

Materialauswahl

Theoretisch könnten fast alle Metalle mehr oder weniger gut zwecks Anregung eines Oberflächen- Plasmons an einem Übergang von Dielektrikum zu Metall genutzt werden. Jedoch wird eine Reihe von diesen Materialien durch praktische Gründe ausgegrenzt. So ist zum Beispiel Indium viel zu teuer, Natrium zu reaktiv, Aluminium und Kupfer weisen ungünstige Plasmafrequenzen auf und Silber hat das Problem der sehr leichten Oxidierbarkeit.

Die Seite der einfallenden Strahlung zugewandt, sollte rein metallisch sein. Oxid- oder Sulfidschichten, welche sich unweigerlich an der Luft bilden, verändern die Anregungsbedingung des Oberflächen- Plasmons (es sei denn, man will gerade diese Bildung der Schichten messen). Weiterhin muss das ausgewählte Metall verträglich sein mit einer Reihe von chemischen Substanzen aus dem Dielektrikum oder anders woher.

Daher erweist sich Gold (aber auch Silber) als das vielseitigste Metall.

- Ermittlung der Plasmafrequenz ausgewählter Materialien als Bedingung der dritten Anregungsbedingung.

Als erstes muss die Elektronendichte „ n “ abgeschätzt werden. Diese ist definiert:

$$n = \frac{z}{\Omega}$$

Mit „ z “ der Anzahl der Leiterelektronen pro Atom und „ Ω “ der Atomdichte. Diese kann ersetzt werden so, dass sich ergibt:

$$n = z \cdot \rho \cdot \frac{N_A}{A}$$

Wobei „ ρ “ die Dichte des betrachteten Leiters ist, „ N_A “ die Avogadro-Konstante und „ A “ die molare Atommasse. Als Beispiel soll hier Kupfer dienen ein Element der ersten Hauptgruppe und daher mit „ $z = 1$ “:

$$N_A = 6,02204E + 23 \text{ mol}^{-1} \quad \rho = 8,92E + 03 \text{ kgm}^{-3} \quad A = 63,5E - 03 \text{ kgmol}^{-1}$$

⇒

$$n = 84,59E + 27 \text{ m}^{-3}$$

Jetzt kann die Plasmafrequenz „ ω_p “ berechnet werden:

$$\omega_p > e \cdot \sqrt{\frac{n}{\epsilon_0 \cdot m}}$$

Oder alternativ dessen Wellenlängenäquivalent:

$$\lambda_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{e \cdot \sqrt{\frac{n}{\epsilon_0 \cdot m}}}$$

Damit ergibt sich für ausgewählte Metalle zum besseren Vergleich alle „z = 1“:

Metall	Elektronendichte	Plasmafrequenz	Plasmawellenlänge
Indium	38, 33 E+27 [m ⁻³]	11, 04 E+15 [s ⁻¹]	170, 62 [nm]
Platin	66, 22 E+27 [m ⁻³]	14, 52 E+15 [s ⁻¹]	129, 73 [nm]
Gold	59, 06 E+27 [m ⁻³]	13, 71 E+15 [s ⁻¹]	137, 40 [nm]
Silber	58, 56 E+27 [m ⁻³]	13, 65 E+15 [s ⁻¹]	138, 00 [nm]
Kupfer	84, 59 E+27 [m ⁻³]	16, 41 E+15 [s ⁻¹]	114, 79 [nm]
Aluminium	60, 27 E+27 [m ⁻³]	13, 85 E+15 [s ⁻¹]	136, 00 [nm]
Nickel	91, 40 E+27 [m ⁻³]	16, 10 E+15 [s ⁻¹]	117, 00 [nm]

Tabelle 1: Hier physikalisch relevante Parameter ausgewählter Metalle. Eine möglichst große Plasmawellenlänge wird präferiert.

- Ermittlung des Realanteiles der Permittivitäten aus der ersten Anregungsbedingung.

Aus der ersten Anregungsbedingung ist bekannt (D = Dielektrikum, M = Metall):

$$-\epsilon_D \leq 0 \leq \epsilon_M$$

⇒

$$\frac{\epsilon_D}{\epsilon_M} \geq 0$$

Für ein „ $\epsilon_D > 1$ “ gilt:

$$\epsilon_M \leq 0$$

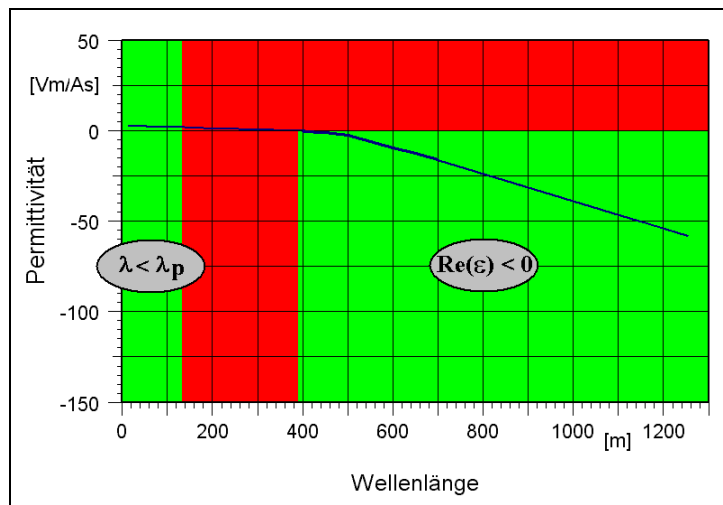
Der Realanteil des Metalls muss daher negativ sein.

Aus J. R Sambles et. al. „Optical excitation of surface plasmons: an introduction. Abbildung 2a und Tabelle 1 sind die Realanteile der Permittivitäten ablesbar.

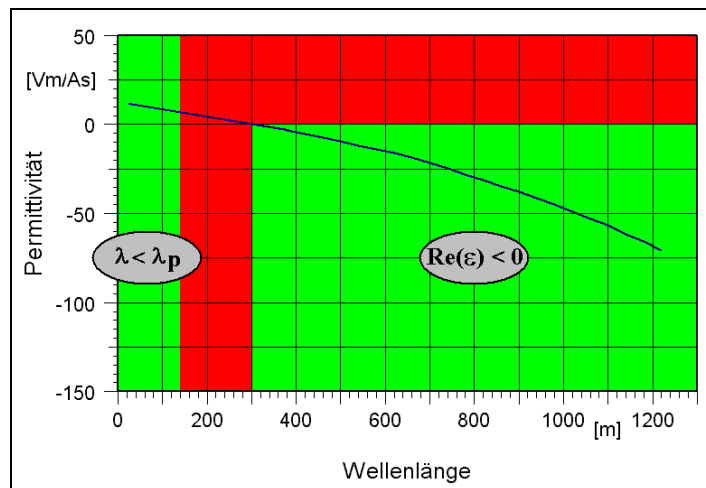
Wellenlänge [nm]	Silber	Gold
400	-4, 0	-0, 3
450	-6, 5	-0, 8
500	-8, 7	-2, 2
550	-11, 9	-5, 8
600	-15, 2	-9, 2
650	-18, 5	-12, 5
700	-21, 8	-16, 1
750	-	-19, 6
800	-	-23, 6

Tabelle 2: Die Realanteile der Permittivitäten ausgewählter Metalle.

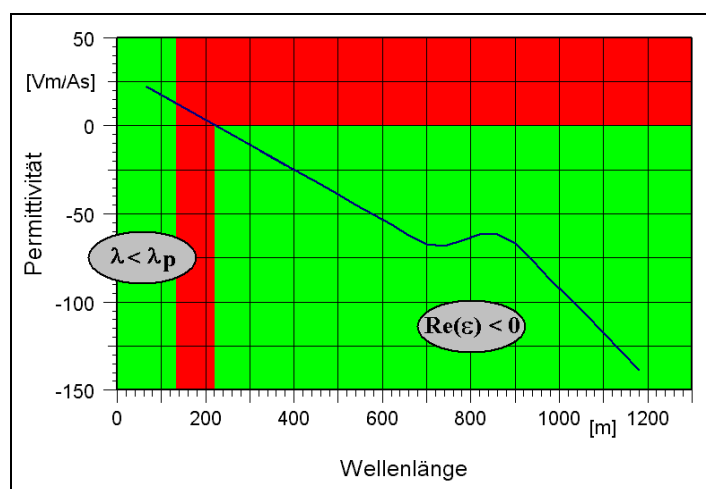
Zum Schluss noch einmal die grafische Darstellung der Tabellen 1 und 2 zur Verdeutlichung der Anregungsbedingungen für ein Oberflächen-Plasmon.



Grafik 1: Plasmafrequenz und der Realanteil der Permittivität von Gold.
Quelle: Eigene Zeichnung.



Grafik 2: Plasmafrequenz und der Realanteil der Permittivität von Silber.
Quelle: Eigene Zeichnung.



Grafik 3: Plasmafrequenz und der Realanteil der Permittivität von Aluminium.
Quelle: Eigene Zeichnung.

Durch geeignete Materialauswahl allein ist es demnach nicht möglich ein Oberflächen- Plasmon anzuregen. Es sind dazu spezielle Einkoppel- Geometrien nötig.

Interessant zu wissen ist auch die „Schärfe“ des Reflektivitätseinbruchs bei Anregung eines Plasmons. Die Anregungsgüte „Q“, die Eignung eines Metalls Plasmonen anzuregen kann man aus dessen komplexen Permittivität abgeschätzt werden. So wird ein schmaler Resonanzpeak beobachtet, wenn gilt:

$$N = \epsilon_R + j \cdot \epsilon_I$$

⇒

$$Q = \left| \frac{\epsilon_R}{\epsilon_I} \right| \rightarrow +\infty$$

Über die Güte „Q“ lassen sich auf einfache Weise die verschiedensten Metalle in Bezug Ihrer Eignung zur Plasmonen- Anregung charakterisieren. Für Gold, Silber und Aluminium gilt aus J. R. Sambles et. al. „Optical excitation of surface plasmons: an introduction“ Abbildung 2a) und b) sowie Tabelle 1:

λ [nm]	ϵ_R	ϵ_I	Q
400	- 0, 30	6, 50	0, 05
450	- 0, 80	5, 72	0, 14
500	- 2, 15	3, 79	0, 58
550	- 5, 75	2, 00	2, 87
600	- 9, 20	1, 61	5, 73
650	-12, 50	1, 39	9, 00
700	-16, 10	1, 38	11, 80
750	-19, 60	1, 60	12, 30
800	-23, 55	2, 00	11, 80

Tabelle 3: Der Real- und der Imaginäranteil der Permittivität und die Güte „Q“ für Gold. Den schärfsten Peak ergäbe sich bei $\lambda \approx 750\text{nm}$.

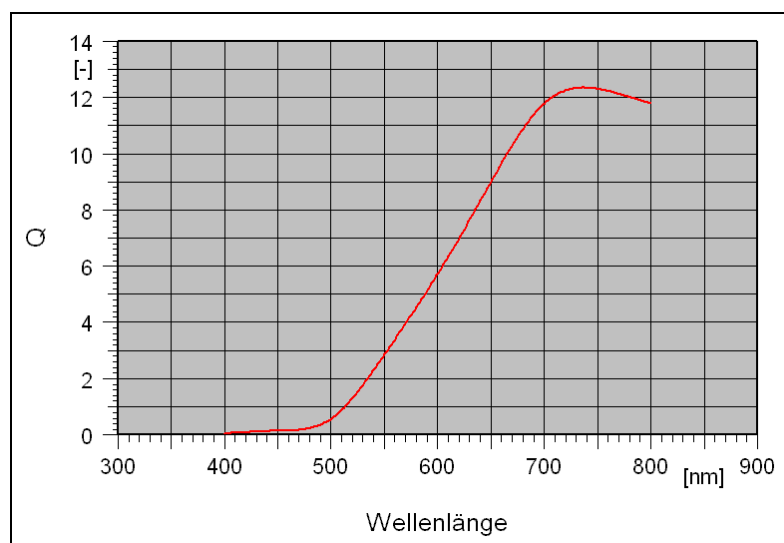


Abbildung 4: Die Tabelle 3 grafisch dargestellt, die Güte „Q“ für Gold. Quelle: Eigene Zeichnung.

λ [nm]	ϵ_R	ϵ_I	Q
300	-	-	-
340	-	-	-
380	- 3, 40	-	-
420	- 5, 30	0, 50	10, 60
460	- 7, 60	0, 57	13, 34
500	- 9, 40	0, 69	13, 62
540	-11, 70	0, 82	14, 27
580	-13, 80	0, 88	15, 68
620	-16, 10	0, 94	17, 13
660	-18, 60	1, 07	17, 38
700	-21, 60	1, 13	19, 12
740	-24, 40	1, 32	18, 48
780	-28, 00	1, 39	20, 14
820	-31, 30	1, 45	21, 59
860	-34, 70	1, 64	21, 16
900	-37, 90	2, 02	18, 76
940	-41, 40	2, 33	17, 77
980	-45, 10	2, 64	17, 08
1020	-48, 80	2, 90	16, 83
1060	-53, 10	3, 21	16, 54
1100	-56, 80	3, 46	16, 42
1140	-61, 40	3, 90	15, 74
1180	-65, 80	4, 47	14, 72
1220	-70, 50	5, 16	13, 66
1260	-	5, 73	
1300	-	-	

Tabelle 4: Der Real- und der Imaginäranteil der Permittivität und die Güte „Q“ für Silber. Den schärfsten Peak ergäbe sich bei $\lambda \approx 820\text{nm}$.

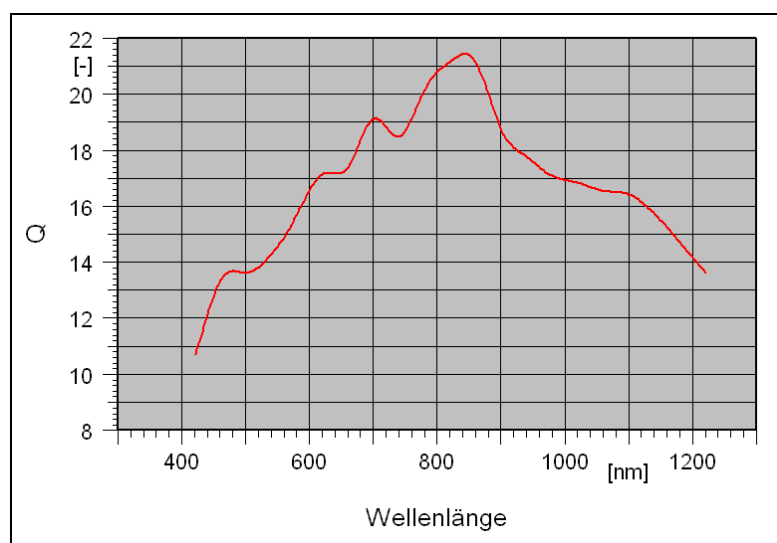


Abbildung 5: Die Tabelle 4 grafisch dargestellt, die Güte „Q“ für Silber. Quelle: Eigene Zeichnung.

λ [nm]	ϵ_R	ϵ_I	Q
300	-	-	-
340	-	-	-
380	- 22, 10	4, 22	5, 24
420	- 27, 10	5, 48	4, 95
460	- 33, 10	7, 24	4, 57
500	- 39, 10	8, 26	4, 73
540	- 45, 10	12, 09	3, 73
580	- 50, 50	15, 24	3, 31
620	- 55, 90	20, 21	2, 77
660	- 62, 10	25, 00	2, 48
700	- 66, 90	30, 92	2, 16
740	- 68, 30	39, 55	1, 73
780	- 64, 90	45, 91	1, 41
820	- 61, 40	45, 91	1, 34
860	- 61, 40	40, 62	1, 51
900	- 66, 50	33, 25	2, 00
940	- 76, 60	27, 08	2, 83
980	- 87, 20	26, 01	3, 35
1020	- 97, 30	25, 25	3, 85
1060	-107, 30	25, 50	4, 21
1100	-117, 50	26, 20	4, 48
1140	-128, 00	27, 08	4, 73
1180	-138, 50	28, 21	4, 91
1220	-	29, 72	-
1260	-	-	-
1300	-	-	-

Tabelle 5: Der Real- und der Imaginäranteil der Permittivität und die Güte „Q“ für Aluminium. Den schärfsten Peak ergäbe sich bei $\lambda \approx 380\text{nm}$.

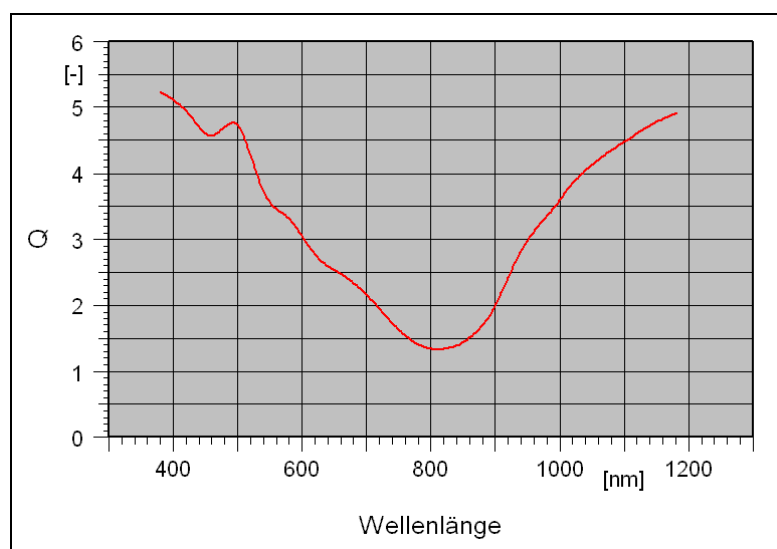


Abbildung 6: Die Tabelle 5 grafisch dargestellt, die Güte „Q“ für Aluminium. Quelle: Eigene Zeichnung.

Für eine Vielzahl anderer Metalle sind die „Q“-Werte auch bekannt.

Metall	Zeichen	λ [nm]	Permittivität	Q
Silber	Ag	632,8	-18,22 + i 0,48	37,96
Kupfer	Cu	632,8	-14,67 + i 0,72	20,38
Gold	Au	632,8	-10,92 + i 1,49	7,33
Aluminium	Al	650,0	-42,00 + i 16,40	2,56
Palladium	Pd	620,0	-14,40 + i 14,60	0,99
Platin	Pt	640,0	-11,10 + i 15,70	0,71
Nickel	Ni	620,0	-9,60 + i 14,09	0,68
Kobalt	Co	617,0	-12,10 + i 18,00	0,67
Blei	Pb	650,0	-8,67 + i 13,40	0,65
Titan	Ti	617,0	-6,71 + i 19,86	0,34
Eisen	Fe	632,8	-1,02 + i 17,81	0,06
Chrom	Cr	617,0	-0,84 + i 20,92	0,04

Tabelle 6: Die Güte „Q“ für ausgewählte Metalle.

Plasmonenanregung - der Verlustfaktor „Z“ - die Anregungsgüte „Q“ – die Winkelgröße „W“

Gegeben ist der Wellenvektor „ k_X “:

$$k_X = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_D}$$

Gegeben ist der Wellenvektor „ k_{SP} “ eines Oberflächenplasmons (verlustfrei):

$$k_{SP} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_D \cdot \epsilon_M}{\epsilon_D + \epsilon_M}}$$

Die Einführung des Verlustfaktors (Imaginäranteil) führt zu:

$$\epsilon_M = \epsilon_{M;R} + j \cdot \epsilon_{M;I}$$

⇒

$$k_{SP} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_D \cdot (\epsilon_{M;R} + j \cdot \epsilon_{M;I})}{\epsilon_D + \epsilon_{M;R} + j \cdot \epsilon_{M;I}}}$$

Der Real- und Imaginäranteil dazu:

$$\operatorname{Re}(k_{SP}) = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_D \cdot \epsilon_{M;R}}{\epsilon_D + \epsilon_{M;R}}} \quad \operatorname{Im}(k_{SP}) = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_D \cdot \epsilon_{M;R}}{\epsilon_D + \epsilon_{M;R}}}^3 \cdot \frac{\epsilon_{M;I}}{2 \cdot \epsilon_{M;R}^2}$$

⇒

$$\operatorname{Re}(k_{SP}) = k_{SP} \quad \operatorname{Im}(k_{SP}) = \frac{k_{SP}^3}{2} \cdot \frac{c^2}{\omega^2} \cdot \frac{\epsilon_{M;I}}{\epsilon_{M;R}^2}$$

Die Propagationslänge „L“ eines Plasmons ist gegeben durch:

$$L = \frac{1}{2 \cdot \operatorname{Im}(k_{SP})}$$

⇒

$$L = \frac{1}{k_{SP}^3} \cdot \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \frac{\epsilon_{M;R}^2}{\epsilon_{M;I}}$$

Es kann weiter vereinfacht werden:

$$L = \frac{1}{k_{SP}^3} \cdot \frac{k_X^2}{\epsilon_D} \cdot \frac{\epsilon_{M;R}^2}{\epsilon_{M;I}}$$

⇒

$$L = \frac{k_X^2}{k_{SP}^3} \cdot \frac{\epsilon_{M:R}}{\epsilon_D} \cdot \frac{\epsilon_{M:R}}{\epsilon_{M:I}}$$

Die Propagationslänge eines Plasmons ist daher bestimmt durch zwei Größen, welche abhängig von den Permittivitäten sind:

$$L \propto \frac{\epsilon_{M:R}}{\epsilon_D} \cdot \frac{\epsilon_{M:R}}{\epsilon_{M:I}}$$

⇒

$$W = \frac{\epsilon_{M:R}}{\epsilon_D} \quad Q = \frac{\epsilon_{M:R}}{\epsilon_{M:I}}$$

In zweiter Schreibart für die Verlustgröße „Z“:

$$W \cdot \epsilon_D = Q \cdot \epsilon_{M:I}$$

⇒

$$Z = \frac{W}{Q} = \frac{\epsilon_{M:I}}{\epsilon_D}$$

$$Z \propto \epsilon_{M:I}$$

Dabei ist „Q“ die Anregungsgüte des Metalls, die Eignung Plasmonen anzuregen.

Die Größe „W“ lässt sich weiter verändern:

$$W = \frac{\sqrt{\epsilon_{M:R}} \cdot \sqrt{\epsilon_{M:R}}}{\sqrt{\epsilon_D} \cdot \sqrt{\epsilon_D}}$$

⇒

$$W = \sin^2 \theta_C$$

Der Wert „W“ ist somit Repräsentant des kritischen Winkels der Totalreflexion.