

Sensoren für Kraft, Druck, Abstand, und Lichtintensität

Stichworte:

Sensor, Messwertaufnehmer, Linearität, Ansprechzeit, Messbereich, Auflösung, Rauschen, Dehnungsmessstreifen, piezoresistiver Effekt, Triangulation, HALL-Effekt, Halbleiter, pn-Übergang.

Literatur:

- /1/ NIEBUHR, J.; LINDNER, G.: „Physikalische Messtechnik mit Sensoren“, Oldenbourg Industrieverlag, München
- /2/ SCHANZ, G. W.: „Sensoren“, Hüthig-Verlag, Heidelberg
- /3/ HAUS, J.: „Optical Sensors“, Wiley-VCH, Weinheim

1 Einleitung

Als Sensoren bezeichnet man Messwertaufnehmer (auch Messgrößenaufnehmer), mit denen eine physikalische oder chemische Größe quantitativ erfasst werden kann. In den meisten Fällen wird der Wert w der Größe in eine elektrische Spannung U oder einen elektrischen Strom I umgesetzt. Durch eine *Kalibrierung* wird die *Kalibrierfunktion* $U(w)$ bzw. $I(w)$ bestimmt, mit der man aus einem gemessenen Spannungs- oder Stromwert auf den zugehörigen Wert der Größe schließen kann. Zur Kalibrierung eines Kraftsensors wird z.B. der Sensor unterschiedlichen, aber bekannten Kräften F_i ausgesetzt und jeweils die zugehörige Spannung U_i gemessen. Anschließend wird U_i über F_i aufgetragen und mit Hilfe eines Fits eine *Kalibrierkurve* durch die Messdaten gelegt.

Wichtige Kenngrößen von Sensoren sind:

- *Linearität*: Oftmals besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Wert der Größe w und dem Ausgangssignal des Sensors, z.B. der Spannung U . Dann gilt:

$$U = k w + U_0$$

wobei k der *Kalibrierfaktor* ist und U_0 die Ausgangsspannung des Sensors im Falle $w = 0$. Die *Kalibrierkurve* ist in diesem Fall eine *Gerade*, der Sensor arbeitet *linear*. Ist $U_0 = 0$, so besteht eine *Proportionalität* zwischen U und w . Dies ist der Idealfall für einen Sensor.

- *Ansprechzeit*: Die Ansprechzeit gibt an, innerhalb welcher Zeit eine Änderung der Größe w zu einer entsprechenden Änderung des Ausgangssignals führt.
- *Messbereich*: Der Messbereich gibt den Wertebereich der Größe w an, der innerhalb festgelegter Fehlergrenzen zu einer mit der Kalibrierfunktion beschreibbaren Änderung des Ausgangssignals führt.
- *Auflösung*: Die Auflösung ist die kleinste Änderung der Größe w , die zu einer eindeutig messbaren Änderung des Ausgangssignals führt.
- *Rauschen*: Unter Rauschen versteht man die inhärenten, zufälligen Schwankungen des Ausgangssignals eines Sensors. Eine wesentliche Quelle für das Rauschen vieler Sensoren ist die Elektronik, die zur Erzeugung des Ausgangssignals eingesetzt wird.

Seit es möglich ist, Sensoren in kompakter bzw. miniaturisierter Bauform herzustellen, oder gar in IC's¹ zu integrieren, haben sie in der modernen Messtechnik und in der industriellen Fertigung eine große Verbreitung gefunden. In diesem Versuch werden Sensoren für Kraft, Druck in Gasen, Abstand, Winkel und Lichtleistung bzw. Lichtintensität behandelt.

2 Theorie

2.1 Kraftsensor auf Basis eines Biegestabes

Mit den im Basispraktikum eingesetzten Kraftsensoren wird eine mechanische Kraft vom Betrag F in ein dazu proportionales Spannungssignal U umgesetzt. Als Sensor dient ein Biegestab (s. Abb. 1). Durch die Kraft F wird der einseitig gehaltene Stab elastisch verformt, es gilt das HOOKEsche Gesetz². Oben findet eine Dehnung des Stabes statt, unten eine Stauchung. Dehnung und Stauchung sind proportional zu

¹ IC: *Integrated Circuit*. Eine in einem Kunststoffgehäuse eingeschlossene integrierte elektronische Schaltung.

² ROBERT HOOKE (1635 – 1703)

$F = |\mathbf{F}|$. Sie werden mit Dehnungsmessstreifen (DMS) in zu F proportionale Änderungen des elektrischen Widerstandes der DMS umgesetzt. Die DMS sind zu einer *Halbbrücke* (Abb. 2) zusammen geschaltet. An eine Brückendiagonale wird die Betriebsspannung U_b angelegt, über der anderen Diagonalen wird die Ausgangsspannung U gemessen. Da diese Spannung sehr klein ist (mV-Bereich), wird sie mit einem Messverstärker verstärkt, der gleichzeitig auch die Betriebsspannung U_b liefert. Die Ausgangsspannung des Messverstärkers, U_M , ändert sich linear mit F .

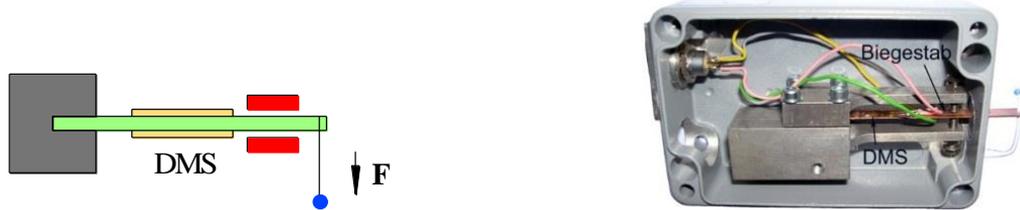


Abb. 1: *Links*: Prinzip der Kraftmessung mit einem Biegestab (grün), der links in einem Block (grau) fixiert ist. Die Gewichtskraft $\mathbf{F} = \mathbf{G}$ eines angehängten Gewichtes (blau) verursacht eine Biegung des Stabes, die mit Dehnungsmessstreifen (DMS, gelb) gemessen wird. Die mechanischen Begrenzungen (rot) verhindern eine Überdehnung des Stabes durch zu große Kräfte. *Rechts*: Blick in das Gehäuse eines im Basispraktikum eingesetzten Kraftsensors. Die auf den Biegestab aufgeklebten DMS sind so dünn, dass sie kaum erkennbar sind. Die Kabel sind die Anschlussleitungen der DMS. Sie führen zur Anschlussbuchse links oben, an die der Messverstärker angeschlossen wird.

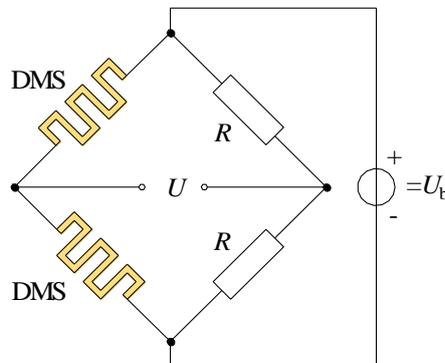


Abb. 2: Halbbrücke mit zwei DMS gleichen Typs und zwei gleichen Widerständen R . Ein DMS wird gedehnt, der andere gestaucht. U_b ist die Betriebsspannung der Brücke, U die Ausgangsspannung, die mit einem Messverstärker weiter verstärkt wird.

2.2 Drucksensor auf Basis des piezoresistiven Effektes

Für die Messung von Druckänderungen in Gasen steht ein Drucksensor des Typs SENSORTECHNICS HCLA12X5DB zur Verfügung. Es handelt sich dabei um einen Halbleiterdrucksensor, der auf dem *piezoresistiven Effekt* basiert. Darunter versteht man die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Materials (hier p-Silizium, p-Si; zur Bezeichnung vgl. Kap. 2.4.1) unter dem Einfluss mechanischer Spannungen.

Abb. 3 (links) zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Sensors. In der Mitte einer gasdichten Kammer befindet sich eine Si-Membran von einigen Mikrometern Dicke, die die Kammer gasdicht in zwei Hälften teilt. Die obere Hälfte der Kammer wird über einen Schlauchanschluss mit einem Gasvolumen vom Druck p_1 verbunden, die untere mit einem Gasvolumen vom Druck p_2 . Bei einer Druckdifferenz $\Delta p = p_2 - p_1$ wölbt sich die Membran in Richtung der Kammer mit dem niedrigeren Druck. Am Rande der Membran sind piezoresistive Si-Elemente angebracht, auf die infolge der Membranwölbung Kräfte ausgeübt werden. Diese führen zur Dehnung und damit zu einer Widerstandsänderung des Materials³, die mit Hilfe einer in dem Sensor integrierten Brückenschaltung in ein Spannungssignal gewandelt wird. Mit einer ebenfalls bereits im Sensor enthaltenen integrierten Schaltung wird dieses Signal weiter verstärkt. Am Ausgang des Drucksensors steht schließlich eine Spannung U zur Verfügung, die sich linear mit der Druckdifferenz Δp ändert.⁴

³ Der Effekt ist der Widerstandsänderung eines metallischen DMS bei Dehnung vergleichbar. Die mit einer bestimmten Dehnung einhergehende Widerstandsänderung ist jedoch bei einem piezoresistiven Material erheblich größer als bei einem metallischen DMS. Für Metalle ist $k = 2 - 4$, für Si ist $k \approx 100$.

⁴ Die elektrische Verbindung (engl. *Bond*) zwischen der integrierten Schaltung und den piezoresistiven Elementen erfolgt über dünne *Bonddrähte*, die an den *Bonding Pads* angeschlossen sind.



Abb. 3: *Links*: Schematische Darstellung eines piezoresistiven Drucksensors zur Messung eines Differenzdruckes $\Delta p = p_2 - p_1$. *Rechts*: Blick in das Gehäuse des im Basispraktikum eingesetzten Drucksensors. Innen rechts befindet sich auf einer kleinen Platine der in einen IC integrierte Sensor. Rechts außen sind die Schlauchanschlüsse zu erkennen ($p_1 = p^-$, $p_2 = p^+$).

2.3 Abstandssensor auf Basis der Triangulation

Zur Abstandsmessung wird ein Laserdistanzsensor eingesetzt (Typ BAUMER OADM 12U6460/S35), der nach dem Prinzip der Triangulation arbeitet (s. Abb. 4 links). Aus einer Laserdiode gelangt ein kollimierter, dünner Laserstrahl auf die Oberfläche eines Objektes O, deren Abstand zur Bezugsebene E im Sensor gemessen werden soll. In einem bekannten seitlichen Abstand d vom Austritt des Laserstrahls befindet sich der Mittelpunkt eines Objektivs L. Mit diesem Objektiv wird das vom Punkt C auf dem Objekt gestreute Licht auf eine CCD-Zeile abgebildet⁵. Es entsteht ein Bildpunkt A, der vom rechten Rand der CCD-Zeile um die Strecke q entfernt ist. Der Abstand q variiert mit der Entfernung s zwischen E und O. Für das *Dreieck* ABC (daher der Name *Triangulation*) gilt:

$$(1) \quad \tan \alpha = \frac{d + q}{s}$$

Außerdem gilt mit der Entfernung p zwischen der Mittenebene der Linse und der Frontseite der CCD-Zeile (Ebene E):

$$(2) \quad \tan \alpha = \frac{q}{p}$$

Daraus folgt:

$$(3) \quad \frac{d + q}{s} = \frac{q}{p} \quad \rightarrow \quad s = \frac{(d + q) p}{q}$$

In Kenntnis der Geräteparameter d und p lässt sich somit durch Messung der Größe q die Entfernung s bestimmen.

Das Signal der CCD-Zeile wird von einem Mikroprozessor ausgelesen, der daraus die Größe q bestimmt und mit den bekannten geometrischen Daten d und p in ein Spannungssignal U_{LDS} umrechnet, das sich mit s linear ändert. Dieses Signal steht am Ausgang des Laserdistanzensors zur Verfügung.

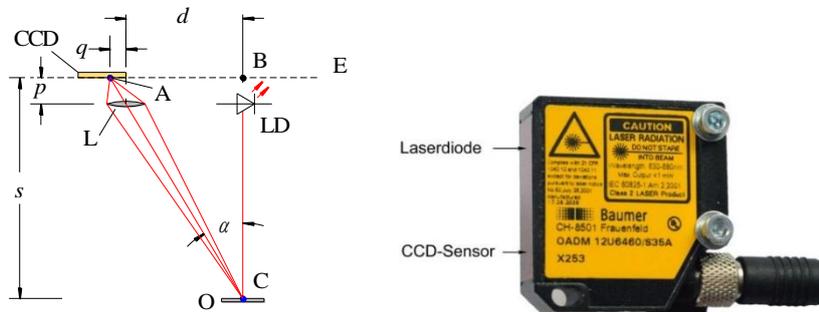


Abb. 4: *Links*: Funktionsprinzip eines nach dem Prinzip der Triangulation arbeitenden Laserdistanzensors (schematisch). Tatsächlich können Objektiv L und CCD-Zeile gegenüber der Horizontalen verkippt sein, um innerhalb des Messbereiches des Sensors Verzerrungen bei der Abbildung des Objektpunktes C zu minimieren. *Rechts*: Foto des im Basispraktikum eingesetzten Laserdistanzensors. Rechts unten befindet sich das Anschlusskabel, über das die Betriebsspannung zugeführt und das Ausgangssignal abgeleitet wird.

⁵ CCD: *Charged Coupled Device*. Eine CCD-Zeile besteht aus einer zeilenförmigen Anordnung von z.B. 128 oder 512 (oder mehr) kleinen Fotodetektoren (*Pixeln*), die jeweils eine Breite von wenigen Mikrometern haben.

2.4 Fotodetektoren

Fotodetektoren dienen zur Detektion von Licht. Messbare Größen sind die Lichtleistung P_L mit der Einheit W (Watt) bzw. die Lichtintensität I_L mit der Einheit W/m^2 . Aus der Vielzahl verschiedener Fotodetektoren wollen wir uns hier auf die *Fotodiode* beschränken. Sie wandelt die Größen P_L bzw. I_L in einen elektrischen Strom I um, der sich linear mit P_L bzw. I_L ändert. Bei Bedarf kann ein Strom-Spannungswandler den Strom I in eine dazu proportionale elektrische Spannung U konvertieren.

Für ein detailliertes Verständnis der Funktion einer Fotodiode sind Kenntnisse aus dem Bereich der Festkörperphysik und Halbleiterphysik erforderlich, die erst in späteren Semestern erarbeitet werden. Deshalb beschränken wir uns hier auf eine kurze Beschreibung der Grundlagen ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise.

2.4.1 Si-Halbleiter und pn-Übergang

Fotodioden werden überwiegend aus kristallinem Silizium (Si), einem Halbleiter, hergestellt. In reinem (*intrinsischem*) Si ist jedes vierwertige Si-Atom von vier gleichen Nachbarn umgeben und mit diesen in kovalenter Bindung verbunden (5). Alle vier äußeren Elektronen des Si sind damit räumlich fixiert.

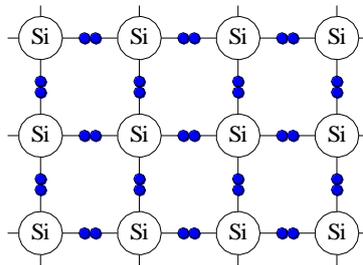


Abb. 5: Kristallstruktur von reinem Si. Die blauen Kreise stellen schematisch die an der kovalenten Bindung beteiligten Elektronen dar.

Durch Dotierung von reinem Si mit fünfwertigen Atomen (*Donatoren*) entsteht *n-Silizium* (Abb. 6 links), ein *n-Halbleiter*⁶. Für die kovalente Bindung des Donatoratoms mit den vier Si-Nachbarn werden nur vier Elektronen benötigt, das fünfte Elektron (*negativer n-Ladungsträger*) ist deshalb nur sehr schwach an den Rumpf des Donatoratoms gebunden. Es ist daher im Material nahezu frei beweglich.

Durch Dotierung von reinem Si mit dreiwertigen Atomen (*Akzeptoren*) entsteht *p-Silizium* (Abb. 6 rechts), ein *p-Halbleiter*. In der kovalenten Bindung des Akzeptoratoms mit den vier Si-Nachbarn fehlt ein Elektron. Dadurch entsteht ein *Loch*, das sich wie ein positiver Ladungsträger verhält (*p-Ladungsträger*). Dieses Loch kann ein Elektron aus seiner Umgebung einfangen. Das eingefangene Elektron hinterlässt ein neues Loch, das wiederum ein Umgebungselektron einfangen kann usw. Auf diese Weise kann das Loch durch das Material wandern, es ist beweglich.

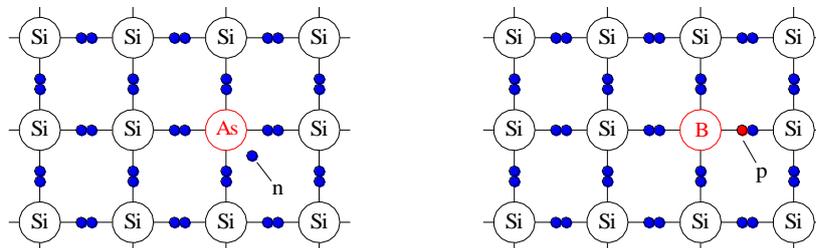


Abb. 6: *Links*: Kristallstruktur von n-Si, in dem einige vierwertige Si-Atome durch fünfwertige Atome ersetzt sind, hier Arsen (As). Das fünfte Valenzelektron des As bildet einen beweglichen n-Ladungsträger. *Rechts*: Kristallstruktur von p-Si, in dem einige vierwertige Si-Atome durch dreiwertige Atome ersetzt sind, hier Bor (B). Das fehlende Valenzelektron des B, ein sogenanntes *Loch*, bildet einen beweglichen p-Ladungsträger.

Bringt man einen p- und einen n-Halbleiter zusammen, so entsteht ein *pn-Übergang* (Abb. 7). In der Kontaktregion gibt es große Konzentrationsunterschiede der n- und p-Ladungsträger. Deshalb diffundieren Löcher aus dem p-Si in das n-Si und rekombinieren dort mit den im Überschuss vorhandenen Elektronen.

⁶ Die typische Dotierungskonzentration in Silizium, das für den Bau von Fotodioden verwendet wird, liegt in der Größenordnung von 10^{15} - 10^{17} Fremdatomen/ cm^3 . Reines Si enthält ca. $0,5 \times 10^{23}$ Si-Atome/ cm^3 .

Ebenso diffundieren Elektronen aus dem n-Si in das p-Si und rekombinieren dort mit den im Überschuss vorhandenen Löchern. Dadurch entsteht eine von beweglichen Ladungsträgern entleerte Zone (*depletion zone*), die sogenannte *Sperrschicht S*. In dieser Schicht lassen die diffundierten Elektronen positiv ionisierte Donatoren zurück, die diffundierten Löcher negativ ionisierte Akzeptoren (Abb. 8). Diese Ionen heißen *Raumladungen*, sie erzeugen in der Sperrschicht (*Raumladungszone*) ein elektrisches Feld \mathbf{E} (*built-in-Feld*).

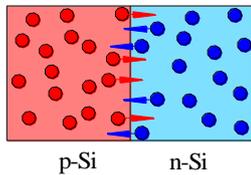


Abb. 7: Entstehung eines pn-Übergangs durch Kontakt zwischen zwei Schichten aus p-Si und n-Si. In der Übergangszone kommt es zur Diffusion von n-Ladungsträgern (blau) in das p-Si und von p-Ladungsträgern (rot) in das n-Si.

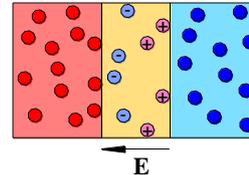


Abb.8: Nach Diffusion der p- und n-Ladungsträger bleiben in der n-Schicht positiv ionisierte Donatoren \oplus zurück, in der p-Schicht negativ ionisierte Akzeptoren (\ominus). Es entsteht eine Sperrschicht S (gelb), in der die Raumladungen ein elektrisches Feld \mathbf{E} erzeugen. Die realen Breitenverhältnisse der p-, n- und Sperrschicht weichen von diesem Prinzipbild erheblich ab.

2.4.2 Funktionsprinzip einer Fotodiode

Wir betrachten eine Fotodiode auf Basis eines pn-Übergangs gem. Abb. 9. Die Bestrahlung der Fotodiode mit Licht führt zur Absorption von Photonen. Deren Energie reicht aus, um im Silizium Elektron-Loch-Paare durch *inneren Fotoeffekt* zu erzeugen. Dabei werden Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband gehoben und hinterlassen im Valenzband ein Loch. Die Zahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare ist proportional zur Zahl der absorbierten Photonen und damit zur Leistung P_L bzw. Intensität I_L des einfallenden Lichtes.

Die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren findet im p-Bereich, im n-Bereich und in der Sperrschicht der Fotodiode statt. Die in der Sperrschicht erzeugten Ladungsträger können durch das dort herrschende elektrische Feld \mathbf{E} direkt räumlich getrennt und beschleunigt werden (Abb. 9). Ladungsträger, die in der p- und n-Schicht erzeugt wurden, müssen vor ihrer Rekombination durch Diffusion in die Sperrschicht gelangen, bevor sie dort beschleunigt werden können.

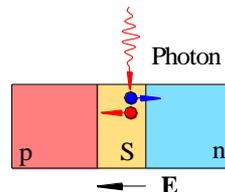


Abb.9: Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares, hier durch Absorption eines Photons in der Sperrschicht S einer Fotodiode. Durch das elektrische Feld \mathbf{E} werden die Ladungsträger (Elektron und Loch) getrennt und beschleunigt.

Verbindet man die Anschlusskontakte der p- und n-Schicht miteinander (Abb. 10 links und Mitte), so fließt ein Fotostrom I , der sich aus einem *Driftstrom* (Photonenabsorption in der Sperrschicht) und einem *Diffusionsstrom* (Photonenabsorption außerhalb der Sperrschicht) zusammensetzt und der sich linear mit der Leistung P_L bzw. Intensität I_L des einfallenden Lichtes ändert. Dies ist die einfachste Betriebsart einer Fotodiode⁷.

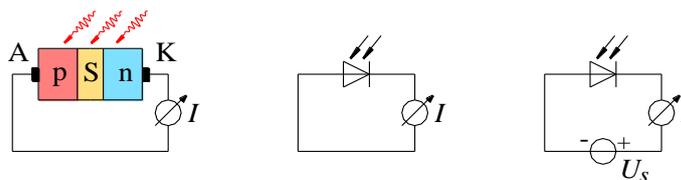


Abb. 10: Links: schematische Darstellung einer pn-Fotodiode, deren Bestrahlung mit Licht zu einem Fotostrom I führt. Schwarz: Anschlusskontakte der p-Schicht (Anode A) und der n-Schicht (Kathode K). Mitte: zugehöriges Schaltbild. Der senkrechte Strich des Diodensymbols symbolisiert die Kathode K. Rechts: Schaltbild einer Fotodiode mit Sperrspannung U_s .

⁷ Bei dieser Betriebsart wird oft auch von einem *Fotoelement* statt von einer *Fotodiode* gesprochen.

Häufig werden Fotodioden mit einer von außen angelegten *Sperrspannung* U_S zwischen Anode und Kathode betrieben, die im Bereich einiger Volt liegt (Abb. 10 rechts). Dadurch wird die *Sperrschicht* S verbreitert. Dies führt zu einer Verringerung ihrer Kapazität C (Analogie zum \rightarrow *Plattenkondensator*). Außerdem wird durch U_S die elektrische Feldstärke E in der Sperrschicht vergrößert, wodurch die Ladungsträger stärker beschleunigt werden. Beide Effekte führen zu einer Verringerung der Zeitkonstante $\tau = RC^8$ des Ausgangssignals der Fotodiode bis hinunter in den 10 ns-Bereich. Damit lassen sich auch schnelle Änderungen von Lichtleistungen bzw. Lichtintensitäten registrieren.

2.4.3 Technische Realisierung einer Fotodiode

Zur Herstellung einer Fotodiode startet man gem. Abb. 11 (links) mit einem Stück *n-Typ-Si* (*bulk-Material*), das einige (10 – 100) μm dick ist. Auf das Material bringt man eine Maske aus SiO_2 auf. Die Maske begrenzt die lichtempfindliche Fläche der Fotodiode auf den Bereich, der frei von SiO_2 ist. Anschließend lässt man von oben durch Diffusion oder Ionen-Implantation dreiwertige Atome in das *bulk-Material* eindringen, bis sich durch diese Dotierung in einer dünnen Schicht (Dicke im Bereich 1 μm), der p-Schicht, ein Überschuss an p-Ladungsträgern gebildet hat. Zwischen dieser p-Schicht und dem n-Material bildet sich eine ebenfalls dünne Sperrschicht S aus (Dicke ebenfalls im μm -Bereich). Schließlich werden die p- und n-Schicht mit metallischen Anschlusskontakten versehen (Abb. 11 links und rechts) und die Frontseite der Fotodiode bei Bedarf mit einer Antireflexschicht (AR) überzogen. Den Abschluss nach außen bildet in der Regel ein Schutzglas (G).

Als *spektrale Empfindlichkeit* S_λ einer Fotodiode bei der Wellenlänge λ ist der Quotient aus Fotostrom I und eingestrahelter Lichtleistung P_L definiert:

$$(4) \quad S_\lambda = \frac{I}{P_L} \quad \text{mit} \quad [S_\lambda] = \text{A/W}$$

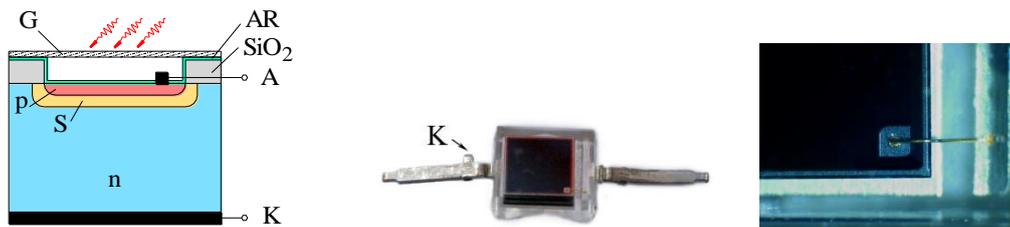


Abb. 11: *Links*: Schematische Darstellung einer Si-Fotodiode im Querschnitt. Die Antireflexschicht (AR) ist grün gezeichnet, die metallischen Anschlusskontakte schwarz. G ist ein Schutzglas.

Mitte: Foto einer Fotodiode (SIEMENS BPW 34) mit nach außen gebogenen Lötkontakten. Auf der schwarzen lichtempfindlichen Fläche befindet sich unten rechts der Anschlusskontakt der Anode A, der mit dem rechten Lötkontakt verbunden ist. Die „Fahne“ am linken Lötkontakt markiert diesen als Anschlusskontakt der Kathode K.

Rechts: Vergrößerter Ausschnitt der Frontseite der Fotodiode unter dem Mikroskop. Unten rechts auf der schwarzen lichtempfindlichen Fläche befindet sich der Anoden-Kontakt von ca. $0,25 \times 0,25 \text{ mm}^2$ Größe mit einem Gold-Anschlussdraht (Bond-Draht) von ca. 25 μm Durchmesser. Der Draht ist rechts mit dem nach außen geführten Anoden-Lötkontakt verbunden. Der äußere Rand und Teile des Golddrahtes erscheinen unscharf, da auf die Ebene des Anoden-Kontaktes scharf gestellt wurde.

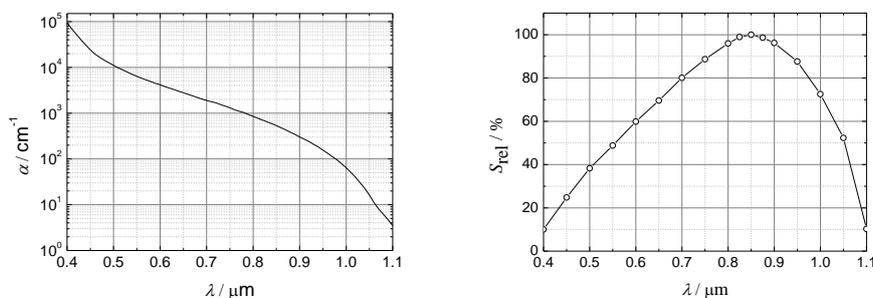


Abb. 12: *Links*: Absorptionskoeffizient α von Silizium als Funktion der Wellenlänge λ (Datenquelle: A. M. GREEN, Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 1305–1310).

Rechts: Relative spektrale Empfindlichkeit S_{rel} der Fotodiode SIEMENS BPW 34 als Funktion der Wellenlänge λ . (Datenquelle: SIEMENS-Datenblatt.)

⁸ R ist der für das Zeitverhalten maßgebliche Widerstand in der äußeren Beschaltung der Fotodiode.

Je größer die Wellenlänge λ des Lichtes ist, mit dem die Fotodiode beleuchtet wird, desto kleiner ist der Absorptionskoeffizient α (Abb. 12 links) und desto größer demnach die Eindringtiefe der Photonen. Kurzwelliges Licht wird zum großen Teil bereits im Schutzglas, der äußeren Antireflexschicht oder in der p-Schicht absorbiert, langwelliges zum großen Teil erst in der n-Schicht. Je weiter entfernt von der Sperrschicht die Photonenabsorption stattfindet, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Ladungsträger in die Sperrschicht diffundieren können, bevor sie rekombinieren. Solche Photonen können deshalb nur zu einem geringeren Teil zum Fotostrom beitragen. Insgesamt ergibt sich damit eine von λ abhängige spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode, die nach oben durch die Bandlücke des Halbleitermaterials begrenzt ist (ca. $1,1 \mu\text{m}$ für Si). Abb. 12 (rechts) zeigt als Beispiel die *relative* spektrale Empfindlichkeit $S_{\text{rel}}(\lambda)$ der im Praktikum eingesetzten Fotodiode.

3 Versuchsdurchführung

Achtung:

Beim Umgang mit Laserlicht muss darauf geachtet werden, dass weder der Laserstrahl direkt, noch reflektierte Strahlen in die Augen gelangen. Es besteht die Gefahr der Netzhautzerstörung durch lokal extrem hohe Intensitäten! Der Laserstrahl muss daher immer in einer Höhe unter ca. 1,2 m gehalten werden!

Bitte auch auf die angegebene Versorgungsspannung der Sensoren achten und diese nicht überschreiten !

Zubehör:

Digitaloszilloskop TEKTRONIX TBS 1102B - EDU, Digital-Multimeter (AGILENT U1251B und FLUKE 112, METRALINE DM 62), 3 Netzgeräte (PHYWE (0 - 15 / 0 - 30) V), Kraftsensor (U-OL) mit Messverstärker (U-OL), Gewichtssatz, unbekanntes Gewicht, Laborwaage, Drucksensor (SENSORTECHNICS HCLA12X5DB) auf Grundplatte mit Absperrhähnen an Stativ, ERLLENMEYER-Kolben mit geschliffenem Stopfen auf Tisch, U-Rohr-Manometer (Wasserfüllung) mit Halterung und Ablese skala, Becherglas auf Scherentisch, Schlauchmaterial, Laserdistanzsensor (BAUMER OADM 12U6460/S35), Feder mit Stange und Kugel an Stativ, Becherglas mit Glycerin/Wasser-Gemisch (190 ml Wasser auf 1000 ml Glycerin), Fotodiode SIEMENS BPW 34, Helium-Neon-Laser auf Dreieckschiene, Polarisationsfilter in THORLABS-Drehhalterung, U-Halter für Fotodiode, Reiter.

Hinweis:

Ausgewählte Kenndaten der eingesetzten Sensoren finden sich in Tab. 1 im Anhang (Kap. 4).

3.1 Kalibrierung eines Kraftsensors

Der an einem Stativ aufgehängte Kraftsensor soll mit Hilfe eines Gewichtssatzes kalibriert werden. Zunächst wird der Kraftsensor mit dem Messverstärker verbunden, mit dem die Brückenspannung U auf die Spannung U_M verstärkt wird. Der Messverstärker wird über ein Netzgerät mit Betriebsspannung versorgt, die Dämpfung wird eingeschaltet. Für mindestens 5 Gewichte G im Bereich (0 - 100) mN wird die Ausgangsspannung U_M des Messverstärkers mit einem Voltmeter gemessen. Zur Berechnung von $G = mg$ aus den Massen m der Gewichte wird für die Erdbeschleunigung g der Wert für Oldenburg verwendet: $g = 9,8133 \text{ m/s}^2$, der als fehlerfrei angenommen wird. Anschließend wird G über U_M aufgetragen und die Kalibrierkurve ermittelt. Da der Sensor linear arbeitet, ist die Kalibrierkurve eine Gerade, deren Parameter mit Hilfe der linearen Regression bestimmt werden.

Schließlich wird ein unbekanntes Gewicht, an den Kraftsensor gehängt und die zugehörige Ausgangsspannung U_M des Messverstärkers gemessen. Mit Hilfe der Kalibrierkurve wird daraus die Gewichtskraft G und die Masse m des Gewichtes bestimmt. Der Größtfehler von m ergibt sich aus dem Größtfehler von U_M , die Fehler der Parameter der Ausgleichsgeraden können vernachlässigt werden. Die Masse m wird zusätzlich mit einer Laborwaage ermittelt (Fehler vernachlässigbar). Beide Messwerte werden miteinander verglichen.

3.2 Kalibrierung eines Drucksensors

Der Drucksensor wird kalibriert, indem zwischen seinen beiden Schlauchanschlüssen definierte Druckdifferenzen Δp eingestellt werden und jeweils die zugehörige Ausgangsspannung U gemessen wird.

Der Schlauchanschluss mit der Kennzeichnung „-“ bleibt offen. Er steht dadurch in direktem Kontakt mit der Umgebungsluft. Der Anschluss mit der Kennzeichnung „+“ wird mit dem Gasvolumen verbunden, dessen Überdruck Δp im Vergleich zum Umgebungsdruck gemessen werden soll. Für einen linearen Betrieb des Sensors muss bei dieser Betriebsart $\Delta p \geq 0$ sein, d.h. der Druck am „+“-Eingang muss immer größer sein als der Druck am „-“-Eingang. Die maximal zulässige Druckdifferenz beträgt $\Delta p = + 1,25 \times 10^3 \text{ Pa}$, die bei einer Versorgungsspannung des Sensors von + 5 V (Netzgerät) in ein Spannungssignal von $U = U_0 + 2 \text{ V}$ umgesetzt wird ($U_0 = 2,25 \text{ V}$)⁹. Die Druckdifferenz $\Delta p = 0 \text{ Pa}$ erzeugt eine

⁹ Man könnte den Sensor auch so betreiben, dass der Anschluss „+“ in Kontakt mit der Umgebungsluft steht und am Anschluss „-“ ein Unterdruck herrscht. Die maximale Druckdifferenz wäre in diesem Fall $\Delta p = - 1,25 \times 10^3 \text{ Pa}$, die in ein Spannungssignal von $U = U_0 - 2 \text{ V}$ umgesetzt wird.

Spannung von $U = U_0 + 0 \text{ V} = U_0$. Für Druckdifferenzen zwischen 0 Pa und $1,25 \times 10^3 \text{ Pa}$ ergeben sich Ausgangsspannungen im Bereich $U_0 \leq U \leq U_0 + 2 \text{ V}^{10}$.

Die für die Kalibrierung des Sensors benötigten Druckdifferenzen lassen sich mit einer Anordnung gem. Abb. 13 einstellen. Das Luftvolumen in einem luftdicht verschlossenen ERLLENMEYER-Kolben E ist über ein Leitungs- und Schlauchsystem mit dem Drucksensor D und einem U-Rohr-Manometer M verbunden (Hahn H_1 geöffnet, Hahn H_2 geschlossen). Der Druck p in diesem Volumen kann durch Variation des Wasserstandes in E verändert werden. Diese Variation erfolgt durch Heben oder Senken eines mit Wasser gefüllten Vorratsgefäßes V mit Hilfe eines Scherentisches S. V und E sind über einen beidseitig in das Wasser eintauchenden Schlauch miteinander verbunden. Die Differenz zwischen dem Druck p in E und dem Umgebungsluftdruck p_L ,

$$(5) \quad \Delta p = p - p_L$$

kann mit Hilfe des U-Rohr-Manometers gemessen werden. Sie ist bei einer Höhendifferenz h_m im Manometer gegeben durch:

$$(6) \quad \Delta p = \rho_m h_m g$$

wobei ρ_m die Dichte der Flüssigkeit im Manometer (hier Wasser) und g die Erdbeschleunigung ist (g wie in Kap. 3.1). Für die Dichte ρ_m von Wasser im Temperaturbereich von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ kann ein als fehlerfrei angenommener Wert von 998 kg/m^3 verwendet werden.

Frage 1:

Wie groß darf h_m höchstens sein, damit die maximale Druckdifferenz des Sensors nicht überschritten wird? (Bitte vorab überlegen und auf der vorbereiteten Messwerttabelle notieren!)

Für mindestens 5 verschiedene Druckdifferenzen (zugehörige Höhen h_m ausmessen) wird die Ausgangsspannung U des Drucksensors D mit einem Voltmeter gemessen. Δp (Gl.(6)) wird über U aufgetragen. Für Δp werden Fehlerbalken eingezeichnet, die sich aus dem Größtfehler der Höhen h_m ergeben. Schließlich wird die Kalibrierkurve ermittelt und eingezeichnet. Da der Sensor linear arbeitet, ist die Kalibrierkurve eine Gerade, deren Parameter mit Hilfe der linearen Regression bestimmt werden.

Hinweis zum Rauschen:

Das elektronische Rauschen des Drucksensors (s. Tab. 1 im Anhang (Kap.4)) führt zu Schwankungen der Ausgangsspannung U , die sich mit Hilfe der Kalibrierkurve in ein Rauschen des Drucksignals umrechnen lassen. Dieses Rauschen liegt unterhalb der Fluktuationen in den Druckwerten nach Gl.(6), die sich aus der beschränkten Ablesegenauigkeit der Höhendifferenz h_m ergeben. Es kann deshalb bei den durchzuführenden Messungen vernachlässigt werden.

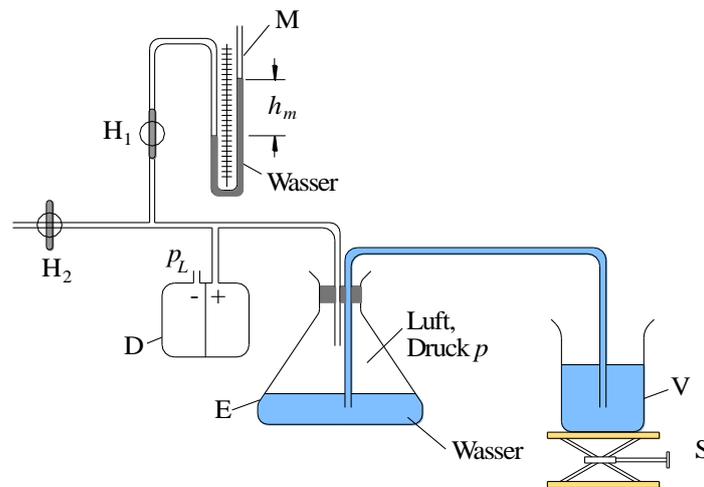


Abb. 13: Anordnung zur Einstellung von Druckdifferenzen $\Delta p > 0$ gegenüber dem Umgebungsluftdruck p_L . Einzelheiten siehe Text.

¹⁰ U_0 und U variieren mit der Betriebsspannung (nominell 5 V). Eine einmal eingestellte Spannung darf deshalb während der Messung nicht verändert werden.

3.3 Abstandsmessung mit einem Laser-Distanzsensor

Mit einem Laser-Distanzsensor (Typ BAUMER OADM 12U6460/S35) soll das zeitliche Verhalten einer gedämpften harmonischen Schwingung untersucht werden. Gesucht sind die Kreisfrequenz ω der Schwingung und die Dämpfungskonstante α . Zur Messung beider Größen wird wie folgt vorgegangen.

An einer Feder ist gem. Abb. 14 über eine Stange S eine Kugel K befestigt, die zur Dämpfung ihrer Bewegung in ein Becherglas B mit einem Glycerin-Wasser-Gemisch eintaucht. Die Stange S wird um einige Zentimeter nach unten ausgelenkt und dann losgelassen (Messbereich des Sensors beachten, s. Tab. 1 im Anhang (Kap. 4)). Kugel und Stange führen danach eine gedämpfte harmonische Oszillation aus. Die Auslenkung aus der Ruhelage, x , lässt sich als Funktion der Zeit t durch folgende Gleichung beschreiben:

$$(7) \quad x(t) = x_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$$

Darin ist x_0 die Anfangsamplitude (d.h. die anfängliche Auslenkung der Kugel), ω die Kreisfrequenz der Schwingung und α die Dämpfungskonstante. Zum Zeitpunkt des Loslassens der Stange sei $t = 0$.

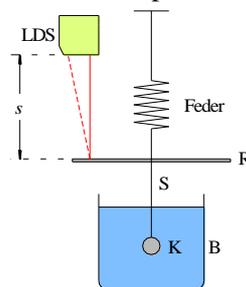


Abb.14: Messung des Verlaufs einer gedämpften harmonischen Schwingung mit einem Laserdistanzsensor LDS.

Die Auslenkung $x(t)$ wird mit dem Laserdistanzsensor in ein Spannungssignal $U(t)$ umgesetzt. Dazu ist an der Stange S eine Reflektorscheibe R angebracht, auf die der Laserstrahl des Sensors gerichtet wird. Die Ausgangsspannung des Sensors ist gegeben durch:

$$(8) \quad U(t) = U_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t) + U_{DC}$$

Dabei ist U_{DC} ein Gleichspannungsanteil, der vom Abstand zwischen dem Laserdistanzsensor LDS und der Reflektorscheibe R in der Ruhelage der Kugel abhängt (s. Abb. 15).

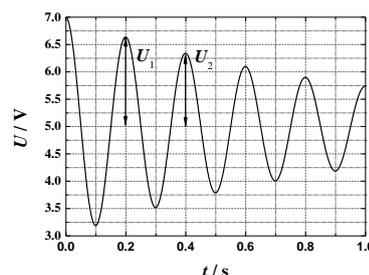


Abb.15: Exemplarische Darstellung des Ausgangssignals des Laserdistanzensors gem. Gl. (8). In diesem Beispiel ist $U_0 = 2 \text{ V}$ und $U_{DC} = 5 \text{ V}$. Die Spannungen U_i werden zu den Zeitpunkten t_i gemessen (hier $t_0 = 0 \text{ s}$, $t_1 = 0,2 \text{ s}$, $t_2 = 0,4 \text{ s}, \dots$).

$U(t)$ wird mit einem Digital-Oszilloskop im SINGLE-SEQ-Modus aufgezeichnet. Aus der aufgezeichneten Kurve wird mit Hilfe der Zeit-Cursor die Frequenz f der gedämpften Schwingung ermittelt und daraus ω berechnet. Zur Bestimmung der Dämpfungskonstante α werden die Amplituden U_i der Teilschwingungen zu den Zeiten t_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) mit Hilfe der Spannungs-Cursor gemessen (Abb. 15). Für U_i und t_i müssen keine Fehler angegeben werden. U_i wird über t_i in einem halblogarithmischen Diagramm dargestellt (U_i auf logarithmischer Achse). Wird für die Skalierung der Ordinate der natürliche

Logarithmus verwendet, kann man α aus der Steigung m der Ausgleichsgeraden durch die Messwerte¹¹ berechnen ($\alpha = -m$).

Durch Kalibrierung des Sensors ist es möglich, den Spannungsverlauf $U(t)$ in die Größe $x(t)$ umzurechnen.

Frage 2:

Wie müsste man vorgehen, um eine Kalibrierkurve zu erstellen?

(Wegen des linearen Zusammenhangs zwischen $U(t)$ und $x(t)$ ergäbe sich für $x(t)$ ein zu $U(t)$ analoger Funktionsverlauf. Deshalb soll hier auf die Kalibrierung und Umrechnung verzichtet werden.)

Frage 3:

Wie ließe sich aus dem Verlauf von $x(t)$ die Geschwindigkeit $v(t)$ und die Beschleunigung $a(t)$ gewinnen? Bestimmen sie die entsprechenden Gleichungen.

3.4 Messungen mit einer Fotodiode

3.4.1 Linearität des Ausgangssignals einer Fotodiode

Ziel der Messung ist die Überprüfung des linearen Zusammenhangs zwischen dem Fotostrom einer Fotodiode und der einfallenden Lichtintensität.

Eine Fotodiode vom Typ Siemens BPW 34¹² (Abb. 11) steht zur Verfügung. Die Messung des Fotostromes erfolgt mit einem Amperemeter (AGILENT U1251B).

Zur Überprüfung der Linearität der Fotodiode muss sie mit Licht unterschiedlicher Intensität I_L beleuchtet werden. Unterschiedliche Lichtintensitäten sind mit einem Laser und einem *idealen* Polarisationsfilter (kurz: *Polfilter*) einfach herzustellen. Wir verwenden einen Helium-Neon-Laser ($\lambda \approx 633$ nm), der linear polarisiertes Licht emittiert, d.h. das elektrische Feld \mathbf{E} der Lichtwelle schwingt nur in einer Richtung. Dieses Licht wird durch einen drehbaren Polfilter geschickt, der die Eigenschaft hat, nur eine Richtung des \mathbf{E} -Feldes einer Lichtwelle durchzulassen. Ist \mathbf{P} die Durchlassrichtung des Polfilters, \mathbf{E} die Richtung des elektrischen Feldes der auf den Filter einfallenden Lichtwelle und α der Winkel zwischen \mathbf{E} und \mathbf{P} , so wird nur die Komponenten \mathbf{E}_t von \mathbf{E} durchgelassen, die parallel zu \mathbf{P} liegt. Diese Komponente ist nach Abb. 16:

$$(9) \quad \mathbf{E}_t = \mathbf{E} \cos \alpha$$

Die Intensität einer Lichtwelle ist bis auf einen Proportionalitätsfaktor k durch das Quadrat ihrer Amplitude $E = |\mathbf{E}|$ gegeben. Ist I_L die Intensität des Laserlichtes, so folgt demnach für die vom Polfilter durchgelassene Intensität I_P gem. Gl. (9) das Gesetz von MALUS¹³:

$$(10) \quad I_P = k E_t^2 = k E^2 \cos^2(\alpha) = I_L \cos^2(\alpha)$$

Durch Drehung des Polfilters um den Winkel α lassen sich demnach hinter dem Polfilter unterschiedliche Lichtintensitäten I_P einstellen.

Hinter den auf einer Dreieckschiene stehenden Laser wird der Polfilter P und dahinter die Fotodiode FD montiert. Die Fotodiode wird so ausgerichtet, dass der Laserstrahl sie mittig trifft.

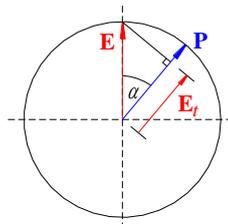


Abb.16: Durchgang einer linear polarisierten Lichtwelle mit dem elektrischen Feldvektor \mathbf{E} durch einen Polfilter mit der Durchlassrichtung \mathbf{P} .

¹¹ Hinweise zur linearen Regression in (halb-)logarithmischen Diagrammen im Kap. „Einsatz der Computer im Basispraktikum Physik“ beachten („scheinbarer Fit“ bzw. „Apparent Fit“).

¹² BPW 34 ist eine PIN-Fotodiode, die etwas anders aufgebaut ist als eine in dieser Anleitung beschriebene pn-Fotodiode. Auf die Einzelheiten des Unterschieds beider Typen soll hier nicht weiter eingegangen werden, da er für die hier durchzuführenden Versuche nicht relevant ist.

¹³ ETIENNE LOUIS MALUS (1775–1812). Die Absorption des Polfilters, die für $\mathbf{E} \parallel \mathbf{P}$ gemessen werden kann, wird hier nicht berücksichtigt.

Zunächst muss die Orientierung von \mathbf{E} der vom Laser emittierten Lichtwelle gefunden werden. Dazu wird der Strom I der Fotodiode bei Änderung der Winkelstellung \mathbf{P} des Polfilters gemessen. I ist minimal, wenn \mathbf{E} und \mathbf{P} orthogonal zueinander stehen. In dieser Stellung ist $\alpha = 90^\circ$. Auf der Winkelskala des Polfilters wird dann ein Wert β angezeigt. Da die Orientierung des Lasers in seiner Halterung beliebig sein kann, ist i. A. $\beta \neq \alpha$.

Anschließend wird der Verschluss des Lasers geschlossen und der Dunkelstrom I_D der Fotodiode gemessen. Danach wird der Verschluss wieder geöffnet und der Fotostrom I für verschiedene Winkel α gemessen ($\alpha = (0, 10, 20, \dots, 90)^\circ$), die sich mit Hilfe der Winkelskala am Polfilter einstellen lassen. Die Stromdifferenz

$$(11) \quad I_\alpha = I - I_D$$

ist proportional zur Lichtintensität I_p . I_α wird über $\cos^2(\alpha)$ aufgetragen und mit Hilfe der linearen Regression eine Ausgleichsgerade eingezeichnet. Anhand der Verteilung der Messpunkte um die Ausgleichsgerade lässt sich die Linearität der Fotodiode beurteilen. Zufällige Streuungen der Messpunkte um die Ausgleichsgerade sind auf die *realen* Eigenschaften des Polfilters zurückzuführen, systematische Abweichungen würden auf ein nichtlineares Verhalten der Fotodiode hindeuten.

3.4.2 Messung der Leistung von Laserlicht

Für die verwendete Fotodiode BPW 34 kann die spektrale Empfindlichkeit S_λ bei der Wellenlänge $\lambda = 850 \text{ nm}$ aus dem Datenblatt entnommen werden. Es ist $S_{850 \text{ nm}} = 0,62 \text{ A/W}$ (ohne Fehlerangabe). In Kenntnis der relativen spektralen Empfindlichkeit S_{rel} für $\lambda = 633 \text{ nm}$ (Abb. 12 rechts) kann daraus die spektrale Empfindlichkeit S_λ für die Wellenlänge des Laserlichtes ($\lambda \approx 633 \text{ nm}$) bestimmt werden:

$$(12) \quad S_{633 \text{ nm}} = S_{850 \text{ nm}} \frac{S_{rel}(633 \text{ nm})}{100} \quad S_{rel} \text{ in \%}$$

Zur Messung der Leistung P_L des Laserlichtes wird der Polfilter aus dem Versuchsaufbau entfernt, die Fotodiode direkt mit dem Licht des Lasers bestrahlt und der Fotostrom $I_{633 \text{ nm}}$ gemessen. Anschließend wird der Verschluss des Lasers geschlossen und der Dunkelstrom I_D gemessen. Die Differenz $I = I_{633 \text{ nm}} - I_D$ ist der Nettostrom, der für die Bestimmung von P_L nach Gl. (4) benötigt wird. Für die Berechnung des Fehlers von P_L ist nur der Ablesefehler für S_{rel} zu berücksichtigen. Zusätzlich zum Messwert wird die Nummer des verwendeten Lasers angegeben.

4 Anhang

Tab. 1: Ausgewählte Kenndaten der eingesetzten Sensoren soweit verfügbar bzw. angebar.

Größe	Typ	Messbereich	Auflösung	Ansprechzeit	Rauschen
Kraft	U-OL 227/10	(0 – 100) mN		< 0,5 ms	$\pm 0,7 \text{ mV}$
Druck	SENSORTECHNICS HCLA 12X5DB	(0 – 1250) Pa		0,5 ms	$\pm 4 \text{ mV}$
Abstand	BAUMER OADM 12U6460/S35	(16 – 120) mm	(0,002 – 0,12) mm ¹⁴	< 0,9 ms	$< \pm 5 \text{ mV}$
Winkel	TWK-ELEKTRONIK PBA 12	(0 – 360)°	0,35°	< 0,4 ms	< 0,5°
Lichtleistung	SIEMENS BPW 34			20 ns ¹⁵	NEP ¹⁶ $4,1 \times 10^{-14} \text{ W/Hz}^{-1/2}$

¹⁴ Je kleiner der Abstand zwischen LDS und Messobjekt, desto besser die Auflösung.

¹⁵ Abhängig von der Beschaltung.

¹⁶ NEP: *noise equivalent power* = rauschäquivalente Strahlungsleistung.