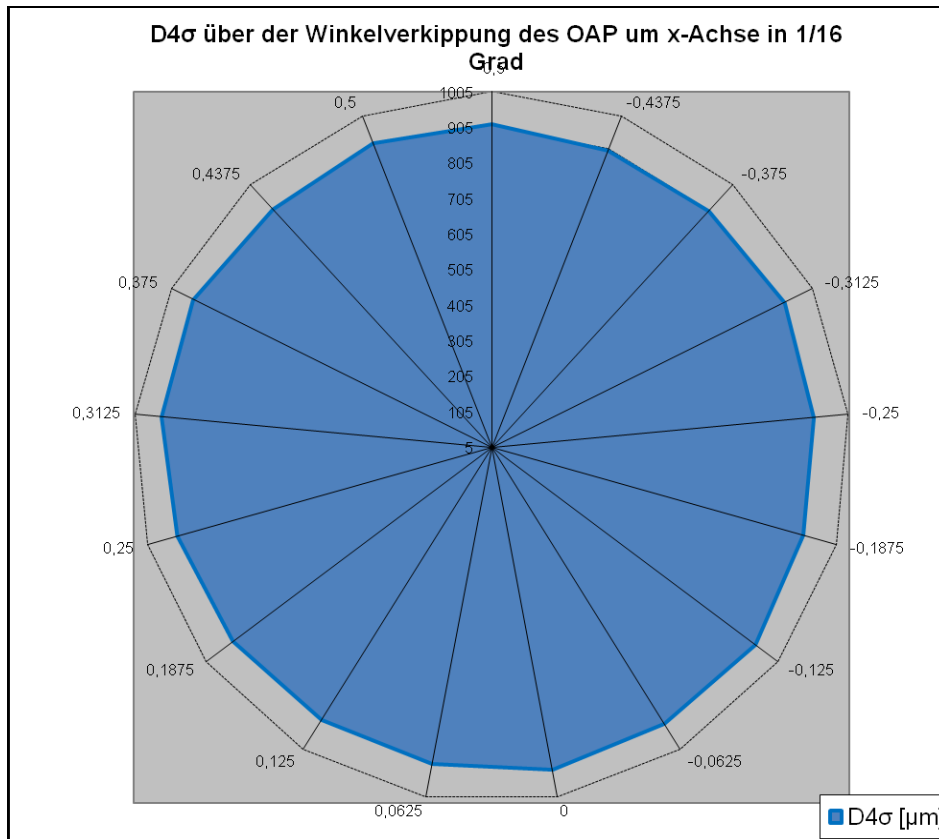
Verkippung in Grad	Litron [mm]		Referenz [mm]		Litron [mm]		Referenz [mm]	
	x	y	x	y	x	y	x	y
-0,75	0,013	0,02	0,005	0,006	0,012	0,019	0,005	0,006
-0,625	0,012	0,019	0,005	0,005	0,013	0,019	0,005	0,005
-0,5	0,012	0,019	0,006	0,006	0,012	0,019	0,005	0,006
-0,375	0,013	0,019	0,005	0,006	0,012	0,019	0,005	0,006
-0,25	0,012	0,019	0,006	0,006	0,013	0,019	0,005	0,006
-0,125	0,013	0,019	0,006	0,006	0,012	0,019	0,005	0,006
0	0,012	0,019	0,005	0,006	0,012	0,0193	0,005	0,006
0,125	0,013	0,019	0,005	0,005	0,012	0,019	0,005	0,006
0,25	0,013	0,019	0,005	0,006	0,013	0,019	0,005	0,006
0,375	0,012	0,02	0,005	0,006	0,012	0,02	0,005	0,006
0,5	0,012	0,02	0,006	0,005	0,012	0,019	0,005	0,005
0,625	0,012	0,019	0,005	0,005	0,013	0,019	0,005	0,006
0,75	0,013	0,019	0,006	0,006	0,012	0,019	0,006	0,006

#### 4.2.4 Einfluss des OAP auf den Durchmesser des Testlaserstrahls

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert wurde, wird neben den Positionen der Zentroide auch der Durchmesser des Testlasers aufgenommen. Sollte die Verkippung des OAP um dessen y-Achse einen signifikanten Einfluss auf die Fokusslage des Testlaserstrahls haben, müsste sich dieser Effekt theoretisch im Strahldurchmesser auf dem Kamera-Chip widerspiegeln. Da die Werte der gleichen Messserie entstammen, wie die der Stabilitätsmessung, sind die Voraussetzungen die gleichen, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben. Im Folgenden zeigen Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 die Durchmesser, welche für die Verkippung des OAP um die jeweilige Achse ermittelt wurden. In den Diagrammen sind die Werte polar in Abhängigkeit der Kippung dargestellt. Zur Vollständigkeit befinden sich Liniendiagramme sowohl zur gleichen Analyse, als auch zu den Abweichungen in Anhang A4 und A5.



**Abbildung 4.5:** Polare Darstellung der Durchmesserwerte bei Verkippung des OAP um die y-Achse



**Abbildung 4.6:** Polare Darstellung der Durchmesserwerte bei Verkippung des OAP um die x-Achse

Die beiden Darstellungen bzw. jene in den Anhängen zeigen, dass der Durchmesser bei Vergrößerung des Kippwinkels des OAP in positive, wie auch in negative Richtung keine bedeutende Änderung erfährt. Bei der Kippung um die y-Achse tritt bei einem Winkel von  $-0,6875^\circ$  ein markanter Einbruch der Werte auf. Der Grund hierfür ist nicht vollständig erklärbar. Durch die starke Verkippung wandert der Strahl ebenfalls auf dem zweiten Faltungsspiegel. Da der Spot in dieser Entfernung vom OAP noch relativ stark aufgeweitet ist und der Testlaser ein eher schlechtes Strahlprofil emittiert, lässt sich die Grenze des Spots schlecht ermitteln. Möglicherweise traf ein Teil des Randbereiches des Strahls bereits auf die Fassung des Faltungsspiegels, so dass diese Strahlung an der Fassung absorbiert oder gestreut wurde. Das bedeutet im Endeffekt für den Detektor, dass dieser weniger Strahlung empfängt und der Strahl dadurch im Durchmesser kleiner wirkt. Die Differenz zum Erwartungswert liegt mit etwa  $25 \mu\text{rad}$  jedoch noch im tolerierbaren Bereich, wobei diese nicht zwingend auf eine Instabilität des Aufbaus zurückzuführen ist. Insgesamt beträgt die Abweichung bei Kippung um die y-Achse maximal  $8,75 \mu\text{rad}$ . Der rapide Abfall der Stabilität bei positiver Verkippung um etwa das 1,5fache ist noch nicht vollständig geklärt. Würde die



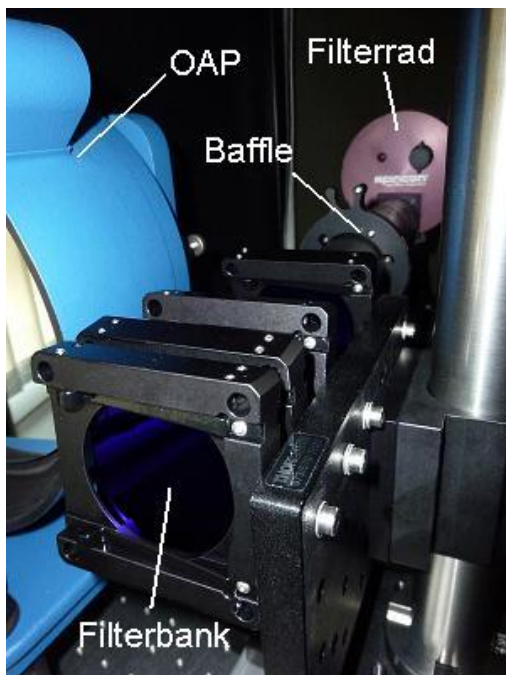
Fokuslage Grund für diesen Effekt sein, müsste sich auch eine Stabilitätsverschlechterung bei negativer Winkelkipfung ausprägen. Obwohl versucht wurde, den Einfluss externer Faktoren so gut es geht auszuschließen, kann das Einwirken von externem Streulicht nicht hundertprozentig ausgeschlossen werden. Der abgetragene Mittelwert stellt überdies einen Mittelwert aus den Messdaten für die kleine und die große Halbachse einer Ellipse dar. BG prozessiert die Daten bereits entsprechend vor. Dennoch konnte für die kleine Halbachse dieser Effekt nicht nachvollzogen werden, so dass die Ellipsengröße lediglich in einer Richtung stärker schwankt. Dieser Umstand deutet auf eine Ursache innerhalb der Strahlquelle hin, bzw. bei der Aufweitung dieser im BEX. Womöglich wird dort bereits durch Koma und sphärische Aberration ein Fehler in das Strahlprofil eingebracht, der sich letztlich auf die beobachtete Weise äußert.

Wie erwartet zeigte sich keine signifikante Änderung des Durchmessers bei Verkippung des OAP um die x-Achse. Die Werte können alles in allem als konstant bezeichnet werden und decken sich mit den Messwerten aus der vorigen Messung. Die Strahlrichtungsabweichung fällt mit maximal  $3,5 \mu\text{rad}$  ebenfalls gering aus, wobei die Werte hier einen leichten Trend vermuten lassen. Demnach scheint die größte Abweichung bei der Nominalposition des OAP aufzutreten, während sie sich bei Verkippung dessen leicht verringert. Möglicherweise werden die bereits angesprochenen Effekte durch die vertikale Verkippung kompensiert. Das würde voraussetzen, dass die große Halbachse einen hinreichend kleinen Winkel zur Vertikalen einnimmt und durch die Verkippung des Spots genannte Ursachen am Spotdurchmesser weniger Einfluss nehmen. Dafür spricht zudem, dass in diesem Fall, wie auch bei der Winkelkipfung um die y-Achse, die Abweichungen des Durchmessers der kleinen Halbachse im Wesentlichen konstant verlaufen.

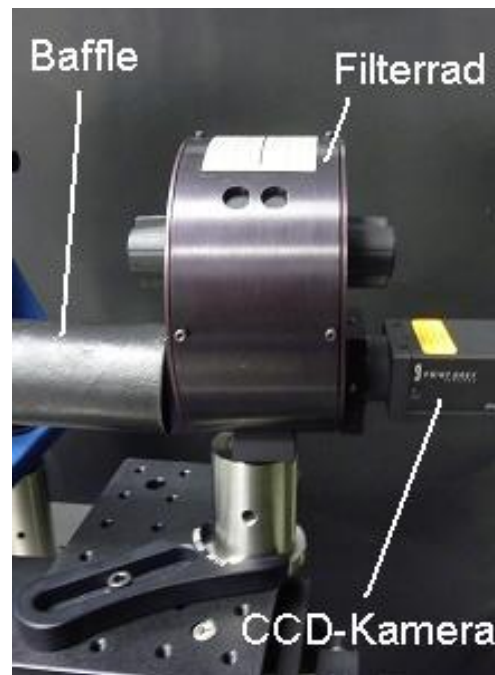
Zusammenfassend fallen die bei Verkippung des OAP auftretenden  $8,75 \mu\text{rad}$  Ungenauigkeit kaum ins Gewicht. Abweichungen im Durchmesser bedeuten nicht zwangsläufig eine Instabilität der Strahlrichtung. Im Detail nimmt diese Abweichung mit rund  $3,8 \%$  am mittleren Durchmesser von  $927,7 \mu\text{m}$  (bei Nominalstellung des OAP) einen nahezu vernachlässigbar kleinen Anteil ein.

## 4.2.5 Einfluss diverser Filterelemente

In diesem Abschnitt wird der Einfluss verschiedener Filterelemente auf die Messung anhand der Entfernung sowie des Durchmessers der Spots und deren Streuung untersucht. Dabei wird prinzipiell zwischen zwei Elementen unterschieden. Zum einen ist unmittelbar vor der CCD-Kamera ein Filtrerrad angebracht, an dem sich verschiedene ND-Filter in den Strahlengang kippen lassen. Auf der anderen Seite wird die u.a. in Abbildung 3.8 schematisch dargestellte Filterbank ebenfalls vor der Kamera in den Strahlengang gestellt, jedoch mit unterschiedlicher Zusammensetzung an ND-Filtern.



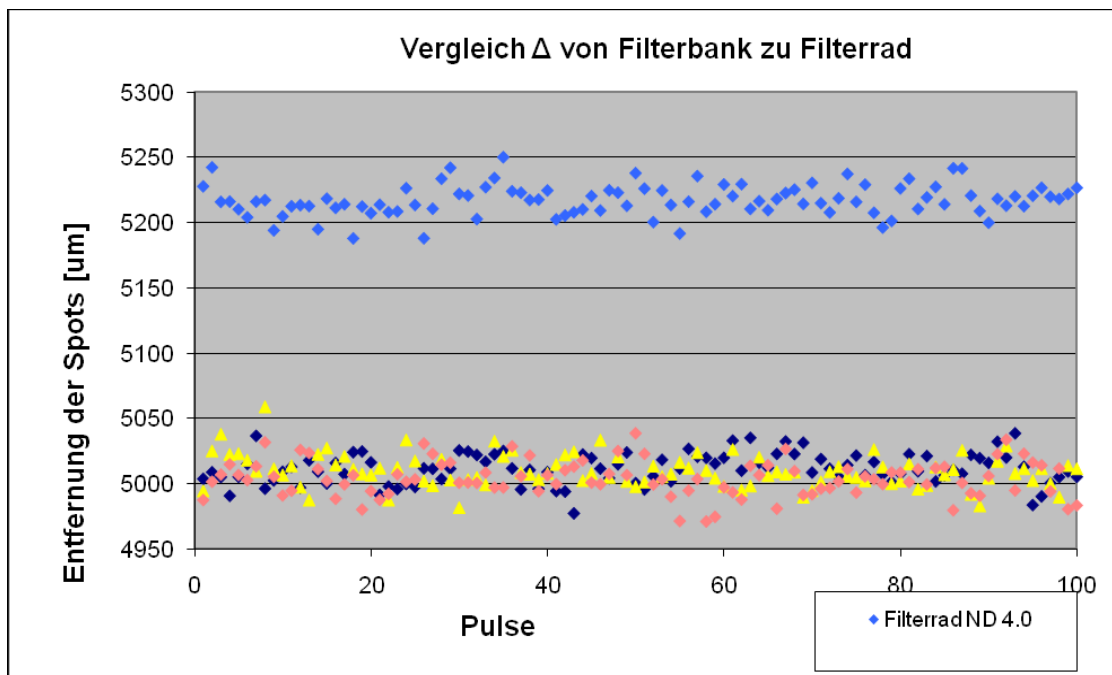
**Abbildung 4.7:** Filterbank vor Baffle und Kamera; die Filter im Filtrerrad sind dabei nicht im Einsatz; maximal können 4 Filter in diese Filterbank eingesetzt werden



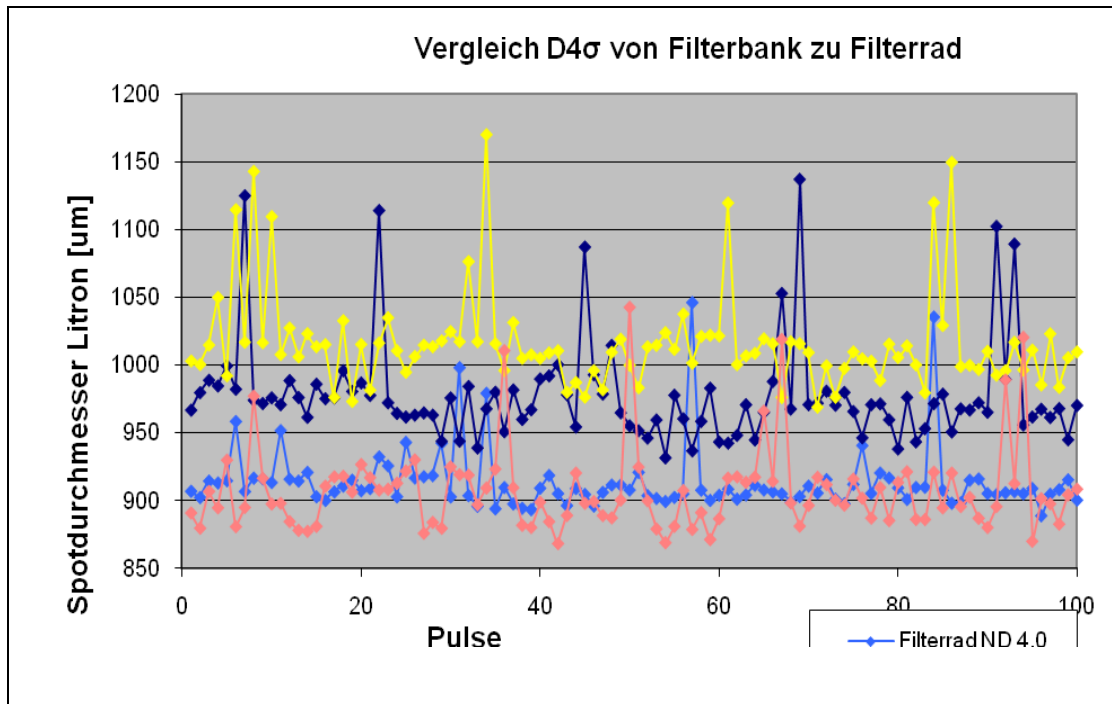
**Abbildung 4.8:** Filtrerrad mit Baffle und CCD-Kamera; der rechte Regler ist für die opt. Dichten von 0 bis 4 und der linke Regler für Komma-stellen in 0,2er Schritten

Das Filtrerrad wird mit einer ND von 4.0 eingesetzt, da die Spots in dieser Konfiguration am deutlichsten auf dem CCD-Chip erfasst wurden. Dabei wird der Strahl des Referenzlasers, unter Einsatz des im Referenzstrahlengang bereits befindlichen Filters, stärker abgeschwächt als der des Testlasers. Daher wird der

Testlaserspot als dominant wahrgenommen. Beim Einsatz der Filterbank stellte sich allerdings heraus, dass eine ND von 4.0 nicht ausreicht und der Referenzspot stark übersteuert detektiert wird. Die Filter des Filtrerrades wurden im Rahmen dessen nicht eingesetzt. Bei einer ND von 5.0 werden die Spots vom Chip wiederum angemessen detektiert, sind aber dennoch immer noch größer als bei Einsatz des Filtrerrades. In der Filterbank wurden verschiedene Konfigurationen von NG4 Filtern der Firma SCHOTT AG eingesetzt – 2 Filter mit je ND 1.0 und 4.0, 3 Filter mit je ND 1.0 und 2-mal je ND 2.0 sowie 4 Filter mit je 3 ND 1.0 und einer ND 2.0.



**Abbildung 4.9:** Gegenüberstellung der gemessenen Entfernungen zwischen den Strahlen über 100 Schuss bei Einsatz verschiedener Filterkonfigurationen



**Abbildung 4.10:** Darstellung der Durchmesser der Spots über 100 Schuss bei verschiedenen Filterkonfigurationen

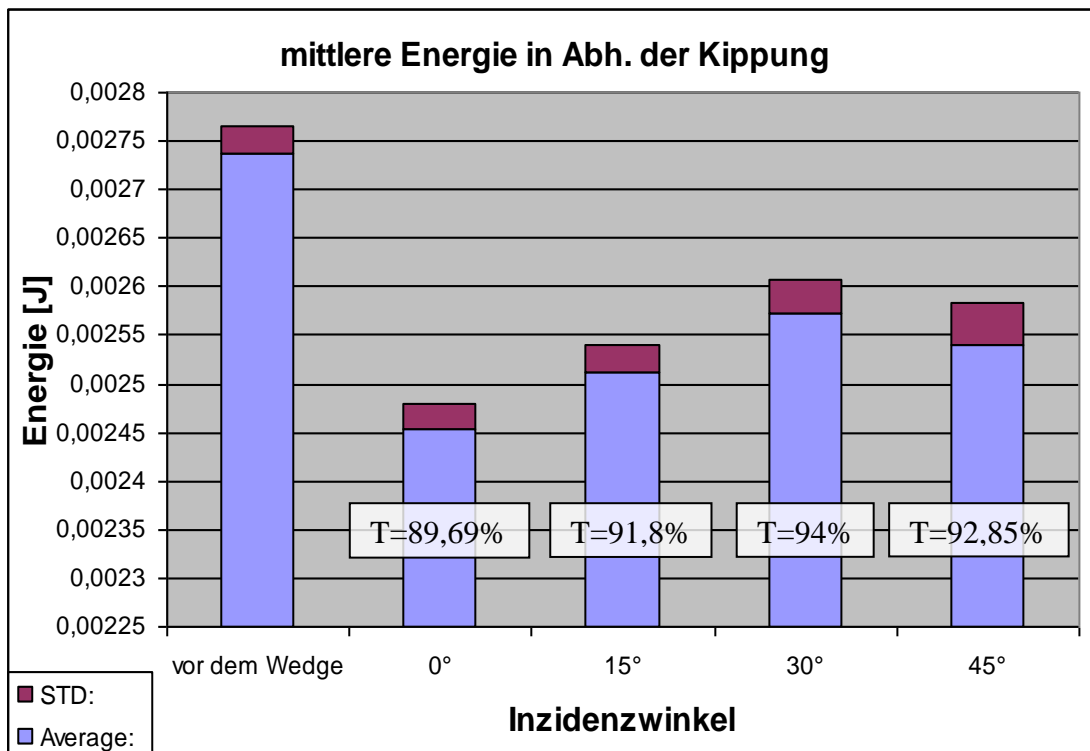
Dem Maß der in Abbildung 4.9 erkennbaren Streuung der Werte kann man keine Abhängigkeit von der Konfiguration der Filter nachweisen. Vielmehr sind die Abweichungen sowohl beim Filtrerrad, als auch bei der Filterbank nahezu gleich stark ausgeprägt. Demzufolge lässt sich ein signifikanter Einfluss durch die Anzahl von Filterelementen im Aufbau ausschließen. Auffällig ist hingegen die deutliche Verschiebung eines oder beider Spots um mehr als 200  $\mu\text{m}$ , bei Einsatz des Filtrerrades im Vergleich zum  $\Delta$  bei der Filterbank. Mögliche Ursache hierfür ist nicht die Konfiguration als solche, da bei Änderung der Anzahl an Filtern in der Filterbank dieser Effekt nicht in Erscheinung tritt. Der Grund dafür ist bei den Filtern im Detail zu suchen. Es stellt sich heraus, dass die Filtereinheit des Filtrerrades vom Hersteller für einen Wellenlängenbereich von 700 bis 1250 nm begrenzt ist. Der eingesetzte Referenzlaser arbeitet jedoch bei 638 nm, so dass die im Filtrerrad verbauten Filter auf den Referenzstrahl eine völlig andere Brechwirkung haben könnten, als die in der Filterbank zum Einsatz kommenden ND-Filter. Letztere sind speziell für 638 und 1064 nm vom Hersteller freigegeben und zudem AR-beschichtet. Im Ergebnis lässt sich lediglich sagen, dass die Resultate, die mit dem Filtrerrad aufgenommen werden, nicht mit jenen unter Benutzung der Filterbank vergleichbar sind. Die Anzahl der Elemente

in der Filterbank indes zeigt keine Auswirkung auf die Stabilität des Systems oder den Abstand der Spots zueinander.

Die ermittelten Durchmesser verändern sich eindeutig um bis zu 100  $\mu\text{m}$  bei unterschiedlichen Filtern, jedoch ist kein Zusammenhang zu der Filteranzahl oder –art erkennbar. Liegen die Durchmesser beim Filterradd und der Filterbank mit 4 Filtern nahe beieinander, so sind diese bei 2 bzw. 3 Filtern in der Bank deutlich größer. Grund hierfür ist möglicherweise die Verkippung der einzelnen Filter innerhalb der Filterbank zur Vermeidung von Geisterbildern, die bei Doppelreflexion innerhalb der Gläser entstehen. Da die Filter jedoch als planparallele Platten betrachtet werden können, dürfte deren Kippung lediglich eine Verschiebung der Spots, nicht aber eine Verzerrung zur Folge haben. Gegebenenfalls ist der beobachtete Effekt eine Folge der bereits enthaltenen Bildfehler, die durch die Kippung entweder verstärkt oder abgeschwächt werden, wie bei der 4-Filter-Konfiguration. Die überdies in Abbildung 4.10 erkennbaren Peaks werden von der zeitlichen Auflösung der Kamera verursacht. Bedingt durch die Software wird hierbei eine Belichtungszeit von 117 ms gewählt, was einer Bildfrequenz von etwa 8,5 Hz entspricht. Infolgedessen können in regelmäßigen Intervallen während einer Belichtungsphase zwei Pulse des Testlasers auf dem Chip auftreffen, so dass es zu einer Überbelichtung der Aufnahme kommt. Zusätzlich unterscheidet sich der zweite eintreffende Puls durch die Abweichungen in Position und Durchmesser vom Ersten. Die Folge ist ein deutlich zu groß gemessener Spot, der sich in den Ausbrüchen in den Kurven widerspiegelt. Somit können die entsprechenden Werte als Ausreißer betrachtet und ignoriert werden.

## 4.2.6 Energiekalibrierung des Wedge

Da der Strahlteiler laut Herstellerangaben etwa 5 % des einfallenden Lichtes bei einem Einfallswinkel von  $0^\circ$  reflektiert, ist es von Interesse zu untersuchen, wie sich die Transmission bzw. Reflexion unter einem definierten Winkel verhält. Ausgehend vom Aufbau wird der Wedge nicht in einem  $0^\circ$ -Winkel zu den einfallenden Strahlen platziert. Tatsächlich befand er sich während der vorangegangenen Messungen in einem Winkel von ungefähr  $30^\circ$  zu der optischen Achse der einfallenden Strahlbündel. Im Rahmen dieser Untersuchung wird der Wedge von  $0^\circ$  bis  $45^\circ$  in  $15^\circ$ -Schritten um die y-Achse gedreht und dabei die Transmission über das Energiemessgerät hinter der Optik bestimmt. Wichtig für die Auswertung ist, dass der Testlaser, entsprechend dem BELA Tx, polarisierte Strahlung emittiert. Dabei ist diese nicht zirkular, sondern linear horizontal polarisiert. Die Bedeutung für die Transmission am Strahlteiler kann der Transmissionskurve in Anhang A6 entnommen werden. Die Grafik in der unteren Hälfte in Anhang A6 zeigt die Pulsenergien in Abhängigkeit der Winkelverkippen über 500 Schuss des Testlasers. Dabei fällt zum einen die große Streuung auf, die mit maximal etwa  $100 \mu\text{J}$  bei einer Spitzenenergie von  $2,67 \text{ mJ}$  einen relativ großen Einfluss hat. Zum anderen wird deutlich, dass die höchste Transmission bei einer  $30^\circ$ -Kippung gemessen wurde. Dieser Effekt deckt sich auf der einen Seite mit den Herstellerangaben und kann in der Transmissionskurve nachvollzogen werden. Hier ist die Transmission für horizontal bzw. parallel polarisiertes Licht bei einer Inzidenz von  $45^\circ$  größer als bei  $0^\circ$ -Einfall. Es ist demzufolge nachvollziehbar, dass eine Kippung von  $30^\circ$  eine noch höhere Transmission nach sich zieht. Folglich ist ein Winkel von  $30^\circ$  zur Inzidenz der Strahlen als optimal zu betrachten und im Aufbau anzustreben.



**Abbildung 4.11:** gemittelte Energie (blau) und Standardabweichung (rot) über dem Inzidenzwinkel

Abbildung 4.11 zeigt die gemittelten Energien in Abhängigkeit des Einfallswinkels der Strahlen auf dem Wedge. Zudem sind die gemessene Pulsenergie vor dem Wedge sowie die entsprechenden Transmissionswerte abgetragen. Dabei wird deutlich, dass der Transmissionsverlust bei senkrechtem Einfall mit über 10 % mehr als doppelt so hoch ist, wie die Theorie erwarten lässt. Auch bei hinreichend idealer Position des Wedge mit einem Einfallswinkel von 30° treten noch 6 % Verlust durch Reflexion und Absorption auf. Anhand dieser Beobachtungen kommt man zu dem Schluss, dass die durch den Hersteller angegebenen Spezifikationen vom Strahlteiler nicht vollkommen erfüllt werden können. Vergleichsmessungen mit dem vertikal polarisierten Referenzlaser und einem Leistungsmesskopf, statt dem Energiedetektor bestätigen diese Vermutung. Auch hier treten entgegen der Theorie bei senkrechtem Einfall etwa 5 % mehr Verlust auf (siehe Anhang A7).

## 5 Kritische Betrachtung der eigenen Arbeit

Aufbauend auf den Grundlagen und Beispielen der Entwickler der BeamGage-Software, konnten die Anforderungen an das LabVIEW-Programm ohne Vorkenntnisse in der Programmierung mit LabVIEW vollständig in einer Applikation umgesetzt werden. Auch wenn das VI funktioniert, stellt es doch nur ein Grundgerüst dar. Nach wie vor enthält der Code diverse Fehler und Bugs, die erst mit längerer Nutzung und Weiterentwicklung des Programms ausgeschlossen werden können. Eine allumfassende Fehlersuche und -analyse war aufgrund des beschränkten Zeitrahmens der Arbeit nicht möglich. Größte Schwachstelle des existierenden VIs sind häufige Abstürze. Auch wenn das Programm während der Messungen stabil läuft, erleiden LV und auch BG häufig einen Absturz bei Beenden des Programms. Nichtsdestotrotz werden die aufgenommenen Daten korrekt gespeichert und auch im Folgenden zieht dieser Fehler keine negativen Konsequenzen nach sich. Bisweilen verliert ein geöffneter BG-Server nach dem Pausieren und wieder Starten einer Messung den Kontakt zur Kamera. Dieses Problem kann jedoch innerhalb der Server wieder behoben werden, indem das Gerät neu initialisiert, oder aber ein Neustart des VIs durchgeführt wird. Zur Lösung dieser Schwierigkeiten wurde der Kontakt zu der Entwicklungsabteilung von Spiricon hergestellt. Ihre Antwort steht noch aus und kann daher leider nicht mehr in diese Arbeit einfließen.

Die Messungen zur Verifizierung der Messgenauigkeit des BELA AIV Testaufbaus erfolgten auf Basis der Erfahrungen der AIV Teams vom GSFC auf der einen Seite und des BELA Teams auf der anderen. Mit Hilfe dieser Messungen konnte gezeigt werden, dass der Testaufbau in seiner Genauigkeit und Empfindlichkeit den Anforderungen von BELA gerecht wird. Es wurden die für die optischen Messungen kritischen Elemente identifiziert und untersucht. Die Rekonfiguration des Aufbaus gemäß den Anforderungen und Laborbedingungen wurde zum großen Teil abgeschlossen. Die Integration des Energiemessers und des Wavemeters in den bestehenden Strahlengang konnte indes nicht endgültig realisiert werden und wurde dementsprechend vorerst provisorisch gelöst. Die Daten dieser Messgeräte werden jedoch von der Applikation erfasst.



## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen der präsentierten Arbeit wurde die Methodik und Vorgehensweise bei der Erstellung einer virtuellen Applikation unter Zuhilfenahme des Programmiersystems LabVIEW erläutert. Die dabei verwendeten Algorithmen und Strukturen wurden, aufbauend auf Beispielen und Erläuterungen Spiricons, entsprechend dargelegt [27][28][29]. In Verbindung damit zeigte sich, dass die zur Stabilitätsmessung benötigten Geräte sowie deren Software-Schnittstelle in LabVIEW integriert werden können. Die aus den Anforderungen an den AIV Aufbau hervorgehenden, zu ermittelnden Parameter konnten entweder einer Software oder aber direkt dem Messgerät entnommen und über die Applikation kanalisiert, dargestellt und angemessen archiviert werden. Im Detail umfasste dies die Entnahme der Zentroid-Positionen der Strahlen zur Bestimmung des Abstandes zwischen diesen. Des Weiteren wurde der Durchmesser des BELA-Strahls, die Ähnlichkeit zu einem Gauß-Strahlprofil sowie die Pulsenergie und die Wellenlänge der Strahlung BELAs detektiert. Die Messdatenerfassung erfolgte zum einen in einem tabellarischen Format, zur Erleichterung der Nachprozessierung, konnte aber zum anderen auch um die Speicherung der Rohdaten der CCD-Kamera ergänzt werden. Überdies wurden mit der Entwicklungsabteilung Spiricons weiterführende Kontakte aufgebaut, welche die Optimierung der beschriebenen Applikation auch in Zukunft fördern werden.

Unter Verwendung der erstellten LabVIEW-Anwendung galt es den BELA AIV Testaufbau im zweiten Teil dieser Arbeit hinsichtlich seiner Genauigkeit und Stabilität zu überprüfen. Dazu wurde zunächst die Konfiguration des AIV Messsystems erläutert und wichtige Komponenten charakterisiert. In Ermangelung des BELA Tx fand die Untersuchung des optomechanischen Aufbaus am Testsystem mit einem Ersatzlaser statt. Die gesamte optomechanische Stabilität des Messaufbaus ohne Manipulation betrug  $5 \mu\text{rad}$ . Daran anknüpfend konnten für den Aufbau kritische Elemente, wie der OAP und die Filterbank, identifiziert und auf ihren Einfluss auf die Stabilität der Messungen hin untersucht werden. Die Verkippung des OAP hatte im Folgenden lediglich einen geringen Einfluss auf die Stabilität der Laserstrahlen sowie deren Durchmesser, wobei die Kippung um die y-Achse deutlich stärkeren Einfluss nahm. Diese stellte mit  $7,5 \mu\text{rad}$  auch den erheblichsten Einflussfaktor auf die Stabilität dar. Damit lag die gesamte Instabilität mit Manipulation des Aufbaus dennoch im

tolerierbaren Bereich. Durch das Referenzlaserkonzept hat die optomechanische Stabilität zudem keine signifikante Auswirkung auf die Messungen.

Eine Abhängigkeit der Strahlstabilität von der Anzahl der Filterelemente im Strahlengang konnte infolge der Untersuchungen ausgeschlossen werden. Es wurde allerdings ein erheblicher Einfluss auf die Entfernung zwischen den Spots durch die Art der Filter festgestellt. Daran anknüpfend zeigte sich, dass sich die für beide Wellenlängen ausgelegten Filter der Filterbank zueinander kongruent verhalten, wohingegen das Filterrada deutlich von diesen Ergebnissen abwich. Dementsprechend und in Anbetracht des empfohlenen Wellenlängenbereichs des Filterrada ist bei weiteren Messungen mit beiden Lasern von einer Strahlabschwächung mit diesem Element abzusehen.

Die Untersuchungen zur Pulsenergie in Zusammenhang mit dem Wedge zeigten wider Erwarten, dass die Kennwerte des Testlasers nicht mehr den Herstellerangaben entsprechen. Dabei unterlag der Laser einem Leistungsverlust von über 90 % im Vergleich zu den Kennwerten. Das Problem konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht korrigiert werden, die Auskunft des Herstellers legt aber die Degradation der Pumplichtquelle nahe. Trotz der daraus resultierenden Dominanz des Referenzlasers ließen sich unter geschickter Verwendung von Filtern dennoch beide Laser simultan auf dem Chip abbilden. Für den Wedge konnte ein optimaler Einfallswinkel der Strahlen von etwa 30° ermittelt werden. In diesem Fall wurden etwa 6 % der Strahlung zur CCD-Kamera geführt und die restliche Strahlung auf den Energiemesser transmittiert, was einer Beschädigung des Chips durch zu hohe Energieeinwirkung vorbeugt. Unter Berücksichtigung dieser Punkte kann der AIV Testaufbau für BELA als verifiziert betrachtet werden.

Im nächsten Schritt wird die Integration der im Testsystem untersuchten Konfiguration im Reinraumlabor erfolgen. Zudem wird der BELA Tx in der TVK platziert, um die Messungen unter nahezu realen Missions-Bedingungen wiederholen zu können. Die LV-Applikation wird im Weiteren von den letzten Programmfehlern zu bereinigen sein und bietet zudem Raum zur Erweiterung, z.B. um die Daten der Umweltkontrollen der TVK zu erfassen. Die Ausgabe der Stabilität in  $\mu\text{rad}$ , resultierend aus den Werten für die Entfernung der beiden Spots stellt sich zusätzlich als interessant für die Übersichtlichkeit des VIs heraus und kann nachträglich implementiert werden. Schlussfolgernd lässt die Verifizierung des BELA Tx sowohl Raum für die Erweiterung des Messaufbaus und des VIs, als auch für weiterführende Untersuchungen.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] National Space Science Data Center; NASA: *Luna 1*. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1959-012A>. (abgerufen am 23. Juni 2011)
- [2] BepiColombo Project Team: *Experiment Interface Document – Part A : BepiColombo*. BC-EST-RS-01140 Issue 2, 24. Juni 2009
- [3] Engelhardt, Wolfgang: *Planeten, Monde, Ringsysteme: Kamerasonden erforschen unser Sonnensystem*. Basel : Birkhäuser, 1984
- [4] DLR: *Merkur und Missionen*. [http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-6445/10591\\_read-23799](http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-6445/10591_read-23799). (abgerufen am 17. Mai 2011)
- [5] National Space Science Data Center; NASA: *Mercury Fact Sheet*. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>. (abgerufen am 18. Mai 2011)
- [6] ESA: *Merkur : Ein Planet voller Rätsel*. [http://www.esa.int/esaCP/SEM2JWSM41F\\_Germany\\_0.html](http://www.esa.int/esaCP/SEM2JWSM41F_Germany_0.html). (abgerufen am 17. Mai 2011)
- [7] BELA Team: *BELA : Experiment Interface Document Part – B*. Februar 2009
- [8] Pedrotti, Frank L.; Pedrotti, Leno S.; Bausch, Werner; Schmidt, Hartmut: *Optik für Ingenieure*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [9] Litfin, Gerd (Hrsg.): *Technische Optik in der Praxis*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [10] Solomon, Sean C.; McNutt Jr., Ralph L.; Gold, Robert E.; et al.: *The MESSENGER mission to Mercury : scientific objectives and implementation*. In: *Planetary and Space Science* 49 (2001), S. 1445-1465

- [11] Thomas, N.; Spohn, T.; Barriot, J.-P.; et al.: *The BepiColombo Laser Altimeter (BELA) : Concept and baseline design*. In: Planetary and Space Science 55 (2007), S. 1398-1413
- [12] DLR: *Messprinzip Laseraltimeter*. [http://www.dlr.de/pf/DesktopDefault.aspx/tabid-6445/10591\\_read-23854/gallery-1/gallery\\_read-Image.6.14236/](http://www.dlr.de/pf/DesktopDefault.aspx/tabid-6445/10591_read-23854/gallery-1/gallery_read-Image.6.14236/). (abgerufen am 20. Mai 2011)
- [13] National Space Science Data Center; NASA: *Mars Observer*. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1992-063A>. (abgerufen am 20. Mai 2011)
- [14] National Space Science Data Center; NASA: *Mars Global Surveyor*. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/marsurv.html>. (abgerufen am 20. Mai 2011)
- [15] Ramos-Izquierdo, Luis; Bufton, Jack L.; Hayes, Patricia: *Optical system design and integration of the Mars Observer Laser Altimeter*. In: Applied Optics 33 (1994), S. 307-322
- [16] Zwally, H.J.; Schutz, B.; Abdalati, W.; et al.: *ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land*. In: Journal of Geodynamics 34 (2002), S. 405-445
- [17] Goddard Space Flight Center, NASA: *Science : ICESat Measurements*. <http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/science/measurements.php>. (abgerufen am 20. Mai 2011)
- [18] Ramos-Izquierdo, L.; Scott III, V. S.; Schmidt, S.; et al.: *Optical system design and integration of the Mercury Laser Altimeter*. In: Applied Optics 44 (2005), Nr. 9, S. 1748-1760
- [19] Cavanaugh, John F.; Smith, James C.; Sun, Xiaoli; et al.: *The Mercury Laser Altimeter Instrument for the MESSENGER Mission*. In: Space Science Review 131 (2007), Nr. 1-4, S. 451-479

- [20] Ramos-Izquierdo, L.; Scott III, V.S.; Connelly, J.; et al.: *Optical system design and integration of the Lunar Orbiter Laser Altimeter*. In: Applied Optics 48 (2009), Nr. 16, S. 3035-3049
- [21] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *BepiColombo Mission zum Merkur*. <http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-6445>. (abgerufen am 06. Juni 2011)
- [22] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *BepiColombo Mission : Raumsonde, Missionsprofil, Instrumente*. [http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-6445/10591\\_read-23671/admin-1/](http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-6445/10591_read-23671/admin-1/). (abgerufen am 06. Juni 2011)
- [23] Oberst, J.; Spohn, T.; Michaelis, H.; Thomas, N.; Seiferlin, K.: *The BepiColombo Laser Altimeter (BELA) : science requirements and experiment description*. <http://elib.dlr.de/43560/>. (abgerufen am 06. Juni 2011)
- [24] Rech, M.; Carl Zeiss Optronics GmbH: *Technical Specification for Laser System*. BC-BEL-SP-60001, März 2009
- [25] Obert, Jürgen: *Science Requirements*. BC-BEL-RS-33001, November 2008
- [26] Ophir-Spiricon (Hrsg.): *BeamGage User Guide : Laser Beam Analyzer*. Document-Nr.: 50220-001, September 2011
- [27] Owens, Bill (2011): *RE: BeamGage - LabVIEW interface - DLR - German Aerospace Center*. E-mail: [bill.owens@us.ophiropt.com](mailto:bill.owens@us.ophiropt.com) (empfangen am 27.06.2011)
- [28] Ophir-Spiricon (Hrsg.): *BeamGage Automation API*. 12. April 2011
- [29] Leikis, Russell (2011): *RE: BeamGage - LabView Schnittstelle - DLR - Hoffmann DLR - German Aerospace*. E-mail: [russ.leikis@us.ophiropt.com](mailto:russ.leikis@us.ophiropt.com) (empfangen am 01.06.2011)

- [30] Althaus, Christian: *Layout, Design and Integration of a Measurement Setup in the Context of the AIV of the BELA Transmitter Laser*. ILR-RSN DA 10-07, Oktober 2010
- [31] CrystaLaser: *Stabilized Compact Red CrystaLaser*. <http://www.crystalaser.com/DL635-785.pdf>. (abgerufen am 11.07.2011)
- [32] SONY: *ICX274AL Datenblatt*. <http://www.datasheetcatalog.net/>. (abgerufen am 12.07.2011)
- [33] Point Grey: *GRASSHOPPER Datenblatt*. <http://www.ptgrey.com/products/grasshopper/models/gras-xx-c.asp>. (abgerufen am 12.07.2011)
- [34] Litron Lasers: *NANO Series : Product Range Specification*. [http://www.litronlasers.com/pages/nano\\_t.html](http://www.litronlasers.com/pages/nano_t.html). (abgerufen am 13.07.2011)
- [35] Kallenbach, R.; Christensen, U.; Thomas, N.; Spohn, T.: *BELA MPS Laser System Requirements Document*. BC-BEL-RS-50014, Oktober 2008
- [36] Laser Components GmbH: *15P106931 Datenblatt*. Eingesehen am: 19.07.2011

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufnahme des Merkur durch die Raumsonde Messenger am 07.10.2008 [4].....	2
Abbildung 2.1:	die 3 Grundprozesse nach Einstein: a) Absorption, b) spontane und c) stimulierte Emission [8].....	7
Abbildung 2.2:	Prinzipskizze eines Laserresonators [8].....	7
Abbildung 2.3:	schematische Darstellung vom Senden und Empfangen des Lichtes [11].....	9
Abbildung 2.4:	Messprinzip eines Laseraltimeters in einer Raumsonde am Beispiel BELA [12].....	10
Abbildung 2.5:	Designskizze des Mars Observer Laser Altimeters [14].....	12
Abbildung 2.6:	Modellskizze vom GLAS [17].....	13
Abbildung 2.7:	Mercury Laser Altimeter Designskizze [19].....	14
Abbildung 2.8:	Lunar Orbiter Laser Altimeter Modellskizze [20].....	15
Abbildung 2.9:	Mercury Composite Spacecraft (MCS) [22].....	16
Abbildung 2.10:	die BELA Komponenten, zusammen mit BPU montiert auf die Raumsonden Konsole [7].....	19
Abbildung 2.11:	BELA Tx Nd:YAG-Resonator (Schema) [24].....	21
Abbildung 2.12:	BELA Tx Strahlengang (schematisch) [24].....	22
Abbildung 3.1:	Front Panel des Beispiel-VI.....	28
Abbildung 3.2:	Blockdiagramm des Bsp.-VI.....	28
Abbildung 3.3:	schematische Darstellung des Datenzugriffs auf BG über LabVIEW.....	29
Abbildung 3.4:	Bsp. der Zentroid Position eines $TEM_{11}$ : links ohne und rechts mit manueller Apertur.....	31
Abbildung 3.5:	Aufzeichnung der rohen Kameradaten aus BG über eine Event Schleife.....	33

Abbildung 3.6:	Überblick über das Front Panel des VIs; Ausgegeben werden die Zentroid-Positionen, das daraus errechnete $\Delta$ , der Durchmesser des BELA-Spots sowie dessen Wellenlänge; unten wird die Pulsenergie dargestellt; an der linken Seite sind zudem diverse Kontrollen zum Starten und Stoppen sowie zum Kalibrieren des VIs platziert.....	37
Abbildung 3.7:	schematischer Messaufbau zur Stabilitätsmessung mit Theodoliten [30] .....	39
Abbildung 3.8:	schematischer Aufbau des AIV Testsystems mit Referenzlaser .....	40
Abbildung 3.9:	Strahlteilerkeil in seiner Justagefassung .....	43
Abbildung 3.10:	Offaxis-Parabolspiegel.....	44
Abbildung 3.11:	Testadapter mit LHB, BEX und Referenzspiegel.....	44
Abbildung 3.12:	CrystaLaser DL638-050 und BEX .....	45
Abbildung 3.13:	Gras-20S4M/C CCD Kamera .....	47
Abbildung 3.14:	spektrale Empfindlichkeit einer CCD Kamera [32] .....	47
Abbildung 4.1:	Finaler Testaufbau zur Verifizierung der Empfindlichkeit und Genauigkeit des Setups, aufgebaut auf zwei optischen Bänken .....	50
Abbildung 4.2:	Ausgabe der Kameradaten über BG, rechts oben der Testlaserspot in einer manuellen Apertur, links unten der Referenzlaserstrahl.....	51
Abbildung 4.3:	Faltungsstrahlen-gang; rot=Testlaser; grün=Referenzlaser.....	54
Abbildung 4.4:	opt. Konfiguration in ZEMAX für Wedge, Faltungsspiegel, OAP und die Bildebene der CCD-Kamera .....	57
Abbildung 4.5:	Polare Darstellung der Durchmesserwerte bei Verkipfung des OAP um die y-Achse.....	58
Abbildung 4.6:	Polare Darstellung der Durchmesserwerte bei Verkipfung des OAP um die x-Achse.....	59
Abbildung 4.7:	Filterbank vor Baffle und Kamera; die Filter im Filterradd sind dabei nicht im Einsatz; maximal können 4 Filter in diese Filterbank eingesetzt werden .....	61



---

Abbildung 4.8:	Filterrad mit Baffle und CCD-Kamera; der rechte Regler ist für die Dichten von 0 bis 4 und der linke Regler für Komma- stellen in 0,2er Schritten .....	61
Abbildung 4.9:	Gegenüberstellung der gemessenen Entfernungen zwischen den Strahlen über 100 Schuss bei Einsatz verschiedener Filterkonfigurationen .....	62
Abbildung 4.10:	Darstellung der Durchmesser der Spots über 100 Schuss bei verschiedenen Filterkonfigurationen .....	63
Abbildung 4.11:	gemittelte Energie (blau) und Standardabweichung (rot) über dem Inzidenzwinkel .....	66

---

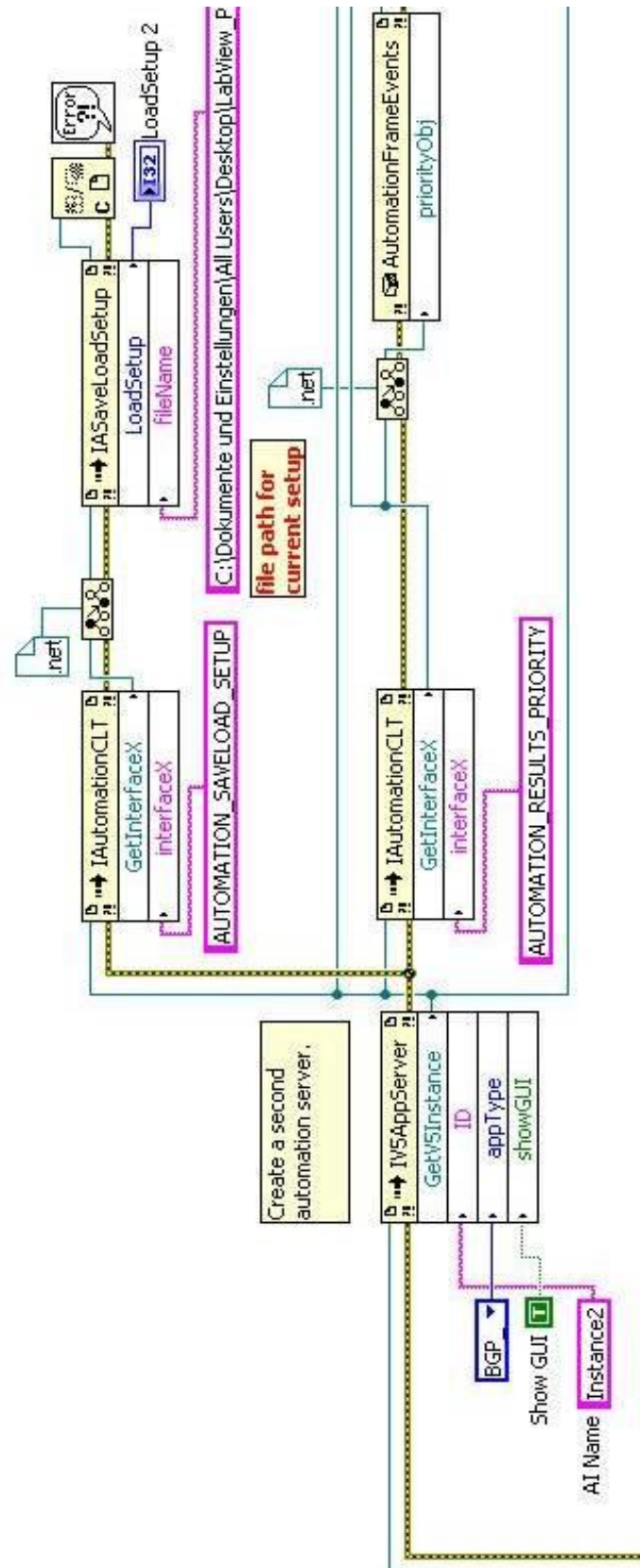
## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Komponenten von BELA [7]	20
Tabelle 2:	Instrumenten Datenblatt der Tx Laserquelle [7]	23
Tabelle 3:	Instrumenten-Datenblatt der Rx- und APD-Komponente [7]	23
Tabelle 4:	Spezifikationen Testlaser Litron NANO-275-20 [34]	42
Tabelle 5:	Daten des Referenzlasers [31]	46
Tabelle 6:	Parameter des Referenz-BEX [31]	46
Tabelle 7:	Parameter der GRAS-20S4M/C CCD Kamera von Point Grey	48
Tabelle 8:	Stabilität des Referenzlasers mit und ohne BEX	52
Tabelle 9:	Kenndaten des Referenzstrahl-ND-Filters	55
Tabelle 10:	Stabilitätswerte für OAP-Verkipfung aus ZEMAX-Simulation	57

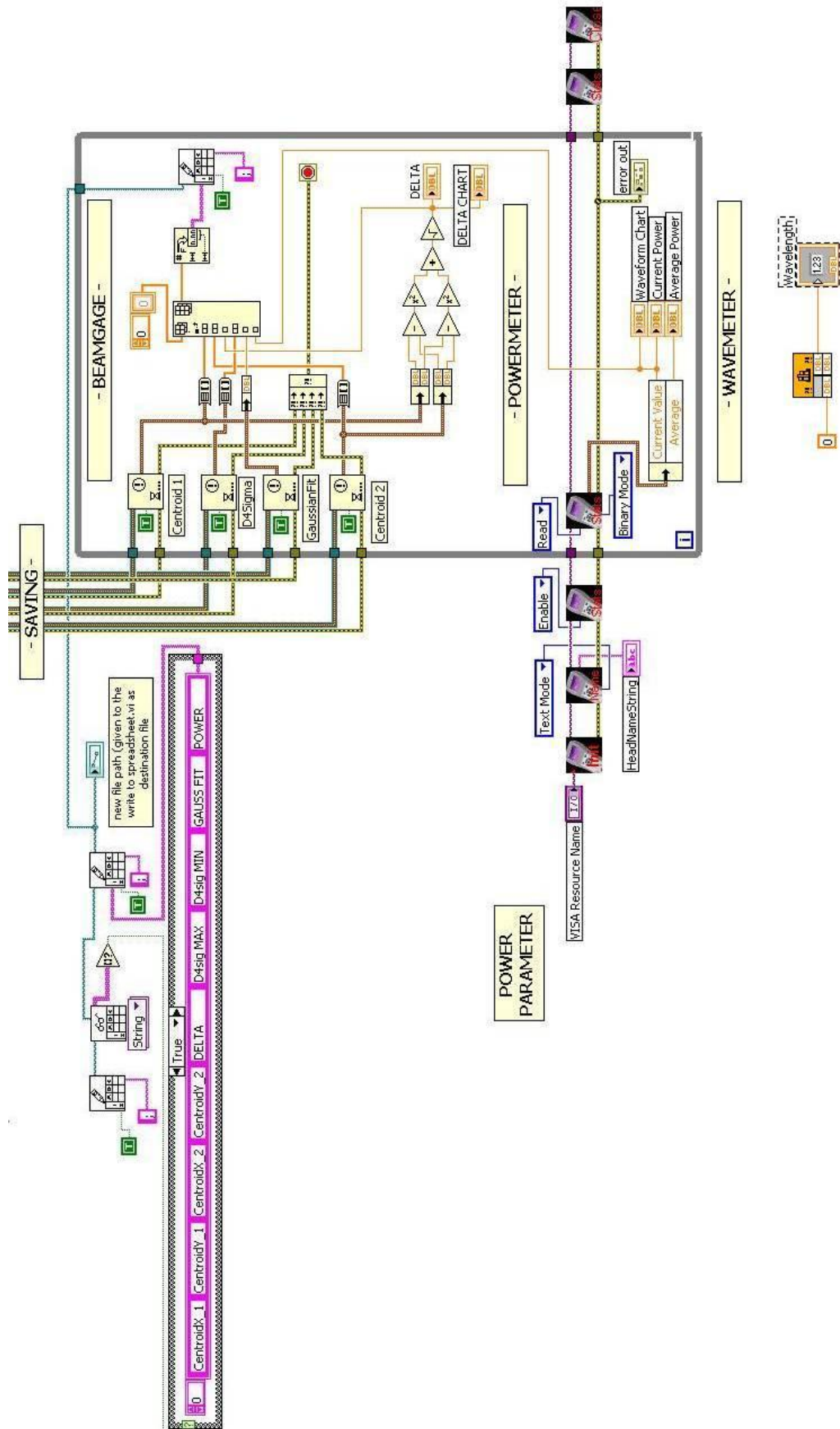
## Anhang

- A1 Blockdiagramm zum Einbinden eines BG-Servers und Laden eines Setups
- A2 Blockdiagramm zum Speichern der Messdaten
- A3 Einfluss der Verkippung des OAP auf die Stabilität
- A4 Einfluss des OAP auf den Durchmesser (Verkippung um y-Achse)
- A5 Einfluss des OAP auf den Durchmesser (Verkippung um x-Achse)
- A6 Transmissionskurve Wedge und Pulsenergie bei Wedge-Kippung
- A7 Leistung des Referenzlasers in Abhängigkeit der Wedge-Kippung

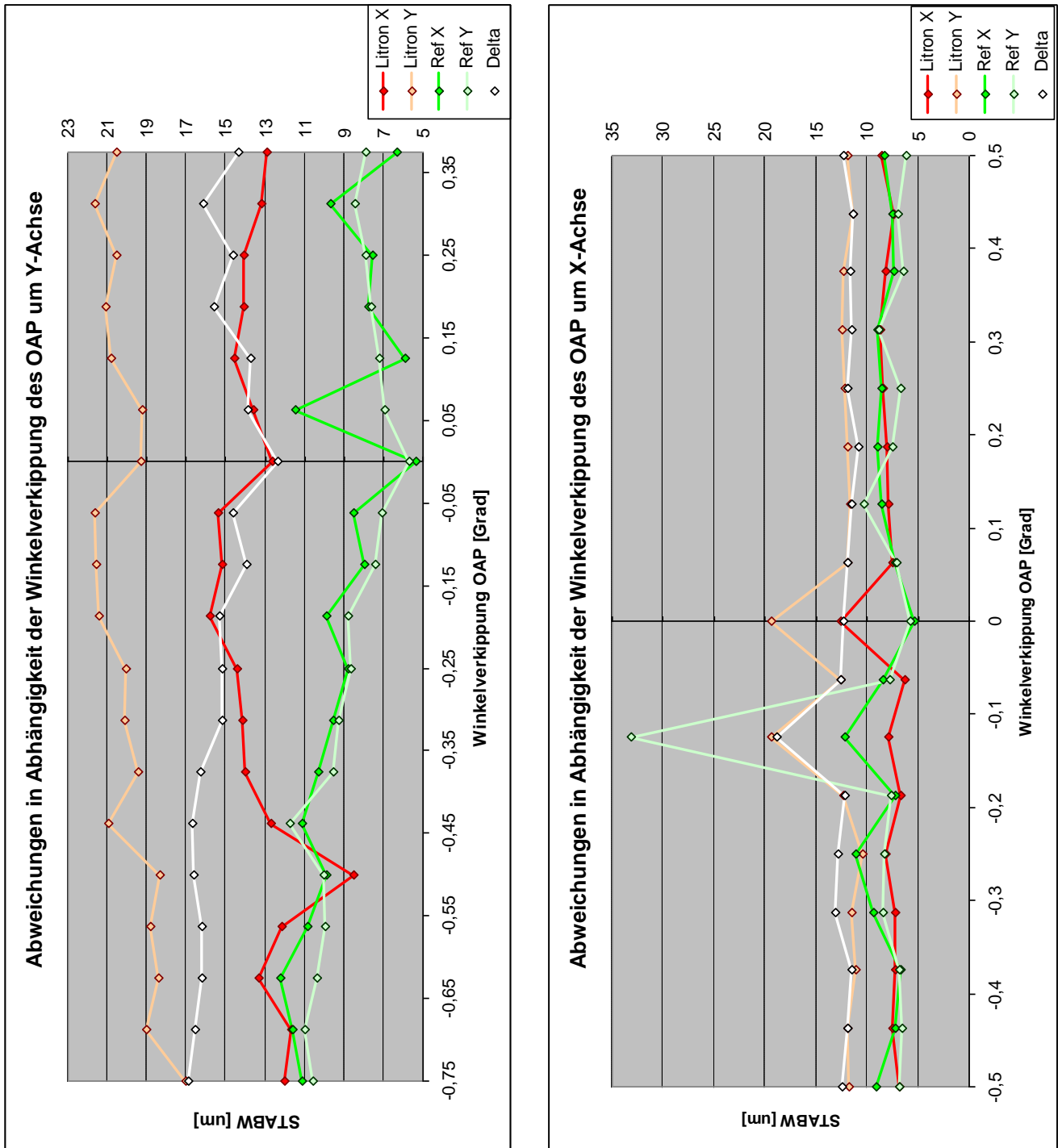
# A1 Blockdiagramm zum Einbinden eines BG-Servers und Laden eines Setups



## A2 Blockdiagramm zum Speichern der Messdaten



### A3 Einfluss der Verkippung des OAP auf die Stabilität



**Abbildungen zu 4.2.3:** Standardabweichung von der Zentroidposition in Abhängigkeit der Winkelverkipfung des OAP um die y-Achse (links) und die x-Achse (rechts). Die dabei verwendeten Werte wurden jeweils über ca. 600 Schuss gemittelt, was etwa 1 Minute Aufnahmezeit entspricht. Die Verkippung um die y-Achse wurde in pos. Richtung durch den Faltungsspiegel begrenzt.

## A4 Einfluss des OAP auf den Durchmesser (Verkipfung um y-Achse)

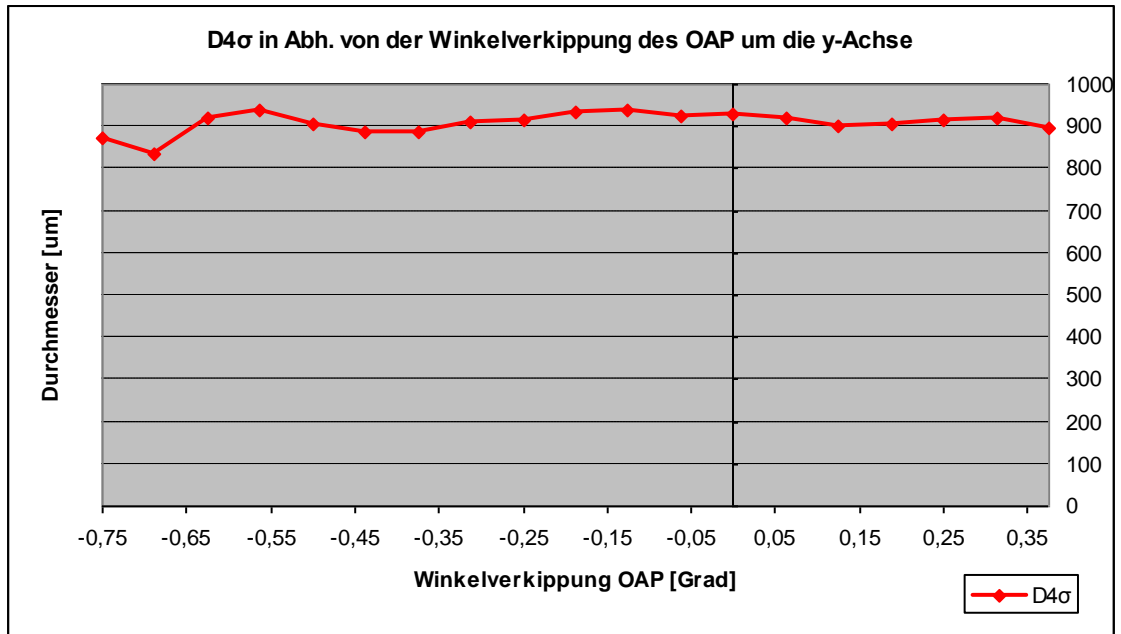


Abbildung zu 4.2.4: D4σ-Durchmesser in Abhängigkeit der Verkipfung des OAP um die y-Achse

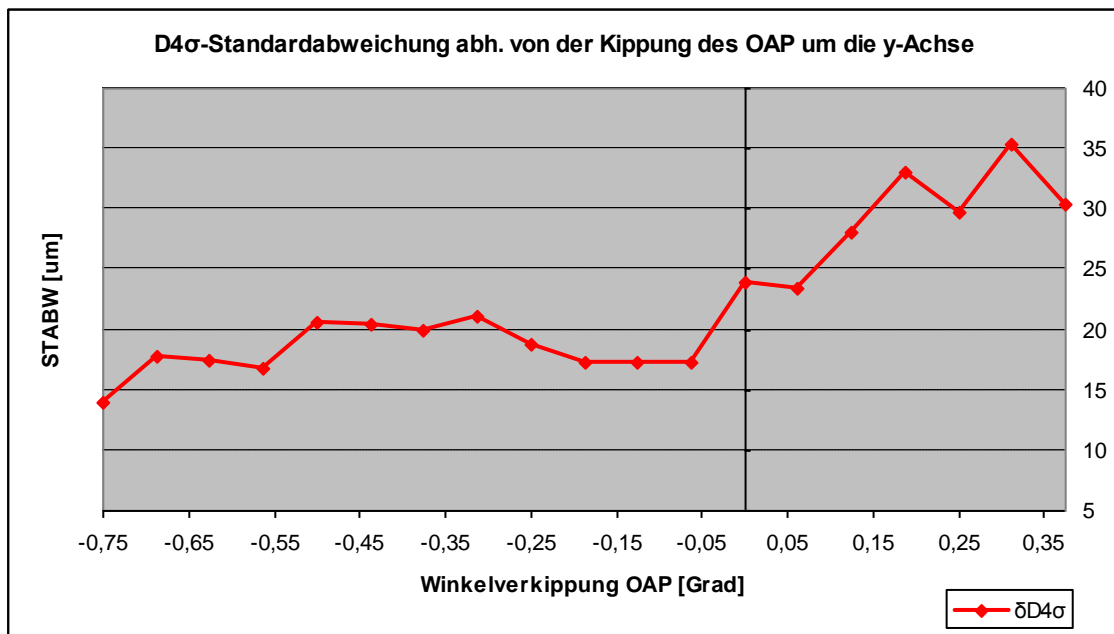
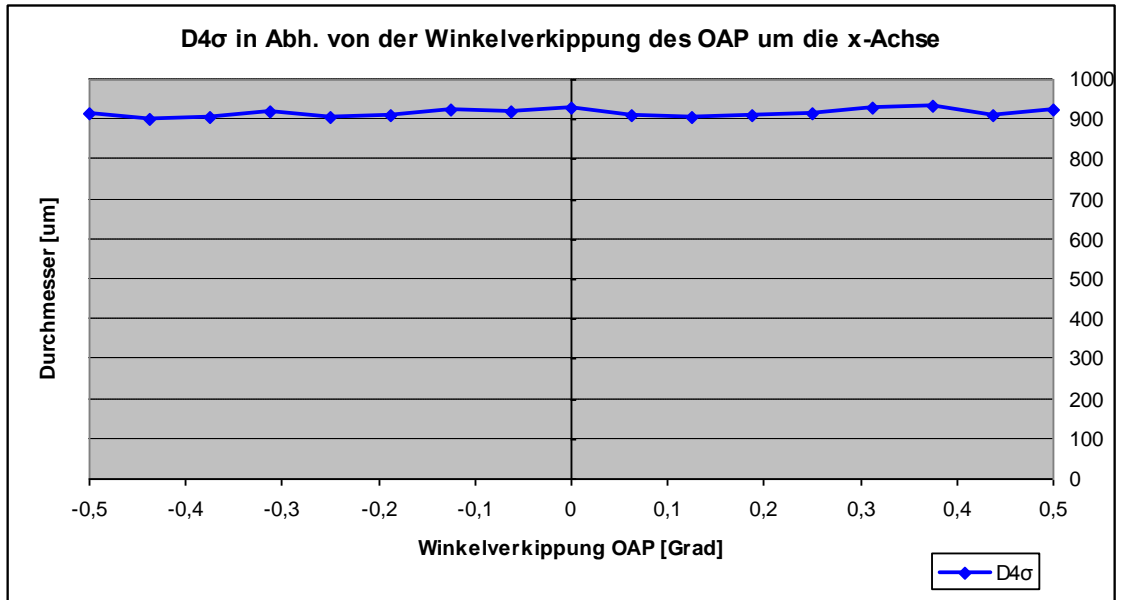
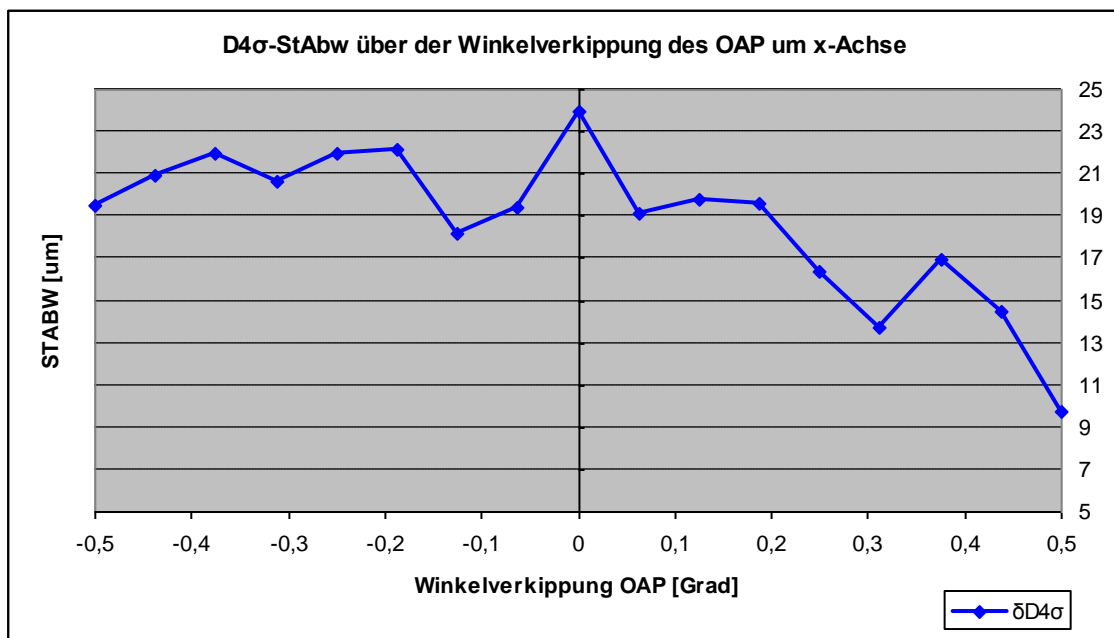


Abbildung zu 4.2.4: Standardabweichung des D4σ-Durchmesser in Abhängigkeit der Verkipfung des OAP um die y-Achse; spiegelt die Stabilität des Durchmessers des Testlasers bei Manipulation im Strahlengang wider

## A5 Einfluss des OAP auf den Durchmesser (Verkipfung um x-Achse)



**Abbildung zu 4.2.4:** D4 $\sigma$ -Durchmesser in Abhängigkeit der Verkipfung des OAP um die x-Achse



**Abbildung zu 4.2.4:** Standardabweichung des D4 $\sigma$ -Durchmesser in Abhängigkeit der Verkipfung des OAP um die x-Achse



## A6 Transmissionskurve Wedge und Pulsenergie bei Wedge-Kippung

15P106931

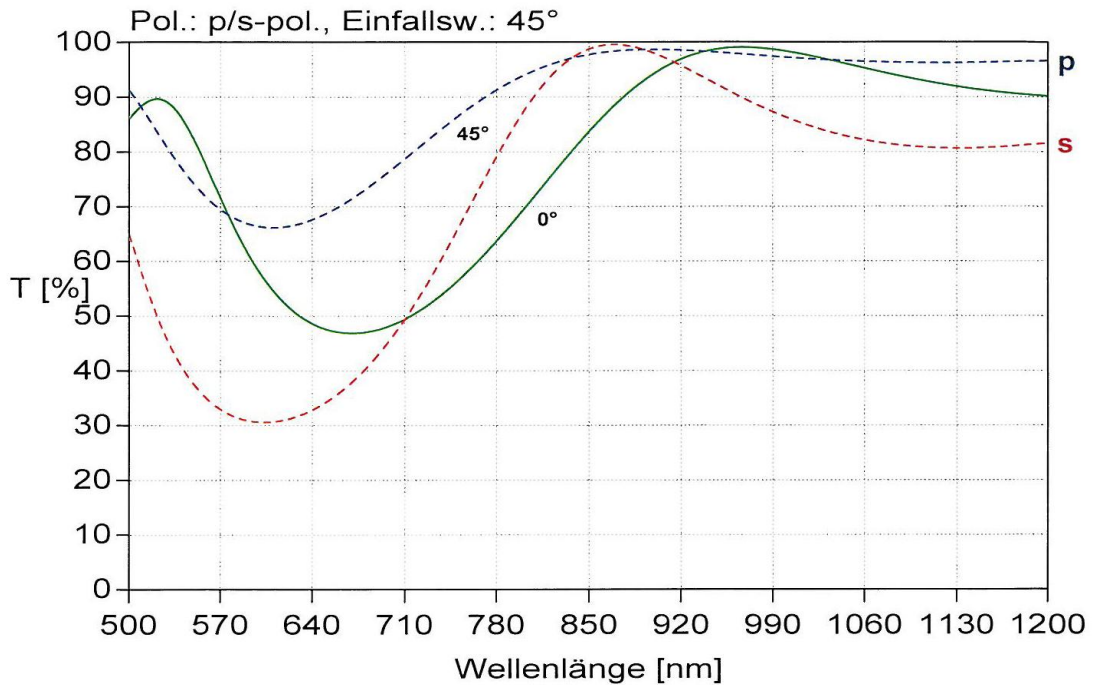


Abbildung zu 4.2.6: Transmissionskurve für den Strahlteilerkeil bei polarisiertem Licht für einen Inzidenzwinkel von 0° und 45° [36]

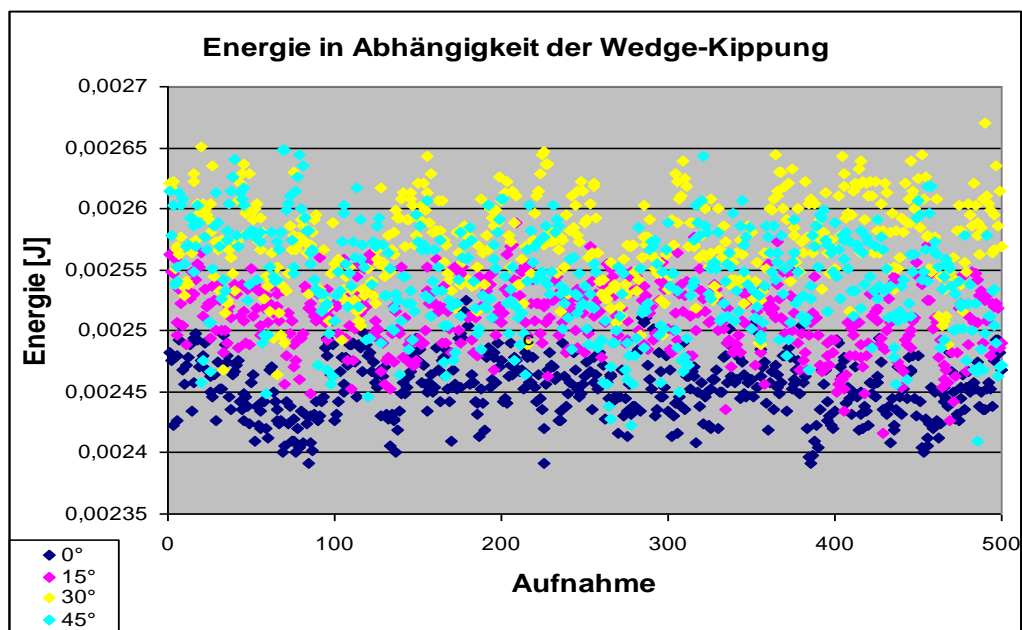


Abbildung zu 4.2.6: Darstellung der Pulsenergien für die einzelnen Winkelkippungen über 500 Schuss

## A7 Leistung des Referenzlasers in Abhängigkeit der Wedge-Kippung

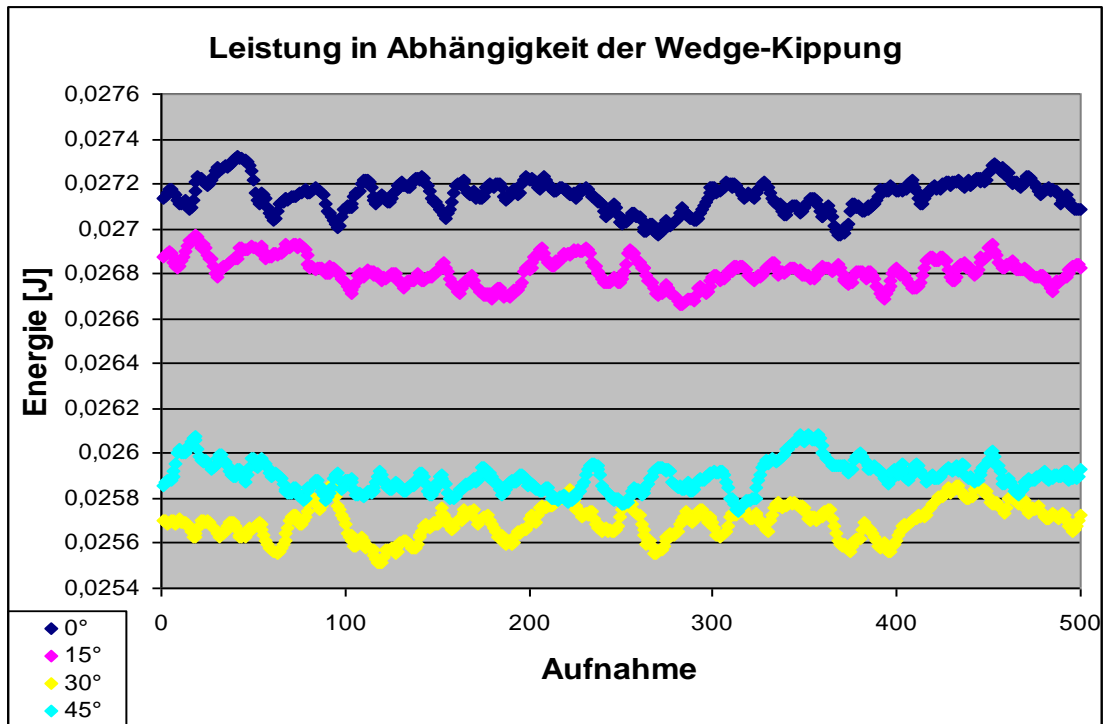


Abbildung zu 4.2.6: Leistung des Referenzlasers (s-pol.) in Abhängigkeit der Wedgeverkipfung über 500 Schuss

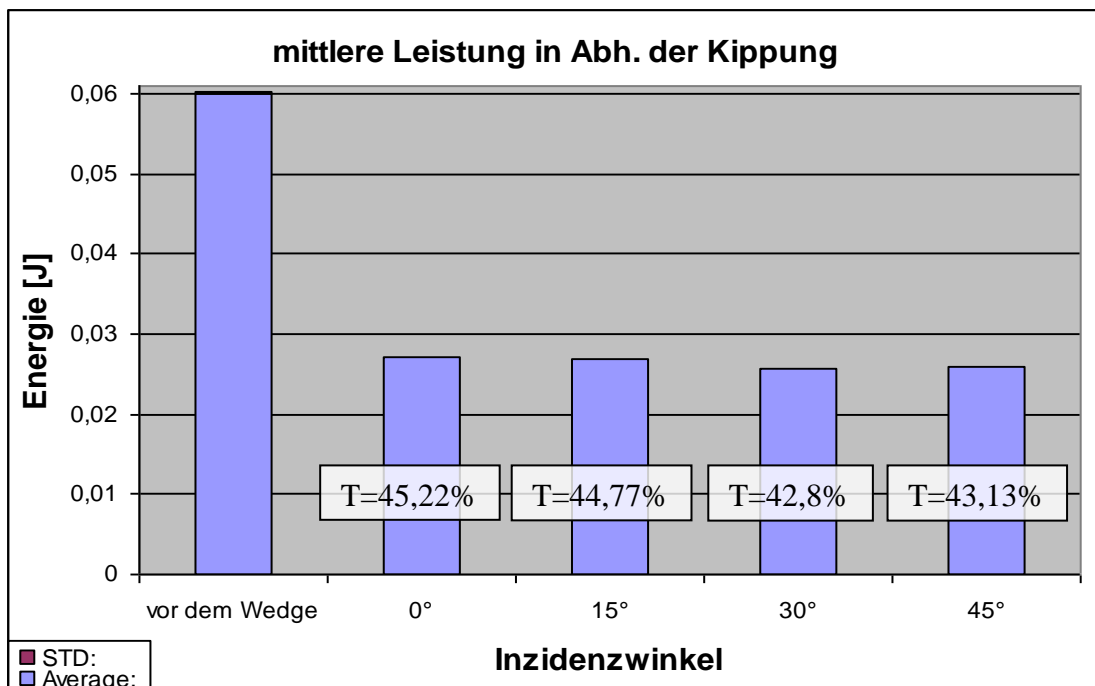


Abbildung zu 4.2.6: mittlere Leistung des Referenzlasers (s-pol.) in Abhängigkeit der Wedgeverkipfung und vor dem Wedge



# **Erklärung der Selbstständigkeit**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit zum Thema „Erstellen einer LabVIEW Applikation zur Kanalisierung von Messdaten und Verifizierung der Messgenauigkeit des optischen AIV Testaufbaus für BELA“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Jena, den 29. Juli 2011

Armin Hoffmann

## Thesen

1. Die grafische Programmierung mit LabVIEW ermöglicht ohne fundierte Programmierkenntnisse das Erstellen komplexer Applikationen zur Messwerterfassung.
2. Die Kanalisierung der Messdaten aus unterschiedlichen Quellen in einer Applikation würde die Datenauswertung vereinfachen und erleichtern.
3. Das Referenzlaser-Messprinzip ist dem Theodolit-Prinzip in einer Laborumgebung mit begrenztem Platz und durch die Notwendigkeit einer zeitlich konstanten Überprüfung der Spots überlegen.
4. Der OAP und der Wedge sollten die für die Stabilität des AIV Testaufbaus kritischen optischen Elemente sein.
5. Die durch die allgemeine optomechanische Stabilität des Messaufbaus und die Verkippung des OAP der Strahlrichtungsstabilität hinzugefügte maximale Abweichung müsste klein ausfallen.
6. Auf die Durchmesser der Strahlen auf dem CCD-Chip hätte die Verkippung des OAP keinen signifikanten Einfluss.
7. Die Anzahl von Filterelementen gleicher Art sollte lediglich einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit des Aufbaus haben.
8. Die Stabilität und Genauigkeit des AIV Testaufbaus für BELA müssten den Anforderungen entsprechen. Der Aufbau wäre damit für die Messung der Strahlrichtungsstabilität und anderer Leistungsparameter des BELA Tx verifiziert.

