

6. Optik

6.1 Grundlagen

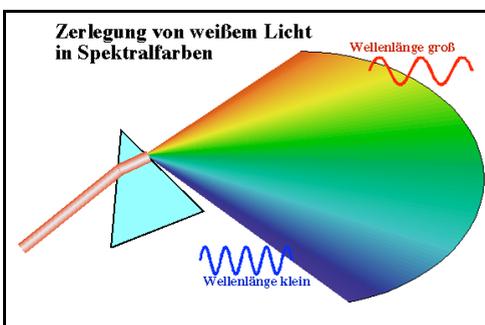
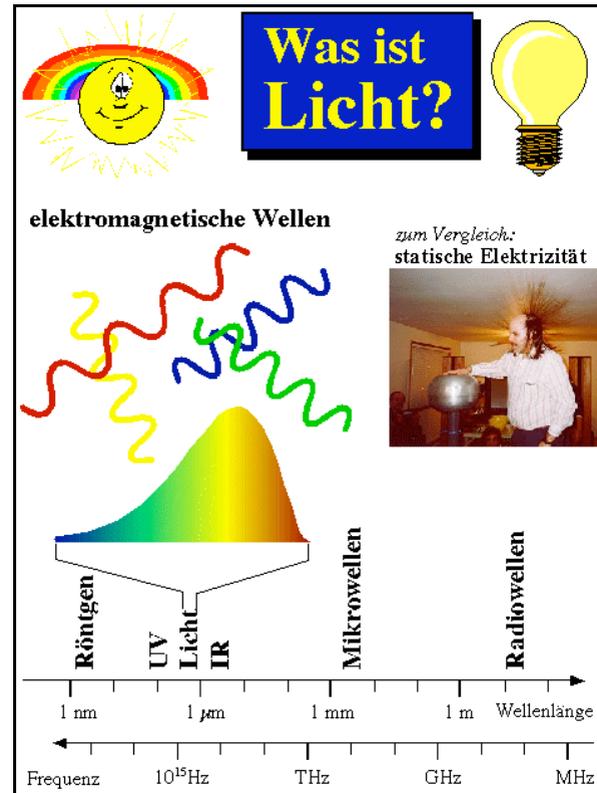
6.1.1 Historisches

Die Natur des Lichtes hat Philosophen und Naturwissenschaftler seit vielen Jahrhunderten beschäftigt und zu engagierten Debatten geführt. Insbesondere wurde heftig darüber debattiert, ob Licht aus Teilchen oder Wellen bestehe. 1672 stellte Newton eine Theorie auf, welche Wellen- und Teilchenaspekte enthielt; die Wellenaspekte traten aber bald in den Hintergrund und seine Theorie wurde im Wesentlichen als Teilchentheorie betrachtet. Dazu gehörten vor allem die geradlinige Ausbreitung; Brechung und Reflexion wurden relativ leicht erklärbar.

1678 stellte Huygens eine Wellentheorie auf, welche Interferenz und Beugung erklären konnte. Newton's Ansehen in der Naturwissenschaft war aber so dominant dass Huygens kaum beachtet wurde. Experimentelle Hinweise auf solche Effekte hatten zuvor die Experimente von Francesco Grimaldi (1618-1663) ergeben.

1808 untersuchte Malus und 1815 Fresnel die Polarisationsseigenschaften von Licht. Während wir das als einen Beweis der Wellenaspekte ansehen war das damals für die Wellentheorie eher eine Schwierigkeit, da damals nur Longitudinalwellen bekannt waren, welche Polarisationsseigenschaften nicht erklären können.

1865 stellte Maxwell die Theorie des Elektromagnetismus. Diese stellt heute die Grundlage für die klassische Theorie des Lichtes dar. Es dauerte allerdings noch einige Jahre bis die Experimente von Hertz zeigten, dass Licht ein Beispiel einer elektromagnetischen Welle ist. Damit wurde die Optik ein Teilgebiet der Elektrodynamik. Auch im Bereich des sichtbaren Lichts findet man unterschiedliche Wellenlängen. Diese entsprechen unterschiedlichen Farben des Lichts. Sichtbares Licht enthält unterschiedliche Wellenlängen, wobei wir den kurzwelligen Bereich blau sehen, den langwelligen Bereich rot.



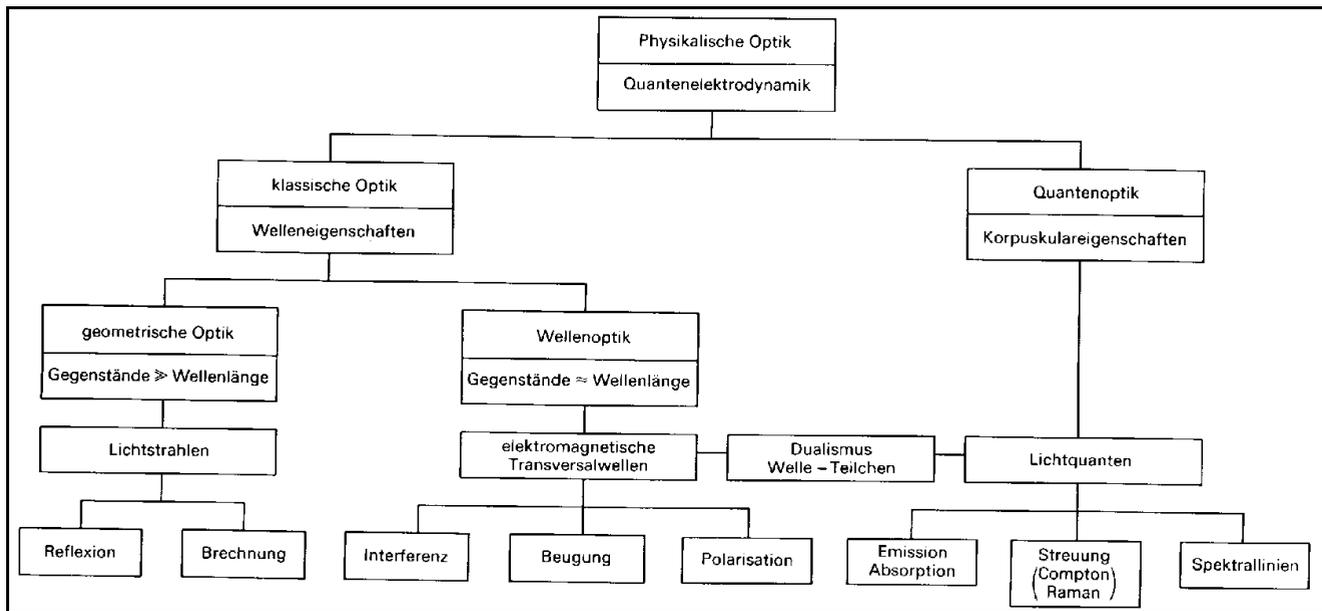
Man kann dies im Experiment leicht nachweisen indem man einen Strahl weissen Lichts auf ein Prisma schickt. Rotes und blaues Licht wird darin unterschiedlich gebrochen und kann deshalb dahinter getrennt beobachtet werden. Exp: Spektrum

Es gibt eine Reihe von Lehrbüchern zu diesem Thema.

Born und Wolf: Principles of Optics
 Feynman Lectures Band I, Kap. 26-36
 J.Ph. Pérez: Optik
 Bergmann, Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3: Optik
 Pedrotti & Pedrotti: Introduction to Optics
 Hecht: Optics

6.1.2 Beschreibung

Die physikalische Optik befasst sich mit der Erzeugung, Ausbreitung und dem Nachweis von Licht. In einem weiteren Sinn gehören dazu auch andere Wellen. Prinzipiell können alle Phänomene, die elektromagnetische Strahlung involvieren durch die Quantenelektrodynamik beschrieben werden. Diese ist aber oft zu kompliziert und wird im Rahmen der Grundvorlesungen nicht unterrichtet. Stattdessen kann man unterschiedliche Beschreibungen verwenden, die für einen großen Bereich der interessanten physikalischen Phänomene genügen.



Die meisten Phänomene kann man aber auch mit der klassischen Elektrodynamik beschreiben, welche Licht als eine elektromagnetische Welle betrachtet. Innerhalb der klassischen Optik unterscheidet man zwischen

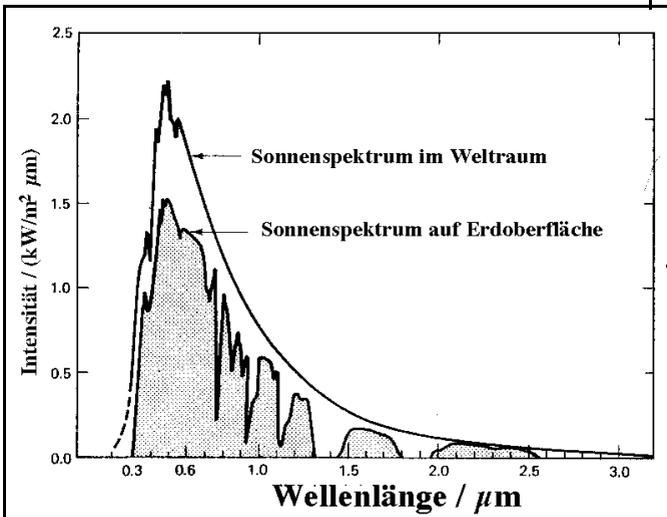
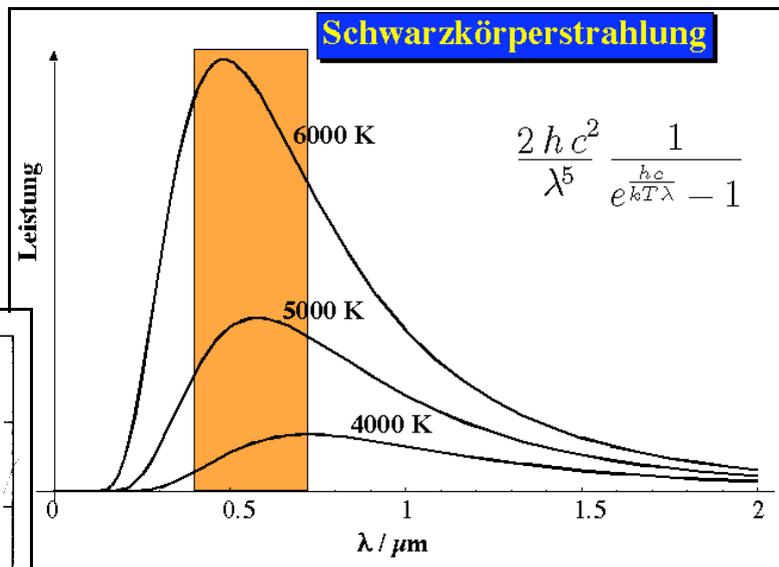
- geometrische Optik oder Strahlenoptik: Licht kann mit als Strahlen beschrieben werden wenn die interessanten Dimensionen groß sind im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts. Diesen Bereich versucht man immer zu treffen wenn man Abbildungen macht, also z.B. in der Fotografie. Die Bedingung führt aber z.B. dazu, dass man auch bei sehr viel Licht die Blende nicht beliebig klein machen kann.
- ist diese Bedingung nicht mehr erfüllt, so muss man den Wellencharakter des Lichtes berücksichtigen; es treten zusätzliche Effekte wie Beugung und Interferenz auf. Dieser allgemeinere Bereich wird durch die Maxwell Gleichungen abgedeckt.
- Wenn die Wechselwirkung mit materiellen Systemen involviert ist, so müssen diese meist quantenmechanisch beschrieben werden. Allerdings kann man die Beschreibung des elektromagnetischen Feldes selbst in den meisten Fällen weiterhin klassisch halten. Man nennt dies die semiklassische oder halbklassische Näherung.

- Mit Quantenoptik wird derjenige Teil der Optik bezeichnet, welcher spezifisch quantenmechanische Aspekte behandelt.

6.1.3 Erzeugung von Licht

Während elektromagnetische Strahlen geringer Frequenz, wie z.B. Radiowellen durch schwingende elektronische Schaltkreise erzeugt werden, ist dies bei sichtbarem Licht nicht mehr möglich. Licht kann aber in einem gewissen Sinn noch einfacher erzeugt werden: indem man einen Körper auf sehr hohe Temperaturen heizt. Solche Quellen werden als thermische Quellen bezeichnet. Das beste Beispiel dafür ist die Sonne, aber natürlich auch eine Glühlampe. Solche Quellen verhalten sich in guter Näherung wie ein Schwarzkörperstrahler. Ein wichtiger Aspekt solcher Quellen ist, dass die spektrale Verteilung der Strahlung nicht vom Material der Quelle abhängt. Jeder schwarze Strahler hat ein Spektrum, welches nur von der Temperatur abhängt.

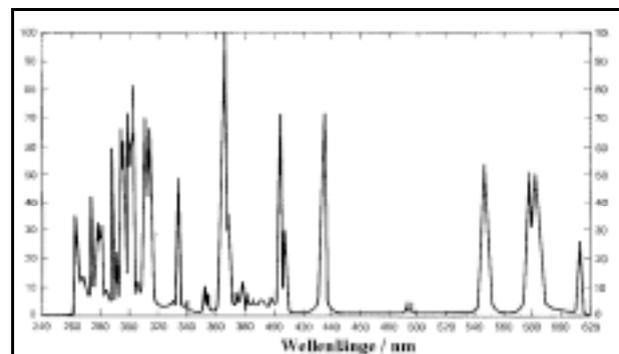
Das Spektrum eines schwarzen Strahlers wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Es besagt, dass das Maximum der emittierten Strahlung sich mit höheren Temperaturen zu immer kürzeren Wellenlängen verschiebt.



Der wichtigste Strahler ist bei weitem die Sonne, die eine Oberflächentemperatur von etwa 6000 Grad aufweist. Das Emissionsmaximum liegt somit bei ca. 500 nm und der größte Teil der emittierten Leistung liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes. Allerdings gelang nicht alle Strahlung bis auf die Erdoberfläche - ein Teil wird durch die Atmosphäre absorbiert, insbesondere im UV-Bereich.

Teil wird durch die Atmosphäre absorbiert, insbesondere im UV-Bereich.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Licht benutzt sogenannte elektronische Übergänge in atomaren Spektren: Hier gehen Elektronen von energetisch höher liegenden Zuständen in tiefere über und senden dabei Licht aus. Dies werden Sie in der Quantenmechanik diskutieren.

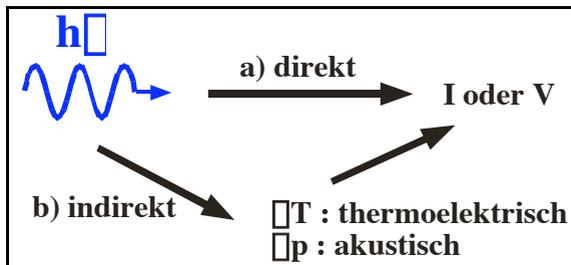


Eine weitere Möglichkeit für die Erzeugung von Licht ist der Laser. Dies ist eine Quelle die besonders nützliche Eigenschaften hat. Laserlicht kann auf

verschiedene Arten erzeugt werden und hat je nach Erzeugungsart unterschiedliche Eigenschaften. Die Eigenschaften von Laserlicht werden in Kapitel 6.7 im Detail diskutiert.

6.1.4 Nachweis von Licht

Chemische Sensoren: Hier regt das Licht ein Elektron in einem Molekül in einen höher angeregten Zustand an. Das angeregte Elektron kann anschließend für chemische Reaktionen verwendet werden. Dieses Prinzip wird insbesondere in der Natur benutzt, z.B. durch die Sinneszellen im menschlichen Auge, aber auch durch das Chlorophyll in Pflanzen etc. Die frühesten Detektoren für Licht (neben dem menschlichen Auge) waren fotografische Filme, also dünne Schichten von lichtempfindlichem Material, in dem beim Auftreffen von Licht eine chemische Umwandlung stattfindet. Diese haben eine recht hohe Empfindlichkeit und können in einer Fläche Licht detektieren. Heute werden sie aber im Labor kaum mehr verwendet, weil die Information erst nach dem Entwicklungsprozess zur Verfügung steht.

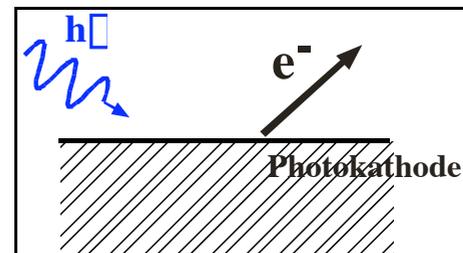


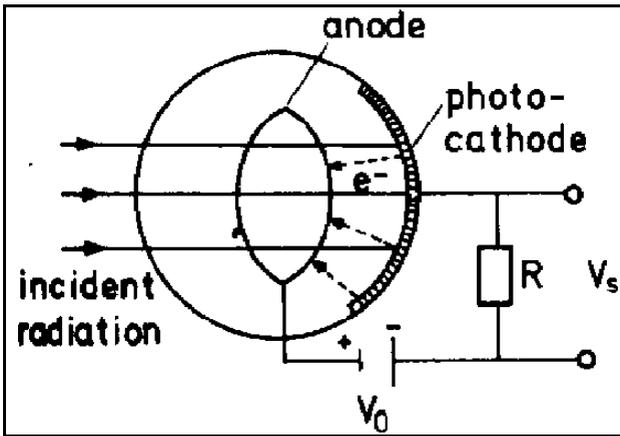
Heute ist bei praktisch allen verwendeten Detektoren das resultierende Signal eine elektrische Spannung und steht somit unmittelbar für die Messung zur Verfügung. Während einige Detektoren direkt Photonen in einen Strom oder eine Spannung umwandeln benutzen andere Detektoren verschiedene Zwischenstufen. So kann das einfallende Licht zunächst in Wärme umgewandelt werden und anschließend wird die Temperaturerhöhung in ein elektrisches Signal umgewandelt. Solche Detektoren kommen u. A. dann zur Anwendung wenn der Detektor über einen möglichst großen Wellenlängenbereich eine konstante Empfindlichkeit aufweisen soll. Ein weiterer Anwendungsbereich ist der Nachweis von Strahlung im infraroten Teil des Spektrums, wo Detektoren, die direkt ein elektrisches Signal erzeugen, eine zu geringe Empfindlichkeit aufweisen. Dieses Prinzip benutzt man z.B. wenn man die Sonne auf der Haut spürt. Physikalische Detektoren, die auf diesem Prinzip basieren sind

- Bolometer: Widerstandsänderung in einem Metall
- Thermistoren: Widerstandsänderung in einem Halbleiter
- Pyroelektrische Detektoren: Die Temperaturerhöhung ändert eine Oberflächenladung

Eine weitere Möglichkeit nutzt den Photoeffekt: Licht, das auf eine Metalloberfläche auftrifft kann aus dieser Elektronen herauslösen. Diese Elektronen werden anschließend vervielfacht und nachgewiesen. Diesen Effekt werden wir im Rahmen der Quantenmechanik noch genauer diskutieren.

Dabei lösen Photonen aus der Oberfläche eines Metalls Elektronen heraus. Eine solche Metalloberfläche wirkt also als Quelle für Elektronen und wird als Photokathode bezeichnet.

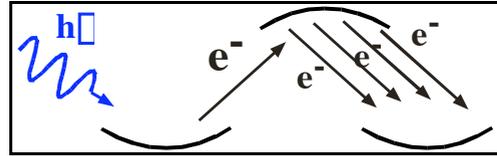




Man kann die emittierten Elektronen auf einer Anode einfangen und den so erzeugten Photostrom direkt messen. Dafür muss sich das Elektrodenpaar im Vakuum befinden.

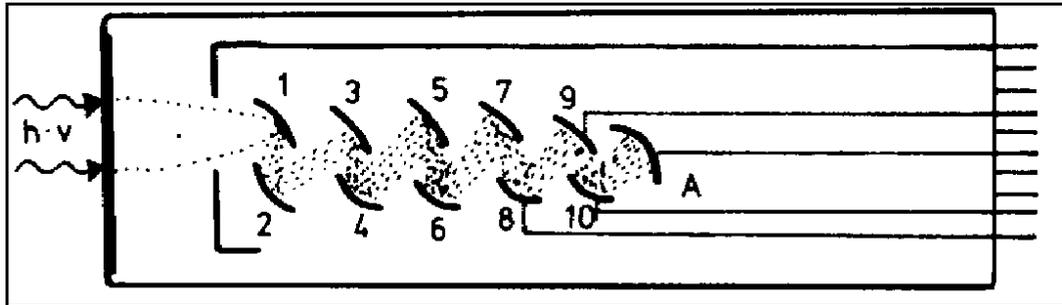
Wenn die Lichtintensität relativ gering ist kann es aber vorteilhaft sein, das Signal noch zu verstärken. Die geschieht meistens über einen Sekundärelektronenvervielfacher:

Dabei werden die freiwerdenden Elektronen in einem Potenti-



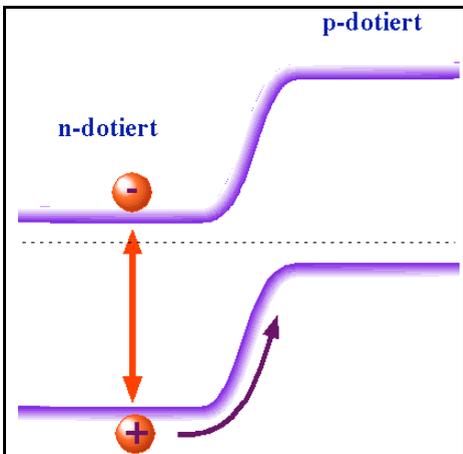
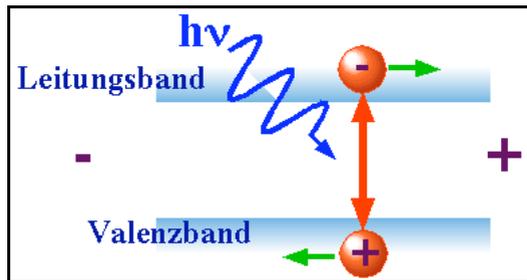
al beschleunigt und auf die Oberfläche einer sekundären Elektrode (Dynode) fokussiert. Elektronen, die mit einigen 100 eV auftreffen lösen aus der Metalloberfläche wiederum mehrere Elektronen heraus, welche anschließend wiederum beschleunigt werden können.

Eine Reihe solcher Vervielfacherstufen kann somit pro Photon z.B. 10^7 Elektronen erzeugen, welche anschließend sehr viel einfacher detektiert werden können.



Eine andere Gruppe von Detektoren wandelt Photonen in einen elektrischen Strom um, indem in einem Halbleiter durch Einfangen der Photonen Elektron-Loch Paare erzeugt werden.

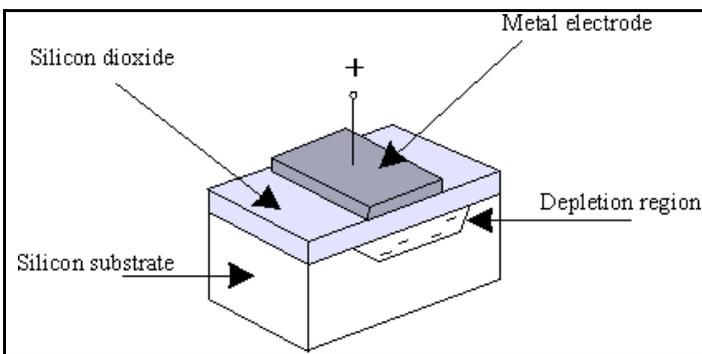
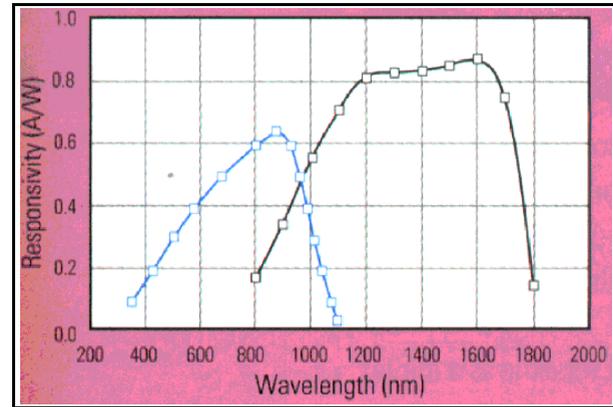
Die so erzeugten Ladungen machen das Material photoleitend. Es ist somit möglich, das Licht durch die Änderung des Widerstandes zu detektieren.



Wenn die in der Nähe eines p-n Übergangs geschieht, so werden die Ladungen getrennt, so dass die Rekombination vermieden wird und ein elektrischer Strom fließt. Nach diesem Prinzip arbeiten Photodioden und Solarzellen. Photodioden sind heute der weitaus häufigste Detektortyp. Sie benötigen im Gegensatz zu einem Photomultiplier keine Hochspannung und kein Vakuum, sondern sind reine Festkörperdetektoren. Damit sind sie sehr viel zuverlässiger und werden außerdem nicht durch Magnetfelder beeinflusst. Sie sind sehr kompakt und billig. Die Quantenausbeute kann mehr als 90% betragen, sofern die Oberfläche mit einer Antireflexbeschichtung versehen wird: typische Halbleiter ha-

ben einen hohen Brechungsindex (z.B. GaAs $n = 3.6$), so dass bei unbehandelten Oberflächen auch bei senkrechtem Einfall 25% des Lichtes an der Oberfläche reflektiert wird.

Die Empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge hängt von der Bandlücke des verwendeten Materials ab. Es ist auch bei Photodioden möglich, die erzeugten Photoelektronen zu vervielfachen, indem man an geeignete Photodioden eine hohe Spannung anlegt. In diesen Avalanche-Photodioden können die beschleunigten Elektronen ihrerseits wieder Ladungsträger erzeugen, so dass ein Photon einen hohen Spannungspuls erzeugen kann, ähnlich wie bei Photomultipliern. Allerdings findet die Verstärkung hier im Festkörper statt, nicht im Vakuum.



Einer der populärsten Detektoren ist heute der CCD (=Charge Coupled Device). CCD's bestehen aus einzelnen lichtempfindlichen Elementen, die in einem zweidimensionalen Raster angeordnet sind. Die einzelnen Elemente sind enthalten eine Silizium-Verarmungszone, in der das einfallende Licht Ladungen erzeugt. Durch eine geeignete Vorspannung und Dotierung wird eine Ansammlung der Ladungen unterhalb der Oberfläche erreicht.