

Wie im Folgenden gezeigt wird, stellt die Grundlage der lichtbasierten Nanotechnologie die Wechselwirkung zwischen Licht mit Elektronen in Metallen dar. In diesem Kapitel sollen einige Überlegungen zum Verständnis dieser Wechselwirkung präsentiert werden: Wie verhalten sich Elektronen in Metallen? Was ist Licht? Wie kann Licht mit diesen Elektronen wechselwirken – und was hat dies mit Nanotechnologie zu tun?

Hierfür soll zunächst eine kurze Einführung in die Natur des Lichtes erfolgen. Im Weiteren wird das Verhalten von Elektronen in festen Körpern und als Abschluss die Wechselwirkung von Licht mit diesen Elektronen beschrieben.

2.1 Was ist Licht?

Licht fasziniert die Menschen schon seit jeher. Newton war an der Schwelle zum 17. Jahrhundert der Meinung, dass Licht aus kleinen Teilchen besteht, die sich geradlinig im Raum ausbreiten. Christiaan Huygens, der zu etwa der gleichen Zeit lebte, widersprach, und behauptete, Licht bestehe aus Wellen, die sich ähnlich wie Wasserwellen verhalten. Das Problem schien scheinbar gelöst, als James Clerk Maxwell Ende des 19. Jahrhunderts seine Maxwell-Gleichungen veröffentlichte, die auch heute noch die Basis für viele Berechnungen im Bereich der Optik darstellen. Diese beschreiben Licht als eine elektromagnetische Welle, die sich in Raum und Zeit ausbreitet (Jackson).

Seit Entwicklung der Quantenmechanik, vorrangig durch Max Planck und Albert Einstein Anfang des 20. Jahrhunderts vorangetrieben, ist jedoch bekannt, dass Licht sowohl Teilchen- wie auch Wellencharakter hat. Je nachdem, welche Eigenschaften betrachtet werden bzw. welches Experiment durchgeführt wird, ist eine Beschreibung von Licht entweder als Teilchen oder als Welle geeigneter.

Für die Ausführungen in diesem Text ist es größtenteils zweckmäßig, Licht als Welle zu betrachten. Eine elektromagnetische Welle kann man sich so vorstellen, dass ein elektrisches Feld (und ein magnetisches Feld, welches im Folgenden aber vernachlässigt wird) zeitlich oszilliert und sich dabei im Raum ausbreitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist hierbei die Lichtgeschwindigkeit, die mit c bezeichnet wird (siehe Abb. 2.1). Schaut man sich das elektrische Feld – oder genauer: den elektrischen Feldvektor, der Richtung und Stärke des elektrischen Feldes angibt – an einem *festen* Ort an, so schwingt (oszilliert) dieser mit der Frequenz f des Lichtes. Den räumlichen Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen bezeichnet man als Wellenlänge λ des Lichtes. Zwischen Wellenlänge λ und Frequenz f besteht im Vakuum der Zusammenhang $c = \lambda \cdot f$. In Materie, also z. B. in Glas oder anderen Materialien (dies wird im Folgenden als „Medium“ bezeichnet) breitet sich Licht mit kleinerer Geschwindigkeit aus, es gilt $c_{\text{Medium}} = \lambda_{\text{Medium}} \cdot f$, da die Frequenz von Licht im Medium und im Vakuum identisch ist. Die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit ist z. B. ein Effekt, welcher aufgrund der Wechselwirkung von Licht mit den Elektronen in den verschiedenen Medien zustande kommt.

Zusätzlich zu den Eigenschaften Frequenz, Wellenlänge und Geschwindigkeit existieren noch weitere Eigenschaften von Licht(-wellen), die für die weiteren Betrachtungen wichtig sind. Eine hiervon ist die Polarisation, die angibt, in welcher Art und Weise der elektrische Feldvektor schwingt. Für die Behandlung in diesem Text ist es ausreichend, die sogenannte „lineare Polarisation“ zu betrachten. Bei dieser schwingt der elektrische Feldvektor in einer Ebene (z. B. in der Papierebene bzw. steht senkrecht auf dieser). Den Begriff der

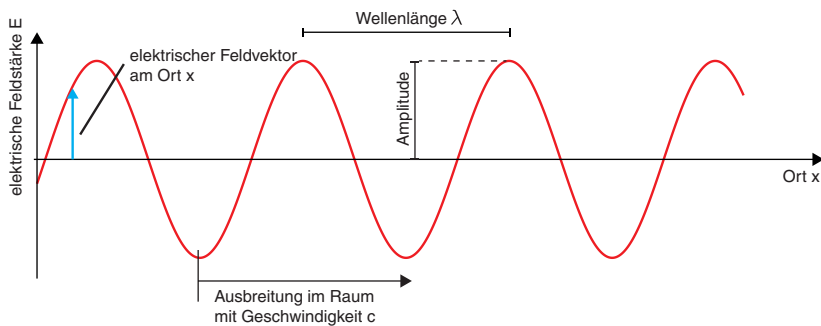


Abb. 2.1 Eigenschaften von Lichtwellen. Die Grafik zeigt die räumliche Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke einer Lichtwelle vom Ort zu einer festen Zeit

Lichtpolarisation¹ findet man z. B. häufig in der Fotografie, wo spezielle Filter eine Polarisationsrichtung des Lichtes herausfiltern können, bzw. im 3-D-Kino, wo Polarisationsbrillen eingesetzt werden, um die Bilder für rechtes und linkes Auge zu trennen.

Der wohl unanschaulichste Begriff im Zusammenhang mit Lichtwellen ist die Phase bzw. der Phasenwinkel der Lichtwelle. Die Phase gibt an, welchen Schwingungszustand eine Lichtwelle an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit gerade hat – ob also gerade ein Maximum der elektrischen Feldstärke vorliegt, oder ob die elektrische Feldstärke sogar Null ist. Sinnvoll ist der Begriff Phase vor allem, wenn man zwei elektromagnetische Wellen gleicher Frequenz miteinander vergleicht – diese können z. B. gleichphasig schwingen. Dies bedeutet, dass eine Welle ein Maximum hat, wenn auch die andere ein Maximum aufweist (siehe Abb. 2.2 rechts). Im Falle einer Phasenverschiebung von 180° schwingen sie gegenphasig, d. h. hat eine ein positives Maximum der elektrischen Feldstärke, hat die andere ein negatives Maximum der elektrischen Feldstärke (siehe Abb. 2.2 links). Treffen z. B. zwei gegenphasig schwingende Wellen mit gleicher Amplitude, also „Höhe“, an einem Ort zusammen, so heben sich ihre elektrischen Felder auf. Diese „Auslöschung“ zweier gegenphasig schwingender Wellen wird als destruktive Interferenz bezeichnet. Überlagern sich zwei gleichphasig schwingende Wellen führt dies zu einer Verstärkung, man spricht von konstruktiver Interferenz.

Eine Lichtwelle kann auf elektrische Ladungen Kräfte ausüben. Dies wird durch die sogenannte Lorentzgleichung beschrieben. Bringt man z. B. ein Elektron in ein elektrisches Feld, so kann das Elektron darin bewegt bzw. beschleunigt werden. Die Richtung der Bewegung ist hierbei durch die Richtung des elektrischen Feldvektors, also der Polarisation des elektrischen Feldes, gegeben. Diesen Effekt hat man sich z. B. früher in analogen Röhrenfernsehern zunutze gemacht, um den Elektronenstrahl, welcher das Bild aufgebaut hat, in geeigneter Weise durch Plattenkondensatoren zu beeinflussen.

Die Frequenz von Licht im sichtbaren Spektralbereich, also zwischen Ultraviolett und Infrarot, liegt jedoch um ein Vielfaches höher als die, mit der früher beim Fernseher der Elektronenstrahl hin und her bewegt wurde. Der elektrische Feldvektor schwingt bei einer Wellenlänge von 800 nm (rotes Licht)

¹Achtung: Das Wort „Polarisation“ wird oft – auch in diesem Text – in Zusammenhang mit der Verschiebung von elektrischen Ladungen verwendet. Sofern es sich nicht aus dem Zusammenhang des Textes ergibt, wird daher explizit der Begriff „Lichtpolarisation“ bzw. „Polarisation des elektrischen Feldes“ verwendet.

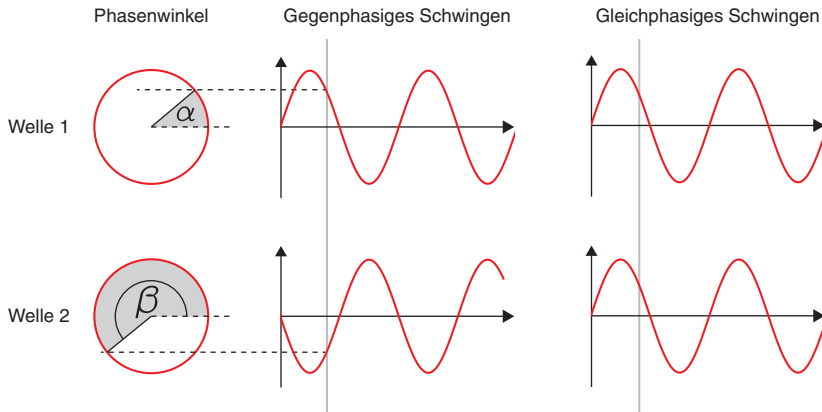


Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Definition von Phasenwinkel und gleich- bzw. gegenphasigem Schwingen. Links dargestellt im Kreis ist der Phasenwinkel für die beiden links gezeigten Wellen. Die Winkel α und β haben eine Winkeldifferenz (Phasendifferenz) von 180° , daher schwingen die beiden links gezeigten Wellen gegenphasig: Zu jedem Zeitpunkt ist der Wert von Welle 1 der negative Wert von Welle 2. Anders beim gleichphasigen Schwingen (rechts), wo beide Wellen immer den gleichen Wert besitzen. Für den Fall gleichphasiger Schwingungen sind die Phasenwinkel-Diagramme nicht angegeben, da hier beide Winkel identisch sind, d. h. $\alpha = \beta$

ca. $375 \cdot 10^{12}$ mal in der Sekunde hin und her – also 375 Millionen Millionen mal, im Vergleich zu einem Fernseher, wo der Elektronenstrahl nur ca. 600 mal pro Sekunde mithilfe eines Plattenkondensators hin und her bewegt wird! Somit bewegen sich Elektronen in einem Lichtfeld viel schneller. In welcher Weise elektromagnetische Wellen wie Licht Kräfte auf Elektronen ausüben, soll im nächsten Abschnitt diskutiert werden.

Was in diesem Abschnitt behandelt wurde

- Licht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden.
- Eigenschaften einer Lichtwelle sind die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde (Frequenz), der räumliche Abstand von zwei Schwingungsbergen (Wellenlänge) sowie noch andere Eigenschaften wie Polarisation und Phase.
- Elektrische Felder, also auch Lichtwellen, können für eine Bewegung von geladenen Teilchen wie z. B. Elektronen sorgen.

2.2 Von einzelnen Atomen zu festen Körpern

Die Grundlage der lichtbasierten Nanotechnologie, um die es in diesem Text gehen soll, bildet die Interaktion von Lichtwellen mit Materie. Hierfür soll in diesem Kapitel zunächst darauf eingegangen werden, wie Materie aufgebaut ist, mit speziellem Augenmerk auf die Elektronen in festen Körpern (hier am Beispiel von Metallen). Danach soll mithilfe des vorgestellten Modells auf die sogenannte dielektrische Funktion eingegangen werden, mit der die Eigenschaften der Elektronen im betrachteten Material und darauf basierend dessen elektronische und optische Eigenschaften beschrieben werden können. Diese Eigenschaften spielen eine besonders wichtige Rolle in der Nanotechnologie.

Hierzu ist es zweckmäßig, zunächst einmal das sogenannte „Bohrsche Atommodell“ zu betrachten, welches typischerweise in der Schule gelehrt wird und auf den Physiker Niels Bohr zurückgeht. In diesem umkreisen Elektronen – negativ geladene Elementarteilchen – einen positiv geladenen Kern, der aus Protonen und Neutronen besteht. Dies erinnert stark an ein Planetensystem, in dem Planeten die Sonne umkreisen. Im Gegensatz zum Planetensystem können Elektronen aufgrund der Gesetze der Quantenmechanik den Kern jedoch nur auf fest vorgegebenen Bahnen umkreisen, es ist also nicht jeder Bahnradius möglich. Verbunden mit dem Bahnradius ist die Bindungsenergie der Elektronen, die sie in Bezug auf den positiv geladenen Kern besitzen. Je näher sie sich am Kern befinden, desto höher ist ihre Bindungsenergie und desto schwieriger können sie vom jeweiligen Atom gelöst werden.

Festkörper wie z. B. Gold, Silber oder Kupfer bestehen aus vielen, miteinander verbundenen Atomen, die regelmäßig in einem sogenannten Kristallgitter angeordnet sind. In einem Kubikzentimeter Gold befinden sich ca. $5,9 \cdot 10^{22}$ Atome. Aufgrund dieser hohen Zahl an Atomen sowie deren regelmäßiger Anordnung ändert sich auch das Bild aus dem Bohrschen Atommodell: Es gibt keine fest vorgegebenen, scharf begrenzten Elektronenbahnen um diese Atome mehr. Vielmehr bilden sich in Festkörpern sogenannte Energiebänder aus. Dies sind – ähnlich wie die Elektronenbahnen des Bohrschen Modells – für Elektronen erlaubte Energiebereiche. Anders jedoch als beim einzelnen Atom sind die Energiebänder eine Eigenschaft des gesamten Festkörpers. Elektronen „gehören“ also nicht mehr zu einem spezifischen Atom (siehe Abb. 2.3).

Je nach Lage der Energiebänder unterscheidet man bei Metallen zwischen Valenz- und Leitungsbändern. Valenzbänder liegen energetisch gesehen tiefer als Leitungsbänder, die Elektronen darin spüren daher eher die Auswirkungen der Atomkerne.

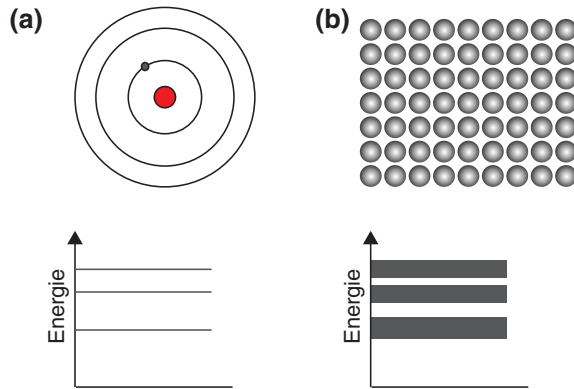


Abb. 2.3 Schematische Darstellung der Ausbildung von Energiebändern. Während bei einzelnen Atomen mit definierten Schalen wie in (a) gezeigt die für Elektronen erlaubten Bereiche energetisch gesehen stark beschränkt sind (es existieren nur scharfe Bereiche, in denen sie sich aufhalten dürfen), bilden sich bei Kristallen, also der regelmäßigen Anordnung von Atomen in (b), Energiebänder aus. Die Elektronen haben dadurch energetisch gesehen viel breitere Aufenthaltsbereiche

Innerhalb des Leitungsbandes können sich Elektronen daher frei bewegen. Bei Anlegen einer Spannung ist diese Bewegung gerichtet und wird dann als Strom bezeichnet. Die Gesamtheit der Elektronen in den Leitungsbandern wird, da sie sich scheinbar frei und losgelöst von den Atomrümpfen bewegen kann, als „freies Elektronengas“ bezeichnet. Man knüpft hier eine Analogie zu Gasen, wo sich auch einzelne Teilchen unabhängig voneinander bewegen können.

Trotzdem können die Leitungselektronen z. B. mit Defekten im Kristallgitter stoßen – in der Physik „Streuung“ genannt. Die Häufigkeit einer solchen Streuung hängt entschieden davon ab, wie rein und perfekt der Festkörper ist bzw. welche Temperatur er hat. Hieraus ergibt sich dann der elektrische Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit.

Um die Eigenschaften des Elektronengases in einem Festkörper beschreiben zu können, wird oftmals die dielektrische Funktion ϵ benutzt. Diese frequenzabhängige Funktion beschreibt, wie das Elektronengas auf die Anregung mit einem elektrischen Feld, wie z. B. Licht, reagiert. Mithilfe dieser Funktion können die vielfältigen optischen Eigenschaften von Festkörpern sehr genau beschrieben werden. So lassen sich z. B. Reflektivitäten der Oberfläche von Festkörpern, elektrische Widerstände und weitere Eigenschaften daraus berechnen.

Die dielektrische Funktion ist eine komplexwertige, materialbezogene Größe, besteht also mathematisch gesehen aus einem Realteil und einem Imaginärteil:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_{\text{real}}(f) + i \cdot \varepsilon_{\text{imaginär}}(f) \quad (2.1)$$

In die theoretische Berechnung dieser Funktion (welche für ein freies Elektronengas durch das sogenannte Drude-Sommerfeld-Lorentz-Modell erfolgt) gehen Faktoren wie z. B. die Dichte der Elektronen und die Anzahl von Streuungen, d. h. Kollisionen dieser Elektronen pro Sekunde, ein. Diese Größen unterscheiden sich bei verschiedenen Materialien, was dazu führt, dass sich deren optische Eigenschaften unterscheiden und somit auch unterschiedliche Festkörper unterschiedliche Farben haben.

Eine beispielhafte Darstellung der dielektrischen Funktion für Gold (in Abhängigkeit der Frequenz) ist in Abb. 2.4 gezeigt.

Die durchgezogenen Kurven zeigen den theoretischen (d. h. mithilfe des Drude-Sommerfeld-Lorentz-Modells für ein freies Elektronengas berechneten) Real- bzw. Imaginärteil der dielektrischen Funktion. Die Punkte hingegen zeigen

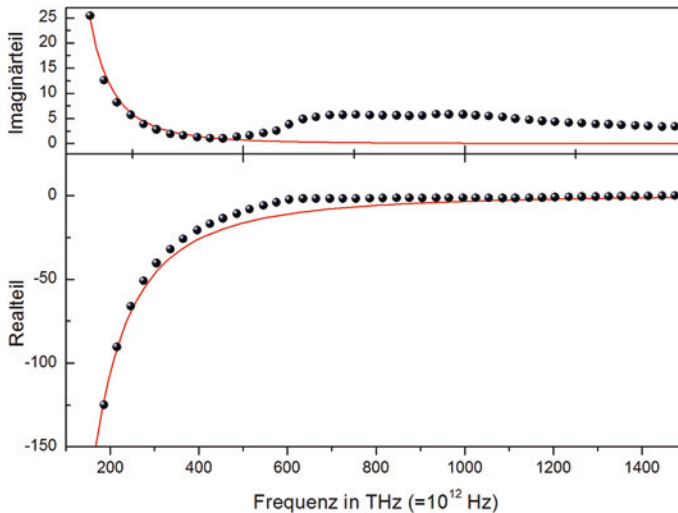


Abb. 2.4 Darstellung des Real- und Imaginärteils der dielektrischen Funktion von Gold. Die Punkte wurden Johnson und Christy (1972) entnommen, die durchgezogenen Kurven stellen die theoretische Beschreibung durch das Drude-Sommerfeld-Lorentz-Modell dar mit geeignet gewählten Werten für die Dichte der Elektronen bzw. der Anzahl von Kollisionen pro Sekunde

gemessene Daten (Johnson und Christy 1972). Wie man erkennt, stimmen die theoretisch modellierten sowie die experimentell gemessenen Verläufe recht gut überein, vor allem bei niedrigen Frequenzen unter 400 THz (was einer Wellenlänge von ca. 750 nm entspricht, also rotem Licht). Für Licht mit höherer Energie, d. h. hin zum ultravioletten Spektralbereich und damit zu höheren Frequenzen, sind jedoch starke Abweichungen vorhanden, die aufgrund von bei diesen Energien möglichen Übergängen von Elektronen zwischen verschiedenen Energiebändern zustande kommen. Für eine grundsätzliche Diskussion können diese Übergänge jedoch im Folgenden vernachlässigt und mit einem freien Elektronengas, beschrieben durch die durchgezogenen Linien, gearbeitet werden.

Im Folgenden soll hauptsächlich mit dem Realteil der dielektrischen Funktion argumentiert werden. Obwohl der Imaginärteil durchaus eine Rolle spielen kann (er wird immer dann wichtig, wenn es um Verluste, Dämpfungen und Energieumwandlungen geht), soll er der einfacheren Argumentation wegen vernachlässigt werden. Die beschriebenen Funktionsweisen und Mechanismen bleiben hierbei auch ohne Berücksichtigung des Imaginärteils richtig.

Eine wichtige Eigenschaft der dielektrischen Funktion von Gold ist, dass deren Realteil im optischen Spektralbereich, also in einem Wellenlängenbereich von 400 nm (Blau) bis 800 nm (Rot) – was einem Frequenzbereich von 375 THz bis 750 THz entspricht – stark negativ ist (siehe Abb. 2.4). Physikalisch bedeutet dies, dass eine Lichtwelle nicht in das Material eindringen kann und somit reflektiert wird. Dies sorgt für das optisch metallische Aussehen von Gold, also die gelblich wirkende Spiegelung.

Bei der sogenannten Plasmafrequenz, die mit f_p bezeichnet wird, ändert sich dieses Verhalten. Licht wird ab dieser Frequenz nicht mehr reflektiert. Bei dieser Frequenz ist der Realteil der dielektrischen Funktion Null, hat also seinen Übergang von negativ zu positiv. Für Gold liegt die Plasmafrequenz beispielsweise bei ca. 2100 THz, was einer Wellenlänge im Vakuum von ca. 140 nm entspricht. Elektromagnetische Wellen größerer Frequenz (oder gleichbedeutend kleinerer Wellenlänge) können durch den Festkörper hindurchgehen, für diese Frequenzen ist Gold also transparent.

Physikalisch kann man sich dies folgendermaßen vorstellen: Bei kleinen Frequenzen der einfallenden Lichtwelle können die Elektronen nahe der Oberfläche dem schnellen Wechsel von positivem und negativem elektrischen Feld der Lichtwelle noch folgen. Sie folgen der Lichtwelle in einer solchen Weise, dass im Inneren des Festkörpers eine zu der äußeren Lichtwelle um 180° phasenverschobene Welle erzeugt wird (siehe Abb. 2.2). Hierdurch ist das Innere des Festkörpers feldfrei, das heißt die Lichtwelle dringt nicht in den Festkörper

ein. Daher wird alles auftreffende Licht reflektiert (bzw. teilweise, in einem beschränkten Bereich in Oberflächennähe auch absorbiert, siehe unten). Ab der Plasmafrequenz f_p wird die Frequenz des Lichtes zu hoch – die Elektronen können den Schwingungen nicht mehr folgen und somit den Festkörper nicht von der Strahlung abschirmen. Daher kann Licht mit höherer Frequenz als die Plasmafrequenz (wie z. B. ultraviolette Strahlung oder Röntgenstrahlung) ungehindert durch den Festkörper hindurchtreten.

Obwohl die Elektronen bei niedrigen Frequenzen das Innere des Festkörpers abschirmen, reagieren zumindest die oberflächennahen Elektronen auf das auftreffende Licht (und sorgen damit dafür, dass das Innere feldfrei ist). Die Dicke dieser noch reagierenden Grenzschicht wird in der Physik auch Eindringtiefe bzw. Skintiefe (engl. „skin“ = Haut) genannt und liegt bei Metallen im Bereich von ca. 20–30 nm.

Was in diesem Abschnitt behandelt wurde

- Elektronen, die sich im Leitungsband von Festkörpern befinden, können sich quasi ungehindert bewegen.
- Die dielektrische Funktion $\varepsilon(f)$ beschreibt, wie die Elektronen auf eine Lichtwelle reagieren.
- Licht kann unterhalb der Plasmafrequenz ca. 20–30 nm weit in Materie eindringen.

2.3 Die Welt ist bunt: Resonanzen und Mie-Theorie

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Eigenschaften von Licht, der Aufbau von Festkörpern sowie die Wechselwirkung von Licht mit großen, massiven Festkörpern betrachtet. Physiker sprechen bei solch massiven Festkörpern vom sogenannten „Bulk-Material“ (engl. „bulk“ = große Menge).

In diesem Kapitel geht es um die Wechselwirkung von Licht mit Nanostrukturen, also Strukturen, die nur aus wenigen bis ein paar 1000 Atomen bestehen. Die dahinter stehende Theorie wurde bereits im Jahr 1908 vom Physiker Gustav Mie veröffentlicht (Mie 1908). Obwohl in der Veröffentlichung von Mie – wie auch in dem hier vorliegenden Text – hauptsächlich auf metallische Nanopartikel eingegangen wird, stellt die Mie-Theorie eine exakte Theorie zur Beschreibung der Wechselwirkung von Licht mit beliebigen,

kugelförmigen Nanoteilchen dar. So ist es mit dieser Theorie zum Beispiel möglich, Lichtstreuung an atmosphärischen Partikeln zu beschreiben.

Im Folgenden soll es darum gehen, bestimmte physikalische Effekte mithilfe der Mie-Theorie zu verstehen. Grundsätzlich sind diese nur exakt für kugelförmige Partikel lösbar und somit richtig, jedoch können Trends und Effekte auch auf andere, nicht-kugelförmige Partikel übertragen werden.

Zunächst stellt sich die Frage, worin der Unterschied bei der Wechselwirkung von Licht mit Nanopartikeln, verglichen mit der Wechselwirkung mit massiven Festkörpern, d. h. Bulk-Material, liegt. Wie im vorigen Kapitel dargelegt, beträgt die Eindringtiefe von Licht in Metalle je nach Frequenz ca. 20–30 nm. Bei kleinen Partikeln, deren Abmessungen in dieser Größenordnung liegen – wie z. B. kleinen Kugeln aus Gold mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern – kann also das komplette Partikelinnere von dem elektrischen Feld des Lichts beeinflusst werden. Dies führt zu neuen, bisher von Bulk-Material nicht bekannten Effekten.

Zunächst soll eine auf einen Nanopartikel auftreffende Lichtwelle zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet werden: Zu einer willkürlich festgelegten Zeit t_1 zeigt zum Beispiel der elektrische Feldvektor der Lichtwelle in die positive y-Richtung, wie in Abb. 2.5 links dargestellt. Hierdurch reagieren alle Elektronen in dem Partikel auf dieses elektrische Feld, werden also in die negative y-Richtung verschoben, da der elektrische Feldvektor die Krafrichtung auf eine positive Ladung angibt. Somit bilden sich an dem oberen bzw. unteren Partikelrand positive bzw. negative Ladungen, die man dann Polarisationsladungen nennt (da sie aufgrund einer Verschiebung der Elektronen

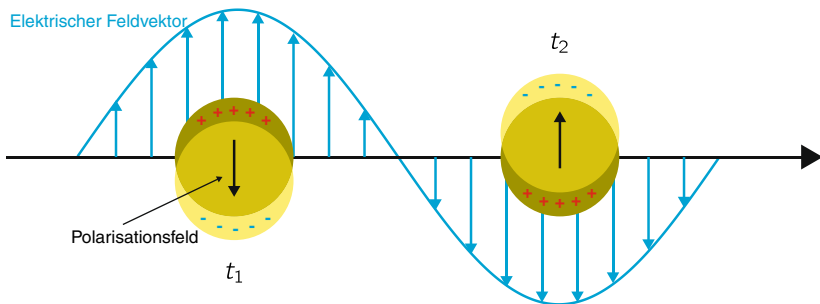


Abb. 2.5 Schematische Darstellung der Verschiebung von Ladungen in einem Nanopartikel aufgrund eines externen elektrischen Feldes. Das Polarisationsfeld wird in Abschn. 4.1 näher behandelt

in einem sonst elektrisch neutralen Partikel zustande kommen).² Zu einem späteren Zeitpunkt t_2 , eine halbe Lichtwellen-Periode später (siehe Abb. 2.5 rechts), haben sich alle Vorzeichen umgedreht: Die positiven Polarisationsladungen befinden sich nun am unteren Partikelrand, die negativen am oberen.

Nimmt man im Folgenden für ein kurzes Gedankenexperiment einmal an, die Lichtwelle habe die Elektronen so ausgelenkt wie in Abb. 2.5 dargestellt. Könnte man nun die Lichtwelle schlagartig abschalten, so würden die Elektronen wieder ihrer Ruhelage zustreben, also so, dass an den Rändern des Nanopartikels keine Polarisationsladungen mehr vorhanden sind. Dieser Vorgang benötigt jedoch eine kurze Zeit (im Bereich von 10^{-15} s), da die Elektronen eine gedämpfte Schwingung um ihre Ruhelage vollführen. Dies kann man sich gut anhand des Bildes eines realen, mechanischen Pendels vorstellen: Lässt man es aus einer ausgelenkten Lage los, schwingt es um die Ruhelage, bis es aufgrund von Dämpfungseffekten (wie z. B. Reibung mit der Luft) zur Ruhe kommt. Die dem Pendel – und auch den Elektronen im Nanopartikel – eigene Frequenz, mit der es/sie um die Ruhelage schwingen/schwingt, nennt man Eigenfrequenz. Im Falle der Schwingung in einem Nanopartikel wird diese Eigenfrequenz hauptsächlich durch die dielektrische Funktion des verwendeten Materials bestimmt.

Strahlt man nun einfarbiges Licht auf einen Nanopartikel ein, so kann die Frequenz dieser Lichtwelle mit der Eigenfrequenz der Elektronen übereinstimmen. In diesem Fall spricht man von einer Resonanz: Das Elektronensystem des Nanopartikels wird durch das elektrische Feld der Lichtwelle mit der gleichen Frequenz angeregt, mit der es selbst schwingen will. Ein Beispiel aus der Mechanik ist z. B. eine Schaukel, die mit einer bestimmten Frequenz schwingt. Bewegt man seine Beine nun mit der gleichen Frequenz der Schaukel, was jedes Kind intuitiv richtig macht, so wird die Auslenkung der Schaukel immer größer. Bewegt man die Beine mit anderer Frequenz (also schneller oder langsamer als die Schaukel schwingt), so erreicht man diese maximale Auslenkung nicht. Ähnlich verhält es sich bei einem Nanopartikel: Mit der richtigen Frequenz, also der Resonanzfrequenz angeregt, kann eine starke Schwingung der Elektronen erreicht werden, d. h. je besser man die Resonanzfrequenz trifft, desto mehr Elektronen nehmen an der Schwingung teil.

Die Resonanz im Falle von Nanopartikeln wird auch oft „Plasmonen-Resonanz“ oder „lokalisierte Oberflächen-Plasmonen-Resonanz“ genannt. Hierbei

²Streng genommen gibt es im geschilderten Fall keine positiven Polarisationsladungen, sondern ein Mangel an Elektronen, wodurch die positiv geladenen Kerne für eine positive Ladung sorgen.

beziehen sich die einzelnen Begriffe auf verschiedene Aspekte des Resonanz-Effekts: Das Wort „Plasmon“ stammt von dem Begriff Plasma ab. Ein Plasma ist in der Physik ein Gemisch von unterschiedlich geladenen Teilchen. „Plasmon“ zielt also auf die Trennung bzw. Verschiebung von Elektronen und der damit verbundenen Ausbildung von positiven und negativen Ladungen an den Partikelenden ab. Da eine solche Schwingung nur stattfinden kann, wenn eben solche Partikel-Grenzflächen, also Oberflächen, existieren, enthält der Begriff zusätzlich das Wort „Oberfläche“. Zuletzt deutet der Begriff „lokalisiert“ an, dass die Schwingung der Elektronen nur auf einem räumlich sehr beschränkten Raum stattfindet, der durch die Größe des Nanopartikels gegeben ist.

Die Plasmonen-Resonanz von Nanopartikeln hat weitreichende Konsequenzen für deren optische wie auch deren elektronische Eigenschaften. Da je nach Anwendung unterschiedliche Aspekte der Plasmonen-Resonanz relevant sind, werden die genauen Effekte bei der jeweiligen Anwendung in Kap. 4 beschrieben. Zunächst soll jedoch auf die Herstellung von Nanostrukturen eingegangen werden.

Was in diesem Abschnitt behandelt wurde

- Licht kann die Elektronen in kleinen metallischen Partikeln hin- und her bewegen. Hierdurch bilden sich an den Rändern Polarisationsladungen.
- Die Schwingung der Elektronen hat eine Eigenfrequenz, die durch die dielektrische Funktion des Materials gegeben ist.
- Ist die Frequenz des auftreffenden Lichts gleich der Eigenfrequenz der Elektronen, kommt es zur Resonanz: Die Anzahl der verschobenen Elektronen bzw. die Anzahl der Polarisationsladungen wird maximal.

Licht in der Welt der Nanotechnologie
Ein verständlicher Einstieg in die Grundlagen und
Anwendungen

Schneider, C.

2016, IX, 43 S. 12 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-14310-7