

A30 Fotoeffekt	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.
(Version: 16. Oktober 2021)

Versuchsziel und Versuchsmethode:

1.) Welche Größen drücken die Energie von Licht im Wellenbild und im Photonenbild aus?

2.) Welche Größen drücken die Intensität von Licht im Wellenbild und im Photonenbild aus?

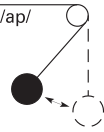
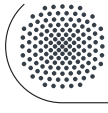
3.) Was versteht man unter Welle-Teilchen-Dualismus von Licht?

4.) Warum kann die Spannung an der Vakuum-Fotозelle nicht direkt mit einem gewöhnlichen Digitalmultimeter gemessen werden? Berechnen Sie dazu den typischen Messstrom bei Anlegen von $U = 1 \text{ V}$.

5.) Wieviele Elektronen fließen bei einem Strom von 1 nA innerhalb einer Sekunde?

6.) Was versteht man unter Leerlaufspannung und unter Kurzschlussstrom? Können diese beiden Größen unter Einsatz von zwei Messgeräten gleichzeitig gemessen werden?

7.) Bei welcher Wellenlänge entspricht die Photonenenergie dem Bandabstand in Si ($1,12 \text{ eV}$)?



A Atomphysik

A30 Fotoeffekt

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] *Kapitel 32* Einführung in die Quantenphysik. In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book
- [2] *Kapitel 14* Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik. In: MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – E-Book
- [3] *Kapitel 3.5* Quantenphysik vs. klassische Physik. In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book
- [4] *Kapitel 37* Elektrische Eigenschaften von Festkörpern. In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book
- [5] *Kapitel 14* Halbleiter. In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book

Stichworte

Welle-Teilchen-Dualismus [1, 2, 3], Energie und Impuls eines Photons [2], Kontaktspannung [4, 5], Austrittsarbeit [4, 5], Halbleiter-Bändermodell [4, 5]

Theoretische Grundlagen

Fotoeffekt Die Auslösung von Elektronen aus Materie durch Licht wird fotoelektrischer Effekt oder kurz Fotoeffekt genannt. Man unterscheidet den **äußeren Fotoeffekt**, bei dem Elektronen aus einer Metalloberfläche freigesetzt werden, und den **inneren Fotoeffekt**, bei dem Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband eines Halbleiters befördert werden. Für die quantentheoretische Deutung des äußeren Fotoeffekts (1905) erhielt Albert Einstein 1921 den Physik-Nobelpreis. Untersuchungen zum äußeren Fotoeffekt durch Millikan lieferten 1916 erstmals einen genauen Wert der Planckschen Konstanten h , wofür Millikan im Jahr 1923 den Physik-Nobelpreis erhielt. Der Fotoeffekt wurde damit zu einem Schlüsselexperiment zum Verständnis des Welle-Teilchen-Dualismus von Licht.

Im Wellenbild wird Licht als elektromagnetische Welle beschrieben, bei der sich ein elektrisches und ein magnetisches Feld im Raum ausbreiten. Phänomene wie Beugung und Interferenz lassen sich damit quantitativ erklären. Fotoeffekt und Lichtstreuung (z.B.

Compton-Effekt) hingegen erfordern zu ihrer Erklärung eine Teilchentheorie des Lichts (Photonen als Korpuskeln). Diese zunächst widersprüchlich erscheinenden Modelle deuten auf die nicht-klassische Natur des Lichts hin und werden in der Quantenelektrodynamik vereinigt.

Äußerer Fotoeffekt

Trifft Licht mit ausreichend großer Energie E auf eine Fotokathode, so können im Metall gebundene Elektronen “herausgeschlagen“ werden und mit der kinetischen Energie E_{kin} davonfliegen. Einstein formulierte dafür die richtige Energiebilanz:

$$\begin{aligned} E_{\text{kin}} &= \frac{1}{2}m_e v^2 \\ &= hf - W_{\text{Kathode}} \end{aligned}$$

Darin ist hf die Energie der Lichtquanten und W_{Kathode} die Austrittsarbeit, mit der die Elektronen im Kathodenmaterial gebunden sind. Gäbe es eine einfache Methode, die Energie oder die Geschwindigkeit der Elektronen für verschiedene Frequenzen f des Lichts zu messen, so fände man einen linearen Zusammenhang zwischen E_{kin} und f .

In unserer Vakuum-Fotozelle treffen die durch Licht ausgelösten Elektronen (sog. Fotoelektronen) auf ein der Kathode gegenüberliegendes Anodenblech, das selbst nicht belichtet wird. Mit zunehmender Aufladung der Anode entsteht ein anwachsendes elektrisches Feld zwischen Anode und Kathode, das ab einer bestimmten Stärke die weitere Aufladung verhindert. Könnte man in diesem Zustand kontaktlos - z.B. durch Messung der Kraft auf eine Probeladung - die Feldstärke und damit die Spannung zwischen Kathode und Anode ermitteln, so ließe sich wiederum h und W_{Kathode} bestimmen.

Verwendet man jedoch ein Spannungsmessgerät, so werden die Verhältnisse unerwartet kompliziert: Die unterschiedlichen Elektronen-Austrittsarbeiten verschiedener Metalle (Kathode, Anode, Messleitung) sind Ursache für das Auftreten von sog. Kontaktspannungen, wenn zwei unterschiedliche Metalle sich berühren. Dies liegt daran, dass die Energieniveaus der Leitungselektronen bis zu einer Maximalenergie, der sog. Fermienergie, besetzt sind, darüber unbesetzt. Durch den leitenden Kontakt entsteht ein Ausgleich im “Elektronensee“, der das Bezugspotential um einen Betrag verschiebt, der der Differenz der Austrittspotentiale entspricht.

Damit in der Fotozelle eine eindeutige Richtung für den Fotostrom festgelegt ist, wählt man die Materialien so, dass die Austrittsarbeit für das Anodenmaterial größer ist als die für das Kathodenmaterial. Dann gilt für die zwischen Kathode und Anode gemessene Spannung U :

$$eU = E_{\text{kin}} - eU_{\text{Kontakt}} \tag{A30-1}$$

$$= (hf - W_{\text{Kathode}}) - (W_{\text{Anode}} - W_{\text{Kathode}}) \tag{A30-2}$$

$$= hf - W_{\text{Anode}} \tag{A30-3}$$

bzw.

$$U = \left(\frac{h}{e}\right) f - \left(\frac{1}{e}\right) W_{\text{Anode}} \quad (\text{A30-4})$$

Bei Auftragung der gemessenen Spannung U über der jeweiligen Frequenz f des Lichts erhält man also eine Gerade mit der Steigung $\frac{h}{e}$ und dem Achsenabschnitt $\frac{1}{e}W_{\text{Anode}}$. Darin ist h das Plancksche Wirkungsquantum.

Entgegen einer intuitiven Annahme tritt also bei der Messung der Spannung nicht die Austrittsarbeit der Kathode, sondern der Anode in Erscheinung. Allerdings legt die Austrittsarbeit der Kathode fest, ab welcher Lichtfrequenz überhaupt erst Fotoelektronen ausgelöst werden können. Weiterhin bemerkenswert ist der Umstand, dass die gemessene Spannung nur von der Frequenz, nicht aber von der Intensität des Lichts abhängt.

Anmerkung zur Kontaktspannung: Beim Messen der Spannung an einer Batterie, an einem Transformator oder in einer elektronischen Schaltung spielen Kontaktspannungen normalerweise keine Rolle, weil sie an beiden Kontaktstellen (Pol 1 - Messleitung 1 und Pol 2 - Messleitung 2) wegen paarweise gleicher Metalle gleich groß, aber im Stromkreis entgegengesetzt gerichtet sind und sich damit aufheben. Da Kontaktspannungen aber temperaturabhängig sind, kann man den Effekt für den Bau von Thermoelementen nutzen.

Innerer Fotoeffekt

Von großer Bedeutung ist der innere Fotoeffekt z.B. in Halbleiter-Solarzellen. Damit für Elektronen, die durch Licht vom Valenz- ins Leitungsband befördert wurden, ein energetisches Gefälle vorliegt, wird der Halbleiter in Schichten p- und n-dotiert (Diodenstruktur). Die Eigenschaften des Halbleiter-Grundmaterials (z.B. Si, GaAs) und der verwendeten Dotierstoffe legen dabei den Energieunterschied und damit die auftretende Spannung zwischen p- und n-Schicht fest. Wie bei der Vakuum-Fotozelle muss Licht eine Mindestenergie hf besitzen, um Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband anregen zu können. Bei Silizium beträgt dieser Bandabstand ca. 1,1 eV. Eine darüber hinausgehende Lichtenergie führt aber nicht zu einer höheren Spannung, sondern geht durch Wärmeerzeugung verloren. Dies limitiert den Wirkungsgrad von Solarzellen für weißes Licht. Zur Charakterisierung von Fotozellen definiert man die Quantenausbeute η_Q als das Verhältnis von Kurzschlussstrom (= Anzahl Elektronen / Sekunde) zur Anzahl der pro Sekunde auf die Detektorfläche eingestrahlenen Photonen.

Für die praktische Verwendung von Solarzellen relevant ist allerdings der Wirkungsgrad hinsichtlich der abgegebenen und eingestrahlenen Leistung:

$$\eta_P = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{Licht}}}$$

Versuchsaufbau

Zur Beobachtung des äußeren und inneren Photoeffekts verwenden wir im Praktikum einerseits eine Vakuum-Fotозelle (PHYWE 06778.00), andererseits eine Silizium-Fotodiode (Typ BPW 21). Als Lichtquellen sind in einem Gehäuse eine rote, grüne und blaue LED sowie eine Glühlampe (weißes Licht) untergebracht. Die Intensität kann über einen Drehknopf geregelt werden. Zur Einschränkung des Wellenlängenbereichs der LEDs stehen passende schmalbandige Filter zur Verfügung. Die Wellenlänge des Anregungslichts wird mithilfe eines optischen Spektrometers ermittelt.

Vakuum-Fotозelle

Das Gehäuse der Vakuum-Fotозelle hat eine durch einen Schieber abdeckbare kreisrunde Licht-Eintrittsöffnung von ca. 11 mm Durchmesser. Im Inneren befindet sich die eigentliche Vakuum-Fotозelle in einem Rohr mit zwei Blendenöffnungen. Der ca. 6 mm breite Steg zwischen den Öffnungen verhindert die direkte Bestrahlung der zentralen Anode, wodurch Fotoemission aus der Anode vermieden wird. Das einfallende Licht sollte deshalb eine Fläche von ca. 11 mm Durchmesser ausleuchten.

Da die Fotозelle bauartbedingt eine sehr hochohmige Quelle darstellt (Fotoströme liegen in unserem Experiment im Bereich von nA) dauert es u.U. einige Minuten, bis sich bei einer Änderung der Belichtung oder der angeschlossenen Leitungen wieder ein neues Ladungs- und damit Spannungsgleichgewicht eingestellt hat.

Um diese Spannung unverfälscht zu messen, benötigen wir eine Messanordnung, durch die deutlich weniger Strom fließt, als durch den Lichteinfall an Fotostrom ausgelöst wird. Wäre der Messstrom in der Größenordnung des Fotostroms, so würde sich die Anode durch den Messvorgang teilweise entladen und damit die Potenzialdifferenz zur Kathode sich verringern.

Ein normaler Spannungsmesser erfüllt diese Bedingung nicht, selbst moderne digitale Geräte haben einen Eingangswiderstand von ca. $10\text{ M}\Omega = 10^7\ \Omega$. Wir schalten deshalb im Versuch vor das Digitalmultimeter einen sog. Elektrometerverstärker mit einem Eingangswiderstand, der größer als $10^{13}\ \Omega$ ist, und der Spannungsverstärkung 1, d.h. Ausgangsspannung = Eingangsspannung, aber der Ausgangsstrom kann - je nach angeschlossenem Messgerät - deutlich größer sein als der Eingangsstrom (Abb. A30-1).

Die Messung der Spannung an der Fotозelle mit dem Elektrometerverstärker ist sehr empfindlich: Bereits durch Verbiegen der Leitung zwischen Fotозelle und Verstärkereingang wird im Dielektrikum der Leitung eine Spannung erzeugt, die das Messergebnis verfälscht. Im Experiment verwenden wir deshalb ein Festmantel-Koaxialkabel. Der Massepunkt des Elektrometerverstärkers (Schaltzeichen "Erde") ist über ein kurzes Laborkabel mit dem Befestigungsstift der Fotозelle zu verbinden, um die gesamte Messanordnung auf ein konstantes Bezugspotential zu legen. Während der Messung den Aufbau nicht berühren, ausreichend lange warten, bis sich ein stabiler Anzeigewert eingestellt hat!

Zur Messung des in der Zelle erzeugten Fotostroms schalten wir einen Strommesser zwischen Kathode und Anode ("Kurzschlussbetrieb"). Ein normales Multimeter ist dafür

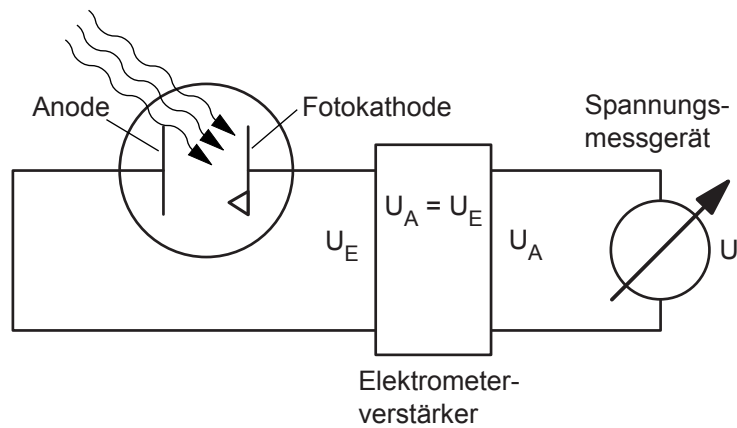


Abb. A30-1: Messung der Fotospannung mithilfe eines Elektrometerverstärkers

wiederum nicht empfindlich genug, wir verwenden deshalb einen Stromverstärker mit umschaltbarer Empfindlichkeit, der am Ausgang eine dem Eingangsstrom proportionale Spannung bereitstellt (sog. Transimpedanzverstärker mit 1 V/nA bzw. $0,1\text{ V/nA}$, s. Abb. A30-2).

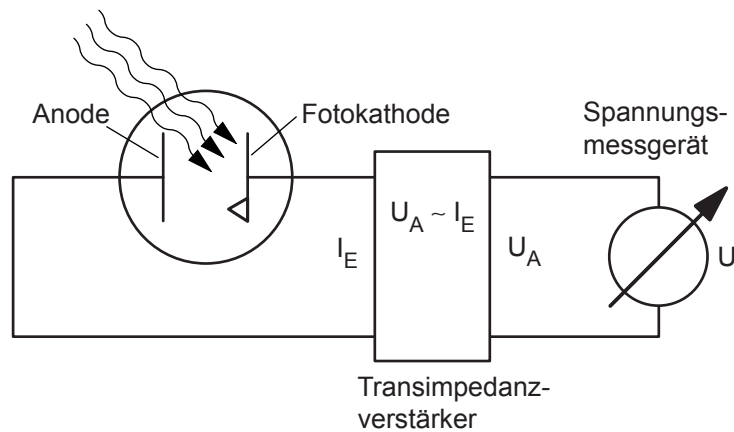


Abb. A30-2: Messung des Fotostroms mithilfe eines Transimpedanzverstärkers

Halbleiter-Fotodiode

Die Silizium-Fotodiode (Type BPW 21) hat eine aktive Fläche von ca. $7,34 \text{ mm}^2$ und ist für die Verwendung mit sichtbarem Licht optimiert. Die Messung der Fotospannung bzw. des Fotostroms erfolgt ohne Verwendung von Verstärkern direkt mit dem Digitalmultimeter.

Hinweise zum Aufbau:

- Glasfaser nicht knicken! Das Faserende befindet sich über der Mitte des Haltestifts.
- Die in die Halterungen eingebauten Filter sind empfindlich - Oberflächen nicht berühren!
- Der Elektrometerverstärker wird über ein vorgeformtes Festmantel-Koaxialkabel mit der Photozelle verbunden - **NICHT VERBIEGEN!**
- Justieren Sie den Lichtweg **ca. 200 mm** über der Dreiecksschiene. Anordnung der Elemente: LED - Filter (Blendenblech zur LED weisend) - Photozelle bzw. Fasereingang.
- Achten Sie auf geringe Umgebungsbeleuchtung im Raum, Deckenlampen aus!

Messprogramm

Im Versuch sollen Fotospannungen und Fotostrome bei verschiedenen Lichtfrequenzen und verschiedenen Lichtintensitäten mit einer Vakuum-Photozelle und einer Halbleiter-Photozelle untersucht und verglichen werden. Die Charakterisierung der Lichtquellen erfolgt mit einem optischen Spektrometer. Aus der quantitativen Analyse soll das Plancksche Wirkungsquantum h und der Wirkungsgrad der Halbleiter-Photozelle ermittelt werden.

Achten Sie darauf, die Glasfaser nicht mechanischer Spannung auszusetzen und keinesfalls zu knicken!

1. Messen Sie den maximalen Fotostrom sowie dessen halben Wert und die entsprechenden Fotospannungen der Vakuum-Photozelle für rotes, grünes, blaues und weißes Licht. Führen Sie zunächst bei geschlossener Eingangsblende der Photozelle einen Nullabgleich ("OFFSET") des Stromverstärkers durch (empfindlichen Messbereich wählen!). Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse im Hinblick auf die Quantennatur des Lichts.
2. Vermessen Sie das gefilterte Licht der drei verwendeten LEDs mit dem Spektrometer. Ermitteln Sie aus den optischen Spektren der LEDs die Wellenlänge des Emissionsmaximums und die Halbwertsbreite (= Breite des Spektrums auf halber Höhe). **Hinweis:** Die Durchlasskurven der Filter folgen keiner einfachen Funktion - verzichten Sie deshalb auf eine mathematische Modellierung.
3. Ermitteln Sie den Wirkungsgrad der Silizium-Photozelle in Abhängigkeit des eingestrahnten Lichts. Dazu muss die Messung von Fotostrom und Fotospannung einerseits und die Messung der Lichtintensität andererseits unter vergleichbaren Bedingungen erfolgen, d.h. stets im selben Abstand zur Lichtquelle und bei Justage

des jeweiligen Detektors auf ein maximales Signal! Um mehr Anregungslicht und damit größere Messströme zu erhalten, **verzichten wir im Folgenden auf die optischen Filter.**

Auswertung

Vakuum-Fotozelle:

Tragen Sie die Spannungen über der Frequenz des Anregungslichts auf. Ermitteln Sie h aus der Steigung der Ausgleichsgeraden und W_{Anode} aus dem Achsenabschnitt. Vergleichen Sie mit dem Literaturwert für h . Diskutieren Sie die relevanten Fehlerquellen qualitativ. Wie ist das Messergebnis mit weißem Licht zu interpretieren?

Halbleiter-Fotozelle:

Tragen Sie in dasselbe Diagramm die bei konstantem Fotostrom gemessenen Spannungen über der Frequenz des Anregungslichts auf. Ermitteln Sie die zugehörigen Quantenwirkungsgrade η_q und Leistungswirkungsgrade η_P .

Hinweis: Berechnen Sie die Leistung einer Fotozelle näherungsweise als Produkt von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung. Diskutieren Sie die relevanten Fehlerquellen qualitativ.

Hinweise

- Für die Messung der Fotospannung verbinden Sie die Fotozelle über das schwarze Koaxialkabel mit dem Eingang des Stromverstärkers und dessen Ausgang mit dem Multimeter als Gleichspannungsmesser (DCV = "Direct Current Voltage").
- Um den maximalen Fotostrom zu erhalten, setzen Sie das rote Filter in die Öffnung der Vakuum-Fotozelle und stellen Sie das LED-Gehäuse möglichst nah vor das Filter. Öffnen Sie nun die Blende und justieren Sie die Position der roten LED bei maximaler Lichtintensität (Drehknopf ganz nach rechts drehen) auf maximalen Fotostrom.
- Bei der Messung der Fotoströme und -spannungen bietet es sich an, zunächst den maximalen Fotostrom zu messen und anschließend die Lichtintensität auf etwa halben Fotostrom zu regeln. Bei dieser Einstellung wird die Fotozelle mit dem Elektrometerverstärker verbunden und dessen Ausgangsspannung mit dem Multimeter (Messbereich passend einstellen!). Drehen Sie die Lichtstärke auf Maximum und messen Sie erneut die Spannung.
- Indem Sie das LED-Gehäuse, das jeweilige optische Filter und die Faserhalterung mit minimalem Abstand aneinandersetzen erhalten Sie die höchste Intensität und den geringsten Streulichteintrag.
- Das Spektrometer lässt sich mit dem Programm "SpectraSuite" auf dem Desktop steuern. Dieses öffnet automatisch ein Messfenster mit dem vollen Spektralbereich

von 350 nm bis 1000 nm und einer Auflösung von 1 nm. In diesem Modus misst das Gerät nur relative Intensitäten (“Counts“) mit unterschiedlicher Empfindlichkeit in verschiedenen Spektralbereichen, was aber für die Ermittlung der Anregungswellenlängen ausreicht. Reduzieren Sie die Integrationszeit des Programms auf 3 ms und drehen Sie die Helligkeit der LED soweit auf, dass das Spektrometer nicht übersteuert ist (max. ca. 3500 Counts).

- Die Spektren lassen sich sowohl abspeichern als auch direkt ausdrucken. Hinweis: Der Button mit einem auf dem Kopf stehenden $\frac{1}{2}$ öffnet den Dateipfad. Wählen Sie folgende Optionen:

“Gewünschtes Spektrum“ = “Verarbeitetes Spektrum“

“Datei Typ“ = “Tab getrennt, ohne Kopfdaten“

- Positionieren Sie die Silizium-Fotozelle und das LED-Gehäuse auf ca. 60 mm Abstand (am Reiter ablesen), um einen guten Wert für den Fotostrom zu erhalten.
- Um den Wirkungsgrad zu bestimmen, messen Sie zuerst den maximalen Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung der Silizium-Fotozelle mit dem Digitalmultimeter (Messbereich passend einstellen!). Platzieren Sie dann den Faserkopf anstelle der Fotozelle und messen Sie das zugehörige Spektrum in absoluten Intensitäten.
- Um absolute Einheiten zu erhalten muss die Funktion “Neue Messung absolute Intensität“ aufgerufen werden (Symbol: **I**). Es öffnet sich ein Fenster “Absolute Intensität Einstellungen“:

“Neue spektrale Erfassung“ Next>

Quelle: “USB650“ Next>

“Intensitätskalibration aus Datei“ Next>

Suchen in: C:\diverses\USB 650 Dateiname: “Kalibration_OOIIrrad.cal“ Next>

Faserdurchmesser: “400 Mikrometer“ Next>

Integrationszeit: “Automatisch einstellen“ (**mehrmals anklicken**, bis in der Vorschau keine Übersteuerung mehr zu erkennen ist) Next>

LED ausschalten und zur Aufnahme eines Dunkelspektrums auf das dunkle Glühbirnensymbol klicken, mit “Finish“ beenden

LED wieder anschalten

mit “Autozoom“ Darstellungsbereich anpassen.

Das Spektrum wird jetzt in absoluten Einheiten ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$) dargestellt. Die gesamte eingestrahlte Lichtleistung erhält man durch Integration über das Spektrum: Menü: Verarbeitung > Absolute Intensität > Neu Energie, Leistung, Photonen
Es öffnet sich ein Fenster, in dem der Integrationsbereich eingestellt werden kann. Nach “Annehmen“ erscheint das Ergebnis in einem weiteren Fenster. Notieren Sie die Leistungsdichte ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) und den Photonenstrom (Photonen pro cm^2/s).