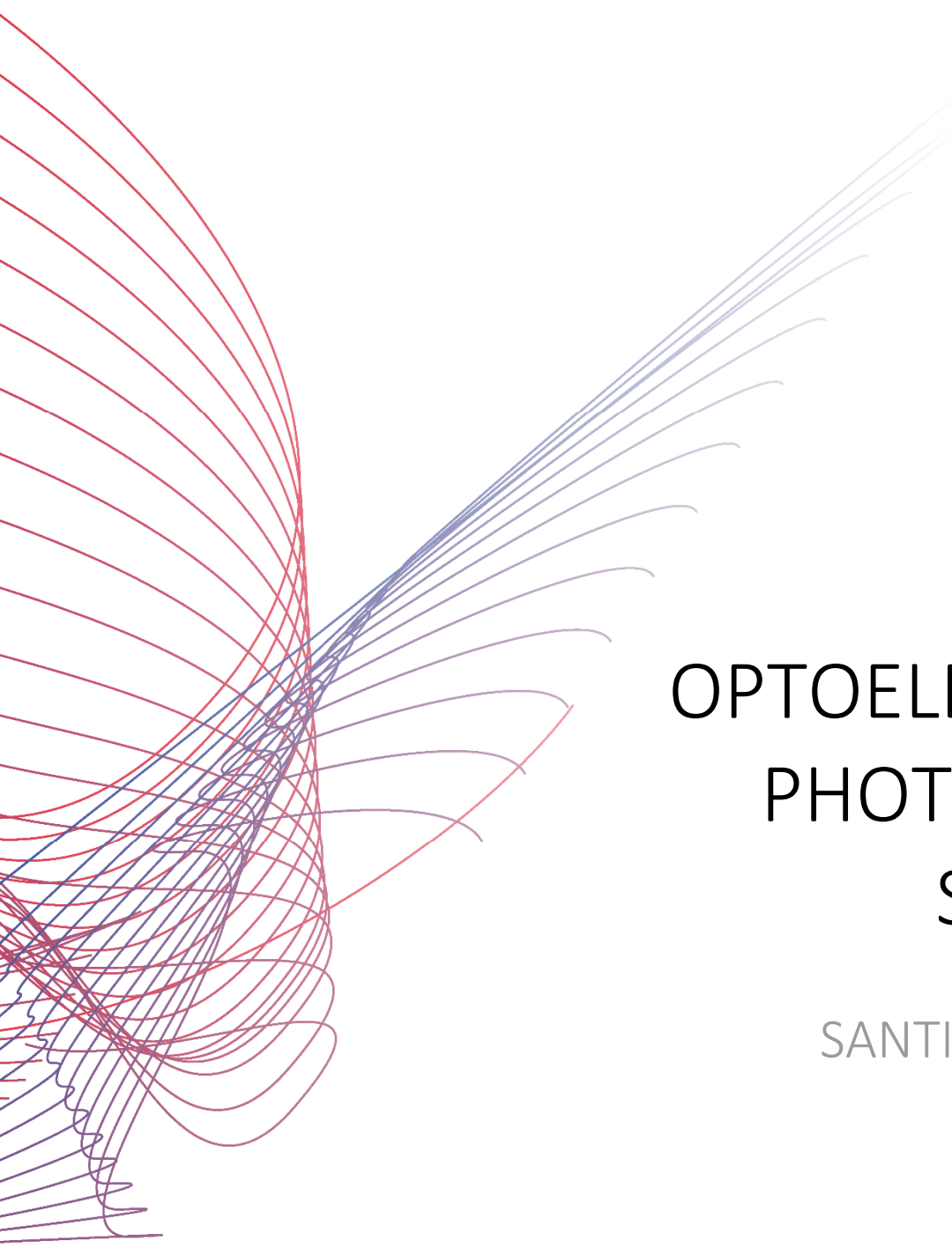




TECH pedia



OPTOELEKTRONIK, PHOTONIK UND SENSOREN

SANTIAGO SILVESTRE

Titel der Arbeit: Optoelektronik, Photonik und Sensoren
Author: Santiago Silvestre
Übersetzt (von): Alena Dvořáková
Veröffentlicht (von): České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktadresse: Technicka 2, Prague 6, Czech Republic
Tel.: +420 224352084
Drucken: (nur elektronisch)
Anzahl der Seiten: 43
Ausgabe: 1. Ausgabe, 2017
ISBN 978-80-01-06263-0

TechPedia

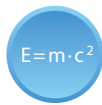
European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>



Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung (Mitteilung) trägt allein der Verfasser; die Kommission haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

ERLÄUTERUNG



Definition(en)



Interessantheit (Interessantes)



Bemerkung



Beispiel



Zusammenfassung



Vorteile



Nachteile

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Kurs stellt eine Einführung in das Gebiet der Optoelektronik dar. In den Einleitungskapiteln werden die grundlegenden Begriffe vorgestellt, die die Lichttransmission betreffen. Die physikalischen Mechanismen, die einen Bezug zu den optoelektronischen Bauelementen besitzen, sind im vierten Kapitel beschrieben. Die wichtigsten optoelektronischen Bauelemente werden im fünften Kapitel behandelt. Kapitel 6. und 7. beschreiben die Prinzipien der optischen Kommunikation und die grundlegenden Anwendungen der Optoelektronik.

ZIELE

Nach dem Durcharbeiten dieses Kurses sollen Studenten imstande sein, die Grundlagen der Optoelektronik und die wichtigen Fragen betreffend Lichttransmission zu verstehen, optoelektronische Elemente zu unterscheiden und ihre Anwendung zu erkennen.

LITERATUR

- [1] Novikov, M. A. in Ahead of the Time Ch. 1, 7–31 (N. I. Lobachevsky State Univ. of Nizhniy Novgorod Publishing, 2006).
- [2] Hecht, Eugene (2002). Optics. Addison-Wesley. ISBN 0-321-18878-0.
- [3] Clifford R. Pollock. Fundamentals of Optoelectronics. Irwin, 1995. ISBN 0256101043, 9780256101041
- [4] French, A.P., Taylor, E.F. (1978). An Introduction to Quantum Physics, Van Nostrand Reinhold, London, ISBN 0-442-30770-5.
- [5] Kasap S.O. Optoelectronic and Photonics, principles and practices. Pearson 2013. ISBN 978-0-273-77417-4
- [6] DeWerd, L. A.; Moran, P. R. (1978). „Solid-state electrophotography with Al₂O₃“. Medical Physics 5 (1): 23–26.
- [7] Buck, John A. Fundamentals of Optical Fibers, second edition. John Wiley and Sons, 2004. ISBN 0-471-22191-0.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung in Optoelektronik: Geschichte und Grundlagen	6
2	Optisches Spektrum: Refraktion, Reflexion, Dämpfung und Dispersion.....	7
2.1	Einleitung	8
2.2	Optisches Spektrum.....	10
2.3	Refraktion, Reflexion, Dämpfung und Dispersion.....	11
3	Lichttransmission, -quellen und -detektoren.....	14
3.1	Einleitung	15
3.2	Lichtquellen und -detektoren.....	16
4	Physikalische Mechanismen: Absorption, Photoleitfähigkeit, Photonenemission	19
4.1	Lichtabsorption.....	20
4.2	Photoleitfähigkeit und photoelektrischer Effekt.....	22
5	Optoelektronische Bauelemente und Sensoren	24
5.1	Einleitung	25
5.2	LED	27
5.3	LD, Laserdioden.....	30
5.4	Photodioden.....	32
5.5	Solarzellen	33
5.6	Optische Verstärker	34
6	Faseroptik: Prinzip und Klassifikation; Moden der optischen Strahlung, Photonische Kristalle	36
6.1	Lichtwellenleiter.....	37
7	Anwendungen: optische Kommunikation, Biophotonik, optische Sensoren, Beleuchtung, Energiequellen.....	42
7.1	Anwendungen der Optoelektronik	43

1 Einleitung in Optoelektronik: Geschichte und Grundlagen

Das erste Kapitel beschreibt die Entwicklung der Optoelektronik und listet wesentliche Anwendungen, die mit diesem Bereich der Physik verbunden sind.



Optoelektronik ist ein Teil des Wissenschaftsbereichs Photonik, der sich auf das Studium und die Anwendungen der elektronischen Geräte bezieht, die mit Licht interagieren. Dazu gehören auch Systeme, in denen Photonen und Elektronen koexistieren. Optoelektronische Bauelemente arbeiten als elektrisch-optische und optisch-elektrische Wandler.

Nachfolgend werden ausgewählte charakteristische Merkmale der Entwicklung des Bereichs Optoelektronik angeführt:

- Über die erste Beobachtungen der Elektrolumineszenz von SiC-Kristallen hat 1907 Henry Joseph Round (Großbritannien) berichtet.
- Zwei Jahrzehnte später, 1927, beobachtete Oleg Wladimirowitsch Lossew (Russisches Kaiserreich) Lichtemission von in Radioempfängern eingesetzten Zinkoxid- und Siliziumkarbidkristall-Gleichrichterdioden beim Stromdurchgang [1].
- 1961 erfand Ali Javan (Bell-Labors) den ersten Gas- oder Helium-Neon-Laser. Ein Jahr später erfand Robert Hall Halbleiterinjektionslaser.
- 1962 erfand Nick Holonyak (USA) die erste praktisch verwendbare sichtbare **LED (lichtemittierende Diode, engl. *light-emitting diode*)**.
- Die erste Übertragungsverbindung durch Glasfaser wurde von Corning Glass erfunden und von AT&T 1983 von New York nach Washington, D.C. mit 45 Megabits pro Sekunde realisiert.

Derzeit ist die Optoelektronik eine neue Zukunftstechnologie. Der Markt mit Optoelektronik steigt weltweit seit 1992 jedes Jahr mit einer Zuwachsrate von 30 Prozent.

Die Optoelektronik ermöglicht die Erzeugung, den Transport und die Verarbeitung von Daten mit hoher Geschwindigkeit. Die wichtigsten Anwendungen der Optoelektronik findet man im Bereich von Kommunikation, einschließlich der Kommunikation mittels Lichtwellenleitern und Lasersystemen.

Optoelektronik wird allerdings auch im Alltagsleben angewendet: Datenverarbeitung, Kommunikation, Unterhaltung, optische Informationssysteme, Ausbildung, elektronischer Handel, Umweltüberwachung, Gesundheitswesen und Verkehr.

Anwendungen im militärischen Sektor sind z.B. Infrarotbildanzeigen, Radarsysteme, Sensoren für die Luftfahrt und optisch geführte Waffen.

2 Optisches Spektrum: Refraktion, Reflexion, Dämpfung und Dispersion

In diesem Kapitel sind einige grundlegende Gleichungen für das Verständnis wichtiger Optoelektronikkonzepte dargestellt. Danach sind einige wesentliche Mechanismen der Lichtübertragung wie Refraktion (Lichtbrechung), Reflexion, Dämpfung und Dispersion erläutert. In diesem Kapitel ist auch ein wichtiges Konzept von **TIR** (*Totalreflexion*, engl. *total internal reflection*) definiert, das in optischer Kommunikation verwendet wird.

2.1 Einleitung

Licht als eine elektromagnetische Welle kann mit einer Kombination von zeitabhängigen Vektoren \mathbf{E} (*elektrisches Feld*) und \mathbf{H} (**magnetisches Feld**) charakterisiert werden, die sich im Raum gemäß den von James Clerk Maxwell in der zweiten Hälfte 19. Jahrhunderts eingeführten Maxwell-Gleichungen ausbreiten.

Licht kann mittels mehrerer spektraler Größen gekennzeichnet werden, wie z. B. Frequenz ν :

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ wobei } \omega \text{ die Kreisfrequenz ist;}$$

oder Wellenlänge λ : $\lambda = \frac{c}{\nu}$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

$E = m \cdot c^2$

c ist eine universale physikalische Konstante der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und beträgt genau 299 792 458 m/s.

Üblicherweise wird der Wert von $c = 3 \cdot 10^8$ m/s als eine gute Approximation verwendet.

In jedem Medium außer Vakuum hängt die Lichtphasengeschwindigkeit ν (Geschwindigkeit, bei der sich Wellengipfel oder -phase bewegt) vom Brechungsindex n des Übertragungsmediums wie folgt ab [2]:

$$\nu = \frac{c}{n}, \text{ wobei } n \text{ mit der folgenden Gleichung definiert werden kann:}$$

$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, wobei ϵ_r die relative elektrische Permittivität und μ_r die magnetische Durchlässigkeit des Mediums sind [3]. Der Brechungsindex ist eine Funktion der Wellenlänge.

Die Beziehung zwischen Elektrizität, Magnetismus und Lichtgeschwindigkeit in einem Medium werden in der folgenden Gleichung zusammengefasst:

$$\nu = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

$E = m \cdot c^2$

Welle-Teilchen-Dualismus: Jedes elementare Teilchen weist Eigenschaften nicht nur von Teilchen, sondern auch von Wellen auf. Elektromagnetische Strahlung breitet sich im Einklang mit linearen Wellengleichungen aus, aber kann nur als diskrete Elemente - **Photonen** - emittiert oder absorbiert werden und daher verhält sich das Licht gleichzeitig wie eine Welle und ein Teilchen.

Die Energie eines Photons E ist proportional zu seiner Frequenz ν und kann mittels der Planck-Einstein-Beziehung oder Planck-Gleichung berechnet werden [4]:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

wobei h die Planck-Konstante ist, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js oder $4,1356 \cdot 10^{-15}$ eVs.

Konstante: $hc = 1,24$ eV μ m.



Die relative Permittivität von Siliziumdioxid SiO₂ beträgt $\epsilon_r = 3,9$ und die relative magnetische Durchlässigkeit von SiO₂ beträgt $\mu_r = 0,53$. Berechnen Sie den Brechungsindex von SiO₂.

LÖSUNG(EN)

Der Brechungsindex von Siliziumdioxid SiO₂ ist: $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = 1,4377$

2.2 Optisches Spektrum

Das optische Spektrum ist ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums. Menschaugen können das Licht der Wellenlänge von 400 nm bis 700 nm wahrnehmen. Dieser Teil des elektromagnetischen Spektrums wird optisches Spektrum oder sichtbares Licht genannt. Das Bild 1 zeigt das elektromagnetische Spektrum und die mit dem optischen Spektrum assoziierten Farben.

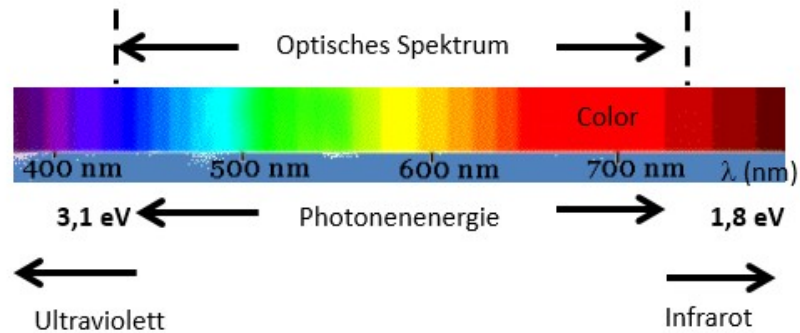
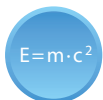


Bild 1: Optisches Spektrum.

2.3 Refraktion, Reflexion, Dämpfung und Dispersion

Nehmen wir den Fall des Auffallens einer optischen Strahlung auf eine Schnittstelle von zwei Medien. Das Licht breitet sich im ersten Medium aus (Durchlicht) und reflektiert sich auf der Schnittstelle der beiden Medien (Auflicht). Das Durchlicht wird gebrochen. Die mit den Richtungen des Durchlichts, des gebrochenen Lichts und des Auflichts assoziierten Winkel sind auf dem Bild 2 angezeigt.

Der Einfallswinkel φ_1 ist gleich dem Reflexionswinkel φ_3 .



Refraktion (Lichtbrechung) ist die Änderung der Lichtrichtung, wenn das Licht in ein Material mit einem anderen Brechungsindex n übergeht.

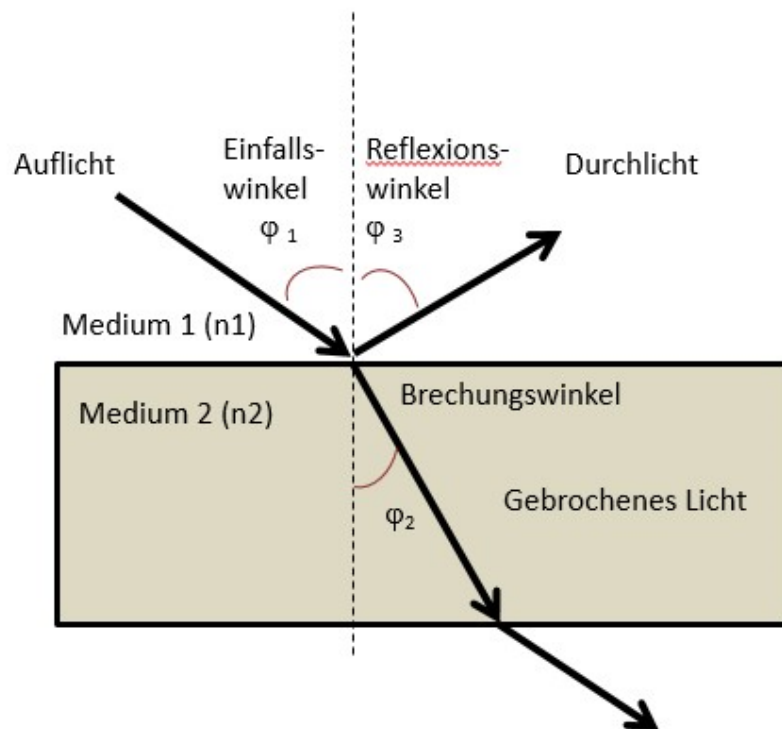


Bild 2: Brechungs- und Reflexionswinkel.

Das Snelliussche Gesetz definiert die Beziehung zwischen Sinus des Einfallswinkels und Sinus des Brechungswinkels und Brechungsindizes der Medien wie folgt:

$$\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Für Winkel, die größer als der kritische Winkel sind, kann man **TIR** (*Totalreflexion*, engl. *total internal reflection*) beobachten [5]. Dieser kritische Winkel φ_{1c} gilt für $\varphi_2=90^\circ$.

$$\varphi_{1c} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Falls das Licht auf die Schnittstelle zwischen zwei Medien unter einem Winkel auffällt, der größer als dieser kritische Winkel ist, wird es ins zweite Medium gar nicht durchgehen. Stattdessen wird das ganze Licht zurück ins erste Medium reflektiert. Dieser Vorgang ist als **TIR** bekannt. Dieses Prinzip findet seine Anwendung in traditionellen Wellenleitern wie Lichtwellenleitern und ist auf dem Bild 3 angezeigt.

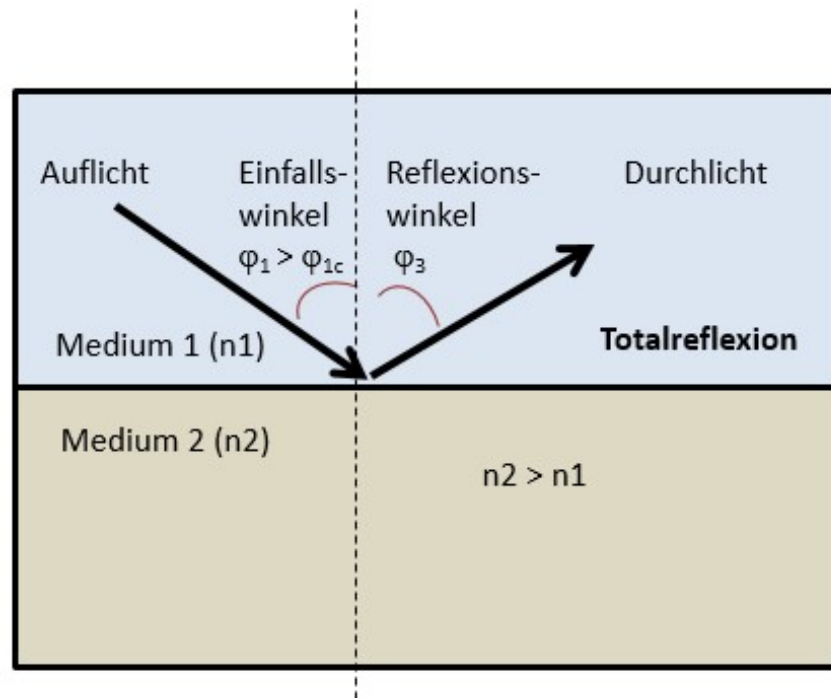


Bild 3: TIR-Effekt.

Das Licht von verschiedenen Frequenzen breitet sich durch ein Medium mit verschiedenen Geschwindigkeiten aus. Darüber hinaus hängt der Brechungsindex von der Wellenlänge ab. Deswegen gibt es Dispersion in dem Medium.

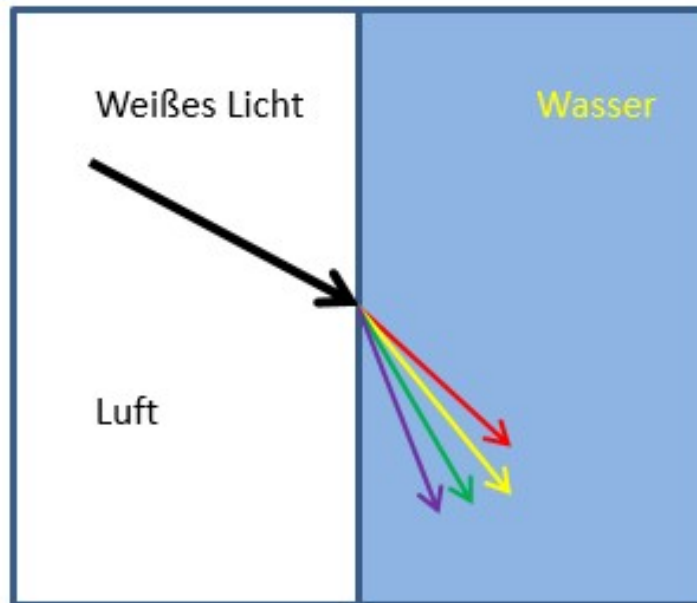


Bild 4: Dispersion der optischen Strahlung.

Unter Dämpfung versteht man einen Verlust der optischen Leistung. Die Hauptgründe der Dämpfung stellen Absorption und Streuung dar, die den Verlust der Energie in der Ausbreitungsrichtung zur Folge haben. Unter der spezifischen Dämpfung versteht man einen Leistungsverlust in dB pro Längeneinheit. Die spezifische Dämpfung hängt von der Wellenlänge der Ausstrahlung durchs Medium ab. Der Dämpfungskoeffizient α wird mit der folgenden Gleichung definiert:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P(L)}{P(0)} \right)$$

wobei $P(0)$ die Anfangsleistung oder Einfallleistung und $P(L)$ die Leistung in der Entfernung L vom Anfangspunkt sind.



Nehmen wir einen Lichtstrahl in einem Medium mit Brechungsindex von $n_1 = 1,44$, der auf ein zweites Medium mit Brechungsindex von $n_2 = 1,4$ auffällt. Die Wellenlänge des Lichts beträgt $1,1 \mu\text{m}$.

Berechnen Sie den Einfallswinkel, um TIR zu erzielen.

LÖSUNG(EN)

Snelliussches Gesetz: $\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$

Der kritische Winkel φ_{1c} entsteht unter $\varphi_2=90^\circ$, daher

$$\varphi_{1c} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \arcsin \left(\frac{1,4}{1,44} \right) = 76,5^\circ$$

3 Lichttransmission, -quellen und -detektoren

In diesem Kapitel werden Haupt-Lichtquellen und die in den Systemen der optischen Kommunikation üblicherweise eingesetzten Detektoren vorgestellt. Die optische Kommunikation bietet wichtige Vorteile in Bezug auf herkömmliche Kommunikation durch Kupferdraht. Einige dieser Vorteile werden in diesem Kapitel angeführt.

3.1 Einleitung

Die Systeme der optischen Kommunikation übertragen Informationen mittels Licht. Im Vergleich zu Kupferdraht, welcher in der elektronischen Kommunikation eingesetzt wird, haben Lichtwellenleiter niedrigere Kosten, niedrigeres Gewicht, niedrigere Dämpfung und niedrigere Dispersion und bieten eine größere Bandbreite. Lichtwellenleiter können Hochgeschwindigkeits-Datenübertragungsraten von Terabits pro Sekunde unterstützen und zur Übertragung von Licht und damit von Informationen über große Entfernungen verwendet werden. Außerdem verursachen sie keine Probleme was die **EMV** (*elektromagnetische Verträglichkeit*) betrifft und es gibt auch keine Brandgefahr, weil keine Elektrizität durch den Kommunikationskanal geleitet wird.

Das Bild 5 zeigt ein typisches Blockschema eines Systems der optischen Kommunikation. Das elektrische Signal (Information) steuert die Lichtquelle und das von der Quelle ausgestrahlte Licht wird mit dem Übertragungskanal (Lichtwellenleiter, Wellenleiter oder freier Raum) gekoppelt. Das Licht wird durch den Übertragungskanal zum Lichtdetektor übertragen, der mit dem Kanal verbunden ist. Der Lichtdetektor transformiert das Licht in ein elektrisches Signal und die Information wird empfangen.

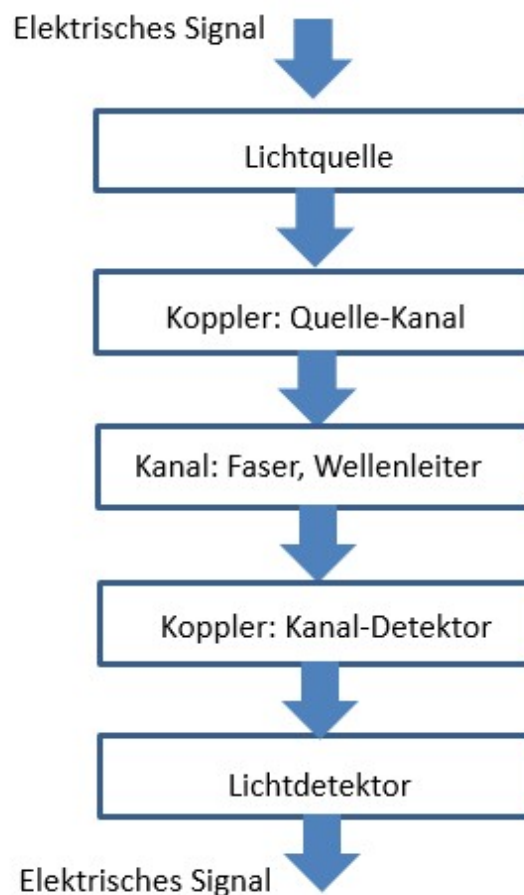


Bild 5: Blockschema eines Systems der optischen Kommunikation.

3.2 Lichtquellen und -detektoren

$$E = m \cdot c^2$$

LED: lichtemittierende Diode, light-emitting diode.

Lichtquellen werden zum Generieren von Eingangssignalen der Systeme der optischen Kommunikation verwendet. Die optischen Kommunikationssysteme verwenden oft Halbleiter-Lichtquellen, wie z. B. **LED** (*lichtemittierende Dioden*, engl. *light-emitting diode*) und **Halbleiter-LD** (*Laserdioden*, engl. *laser diode*).

$$E = m \cdot c^2$$

LASER: Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung, engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Diese optischen Halbleiterbauelemente bieten hohe Effizienz und Zuverlässigkeit. Überdies ermöglichen sie eine genaue Auswahl des Wellenlängenbereichs und der ausstrahlenden Regionen, die mit den Abmessungen der Lichtwellenleiterkerne kompatibel sind. Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Charakteristiken und Strukturen von **LED** und **LD** zusammen, die in optischen Kommunikationssystemen mit Lichtwellenleitern eingesetzt werden.

Optische Halbleiterquellen	Charakteristik	Strukturen
LED	Die in der optischen Kommunikation verwendeten LED müssen hohe Strahldichte (spezifische Intensität), schnelle Reaktionszeit und hohe Quantenausbeute (QE) haben.	Ebene, kuppelförmige, kanten- oder oberflächenemittierende LED.
LD	Die in der optischen Kommunikation verwendeten LD sollen ein kohärentes Licht, schmale Strahlbreite und hohe Ausgangsleistung haben.	Spontane Emission. Stimulierte Emission.

Auf dem Ende des optischen Kommunikationssystems werden optische Sensoren (Lichtdetektoren) verwendet, um die übertragene Information wiederherzustellen und in ein elektrisches Signal mittels des photoelektrischen Effektes wieder umzuwandeln. Die Rolle des Photodetektors ist die Wiederherstellung von Daten, die mittels des Lichtwellenleiter-Kommunikationssystems übertragen wurden.

$$E = m \cdot c^2$$

Photodetektoren sind optoelektronische Bauelemente, die die Einfallstrahlung (Licht) in ein elektrisches Signal umwandeln, wie z. B. Spannung oder Strom.

Lichtdetektoren oder Photodetektoren bestehen üblicherweise aus PD (Photodiode), photoleitenden Detektoren und Phototransistoren. Die photoleitenden Detektoren haben die einfachste Struktur von Lichtdetektoren und entstehen durch Verbindung von zwei Metallelektroden und einem Halbleitermaterial. Die Leitfähigkeit des Halbleiters steigt, wenn einige Einfallphotonen in den Halbleiter absorbiert werden. Infolgedessen steigt der externe Strom, wenn Spannung an Elektroden anliegt. Ein spezifischer Typ von Photodetektoren sind Solarzellen, die in photovoltaischen Solarenergiegewinnungssystemen, nicht in Kommunikationssystemen verwendet werden.

$$E = m \cdot c^2$$

Photodioden sind Halbleiterdioden, die als ein Photodetektor funktionieren. Es handelt sich um einen p-n-Übergang oder eine p-i-n-Struktur. Wenn ein Photon mit einer ausreichenden Energie auf die Diode auftrifft, wird ein Elektron angeregt, der zu einem mobilen Elektron wird, und zugleich entsteht eine positiv geladene Elektronenfehlstelle.

$$E = m \cdot c^2$$

Phototransistoren sind Bipolartransistoren (**BJT**, engl. *bipolar junction transistor*), die als Photodetektoren arbeiten und auch Photostromverstärkung bieten. Diese Bauelemente sind Halbleiter-Lichtsensoren und werden von einem Grundtransistor mit einem transparenten Deckel gebildet.

Optische Halbleiterdetektoren	Charakteristik	Beispiele von Strukturen
Photodioden	Auf p-n-Übergang basiert.	p-n- oder p-i-n-Dioden. Lawinenphotodioden (<i>APD</i> , <i>Avalanche-Photodioden</i> , engl. <i>avalanche photodiode</i>). Heteroübergang-Photodioden.
Schottky-Übergang	Durch Verbindung eines n-Halbleiters mit einem Metall gestaltet.	Schottky-Kontakte.
Solarzellen	Solarzellen wandeln die Energie der einfallenden Ausstrahlung in elektrische Energie.	cSi (kristallinisches Silizium) und a-Si:H (amorphes Silizium). HiT (Solarzelle mit einer intrinsischen Heteroübergang-Dünnschicht). GaAs.
Phototransistoren	Lichtempfindliche Transistoren. Sie verstärken die Veränderungen des einfallenden Lichts.	n-p-n-BJT p-n-p-BJT
Photoleitende Detektoren	Verändernde Leitfähigkeit wegen Lichtabsorption.	Photowiderstand (<i>LDR</i> , engl. <i>light-dependent resistor</i>). PbS IR (<i>infrarote Detektoren mit Bleisulfid</i>). PbSe IR (<i>infrarote Detektoren mit Bleiselenid</i>).

4 **Physikalische Mechanismen: Absorption, Photoleitfähigkeit, Photonenemission**

In diesem Kapitel werden die grundlegenden physikalischen Mechanismen, die die Effekte der Energieumwandlung in **Halbleitermaterialien** betreffen, vorgestellt.

4.1 Lichtabsorption

Wenn sich Licht durch ein Material ausbreitet, wird ein Teil der Photonenenergie in andere Energieformen (z. B. Wärme) umgewandelt. Diese verlorene Energie wird in dem Material absorbiert. Die Elektronen von Atomen können in einen höheren energetischen Zustand übergehen und vom VB (Valenzband) in Leitungsband durch Absorption der Photonenenergie angeregt werden. Dabei werden Paare e^-h^+ (Elektron-Loch) erzeugt.

$$E = m \cdot c^2$$

Der wichtigste Prozess der Lichtabsorption in einem Halbleiter ist das Entstehen von diesen Paaren e^-h^+ . Jedes absorbierte Photon verursacht einen Übergang vom Valenzband in Leitungsband. Ein Photon wird vom Halbleiter absorbiert, falls die Energie des Photons höher als Bandlücke des Materials E_g ist.

Die Bandlücke E_g bezieht sich auf den Unterschied der Energie in eV (Elektronenvolt) zwischen dem oberen Teil des Valenzbands und dem unteren Teil des Leitungsbands in Isolatoren und Halbleitern. Die Elektronenaffinität eines Halbleiters χ ist die Breite des Leitungsbands eV. Die Fermi-Energie E_F gibt die höchste Energie an, die bei 0 K besetzt werden kann. Die Energien oberhalb E_F sind leer bis zur Vakuumebene.

$$E_g = E_c - E_v$$

wo E_c und E_v die Energien des oberen Teils des Valenzbands und des unteren Teils des Leitungsbands sind. Das Bild 6 zeigt den Absorptionsmechanismus und das Schema des Energiebands.

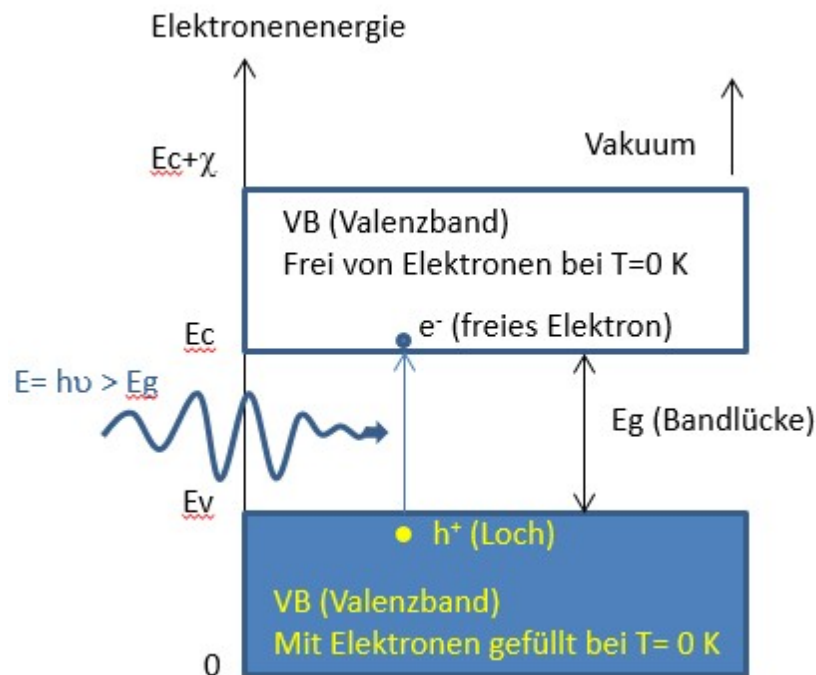


Bild 6: Schema des Energiebands und Absorptionsmechanismus.

Typische Eigenschaften einiger Halbleiter bei 300 K

Halbleiter	E _g (eV)	χ(eV)
Silizium: Si	1,11	4,05
Galliumarsenid: GaAs	1,42	4,07
Germanium: Ge	0,66	4,13
Indiumphosphid: InP	1,35	4,5
Galliumphosphid: GaP	2,26	3,8

Für jede Wellenlänge λ eines einfallenden Lichtstrahls I_0 , der durch ein Material durchgeht, wird die Intensität des Lichtstrahls I mittels Streuungs- und Absorptionsmechanismen gedämpft. Das Lambertsche Gesetz definiert die Übertragung und Absorption wie folgt:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha L}$$

wobei α Absorptionskoeffizient ist; α (m⁻¹) ist eine Funktion von λ .

4.2 Photoleitfähigkeit und photoelektrischer Effekt

$$E = m \cdot c^2$$

Photoleitfähigkeit ist ein optoelektronisches Ereignis, in dem ein Material wegen der Absorption der elektromagnetischen Strahlung, wie Licht, elektrisch leitfähiger wird.

$$E = m \cdot c^2$$

Photoelektrischer Effekt: Viele Metalle emittieren Elektronen, wenn Licht auf sie auffällt. Falls bei der Photoemission ein Elektron in einem Material die Energie eines Photons absorbiert und mehr Energie als Austrittsarbeit des Materials erwirbt, wird es herausgelöst.

Albert Einstein erhielt 1921 den Nobelpreis für seine Forschung im Bereich des photoelektrischen Effekts. Die für das Auslösen eines Elektrons von einem Material benötigte Energie wird Austrittsarbeit des Metalls ϕ genannt.

$$E = m \cdot c^2$$

Photonenemission: Wenn ein Elektron auf eine niedrigere Energieebene fällt und ein Loch trifft, setzt es Energie in der Form eines Photons frei. Die Wellenlänge des Lichts hängt von der Bandlücke des Halbleitermaterials ab. Das Licht wird als das Vielfache einer gewissen Mindestenergieeinheit emittiert. Die Größe dieser Einheit ist die Photonenenergie.

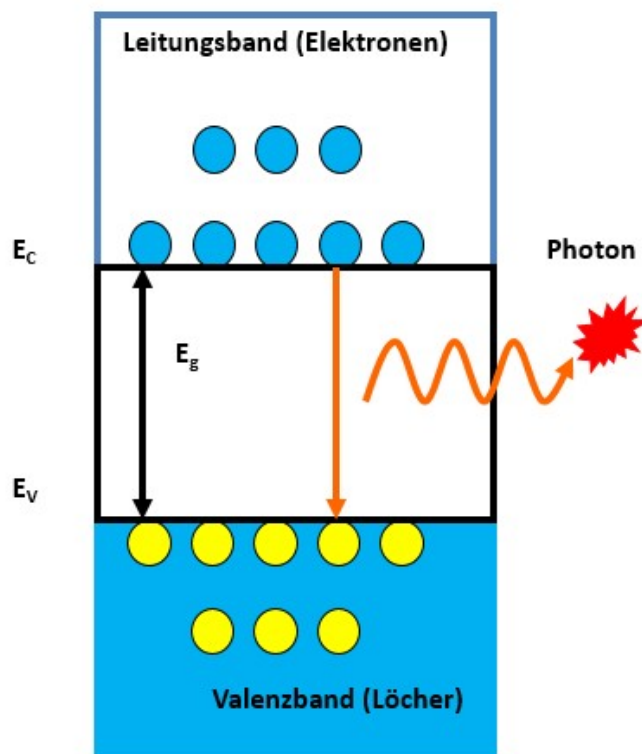


Bild 7: Photonemission.



Die Photonenenergie gleicht $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

Berechnen Sie den Bereich der Wellenlängen, die von Germanium (Ge) nicht absorbiert werden, unter Berücksichtigung der Bandlücke von $E_g = 0,66$ eV.

LÖSUNG(EN)

Die Lichtabsorption in einem Halbleiter bildet Paare e^-h^+ , wenn die Energie der einfallenden Photonen größer als die Bandlücke des Materials E_g ist. Für die Absorption von Photonen beträgt die Mindestenergie für Ge:

$$E = h\frac{c}{\lambda} > E_g(\text{Ge}) = 0,66 \text{ eV} . \text{ Daher werden die Photonen mit den Wellenlängen } \lambda < h\frac{c}{E_g(\text{Ge})} \text{ vom Halbleiter absorbiert.}$$

Unter Berücksichtigung von $hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m}$, beträgt der Höchstwert der Photonen-Wellenlänge fürs Generieren von Paaren e^-h^+ in Ge $\lambda < 1878 \text{ nm}$.



Alle physikalischen Effekte, die in diesem Kapitel beschrieben sind, haben eine spezifische Anwendung in optoelektronischen Technologien sowie in weiteren verwandten physikalischen Wissenschaften.

5 Optoelektronische Bauelemente und Sensoren

Dieses Kapitel beschreibt die wichtigsten optoelektronischen Bauelemente und Sensoren in den Anwendungen der Photonik. Es sind auch einige grundlegende Konzepte der Halbleiterphysik erläutert, so dass die internen Charakteristiken und das Verhalten dieser Bauelemente, vor allem direkte Umwandlung zwischen Elektronen und Photonen, richtig verstanden werden können.

5.1 Einleitung

Optoelektronische Bauelemente und Lichtsensoren werden mittels Halbleitermaterialien hergestellt.

$E = m \cdot c^2$

Der Wert der elektrischen Leitfähigkeit eines Halbleitermaterials liegt zwischen dem Wert eines Leiters, wie Kupfer, und eines Isolators, wie Glas.

Die elektrische Leitfähigkeit eines Halbleitermaterials steigt mit der steigenden Temperatur. Daher verhält sie sich umgekehrt im Vergleich zum Metall. Derzeit ist **Si** (*Silizium*, engl. *silicon*) der in elektronischen Anwendungen meist angewandte Halbleiter. Eigenhalbleiter, intrinsische Halbleiter oder I-Halbleiter sind reine Halbleiter ohne jede Dotierstoffe darin (undotiert, engl. undoped). Die Anzahl von Ladungsträgern, Elektronen und Löcher, wird daher von den Eigenschaften des Materials an sich bestimmt. In einem Eigenhalbleiter beträgt die Anzahl von angeregten Elektronen und die Anzahl von Löchern:

$n = p = n_i$ (Träger/cm³), der Wert von n_i hängt von der Lücke des Halbleiters E_g ab und ändert sich mit Temperatur wie folgt:

$$n_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

wobei T die Temperatur in K, k_B die Boltzmann-Konstante: $k_B = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K und A eine Konstante sind.

Die Halbleiterbauelemente können eine Reihe von nützlichen Eigenschaften haben, wie zum Beispiel Stromfluss einfacher in einer Richtung als in der anderen, veränderlicher Widerstand und Empfindlichkeit gegen Licht oder Wärme. Wenn man reinen kristallinen Eigenhalbleitern spezifische Fremdstoffe beimischt, werden Störstellenhalbleiter geschaffen: Es handelt sich um Halbleiter, in denen die Konzentration eines Trägertyps, Elektron oder Loch, viel höher als die Konzentration des anderen Typs ist. Wenn die Konzentration von Elektronen größer als die Konzentration von Löchern ist, werden die Halbleiter n-Halbleiter genannt. Wenn im Gegensatz dazu die Dichte der Löcher viel höher als die Dichte der Elektronen ist, handelt es sich um p-Halbleiter.

Einige in diesem Kapitel beschriebene Sensoren und Bauelemente beruhen auf Prinzipien eines p-n-Übergangs.

$E = m \cdot c^2$

Ein p-n-Übergang ist eine Schnittstelle zwischen zwei Typen des Halbleitermaterials, p- und n-Halbleiter, in einem einzigen Halbleiterkristall. Dioden sind Halbleiterbauelemente, die von einem Halbleitermaterial mit dem p-n-Übergang zu zwei elektrischen Zuleitungen geschaffen sind.

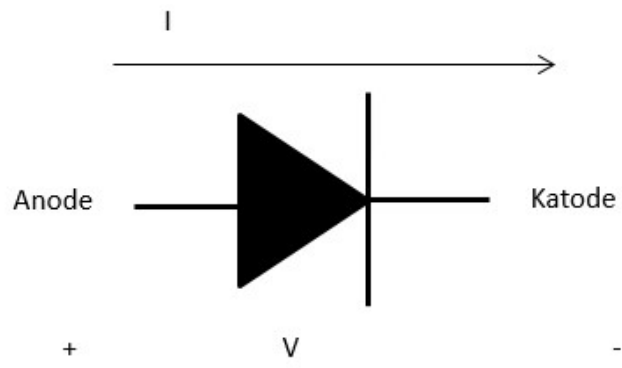


Bild 8: Elektronisches Symbol einer Diode.

5.2 LED



LED (*lichtemittierende Dioden*, engl. *light-emitting diode*) sind Halbleiterdioden, die ein inkohärentes Licht mit einem engen Spektrum emittieren, wenn an ihrem p-n-Übergang positive Spannung angebracht wird.

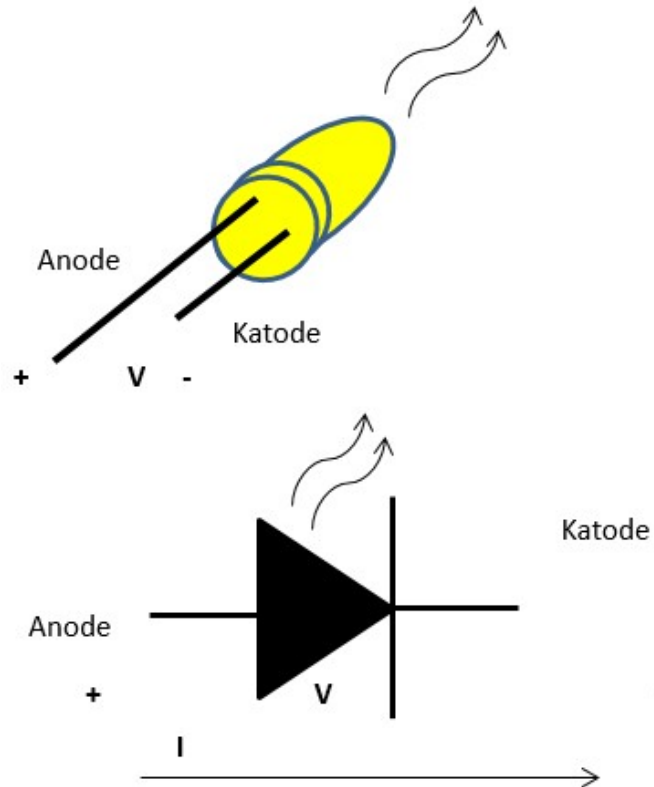


Bild 9: LED.

Das normalerweise leere **Leitungsband** (engl. *conduction band*) eines Halbleiters wird mit Elektronen besetzt, die darin mittels positiver Spannung durch den Übergang eingespritzt werden. Wie im Kapitel 4 zu sehen ist, wenn ein Elektron ein Loch trifft, fällt es auf eine niedrigere Energieebene und setzt Energie in der Form eines Photons frei. Diese Photonenemission ist der Mechanismus hinter dem Lichtemittieren von LED. Wenn ein Elektron auf eine niedrigere Ebene eigenmächtig übergehen kann, wird der Prozess der Photonenemission **spontane Emission** genannt.

Das Licht wird durch Rekombination von Elektronen und Löchern generiert und die Wellenlänge des Lichts hängt von der Bandlücke des Halbleitermaterials E_g ab. Die nachfolgende Tabelle zeigt die mit Wellenlängen des Lichts assoziierten Farben, das von LED aus verschiedenen Halbleitermaterialien emittiert wird.

LED aus Halbleitern mit einer direkten Bandlücke emittieren mehr Licht als LED, die mittels Halbleitern mit indirekter Bandlücke hergestellt wurden.

Halbleitermaterialien und LED-Farben

Halbleiter	Farbe	Helligkeit
GaAs; GaAlAs	Infrarot	Mittlere (normale)
GaAs; AlGaAs; GaP	Rot	Mittlere (normale)
GaN	Blau	Mittlere (normale)
GaP	Grün	Mittlere (normale)
GaAlAs; GaAsP; InGaAlP	Rot	Hohe (super & ultra)
GaN	Blau	Hohe (super & ultra)
GaP; InGaN	Grün	Hohe (super & ultra)
InGaAlP; GaAsP	Gelb	Hohe (super & ultra)

LED werden in vielen Bereichen angewandt, wie Displays, Festkörperbeleuchtung, Fernbedienung und optische Kommunikationssysteme. In den letzten Jahren wurden LED üblicherweise auch in konventionellen Leuchten als integrierte LED-Lampen und -Beleuchtungskörper verwendet. Man kann auf dem Markt der gegebenen Anwendungen verschiedene LED-Pakete finden. Normalerweise werden in LED-Paketen einige Arten von Linsen verwendet, um den Ausgangswinkel des Lichtstrahls zu regeln. Das ist eine der Charakteristiken, die Hersteller in Datenblättern zusammen mit Lichtstärke (mcd), Lichtstrom (lm), primäre Wellenlänge (nm) und Farbe angeben. Die spezifischen Werte (typische Werte und Schwellenwerte) der elektrischen Parameter, wie V_f (*Durchlassspannung*, engl. *forward voltage*) und I_f (*Durchlassstrom*, engl. *forward current*), werden auch von Herstellern aufgelistet.

Typischerweise ist die Energieausbeute η einer LED einfach ausgedrückt als Verhältnis der Eingangsleistung und des Lichtausgangs charakterisiert - oder in einer technischen Form wie folgt formuliert: emittierter Fluss (Lumen) durch Leistungsaufnahme (Watt). Kommerziell erhältliche LED haben einen Wirkungsgrad von 50 bis 70 %.



Bild 10: Infrarote LED.

5.3 LD, Laserdioden


$$E = m \cdot c^2$$

Laser: Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung, engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Die Energie eines einfallenden Photons $E = h \cdot \nu$ regt den Emissionsvorgang durch Induzieren eines Elektrons zum Übergang in eine niedrigere Energieebene an. Dieser Vorgang ermöglicht die Verstärkung von Photonen: Ein einfallendes Photon hat zwei abgehende Photonen zur Folge, die die gleiche Richtung, Wellenlänge und Phase haben.

Die im vorigen Kapitel präsentierten LED basieren auf einem Mechanismus der spontanen Emission, aber **LD** (*Laserdioden*) beruhen auf dem Prinzip der stimulierten Emission.

Um die Verstärkung des Lichts durch eine stimulierte Emission zu erzielen, muss die Wahrscheinlichkeit der Photonenemission höher als die Wahrscheinlichkeit der Absorption für den gegebenen Spektralbereich sein. Falls die stimulierte Emission dominiert, wird das Licht verstärkt und ein Laser entsteht. Die stimulierte Emission ist ein dominanter Mechanismus, wenn die Wahrscheinlichkeit des Findens eines Elektrons im Leitungsband höher als die Wahrscheinlichkeit des Findens eines Elektrons im Valenzband ist. Diese Situation entsteht im Zustand der Besetzungsinversion. Die Besetzungsinversion wird erreicht, wenn der Unterschied zwischen der Fermienergie E_{FN} für Elektronen und Fermienergie E_{FN} für Löcher größer als die Bandlücke E_g ist. Um diese Ebenen der Fermienergie zu trennen, muss Energie in der Form des elektrischen Stroms in den Halbleiter gepumpt werden. Wenn danach durch **Pumpen** des Lasers ein Strom über Schwellenstromwert eingespritzt wird, wird der Halbleiter in einen Zustand der Besetzungsinversion übergehen.

Optische Reflektoren, z. B. **FP** (*Fabry-Perot*) oder dielektrische Spiegel (**Bragg-Spiegel**, *DBR*, engl. *distributed Bragg reflector*), die einen Laser zwischen zwei reflektierenden Flächen haben, werden als optische Resonatoren verwendet. In einem stabilen Zustand kann man im optischen Resonator stationäre elektromagnetische Schwingungen beobachten. Diese Schwingungen entstehen auf den reflektierenden Flächen des optischen Resonators. Die Achse eines optischen Resonators ist senkrecht zum Stromfluss. Bei jeder Reflexion geht die Welle teilweise durch reflektierende Fläche des Reflektors durch. Die Laserschwingungen treten auf, wenn der Verstärkungsgrad gleich wie die gesamte Summe des Verlusts durch Seiten des Resonators, Streuung im Übertragungsmedium und Absorption des Kristalls ist.

Es gibt zwei Haupttypen von Laserdioden: kanten- und oberflächenemittierende Dioden. Die kantenemittierenden Laserdioden sind durch eine breite und astigmatische Emission charakterisiert, wobei die oberflächenemittierenden Laserdioden strahlen einen engeren Strahl aus.

Oberflächenemitter (*VCSEL*, engl. *vertical-cavity surface-emitting laser*) sind Laser mit einem sehr kurzen aktiven Bereich, deren Achse des optischen Resonators parallel zu der Richtung des Stromflusses ist.

In diesen Lasern wird die Strahlung in der zu dem aktiven Bereich senkrechten Richtung emittiert. Die Oberflächenemitter ermöglichen die Geschwindigkeit der Datenübertragung von 10 Gbs^{-1} .



Elektrooptische Modulatoren (*EOM*, engl. *electro-optic modulator*) sind optoelektronische Geräte, die zur Steuerung der Leistung, Phase oder Polarisierung des Laserstrahls mittels eines elektrischen Steuersignals verwendet werden.

Laserdioden stellen den üblichsten Typ von Laser dar und werden in einer Reihe von Anwendungen genutzt. Sie zeichnen sich durch kleine Abmessungen, niedrigen Preis und lange Lebensdauer aus. Deswegen sind sie für viele Anwendungen geeignet, wie zum Beispiel optische Kommunikation, Barcodelesegeräte, Laserpointer, Lesegeräte und Brenner für CD/DVD/Blu-ray, Laserscanner und -drucker, gerichtete Lichtquellen.

5.4 Photodioden

$$E = m \cdot c^2$$

Photodioden sind Halbleiterbauelemente, die Licht in elektrischen Strom umwandeln. Der Strom wird generiert, falls Photonen in der Photodiode absorbiert werden. Photodioden werden als p-n-Übergänge oder p-i-n-Strukturen konstruiert. Wenn ein Photon mit einer ausreichenden Energie die Diode trifft, wird ein Elektron angeregt und damit ein mobiles Elektron und eine positiv geladene Elektronendefektstelle generiert.

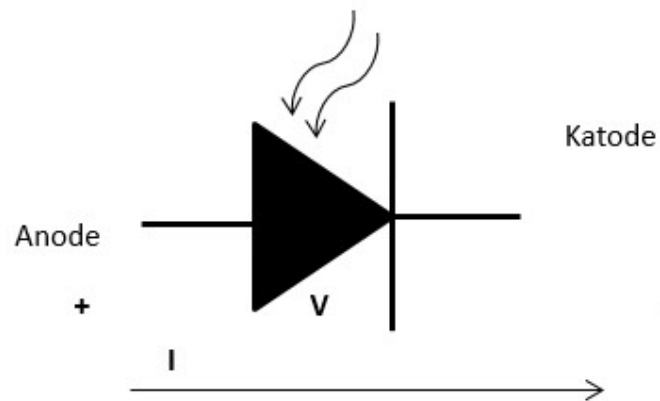
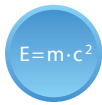


Bild 11: Photodiode.

5.5 Solarzellen



Eine Solarzelle ist ein photovoltaisches Gerät, das die einfallende Strahlung in elektrische Energie umwandelt.

Halbleiterbasierte Solarzellen können p-n-, Hetero- oder Multiübergänge besitzen.

Die wichtigsten Halbleiter, die bei der Herstellung von Solarzellen angewandt werden, sind Si und GaAs.

Die Effizienz von Solarzellen wird von der Beziehung zwischen der elektrischen Höchstleistung und der gesamten einfallenden Leistung des Lichts gegeben.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{G A}$$

Dabei sind V_m und I_m Koordinaten des **Höchstleistungspunkts** (*MPP*, engl. *Maximum Power Point*) am Ausgang des Bauteiles, G Bestrahlung (W/m^2) und A aktive Oberfläche des Bauteiles.

Die Solarzellen auf der Basis des kristallinen Siliziums haben eine Effizienz von bis 25 % und die Solarzellen mit Multiübergängen, die mit einem „konzentrierten“ Licht arbeiten, können die Effizienz von 43,5 % erzielen.

Die Effizienz von Solarzellen sowie Hauptparameter dieser Geräte werden von Herstellern als **STC** (*standardmäßige Arbeitsbedingungen, standard conditions of work*) angeführt: Spektrum AM1.5, $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ und $T = 25 \text{ °C}$.

Um photovoltaische Module zu schaffen, werden Solarzellen in Serien verbunden. Ein photovoltaisches Modul beinhaltet eine oder mehr parallele Verbindungen.

5.6 Optische Verstärker

Um ein Signal über große Entfernungen (>100 km) zu übertragen, müssen die Dämpfungsverluste im Lichtwellenleiter (im optischen Übertragungskanal) ausgeglichen werden. Diese Aufgabe wird von optischen Verstärkern erfüllt.

Ein typischer Lichtwellenleiter hat auf der Wellenlänge von 1,5 μm einen Verlust von etwa 0,2 dB/km. Es besteht die Möglichkeit, das optische Signal in ein elektrisches umzuwandeln, konventionelle elektrische Verstärker für die Kompensation der Übertragungsverluste zu verwenden und nachfolgend dieses Signal zurück in ein optisches Signal umzuwandeln. Diese Umwandlungen des Signals fordern jedoch eine aufwendige und sehr schnelle Elektronik.

$E = m \cdot c^2$

Ein optischer Verstärker verstärkt direkt das optische Signal, ohne dass es in ein elektrisches Signal zuerst umgewandelt werden muss.

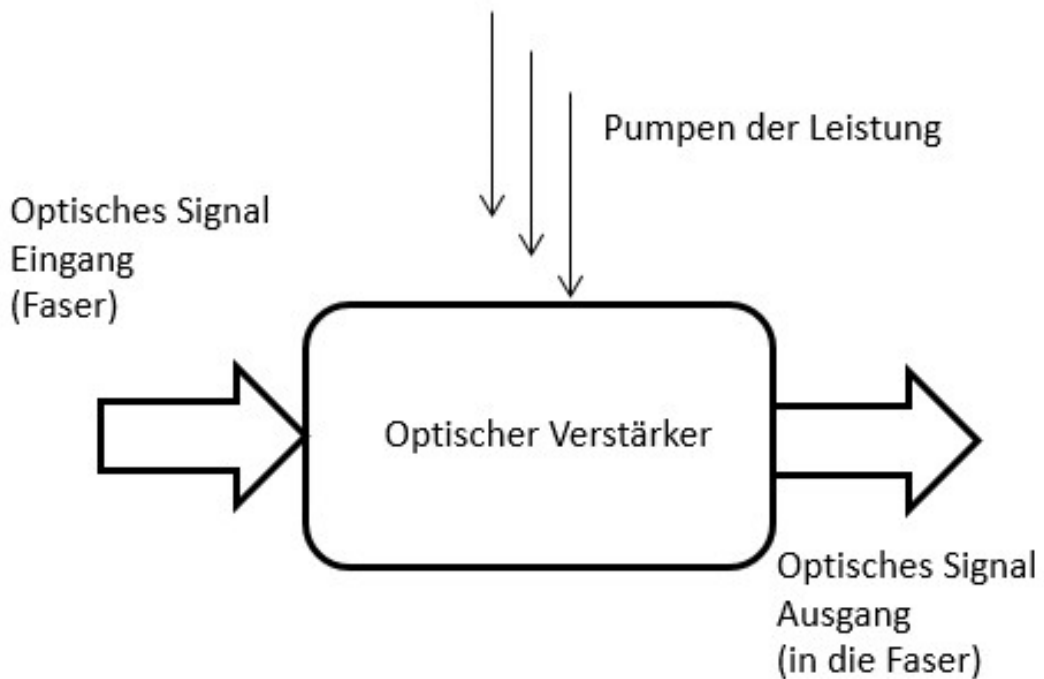


Bild 12: Schema des optischen Verstärkers.

Die wesentlichen Charakteristiken der optischen Verstärker sind die Verstärkung (dB), Arbeitsfrequenzbereich oder **Bandbreite** (BW , engl. *bandwidth*), Verstärkungssättigung: Höchstausgangsleistung und Ausgangsgeräuschpegel. Die Verstärkung ist mit der folgenden Gleichung definiert:

$$G = \frac{P_o}{P_i}, \text{ wobei } P_o \text{ und } P_i \text{ Aus- und Eingangsleistung sind.}$$

Es gibt drei Haupttypen von optischen Verstärkern: **EDFA** (*Erbium-dotierter Faserverstärker*, engl. *erbium-doped fibre amplifier*), **SOA** (*Halbleiterlaserverstärker*, engl. *semiconductor optical amplifier*) und Raman-

Verstärker. Bei EDFA ist das verstärkende Medium ein mit Erbiumionen dotierter Glas-Lichtwellenleiter, die in den Zustand der Besetzungsinversion durch einen gesonderten optischen Eingang optisch gepumpt werden. SOA werden mit dem elektrischen Strom gepumpt und das Verstärkungsmedium schaffen nicht dotierte Halbleiter. Diese optischen Verstärker sind wegen ihrer niedrigen Preise und ihrer befriedigenden Verstärkung über kurze Entfernungen für lokale Netzwerke sehr nützlich.

In Raman-Verstärkern ist die Verstärkung auf Raman-Streuung (SRS, engl. *stimulated Raman scattering*) basiert. Die Raman-Streuung ist ein Prozess, in dem das Licht in Molekülen von einer niedrigeren Wellenlänge in eine höhere Wellenlänge gestreut wird.

Einige Typen von optischen Verstärkern	Charakteristik	Nachteile
SOA (Halbleiterverstärker) 400 – 2000 nm	Ähnlich wie Halbleiterlaser. Breites Übertragungsband und hohe Verstärkung.	Hohes Geräusch und Nebensprechen.
Mit Seltenen Erden dotierte Faserverstärker Erbium – EDFA 1500 nm Praseodym – PDFA 1300 nm	Die Verstärkung wird durch eine stimulierte Emission der Strahlung erzielt. Die Verstärkung hängt von der Frequenz und Intensität des Strahls ab.	Ziemlich große Geräte. Nebensprechen und Verstärkungssättigung. Spontane Geräuschemission.
Raman- und Brillouin-Verstärker	Keine Besetzungsinversion erforderlich.	Das gepumpte und das verstärkte Signal erfolgen in unterschiedlichen Wellenlängen. Hoher Aufwand.

6 Faseroptik: Prinzip und Klassifikation; Moden der optischen Strahlung. Photonische Kristalle

Zurzeit stellen Lichtwellenleiter den meist verwendeten Kommunikationskanal in der optischen Kommunikation dar. In diesem Kapitel sind die grundlegenden Charakteristiken der Lichtwellenleiter vorgestellt, um die Vorteile der Lichtwellenleiter im Vergleich zu konventionelleren Kommunikationskanälen bei Datenübertragung zu zeigen. Zu diesen Anwendungen gehören zum Beispiel Backbone-Infrastrukturen, Ethernet-Systeme, Breitbandverteilung und hochwertige Datennetze.

6.1 Lichtwellenleiter

$$E = m \cdot c^2$$

Ein Lichtwellenleiter ist eine flexible transparente Faser aus Glas (Silizium) oder Kunststoff, ein bisschen dicker als ein Menschenhaar. Lichtwellenleiter werden meistens als Lichtübertragungsmedium verwendet und oft in Telekommunikation angewandt.

Lichtwellenleiter werden als optische Kommunikationskanäle wegen ihrer großen Bandbreite, Datenübertragungsraten (Gbps) und hohen Übertragungskapazitäten verwendet. Tausenden von Informationskanälen können in einem Lichtwellenleiter zusammen multiplext werden. Überdies sind Lichtwellenleiter durch eine sehr niedrige Dämpfung von etwa 0,2 dB/km und einen ziemlich niedrigen finanziellen Aufwand charakterisiert. Diese Charakteristiken sind der Grund eines hohen Interesses im Bereich der optischen Kommunikation über große Entfernungen.

Auf dem Bild 13 ist die Struktur eines Lichtwellenleiters angezeigt. Die dünne Glasmitte der Faser, durch die sich das Licht ausbreitet, wird Kern genannt. Das äußere optische Material um den Kern, das das Licht zurück in den Kern reflektiert, wird Mantel genannt. Die äußere Schutzbeschichtung oder Hülle schützt die optische Oberfläche.

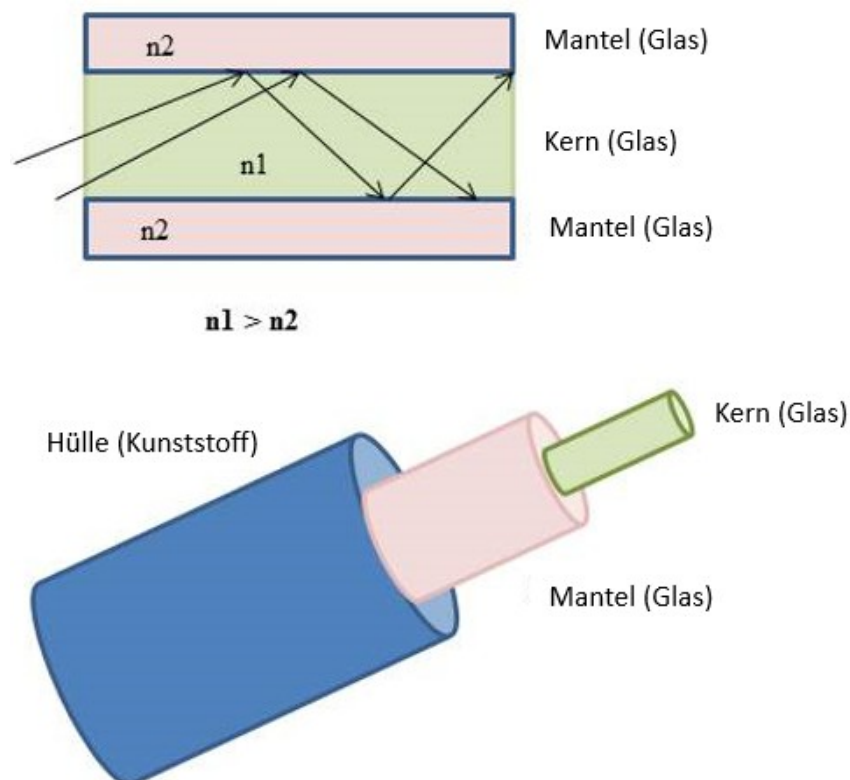


Bild 13: Lichtwellenleiter.

Ein Lichtwellenleiter hat eine mittlere Schicht (Kern), die einen höheren Brechungsindex n_1 als Brechungsindex n_2 der umhüllenden Schicht (Mantel) hat. Falls das Licht auf die Schnittstelle unter einem Winkel auffällt, der größer als der

kritischer Winkel φ_{1c} ist (siehe Abschnitt 2.3), wird es durch das zweite Medium nicht durchgehen und wird zurück in den Kern wegen TIR-Effektes reflektiert.



Ein Lichtwellenleiter hat einen Kern aus reinem Si mit Brechungsindexen:

$n = 5,57$ für die Wellenlänge von $0,4 \mu\text{m}$ und $n = 3,78$ für die Wellenlänge von $0,7 \mu\text{m}$.

Berechnen Sie die Zeit, die das Licht der beiden Wellenlängen zum Zurücklegen von 2 km dieses Lichtwellenleiters braucht.

LÖSUNG(EN)

Die Geschwindigkeit des Lichts von unterschiedlichen Wellenlängen im Kern wird sich wegen unterschiedlicher Werte der Brechungsindexe für diese Wellenlängen unterscheiden. Diese Geschwindigkeit wird wie folgt definiert: $v = \frac{c}{n}$.

Im ersten Schritt müssen wir Geschwindigkeiten für jede Wellenlänge berechnen:

$$v_1(\lambda = 0,4 \mu\text{m}) = \frac{c}{n(0,4 \mu\text{m})} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5,57} = 5,39 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_2(\lambda = 0,7 \mu\text{m}) = \frac{c}{n(0,7 \mu\text{m})} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{3,78} = 7,94 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

Weiter berechnen wir die Zeit des Zurücklegens der optischen Strecke von zwei Kilometern:

$$t_1 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{5,39 \cdot 10^7} \text{ s} = 37,1 \mu\text{s}$$

$$t_2 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{7,94 \cdot 10^7} \text{ s} = 25,2 \mu\text{s}$$

Multimodefasern sind Fasern, die mehr als eine Mode der optischen Strahlung für eine gewisse Wellenlänge übertragen können. Einige Fasern haben einen sehr kleinen Durchmesser des Kerns und können nur eine Mode übertragen - dann handelt es sich um eine Monomodefaser, in der das Signal geradlinig in der Mitte des Kern geführt wird. Um die Welle durch den Wellenleiter zu übertragen, muss die konstruktive Interferenz verwendet werden. Dann interferieren alle Strahlen miteinander. Nur einige Winkel sind zulässig. Jeder zulässige Winkel stellt eine Mode der optischen Strahlung dar.

Der maximale Akzeptanzwinkel einer Faser definiert den Kegel, der das in die Faser eingehende Licht bestimmt. Das Licht wird sich in der Faser in verschiedenen Moden ausbreiten. Eine Hälfte des Winkels dieses Kegels ist der Akzeptanzwinkel φ_{max} , der nur von den Brechungsindizes abgeleitet wird. Der Parameter **NA** (*numerische Apertur*) der Faser ist von der folgenden Gleichung definiert:

$$NA = n \cdot \sin(\varphi_{\text{max}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

wo n Brechungsindex ist, in dem sich das Licht ausbreitet, bevor es in den Lichtwellenleiter eingeht.

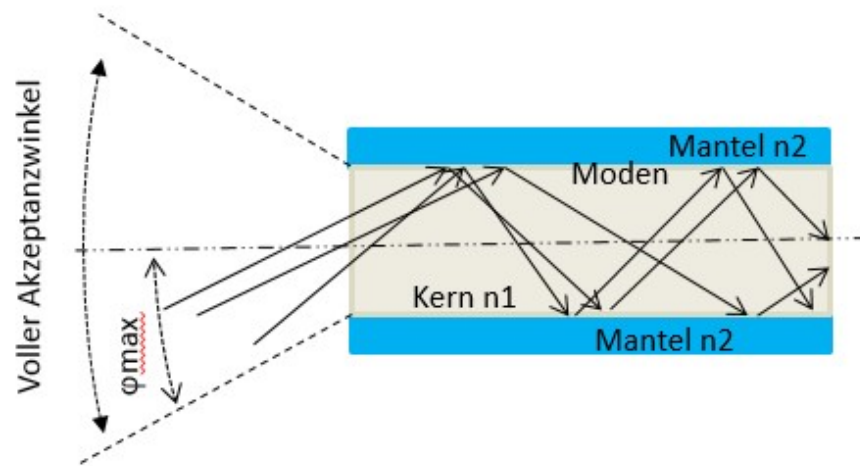


Bild 14: Moden der optischen Strahlung und Akzeptanzwinkel.



Die Anzahl der Moden der optischen Strahlung M hängt von den Parametern des Lichtwellenleiters wie folgt ab:

$M = \frac{V^2}{2}$, wobei V die normierte Frequenz oder die V-Nummer ist, die durch die folgende Gleichung definiert ist:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ wobei } 2a \text{ der Kerndurchmesser ist.}$$

Falls $V < 2,495$, breitet sich im Lichtwellenleiter nur eine grundlegende Mode (**Monomodefaser**, engl. *single-mode fibre*) aus. Die Werte $V > 2,495$ charakterisieren Multimodefasern.

Die größten Übertragungsverluste im Lichtwellenleiter sind mit Absorption und Streuung verbunden. Die Rayleigh-Streuung wegen mikroskopischer Unregelmäßigkeiten im Lichtwellenleiter ist eine intrinsische Quelle der Verluste. Die Absorption wird durch Anwesenheit von Unreinheiten im Material des Lichtwellenleiters verursacht. In Lichtwellenleitern aus Silizium (SiO_2) gibt es drei grundlegende Dämpfungsspitzen wegen Absorption, die von OH-Ionen in der Wellenlänge von 1050 nm, 1250 nm und 1380 nm verursacht wird.

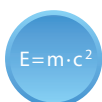
Eine andere Quelle der Verluste ist die Biegung des Lichtwellenleiters. Ein Teil der Strahlung wird dort verloren, wo der Lichtwellenleiter gebogen ist. Die Höhe des Verlustes hängt von dem Biegeradius ab. Falls der Biegeradius ähnlich wie der Durchmesser D des Lichtwellenleiters einschließlich des Mantels ist, handelt es sich um Mikrobiegung, wobei Biegungen mit einem Biegeradius höher als D Makrobiegung genannt werden. Typischerweise entstehen Makrobiegungen, wenn ein Lichtwellenleiter bei der Installation der Faserverbindung gebogen wird, wie zum Beispiel beim Krümmen der Fasern um die Ecke. Im Gegenteil dazu werden Mikrobiegungen durch Herstellungsfehler verursacht, die zu Veränderungen der Geometrie des Lichtwellenleiters auf kleine Entfernungen führen können.

Typen von Lichtwellenleitern	Charakteristik
Kunststoffleiter	Verluste von etwa 10^2 dB/km Sehr flexibel, billig, leicht
Weitere Glasfasern	Materialien: Chalkogenide, Fluoroaluminat In Kommunikation auf lange Wellenlängen anwendbar
Silizium (SiO_2)	Sie können extrem rein sein und danach dotiert werden, um die erwünschte Trägerkonzentration zu erzielen. Niedrige Verluste und Dispersion bei $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Zwei Fasern können kombiniert werden, falls sie eines kompatiblen Typs sind. Die Fasern müssen genau miteinander ausgerichtet sein, passende NA haben und die Enden der Fasern müssen in nächster Nähe sein.

Vergleich der Lichtwellenleiter, Koaxialkabel und Kabel mit verdrehten Adernpaaren.

Vorteile	Nachteile
Von der elektromagnetischen Interferenz nicht betroffen.	Hohe Installationskosten.
Niedrigere Dämpfung als bei Koaxialkabeln und Kabeln mit verdrehten Adernpaaren. Sender mit einer niedrigeren Leistung können verwendet werden.	Punkt-zu-Punkt-Kommunikationssysteme.
Kein Schutz für Erdung und Spannung erforderlich.	Verbindung und Spleißen der Fasern ist nicht einfach. Zufügen von weiteren Knoten ist problematisch.
Hohe Sicherheit des Signals, weil keine Energie ausgestrahlt wird, die von einer Antenne oder Detektor erkannt werden kann.	Zerbrechlicher als Koaxialkabel.
Hohe Bandbreite.	Teure Reparaturen und Wartung.



Photonische Kristalle sind künstliche mehrdimensionale periodische Strukturen, wobei die Entfernung zwischen den periodischen Wiederholungen in der Größenordnung der optischen Wellenlängen ist. Diese Materialien haben eine gewisse Struktur, um eine periodische Modulation des Brechungsindex zu haben.

Man kann auch Lichtwellenleiter mittels photonischer Kristalle herstellen. In diesen Leitern sind sowohl der Kern als auch der Mantel aus demselben Material

geschaffen, üblicherweise aus Silizium. Ein der Bereiche (Kern oder Mantel) hat Luftlöcher und der andere ist aus einem Feststoff. Die Anwesenheit der Luftlöcher in einem Bereich, z. B. Mantel, führt zu einem effizienten Brechungsindex, der kleiner als der Index im festen Kern ist.

Mittels photonischer Kristalle kann auch die spontane Emission gedämpft werden.

7 Anwendungen: optische Kommunikation, Biophotonik, optische Sensoren, Beleuchtung, Energiequellen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Anwendungen der Optoelektronik aufgelistet. Man sollte jedoch beachten, dass jedes Jahr neue Anwendungen auf dem Markt erscheinen. Infolgedessen wächst der optoelektronische Markt mit 30 % pro Jahr seit 1992.

7.1 Anwendungen der Optoelektronik

Die grundlegenden Anwendungen der Optoelektronik werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Anwendungen der Optoelektronik.

Anwendung	Charakteristiken
Kommunikation mittels Lichtwellenleitern <ul style="list-style-type: none"> • Telekommunikation • Rechnernetze • Kabelfernsehen 	Die Faseroptik wird als Übertragungskanal für Informationen wegen ihrer intrinsischen Charakteristiken verwendet: niedrige Kosten und geringes Gewicht, niedrige Dämpfung und Dispersion und hohe Bandbreite. Weitere optoelektronische Geräte wie LD, Photodetektoren, Sensoren, optische Verstärker, optische Modulatoren und Demulatoren, Multiplexer und Demultiplexer schaffen einen wichtigen Teil des optischen Kommunikationssystems. Die optische Datenübertragung wird auch in Steuereinrichtungen und Industrieautomatisierung eingesetzt.
Unterhaltungselektronik	Breites Spektrum der Produkte der Unterhaltungselektronik schließt optoelektronische Bauelemente ein, wie zum Beispiel Photodetektoren, LED, CCD-Sensoren, Photodioden und Phototransistoren. <ul style="list-style-type: none"> • Rechner, Drucker • CD-Lesegeräte • Thermographie • Kameras und Displays • Smartphones • Massive Speicherchips
LD, Laserdioden	Die wesentlichste Anwendung von LD ist Telekommunikation mittels Lichtwellenleitern als Lichtsender. Weiter können LD wie folgt verwendet werden: <ul style="list-style-type: none"> • Schneiden, Chirurgie. • CD-Brennen und -Lesen. • Optische Datenspeicher. • Verteidigung: Radare, lasergesteuerte Waffen
Beleuchtung, LED.	LED können für Beleuchtung in vielen Bereichen angewandt werden: <ul style="list-style-type: none"> • Wohngebäuden. • Verkehrssignalisierung, Straßenbeleuchtung. • Außenanwendungen: Start- und Landebahnen auf Flughafen. • Digitaluhren, elektronische Anzeigeelemente.
Solarzellen	Photovoltaische Systeme <ul style="list-style-type: none"> • Anwendungen mit niedriger Leistung: Taschenrechner, Uhren, Innen- und Außenbeleuchtung. • Eigenständige photovoltaische Systeme. • Photovoltaische Systeme mit Netzanschluss. • Anwendungen in Luftfahrt.