

**Optimierung der  
Synchrotronlicht-Strahlmonitore in der externen  
Strahlführung zu den Experimentierbereichen  
E1/E2 an ELSA**

Kilian R. Kranz

Bachelorarbeit in Physik  
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
Bonn

Oktober 2020

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

Bonn, .....  
Datum

.....  
Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch
2. Gutachterin: Priv.-Doz. Dr. Elisabeth Soergel

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Synchrotronstrahlung . . . . .	3
2.2	Geometrische Optik . . . . .	4
2.2.1	Abbildungsgleichungen . . . . .	5
2.2.2	Schärfentiefe . . . . .	6
2.3	CMOS/CCD-Sensor . . . . .	7
2.4	Numerische Profilanalyse . . . . .	8
2.4.1	Fehlerfunktion . . . . .	8
2.4.2	GAUSSfunktion . . . . .	9
2.5	Ionenoptik . . . . .	9
2.6	Simulation von Strahleigenschaften der E1/E2 Strahlführung mit <i>MAD-X</i> . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Eigenschaften der bisherigen Synchrotronlicht-Monitore</b>	<b>15</b>
3.1	Messung der Distanz zur Fokalebene . . . . .	16
3.2	Vergrößerungsfaktor . . . . .	16
3.2.1	Ermittlung des Vergrößerungsfaktors über Gegenstandsgröße . . . . .	16
3.2.2	Ermittlung des Vergrößerungsfaktors aus früheren Aufnahmen . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Neugestaltung der Synchrotronlicht-Monitore</b>	<b>21</b>
4.1	Eigenschaften der neuen Synchrotronlicht-Monitore . . . . .	21
4.1.1	Abbildungsgrößen . . . . .	22
4.1.2	Einwirkung schief einfallender Strahlen . . . . .	25
4.1.3	Kameraanforderungen . . . . .	26
4.1.4	Vermessung einer vergleichbaren Lichtquelle . . . . .	26
4.2	Messung der optischen Eigenschaften der neuen SyLi-Monitore . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>31</b>
	<b>Literatur</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>Gegenstände in Originalgröße</b>	<b>35</b>
<b>B</b>	<b>Distanz-Bestimmung der neuen SyLi-Monitore</b>	<b>37</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>39</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>41</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>43</b>



## Einleitung

---

An der Universität Bonn wird der Elektronenbeschleuniger ELSA<sup>1</sup> betrieben. An ihm werden Elektronen mit einem Linearbeschleuniger (LINAC) vorbeschleunigt und in das Booster-Synchrotron eingeschossen, woraus der Strahl mit einer Energie von 1,2 GeV in den Speicherring (früher Stretcherring) extrahiert wird, in dem er Energien bis zu 3,2 GeV erreichen kann. Vom Speicherring aus kann der Strahl zu drei Experimentierplätzen extrahiert werden, sodass durch die in dieser Arbeit betrachtete externe Strahlführung ein konstanter Elektronenstrom im Bereich von wenigen Nanoampere fließt. Zur Beobachtung der Strahleigenschaften werden an der Strahlführung, die zu den Hadronenphysikexperimentierplätzen E1/E2 (vgl. Abbildung 1.1) führt, neben Fluoreszenzschirmen Synchrotronlichtmonitore (im Folgenden SyLi-Monitor) verwendet. Das Synchrotronlicht wird durch die Ablenkung der Elektronen im Dipolmagneten erzeugt und kann für eine zerstörungsfreie Strahldiagnose zeitgleich zum Experimentierbetrieb genutzt werden. Diese Arbeit behandelt die Optimierung von zwei SyLi-Monitoren, die in der jeweiligen Strahlführung direkt hinter den Dipolmagneten MB2 und MB3 installiert sind. Sie werden im Folgenden zur Unterscheidung MB2- und MB3-Monitor genannt.

Grund der Überarbeitung sind die im Regelbetrieb stark übersättigten Aufnahmen von den bisherigen Monitoren mit kleinem Abbildungsmaßstab, die große Fehlerquellen bei der Bestimmung von Strahleigenschaften darstellen. (vgl. Abbildung 3.4). Die Abbildungseigenschaften der bisherigen Monitore wurden untersucht um ein optimales Design zu entwickeln.

Ziel der neuen SyLi-Monitore ist es, dass mit ihnen präzisere Aufnahmen und Strahlanalysen durchgeführt werden können. Um eine geeignete Vergrößerung zu bestimmen, wurde mit dem Simulationsprogramm *MAD-X* die Strahlbreite in den Dipolmagneten abgeschätzt. Über die abgestrahlte Leistung der Synchrotronstrahlung konnte zudem die nötige Belichtungszeit und Lichtsensibilität für die Kamera der Monitore abgeschätzt werden. Um die nötigen Belichtungszeiten zu überprüfen, wurde eine LED mit vergleichbarer Leistung zur Vermessung genutzt. Die neuen SyLi-Monitore wurden zuletzt noch auf ihre Funktionalität geprüft und für die Nutzung in der externen Strahlführung von ELSA vorbereitet, da ein Elektronenstrahl während der Erstellung dieser Arbeit nicht verfügbar war.

---

<sup>1</sup> Elektronen Stretcher Anlage

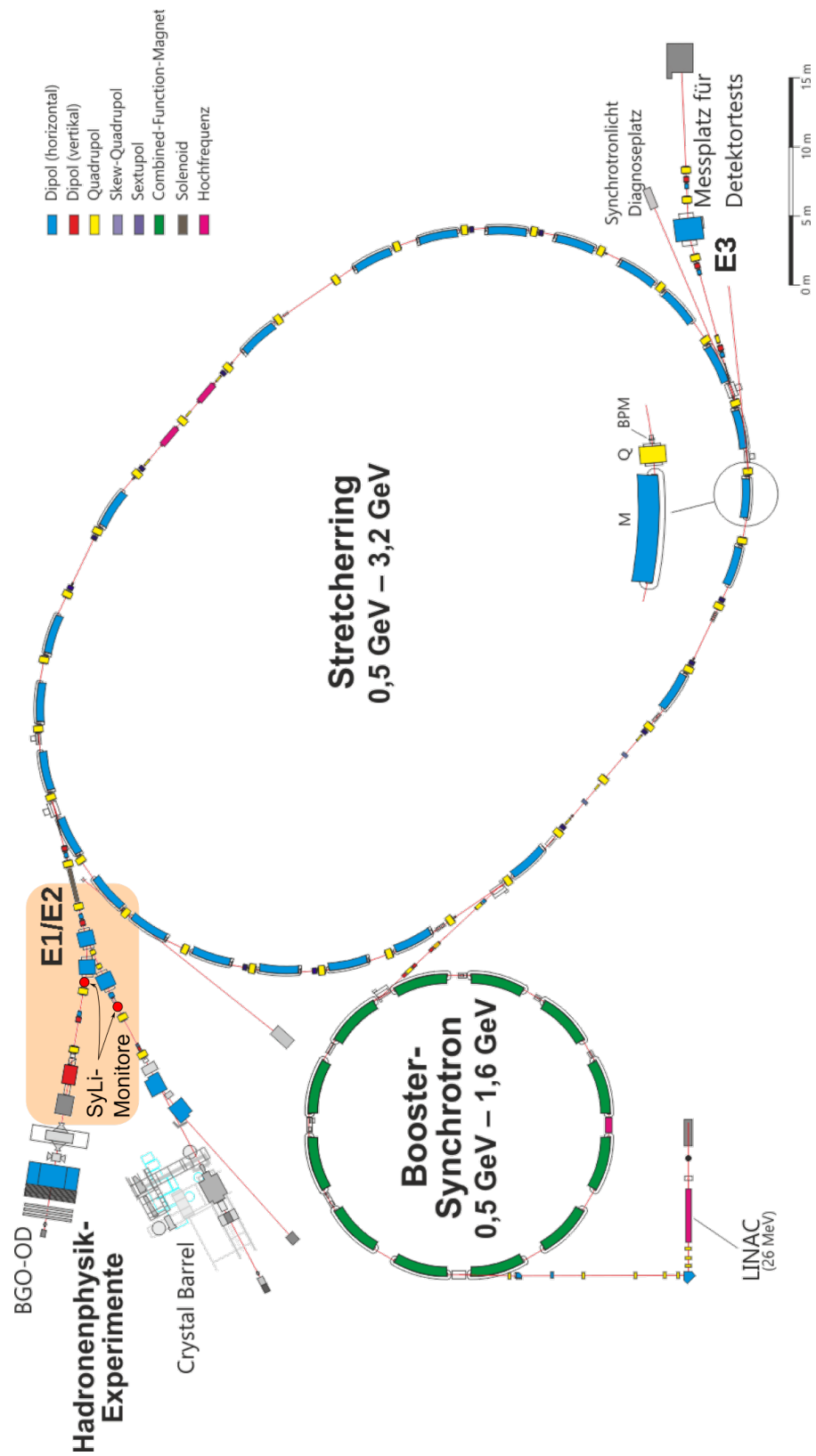


Abbildung 1.1: Die Elektronen Stretcher Anlage ELSA mit hervorgehobener Extraktionsstrahlführung mit SyLi-Monitoren.

## Physikalische Grundlagen

Die für das Verständnis und die spätere Konstruktion der neuen SyLi-Monitore wichtigen physikalischen Grundlagen sollen in diesem Kapitel präsentiert werden. Neben der Entstehung der beobachtbaren Synchrotronstrahlung und den Elektronenstrahleigenschaften wird auch die geometrische Optik vorgestellt, mit der die abbildenden SyLi-Monitore beschrieben werden können. Außerdem werden die Kamerasensor-Merkmale aufgeführt und wichtige Analysefunktionen für die Auswertung von Monitoraufnahmen angegeben. Zuletzt wird auf die Elektronenstrahleigenschaften, insbesondere die Strahlbreite, eingegangen und ein Simulationsprogramm für diese vorgestellt.

### 2.1 Synchrotronstrahlung

Beschleunigte Teilchen mit Ladung  $e$  und Impuls  $\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}$  strahlen bei Ablenkung durch einen Dipolmagneten Synchrotronstrahlung (auch Synchrotronlicht genannt) tangential zur Bewegungsrichtung ab, wie in [Abbildung 2.1](#) dargestellt. Die Synchrotronstrahlung kann als besondere Form der Bremsstrahlung bezeichnet werden [[Wie07](#)]. Die gesamte abgestrahlte Leistung  $P_S$  eines nicht

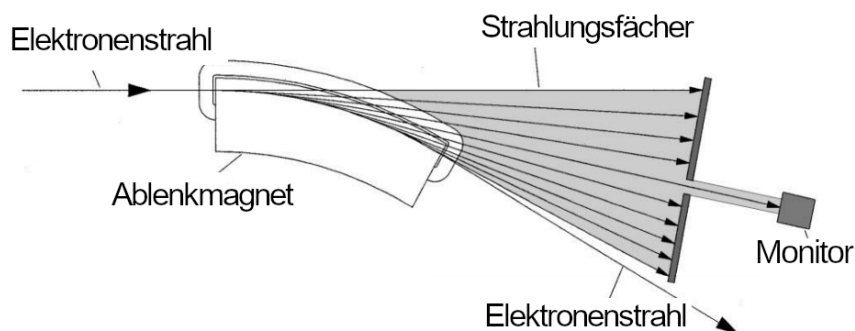


Abbildung 2.1: Horizontaler Strahlungsfächer der emittierten Synchrotronstrahlung in einem Ablenkmagneten; angepasste Abbildung aus [[Wil00](#)].

relativistischen Teilchens wird durch die LARMOR-Gleichung beschrieben [Wi100]:

$$P_S = \frac{1}{6\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3} \left( \frac{d\vec{p}}{dt} \right)^2 \quad (2.1)$$

Durch eine Umformung von Gleichung (2.1) für relativistische Elektronen in einem Kreisbeschleuniger erhält man [Jac75, Kap. 14]:

$$P_S = \frac{e\beta^3}{\epsilon_0(m_0c^2)^4} \frac{E^4}{R} I_{\text{Strahl}} \quad (2.2)$$

Hierbei beschreibt  $I_{\text{Strahl}}$  den Strahlstrom, der proportional zur Anzahl von Teilchen im Strahl ist,  $R$  den Ablenkradius des Magneten und  $E$  die Strahlenergie. Für Elektronen mit  $\beta \simeq 1$  führt eine numerische Approximation von Gleichung (2.2) zu:

$$P_S [\text{kW}] = 88,5 \cdot \frac{(E [\text{GeV}])^4}{R [\text{m}]} \cdot I_{\text{Strahl}} [\text{A}] \quad (2.3)$$

In der in dieser Arbeit betrachteten externen Strahlführung fließt ein Strom in der Größenordnung weniger Nanoampere und die Ablenkradien der Magnete betragen  $R_{\text{MB2}} = 5,63 \text{ m}$  und  $R_{\text{MB3}} = 21,2 \text{ m}$ . Es wird nur ein kleiner Kreisausschnitt  $L/(2\pi R)$  der abgestrahlten Leistung für die SyLi-Monitore betrachtet, wobei  $L = 1,08 \text{ m}$  die Länge der Magneten angibt. Die in diesem Ausschnitt abgestrahlte Leistung mit einem Strahlstrom von  $1 \text{ nA}$  für einen Elektronenstrahl mit maximaler Strahlenergie  $E = 3,2 \text{ GeV}$  im Kreisausschnitt ist:

$$P_{S,\text{MB2}} \simeq 50 \mu\text{W} \quad (2.4a)$$

$$P_{S,\text{MB3}} \simeq 3 \mu\text{W} \quad (2.4b)$$

Der Anteil, der die SyLi-Monitore erreicht, wird zudem durch den Winkelbereich begrenzt, welcher der Apertur des Monitors herrührt, wie in Abbildung 2.1 über den Strahlungsfächer dargestellt. Zudem verteilt sich die Leistung auf ein breites Frequenzspektrum. Die SyLi-Monitore schöpfen lediglich den Wellenlängenbereich von  $400 \text{ nm}$  bis  $700 \text{ nm}$  aus, da die optischen Bauteile für dieses Spektrum konstruiert sind. Mit dem Simulationsprogramm *XOP*<sup>1</sup> wurde die Leistung für die betrachtete Bandbreite und des Winkelbereichs der Monitore von ca.  $28 \text{ mrad}$  berechnet und ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Sie beträgt für MB2 im Mittel ca.  $4,2 \cdot 10^{-5} \mu\text{W}$  und für MB3 ca.  $6,5 \cdot 10^{-5} \mu\text{W}$ .

## 2.2 Geometrische Optik

Die Funktionsweise der SyLi-Monitore kann mit geometrischer Optik in paraxialer Näherung beschrieben werden. Die Monitore beinhalten eine einzelnen Linse, welche die Optik bestimmt, und eine Kamera ohne zusätzliches Objektiv.

---

<sup>1</sup> XOP 2.4 ist ein auf Röntgenstrahlung spezialisiertes Programm bereitgestellt von ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), welches die Eigenschaften von Synchrotronlicht errechnet.

<http://www.esrf.eu/Instrumentation/software/data-analysis/xop2.4>



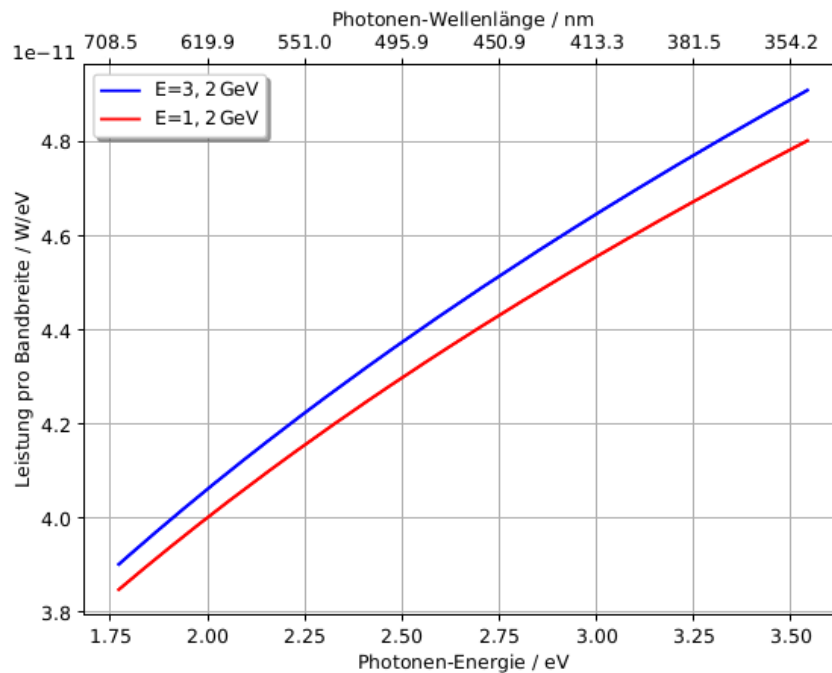


Abbildung 2.2: Spektrale Verteilung der abgestrahlten Leistung im visuellen Bereich am Beispiel vom MB2-Monitor für zwei verschiedene Strahlenergien.

### 2.2.1 Abbildungsgleichungen

Für eine abbildende Linse gibt die Abbildungsgleichung die Beziehung zwischen Brennweite  $f$  der Linse, Gegenstandsweite  $g$  und Bildweite  $b$  (vgl. Abbildung 2.3) an [Dem08, Kap. 11]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \Leftrightarrow f = \frac{g \cdot b}{g + b} . \quad (2.5)$$

Die Vergrößerung  $V$  (auch Abbildungsmaßstab) ergibt sich aus dem Verhältnis von Bildgröße  $B$  und Gegenstandsgröße  $G$  oder über Bild- und Gegenstandsweite:

$$V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} . \quad (2.6)$$

Mit bekannter Brennweite und Vergrößerung können die Gleichungen (2.5) bis (2.6) kombiniert werden um  $g$ , sowie  $b$  zu bestimmen:

$$g = f \left( \frac{1}{V} + 1 \right) , \quad (2.7a)$$

$$b = f (V + 1) . \quad (2.7b)$$

Die Ebene hinter einer Linse oder einem Objektiv, in der ein Gegenstand scharf abgebildet wird, nennt sich Fokalebene.

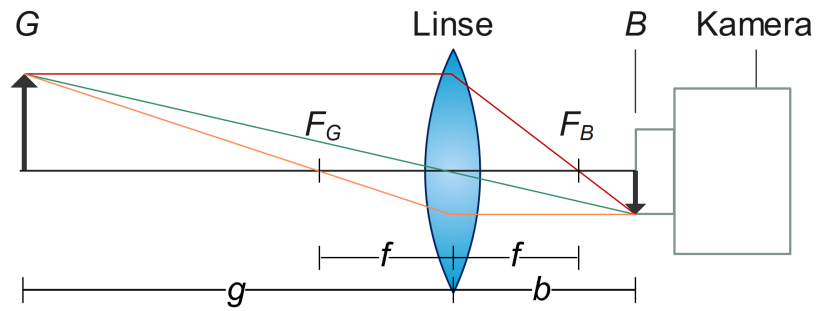


Abbildung 2.3: Schematischer Messaufbau mit Strahlengang. Der Gegenstand  $G$  ist entlang der optischen Achse positionierbar und in der richtigen Distanz  $D = g + b$  wird  $B$  scharf auf dem Kamerasensor abgebildet.

### 2.2.2 Schärfentiefe

Als Schärfentiefe bezeichnet man den Bereich  $\Delta g$ , innerhalb dessen der Gegenstand hinreichend scharf abgebildet wird. Der Schärfentiefebereich hängt dabei von dem Durchmesser der verwendeten Blende  $D_B$ , dem Durchmesser des aufzulösenden Zerstreungskreises  $u$  und der Brennweite sowie der Bildweite ab, wie in Abbildung 2.4 dargestellt. Einen Zerstreungskreis kann man hierbei annähern als Verhältnis der Diagonalen des Kamerasensors  $d_S$  und der entlang der Diagonalen unterscheidbaren Bildpixel  $N$ :

$$u = \frac{d_S}{N} . \quad (2.8)$$

Damit erhält man für den Schärfentiefebereich [Dem08, Kap. 11]:

$$\Delta g = \frac{bf^2u}{(b-f)(D_B b - D_b f \pm uf)} . \quad (2.9)$$

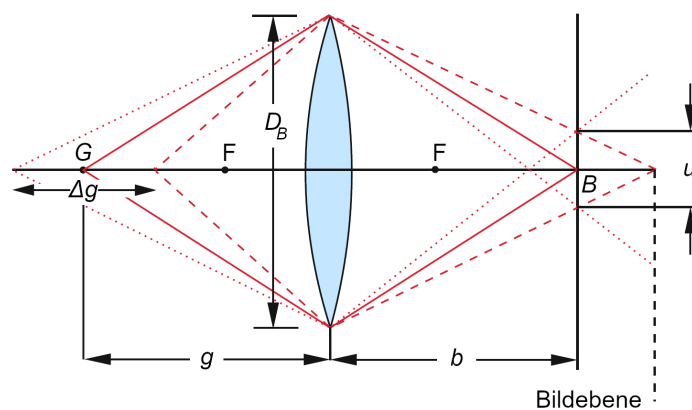


Abbildung 2.4: Skizze zur Schärfentiefe der Abbildung durch eine Linse. Ohne zusätzliche Blende ist der Blendendurchmesser gleich dem Linsendurchmessers. Angepasste Abbildung aus [Dem08].

Man kann den Schärfentiefebereich vergrößern, indem man die Blendengröße verkleinert, doch verringert sich dadurch die auf die Bildebene treffende Photonenzahl. Als Beispiel<sup>2</sup> ist der Schärfentiefebereich für eine Blendengröße von  $D_b = 50,8$  mm, einer Bildebene  $u = 4,88$   $\mu\text{m}$ , einer Brennweite von  $f = 100$  mm und einer Bildweite von  $b = 10,8$  mm ergibt sich  $\Delta g = 3,24$  cm.

## 2.3 CMOS/CCD-Sensor

Während die bisher verwendeten SyLi-Monitorkameras CCD<sup>3</sup>-Sensoren verbaut haben, werden bei den neuen Monitoren CMOS<sup>4</sup>-Kamerasensoren verwendet. Das Prinzip der beiden Sensortypen ist ähnlich: beide wandeln durch den photoelektrischen Effekt Photonen in elektrische Ladungen um. Während im CCD-Sensor die Pixel sequenziell in einem Schiebe-Register ausliest, können beim CMOS-Sensor Pixel reihen- oder zeilenweise ausgelesen werden, da die Umwandlung von Ladung in Spannung bereits in jedem Pixel geschieht. Beide Sensoren basieren auf dem Halbleitermaterial Silizium und sind im Spektralbereich 300-1000 nm empfindlich [Tho; Bau]. Die Auslesemethode von CMOS-Sensoren hat den Vorteil, dass kleinere Teilbereiche für sich ausgelesen werden können, was die erreichbare Bildausleserate drastisch erhöht.

Es ist zu beachten, dass nicht alle Photonen auch in elektrische Signale umgewandelt werden. Die Kenngrößen der Sensoren sind:

1. Die Quanteneffizienz gibt den prozentualen Anteil von im Pixel konvertierten Elektronen durch ein Photon an. Sie ist ein Maß der Lichtempfindlichkeit eines Sensors und ist wellenlängenabhängig, wie in Abbildung 2.5 dargestellt. Für die in dieser Arbeit verwendeten Kamera<sup>5</sup> ist sie im Mittel 48 %.
2. Das maximale Verhältnis zwischen gemessenen Photonen und Signalrauschen bezeichnet man als Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Es wird typischerweise in dB angegeben und für die verwendete Kamera beträgt es 40 dB.
3. Die absolute Empfindlichkeitsschwelle gibt die minimale Photonenzahl an, die nötig ist, damit die Kamera Nutzinformationen von Rauschen unterscheiden kann. Neben der Quanteneffizienz beinhaltet sie das Bildrauschen. Denn auch wenn der Sensor nicht beleuchtet wird, entstehen proportional zur Auslesezeit und Temperatur in jedem Pixel Ladungen, was Dunkelrauschen genannt wird. Die absolute Empfindlichkeitsschwelle wird aus dem Wert bestimmt, bei dem das SNR gleich 1 ist. Für die verwendete Kamera ist dies mit 21,22 Photonen angegeben.
4. Die Dynamik ist als das Verhältnis zwischen maximal messbarer Pixel-Füllmenge mit Ladungsträgern und der absoluten Empfindlichkeitsschwelle definiert. Je größer der Wert für die Dynamik, desto detaillierter sind Aufnahmen mit großen Intensitätsschwankungen. Der Dynamikbereich der verwendeten Kamera ist 54,61 dB.

Jeder Pixel besitzt ein individuelles Dunkelrauschen und über den Durchschnitt mehrerer Aufnahmen kann die Streuung des Rauschens vermindert werden.

<sup>2</sup> Die Werte entsprechen der späteren Messung aus Abschnitt 4.1.1

<sup>3</sup> CCD: Charge-Coupled Device

<sup>4</sup> CMOS: Complementary Metal-Oxide Semiconductor

<sup>5</sup> Modell BFS-PGE-13Y3M, eine Monochrom-Kamera der Firma FLIR Systems, Oregon, USA. <https://www.flir.de/>

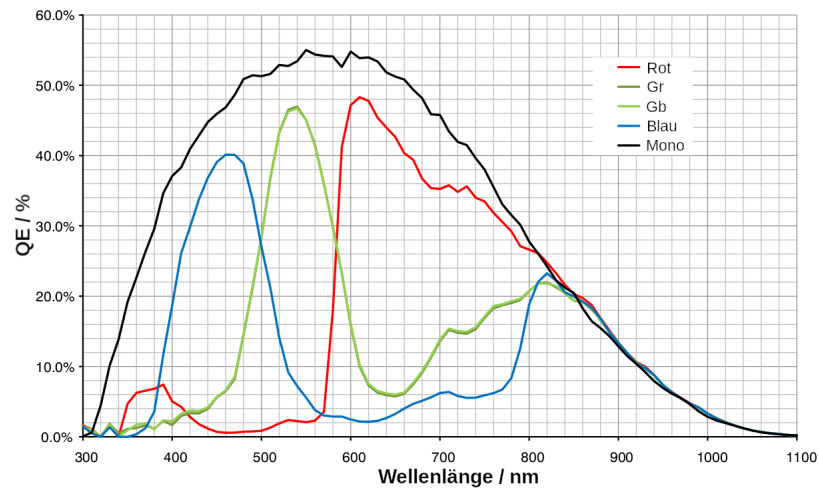


Abbildung 2.5: Quanteneffizienz QE gegen Wellenlänge der Photonen für den Sensor der verwendeten monochromatischen Blackfly-S. Zusätzlich im Bild ist die Quanteneffizienz des Kameramodells mit Farbsensor dargestellt [Ons].

## 2.4 Numerische Profilanalyse

Die mit der Kamera des SyLi-Monitors aufgenommenen Bilder können als Bildmatrix ausgegeben und numerisch ausgewertet werden. Die primär in der Arbeit verwendeten Funktionen zur Analyse der Aufnahmen werden im folgenden dargestellt.

### 2.4.1 Fehlerfunktion

Bei einer Aufnahme eines Zwei-Stufen Übergangs, wie z. B. schwarz zu weiß, kann die Fehlerfunktion als Maß für die Schärfe genutzt werden:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau . \quad (2.10a)$$

Sie ist eine sogenannte Sigmoidfunktion, das heißt sie ist S-förmig und verläuft unskaliert von  $-1$  zu  $1$ . Für die spätere Anpassung wurde die Funktion wie folgt umformuliert:

$$f(x) = A \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x - c}{b}\right) + O . \quad (2.10b)$$

Dabei ist  $A$  ein Skalierungsfaktor,  $c$  die Verschiebung auf der  $x$ -Achse,  $b$  die Steigung der Funktion und  $O$  der Abstand zur Abszisse. Der Steigungsparameter ist ein Maß der schärfe, denn desto schneller die Funktion anwächst, desto deutlicher ist der Übergang zwischen den zwei Intensitätsstufen, wie in Abbildung 2.6 dargestellt.

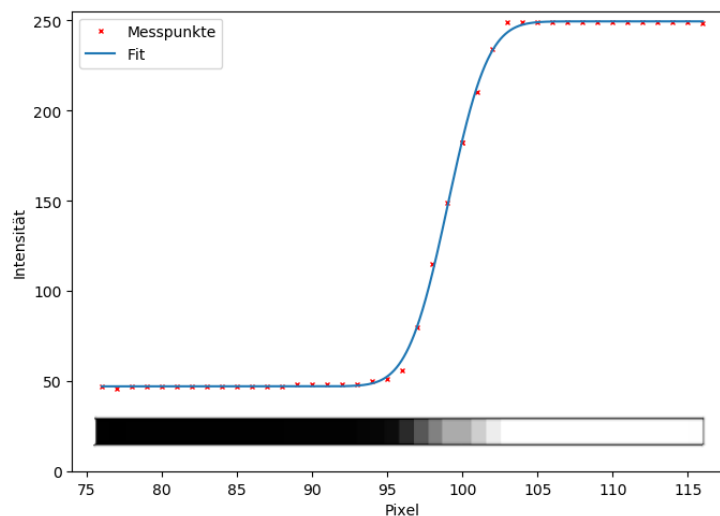


Abbildung 2.6: Beispiel einer Fehlerfunktion für eine Aufnahme vom MB3-Monitor anhand einer Anpassung an Messdaten außerhalb der Fokalebene (Ausschnitt aus Abbildung 3.3). Unterhalb der Anpassungsfunktion ist der Übergang der Intensität dargestellt.

### 2.4.2 GAUSSfunktion

Das Strahlprofil kann sowohl für einen Kreisbeschleuniger mit relativistischen Elektronen [Hin08], als auch für die betrachtete lineare, externe Strahlführung durch eine GAUSSverteilung approximiert werden. Die zum Anpassen eines eindimensionalen Profils genutzte Form der Funktion lautet:

$$g(x) = A \cdot \exp \left[ -\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] + O . \quad (2.11)$$

Hierbei sind  $A$  und  $O$  definiert wie in Gleichung (2.10b). Die Standardabweichung  $\sigma$  beschreibt die Breite der GAUSSkurve und der Erwartungswert  $\mu$  ist ein Maß für die Lage des Schwerpunkts der Funktion. Der Hauptteil der Intensitätsverteilung einer GAUSSverteilung liegt in der  $\pm 3\sigma$ -Umgebung, wie in Abbildung 2.7 dargestellt.

## 2.5 Ionenoptik

Die aus der GAUSSanpassung einer Strahlabbildung ermittelte Standardabweichung  $\sigma$  gibt die Elektronen-Strahlbreite wieder, die mittels Ionenoptik berechnet werden kann. Ein Elektronenstrahl besteht aus einem Ensemble von Elektronen, deren jeweilige Trajektorie in einer Einhüllenden des Gesamtensembles liegt, dessen Ausweitung in der transversalen Ebene proportional zur Wurzel der sogenannten Beta-Funktion  $\beta(s)$  ist. Die von der longitudinalen Position abhängige Strahlbreite  $\sigma(s)$  des Elektronenstrahls kann beschrieben werden durch [Wi100, Kap. 3.8]:

$$\sigma(s) = \sqrt{\epsilon \cdot \beta(s)} . \quad (2.12)$$

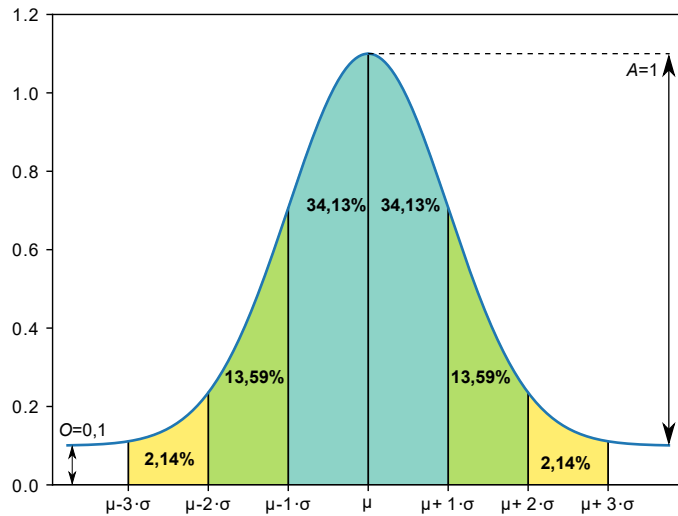
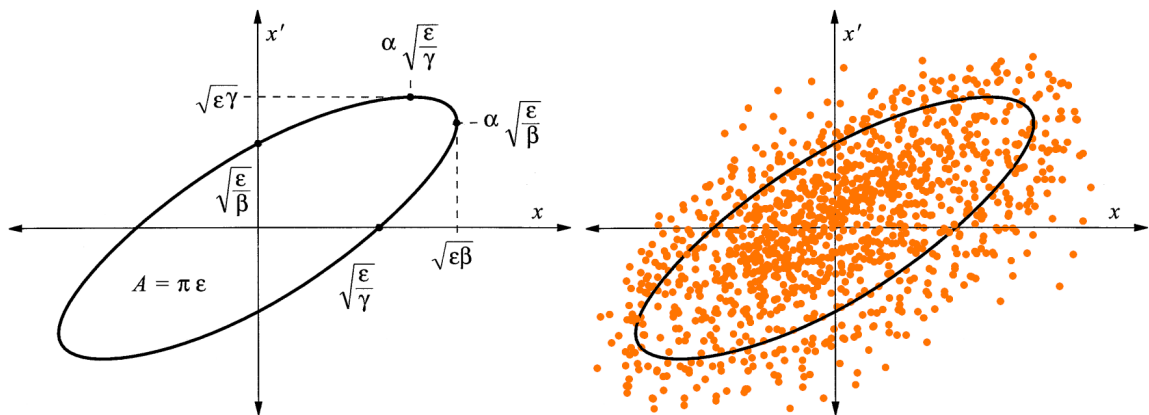


Abbildung 2.7: Beispiel für die GAUSSfunktion mit Amplitude  $A = 1$ , Erwartungswert  $\mu$ , Standardabweichung  $\sigma$  und Nullverschiebung  $O = 0,1$ .



(a) Phasenraumellipse eines Teilchens beschrieben durch die Twissparameter, [Wil100]. (b) Teilchenensemble im Phasenraum mit Mehrteilchen-Phasenraumellipse, angepasste Abbildung aus [Wil100].

Abbildung 2.8: Die Phasenraumellipse für ein Einzelteilchen mit Beschreibung durch Twissparameter und für ein Mehrteilchenensemble.

Dabei ist die Emittanz  $\epsilon$  ein Strahlenergieabhängiger Skalierfaktor für die Einhüllende. Betrachtet man ein einzelnes Teilchen ortsfest im transversalen Phasenraum, z.B.  $(x, x')$  mit  $x' = \frac{dx}{ds}$  als horizontale Winkelablage, für mehrere Umläufe im Beschleuniger, spannt es eine Phasenraumellipse auf, dargestellt in Abbildung 2.8(a). Betrachtet man das gesamte Teilchenensemble, ist die Mehrteilchen-Phasenraumellipse definiert als Trajektorie, bei der die Elektronendichte auf  $e^{-1/2}$  abgefallen ist, dargestellt in Abbildung 2.8(b). Die Fläche  $A$  dieser Ellipse ist proportional zur Emittanz ( $A = \pi \epsilon$ ) und die Ladungsverteilung ist GAUSSförmig. Die Form der Phasenraumellipse, die sich im Verlaufe

der Magneto-optik bei gleichbleibender Fläche und Lage verändern kann, wird über die Twissparameter  $\beta(s)$ ,  $\alpha(s)$  und  $\gamma(s)$  definiert und sie kann beschrieben werden über [Wi100, Kap. 3.10]:

$$\gamma(s)x^2(s) + 2\alpha(s)x(s)x'(s) + \beta(s)x'^2(s) = \epsilon \quad (2.13)$$

Über die Berechnung der Twissparameter entlang der Teilchenbahn des Beschleunigers kann die Strahlbreite mittels Gleichung (2.12) an jeder Position  $s$  ermittelt werden.

## 2.6 Simulation von Strahleigenschaften der E1/E2 Strahlführung mit *MAD-X*

In der externen Strahlführung, die zu den Experimentierplätzen E1/E2 führt, liegen die in dieser Arbeit betrachteten SyLi-Monitore (vgl. Abbildung 2.9). Sie sind hinter den Dipolmagneten MB2 und MB3 installiert und mit ihnen kann das Strahlprofil innerhalb des Magneten abgebildet werden. Die Berechnung der Twissparameter in den Magneten ist nötig, um die Größenordnung der Strahlbreite nach Gleichung (2.12) zu bestimmen. Die Twissparameter entlang der Teilchenbahn eines Beschleunigers können simuliert werden, z.B. mit dem hier verwendete Programm *MAD-X*<sup>6</sup>. Für die in dieser Arbeit behandelte Strahlführung stehen *MAD-X* Dateien<sup>7</sup> bereit, mit der die Strahlparameter, insbesondere die Strahlbreite in den relevanten Magneten MB2 und MB3, berechnet werden. Der Verlauf der Betafunktionen und der Strahlbreiten sind als Beispiel für MB3 in Abbildung 2.10 abgebildet. Die erwarteten Strahlbreiten in der Mitte der Magneten, die von den SyLi-Monitoren abgebildet werden, sind in Tabelle 2.1 hinterlegt.

Strahlparameter	MB2		MB3	
	$x$	$y$	$x$	$y$
Entfernung vom Extraktionspunkt $s$ / m	18,41		18,65	
Strahlbreite $\sigma_i$ / mm	3,29	0,632	4,136	0,766
Beta-Funktion $\beta_i(s)$ / m	24,59	8,85	43,31	13,00
Emittanz $\epsilon_i$ / $10^{-9}$ m	376	45,1	376	45,1

Tabelle 2.1: Mit *MAD-X* berechnete Strahlbreiten für die Mitte der Dipolmagneten bei typischer Extraktionsoptik.

Diese Werte gelten für einen Elektronenstrahl mit Maximalenergie von 3,2 GeV. Für geringere Energien verringert sich die Strahlbreite, da die Emittanz abnimmt.

Bei einer Abweichung der betrachteten Fokalebene vom Magnetmittelpunkt verändert sich die Strahlbreite, da sich die optischen Funktionen verändern. In einem Bereich von  $\pm 30$  cm um diesen Mittelpunkt weist die Strahlbreite allerdings nur eine relative Abweichung von  $\pm 5\%$  auf, sodass die Strahlbreiten aus Tabelle 2.1 für den betrachteten Bereich, der sich aus Einstellunsicherheiten ergibt, als hinreichend konstant aufgefasst werden können.

<sup>6</sup> Methodical Accelerator Design, online verfügbar unter <https://mad.web.cern.ch/mad/>

<sup>7</sup> Im Rahmen von [Zan13] möglichst realitätsnah angepasst

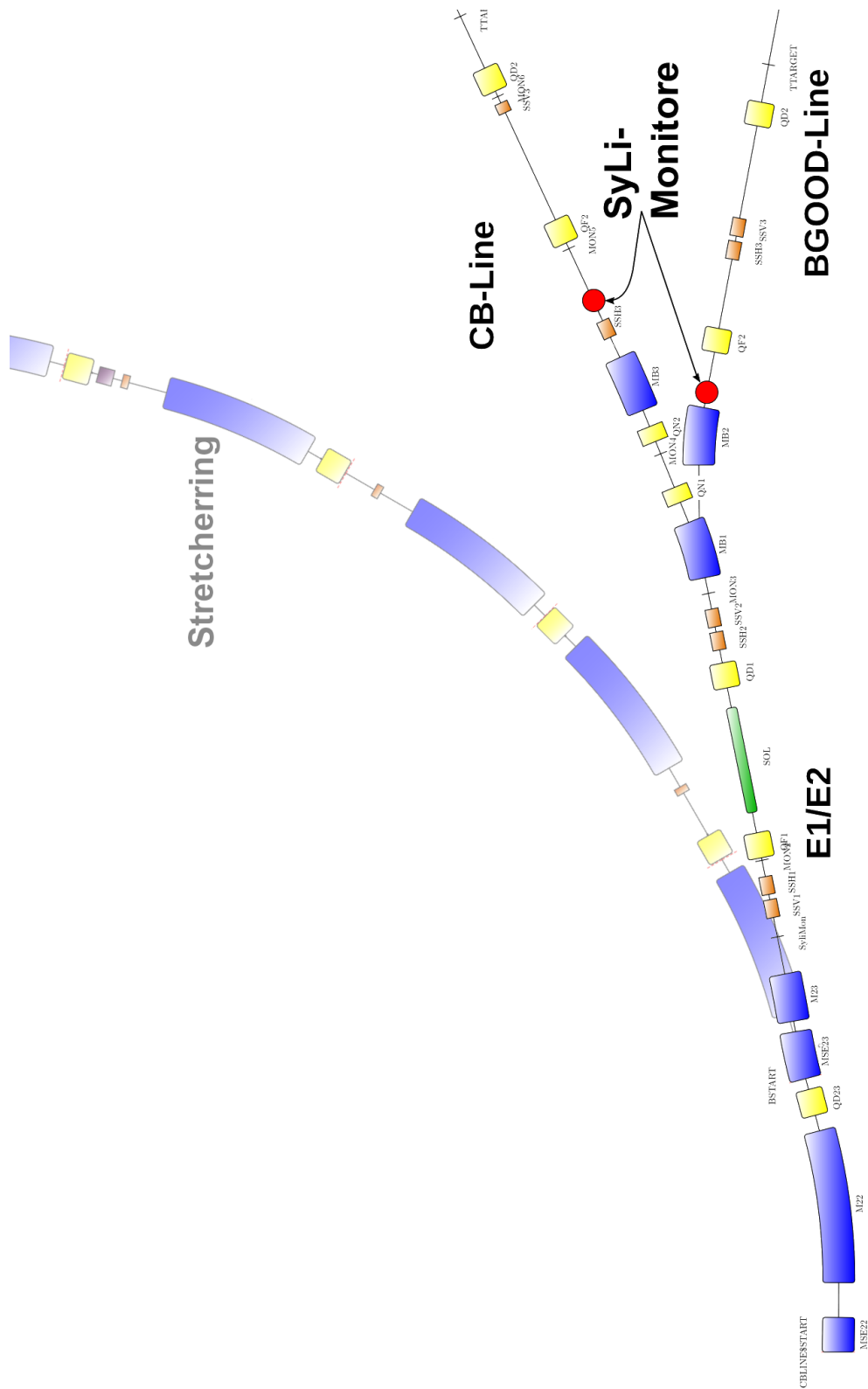


Abbildung 2.9: Die externe Strahlführung mit rot markierten SyLi-Monitoren.



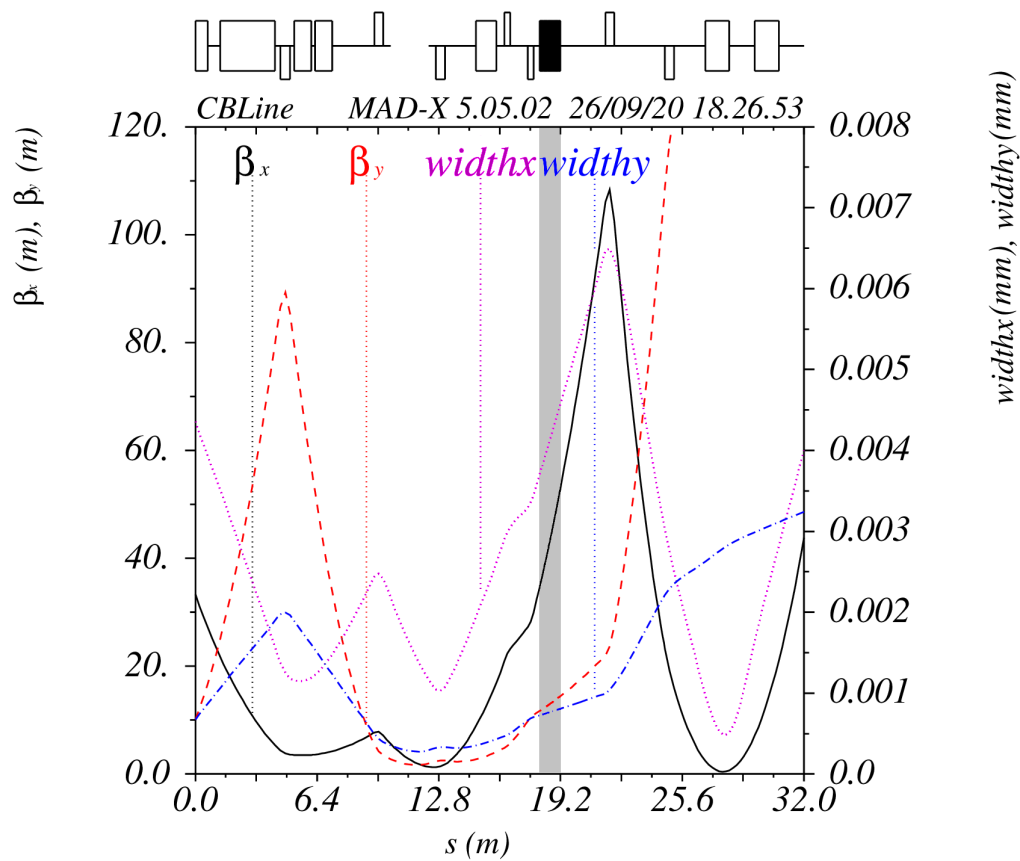


Abbildung 2.10: Mit MAD-X simulierter Verlauf der Betafunktionen und Strahlbreiten (hier  $width_i$ ) an der CB-Strahlführung. Über dem Graphen sind symbolische Darstellungen der Strahloptiken aufgezeichnet. Schwarz markiert ist hier der Dipolmagnet MB3 (von  $s = 18,10$  m bis  $s = 19,18$  m).



## Eigenschaften der bisherigen Synchrotronlicht-Monitore

Dieses Kapitel behandelt die bisher verwendeten SyLi-Monitore. Der Quellpunkt soll für die überarbeiteten SyLi-Monitore gleich bleiben. Deswegen wird anhand von Messungen die Distanz  $D = g + b$  zwischen Kamera und Quellpunkt im Magneten und damit die verminderte Distanz  $D'$  vom Quellpunkt bis zum Ablenk-Spiegel bestimmt (vgl. Abbildung 3.1). Außerdem kann die eingestellte Vergrößerung der bisherigen Monitore bestimmt werden.

Die beiden bis dato verwendeten Monitore besitzen den selben grundlegenden Aufbau: Die Synchrotronstrahlung durchläuft eine Vakuumkammer, die tangential vom Magneten auf einen um  $45^\circ$  geneigten, 1,5 Zoll großen Spiegel führt. Auf diesen folgt die abbildende Kamera, ausgestattet mit einem kommerziellen Kamera-Objektiv. Das bisher genutzte Kameramodell ist die CCD-Kamera Watec-502B [WAT] und sie wird über einen Framegrabber<sup>1</sup> ausgelesen. Um die Lage des Quellpunkts zu überprüfen werden im Folgenden die ursprünglichen SyLi-Monitore untersucht und deren Eigenschaften ermittelt.

<sup>1</sup> Ein Framegrabber ist eine elektrische Schaltung, die das analoge Kamerasignal digitalisiert. Genutzt wird hier das Modell Morphi MOR/2VD/E/84 vom Hersteller Matrox Electronic Systems Ltd., Dorval, Kanada.

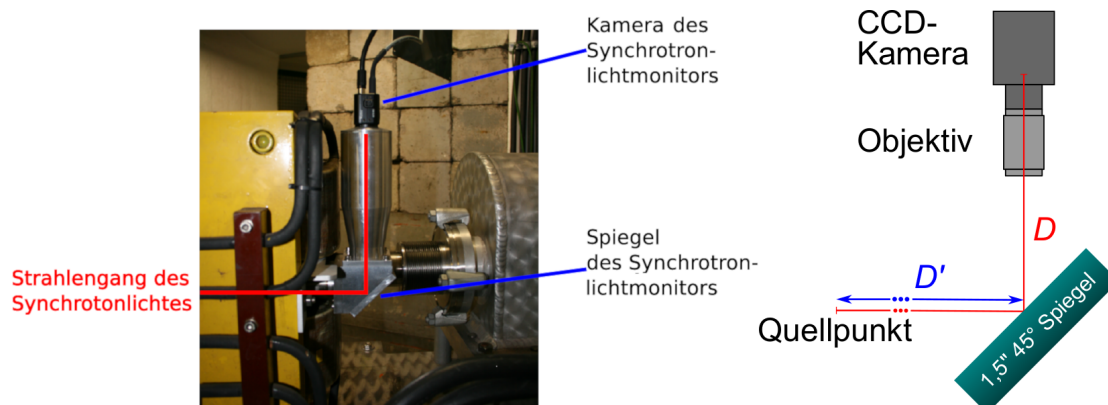


Abbildung 3.1: Aufbau des SyLi-Monitors hinter dem Dipolmagneten MB3 mit Skizze; Fotografie entnommen aus [Zan13].

### 3.1 Messung der Distanz zur Fokalebene

Zur Untersuchung der eingestellten Distanz von den bisher genutzten SyLi-Monitoren zur Bildebene wurden die Kameras samt Objektiv ausgebaut und anhand eines bekannten Gegenstands vermessen. Der Gegenstand wurde bei variierenden longitudinalen Abständen zur Kamera abfotografiert und die Entfernung mit einem Laser-Entfernungsmesser auf einen Millimeter präzise gemessen. Mit einem in Python<sup>2</sup> geschriebenen Algorithmus wurde dann das Maß der Schärfe ermittelt:

Der Algorithmus findet die Intensitätsübergänge des Gegenstands und passt an ihnen eine Fehlerfunktion nach Abschnitt 2.4.1 an. Der Mittelwert des Steigungsparameters von jedem Bild wird gegen den Abstand aufgetragen, wie z. B. in Abbildung 3.2 gezeigt, sodass aus dem Minimum die eingestellte Distanz  $D$  des SyLi-Monitors ermittelt werden kann. Der Abstand zwischen Spiegel und Kamera beträgt für beide bisher verwendete Monitore 18 cm, sodass die verminderte Distanz  $D' = D - 18$  cm über dieses Verfahren ermittelt wurde zu:

$$D'_{MB2} = (98,7 \pm 1) \text{ cm} \quad , \quad (3.1a)$$

$$D'_{MB3} = (136,2 \pm 1) \text{ cm} \quad . \quad (3.1b)$$

Die Fehler sind anhand der Datenlage auf 1 cm abgeschätzt, da die Messdaten eine relativ große Schwankung aufweisen. Eine mögliche Ursache der Schwankung ist, dass die Watec-Kamera einen nicht komplett deaktivierbaren, automatischen Shutter besitzt, der die Belichtungszeit regelt. So können die Übergänge in verschiedenen Messungen unterschiedlich belichtet und gesättigt sein und zu einer Veränderung des Steigungsparameters führen.

Messungen in der externen Strahlführung an MB3 ergaben, dass der Abstand von Magnetmittelpunkt zum Spiegel  $(130,8 \pm 0,7)$  cm beträgt. Der Abstand zwischen Kamera und Spiegel beträgt 18 cm, sodass die verminderte Distanz  $D'_{MB3} = D_{MB3} - 18 \text{ cm} = 136,2 \text{ cm}$  beträgt. Der Unterschied zu dem ungefähr gemessenen Magnetmittelpunkt ist also mit den Überlegungen aus Abschnitt 2.6 vernachlässigbar klein. Der Abstand zum Magnetmittelpunkt von MB2 beträgt  $(73,5 \pm 0,1)$  cm und weicht stärker vom ermittelten Abstand zum Quellpunkt von 98,7 cm ab. Da die simulierten Strahlbreiten sich in diesem Bereich der Abweichung kaum verändern und zumal nur ein Richtwert sind können diese weiter verwendet werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass der Quellpunkt des bisher genutzten MB2-Monitors nicht im Magnetmittelpunkt liegt.

### 3.2 Vergrößerungsfaktor

Über Gleichung (2.6) kann mittels der Bild- und Gegenstandsgröße  $B$  und  $G$  die Vergrößerung berechnet werden. Dies wurde auf zweierlei Arten durchgeführt, über die Aufnahmen des Gegenstands in der Fokalebene und über frühere Aufnahmen des Elektronenstrahls der SyLi-Monitore. Das Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel von jeweils einem SyLi-Monitor aufgeführt.

#### 3.2.1 Ermittlung des Vergrößerungsfaktors über Gegenstandsgröße

Mit einem aufgenommenen, scharfen Abbild in der Fokalebene (z. B. Abbildung 3.3) kann man über die Pixelgröße des Kamerasensors auf die Bildgröße schließen. Dem Datenblatt der Watec-502B [WAT]

---

<sup>2</sup> Python ist eine Open-Source Programmiersprache, <https://www.python.org>.

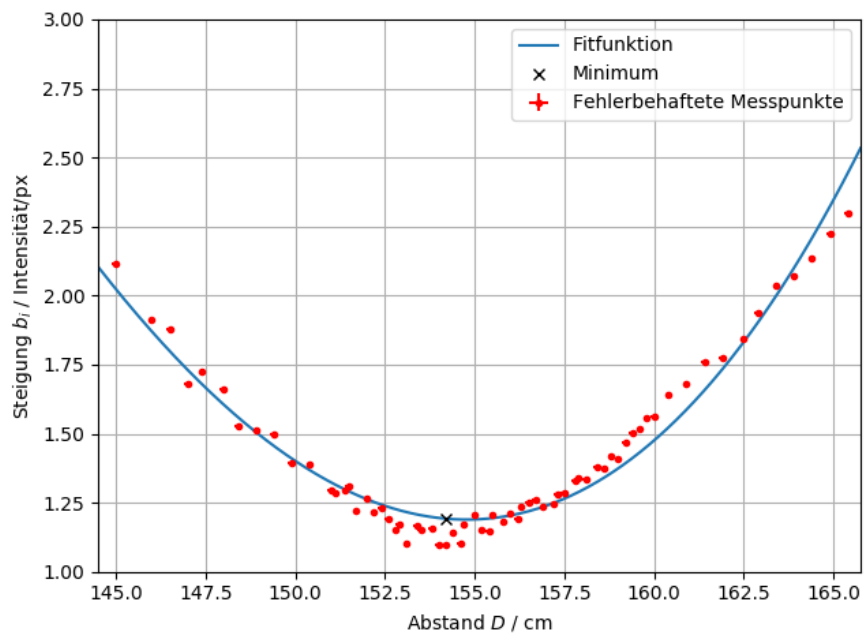


Abbildung 3.2: Ausschnitt der Gegenüberstellung von Distanz und Steigungsparameter der angepassten Fehlerfunktion am Beispiel vom MB3-Monitor.

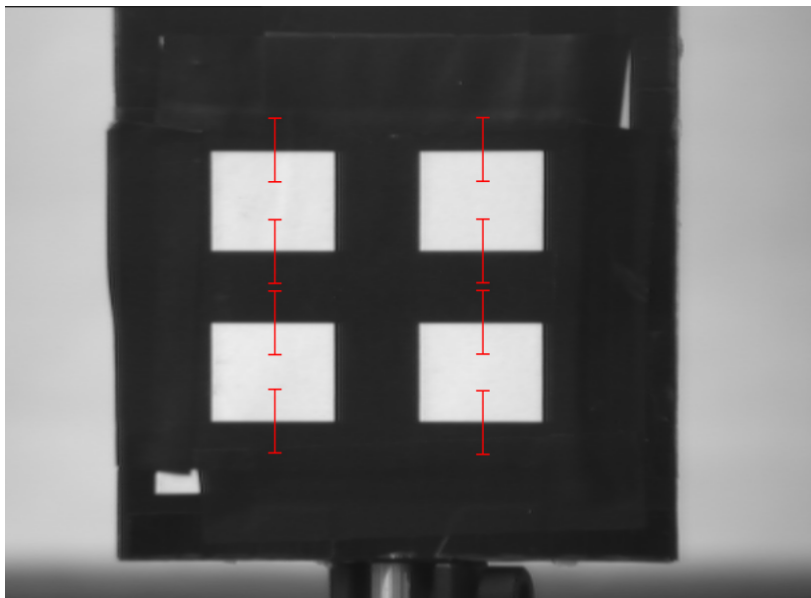


Abbildung 3.3: Aufnahme vom scharfgestellten Gegenstand in der Fokalebene. Aufgenommen mit dem MB3-Monitor. Rot eingezeichnet wurden die Linien, die für die Anpassung der Fehlerfunktion zum Scharfstellen betrachtet wurden.

kann entnommen werden, dass die Pixel der Kamera in der Horizontalen (H)  $\Delta p_H = 9,6 \mu\text{m}$  und in der Vertikalen (V)  $\Delta p_V = 7,5 \mu\text{m}$  groß sind. Obwohl die Kamera nur über eine effektive Pixelzahl von 510 (H) mal 492 (V) verfügt, gibt der Framegrabber ein 768 x 576 Pixel großes Bild aus. Das heißt, dass sowohl die Vertikale, als auch die Horizontale einen eigenen Skalierfaktor besitzen, mit welchen ein Abbild weiter skaliert dargestellt werden. Der Skalierfaktor  $\mathcal{S}$  wird bestimmt über das Verhältnis von ausgegebenen Pixeln zu effektiven Pixeln:

$$\mathcal{S}_H = \frac{768}{510} = 1,51 \quad , \quad (3.2a)$$

$$\mathcal{S}_V = \frac{582}{492} = 1,18 \quad . \quad (3.2b)$$

Die Maße des mit dem Framegrabber gemessenen weißen Rechtecks aus Abbildung 3.3 können der Anpassung mit Fehlerfunktion (vgl. Abschnitt 2.4.1) entnommen werden - genauer über die Differenz zweier Lageparameter  $c$  für zwei Überänge - z. B. in Abbildung 3.3 ist  $B'_H = 97 \pm 3$  Pixel breit und  $B'_V = 77 \pm 3$  Pixel hoch. Die Bestimmung der realen Bildgröße auf dem Sensor erfolgt über:

$$B_i = \frac{B'_i \cdot \Delta p_i}{\mathcal{S}_i} \quad , \quad i \in \{H, V\} \quad . \quad (3.3)$$

Damit ergibt sich dann:

$$B_H = (0,621 \pm 0,019) \text{ mm} \quad , \quad (3.4a)$$

$$B_V = (0,489 \pm 0,019) \text{ mm} \quad . \quad (3.4b)$$

Die Vergrößerung kann nach Gleichung (2.6) berechnet werden, wobei die Originalgröße der Rechtecke  $G_H = 18,75 \text{ mm}$  und  $G_V = 15 \text{ mm}$  ist:

$$V_H = \frac{B_H}{G_H} = (3,31 \pm 0,07) \cdot 10^{-2} \quad , \quad (3.5a)$$

$$V_V = \frac{B_V}{G_V} = (3,26 \pm 0,09) \cdot 10^{-2} \quad . \quad (3.5b)$$

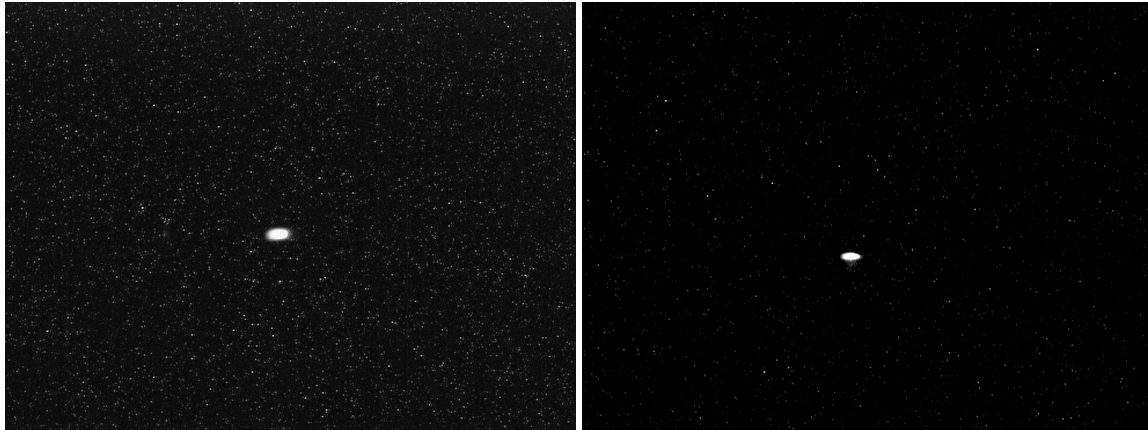
Analog kann die Vergrößerung auch für den MB2-Monitor berechnet werden und die Mittelwerte der Vergrößerung der Horizontalen und Vertikalen sind:

$$V_{MB2} = (2,67 \pm 0,14) \cdot 10^{-2} \quad , \quad (3.6a)$$

$$V_{MB3} = (3,29 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \quad . \quad (3.6b)$$

### 3.2.2 Ermittlung des Vergrößerungsfaktors aus früheren Aufnahmen

Zusätzlich wurden auch ausgewählte frühere Aufnahmen der SyLi-Monitore, wie in Abbildung 3.4 gezeigt, ausgewertet. Wird an das Strahlprofil eine GAUSSfunktion (siehe Abbildung 3.5) angepasst, so kann die gemessene Breite des Strahls, die Standardabweichung  $\sigma$ , mit der erwarteten Strahlbreite verglichen und daraus die Vergrößerung bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.5). Diese Methode weist



(a) Aufnahme des MB2-Monitors.

(b) Aufnahme des MB3-Monitors.

Abbildung 3.4: Beispielaufnahmen der bisherigen Strahlmonitore. Beide Aufnahmen entstanden bei einer Strahlenergie von 3,2 GeV .

aber große Unsicherheiten auf, da einerseits die erwartete Strahlbreite einer Simulation entstammt und andererseits die bisherigen Aufnahmen ein übersättigtes GAUSSprofil beschreiben. Eine bessere Funktion zur Anpassung der Messpunkte außerhalb der Sättigung ist ein an diese Situation angepasster GAUSS, auch Flattop-GAUSS<sup>3</sup> [Kro20, Kap. 4]. Die Anpassungskurve nutzt nur die Datenpunkte, die nicht übersättigt sind, sodass die gefundene GAUSSfunktion optimal an den auswertbaren Punkten anliegt (vgl. Abbildung 3.5). Je nach Aufnahme erreicht man einen Unterschied der durch diese Anpassung erhaltenen Standardabweichung bzw. Strahlbreite von mehreren 10 %.

Wie bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben, konnte mit *MAD-X* die zu erwartende Strahlbreite berechnet werden. Mithilfe der Anpassung erhält man für die gemessene Strahlbreite  $\sigma_i$  analog zu Gleichung (3.3) mit gleichem Skalierfaktor für die MB2-Monitor-Aufnahme:

$$\sigma_{x,\text{messung}} = 7,94 \text{ pixel} \hat{=} (5,05 \pm 0,17) \cdot 10^{-2} \text{mm} , \quad (3.7a)$$

$$\sigma_{y,\text{messung}} = 4,11 \text{ pixel} \hat{=} (2,63 \pm 0,29) \cdot 10^{-2} \text{mm} . \quad (3.7b)$$

Daraus folgt für die Vergrößerung mit der simulierten Strahlbreite aus Tabelle 2.1:

$$V_{i,\sigma} = \frac{\sigma_{i,\text{messung}}}{\sigma_{i,\text{max}}} , i \in \{x, y\} . \quad (3.8)$$

Hierbei ist  $x$  die Horizontale und  $y$  die Vertikale. Somit ergibt sich:

$$V_{H,\sigma} = (1,53 \pm 0,06) \cdot 10^{-2} , \quad (3.9a)$$

$$V_{V,\sigma} = (4,16 \pm 0,48) \cdot 10^{-2} . \quad (3.9b)$$

Auffällig ist der große Unterschied zwischen horizontaler und vertikaler Vergrößerung. Das selbe

<sup>3</sup> Ermittelt über das im Rahmen von S. Kronenbergs Arbeit geschriebene Programm zur Strahlanpassung.

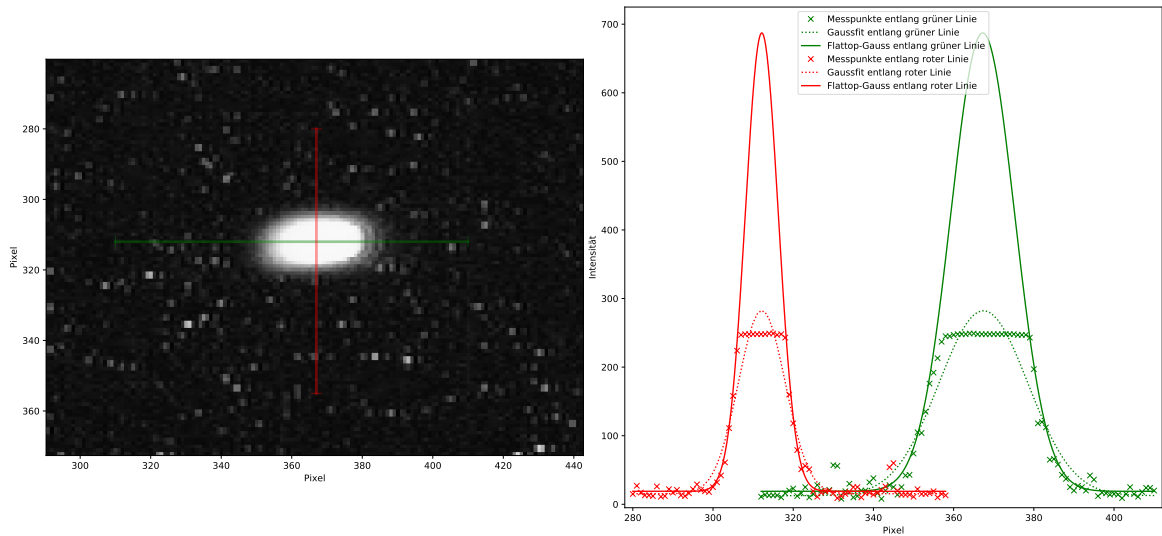


Abbildung 3.5: Ausschnitt alter MB2-Monitor-Aufnahme mit einem einfachen GAUSSanpassung und einem Flattop-GAUSS nach [Kro20]. Die Strahlbreiten variieren hier um 35 % für die beiden Anpassungsmethoden.

Ereignis tritt ebenso bei den Aufnahmen des MB3-Monitors auf:

$$V_{H,\sigma,MB3} = (1,46 \pm 0,07) \cdot 10^{-2} , \quad (3.10a)$$

$$V_{V,\sigma,MB3} = (3,11 \pm 0,40) \cdot 10^{-2} . \quad (3.10b)$$

Dies lässt den Schluss zu, dass trotz der Verbesserung durch die Flattop-Methode, die alten Aufnahmen über diese Methode nicht präzise auswertbar sind. Ein Grund ist die Überbelichtung der Aufnahmen und die dadurch geringe Anzahl von verwertbaren Messpunkten für die Anpassung. Des Weiteren kann auch die Skalierung im Framegrabber die Daten verfälschen. Dies würde die große Diskrepanz zwischen horizontaler und vertikaler Vergrößerung erklären, da die effektive Pixelzahl in der Horizontalen um 258 Pixel von der vom Framegrabber ausgegeben Pixelzahl abweicht und nicht genau bekannt ist, wie der Framegrabber die Quelldaten verändert.



# Neugestaltung der Synchrotronlicht-Monitore

---

Die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel haben gezeigt, dass die früheren Bilder des Strahls nicht zweifelsfrei ausgewertet werden können. Mit den Erkenntnissen aus Kapitel 3 und den Simulationen von *MAD-X* in Abschnitt 2.6 fließen die Anforderungen an die neuen Monitore in die Gestaltung ein. Dieses Kapitel behandelt das Design der neuen Monitore mit ihren Abbildungsgrößen, als auch Messungen, um die optischen Eigenschaften zu verifizieren.

## 4.1 Eigenschaften der neuen Synchrotronlicht-Monitore

Im Weiteren werden die Anforderungen an die SyLi-Monitore zusammengefasst, anhand welcher die Abbildungseigenschaften und die abbildende Kamera gewählt werden. Der in Abbildung 3.1 abgebildete Strahlengang bis zum Ablenk-Spiegel wird für den neuen Aufbau nicht verändert. Das heißt, dass sowohl Spiegel als auch die Auflagefläche an der Vakuumkammer für den SyLi-Monitor gleich bleiben und die Linse und Kamera darauf montiert werden.

Das neue SyLi-Monitor-Design ist am Beispiel des MB3-Monitors in Abbildung 4.1 skizziert. Ein Aluminiumadapter, hergestellt in der universitätseigenen Werkstatt, ist mit der Auflagefläche über dem Spiegel verschraubt und besitzt eine 2 Zoll Aussparung. Um eine frei wählbare Linsenposition zu erhalten, werden Linsenrohre<sup>1</sup> benutzt mit Innengewinde, wodurch Linsen in beliebiger Position mit Sicherungsringen eingespannt werden können. Bis auf das erste aufliegende Rohr sind die Linsenrohre durch Außengewinde kombinierbar und können den Abbildungsgrößen der Monitore entsprechend angepasst werden. So erhält man ein modulares Design was nach Bedarf umgebaut oder erweitert werden kann.

Auf dem letzten Linsenrohr wird eine Positioniereinheit angebracht, mit der die Kamera in beiden transversalen Achsen um  $\pm 6$  mm verschoben werden kann, falls der Strahl sich nach Erstjustage am Rand oder außerhalb des Bildsensors befinden sollte. Das verwendete Kameramodell ist die Blackfly-S Ethernetkamera der Firma FLIR mit einem 1/2 Zoll-Sensor, d. h. einer Sensorbreite von 6,4 mm und -höhe von 4,8 mm. Diese wird an einem C-Mount Verlängerungsrohr in der Positioniereinheit fixiert.

---

<sup>1</sup> Verschiedene Rohre des Typs SM2 der Thorlabs GmbH, Bergkirchen, Deutschland. <https://www.thorlabs.com/>

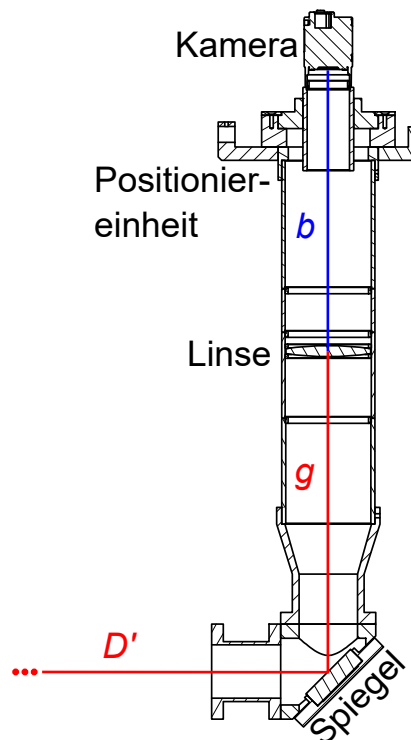


Abbildung 4.1: Technische Zeichnung des neuen Aufbauprinzips der SyLi-Monitore am Beispiel vom MB3-Monitor mit Vergrößerungsstufe 1. Gegenstands- und Bildweite sind rot und blau vermerkt. Die Zeichnung wurde erstellt von P. Hänisch und J. Schelske.

#### 4.1.1 Abbildungsgrößen

Es ist nicht gewährleistet, dass der Strahl zentral im Bildfeld positioniert ist, wie in Abbildung 3.4 ersichtlich ist. Dies muss bei der Wahl des Vergrößerungsfaktors  $V$  berücksichtigt werden. Würde man eine Vergrößerung wählen, die nur den Hauptteil des Strahls abbildet, würden bei einer Verschiebung das Strahlprofil aus dem Sensorbereich verschoben werden und Teile des Strahlprofils wären abgeschnitten, was die Analyse erschwert. Anhand der früheren Aufnahmen und der erwarteten Strahlgröße kann der gegenstandsweite Abstand zur Sensormitte grob abgeschätzt werden, zusammengefasst in Tabelle 4.1. Des Weiteren kann sich die Größe des Strahls ändern, ob durch Ionen-optische Einwirkungen oder

Strahlverschiebung	SyLi-Monitor	
	MB2	MB3
Horizontal	3,95 mm	6,29 mm
Vertikal	3,67 mm	10,08 mm

Tabelle 4.1: Die berechnete Verschiebung auf dem Bildsensor von der Strahlellipse auf dem Kamerasensor anhand von früheren Aufnahmen der MB2- und MB3-Monitore.

anhand der Extraktionsenergie, wie in Abschnitt 2.6 bereits dargestellt. Aus diesen Gründen ist es nötig Spielraum für die Strahlposition einzuplanen.

Mittels dieser Faktoren sind zwei Vergrößerungsstufen auf den Grundlagen einer Strahlenergie von 3,2 GeV und damit maximaler Strahlgröße gewählt worden. Die erste Vergrößerungsstufe wurde über die von MAD-X berechneten Strahlbreiten aus Tabelle 2.1 für beide Monitore festgelegt. Beide sind so gewählt, dass der Strahl bei einer horizontalen Verschiebung um ungefähr  $\pm 6\sigma_x$  noch abgebildet werden kann:

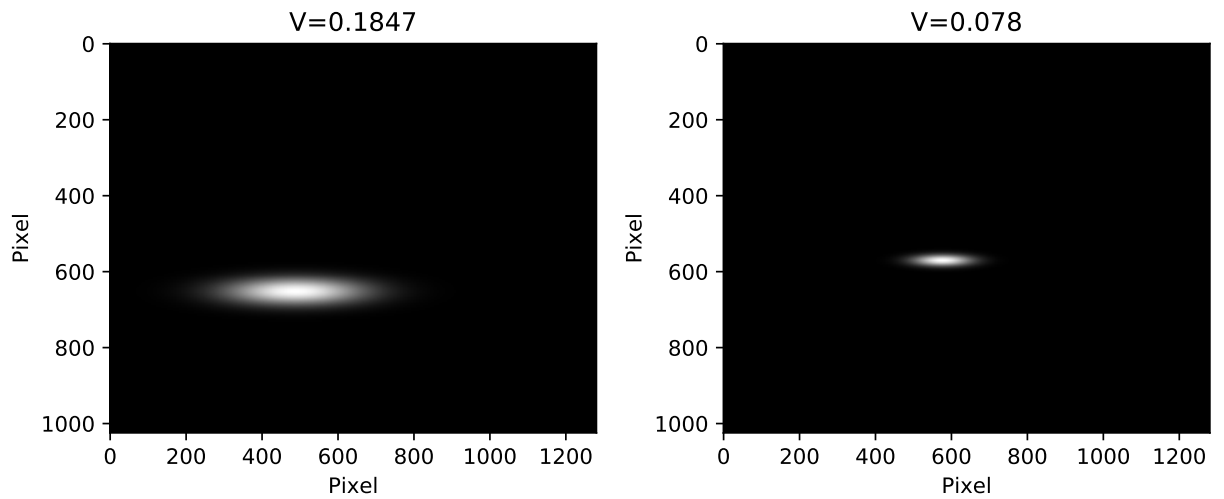
$$V_{1,i} \simeq \frac{6,4 \text{ mm}}{12 \sigma_{x,i,\text{max}}} , i \in \{\text{MB2}, \text{MB3}\} . \quad (4.1)$$

Die 6,4 mm entsprechen der horizontalen Sensorgröße der verwendeten Kamera. Da die vertikale Strahlgröße deutlich kleiner als die horizontale Strahlgröße ist, konnte die vertikale Verschiebung vernachlässigt werden. Die zweite Vergrößerungsstufe dient dem Zweck einen größeren Teil des Strahlrohrs abzubilden. Die gewählten Werte sind Tabelle 4.2 zu entnehmen. Der Einfluss einer möglichen Verschiebung mit den Werten aus Tabelle 4.1 für die beiden Vergrößerungsstufen ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Strahlellipsen werden demnach mit den gewählten Vergrößerungen und den erwarteten Verschiebungen stets abgebildet.

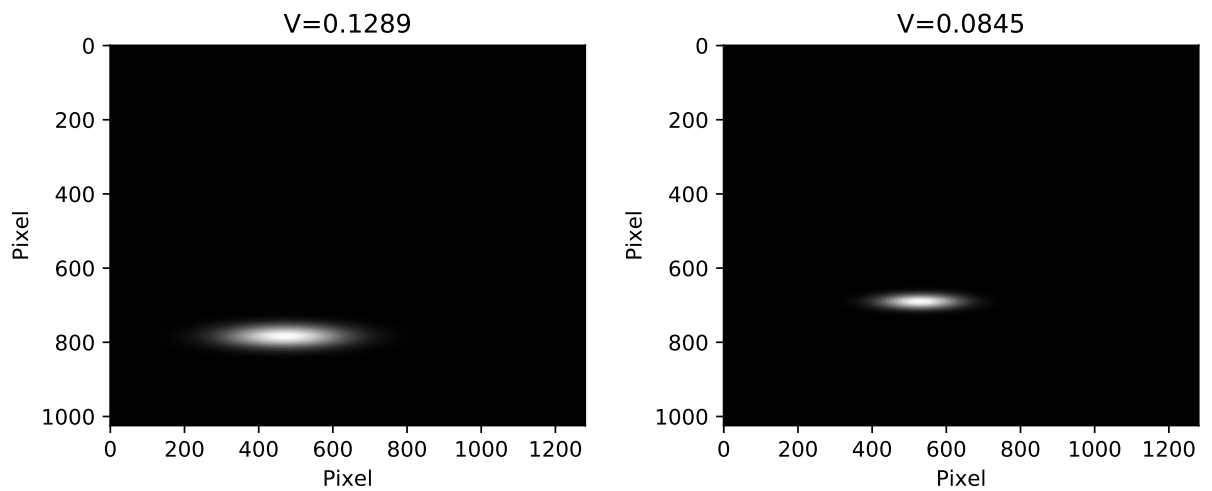
Die weiteren Abbildungsgrößen für jede Vergrößerungsstufe können über Gleichung (2.7) bestimmt werden. Bild- und Gegenstandsweite sind durch die Distanz von Magnetmittelpunkt zum Spiegel und durch die Platzverhältnisse ihrer Position beschränkt: Das Eisenjoch vom Dipolmagneten MB2 liegt nah am SyLi-Monitor und die Positioniereinheit findet nur oberhalb des Rahmens platz. Ähnliches Problem findet sich für den Monitor hinter dem Magneten MB3 mit dem nebenliegenden Strahlschieber SSH3 (vgl. Abbildung 2.9). Die in Abschnitt 3.1 bestimmten Distanzen geben einen Rahmen für die Gegenstandsweite an. Mit entsprechender Brennweite wurden die Abbildungsgrößen gewählt und der erwartete Schärfentiefebereich  $\Delta g$  kann dann durch Gleichung (2.9) bestimmt werden und ist in Tabelle 4.2 angegeben. Die Bildscheibe für die verwendete Kamera ist 4,88  $\mu\text{m}$  und die Blendengröße ist durch die 2 Zoll Linsenrohre gegeben.

Abbildungsgröße	SyLi-Monitor			
	MB2		MB3	
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 1	Stufe 2
$V$	0,1847	0,078	0,1289	0,0845
$f / \text{mm}$	200	100	175	125
$g / \text{cm}$	128,3	138,2	153,2	160,4
$b / \text{cm}$	23,7	10,8	19,8	13,6
$D / \text{cm}$	152	149	173	174
$\Delta g / \text{cm}$	1,33	3,24	2,20	3,37

Tabelle 4.2: Die theoretischen Abbildungsgrößen und Schärfentiefebereiche für die neuen SyLi-Monitore.



(a) Vergrößerungenstufen vom MB2-Monitor



(b) Vergrößerungenstufen vom MB3-Monitor

Abbildung 4.2: Simulierte Strahlverschiebung der neuen SyLi-Monitore für die simulierte Strahlbreiten aus Tabelle 2.1 anhand der gewählten Vergrößerungen.

### 4.1.2 Einwirkung schief einfallender Strahlen

Der Einfluss einer verdrehten Linse und damit einer Approximation für einen zur optischen Achse schief propagierenden Synchrotronlichtstrahls soll untersucht werden, da z. B. das Rohr schief angebracht sein kann. Eine auf Papier gedruckte Ellipse mit GAUSSförmiger Intensitätsverteilung wurde in der Fokalebene der Kamera-Optik aufgebaut. Auf einem Drehtisch wird die Linse um kleine Winkel in einer transversalen Achse verdreht, dargestellt in Abbildung 4.3.

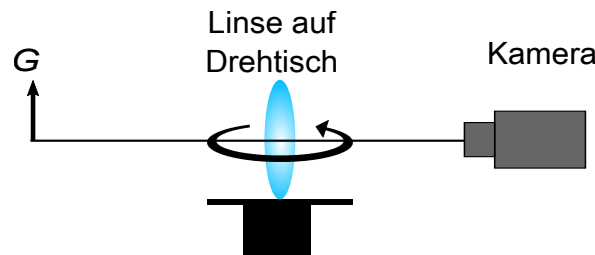
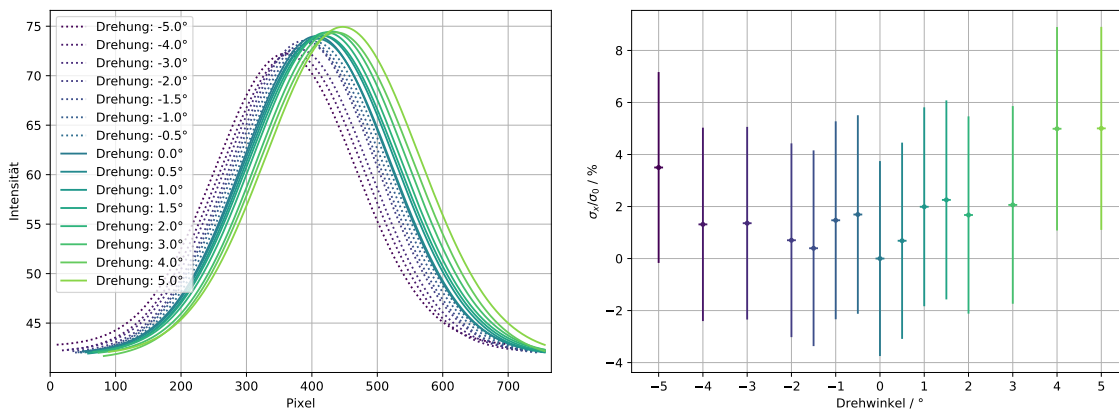


Abbildung 4.3: Messaufbau zum Verdrehen der Linse in der transversalen Ebene.

Der horizontale Querschnitt der GAUSSverteilten Ellipsen wurde mit Gleichung (2.11) ausgewertet und der Verlauf der eindimensionalen GAUSSkurven und deren Standardabweichungen wurde gegen den Drehwinkel der Linse aufgetragen, dargestellt in Abbildung 4.4. Die Standardabweichung verändert sich mit der Verdrehung der Linse und weicht zunehmend von der Standardabweichung beim Drehwinkel  $0^\circ$  ab. Grund dafür könnte eine leicht ungleichmäßige Wölbungen der Linse und daraus resultierende Abbildungsfehler wie die Koma sein [Hec09, Kap. 6]. Der Brennpunkt kann sich verschieben, wodurch eine Unschärfe und Verzerrung des Gegenstands entsteht.

Eine Verdrehung von über  $5^\circ$  ist allerdings nicht anzunehmen und Abbildung 4.4(b) ist zu entnehmen, dass eine relative Abweichung von der nicht verdrehten Standardabweichung von unter 5% auftritt. Neben der Strahlbreite verändert sich auch mit zunehmender Verdrehung die Strahlposition. Die Einwirkung einer kleinen Verdrehung bzw. Schiefelage ist demnach vernachlässigbar gering und es ist



(a) GAUSSanpassungen an horizontalen Querschnitt der (b) Absolute prozentuale Abweichung der gemessenen GAUSSverteilten Ellipsen im Verlauf der Linsendrehung. Standardabweichung gegen die Linsendrehung.

Abbildung 4.4: Auswertung der Einwirkung für kleines Verdrehen der Linse.

im neuen Monitor-Aufbau nicht nötig die Linse zur Korrektur verdrehen zu können und ein Versatz zur Linsenmitte kann mit der Positioniereinheit ausgeglichen werden.

### 4.1.3 Kameraanforderungen

Der Aufbau an der betrachteten externen Strahlführung ist bei Strahlbetrieb nicht betretbar, weswegen bei der Wahl der Kamera bedeutsam ist, dass von außerhalb die Kameraeinstellungen eingestellt werden können. Deshalb wird eine Ethernetkamera genutzt, die über das Netzwerk konfiguriert werden kann und durch die digitale Übertragung der Bilddaten werden Störungen, wie sie auf den Analogsignalen aufgetreten sind, vermieden. Die Belichtungszeit oder das Binning ist während der Beobachtung einstellbar, wobei das Binning bis zu vier Pixel zu einem zusammenfasst. Dies hat den Vorteil, dass die Auslesegeschwindigkeit drastisch erhöht und die benötigte Übertragungs-Bandbreite verringert wird. Des Weiteren führt Binning zu einer höheren Lichtsensibilität und gleichzeitig zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Mit den Daten des Kamerasensors, beschrieben in Abschnitt 2.3, und der abgestrahlten Leistung, die den SyLi-Monitor erreicht, kann die voraussichtliche Belichtungszeit für eine Aufnahme des Strahls ermittelt werden. Wie in Abschnitt 2.1 bereits erwähnt ist die Leistung der abgestrahlten Photonen gering und die Kamera bedarf einer hohen Lichtsensibilität. Die Lichtleistung von  $4,22 \cdot 10^{-5} \mu\text{W}$  ist dabei über den gesamten Photonenstrahl verteilt. Überträgt man die Leistung auf eine GAUSSverteilung mit den Strahlbreiten 3,29 mm und 0,632 mm (vgl. Strahlbreiten in MB2 aus Tabelle 2.1) für die zweite Vergrößerungsstufe mit  $V_{2,MB2} = 0,078$ , erhält man eine maximale Intensität für den zentralen Pixel im Strahlzentrum von ca.  $P_Z \approx 1,2 \cdot 10^{-8} \mu\text{W}$ . Die Rate an Photonen lässt sich berechnen mit:

$$\dot{N}_{\text{Photonen}} = \frac{P_Z}{E_{\text{Photon}}} \approx 33901 \frac{\text{Photonen}}{\text{s}} . \quad (4.2)$$

Als Energie wurde hier die gemittelte Energie von 2,25 eV des abgebildeten Spektrums genutzt (vgl. Abschnitt 2.1). Dem Datenblatt [FLI] der verwendeten Kamera kann entnommen werden, dass sie eine absolute Empfindlichkeitsschwelle von 21,22 Photonen hat, also erst bei 22 Photonen kann ein Signal von dem Rauschen unterschieden werden. Zusätzlich übersättigt ein Pixel ab einer Elektronenzahl von 5756, was ca. 10000 Photonen entspricht. Das gibt den Rahmen der nötigen Belichtungszeit an, der für die Blackfly-S zwischen der Einstellbaren Zeit von 11  $\mu\text{s}$  und 30 s liegen muss. Damit auch der Teil des Strahlprofils mit niedrigerer Intensität außerhalb des Zentrums sichtbar sind, muss die Belichtungszeit entsprechend angepasst werden, sodass sowohl die äußeren Photonen von den Pixeln aufgenommen, als auch die Zentrumspixel nicht übersättigt werden. Für alle Vergrößerungen der SyLi-Monitore wurden diese Belichtungszeiten über Gleichung (4.2) ermittelt und in Tabelle 4.3 eingetragen. Hierbei handelt es sich um Richtwerte, die auf Annahmen beruhen und nicht am Elektronenstrahl von ELSA getestet werden konnten.

### 4.1.4 Vermessung einer vergleichbaren Lichtquelle

Um die Belichtungszeiten aus Tabelle 4.3 zu verifizieren, wird mit dem MB2-Monitor mit zweiter Vergrößerungsstufe eine Messung mit einer alternativen Lichtquelle durchgeführt. Dafür wurde eine LED in der Fokalebene positioniert und die Leistung, die den Kamerasensor erreicht, gemessen. Der Messaufbau ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die von der LED abgestrahlte Leistung am Sensor beträgt  $P_{\text{LED}} = 9,4 \cdot 10^{-2} \mu\text{W}$ . Um diese mit der Synchrotronlichtleistung vergleichen zu können, wurde

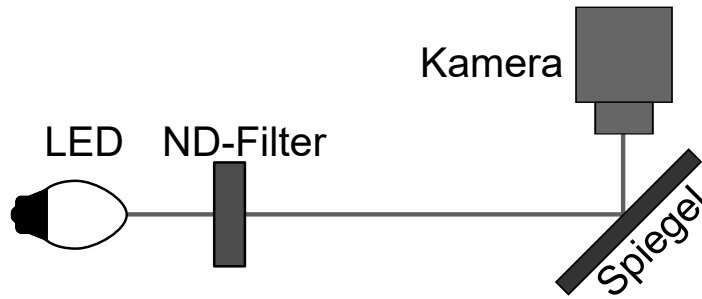


Abbildung 4.5: Messaufbau zur Bestimmung der Leistung und Belichtungszeit mit einer LED.

ein Neutralsichtfilter-Filter (ND-Filter) eingebaut, der die abgestrahlte Leistung der LED um drei Größenordnungen vermindert. Die effektive LED-Leistung ist dementsprechend  $P_{LED} = 9,4 \cdot 10^{-5} \mu\text{W}$ . Die Belichtungszeit der Kamera wurde der LED entsprechend angepasst, sodass das Bild gerade nicht in Sättigung gerät (vgl. Abbildung 4.6). Die eingestellte Belichtungszeit beträgt 0,011 s.

Die Intensität der LED ist höher als die vom Synchrotronlicht. Um die Belichtungszeiten beider Lichtquellen vergleichen zu können, muss für die LED ebenfalls die maximale Intensität des am stärksten ausgeleuchteten Pixel bestimmt werden (vgl. Abbildung 4.6). Deswegen wurde der relative Anteil des am stärksten ausgeleuchteten Pixels  $J_{\text{Pixel, max}}$  im Verhältnis zur gemessenen Leistung der Pixel gesetzt, um die Intensität des zentralen Pixels zu bestimmen:

$$P_{\text{Pixel, max}} = \frac{J_{\text{Pixel, max}}}{J_{\Sigma \text{Pixel}}} \cdot P_{LED} \quad , \quad \text{mit } J_{\Sigma \text{Pixel}} = \sum J_{\text{Pixel}} \quad . \quad (4.3)$$

Die Pixelintensität  $J$  ist die von dem Kamerasensor übertragene, in Skalenteilen gemessene Intensität und  $J_{\Sigma \text{Pixel}}$  ist die Summe aller gemessenen Pixelintensitäten. Die Leistung, die den am stärksten ausgeleuchteten Pixel erreicht, beträgt dann  $P_{\text{Pixel, max}} = 0,8 \cdot 10^{-8} \mu\text{W}$ . Dieser Wert ähnelt dem für die Zentralphotonen des Synchrotronlicht in Abschnitt 4.1.3 berechneten Wert von  $P_Z \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \mu\text{W}$ . Das heißt, die eingestellte Belichtungszeit für die LED ist mit der für die Synchrotronstrahlung vergleichbar. Diese Messung ist jedoch nicht präzise, da die Leistung nach einführen des ND-Filters nicht gemessen werden konnte. Außerdem gibt es einen zusätzlichen Einfluss des Rauschens bei den summierten Pixelintensitäten. Dennoch ist die Größenordnung der errechneten Belichtungszeiten bestätigt worden und sinnvolle Belichtungszeiten für den Extraktionszyklus von ca. 5 s sind möglich.

	SyLi-Monitor			
	MB2		MB3	
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 1	Stufe 2
Belichtungszeit / s	0,95	0,17	0,70	0,29
Ansprechbereich / $\sigma_i$	3,35	3,83	3,43	3,67

Tabelle 4.3: Berechnete Richtwerte der maximalen Belichtungszeiten für die neuen SyLi-Monitore für jede Vergrößerungsstufe, sodass das Maximum von Pixeln angesprochen wird ohne das das Bild übersättigt. Der Ansprechbereich gibt an, wie viele Pixel skaliert auf die Standardabweichung noch ein eindeutiges Signal empfangen.

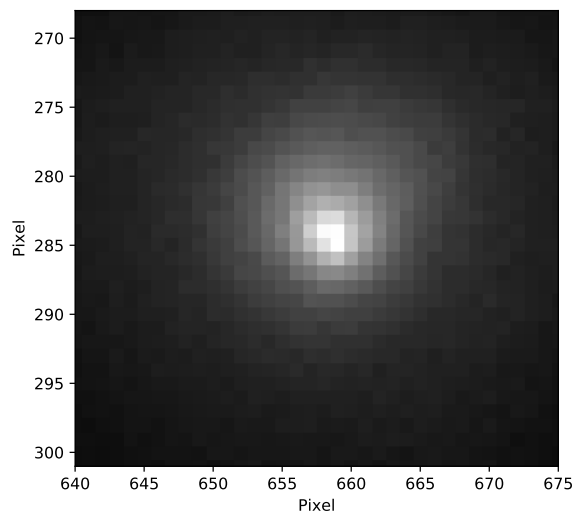


Abbildung 4.6: Kameraaufnahme der LED, bei der gerade keine Sättigung auftritt. Aufgenommen mit dem MB2-Monitor und zweiter Vergrößerungsstufe.

### 4.2 Messung der optischen Eigenschaften der neuen SyLi-Monitore

Um die erwarteten optischen Eigenschaften zu überprüfen, wird ähnlich wie in Kapitel 3 ein Messaufbau errichtet, mit dem sowohl die Distanz, als auch die Vergrößerung bestimmt werden kann. Zusätzlich wurde noch ein um  $45^\circ$  geneigter 2 Zoll Spiegel in den Strahlengang gesetzt, wie in Abbildung 4.7 dargestellt. Aufgrund der neuen Vergrößerungsstufen wurde der abzubildende Gegenstand angepasst: Um für die Anpassung hinreichend gute Übergänge zu erhalten, wenn der Gegenstand nicht in der Fokalebene liegt, müssen die Übergangsflächen hinreichend groß sein. Ansonsten ist der verzerrte Übergang größer als die Fläche des Rechtecks und die Anpassung wird ungenau. Ein entsprechend großer Gegenstand ist in Abbildung 4.8 abgebildet.

Mit dem selben Algorithmus aus Abschnitt 3.1 wurden die Distanzen zur Fokalebene überprüft, um sicherzustellen, dass die Fokalebene der neuen Monitore im selben Abstand  $D'$  liegt. Dieser Abstand zum Gegenstand wurde gemessen und erneut gegen die Steigungsparameter der Fehlerfunktion aufgetragen. Die Ergebnisse der Auswertung sind im Anhang B in Abbildungen B.1 bis B.2 dargestellt und in Tabelle 4.4 eingetragen und liegen mit ihren Fehlern im Schärfentiefebereich des angepeilten Synchrotronlichtquellpunktes. Für die eingestellten Distanzen kann per Messschieber die Bild- und Gegenstandsweite anhand der Linsenposition gemessen werden. Die Mitte der Linse kann als Brechebene behandelt werden und es ergeben sich die Werte aus Tabelle 4.4.

Die Vergrößerung ist über die Bild- und Gegenstandsgröße sowie -weite messbar. Es gibt hier keine Skalierung und die Pixelquadrate verfügen über eine Seitenlänge von  $4,8 \mu\text{m}$  [FLI]. Die Vergrößerungen berechnet mit beiden Methoden sind annähernd gleich und sind beide in Tabelle 4.4 hinterlegt.

Die gemessenen Abbildungsgrößen sind mit Fehlerbetrachtung im Bereich des Erwarteten und die relativen Fehler sind gering. Die Abweichungen der Bild- und Gegenstandsweite zu den theoretischen Werten kann sowohl an der Tatsache, dass die Linse eine endliche Dicke besitzt und die Brennweite auch eine Ungenauigkeit besitzt, die im Allgemeinen mit 1% angenommen wird. Zusätzlich ist bei Bildweiten, die klein gegenüber der Gegenstandsweite sind, eine hohe Präzision beim Aufbau



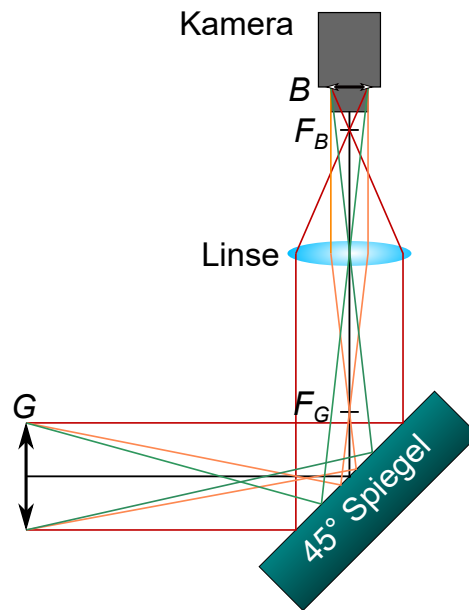


Abbildung 4.7: Schematischer Strahlengang des Messaufbaus zur Distanzmessung der SyLi-Monitore.

Abbildungsgröße	SyLi-Monitor			
	MB2		MB3	
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 1	Stufe 2
$V_{b/g}$	0,1849 ± 0,0018	0,0795 ± 0,0027	0,1279 ± 0,0019	0,0833 ± 0,0027
$V_{B/G}$	0,1843 ± 0,0021	0,0785 ± 0,0032	0,1282 ± 0,0023	0,0832 ± 0,0032
$g / \text{cm}$	128,53 ± 0,13	138,29 ± 0,13	153,62 ± 0,13	159,88 ± 0,13
$b / \text{cm}$	23,76 ± 0,04	11,0 ± 0,04	19,58 ± 0,04	13,31 ± 0,04
$D / \text{cm}$	152,3 ± 0,2	149,3 ± 0,2	173,2 ± 0,2	173,2 ± 0,2
$D' / \text{cm}$	98,8 ± 1,0	99,0 ± 1,0	136,4 ± 1,0	135,4 ± 1,0

Tabelle 4.4: Die gemessenen Abbildungsgrößen für die neuen SyLi-Monitore. Dabei ist  $D'$  die Distanz vom Gegenstand zum Spiegel. Der Vergrößerungsfaktor ist jeweils über Bild- und Gegenstandsgröße, sowie -weite berechnet worden.

erforderlich, da schon kleinste Veränderungen der Bildweite im Bereich von Millimetern zu großen Differenzen in der Gegenstandsweite führen.

Mit den angefertigten neuen SyLi-Monitoren, eingebaut an ihren Positionen in Abbildung 4.9, sollte es nach den bisherigen Messungen möglich sein, den Elektronenstrahl erfolgreich abzubilden.

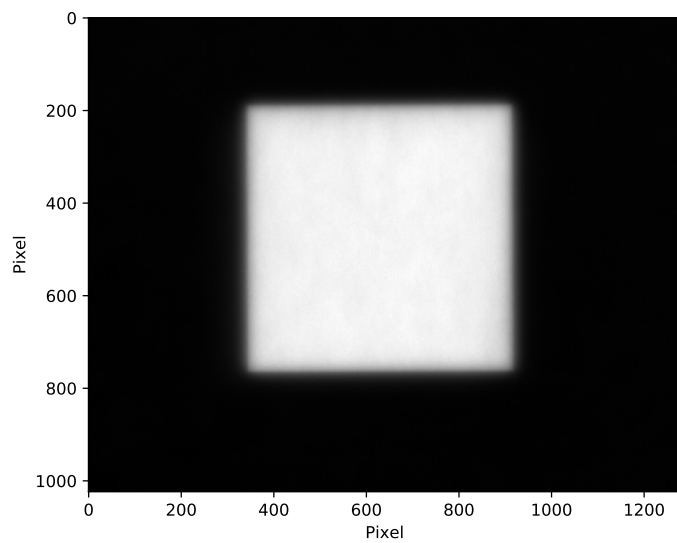
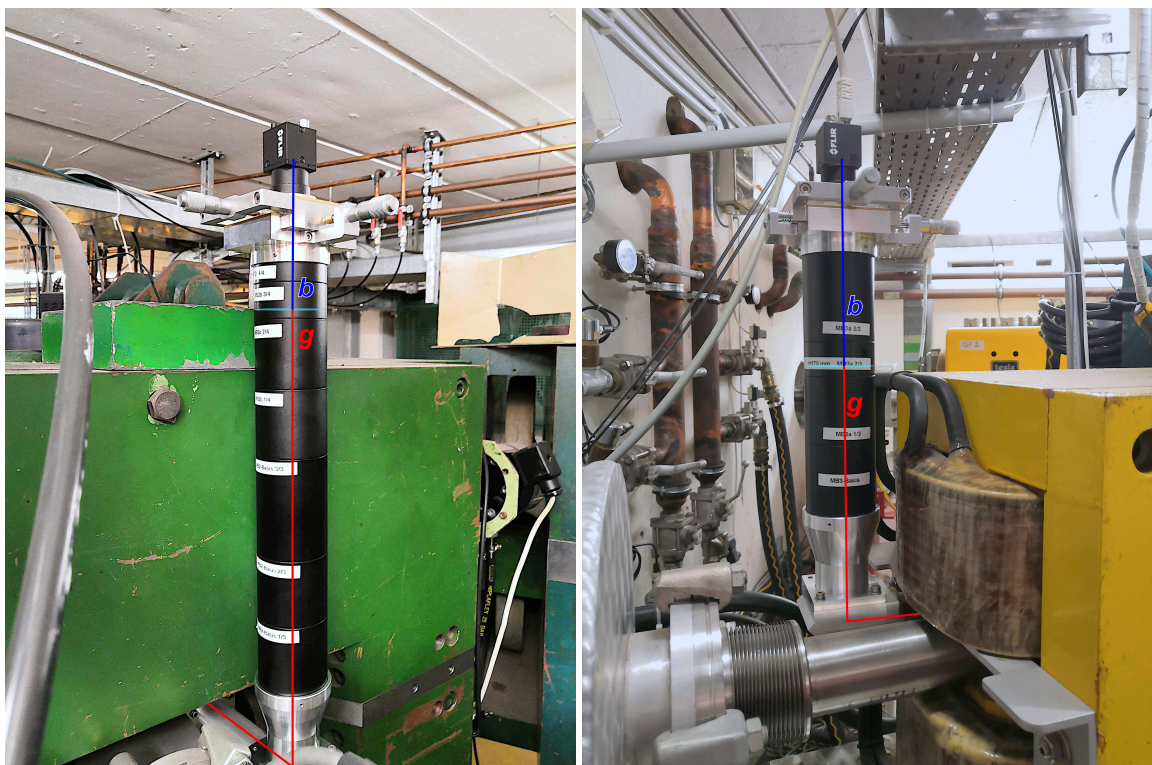


Abbildung 4.8: Aufnahme des für die Messungen der neuen SyLi-Monitore verwendeter Gegenstands in Fokalebene, aufgenommen vom MB2-Monitor mit Vergrößerungsstufe 2.



(a) Neuer SyLi-Monitor hinter dem grünen MB2 Dipolmagneten. Eingebaut ist die Vergrößerungsstufe 2. (b) Neuer MB3-Monitor neben dem gelben Strahlschieber SSH3. Eingebaut ist die Vergrößerungsstufe 1.

Abbildung 4.9: Fotos der neuen SyLi-Monitore in der externen Strahlführung mit eingezeichneter Strahlführung, vgl. Abbildung 4.1.

### Zusammenfassung und Ausblick

---

Der Aufbau der Synchrotronlicht-Monitore an der externen Strahlführung E1/E2 konnte im Verlauf dieser Arbeit erfolgreich fertiggestellt werden. Das Ziel, den Elektronenstrahl bei maximaler Energie von 3,2 GeV mit geeigneter Vergrößerung auf den Kamerasensor abzubilden, wurde umgesetzt und die entworfenen Monitore weisen die geplanten Abbildungsgrößen auf. Mit den Monitoren ist es möglich einen großen Teil des Strahls abzubilden, ohne dass die Pixel für die Profilmittte übersättigen. Dies konnte aber nicht mit Synchrotronlicht eines Elektronenstrahls von ELSA getestet werden. Die dafür erforderlichen Belichtungszeiten sind anhand der simulierten Synchrotronleistung errechnet und in ihrer Größenordnung bestätigt worden. Die Monitore sind zum Abschluss der Arbeit einsatzbereit und können abschließend getestet werden, sobald wieder ein Elektronenstrahl nach den derzeitigen Reparaturarbeiten zur Verfügung steht.

Die Analyse der Bilder funktioniert und kann bereits am Framegrabber ausgelesen werden, doch die Einstellung der Kamera muss manuell durchgeführt werden. Eine Implementierung dieser Funktion am Framegrabber oder im ELSA-Kontrollsystem würde die Änderung der Einstellung in Realzeit ermöglichen. Durch die Austauschbarkeit der Linsenrohre der SyLi-Monitore können weitere Vergrößerungsstufen flexibel eingebaut werden und eine Beobachtung des Elektronenstrahls ist mit unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben möglich.



# Literatur

---

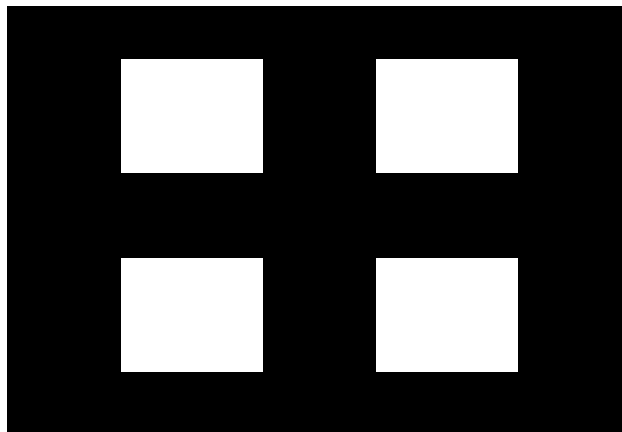
- [Bau] Baumer, *Funktionsweise und Eigenschaften von CMOS-Sensoren*,  
URL: <https://www.baumer.com/ch/de/service-support/know-how/funktionsweise/funktionsweise-und-eigenschaften-von-cmos-sensoren/a/EMVA1288> (siehe S. 7).
- [Dem08] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2*, Springer Berlin Heidelberg, 2008 (siehe S. 5, 6).
- [FLI] FLIR, *Datenblatt zur Ethernet-Kamera Blackfly-BFS-PGE-13Y3M* (siehe S. 26, 28).
- [Hec09] E. Hecht, *Optik*, 5. Aufl., Oldenbourg, 2009 (siehe S. 25).
- [Hin08] F. Hinterberger, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*, 2. Aufl., Springer-Verlag, 2008 (siehe S. 9).
- [Jac75] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics; 2nd ed.* Wiley, 1975,  
URL: <https://cds.cern.ch/record/100964> (siehe S. 4).
- [Kro20] S. Kronenberg, *Entwicklung einer Softwarebibliothek zur automatisierten Analyse von Strahlabbildern an ELSA*, Universität Bonn, 2020,  
URL: <https://www-elsa.physik.uni-bonn.de/Publikationen/> (siehe S. 19, 20).
- [Ons] Onsemi, *PYTHON 1.3/0.5/0.3 MegaPixels Global Shutter CMOS Image Sensors*,  
Datenblatt für Sensortypen (siehe S. 8).
- [Tho] Thomson, *The CCD Image Sensor*, Applikationsbroschüre,  
Thomson Composants Militaires Et Spatiaux (siehe S. 7).
- [WAT] WATEC, *Datenblatt zur CCD-Kamera WAT-502B* (siehe S. 15, 16).
- [Wie07] H. Wiedemann, *Particle accelerator physics; 3rd ed.* Springer, 2007,  
URL: <https://cds.cern.ch/record/1083415> (siehe S. 3).
- [Wil00] K. Wille, *The Physics of Particle Accelerators: An Introduction*,  
Oxford University Press, 2000 (siehe S. 3, 4, 9–11).
- [Zan13] S. Zander, *Optische Strahldiagnose an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*,  
Doktorarbeit: Universität Bonn, 2013, Seiten 22–23,  
URL: <https://www-elsa.physik.uni-bonn.de/Publikationen/> (siehe S. 11, 15).



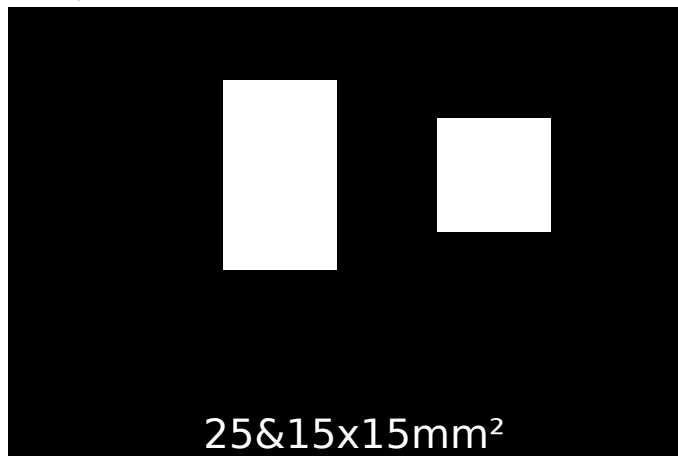
---

## Gegenstände in Originalgröße

---



(a) Vektorgrafik des abzubildenden Gegenstands bei den früheren SyLi-Monitor Aufnahmen (siehe Abschnitt 3.1). Die Rechtecke sind  $15 \times 18,75\text{mm}^2$  groß.



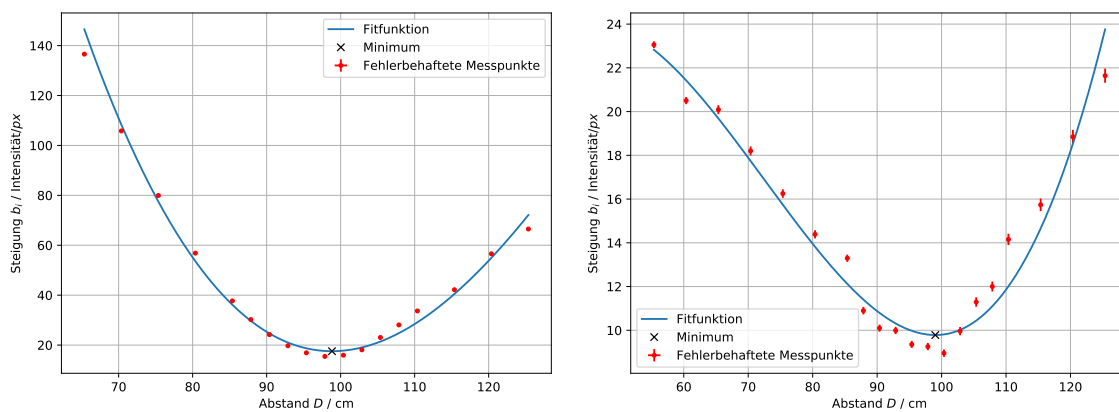
(b) Vektorgrafik des abzubildenden Gegenstands bei den neuen SyLi-Monitor Aufnahmen (siehe Abschnitt 4.2). Die Rechteckmaße sind im Bild vermerkt.

Abbildung A.1: Vektorgrafiken der verwendeten Gegenstände mit Übergängen von schwarz zu weiß.



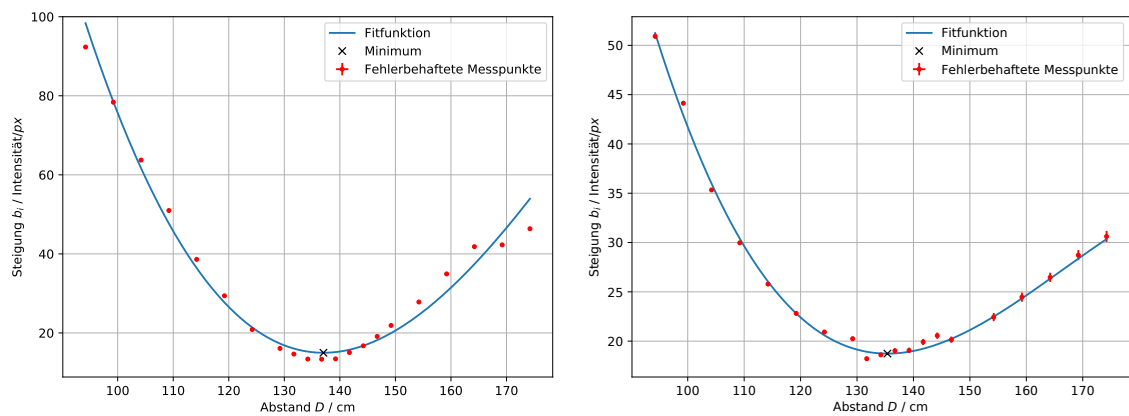


## Distanz-Bestimmung der neuen SyLi-Monitore



(a) Auswertung der Distanz  $D'$  des SyLi-Monitors mit Vergrößerungsstufe 1. Das Minimum liegt bei 98,8 cm. (b) Auswertung der Distanz  $D'$  des SyLi-Monitors mit Vergrößerungsstufe 2. Das Minimum liegt bei 99,0 cm.

Abbildung B.1: Auswertung der Distanz für beide Vergrößerungsstufen des SyLi-Monitors bei MB2, vgl. Tabelle 4.4.



(a) Auswertung der Distanz  $D'$  des SyLi-Monitors mit Vergrößerungsstufe 1. Das Minimum liegt bei 136,4 cm. (b) Auswertung der Distanz  $D'$  des SyLi-Monitors mit Vergrößerungsstufe 2. Das Minimum liegt bei 135,4 cm.

Abbildung B.2: Auswertung der Distanz für beide Vergrößerungsstufen des SyLi-Monitors bei MB3, vgl. Tabelle 4.4.

# Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Ich möchte Herrn Prof. Klaus Desch dafür danken, dass er mir die Möglichkeit gab in der Arbeitsgruppe ELSA meine Arbeit zu schreiben und mir damit einen Vorgeschmack für die praktische Forschung gegeben hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Priv.-Doz. Elisabeth Soergel für die Übernahme des Korreferats bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Michael Switka, der meine Bachelorarbeit betreut hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Ebenso gilt mein Dank Dennis Proft, der meine Arbeit nicht nur Korrektur gelesen hat, sondern auch bei Fragen und Problemen tatkräftig zur Verfügung stand.

Ich möchte meinen Kommilitonen danken - besonders Samuel Kronenberg, mit dem ich das Büro teilte - mit denen es trotz der ungewöhnlichen Zeit möglich war mit Spaß und einem guten Arbeitsklima zu arbeiten.

Mein Dank gilt dazu allen nicht namentlich genannten Personen, die mir in der Zeit meiner Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Großer Dank gilt auch meiner Freundin Yvonne, die mich tagtäglich unterstützt hat und mir auch in stressigen Zeiten half einen kühlen Kopf zu bewahren.

Außerdem danke ich Luca für das Korrekturlesen, trotz der Fachfremdheit.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.



# Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Die Elektronen Stretcher Anlage ELSA mit hervorgehobenen SyLi-Monitoren . . . . .	2
2.1	Skizze der Emittierten Synchrotronstrahlung in einem Ablenkmagneten . . . . .	3
2.2	Spektrale Verteilung der abgestrahlten Leistung im visuellen Bereich am Beispiel vom MB2-Monitor . . . . .	5
2.3	Schematischer Messaufbau für frühere SyLi-Monitore . . . . .	6
2.4	Skizze zur Schärfentiefe einer Abbildung durch eine Linse . . . . .	6
2.5	Quanteneffizienz des verwendeten Sensors . . . . .	8
2.6	Beispiel einer Fehlerfunktion . . . . .	9
2.7	Beispiel für die GAUSSfunktion . . . . .	10
2.8	Phasenraumellipse . . . . .	10
2.9	Externe Strahlführung mit rot markierten SyLi-Monitoren . . . . .	12
2.10	Mit <i>MAD-X</i> simulierter Verlauf der Strahleigenschaften der CB-Strahlführung . . . . .	13
3.1	Aufbau des SyLi-Monitors hinter dem Dipolmagneten MB3 . . . . .	15
3.2	Ausschnitt der Gegenüberstellung von Distanz und Steigungsparameter der angepassten Fehlerfunktion . . . . .	17
3.3	Kameraaufnahme vom Gegenstand in Fokalebene vom MB3-Monitor . . . . .	17
3.4	Beispielaufnahmen der bisherigen Strahlmonitore . . . . .	19
3.5	GAUSSfit an alter SyLi-Monitor-Aufnahme . . . . .	20
4.1	Technische Zeichnung des neuen Aufbauprinzips . . . . .	22
4.2	Simulierte Strahlverschiebung der neuen SyLi-Monitore . . . . .	24
4.3	Messaufbau zum Verdrehen der Linse in der transversalen Ebene . . . . .	25
4.4	Verlauf der GAUSSverteilten Ellipsen im Verlauf der Linsendrehung und die absolute prozentuale Abweichung der Standardabweichungen . . . . .	25
4.5	Messaufbau zur Bestimmung der Leistung und Belichtungszeit mit einer LED. . . . .	27
4.6	Kameraaufnahme der LED, bei der gerade keine Sättigung auftritt . . . . .	28
4.7	Schematischer Strahlengang der SyLi-Monitor . . . . .	29
4.8	Kameraaufnahme vom Gegenstand in Fokalebene vom MB2-Monitor . . . . .	30
4.9	Fotos der eingebauten SyLi-Monitore in der externen Strahlführung . . . . .	30
A.1	Vektorgrafiken der verwendeten Gegenstände mit Übergängen von schwarz zu weiß. . . . .	35
B.1	Auswertung der Distanz für beide Vergrößerungsstufen des SyLi-Monitors bei MB2 . . . . .	37
B.2	Auswertung der Distanz für beide Vergrößerungsstufen des SyLi-Monitors bei MB3 . . . . .	38



# Tabellenverzeichnis

---

2.1	Mit <i>MAD-X</i> berechnete Strahlbreiten . . . . .	11
4.1	Berechnete Verschiebung der Strahlellipse anhand von früheren Aufnahmen der MB2- und MB3-Monitore . . . . .	22
4.2	Theoretische Abbildungsgrößen für die neuen SyLi-Monitore . . . . .	23
4.3	Richtwerte der Belichtungszeit für die neuen SyLi-Monitore . . . . .	27
4.4	Gemessene Abbildungsgrößen für die neuen SyLi-Monitore . . . . .	29