

Bachelorarbeit

# **Das Elektron Benedikt und seine Brüder\*innen**

Jan Gaschina  
jan.gaschina@tu-dortmund.de

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Abstract**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Füllstruktur am Elektronenspeicherring DELTA</b>	<b>3</b>
1.1 Singlebunch . . . . .	4
1.2 Multibunch . . . . .	4
1.3 Hybride Füllstruktur . . . . .	4
1.4 Bisherige Messung der Füllstruktur . . . . .	5
<b>2 Theorie</b>	<b>5</b>
2.1 Entstehung von Synchrotronstrahlung . . . . .	5
2.1.1 Undulatorstrahlung . . . . .	6
2.2 Wahrscheinlichkeit für das Messen eines Photons . . . . .	8
2.2.1 Berechnung von $P_{Abschwächer}$ . . . . .	8
2.2.2 Berechnung von $P_{Bandpass}$ . . . . .	8
2.3 Höhenkorrektur der Histogramme . . . . .	8
<b>3 Aufbau</b>	<b>9</b>
3.1 Der Undulator . . . . .	9
3.2 Optischer Aufbau . . . . .	9
3.3 Der Photomultiplier . . . . .	9
3.4 Oszilloskop . . . . .	9
3.5 TDC7201 . . . . .	11
3.6 Time Tagger . . . . .	11
<b>4 Durchführung</b>	<b>14</b>
4.1 Auflösung des TDC bestimmen . . . . .	14
4.2 Probleme bei der Messung mittels TDC . . . . .	14
4.2.1 Geschwindigkeit des Delaygenerators . . . . .	14
4.2.2 Geschwindigkeit des TDC . . . . .	14
4.3 Messungen mit dem Oszilloskop . . . . .	14
4.4 Messungen mit dem Time Tagger . . . . .	14
<b>5 Auswertung</b>	<b>14</b>
<b>6 Diskussion</b>	<b>14</b>

## 1 Füllstruktur am Elektronenspeicherring DELTA

Der Dortmunder Elektronenspeicherring DELTA (Dortmund Electron Accelerator) ist eine 1,5 GeV Synchrotronstrahlungsquelle mit einem Umfang von 115,2 m. Die bereitgestellte Synchrotronstrahlung wird von verschiedenen Arbeitsgruppen aus den Gebieten der Physik, Chemie und Materialwissenschaften genutzt, um meist kondensierte Materie zu untersuchen. Zudem wird bei DELTA in immer größerem Maß Grundlagenforschung im Bereich der Beschleunigerphysik betrieben. Dazu zählen vor allem Konzepte zur erzeugung von ultrakurzen Strahlungspulsen mittels Interaktion von geladenen Teilchen, welche sich in periodischen Magnetfeldstrukturen bewegen, mit Laserpulsen unterschiedlichster Wellenlängen. Synchrotronstrahlung ist diejenige breitspektrale Strahlung welche entsteht wenn, mit elektrischer Ladung belegte Teilchen, beschleunigt werden. In einem Speicherring bleiben die geladenen Teilchen zwar in sehr guter Näherung bei gleicher Geschwindigkeit, welche hier nahezu die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, jedoch stellt auch ein Richtungswechsel im Laborsystem eine Beschleunigung dar, sodass in jeder Kurve des Speicherrings Synchrotronstrahlung abgegeben wird. Die Richtungsänderung zur Erhaltung der null-förmigen Sollbahn wird bei DELTA durch elektrische Dipolmagneten, welche mit einem Betriebsstrom von etwa 1 kA eine magnetische Flussdichte von circa 1,5 T in der Strahlbahn erzeugen, bewirkt. Die so erzeugte Strahlung nennt sich nach ihrer Entstehung Dipolstrahlung und kann an 12 Beamlines genutzt werden. Die mit der Strahlung ausgekoppelte Energie geht für die umlaufenden Teilchen verloren und muss in als Cavity bezeichneten elektromagnetischen Hohlraumresonatoren nachgefüttert werden. Die Cavities werden mit einer Frequenz von knapp 500 MHz betrieben. In den hier beschriebenen Experimenten wird jedoch keine Dipolstrahlung verwendet sondern Undulatorstrahlung. Diese entsteht wenn ein geladenes Teilchen eine Anordnung von abwechselnd gepolten Magneten durchläuft. Diese Abfolge wird Undulator genannt. Die entstehende Strahlung ist im Spektrum wesentlich schmäler als die Dipolstrahlung am selben Speicherring. Bei DELTA werden zur Strahlungserzeugung Elektronen verwendet. Diese sind besonders geeignet da sie sich aufgrund ihrer geringen Ruhemasse leicht beschleunigen und ablenken lassen. Eine wichtige charakteristische Größe eines Speicherrings für geladenen Teilchen ist der maximale Strahlstrom. Dieser ist definiert als Zahl der Ladungen die pro Zeiteinheit eine Fläche durchqueren. Der maximale Strahlstrom im Multibunchbetrieb liegt am DELTA bei etwa 130 mA. Der Elektronenstrahl ist an dieser Maschine in 192 Buckets mit einer Länge von etwa 0,6 m, was bei Lichtgeschwindigkeit etwa 2 ns entspricht, aufgeteilt. In jedem Bucket können sich unterschiedlich viele Elektronen befinden. Ein Bucket bezeichnet hier eine Art räumlichen Abschnitts im mitbewegten Bezugssystem. Die Gruppe von Elektronen die sich in jedem Bucket befinden kann, besitzt bei Lichtgeschwindigkeit eine Länge von etwa 36 ps und wird als Bunch bezeichnet. Die Kombination von unterschiedlich stark gefüllten Buckets wird Füllstruktur genannt. DELTA kann mit drei verschiedenen Typen von Füllstrukturen betrieben werden.

## 1.1 Singlebunch

Im Singlebunchbetrieb wird nur ein einzelner Bucket mit einem einzelnen Bunch befüllt. Das hat zur Folge das mit einer Frquenz von etwa 2,6 MHz etwa alle 384 ns ein kurzer Strahlungsblitz erzeugt wird. Eine Variante dieses Betriebsmodus ist der Betrieb mit einem einzelnen Elektron. Dazu wird im Singlebunchbetrieb ein Bucket mit einer geringen Zahl Elektronen befüllt. Im nächsten Schritt wird dann eine art Stempel, Scraper genannt, nah an den Elektronenstrahl herangefahren. Da die Elektronen sich nun nicht, wie an einer Perlenkette aufgereiht präzise auf ihrer Sollbahn fliegen, sondern vielmehr transversal um diese Sollbahn schwingen, treffen immer wieder Elektronen auf den Scraper und gehen somit für den eigentlichen Strahl verloren. Die Ausdehnung des Strahls verringert sich durch den Verlust der stark schwingenden Elektronen. Der Scraper wird nun Schritt für Schritt näher an den Strahl herangefahren bis nurnoch ein einzelnes Elektron übrig ist.

## 1.2 Multibunch

Der Multibunchbetrieb stellt die Standardfüllstruktur bei DELTA dar. Hier werden 128 der Buckets mit einer ähnlichen Anzahl von Elektronen befüllt, darauf folgen dann 64 ungefüllte Buckets. Das bedeutet es wird eine Abfolge von 128 kurzen Strahlungsblitzen mit einem Absand von jeweils etwa 2 ns erzeugt auf welche eine Strahlungsfreie Periode von etwa 128 ns folgt.

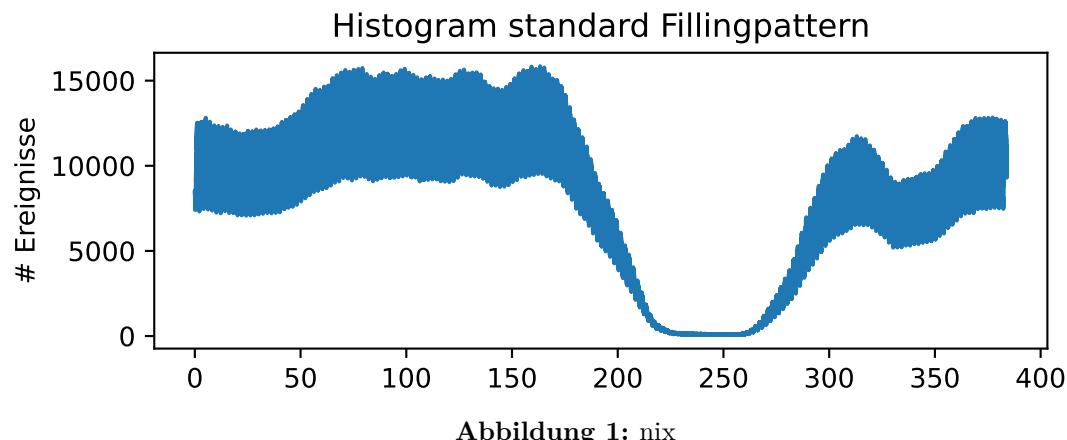
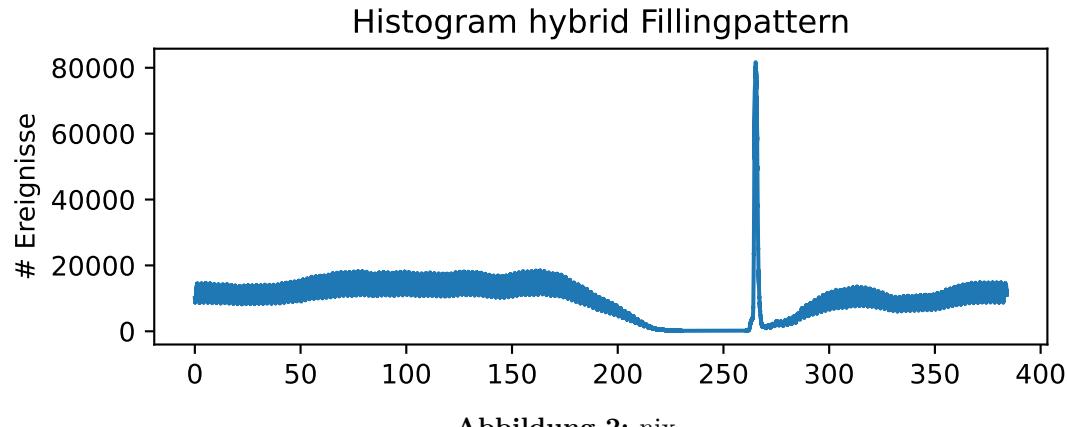


Abbildung 1: nix

## 1.3 Hybride Füllstruktur

Die hybride Füllstruktur zeichnet sich dadurch aus das der Speicherring zunächst im Multibunchbetrieb gestartet wird und dann in ein Bucket das zur strahlungsfreien Periode gehört Elektronen injiziert werden.



## 1.4 Bisherige Messung der Füllstruktur

Bisher wird die Füllstruktur gemessen indem das Signal eines BPMs (Beam Position Monitors) mit einer Oszilloskopkarte ausgewertet wird. Ein solcher BPM besteht aus vier sogenannter Pickupelektroden welche in der zum Strahl transversalen Ebene in die Bahn eingebracht wurden. Wenn nun ein Elektronenpaket diese Ebene quert, erzeugt es in den Elektroden Spiegelladungen, daher kann eine kleine Spannung gemessen werden. Aus den vier Spannungen kann dann die transversale Strahllage berechnet werden. Um die Füllstruktur zu errechnen müssen jedoch alle vier Spannungen in einem Leistungsaddierer addiert werden. Dabei gilt: je größer das Gesamtsignal desto größer die Ladungsmenge im Bunch. Das entstehende Summensignal wird an eine Oszilloskopkarte weitergeleitet dort aufgezeichnet, verarbeitet und über das EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) an den Kontrollraum weitergeleitet wo es als Balkendiagramm mit der Bucketnummer auf der Abszisse und der Ladungsmenge auf der Ordinate dargestellt wird.

## 2 Theorie

In diesem Kapitel soll kurz die nötige Theoretische Grundlage geschaffen werden.

### 2.1 Entstehung von Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung bezeichnet ein kontinuierliches Strahlungsspektrum das vom Infraroten über das sichtbare und ultraviolette Licht bis in den Bereich der harten Röntgenstrahlung reicht. Sie entsteht, wie bereits erwähnt, durch die Beschleunigung von elektrisch geladenen Teilchen, im speziellen Fall des DELTA Speicherrings durch die Beschleunigung von Elektronen. Um die zur Beschleunigung verwendete Richtungsänderung zu bewirken werden Magnetfelder verwendet. Elektrisch geladene Teilchen in einem Magnetfeld sind der Lorentzkraft ausgesetzt. Sie wird beschrieben durch:

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{v} \times \vec{B} = \dot{\vec{p}}$$

Die Kraft wirkt also auf ein mit der Ladung  $e$  belegtes Teilchen das mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  das Magnetfeld  $\vec{B}$  durchquert. Der Biegeradius  $R$  lässt sich durch gleichsetzen der Lorentzkraft mit der Zentripetalkraft  $\vec{F}_Z$  ermitteln.

$$\vec{F}_Z = m \frac{\vec{v}^2}{R}$$

$$\vec{F}_Z = \vec{F}_L \Rightarrow m \frac{\vec{v}^2}{R} = e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\Leftrightarrow R = \frac{\vec{v}^2 m}{e \cdot |\vec{v} \times \vec{B}|} \quad (1)$$

Da sich die Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen muss relativistisch gerechnet werden. Es gilt also  $m = m_0\gamma$  mit  $m_0$  der Ruhemasse des Elektrons und  $\gamma$  dem Lorentzfaktor. Die Strahlungsleistung  $P_S$  eines derart bewegten Elektrons wird beschrieben durch:

$$P_S = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{1}{(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^2}$$

Hier meint  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit,  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante und  $E$  die Gesamtenergie des Teilchens. Das die Ruhemasse  $m_0$  in vierter Potenz eingeht, erklärt die gute Eignung von Elektronen zur Synchrotronstrahlungserzeugung. Schwerere Teilchen wie Protonen oder auch -Leptonen sind nicht nur schwerer zu beschaffen, sondern müssten auch auf deutlich größere Energien beschleunigt werden um die gleiche Strahlungsleistung zu erbringen. Pro Umlauf ergibt sich für ein Elektron die mittlere Abgestrahlte Energie  $\Delta E$ :

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\epsilon_0(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R}$$

### 2.1.1 Undulatorstrahlung

Undulatoren zählen zu den sogenannten insertion devices, diese werden auf graden Strecken des Speicherrings untergebracht welche ohne diese Geräte einfache Driftstrecken wären. Ein Undulator besteht aus einer Abfolge von abwechselnd gepolten Magneten. Bei den Magneten kann es sich sowohl um Dauer- als auch normal- oder supraleitende Elektromagneten handeln. Durch die Periodische, abwechselnd gepolte Anordnung von Magneten beschreiben die durfliegenden Teilchen eine sinusförmige Bahn. Die Amplitude des Sinus ist dabei Abhängig von der Magnetischen Feldstärke und der Gesamtmasse der Teilchen. Eine charakteristische Größe ist hier der sogenannte Undulatorparameter  $K$ , er ergibt sich über:

$$K \equiv \frac{\lambda_U e B_0}{2\pi m_e c}$$

Dabei bezeichnet  $\lambda_U$  die Undulatorperiode, also den longitudinalen Abstand zwischen zwei gleichartig gepolten Magneten. Anhand des Undulatorparameters lassen sich auch Undulatoren von Wigglern unterscheiden. Für einen Undulator gilt  $K \leq 1$  und für einen Wigglern  $K > 1$ . Bei einem Undulator interferieren die in jedem Bogen der sinusförmigen Bahn erzeugten Strahlungskegel miteinander was zu einem Linienspektrum führt. Die Intensität der Synchrotronstrahlung ist hier um den Faktor  $N_P^2$  erhöht, wobei  $N_P$  die Anzahl der Magnetpole ist. Bei einem Wigglern erfolgt keine Interferenz und es entsteht ein kontinuierliches Spektrum dessen Synchrotronstrahlungsintensität proportional zu  $N_P$  ist. Diese Unterscheidung ist jedoch sehr theoretisch, in der Praxis treten mit zunehmender Flussdichte im Undulatorspektrum immer mehr ungradzahlige Harmonische der fundamentalen Undulatorlinie auf die dann zu einem kontinuierlichen Spektrum verschmelzen. Die Wellenlänge der fundamentalen Undulatorlinie kann geschrieben werden als:

$$\lambda = \lambda_U - \lambda_U \beta^* c \cos \theta$$

Dabei ist  $\theta$  der Betrachterwinkel. Dieser ist von null verschieden falls der Beobachter sich nicht auf der Elektronenachse befindet. In den folgenden Experimenten ist der Beobachter jedoch immer auf der Elektronenachse. Daher lässt sich vereinfacht schreiben:

$$\lambda = \lambda_U - \lambda_U \beta^* c$$

Um jedoch zu verhindern das der Beobachter vom Elektronenstrahl getroffen wird und dieser verloren geht befindet sich zwischen Undulator und Beobachter noch ein Ablenkmagnet welcher Dipolstrahlung erzeugt. Die Strahlung des Dipols überlagert sich nun mit unbekannter Phasenbeziehung mit der Strahlung des Undulators. Um die Relevanz der Dipolstrahlung im Vergleich zur Undulatorstrahlung abschätzen zu können werden hier die Strahlungsleistungen im Bereich der Fundamentallinie verglichen. Die Strahlungsleistung für die fundamentallinie des Undulators beträgt in etwa:

$$P_{Undulator}[W] = 7,26 \frac{E^2 [GeV^2] I[A] K^2 N_U}{\lambda_U [cm]}$$

Die Gesamtstrahlungsleistung des Dipols lässt sich abschätzen über:

$$P_{Total} = \frac{e\gamma^4}{3\epsilon_0 R} I \quad (2)$$

Da dies jedoch eben die Gesamtstrahlungsleistung im kompletten Spektrum ist und nicht die Leistung an der Undulatorlinie, muss diese Größe noch mit dem Integral der Spektralfunktion  $S(x)$  an der entsprechenden Stelle gewichtet werden:

$$P_{Dipol} = P_{Total} \int_a^b S(x) dx = P_{Total} \int_a^b \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} x \int_x^\infty K_{5/3}(u) du dx$$

mit  $a = \frac{4\pi R}{3(\lambda - \lambda_v)\gamma^3}$  und  $b = \frac{4\pi R}{3(\lambda + \lambda_v)\gamma^3}$  und  $K_{5/3}(u)$  der modifizierten Besselfunktion zweiter Gattung zur Basis 5/3.

## 2.2 Wahrscheinlichkeit für das Messen eines Photons

Die Wahrscheinlichkeit das ein von einem Elektron in einem Bunch ausgestrahltes Photon den Bandpassfilter passieren kann und nicht von einem Abschwächer absorbiert wird, stzt sich aus den drei Einzelwahrscheinlichkeiten  $P_{Abschwächer}$ ,  $P_{Bandpass}$  und  $P_{Emittiert}$  zusammen und wird aufgrund der Stichprobengröße von  $N \approx 10^{11}$  als Normalverteilt angenommen. Der Erwartungswert einer Normalverteilung ergibt sich aus:  $\epsilon = N \times P_{Gesamt}$

$$\epsilon = N * P_{Abschwächer} * P_{Bandpass} * P_{Emittiert}$$

### 2.2.1 Berechnung von $P_{Abschwächer}$

Die Wahrscheinlichkeit das ein Photon beliebiger Energie einen Abschwächer neutraler Dichte durchqueren ergibt sich direkt aus dem Kehrwert seiner Dichte  $\rho$ . Für  $n$  hintereinander stehende Abschwächer müssen diese Wahrscheinlichkeiten multipliziert werden. Für  $n$  Abschwächer mit gleicher neutraler Dichte ergibt sich:

$$P_{Abschwächer} = \frac{1}{\rho^n}$$

### 2.2.2 Berechnung von $P_{Bandpass}$

Die Wahrscheinlichkeit das ein im Undulator abgestrahltes Photon die richtige Wellenlänge hat um den Bandpassfilter passieren zu können ergibt sich aus dem Integral über das Undulatorspektrum. Das Undulatorspektrum hat die folgende Form:

## 2.3 Höhenkorrektur der Histogramme

Bedingt durch den messtechnischen Aufbau, kann immer nur eine bestimmte Anzahl an Photonen pro Messzyklus gemessen werden. Dadurch ergebt es sich das es wahrscheinlicher ist ein Photon zu messen das kurz nach dem Start-Trigger ankommt als eines das lange nach dem Trigger ankommt. Denn je später das Photon ankommt desto wahrscheinlicher ist es das zuvor schon so viele Photonen gemessen wurden das der Messspeicher für den entsprechenden Messzyklus bereits voll ist. Daher wurde ein Histogramm über viele Messzyklen aufgenommen und die Rohdaten aufgetragen. Da sich der Strahlstrom über die Messzeit praktisch nicht verändert hat, müsste der erste Balken des Histogramms ebenso hoch sein wie der 193., der 385. und der 577.. Es ist jedoch ein scheinbar exponentieller Abfall zu erkennen. Daher wurden die Daten logarithmiert und durch die jeweils vier zusammengehörenden Balkenhöhen eine Ausgleichsgrade gelegt. Anschließend werden Mittelwerte gebildet und die Logarithmierung rückgängig gemacht. Mit der entsandten Funktion kann dann eine Höhenkorrektur durchgeführt werden.

### 3 Aufbau

Allen Messungen liegt ein einfacher Aufbau zu Grunde. An einer Beamline des Elektronenspeicherrings DELTA wird die im davorliegenden elektrromagnetischen Undulator entstehende, Strahlung über einen Spiegel ausgekoppelt. Diese wird über zwei weitere Spiegel in eine dunkle Box geleitet. Dort durchquert der Lichtstrahl zuerst eine Blende dann eine Reihe von neutrale Dichte Filtern und eine weitere Blende bevor er auf einen Photomultiplier trifft. Dort werden einzelne Photonen in elektrische Pulse umgewandelt. Diese Pulse werden im weiteren mit unterschiedlichen Messinstrumenten aufgezeichnet und später ausgewertet.

#### 3.1 Der Undulator

Zur Strahlungserzeugung wird der Undulator U255 auf der Nordostseite des Speicherrings genutzt. Er besitzt  $N_p = 17$  Perioden mit einer Periodenlänge von  $\lambda_U = 250$  mm. Die Lücke zwischen den einzelnen Magneten beträgt 50 mm.

#### 3.2 Optischer Aufbau

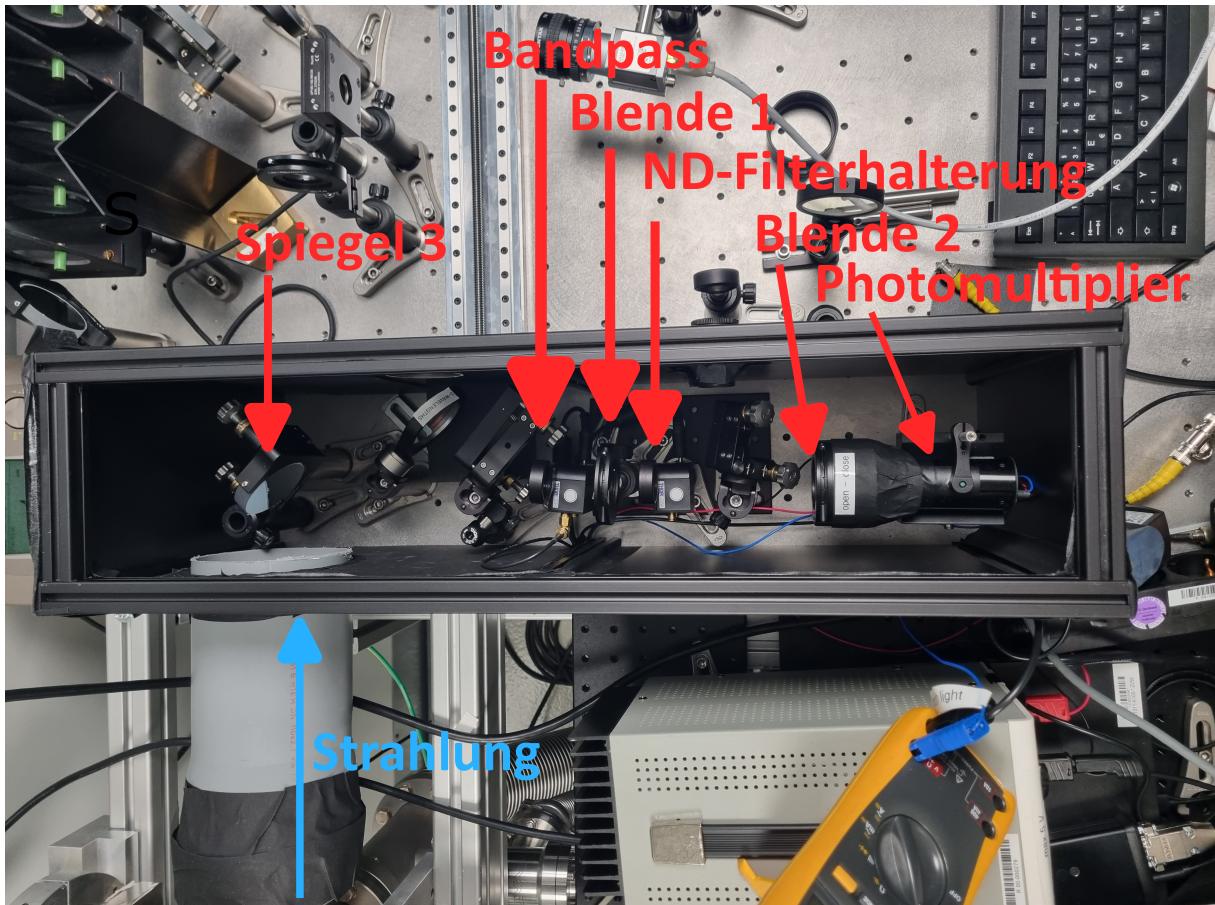
Die vom Undulator erzeugte Strahlung wird über drei Spiegel in eine dunkle Kiste geleitet. Der erste Spiegel befindet sich in der verlängerten Undulatorachse und spiegelt den Strahl in horizontal-transversaler Richtung zu dieser in einen zweiten Spiegel, dieser dann wieder in einem 90° Winkel auf Spiegel 3 in der Blackbox. Nach dem dritten Spiegel passiert die Strahlung zunächst eine Blende, dann einen Bandpass welcher die Wellenlängen von 10 000 nm bis 10 000 nm passieren lässt. Anschließend folgt ein Neutrale-Dichte-Filter, kurz: ND-Filter, welcher die Strahlung unabhängig von ihrer Wellenlänge um eine bestimmte Zehnerpotenz abschwächt. Hier wurden Filter mit einer Abschwächung von  $10^7$  genutzt. Danach wird eine weitere Blende passiert, welche allerdings nur zum Schutz des empfindlichen Photomultipliers dient und während der Experimente stets vollständig geöffnet war. Während dem Betrieb des Aufbaus wurde die Kiste noch mit einem schwarzen Deckel verschlossen und das Licht im Labor ausgeschaltet um möglichst wenig Untergrundstrahlung zu messen. Siehe Abbildung 3.

#### 3.3 Der Photomultiplier

Für alle Experimente wurde der selbe Photomultiplier verwendet. Es handelt sich um einen Hamamatsu H11870. Er arbeitet mit einer Spannung von lediglich fünf Volt und ist daher leicht zu handhaben. Für jedes detektirte Photon gibt er einen Puls von etwa 9 ns lange bei circa 2,2 V aus.

#### 3.4 Oszilloskop

Für die mit dem Oszilloskop durcheführten Messungen wurde ein Lecroy verwendet.



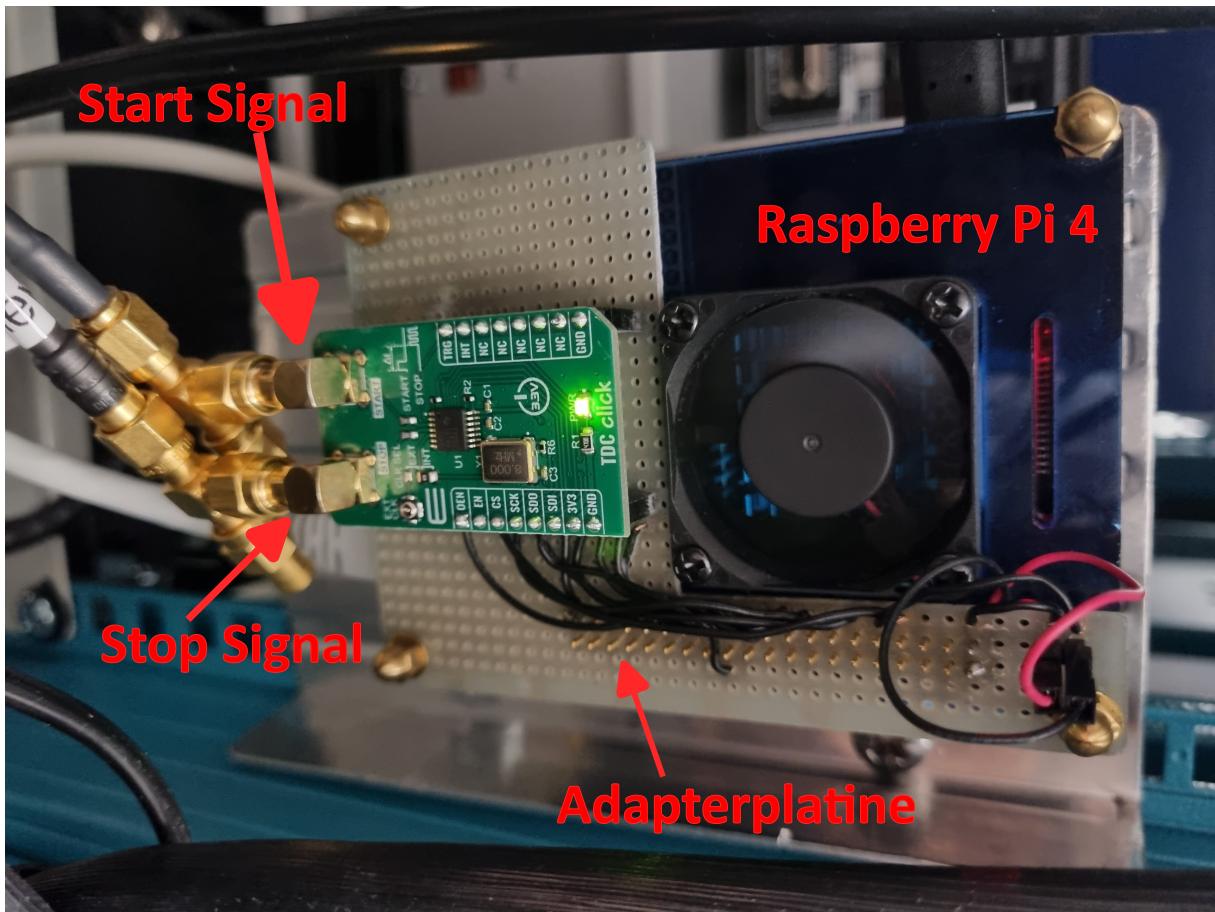
**Abbildung 3:** Zu sehen ist der optische Aufbau. Nachdem die Strahlung in das Labor gespiegelt wurde wird sie durch eine Blende, einen Bandpass und einem ND-Filter abgeschwächt bevor sie auf den Photomultiplier trifft.

### 3.5 TDC7201

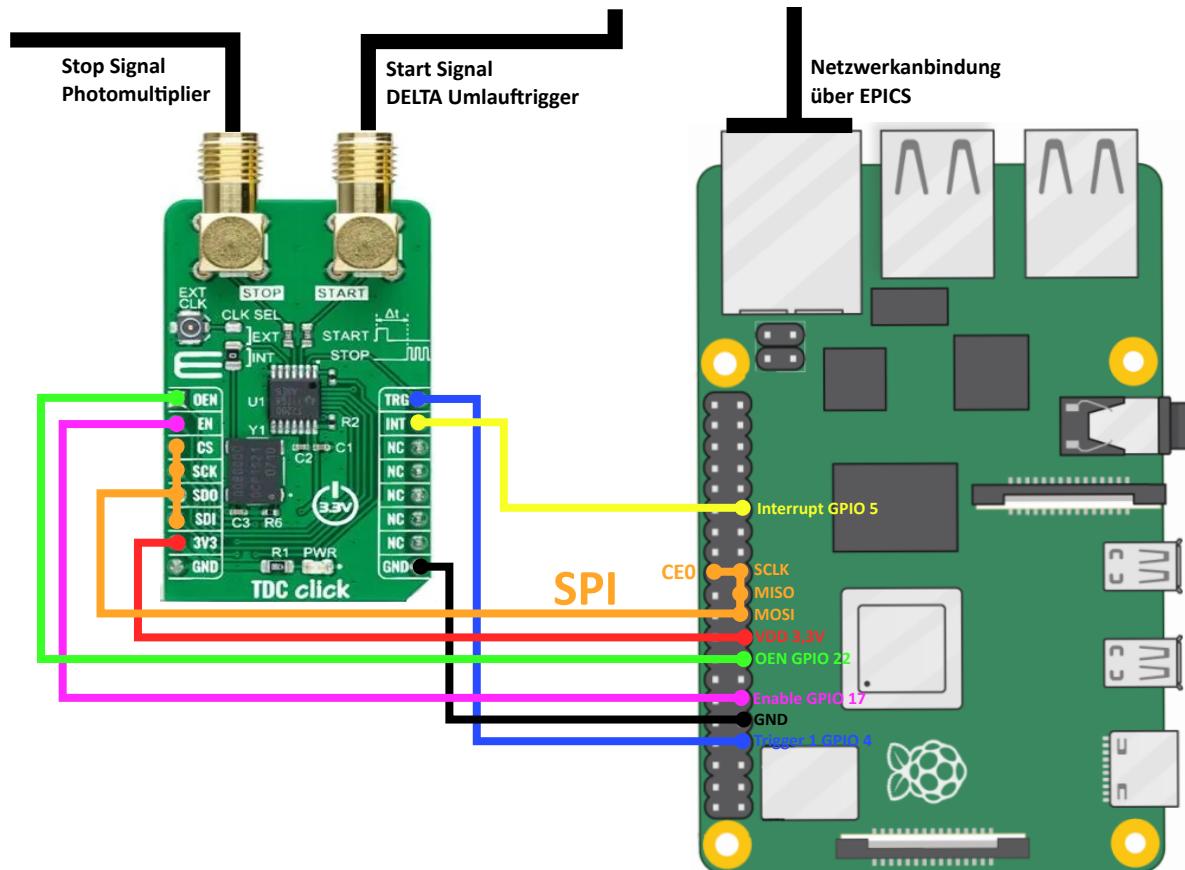
Beim TDC7201 handelt es sich um einen Time to Digital Converter. Dieser besitzt einen Eingang für ein Start Signal und einen Eingang für ein Stop Signal. Der Chip misst die Zeit zwischen den steigenden oder fallenden Flanken der Signale. Die gemessenen Zeiten können dann über einen SPI Bus ausgelesen werden. Das geschieht in diesem Aufbau durch einen Raspberry Pi. Dieses Verfahren funktioniert in nahezu Echtzeit. Daher kann mit diesem Aufbauleicht eine Füllstruktur errechnet und über das EPICS Protokoll im Netzwerk zur Verfügung gestellt werden. Als Startsignal wird der DELTA Umlauftrigger genutzt. Als Stoppsignal wird das Signal des Photomultipliers genutzt. Da es bei diesem Aufbau wahrscheinlicher ist Photonen von Bunches zu messen die als erstes nach dem Umlauftrigger Signal kommen, sollte das Umlauftriggersignal nach jeder Messung um zwei Nannosekunden verzögert werden um so alle Bunches über die Zeit gleich gut vermessen zu können. Dazu wurde der Delaygenerator über das VXII Protokoll vom Raspberry Pi angesteuert. Dieses Vorhaben scheiterte jedoch daran das der Delaygenerator nicht schnell genug umschalten konnte. Daher müssen die gemessenen Signale später rechnerisch korrigiert werden. Dazu wurde ein Histogramm über mehrere Umläufe erstellt und anhand dessen der Abfall der Messwahrscheinlichkeit bestimmt.

### 3.6 Time Tagger

Der Time Tagger ist ein dem in Unterabschnitt 3.5 beschriebenen Aufbau ähnliches kommerzielles Produkt der Firma Swabian Instruments.



**Abbildung 4:** Auf dem Raspberry Pi befindet sich eine handgelöttete Adapterplatine welche fest mit dem Gehäuse des Raspberry Pis verschraubt ist und dessen GPIOs mit den Pins der Platine verbindet auf welcher der TDC7201 aufgelötet ist. Start- und Stoppsignal werden über koaxialkabel mit SMA Verbbindern geliefert. Diese werden noch kurz vor dem Bord über ein T-Stück auf  $50\Omega$  abgeschlossen, da das TDC Board an sich eher einen offenen Abschluss darstellt.



**Abbildung 5:** Der Rspberry Pi ist über den SPI Bus (GPIO 10 MOSI, GPIO 9 MISO, GPIO 8 CE0 und GPIO 11 SCLK) mit dem TDC Board verbunden. Zudem liefert der Raspberry Pi die benötigte Betriebsspannung von  $V_{DD} = 3,3\text{ V}$ . Außerdem ist an GPIO 4 der Trigger-, an GPIO 17 der Enable-, an GPIO 22 der OEN und an GPIO 5 der Interrupeingang des TDC Boards angeschlossen.

---

## **4 Durchführung**

- 4.1 Auflösung des TDC bestimmen**
- 4.2 Probleme bei der Messung mittels TDC**
- 4.2.1 Geschwindigkeit des Delaygenerators**
- 4.2.2 Geschwindigkeit des TDC**
- 4.3 Messungen mit dem Oszilloskop**
- 4.4 Messungen mit dem Time Tagger**

## **5 Auswertung**

## **6 Diskussion**

## **Anhang**

Programmcode