

Gib mir die Kugel

Ein Exkurs in die Laserleistungsmessung

Sensortypen für Laserleistungsmessungen basieren auf unterschiedlichen physikalischen Effekten und weisen Vor- und Nachteile auf. Im Folgenden wird beschrieben, welche Systeme sich hierbei als geeignet erweisen.

Bernhard Neumann, Steve Wright, Artifex Engineering

„Ich geb mir die Kugel!“ höre ich aus dem Laserlabor. „Was ist denn hier los?“ frage ich meinen Kollegen, der verzweifelt vor seinem Messaufbau sitzt. „Ich versuche die Leistung dieser Laserdioden zu messen.“, sagt er. „Aber bei den kleinsten Änderungen im Aufbau bekomme ich andere Werte und ich weiß einfach nicht, welchen ich trauen sollte.“ „Hast Du eine Kugel?“, frage ich ihn. „Das wollte ich ja gerade.“, erwidert er und schaut mich halb verängstigt, halb entgeistert an.

Dazu muss es nicht kommen. Eine Analyse der Möglichkeiten gibt uns Rat.

Der Sensor ist der Kern

Da die Messwerterfassung und Verarbeitung elektronisch erfolgt, ist der Kernpunkt eines Laserleistungsmesssystems der Sensor im Detektorkopf. Dieser hat die Aufgabe, optische Strahlungsleistung in ein elektrisches Signal zu wandeln. Es gibt zwei gängige Sensortypen, um die Leistung von Laserstrahlung zu messen (Tabelle rechts).

Sensortyp Photodiode

Eine Photodiode besteht aus einem Halbleiterkristall, der in seinem Wachs-

tum so konstruiert wurde, dass ein elektrischer Potentialgradient zwischen den zwei Oberflächen besteht.

Die zwei Oberflächen sind mit dünnen Drähten elektrisch kontaktiert. Diese Drähte sind wiederum mit festen Drähten verbunden, die als Kontaktstifte für einen externen Stromkreis dienen. Da das Gebilde mechanisch empfindlich ist, wird das Kristall mit den dünnen Drähten in einem Metallgehäuse mit einem Schutzfenster für den Lichteintritt eingeschlossen.

Aus diesem Aufbau sind gewisse Eigenschaften ersichtlich:

1. Die Photodiode ist sehr lichtempfindlich, da ein direkter Quantentransfer von Photonen in Strom stattfindet. Leistungsmessungen hinunter bis in den Femtowatt-Bereich sind möglich. Daher ist aber auch die maximale Leistung auf wenige Milliwatt begrenzt, wo die Photodiode dann in Sättigung geht: der erzeugte Strom ist nicht mehr proportional zur einfallenden Leistung.

Sensortyp	Physikalischer Effekt	Beschreibung
Photodiode	Elektron-Loch-Paarerzeugung	Photonen werden in einem Halbleiter absorbiert und erzeugen dort jeweils ein Elektron-Loch-Paar. Durch die internen Potentialgradienten des Halbleiters werden die Elektronen von den Löchern getrennt und ein Strom fließt durch einen extern aufgebauten Stromkreis.
Thermosäule	Seebeck Effekt	Ein Stromkreis wird aus zwei verschiedenen Leitern aufgebaut, die an zwei Stellen miteinander verbunden sind. Gemäß dem Seebeck-Effekt entsteht eine elektrische Spannung bei einer Temperaturdifferenz zwischen den zwei Kontaktstellen.

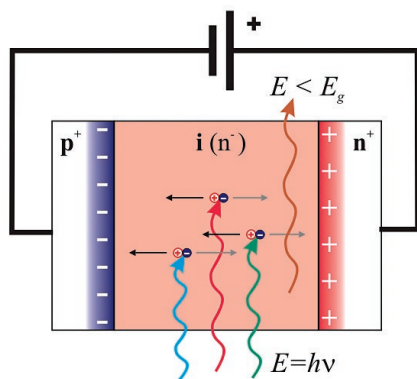


Bild 1: Prinzipbild einer Photodiode

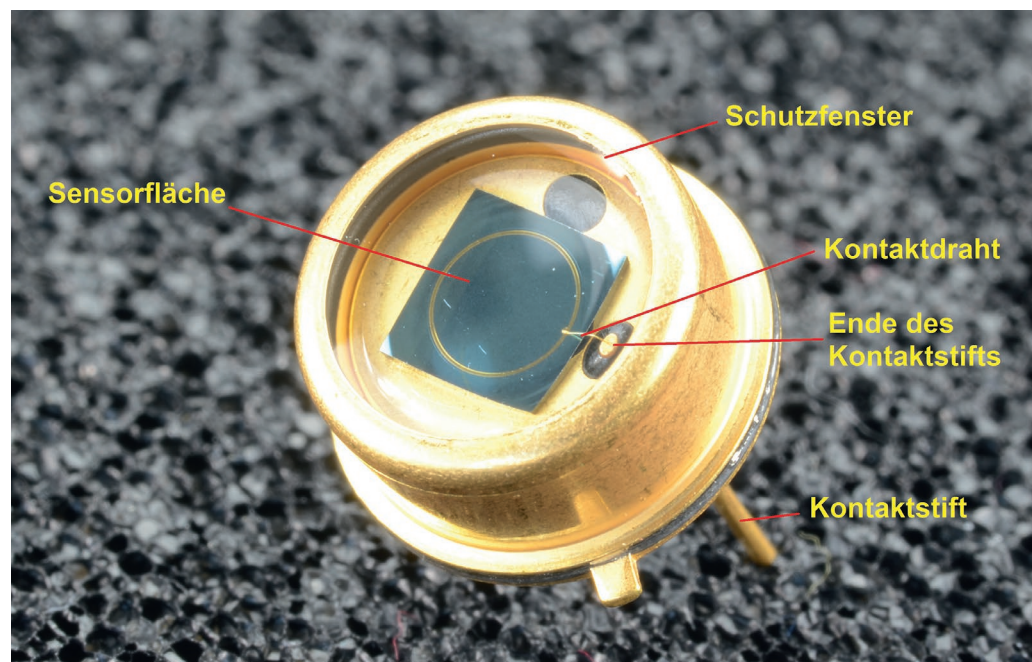


Bild 2: Aufbau einer Photodiode

copyright AT-Fachverlag GmbH, www.photonik.de
 Bilder: Artifex Engineering (2), „Pin-Photodiode“ von Kirnehkrib - Eigenes Werk, Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pin-Photodiode.png#media/File:Pin-Photodiode.png

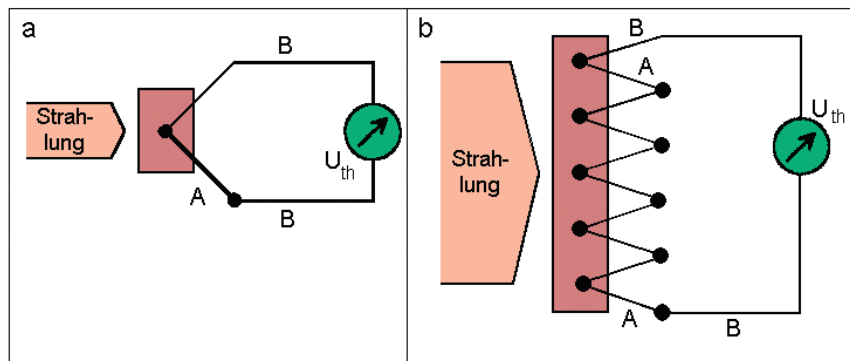


Bild 3: Thermoelement

Thermosäule

- Halbleitermaterialien sind relativ teuer, insbesondere IR-empfindliche Materialien. Somit sind die verfügbaren Sensorflächen in der Größe stark begrenzt.
- Halbleiter haben einen hohen Brechungsindex, was zu einer relativ hohen und gerichteten Reflexion des auftreffenden Strahls führt.
- Das Schutzfenster wirkt wie ein schwaches Etalon und transmittiert somit unterschiedlich stark, je nach Einfallswinkel und -ort des Lichts [1].

Sensortyp Thermosäule

Eine Thermosäule ist ein Sensor bestehend aus einer Anordnung vieler Ther-

moelemente, thermisch parallel und elektrisch in Reihe geschaltet. Diese Anordnung ist für praktische Sensoren notwendig, da die Wärmeempfindlichkeit ($V/^\circ C$) eines Thermoelements sehr klein ist.

**In der Ulbrichtkugel
ist die Leistungsdichte
praktisch vollkommen
homogen verteilt**

Für den Zweck der Laserleistungsmessung ist die bestrahlte Fläche mit einem matten tiefschwarzen Absorbermaterial beschichtet.

Diese Schicht dient dazu, die einfallende Laserstrahlung möglichst vollständig unabhängig von der Wellenlänge zu absorbieren.

Auch in diesem Fall sind gewisse Eigenschaften ersichtlich:

- Die Thermosäule ist wesentlich lichtunempfindlicher als die Photodiode.
- Die Messung der Laserleistung wird durch umgebende Wärmequellen (z. B. eine Hand) verfälscht. Das begrenzt die praktisch messbare Leistung nach unten hin auf einige Milliwatt.
- Das Absorbermaterial ist ausschlaggebend für die Messung. Mit der Zeit bleicht diese Schicht aber aus und führt dazu, dass die Kalibrierung nicht mehr stimmt.

- Thermosäulen reagieren sehr träge, da die Messung auf Wärmefluss beruht. Typische Reaktionszeiten sind ein bis mehrere Sekunden.

Die Ulbrichtkugel

Abhilfe für die oben aufgeführten Unzulänglichkeiten der nackten Photodioden und der Thermosäule bietet die „Ulbrichtkugel“ (integrating sphere). Da die Ulbrichtkugel allein keine Messung vollbringen kann, wird im praktischen Aufbau eine Ulbrichtkugel mit einer Photodiode verheiratet. Die Ulbrichtkugel ist also ein passives Bauelement bestehend aus einer Hohlkugel mit Öffnungen für den Strahlungsein- und -austritt.

Das Material der Hohlkugel muss einen hohen Reflexionsgrad über den zu messenden Wellenlängenbereich aufweisen. Zudem muss die Oberfläche so beschaffen sein, dass die auftreffende Strahlung stark gestreut wird. Hohlkugeln, aus einem speziellen Polymer gedreht, eignen sich für den Wellenlängenbereich von 250 nm – 2,5 μm . Etwas günstiger für diesen Wellenlängenbereich sind BaSO_4 -beschichtete Aluminiumkugeln. Diese neigen aber mit der Zeit zum Vergilben und sind somit für genaue Laserleistungsmessung eher ungeeignet.

Für langewelligere Strahlung im Wellenlängenbereich 700 nm – 20 μm wird eine Goldbeschichtung auf einer rauen, metallischen Oberfläche verwendet. Da Laser in diesem Spektralbereich in der Regel auch hohe Leistung haben, eignet sich massives Kupfer als gut wärmeleitendes Substratmaterial.

Ein solches Gebilde hat zur Folge, dass sich ein eintreffender Laserstrahl durch die mehrfache, stark gestreute Reflexionen gleichmäßig über die gesamte Kugelfläche verteilt. Ein in der Wand der Kugel eingebauter Sensor erfasst nun einen Teil der in die Kugel einfallenden Strahlung mit folgenden wichtigen Änderungen:

- Die Leistungsdichte ist praktisch vollkommen homogen.
- Die Strahlung ist absolut unpolarisiert.
- Die auf den Sensor auftreffende Leistung ist gegenüber der gesamten Laserleistung stark abgeschwächt.

Durch diese einfache Maßnahme entsteht ein Laserleistungsdetektor, der



Bild 4: Ulbrichtkugel mit Photodiode- und Faserport

[1] L.P.Boivin, Appl. Opt. 21(5), pp 918-923, 1982

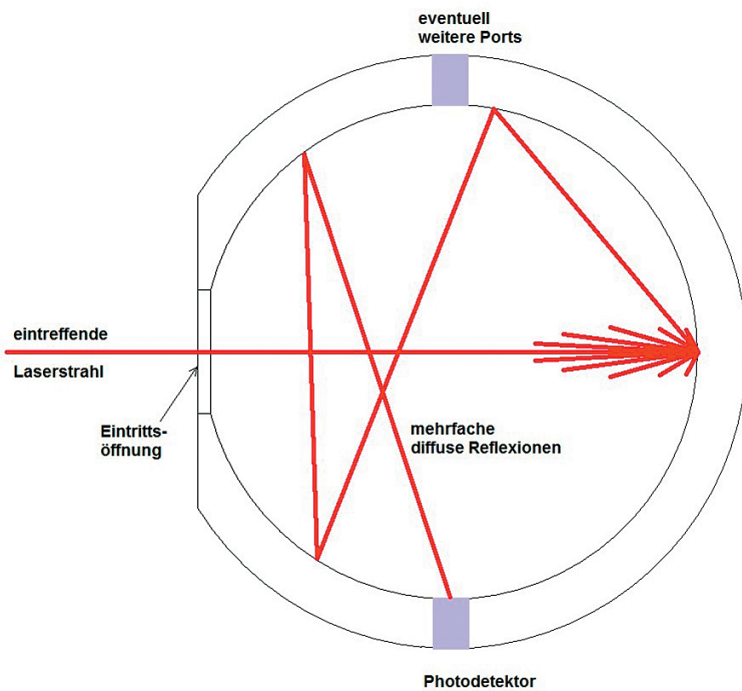


Bild 6: Funktionsweise einer Ulbrichtkugel

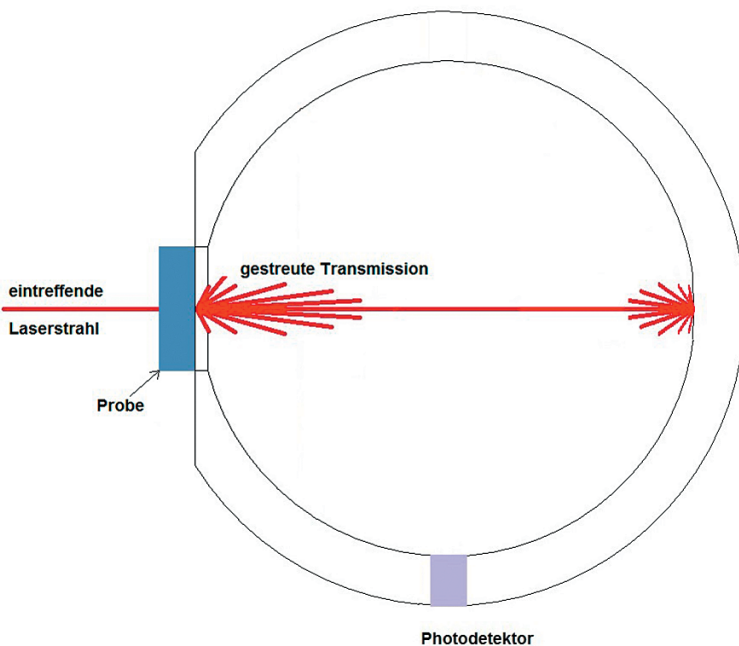


Bild 7: Transmissionsmessung an einem streuenden Objekt

praktisch so schnell wie eine Photodiode reagiert, jedoch deutlich mehr Leistung messen kann. Durch die Wahl der Größe der Ulbrichtkugel kann die Gesamtempfindlichkeit des Systems angepasst werden. Zudem ist der Detektor nun unabhängig von Inhomogenitäten der Leistungsdichte und der Polarisaton. Der Detektor ist auch unabhängig von dem Einfallsort und -winkel der Laserstrahlung.

Mit der Ulbrichtkugel können relativ große Strahldurchmesser genutzt werden, da die Größe der Photodiode selbst nicht der begrenzende Faktor ist. Durch die mindestens 20x so große Kugelinnenfläche im Vergleich zu der Laserstrahlfläche ist auch die Leistungsdichte auf der Kugelinnenwand deutlich geringer als auf einer absorbierenden Thermosäule. Das Wandmaterial kann daher eine höhere Leistungsdichte vertragen

und ändert sich relativ wenig mit der Zeit.

Einen weiteren Vorteil bieten zusätzliche Messports in der Kugelwand, z. B. ein Faseranschluss für simultane Messungen mit einem Spektrometer.

Wie bei der nackten Photodiode besteht allerdings auch bei der Ulbrichtkugel der Nachteil der Wellenlängenabhängigkeit. Somit muss für eine Leistungsmessung das Gerät kalibriert sein und der Anwender muss die Wellenlänge der zu messenden Strahlung kennen. Ferner ist dadurch die Messung breitbandiger Quellen wie Superkontinuumlaser ausgeschlossen. Mit einfachen Mitteln ist die Messung auf Wellenlängen unter etwa 3 µm begrenzt. Langwelligere Quellen können zwar auch vermessen werden, hierfür muss aber der Halbleitersensor gekühlt werden, um den thermischen Rauschpegel zu unterdrücken.

Fazit

Die Ulbrichtkugel mit einer Photodiode entspricht einem nahezu idealen Laserleistungsmessensor. Darüber hinaus lässt sie sich für laserbasierte Messungen wie Transmission an brechenden und streuenden Objekten nutzen, da die Messung praktisch unabhängig von der Strahldivergenz ist. Beispiele hierfür sind die Messung der Transmission von optischen Linsen zur Eignungsprüfung von Materialien oder Beschichtungen oder auch die Messung der Transmission von laserschweißbaren Kunststoffen, um die Betriebsparameter des Schweißlasers einzustellen.

Also, bei uns im Laserlabor heißt es ab jetzt: „Gib mir die Kugel!“

Kontakt

Dipl.-Ing.
Bernhard Neumann
Entwicklungs-
ingenieur
Artifex Engineering



Dr. Steve Wright
Geschäftsleitung /
Managing Director
Artifex Engineering
Dortmunder Str.
16-18
26723 Emden
Tel. +49 (0) 4921 / 58908-0
Fax +49 (0) 4921 / 58908-29
info@artifex-engineering.com
www.artifex-engineering.com

