

Messung der spektralen Quanteneffizienz von Photomultipliern

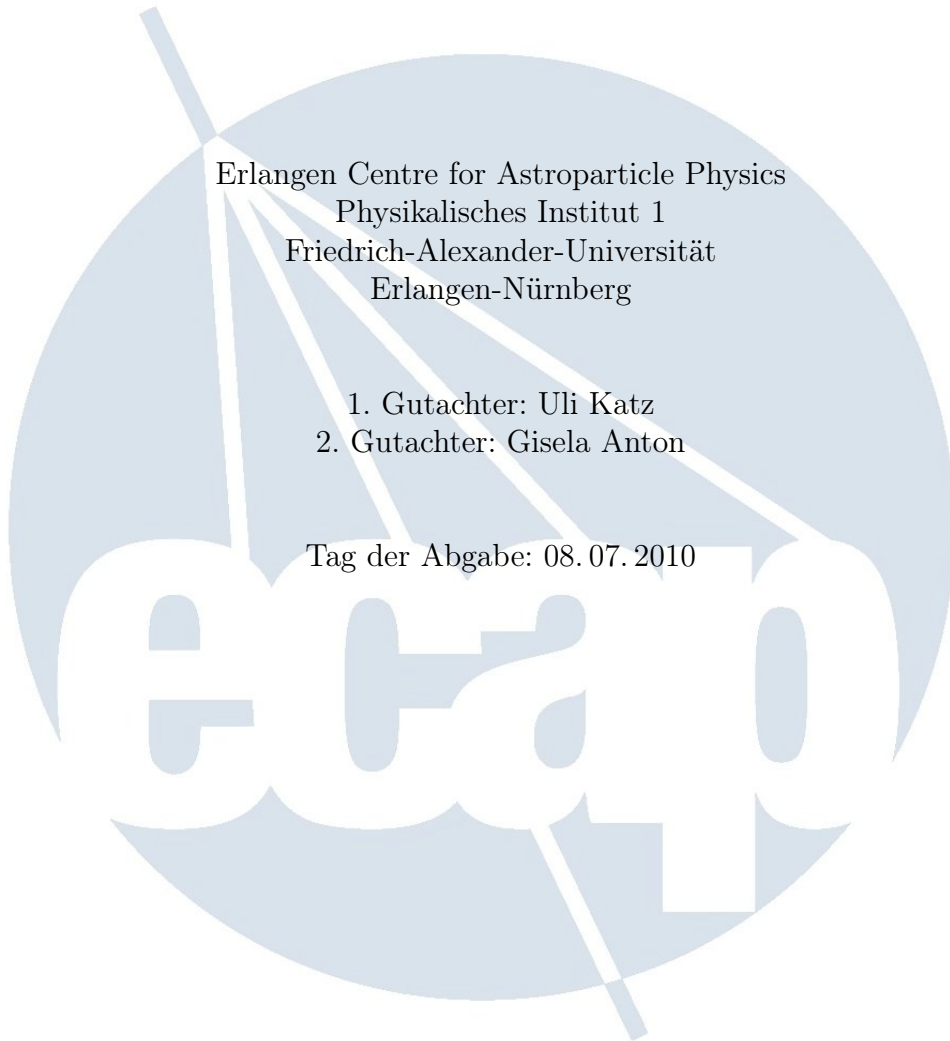
Bachelorarbeit

vorgelegt von
Jonas Reubelt

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut 1
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

1. Gutachter: Uli Katz
2. Gutachter: Gisela Anton

Tag der Abgabe: 08.07.2010



Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	3
1.1	KM3NeT	3
1.2	Physikalische Grundlagen	3
1.2.1	Photomultiplier	3
1.2.2	Photoelektrischer Effekt und Quanteneffizienz	4
2	Messungen und Auswertung	6
2.1	Messaufbau	6
2.2	Messvorgang und Auswertung	6
2.3	Kalibrierungsmessung zur Festlegung der Filter und Messbereiche	8
2.4	Erstellen eines geeigneten Messprogramms	10
2.5	Erste Messung der Quanteneffizienz mit Hamamatsu R6233	10
2.5.1	Mess- und Programmeinstellungen	10
2.5.2	Messkurve	10
2.5.3	Auswertung und Verbesserungsansätze	12
2.6	Verbesserung der Messung	12
2.6.1	Anpassung des Messprogramms und Variation der Messparameter	12
2.7	Suche nach der Ursache der Sprünge beim Filterwechsel	16
2.7.1	Filterabhängige Quanteneffizienz bei gleichen Wellenlängen	16
2.8	Streulicht als Ursache der Sprünge beim Filterwechsel	17
2.8.1	Sichtbares Streulicht im Monochromator	17
2.8.2	Erklärung des ersten Sprunges mit der Streulichttheorie	17
2.8.3	Berechnung des Streustroms bei der Messung mit der Photodiode	17
2.8.4	Lösungsvorschlag	19
2.8.5	Messung mit Notchfilter	20
2.9	Xenon-Lampe	21
2.9.1	Spektrum der Xenon-Lampe	21
2.9.2	QE-Messung mit der Xenon-Lampe	21
2.10	Zusammenfassung	27

Kapitel 1

Physikalische Grundlagen

1.1 KM3NeT

Das **KM3 Neutrino Teleskop**, ein Kubikkilometer großes Neutrino-teleskop, ist ein Zukunftsprojekt für Tiefseeforschung und Astroteilchenphysik. Hauptsächlich sollen damit Neutrinos von weit entfernten astrophysikalischen Quellen untersucht werden. Dies sind z.B. Gamma Ray Bursts, Supernovae oder kollidierende Sterne. Außerdem können Langzeitstudien von der Tiefseenumgebung gemacht werden. Es ist Teil der “List of Opportunities of the European Strategy Forum for Research Infrastructures“ (ESFRI). 40 Institute aus zehn Ländern arbeiten an diesem Projekt, dessen Umsetzung noch nicht fest steht. Hochenergetische Neutrinos sollen indirekt durch das von ihren Sekundärteilchen verursachte Cherenkov-Licht nachgewiesen werden. Diese optische Detektionsweise wird mithilfe von Photomultipliern umgesetzt. Die Charakterisierung von Photomultipliern für dieses Projekt ist Gegenstand dieser Arbeit.[1],[2]

1.2 Physikalische Grundlagen

1.2.1 Photomultiplier

Photomultiplier werden eingesetzt, um Vorgänge zu untersuchen, die sich durch Lichtemission bemerkbar machen. Das Licht wird im Photomultiplier in einen messbaren Strom umgewandelt. Aufgrund der großen Verstärkungen, die mit einem Photomultiplier möglich sind, (Verstärkung $\sim 10^6 - 10^7$) können sogar einzelne Photonen nachgewiesen werden.

Ein Photomultiplier besteht aus einer Glasröhre, in der eine Photokathode, Fokus-Elektroden, mehrere Dynoden und eine Anode im Vakuum platziert sind. Trifft auf das Einlassfenster der Röhre Licht, so löst es aus der Photokathode durch photoelektrischen Effekt Photoelektronen aus. Diese Photoelektronen werden durch eine Fokus-Elektrode gebündelt und auf die erste Dynode beschleunigt. Das Beschleunigen von Dynode zu Dynode geschieht mittels eines Spannungsteilers, der die Dynoden auf zunehmend positives Potential setzt. Trifft ein Elektron eine Dynode, so schlägt es aus ihr weitere sogenannte Sekundärelektronen aus. Diese Sekundärelektronen tun das gleiche bei der nächsten Dynode, was zu einer kaskadenartigen Vervielfachung der Ladungsträger führt. Zuletzt landen alle Elektronen auf der Anode und erzeugen einen messbaren Strom. Abbildung 1.1 [3] zeigt den schematischen Aufbau eines Photomultipliers. [3],[4]

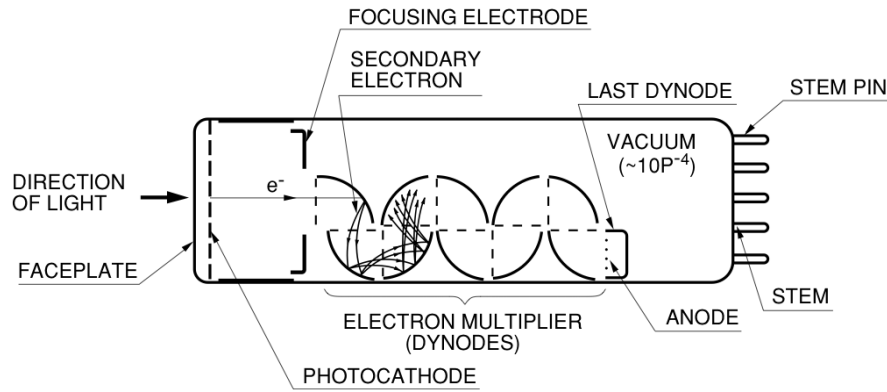


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers

1.2.2 Photoelektrischer Effekt und Quanteneffizienz

Unter dem extrinsischen photoelektrischen Effekt versteht man das Auslösen von Elektronen aus einem Material mithilfe von Photonen. Beim intrinsischen photoelektrischen Effekt gelangen Photoelektronen aufgrund der Absorption der Energie eines Photons vom Valenz- ins Leitungsband eines Stoffes. Besteht die Photokathode aus einem Halbleiter, so muss ein Elektron genügend Energie aufnehmen, um die Bandlücke zu überspringen und die Auslösearbeit zu überwinden. Nimmt ein Elektron die Energie eines Photons ($h\nu$) auf, so wird es ins Leitungsband gehoben und diffundiert zur Oberfläche der Photokathode. Ist die übrige Energie noch größer als die Auslösearbeit, so gelangt es ins Vakuum und kann beschleunigt und vervielfacht werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon genügend Energie an ein Elektron abgibt, so dass dieses als Photoelektron emittiert wird, wird als Quanteneffizienz bezeichnet. Gleichung 1.1 [3] zeigt, wie sich die Quanteneffizienz berechnen lässt.

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_\nu}{k} \cdot \left(\frac{1}{1 + 1/kL} \right) \cdot P_s \quad (1.1)$$

R : Reflexionskoeffizient

k : Koeffizient für volle Absorption von Photonen

P_ν : Wahrscheinlichkeit, dass die absorbierte Energie eines Elektrons ausreicht um aus der Photokathode auszutreten

L : mittlere Austrittslänge für Elektronen

P_s : Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron das die Photokathodenoberfläche erreicht, ausgelöst wird

ν : Frequenz des Lichtes

Abbildung 1.2 [3] zeigt das Bändermodell einer Alkali-Photokathode. EG ist die Energielücke zwischen Valenzband und Leitungsband, EA ist die Auslösearbeit. [3],[4]

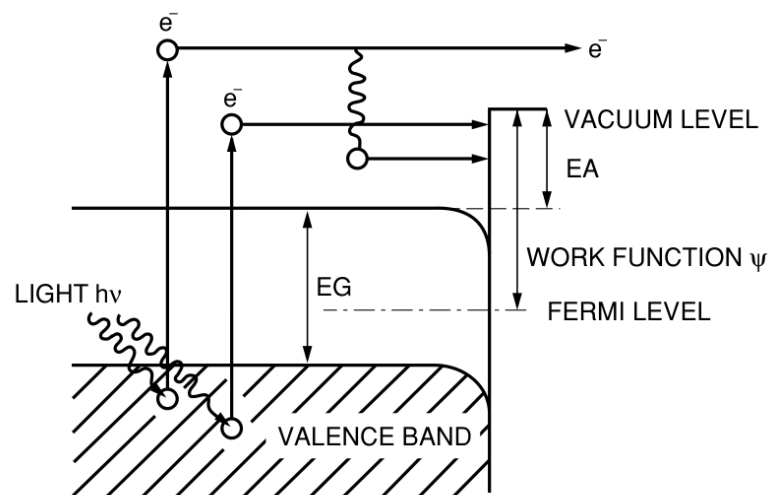


Abbildung 1.2: Bandstruktur eines möglichen Photokathodenmaterials

Kapitel 2

Messungen und Auswertung

2.1 Messaufbau

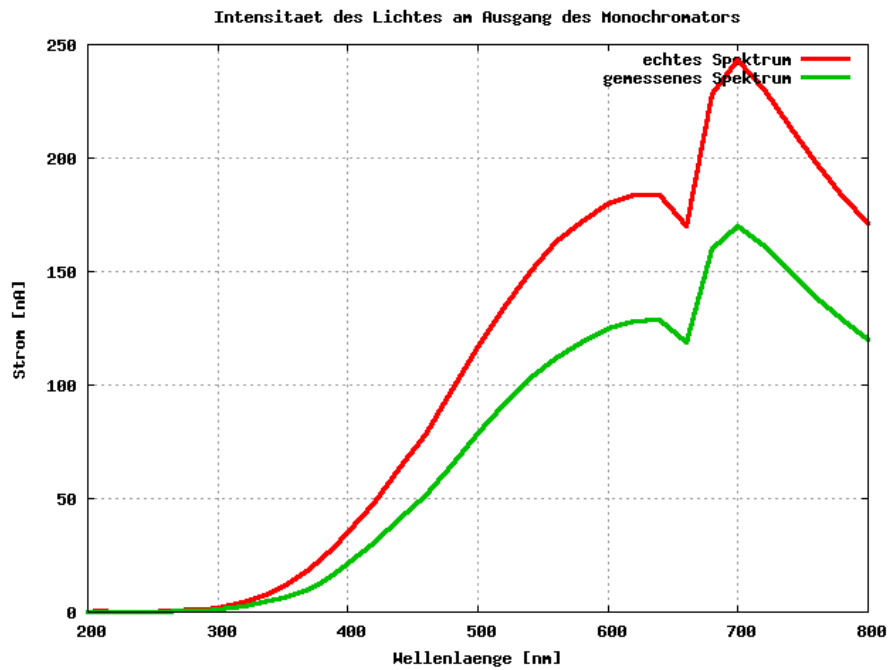
Um die spektrale Quanteneffizienz messen zu können, wird im Versuchsaufbau ein Monochromator verwendet. Dieser fängt Licht durch einen veränderbaren Spalt aus einer Halogenlampe ein und spaltet dieses mithilfe eines Gitters in sein Spektrum auf. Durch veränderbare Spiegelpositionen führt er beliebige Wellenlängen durch einen weiteren Spalt mit Shutter, hinter dem in einem Dunkelkasten Photodiode, Photomultiplier oder andere Messgeräte platziert werden können. Photomultiplier oder Photodiode können mit einem Picoamperemeter verbunden werden, welches die Ströme misst und anzeigt. Außerdem ist ein Filterwechsler mit sechs Slots vorhanden. Für Messungen mit Photomultipliern steht auch eine Hochspannungsversorgung zur Verfügung. Bei diesen Messungen wird der Photomultiplier allerdings ohne Verstärkung betrieben. Die Dynoden liegen alle auf dem gleichen Potential. Der Vorteil hierbei ist, dass der Effekt der sogenannten “collection efficiency“ wegfällt. Die “collection efficiency“ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photoelektron die effektive Fläche der ersten Dynode trifft. Wenn ein Elektron im verstärkenden Betrieb nicht die erste Dynode sondern die Anode trifft, geht es für die Verstärkung verloren. Im nicht verstärkenden Betrieb haben Messungen gezeigt, dass die “collection efficiency“ gleich eins ist. Hierzu wurden Ströme verglichen, die zwischen Anode und Erdpotential sowie zwischen Photokathode und Erdpotential gemessen wurden. Es trat kein messbarer Unterschied zwischen ihnen auf.

Monochromator, Filterwechsler und Picoamperemeter sind über ein Interface mit einem PC verbunden, von dem aus sie über ein Programm(Python) gesteuert und ausgelesen werden können.

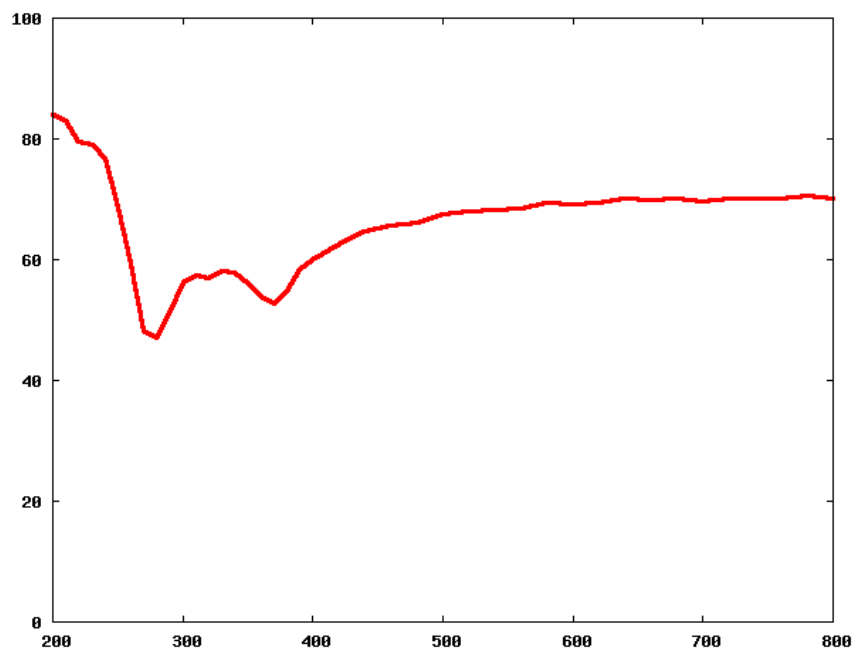
Abbildung 2.1 zeigt den gemessenen Strom mit der Photodiode über den gesamten Messbereich (grün) und den durch die Quanteneffizienz dividierten echten Intensitätsverlauf (rot).

2.2 Messvorgang und Auswertung

Bei jeder Messung mit einem Photomultiplier wird die gleiche Messung immer mit einer Referenzphotodiode vollzogen, deren Quanteneffizienz in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Um die Quanteneffizienz des Photomultipliers zu erhalten, wird jeder Messpunkt der Messung mit dem PMT durch den entsprechenden Messpunkt der Messung mit der PHD geteilt und dann mit der entsprechenden Quanteneffizienz der PHD multipliziert. Zusätzlich werden durch diese Methode unerwünschte Effekte wie z.B. nicht konstante Leistungsdichte der Halogenlampe bei verschiedenen Frequenzen eliminiert. Der Dunkelstrom wird sowohl mit der Photodiode als auch mit dem Photomultiplier gemessen. Der Umgang mit den Dunkelströmen ist Hauptbestandteil die-

Abbildung 2.1: *Spektrum der Halogenlampe*

ser Arbeit. Ziel war es, die Messungen immer weiter zu verbessern und den systematischen Fehler so klein wie möglich zu machen.

Abbildung 2.2: *Spektrale Quanteneffizienz der im Versuch verwendeten Photodiode*

2.3 Kalibrierungsmessung zur Festlegung der Filter und Messbereiche

Bei den Experimenten wurden zwei verschiedene Photomultiplier verwendet, XP53B2 von Photonis und R6233 von Hamamatsu. Sie sind auf Abbildung 2.3 zu sehen. Bei den verwendeten Photomultipliern existieren maximale Photokathodenströme, bei deren Überschreitung eine Sättigung einsetzt. Um den Messbereich zu begrenzen, werden verschiedene Filter für verschiedene Wellenlängenbereiche eingesetzt. Der maximale Strom soll hier etwa 10 nA betragen. Es wurde mit der Photodiode das komplette Spektrum mit verschiedenen Filtern aufgenommen. Die Messwerte wurden dann durch die Quanteneffizienz der Photodiode geteilt und mit der Quanteneffizienz des Photomultipliers (ungenau, vom Hersteller) multipliziert, um den zu erwartenden Strom am Photomultiplier zu erhalten.



Abbildung 2.3: Links: Photonis XP53B2. Rechts: Hamamatsu R6233

In Abbildung 2.4 sind die Intensitätsverläufe für verschiedene Filter eingezeichnet. Hieraus konnten die Filter für die Bereiche bestimmt werden, so dass der absolute Strom am Photomultiplier kleiner als 10 nA ist.

Tabelle 2.1 zeigt die verwendete Konfiguration der Filter und Messbereiche.

In Abbildung 2.5 ist die Transmissionseigenschaft des Farbfilters dargestellt.

Filternummer	Filterart	Transmission	Messbereich [nm]
1	Graufilter	0,158	410 - 620
2	Graufilter	0,251	380 - 410, 620 - 650
3	Graufilter	0,398	340 - 380, 650 - 700
4	kein Filter	1	nicht eingesetzt
5	Farbfilter	s. Abb. 2.3	300 - 340

Tabelle 2.1: Filterinformationen und Einsatzbereiche

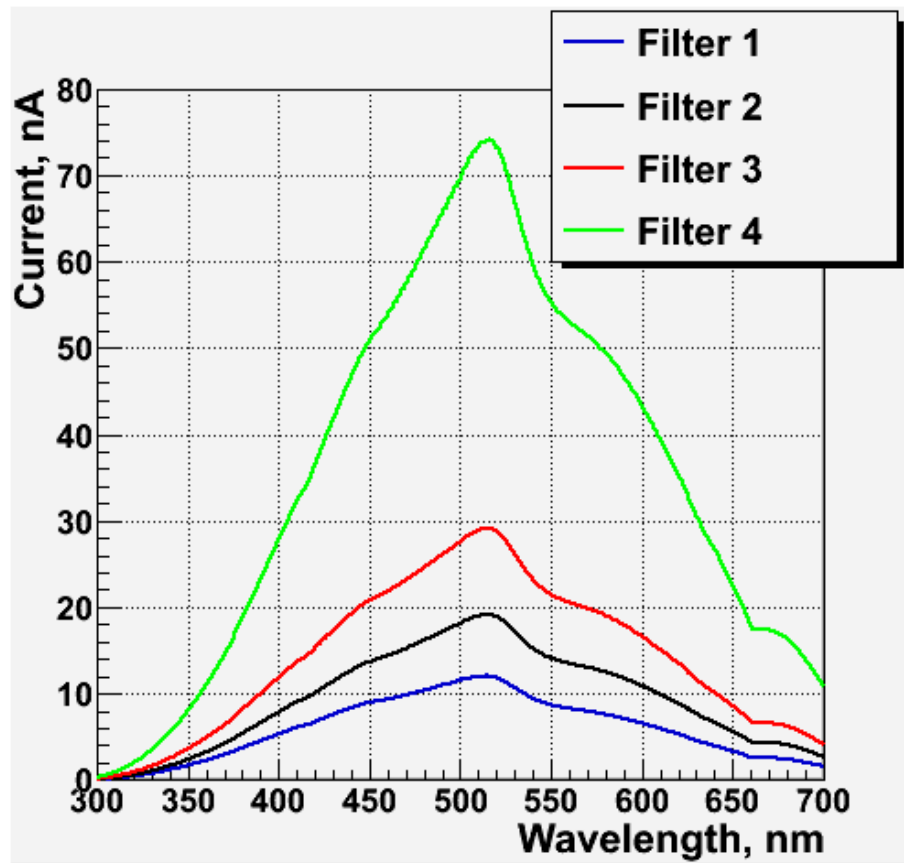


Abbildung 2.4: Erwarteter Strom bei spektraler Messung mit Photomultiplier

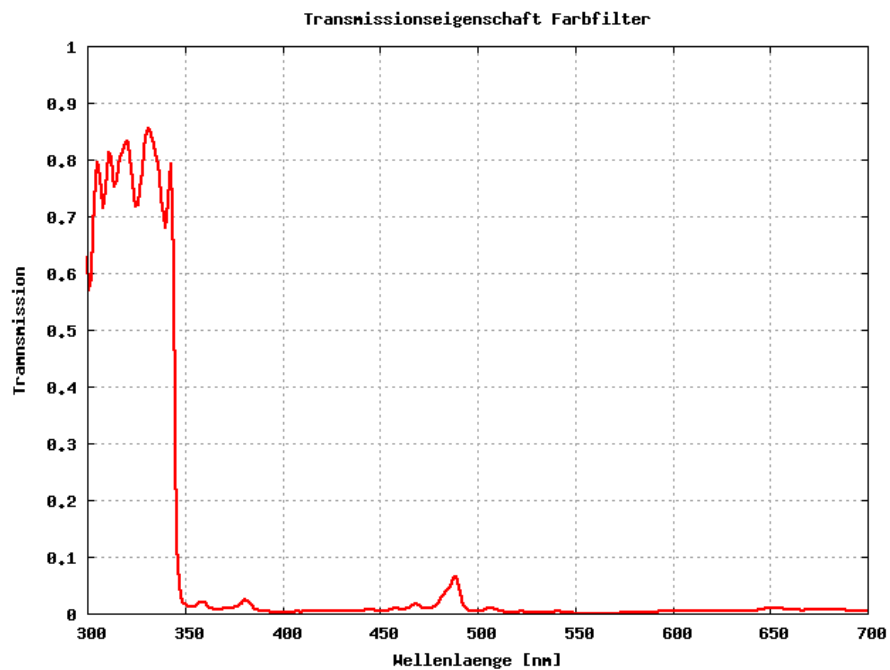


Abbildung 2.5: Gemessene Transmission des verwendeten Farbfilters (Filter 5)

2.4 Erstellen eines geeigneten Messprogramms

Beim Planen des Messablaufs wurde angestrebt, dass sowohl mit dem Photomultiplier als auch mit der Photodiode die gleichen Messbereiche und Einsatzbereiche für die Filter gelten. Das Messprogramm ist so aufgebaut, dass die Messbereiche in beliebigen Wellenlängenschritten abgescannt werden, bei jeder Wellenlänge mindestens ein Messwert aufgenommen und in eine Textdatei geschrieben wird. Außerdem finden zwischen den Messbereichen automatische Filterwechsel statt. Zusätzlich misst das Programm den Dunkelstrom einmal vor und einmal nach der Hauptmessung für jeden Filter einzeln. Der Dunkelstrom der Photodiode liegt im Promille-Bereich des gemessenen Stromes, wurde aber trotzdem berücksichtigt. Der Dunkelstrom des Photomultipliers ist im allgemeinen viel größer und daher wichtig für die weitere Auswertung. Der Dunkelstrom, der von den gemessenen Werten abgezogen wird, um die realen Ströme zu erhalten, wird zwischen den beiden vor und nach der Hauptmessung gemessenen Dunkelströmen interpoliert. Ein schon vorhandenes Auswertungsprogramm wurde leicht angepasst und subtrahiert die Dunkelströme, teilt die so entstandenen PMT Werte durch die PHD Werte, multipliziert sie mit der Quanteneffizienz der PHD und stellt sie graphisch dar.

2.5 Erste Messung der Quanteneffizienz mit Hamamatsu R6233

2.5.1 Mess- und Programmeinstellungen

Die erste Messung erfolgte nach genanntem Schema. Die Zeit zwischen der Aufnahme von Messwerten bei aufeinanderfolgenden Wellenlängen betrug 0,5 Sekunden. Der Messbereich am Amperemeter wurde ≤ 100 nA gewählt. Der Photomultiplier wurde ohne Verstärkung betrieben, lediglich eine Absaugspannung wurde zwischen Photokathode und erster Dynode angelegt. Im Verstärkungsbetrieb der Photomultiplier sorgt die Spannungsteilerkette für bestimmte Potentialdifferenzen zwischen Photokathode, Dynoden und Anode. Bei den beiden verwendeten Photomultipliern beträgt die Potentialdifferenz zwischen Photokathode und erster Dynode im normalen Verstärkungsbetrieb 333,3 V (Hamamatsu R6233) und 213,6 V (Photonis XP53B2). In Abschnitt 2.6.1 wird deutlich, dass bei einer Variation der Spannung von 300 auf 200 V keine Veränderungen der Quanteneffizienz zu erkennen sind. Daraus folgt, dass sogar schon 200 V ausreichen, um alle ausgelösten Elektronen abzusaugen. Für beide Photomultiplier wurde eine Standardspannung von 300 V gewählt.

2.5.2 Messkurve

Abbildung 2.6 zeigt die gemessene spektrale Quanteneffizienz des Photomultipliers R6233 von Hamamatsu. Der Maximalwert liegt hier bei etwa 27% zwischen 380 und 390 nm. Die farbigen Bereiche kennzeichnen die verwendeten Filter im jeweiligen Wellenlängenabschnitt. Der Zick-Zack-Verlauf, der im ersten Abschnitt deutlich ausgeprägter ist als bei höheren Wellenlängen, fällt auf. Die Intensitäten sowohl am Photomultiplier als auch an der Photodiode bei kleineren Wellenlängen, hauptsächlich im Bereich 300 bis 350 nm, sind sehr viel kleiner als die bei hohen Wellenlängen. Dadurch machen sich Fehler, wie z.B. schwankende Leistung der Weißlichtlampe oder statistische Fehler des Amperemeters bei kleinen Wellenlängen deutlich stärker bemerkbar als bei großen Wellenlängen.

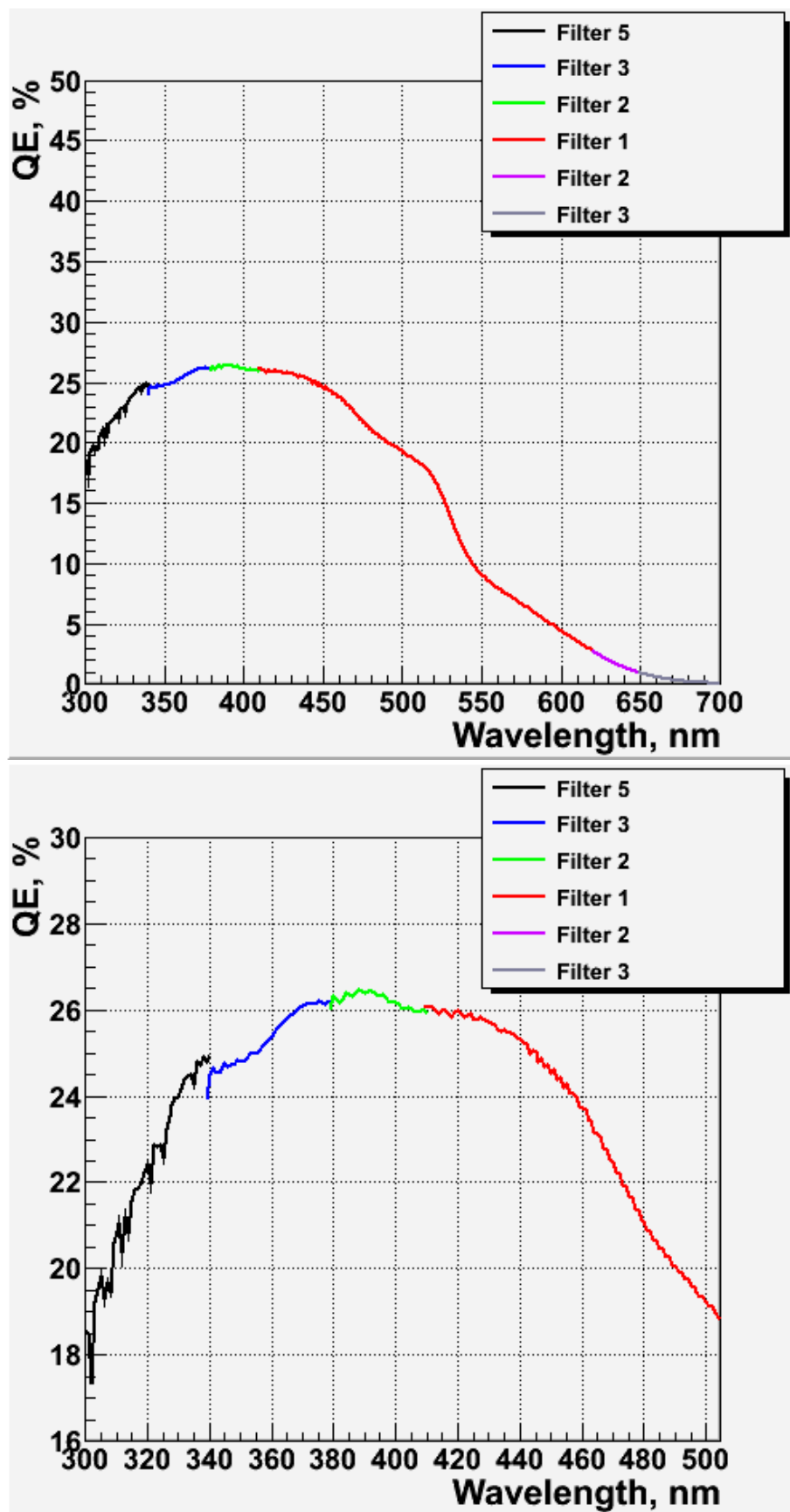


Abbildung 2.6: Gemessene Quanteneffizienz von PMT R6233

2.5.3 Auswertung und Verbesserungsansätze

Die Kurve beinhaltet viele Zacken und Sprünge, die bei kleinen Wellenlängen am stärksten sind und mit zunehmender Wellenlänge verschwinden. Ein Grund dafür könnte in der sehr kurzen Integrationszeit des Amperemeters liegen. Diese Zacken konnten entstehen, da das Amperemeter gewissen Schwankungen unterliegt. Dieses Problem könnte gelöst werden, indem bei gleicher Wellenlänge mehrere Messpunkte genommen werden und der Mittelwert errechnet wird. Zusätzlich könnte die Wartezeit zwischen den Messpunkten vergrößert werden.

2.6 Verbesserung der Messung

2.6.1 Anpassung des Messprogramms und Variation der Messparameter

Das Messprogramm wurde so modifiziert, dass über mehrere Messwerte der Mittelwert gebildet wird. Auch eine Veränderung der Wartezeit sowohl zwischen den Messpunkten bei verschiedenen Wellenlängen als auch bei den Messpunkten bei gleicher Wellenlänge fand statt. Angelegte Hochspannung und Lichtintensität wurden variiert. Zweiteres, indem die Öffnungsbreite des Eingangsspalts am Monochromator verändert wurde. Sichtbare Auswirkungen gab es hierbei nicht. Der Messbereich des Amperemeters wurde auf ≤ 20 nA festgelegt. Da die Messwerte mit der Photodiode ab etwa 470 nm einen höheren Messbereich des Amperemeters benötigen, wurde im Messprogramm eine Funktion zur automatischen Anpassung des Messbereiches übernommen.

Abbildung 2.7 zeigt eine weitere Messung mit dem Photomultiplier R6233 von Hamamatsu. Die verwendete Hochspannung betrug ebenfalls 300 V. Zu erkennen ist, dass die Zacken weitgehend aus der Messkurve verschwunden sind. Es fällt allerdings auf, dass beim Filterwechsel ein Sprung bleibt. Beim ersten Filterwechsel noch deutlich ausgeprägt, beim zweiten und dritten Filterwechsel noch vorhanden, aber sehr viel geringer. Es folgen weitere Messungen mit abgeänderten Parametern.

Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 zeigen gemessene Quanteneffizienzen mit dem Photomultiplier XP53B2 von Photonis. Die verwendete Spannung betrug bei Abbildung 2.8 200 V und bei Abbildung 2.9 300V. Es sind keine offensichtlichen Auswirkungen der Spannungsveränderung zu erkennen. Bei der Messung, die in Abbildung 2.9 dargestellt ist, wurde durch Vergrößerung der Spaltbreite am Eingang des Monochromators die Lichtintensität etwa verdoppelt. PMT XP53B2 hat, wie aufgrund der Datenblätter der Hersteller erwartet, eine deutlich höhere Quanteneffizienz im Spitzenbereich als Hamamatsu R6233. Er erreicht bei 375 nm etwa 40%. Auch bei diesem Photomultiplier ist der Sprung beim Filterwechsel ausgeprägt.

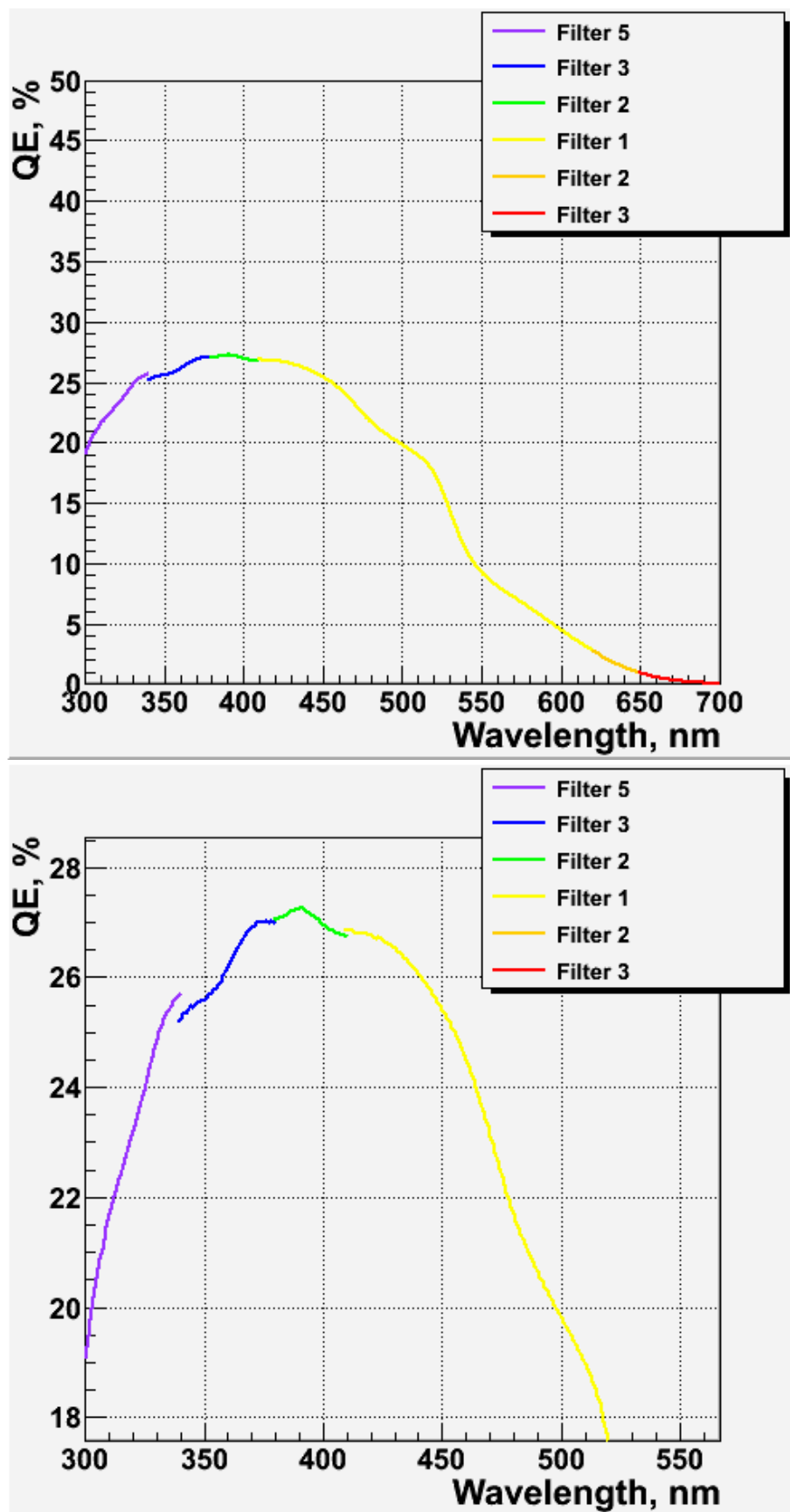


Abbildung 2.7: Quanteneffizienz Hamamatsu R6233 mit erhöhter Wartezeit zwischen den Strommessungen bei verschiedenen Wellenlängen und Mittelung von drei Messwerten

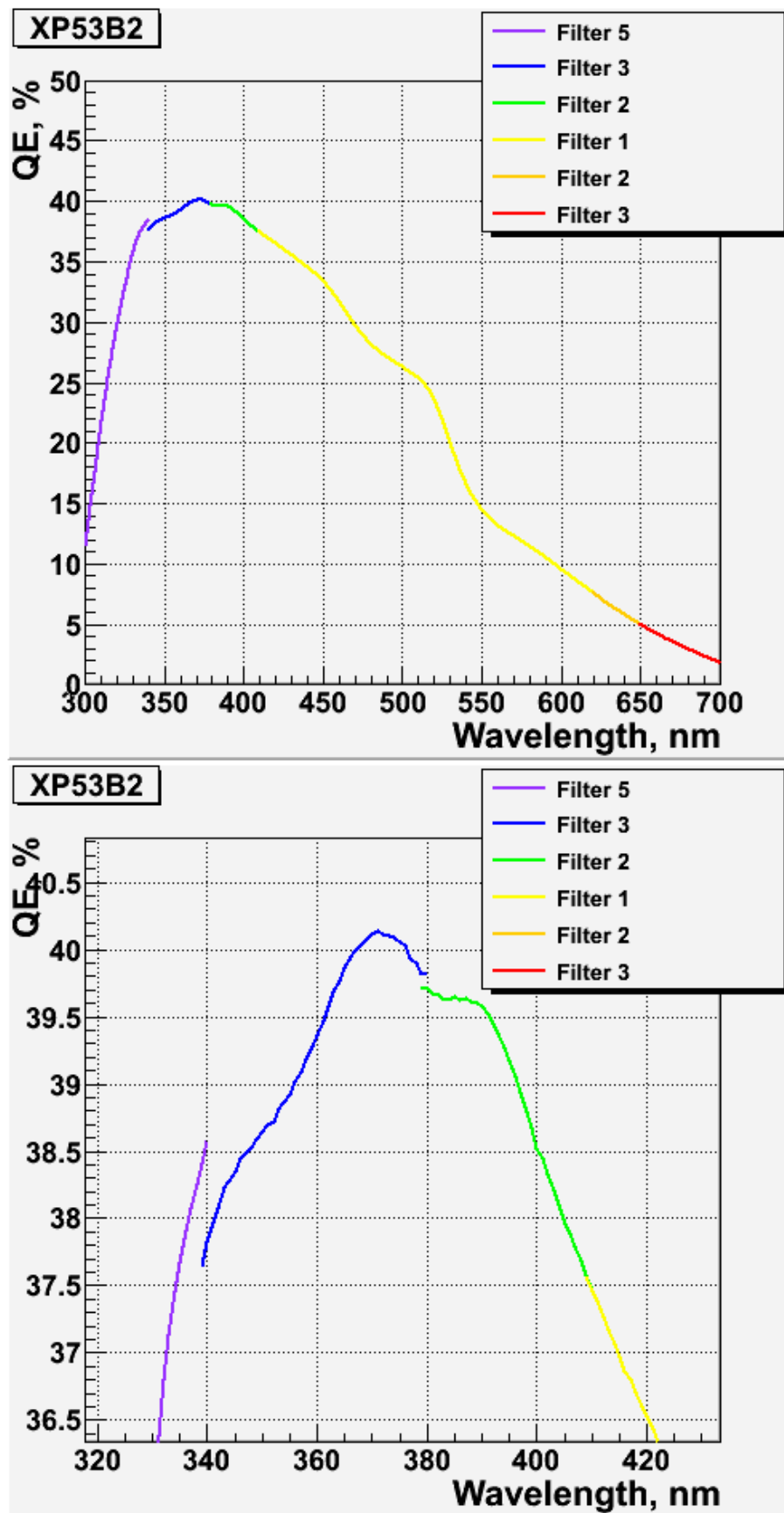


Abbildung 2.8: Quanteneffizienz: Photonis XP53B2 mit Mittelung von fünf Messwerten

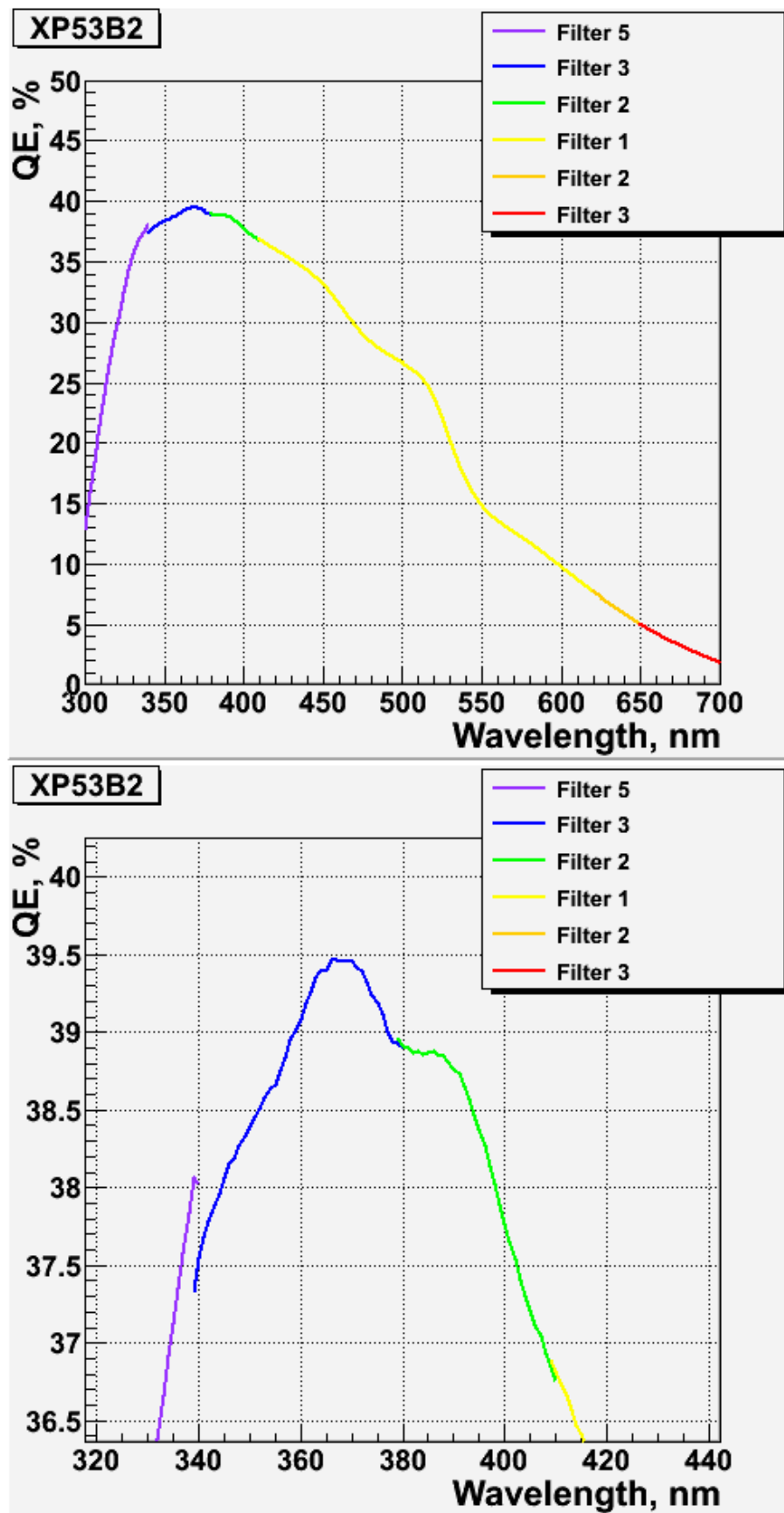


Abbildung 2.9: Quanteneffizienz: Photonis XP53B2 mit Mittelung von fünf Messwerten

2.7 Suche nach der Ursache der Sprünge beim Filterwechsel

2.7.1 Filterabhängige Quanteneffizienz bei gleichen Wellenlängen

Um zu untersuchen, ob die Quanteneffizienz des Photomultipliers vom verwendeten Filter abhängt, wurde die Quanteneffizienz bei gleichen Wellenlängen mit verschiedenen Filtern gemessen. Tabelle 2.2 zeigt die gemessenen Quanteneffizienzen mit verschiedenen Filtern bei gleichen Wellenlängen. Abbildung 2.10 zeigt diese graphisch. Bei allen Wellenlängen liegt die gemessene

Wellenlänge [nm]	Filternummer	Quanteneffizienz [%]
330	1	32,21
	2	31,92
	3	32,04
	5	32,98
335	1	33,88
	2	33,72
	3	33,69
	5	34,66
340	1	35,10
	2	34,95
	3	35,01
	5	35,80

Tabelle 2.2: Filterabhängige Quanteneffizienz(PMT XP53B2)

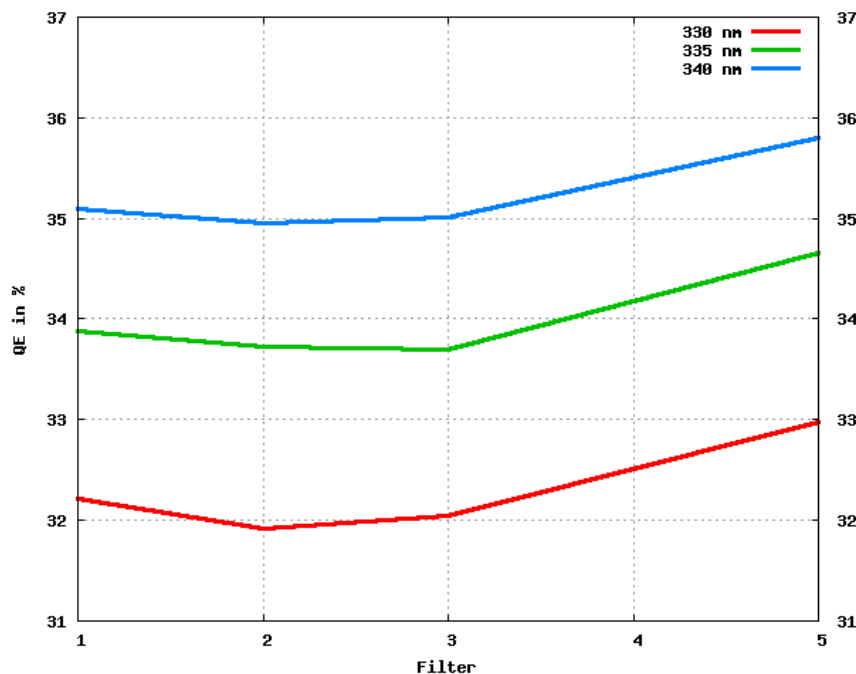


Abbildung 2.10: Filterabhängige Quanteneffizienz von XP53B2

Quanteneffizienz mit dem Farbfilter (Filter 5) um knapp 1%-Punkt höher als bei den Graufiltern. Es kam die Vermutung auf, dass bei dem Farbfilter weniger Dunkelstrom gemessen wird als bei den Graufiltern. Die Eigenschaft des Farbfilters, dass er jegliches Licht, außer solches

etwa zwischen 300 und 340 nm, abschirmt, bedeutet auch, dass er Dunkelstrom, der möglicherweise aus einem diffusen Spektrum besteht, zu einem höheren Anteil abschirmt als dies die Graufilter tun.

2.8 Streulicht als Ursache der Sprünge beim Filterwechsel

2.8.1 Sichtbares Streulicht im Monochromator

Schaut man sich den ausfallenden Lichtstrahl des Monochromators bei einer Wellenlängeneinstellung von 200 nm an, so erkennt man weißes Licht, was bei eigentlich monochromatischem Licht fehlerhaft ist. Dieses Streulicht könnte aus gewissen Streuprozessen an Kanten der Spiegel und Linsen oder am Gitter des Monochromators resultieren. Wie dieses Streulicht in Verbindung mit den Sprüngen in der Quanteneffizienzkurve gebracht werden kann, ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

2.8.2 Erklärung des ersten Sprunges mit der Streulichttheorie

Der Streustrom, der aufgrund der Fehler des Gitters im Monochromator entsteht, ist "weiß", also eine Überlagerung von vielen Wellenlängen. Er wird sowohl vom Photomultiplier als auch von der Photodiode bei jeder Messung mit geöffnetem Shutter mitgemessen und ist vermutlich abhängig von der eingestellten Wellenlänge. Aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit von Farb- und Graufilter wird in den verschiedenen Messbereichen ein unterschiedlicher Streustrom gemessen. Auch bei den Sprüngen, bei denen bei gleicher Wellenlänge mit verschiedenen Filtern gemessen wird, treten Differenzen des Streustroms auf. Die Intensität des multifrequenten Streulichts wird durch den Farbfilter, der große Teile von ihm abschirmt, deutlich stärker reduziert als dies durch einen der Graufilter geschieht. Auch durch die verschiedenen Graufilter wird der Streustrom verschieden stark absorbiert. Dieser Effekt würde allerdings durch die Referenzmessung eliminiert, falls der gemessene Streustrom beim Photomultiplier und bei der Photodiode gleich wären. Die Quanteneffizienz der Photodiode ist aber über einen größeren Bereich viel höher als die Quanteneffizienz der Photomultiplier, somit ist der von der Photodiode erwartete Streustrom deutlich höher als der vom Photomultiplier. Bei der Berechnung der Quanteneffizienz des Photomultipliers wird die Intensität des Photomultipliers durch eine im Verhältnis höhere Intensität der Photodiode geteilt, und weil dieser Effekt beim Graufilter deutlicher zum Tragen kommt als beim Farbfilter, ist der Quanteneffizienzwert beim Filter 3 geringer als der beim Filter 5. Dadurch kommt dieser Theorie zufolge der Sprung beim Filterwechsel zustande.

2.8.3 Berechnung des Streustroms bei der Messung mit der Photodiode

Da der Streustrom bei der Photodiodenmessung größer zu erwarten ist als bei der Messung mit dem Photomultiplier und nicht beide Streuströme gleichzeitig festgelegt werden können, wird im Folgenden angenommen, dass nur bei der Photodiodenmessung Streustrom existiert. Der Streustrom für Filter 3 wird wieder für den Fall berechnet, dass der Sprung beim ersten Filterwechsel verschwindet und kein Streustrom beim Filter 5 existiert. Es gilt:

$$P_{m5} = P_{wl}, \quad P_{m3} = P_{wl3} + P_s, \quad I_{m5,3} = I_{wl5,3} + I_{d5,3} \quad (2.1)$$

unter Vernachlässigung des sehr kleinen Dunkelstroms der PHD, mit

P_m, I_m : gemessener Strom PHD, PMT

P_{wl}, I_{wl} : erwarteter Strom für diese Wellenlänge PHD, PMT

I_d : Dunkelstrom PMT

P_s : Streustrom PHD

Die im Index nachgestellte Ziffer dient zur Kennzeichnung des benutzten Filters.

Für verschwindenden Sprung:

$$\frac{I_{wl5}}{P_{wl5}} = \frac{I_{wl3}}{P_{wl3}} \Rightarrow \frac{I_{m5} - I_{d5}}{P_{m5}} = \frac{I_{m3} - I_{d3}}{P_{m3} - P_s} \quad (2.2)$$

Aufgelöst nach dem Streustrom:

$$P_s = P_{m3} - (I_{m3} - I_{d3}) \cdot \frac{P_{m5}}{I_{m5} - I_{d5}} \quad (2.3)$$

Der berechnete Streustrom für Filter 3 wird dann von den Messwerten im Messbereich des Filters abgezogen. Dann wird der Streustrom wie oben für den nächsten Filterbereich berechnet, so dass der jetzt veränderte zweite Sprung verschwindet. Genauso wird mit dem dritten Sprung verfahren. Die so errechneten Streuströme sollten proportional zur Transmission der Filter, mit denen sie gemessen wurden, sein. Tabelle 2.3 und 2.4 zeigen die mithilfe der Gleichungen

Sprung	Wellenl. [nm]	Filter	I_s [nA]	Transm.	$I_{s1}/T_1 \cdot T_{2,3}$	P_{wl} [nA]	I_{wl} [nA]	I_d [nA]
1	340	3	0,0723	0,398	-	3,5672	2,2422	0,2749
2	380	2	0,0543	0,251	0,456	6,5993	4,6104	0,2709
3	410	1	0,0494	0,158	0,287	8,7405	5,1578	0,2683
-	-	5	0	-	-	5,7527	3,6159	0,2637

Tabelle 2.3: Streuströme und Transmissionen der einzelnen Filter

2.1, 2.2 und 2.3 berechneten Ströme. In der vierten Spalte von rechts sind die Streuströme für Filter 2 und 1 aufgeführt unter der Annahme, dass der Streustrom bei Filter 3 richtig ist und dass sich der Streustrom linear zur Filtertransmission verhält. Da die Werte der Streuströme nicht übereinstimmen, liegt nahe, dass die Gesamtintensität des Streustroms mit der Wellenlängeneinstellung am Monochromator variiert und der vernachlässigte Streustrom beim Photomultiplier doch eine Rolle spielt. Aus diesen Gründen ist es sehr schwer, diesen Fehler zu eliminieren. Abbildung 2.11 zeigt eine Quanteneffizienzmessung bei der diese berechneten Streuströme die Sprünge ausgleichen.

Sprung	Wellenl. [nm]	Filter	I_s [nA]	Transm.	$I_{s1}/T_1 \cdot T_{2,3}$	P_{wl} [nA]	I_{wl} [nA]	I_d [nA]
1	340	3	0,0968	0,398	-	7,6027	4,9909	0,5876
2	380	2	0,0648	0,251	0,610	13,2136	9,4071	0,5802
3	410	1	0,0193	0,158	0,384	17,0192	10,2107	0,5756
-	-	5	0	-	-	12,7020	8,3385	0,5650

Tabelle 2.4: Streuströme und Transmissionen der einzelnen Filter mit doppelter Lichtintensität

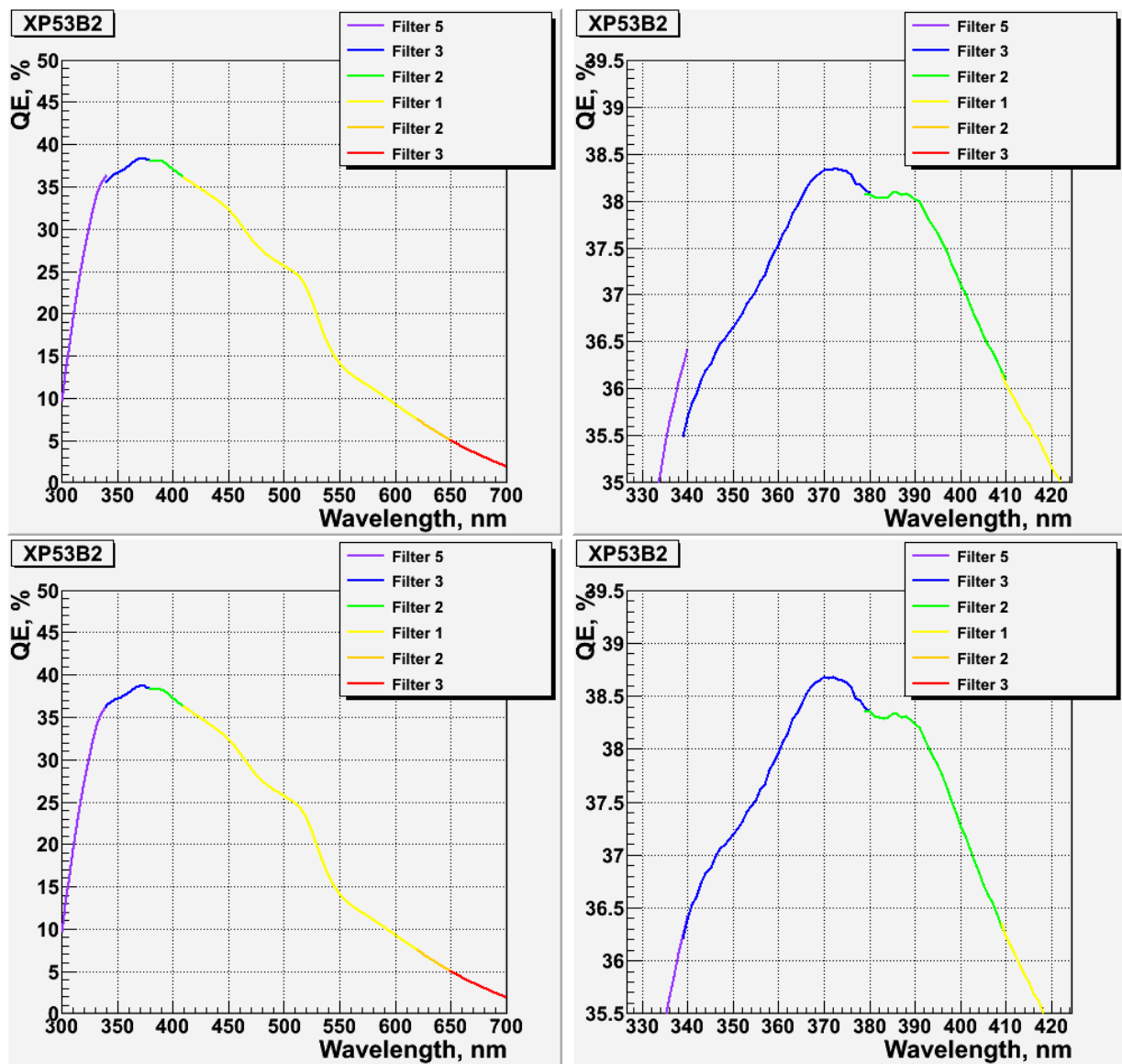


Abbildung 2.11: Quanteneffizienz von XP53B2 oben ohne Einbeziehung des Streustroms, unten mit berechnetem Streustrom

2.8.4 Lösungsvorschlag

Zur Bestimmung des Streustromes bei bestimmten Wellenlängen, z.B. bei den Wellenlängen der Sprünge, könnten sogenannte Notch-Filter verwendet werden. Notch-Filter blockieren nur einen kleinen Wellenlängenbereich von etwa 10 nm bis zu optischer Dicke 7. Der restliche Spektralbereich wird fast vollständig transmittiert. Stellt man die Wellenlänge, die der Notch-Filter blockiert, am Monochromator ein und postiert den Notch-Filter zwischen Monochromator-Ausgang und Messinstrument, so sollte nur der Streustrom gemessen werden und ist zumindest für diese Wellenlänge bestimmt. Da der Streustrom wahrscheinlich aber stark variiert über das gesamte Spektrum, müsste der Streustrom für jede Wellenlänge bestimmt werden, was zumindest mit dieser Methode nahezu unmöglich ist. Es wäre daher für eine präzise Messung sicherlich einfacher, zu versuchen, durch Modifikation des Monochromators das Streulicht von Anfang an zu eliminieren oder es gar nicht erst entstehen zu lassen.

2.8.5 Messung mit Notchfilter

Bei dieser Messung wurde nur der Notchfilter am Ausgang des Monochromators verwendet. Es wurde der Strom gemessen im Bereich, in dem der Notch-Filter absorbiert. Der echte Dunkelstrom wurde automatisch dividiert, so dass nur der Streustrom zurückbleiben sollte. Es wurde sowohl mit der Photodiode, in Abbildung 2.12 dargestellt, als auch mit dem Photomultiplier, in Abbildung 2.13 dargestellt, gemessen. Der Notchfilter absorbiert bei 534,6 nm am stärksten.

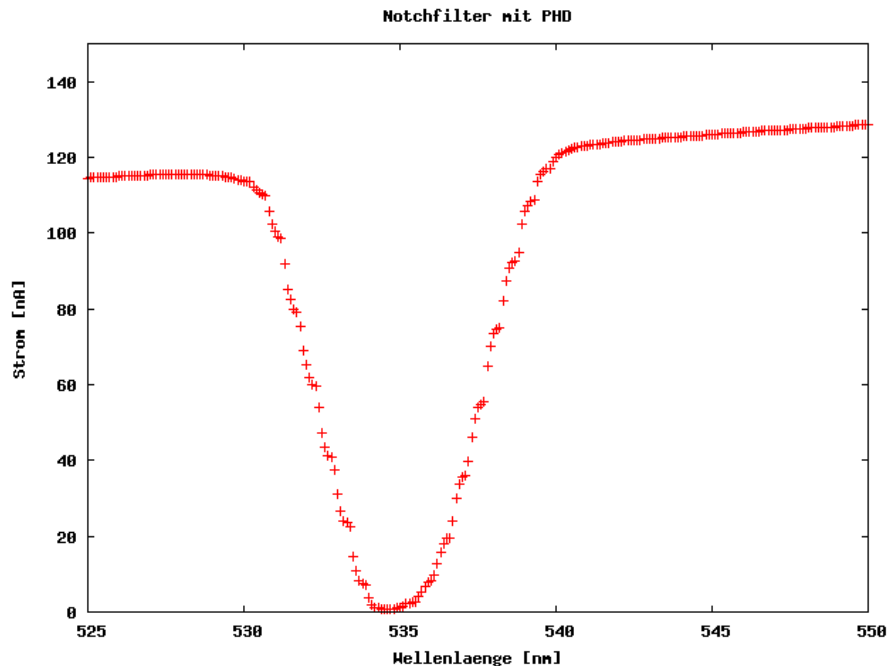


Abbildung 2.12: Absorption des Notch-Filters bei Messung mit der Photodiode

Bei der Messung mit der Photodiode fällt der gemessene Strom im Absorptionsbereich des Filters auf 0,76 nA ab. Der relative Abfall beträgt etwa 0,65 %. Bei der Messung mit dem Photomultiplier fällt der Strom auf 0,17 nA ab. Hier beträgt der relative Abfall etwa 0,52 %. Unter der Annahme, dass der vom Notchfilter durchgelassene Strom bei der Wellenlänge der Absorption noch sehr viel kleiner ist, wird der Reststrom als maximaler Streustrom identifiziert. Der Streustrom ist bei dieser Messung deutlich größer als in der Rechnung in 2.8.3. Gründe dafür können sein, dass in 2.8.3 der Streustrom bei der Messung mit dem Photomultiplier nicht berücksichtigt wurde und dass das Streulicht mit der Wellenlänge variiert. Die Wellenlänge des gemessenen Streustroms liegt bei 534,6 nm, deutlich verschieden zu den Wellenlängen der Sprünge in 2.8.3.

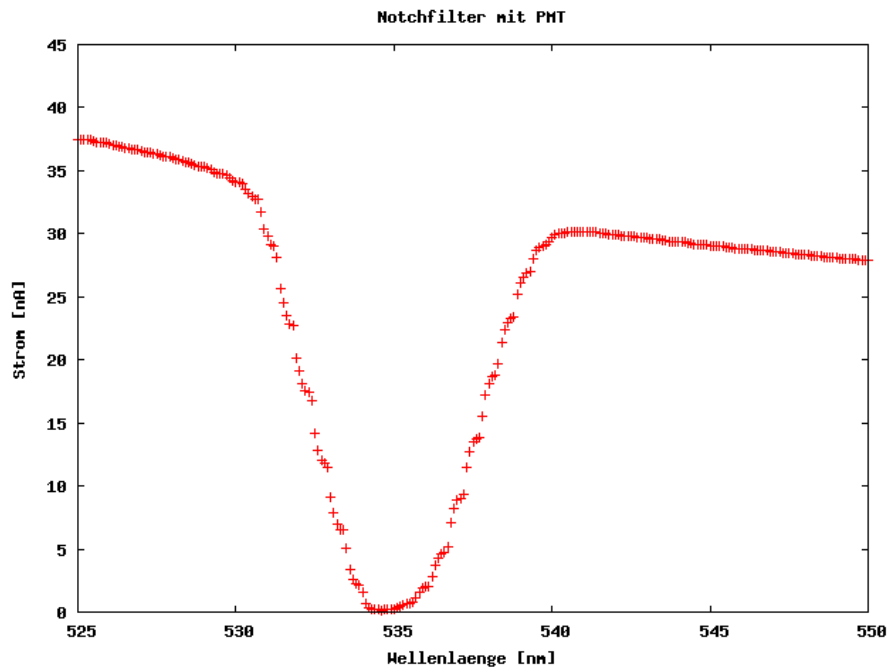


Abbildung 2.13: Absorption des Notch-Filters bei Messung mit PMT XP53B2

2.9 Xenon-Lampe

2.9.1 Spektrum der Xenon-Lampe

Statt der Halogenlampe wurde hier eine Xenonlampe verwendet, deren Spektrum über den zu messenden Wellenlängenbereich konstanter ist, d.h. die maximale Intensität, die bei etwa 470 nm liegt, ist nur etwa vier mal größer als die minimale, die bei 300 nm liegt. Daraus ergibt sich ein deutlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis bei kleinen Wellenlängen als dies mit der Halogenlampe der Fall war. Bei der Halogenlampe beträgt die Intensität bei 300 nm weniger als 1 % der Maximalintensität. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist bei der Halogenlampe deshalb kleiner, weil bei der Messung mit dem Photomultiplier der maximale Kathodenstrom von etwa 10 nA nie überschritten werden darf, der Strom bei minimaler Intensität des Lampenspektrums dann aber sehr klein wird. Bei gleichbleibenden Dunkelströmen ist daher das Signal-Rausch-Verhältnis klein. Bei der Xenonlampe ist der Strom bei minimaler Intensität immer noch groß genug, um ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen. Abbildung 2.14 zeigt das Spektrum der Xenonlampe.

2.9.2 QE-Messung mit der Xenon-Lampe

Aufgrund des besseren Signal-Rausch-Verhältnisses der Xenon-Lampe bei kleinen Wellenlängen hat der Streustrom eine verhältnismäßig geringe Bedeutung. Dies könnte die Höhe der Sprünge der Quanteneffizienz beim Filterwechsel verringern und auch die Messung während eines Filters verbessern. Die Mess- und Filterbereiche wurden zuerst neu kalibriert. Tabelle 2.5 zeigt die verwendeten Filterbereiche.

Die Abbildungen 2.15 und 2.16 zeigen die Quanteneffizienz der Photomultiplier XP53B2 und R6233. Auf beiden Grafiken ist zu erkennen, dass der Sprung beim Filterwechsel relativ klein und deutlich geringer als bei den Messungen mit der Halogenlampe sind. Das größere Signal-Rausch-Verhältnis lässt den Effekt des Streulichts fast verschwinden. Das verringert den systematischen Fehler bei der Messung.

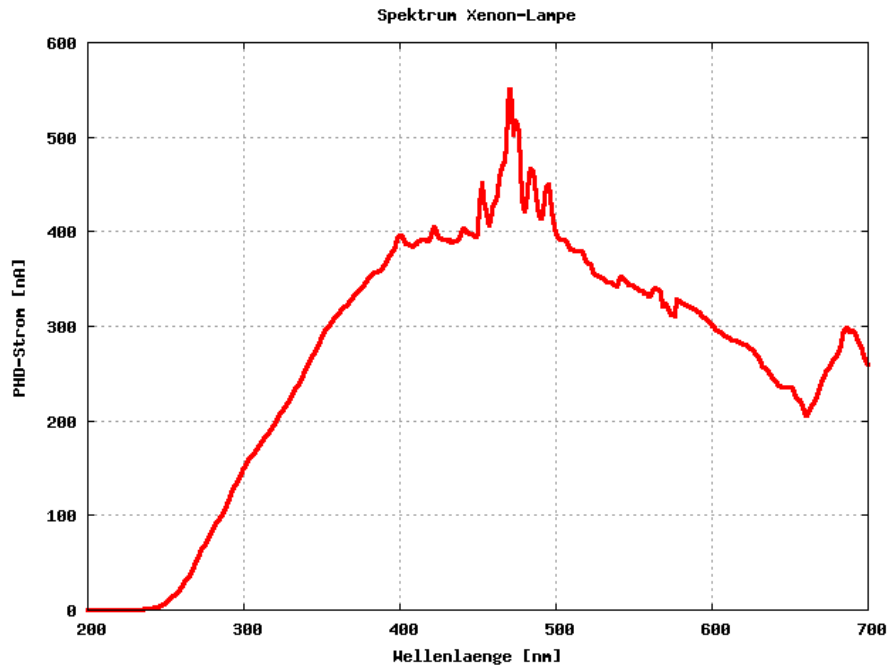


Abbildung 2.14: Gemessenes Spektrum der Xenon-Lampe

Messbereich	Wellenlänge [nm]	Filter	Transmission
1	300 - 340	5	-
2	340 - 530	3	0,398
3	530 - 700	4	1

Tabelle 2.5: Filterbereiche bei der QE Messung mit der Xenonlampe

Die Abbildungen 2.17 und 2.18 zeigen gemessene Quanteneffizienzen für die zwei Photomultiplier im Vergleich, einmal mit der Xenonlampe und einmal mit der Halogenlampe. Im Bereich zwischen 340 bis 380 nm wird bei beiden Grafiken deutlich, dass die Quanteneffizienz, die mit der Halogenlampe gemessen wurde, kleiner ist im Vergleich zur Messung mit der Xenonlampe. Aufgrund des geringeren Signal-Rausch-Verhältnisses bei der Halogenlampe in diesem Bereich, wird der gemessene Strom mit der Photodiode durch den zusätzlichen Streustrom relativ gesehen stärker verändert als bei der Messung mit der Xenonlampe. Dadurch wird bei der Quanteneffizienzberechnung durch einen zu hohen Photodiodenstrom geteilt und der Wert der Quanteneffizienz ist geringer. Beim Vergleich der beiden Messungen mit dem Photomultiplier R6233 ist auch im Bereich von 300 bis 340 nm eine Verschiebung zu erkennen. Auch hier ist von einer besseren Systematik bei der Messung mit der Xenonlampe, aufgrund des Signal-Rausch-Verhältnisses, auszugehen.

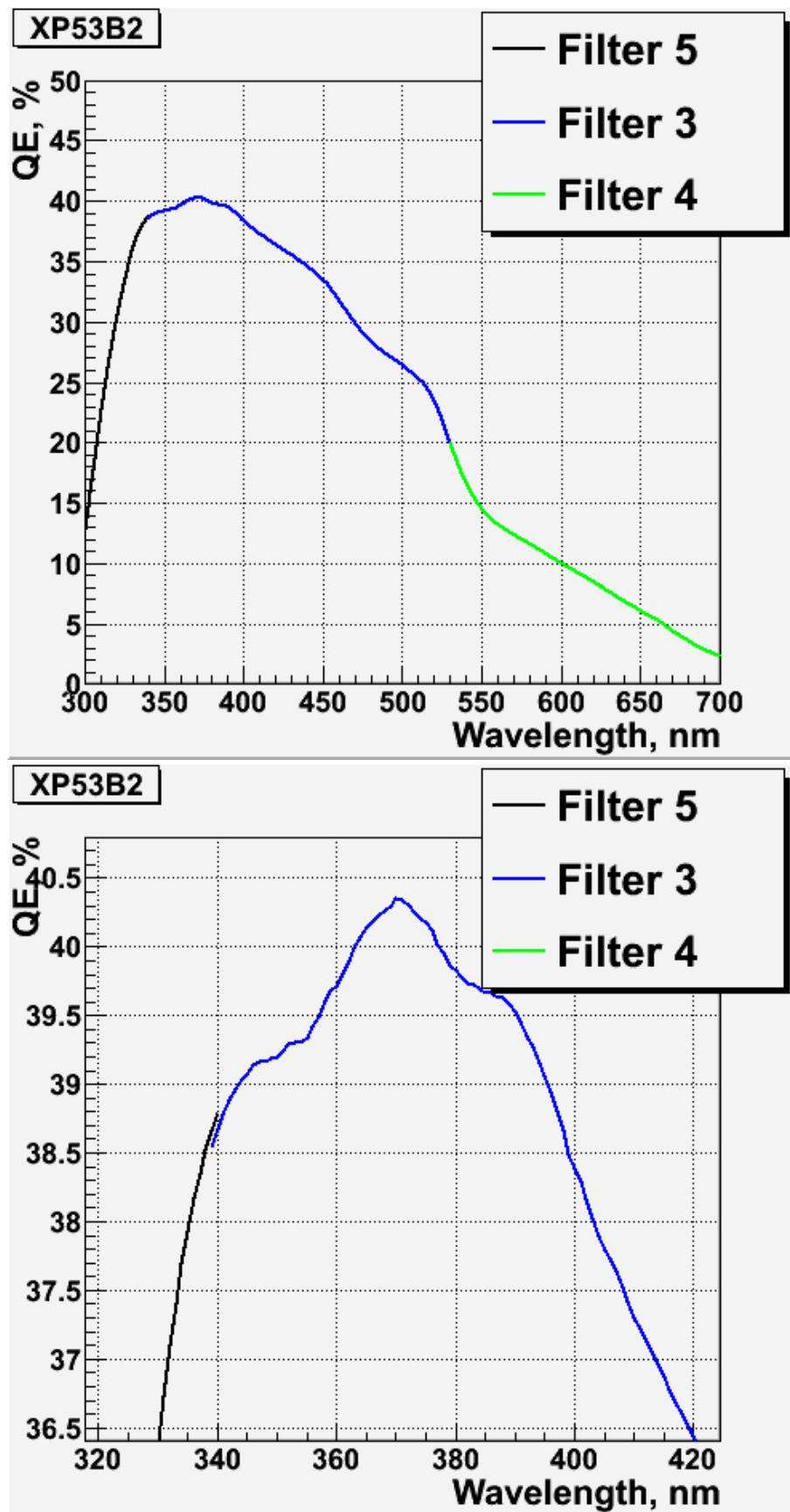


Abbildung 2.15: Quanteneffizienz von XP53B2 mit Xenon-Lampe

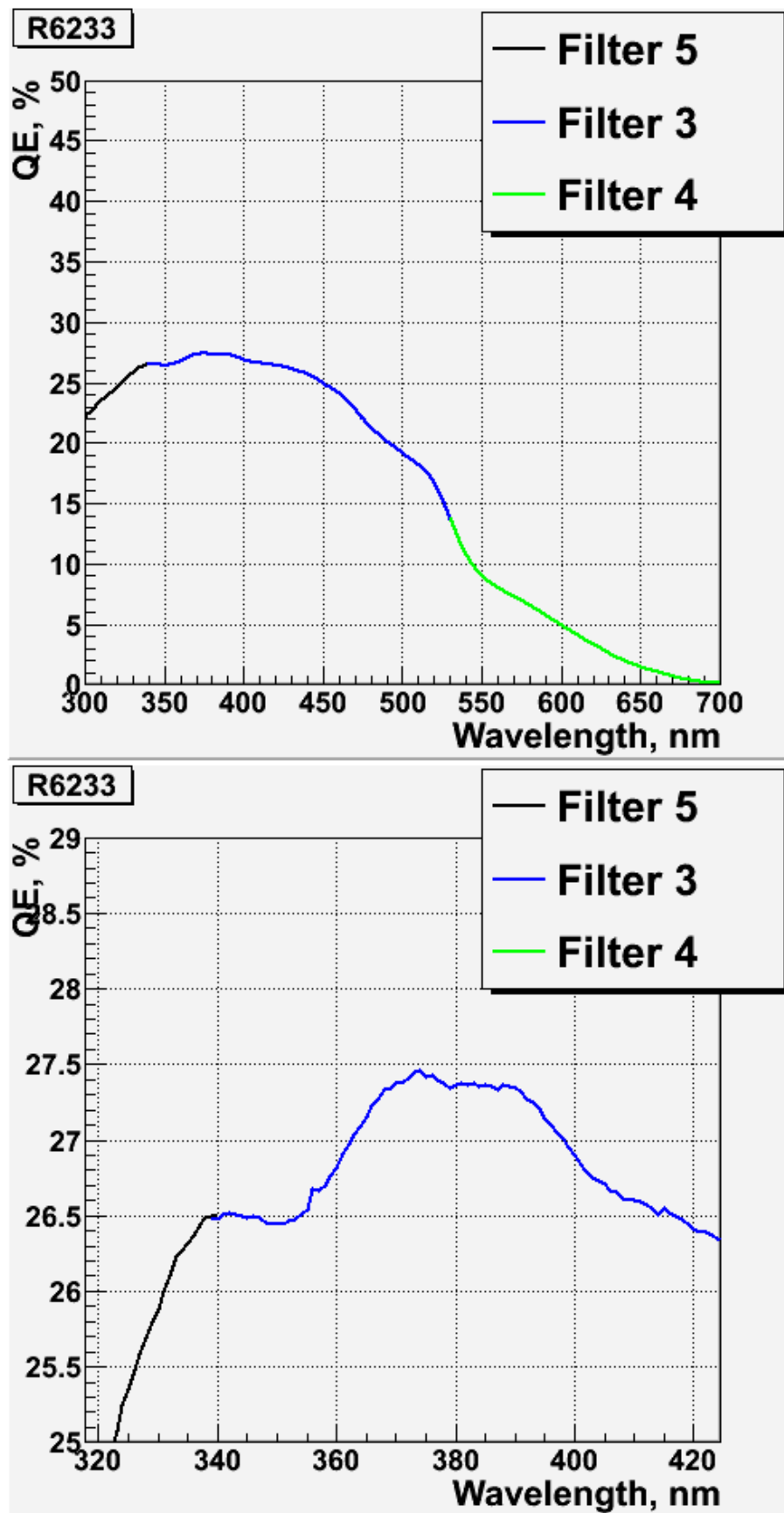


Abbildung 2.16: Quanteneffizienz von R6233 mit Xenon-Lampe

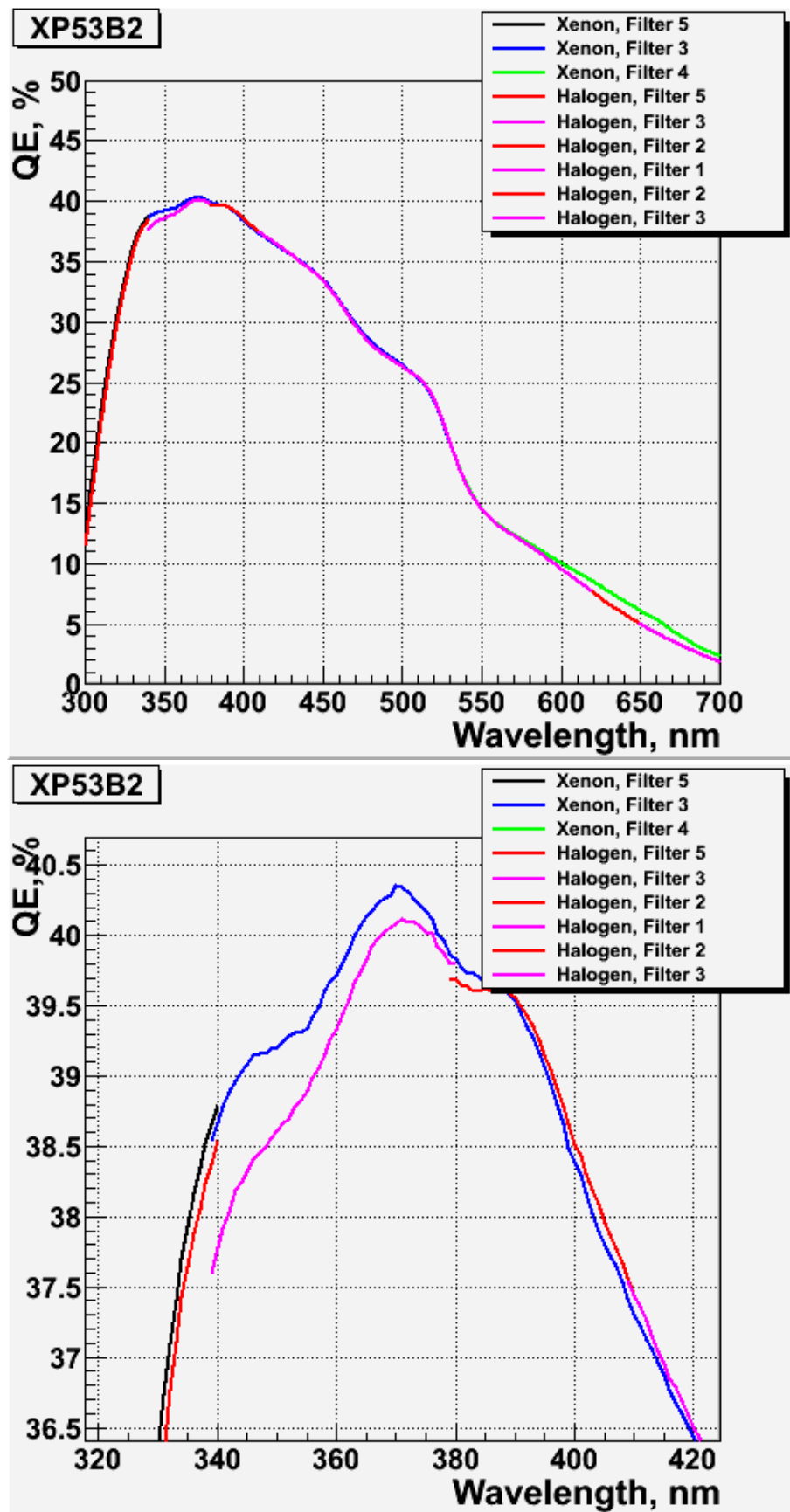


Abbildung 2.17: Quanteneffizienz von XP53B2 im Vergleich Xenonlampe und Halogenlampe

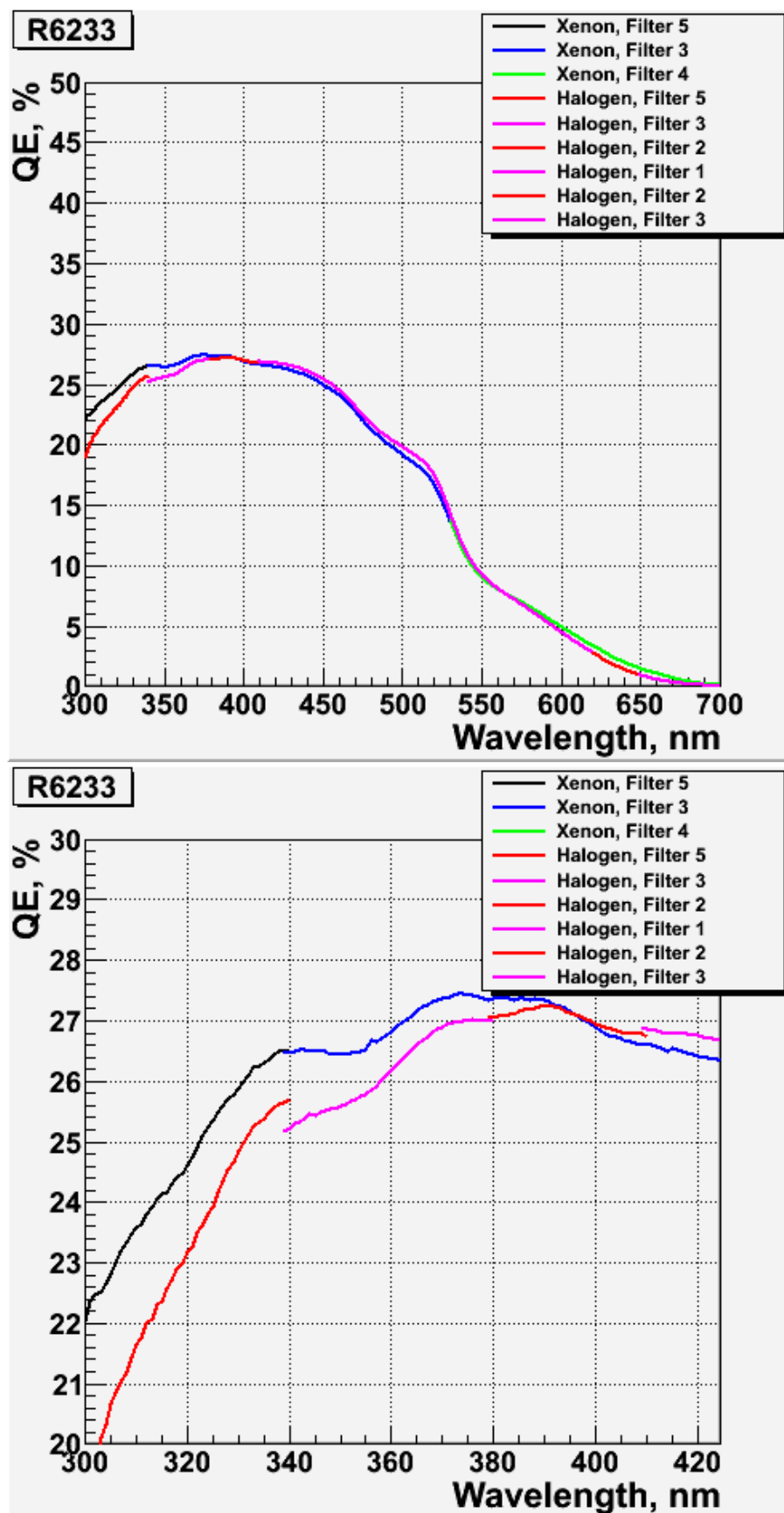


Abbildung 2.18: Quanteneffizienz von R6233 im Vergleich Xenonlampe und Halogenlampe

2.10 Zusammenfassung

Mit der Xenonlampe ist die Messung mit den geringsten systematischen Fehlern gelungen. Die Sprünge beim Filterwechsel, die bei den Messungen mit der Halogenlampe relativ groß waren, sind durch das hohe Signal-Rausch-Verhältnis mit der Xenonlampe deutlich kleiner geworden. Die wahrscheinlichste Erklärung für diese Sprünge ist, dass Streulicht durch die unterschiedlichen Filterarten und die verschiedenen Quanteneffizienzen von Photodiode und Photomultiplier unterschiedliche Auswirkungen auf die Messbereiche haben. Hier war der Einsatz des Farbfilters sehr nützlich. Dadurch, dass der Farbfilter den Großteil des Streulichts blockiert, ist die Messung in seinem Einsatzbereich, zwischen 300 und 340 nm auch mit der Halogenlampe gut gelungen. Dies erkennt man in Abbildung 2.17 im Abschnitt 2.9.2. Die geringen Unterschiede der Verläufe der beiden Kurven im Bereich des Farbfilters zeigen die genannten Vorteile des Farbfilters auf. Das Streulicht mithilfe eines Notchfilters festzulegen, ist nur teilweise gelungen. Sowohl Resttransmission im Absorptionsbereich, sowie das nicht konstante Streulicht bei verschiedenen Wellenlängen, verhindert eine genaue Bestimmung. Bei den Vergleichsmessungen mit der Xenonlampe und der Halogenlampe sieht man, dass nur in bestimmten Bereichen von einer Verbesserung ausgegangen werden kann. In Abb. 2.15 im Bereich zwischen 600 nm bis 700 nm ist es schwierig, den unterschiedlichen Verlauf zu deuten. Es ist unklar, welche der beiden Kurven hier besser passt, oder ob der echte Verlauf ganz anders ist. Hier sind weitere Verbesserungen der Messungen nötig. Man könnte z.B. auch im Bereich großer Wellenlängen mit einem Farbfilter messen, um auftretende Streuströme weitgehend zu eliminieren und um ein besseres Bild von diesem Wellenlängenbereich zu bekommen.

Literaturverzeichnis

- [1] About KM3NeT
<http://www.km3net.org/about.php>
Stand 02.07.2010, 13:38 Uhr.
- [2] Katz, Uli,
VLVnT2 Workshop, Catania, Sizilien, November 9th, 2005,
KM3NeT: Towards a km³ Mediterranean Neutrino Telescope.
- [3] Hamamatsu Photonics K.K.,
Photomultiplier Tubes - Basics and Applications.
http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/ETD/pmt_handbook_complete.pdf, 3rd
Edition, 2006.
- [4] electron tubes,
understanding photomultipliers.
<http://www.et-enterprises.com/Photomultipliers/Understanding.pdf>

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Erlangen,

Jonas Reubelt