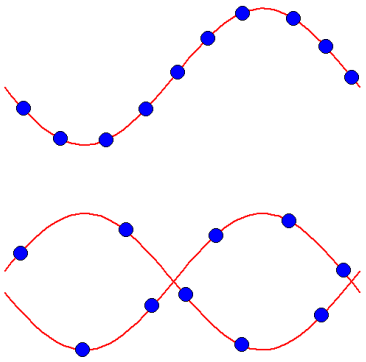
Kurze Begriffsbestimmung



Photon, Phonon, Plasmon, Polariton

Dipl.-Ing. Björnstjerne Zindler, M.Sc.

www.Zenithpoint.de

Erstellt: 28. Januar 2010 - Letzte Revision: 19. Oktober 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Photon **3**

2 Phonon **5**

3 Plasmon **7**
- 3.1 Partikelplasmonen . . . 8
- 3.2 Oberflächen-, (2D-)Plasmonen . . . 9
- 3.3 Volumenplasmonen . . . 10
- 3.4 Plasmon-Polaritonen I . . . 11

4 Polariton **13**
- 4.1 Phonon-Polaritonen . . . 14
- 4.2 Plasmon-Polaritonen II . . . 15

5 Zusammenfassung **17**

Literatur

[001] Keine für vorliegenden Text.

---

1 Photon

Das Photon ist die elementare Anregung (Quant) des quantisierten elektromagnetischen Feldes. Alle bewegten (Elementar-)Teilchen einschließlich der Photonen besitzen Welleneigenschaften, der Welle-Teilchen-Dualismus. Photonen gehören zur Teilchenklasse der Bosonen. Für das Photon wird im Allgemeinen das Symbol γ verwendet. Sehr oft wird ein Photon auch durch die enthaltene Energie dargestellt. [001]ff.

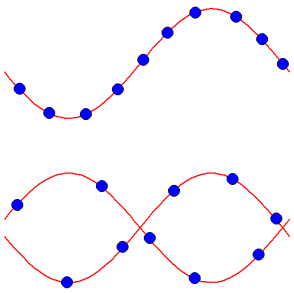
$$\gamma = h \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{h}{2\pi} \cdot \omega = \hbar \cdot \omega$$

Jegliche elektromagnetische Strahlung ist in Photonen quantisiert. Das bedeutet, die kleinste Menge an elektromagnetischer Strahlung beliebiger Frequenz ist ein Photon. Photonen haben eine unendliche natürliche Lebensdauer, können aber bei einer Vielzahl physikalischer Prozesse erzeugt oder vernichtet werden. Ein Photon befindet sich nie in Ruhe, sondern bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit c. Daraus folgt, dass es keine (Ruhe)Masse besitzen kann.

2 Phonon

Ein Phonon ist ein Quasiteilchen, das in der theoretischen Festkörperphysik verwendet wird, um die Eigenschaften der quantenmechanisch beschriebenen Gitterschwingungen in einem Kristall mit Hilfe eines vereinfachten Modells beschreiben zu können. Phononen sind delokalisiert, das heißt ein Phonon existiert im ganzen Kristallgitter und lässt sich keinem bestimmten Ort zuordnen.

Man unterscheidet zwischen akustischen und optischen Phononen. Akustische Phononen entsprechen den Schallwellen, die sich durch das Kristallgitter fortpflanzen. Hierbei bewegen sich alle Atome einer Basis in Phase, während sich die Atome einer Basis bei optischen Phononen gegenphasig bewegen. Optische Aktivität bedeutet, dass ein Phonon mit einem Photon wechselwirken kann (also ein Phonon erzeugt werden kann, indem ein Photon absorbiert wird - umgekehrt - ein Photon emittiert werden kann, indem ein Phonon vernichtet wird). Optische Aktivität kann nur dann vorliegen, wenn innerhalb der Basis Polarisation vorliegt, was im Allgemeinen genau dann der Fall ist, wenn die Basis aus verschiedenen Atomen aufgebaut ist.



Unterschied von akustischen
und optischen Phononen grafisch dargestellt.

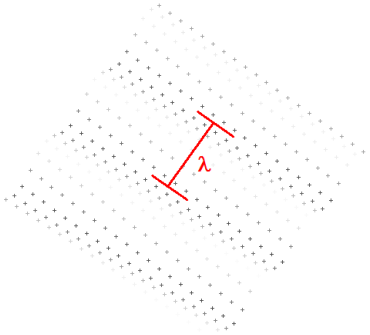
Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenvektor ist durch die Phononendispersion gegeben. Bei Wellenlängen, die gegenüber der Gitterkonstante groß sind, gilt für akustische Phononen eine lineare Beziehung

$$\omega \cong c \cdot k$$

(mit der jeweiligen Schallgeschwindigkeit c_s). Die Energiezustände ε_n der Phononen berechnen sich äquivalent zu den Niveaus eines harmonischen Oszillators der Photonen nach

$$\varepsilon_n = \hbar \cdot \omega \cdot \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

da Phononen zu den Bosonen zählen. Der Begriff Phonon wurde in Analogie zu den Schwingungsquanten des elektromagnetischen Feldes, den Photonen gewählt.



Ein Phonon als Kristallgitterschwingung.

3 Plasmon

Plasmonen werden die quantisierten Dichteschwankungen von Ladungsträgern in Halbleitern oder Metallen genannt. Quantenmechanisch werden sie als Quasiteilchen behandelt. Der Begriff ist eine Abkürzung für Plasmaschwingungsquanten. Was das Photon für elektromagnetische Wellen darstellt, ist das Plasmon für Schwingungen im Fermigas von Metallen.

3.1 Partikelplasmonen

Als Partikelplasmon oder auch Lokalisiertes Oberflächenplasmonen bezeichnet man nicht propagierende Feldüberhöhungen an kleinen Metallpartikeln, wie beispielsweise Gold oder Silber. Es ist damit ein spezielles Plasmon. Für hinreichend kleine Partikel ($\oslash < \lambda$) kann ein solches als schwingender Dipol angesehen werden mit dem Dipolmoment:

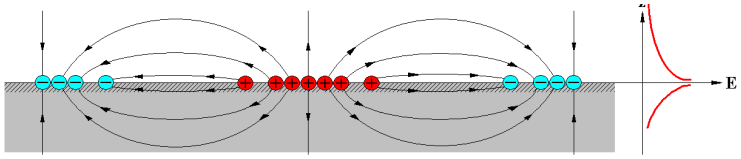
$$p \cong \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_m}$$

Mit:

ε	die Dielektrizitätskonstanten des umgebenden Mediums
ε_m	die Dielektrizitätskonstanten des Metalls

Da bei Metallen die Dielektrizitätskonstante sehr stark von der Wellenlänge der elektromagnetischen Schwingung abhängt (Drude-Theorie), ist auch die Größe der Polarisation wellenlängenabhängig.

3.2 Oberflächen-, (2D-)Plasmonen



Ein Phonon als Kristallgitterschwingung grafisch dargestellt.

Kollektive Anregungen von freien Elektronen in Metallen zu Plasmaschwingungen gegen die Ionenrümpfe werden in der Festkörperphysik als Plasmonen bezeichnet. Oberflächenplasmonen sind Oberflächenwellen (evaneszente Wellen), bei denen die longitudinalen elektronischen Schwingungen parallel zur Oberfläche eines Metalls angeregt werden. Die resultierende Feldstärke ist im Raum über der metallischen Oberfläche verstärkt.

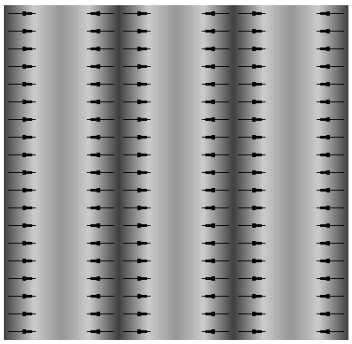
Oberflächenplasmonen lassen sich unter bestimmten Bedingungen mit Licht anregen. Auch wenn die Energie der Lichtquanten im Bereich der Energien von Oberflächenplasmonen ist, kann ein einfallender Lichtstrahl normalerweise kein Oberflächenplasmon anregen, weil Oberflächenplasmonen in Metallen eine geringere Phasengeschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit haben. Daher stimmt der Wellenvektor (Impuls) des Lichts und des Oberflächenplasmons nicht überein. Eine Einkopplung kann jedoch nur stattfinden, wenn die Komponenten des Wellenvektors parallel zur Oberfläche gleich sind. Oberflächenplasmonen können auch durch Elektronen angeregt werden. Diese können Energie und Impuls an ein Oberflächenplasmon abgeben.

Oberflächenplasmonen breiten sich entlang der Metalloberfläche aus, wobei ihre Intensität mit der Ausbreitungslänge exponentiell abnimmt. Für die Dämpfung der Plasmonenausbreitung sind Leitungsverluste im Metall verantwortlich.

•λ = 633nm für Oberflächenplasmonen auf Gold etwa $L = 9\mu$m, was $1/e$ der Intensität entspricht.
•λ = 633nm für Oberflächenplasmonen auf Silber etwa $L = 60\mu$m, was $1/e$ der Intensität entspricht.

Durch geeignete Strukturierung der Metalloberfläche kann die Ausbreitungsrichtung von Oberflächenplasmonen beeinflusst werden. Es lassen sich Spiegel, Strahlteiler und Linsen für Oberflächenplasmonen herstellen. Eine Anwendung ist die Oberflächenplasmonenresonanz (SPR) in der Biosensorik. Dabei macht man sich zu Nutze, dass die Wellenlänge der Oberflächenplasmonen auf Brechzahländerungen in der unmittelbaren Nähe der Metalloberfläche stark reagiert. Außerdem könnten Oberflächenplasmonen geeignet sein, optische Information in hochintegrierten Computerchips zu übertragen. Weiterhin kommen sie bei der Entwicklung von neuer DVD-Technologie zum Einsatz.

3.3 Volumenplasmonen



Ein Phonon als Kristallgitterschwingung grafisch dargestellt.

Volumenplasmonen sind eng mit Plasmonen verwandt und stellen einen Spezialfall dar. Ähnlich dem Plasmon stellen Volumenplasmonen Schwingungsquanten dar, jedoch unter Berücksichtigung einer neuen Schwingungsmode, die für das ganze Raumvolumen gilt:

$$E_{VP} = \hbar \cdot \sqrt{\frac{n \cdot e^2}{m \cdot \varepsilon_0}} \propto \hbar \cdot \omega_A \propto h \cdot \omega_{VP}$$

Mit:

n	die Valenzelektronendichte
e	die Elementarladung
m	die Elektronenmasse
ε_0	absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$\hbar$	das Plancksche Wirkungsquantum
ω_P	die Plasmafrequenz

3.4 Plasmon-Polaritonen I

Klassisch kann man sich Plasmonen als Elektronen vorstellen, die relativ zu positiven Ionen oszillieren. Verdeutlichung - man kann sich einen kubischen Metallklotz in einem nach rechts gerichteten Feld vorstellen. Die freien Elektronen bewegen sich nun nach links, bis das Feld im Innern ausgeglichen ist. Dabei werden am rechten Rand positive Ionen freigelegt. Schaltet man das äußere Feld nun ab, wandern die Elektronen wieder nach rechts, durch die gegenseitige Abstoßung und die Anziehung durch die positiven Ionen. So oszillieren die Elektronen nun mit der Plasmafrequenz hin und her, bis die Energie durch Reibung oder andere Dämpfungen aufgebraucht ist. Plasmonen sind die Quantisierung dieser Eigenfrequenz.

Plasmonen besitzen näherungsweise die Energie:

$$E_P = \hbar \cdot \sqrt{\frac{n \cdot e^2}{m \cdot \varepsilon_0}} = \hbar \cdot \omega_P$$

Mit:

n	die Elektronendichte
e	die Elementarladung
m	die Elektronenmasse
ε_0	die absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$\hbar$	das Plancksche Wirkungsquantum
ω_P	die Plasmafrequenz

4 Polariton

Ein Polariton ist ein Quasiteilchen, das bei Wechselwirkung einer elementaren Anregung im Festkörper wie durch Phonon, Exziton oder Plasmon oder mit elektromagnetischen Feldern (Photonen) auftritt. Die zuständigen physikalischen Phänomene sind Absorption, Reflexion und Dispersion.

Photon und die elementare Anregung bilden in Festkörpern ein neues Quasiteilchen - das Polariton. Starke Kopplung findet man, falls sich die Dispersionskurven von Photon und Anregung schneiden, das heißt, falls Energie und Impuls der Wechselwirkungspartner praktisch übereinstimmen.

Bezüglich der beteiligten Quasiteilchen unterscheidet man im Detail zwischen Phonon-Polariton, Exziton-Polariton oder Plasmon-Polaritonen.

Die Polaritonen sollten nicht mit den Polaronen verwechselt werden. Bei letzteren hat man es mit fermionischen Quasiteilchen zu tun - einem Elektron plus „mitgeschleppter Polarisationswolke“. Während die Polaritonen bosonische Quasiteilchen darstellen.

4.1 Phonon-Polaritonen

Das Phonon-Polariton lässt sich in Kristallen mit ionischer Bindung (z. B. NaCl) finden. Bildlich gesprochen ruft eine elektromagnetische Welle eine Polarisation und damit eine Gitterverzerrung hervor. Umgekehrt wird eine transversal optische Gitterwelle von einer elektromagnetischen Gitterwelle begleitet. Hierbei spielen zwei verschiedene Arten der Polarisation eine wichtige Rolle:

• Die Ionenpolarisation beruht auf der Verschiebung der Gitterionen eines Ionenkristalls im elektrischen Feld.

• Die elektronische Polarisation kann als Verschiebung der Elektronenwolke bezüglich der Kerne aufgefasst werden.

Beide können durch das Oszillatormodell beschrieben werden.

4.2 Plasmon-Polaritonen II

Schwingungen des Gitters (Phononen) werden auch durch Elektronen abgeschirmt. Da Elektronenwellen bei ω_P (Plasmafrequenz) maximal sind, ergibt sich eine Änderung der Schirmung bei ω_P. Dies macht sich als kleine Änderung in der Phononendispersion bei ω_P bemerkbar.

Diese Änderung der Eigenschaften von freien Ladungen bei ω_P macht sich bemerkbar in der räumlichen Struktur der beschriebenen Abschirmung.

Gekoppelte Moden des Feldes einer transversalen elektromagnetischen Welle mit optischen Phononen (Gitterschwingungen mit Polarisationsänderungen) nennt man Polariton.

5 Zusammenfassung

• **Photon**
- Teilchen
- Elementare Anregung eines elektromagnetischen Feldes.
- Kleinste Menge an elektromagnetischer Strahlung beliebiger Frequenz.
- Hohe Energie - Kleiner Impuls

• **Phonon**
- Quasiteilchen
- Quantenmechanisch beschriebene Gitterschwingungen in einem Kristall.
- Phononen wechselwirken mit Photonen - Photonen erzeugen Phononen und umgekehrt.
- Kleine Energie - Hoher Impuls

• **Plasmon**
- Quasiteilchen
- Quantisierte Dichteschwankungen von Ladungsträgern.
- Der Begriff ist eine Abkürzung für Plasmaschwingungsquanten.
- Wechselwirkung zwischen Energie und Impuls

• **Polariton**
- Quasiteilchen
- Kopplung zwischen Photonen und Festkörperanregung wie Phonon oder Plasmon.
- Starke Kopplung findet man, falls sich die Dispersionskurven von Photon und Plasmon schneiden.
- Energie und Impuls der Wechselwirkungspartner stimmen überein.

• **Teilchen**
- (Elementar)Teilchen haben eine eindeutig festgelegte Energie-Impuls-Beziehung.

• **Quasiteilchen**
- Quasiteilchen im Festkörper sind im selben Sinne elementar.
- Ihre Energie-Impuls-Beziehung ist periodisch im Impuls und von größerer Komplexität.

LaTeX 2_ε