

# Plasmonen

Christoph Pratsch  
HU Berlin

# Plasmonen

- Motivation
- Einführung
- Anregung von Plasmonen
- Herstellung von plasmonischen Strukturen
- Anwendungsbeispiele
- Anhang

# Motivation

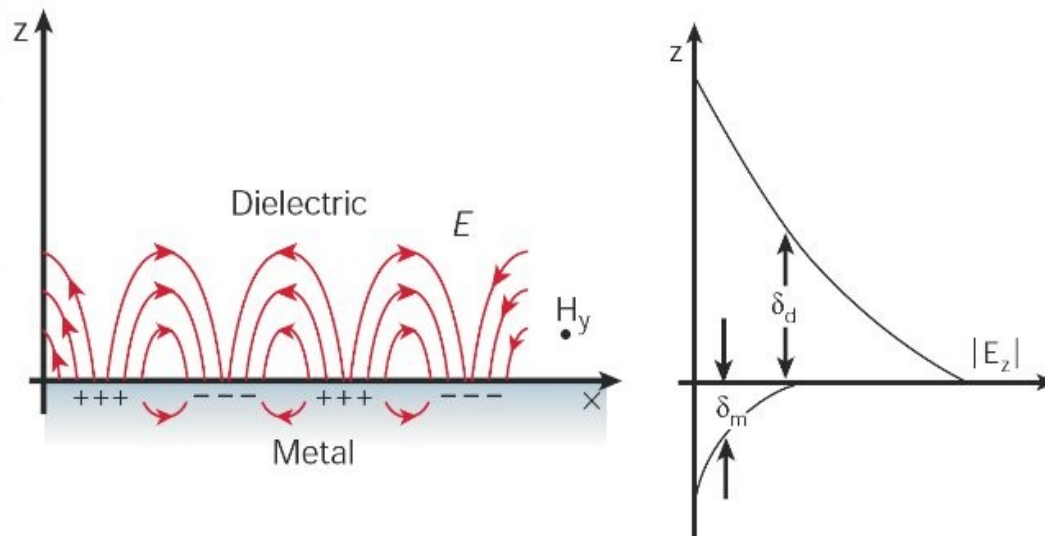


Lycurguss Becher British Museum in reflektiertem und transmittiertem Licht

- Plasmonen erklären Farben beim Lycurgus Becher
- Plasmonen nutzbar für neue Computer
- Plasmonen können Moleküle erkennen

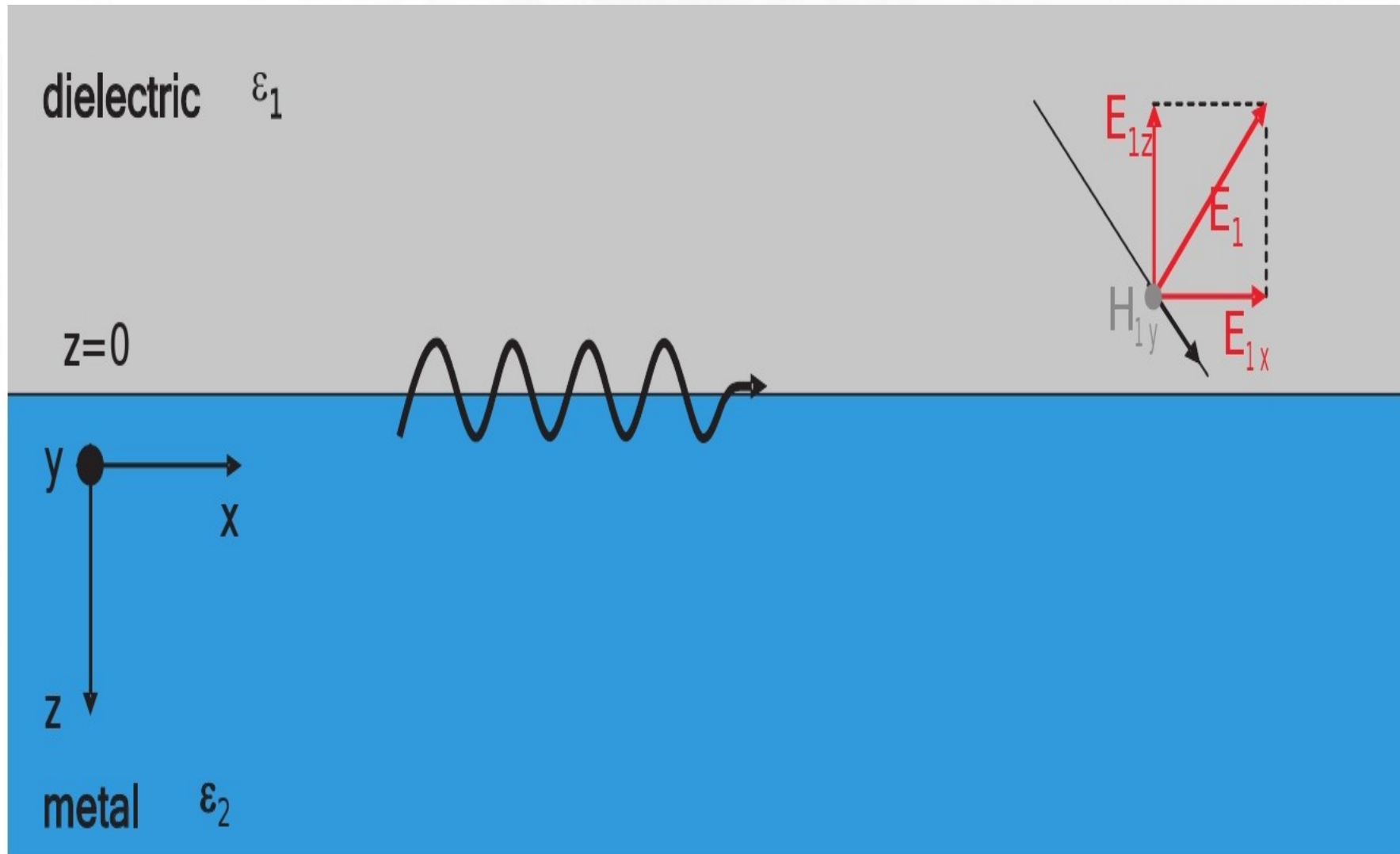
# Einführung (SPP)

- Surface plasmon polariton kurz SPP
- SPPs existieren an Grenzflächen von Metall & Dielektrika.
- SPPs bestehen aus elektromagnetischer Welle im Dielektrika und Elektronenplasmawelle im Metall



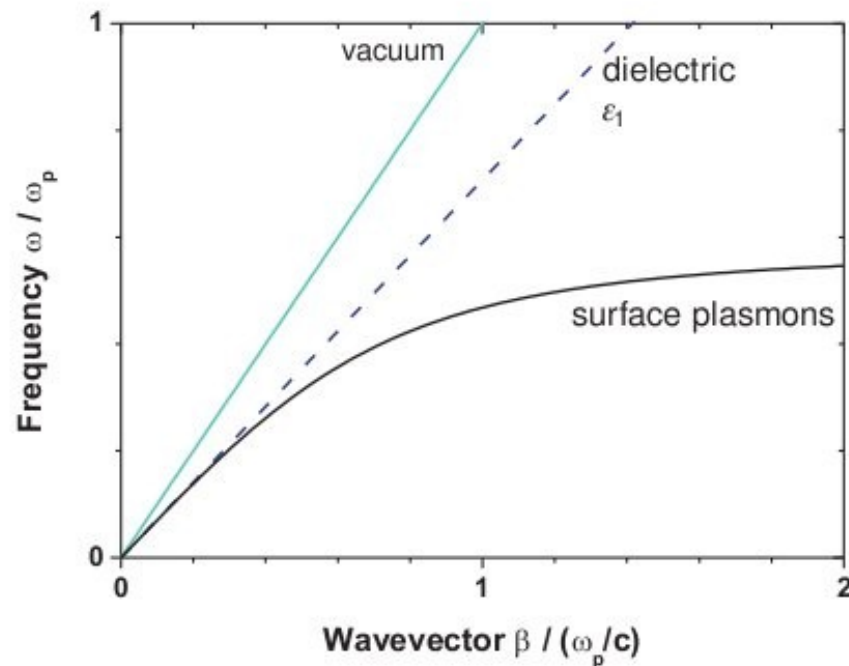
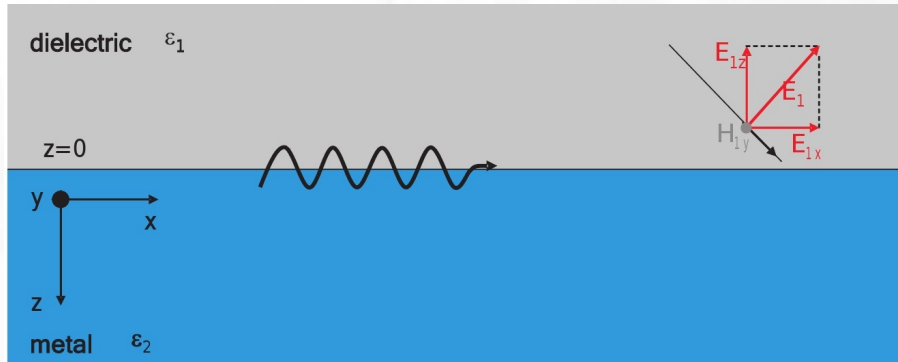
Darstellung einer SPP sowie der Evaneszenten Felder  
aus Barnes et al., Nature 424, 824

# Einführung (SPP)



Darstellung der Grenzfläche Metall (2) und Dielektrika (1) aus Buch von O. Benson

# Einführung (SPP)



Randbedingungen:

$$D_{1,z} = D_{2,z} \quad B_{1,z} = B_{2,z}$$

$$E_{1,x/y} = E_{2,x/y} \quad H_{1,x/y} = H_{2,x/y}$$

Ansatz:

$$E_l = (E_{l,x}, E_{l,y}, 0) e^{i(k_l \cdot r - i\omega t)}$$

$$H_l = (0, H_{l,y}, 0) e^{i(k_l \cdot r - i\omega t)}$$

$$D_l = \epsilon_0 \cdot \epsilon_l E_l \quad B_l = \mu_0 H_l$$

Wellenvektor

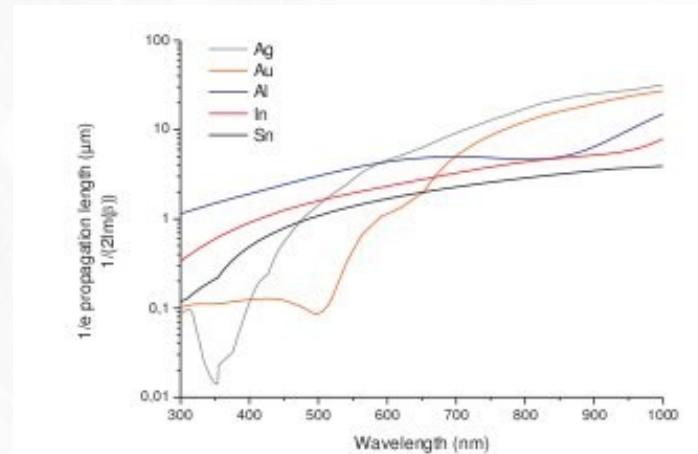
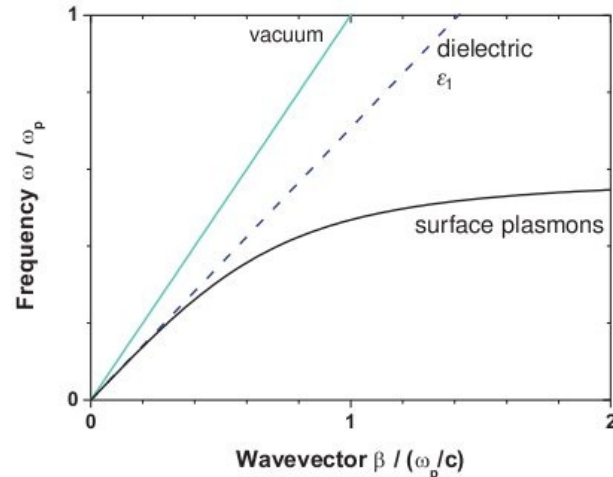
$$k_l = (\beta, 0, k_{l,z}) \rightarrow \frac{k_{1,z}}{\epsilon_1} = \frac{k_{2,z}}{\epsilon_2}$$

Dispersions Relation

$$\beta = \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$



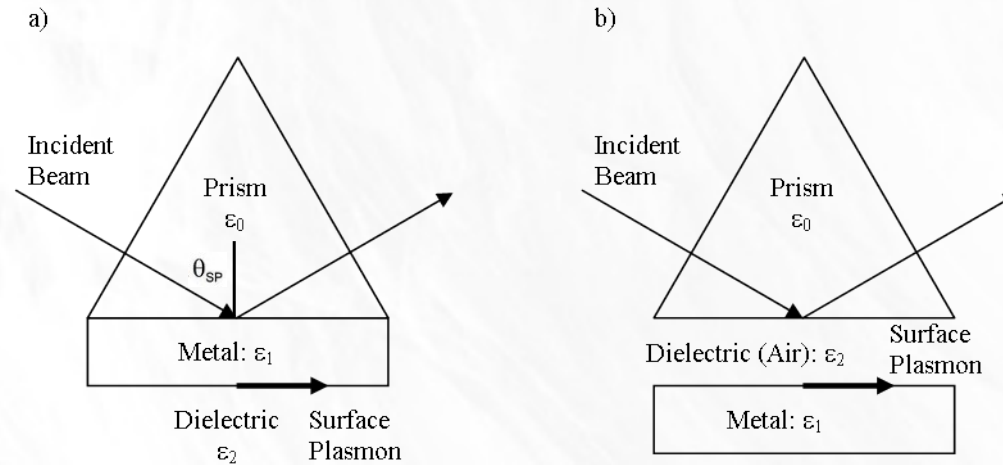
# Einführung (Eigenschaften SPP)



Dispersionsrelation von SPPs und Propagationslänge aus Buch von O. Benson

- Eindringtiefe  $\sim \lambda/2$  im Dielektrikum  
 $\sim$  Skinddepth im Metal
- Da Dispersionskurve unter Lichtkegel liegt, keine Anregung mit direktem Licht
- Kleine Propagationslänge (0,1-100  $\mu\text{m}$ ), hohe Feldstärke

# Anregung von Plasmonen

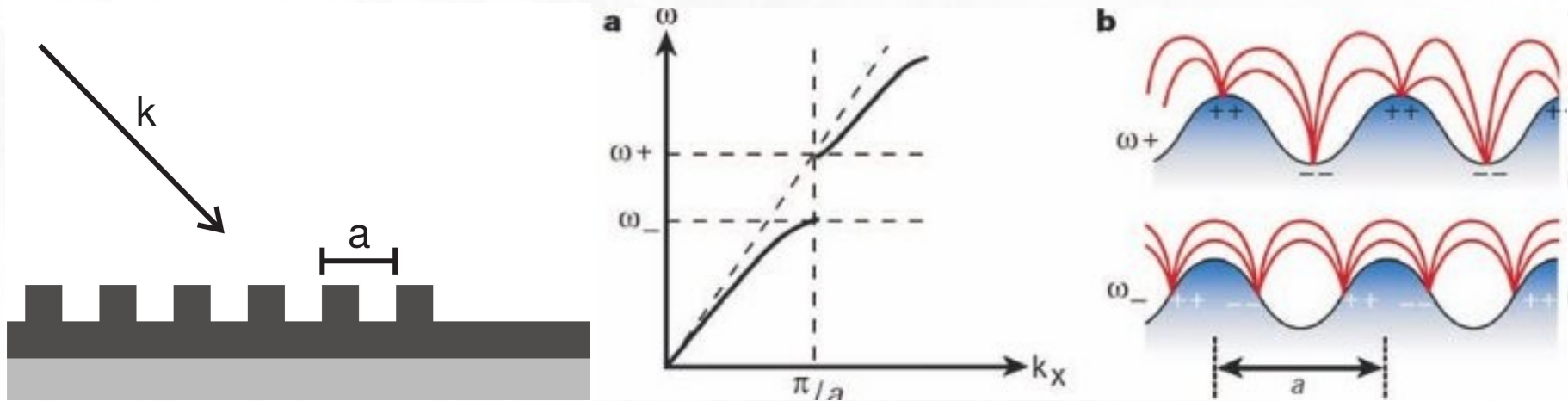


Prismenkopplung a) Kretschmann b) Otto Konfiguration aus Wikipedia

- Kopplung über Prismen, Gitter, Nahfeldanregung
- Bsp. Kretschmann Konfiguration a)
- Zu erfüllen:  $\beta = \omega/c(\epsilon_{\text{Prism}})^{0,5} \sin \Theta$



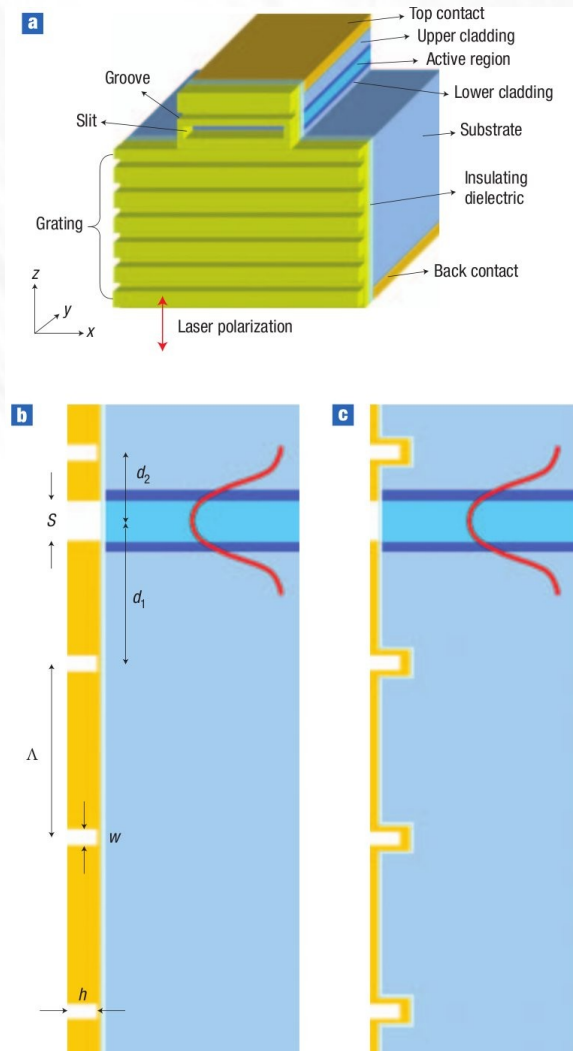
# Anregung von Plasmonen



Darstellung des Gitters sowie a) der Dispersionsrelation b) SPP Moden nahe der „stop gap“ aus Barnes et al. Nature 424, 824

- Bsp „Grating Coupling“
- Zu erfüllen:  $\beta = k \sin \Theta \pm n 2\pi/a$
- 1D Gitter stört SPP-Ausbreitung daher Dispersionsrelation mit „stop gap“

# Anregung von Plasmonen

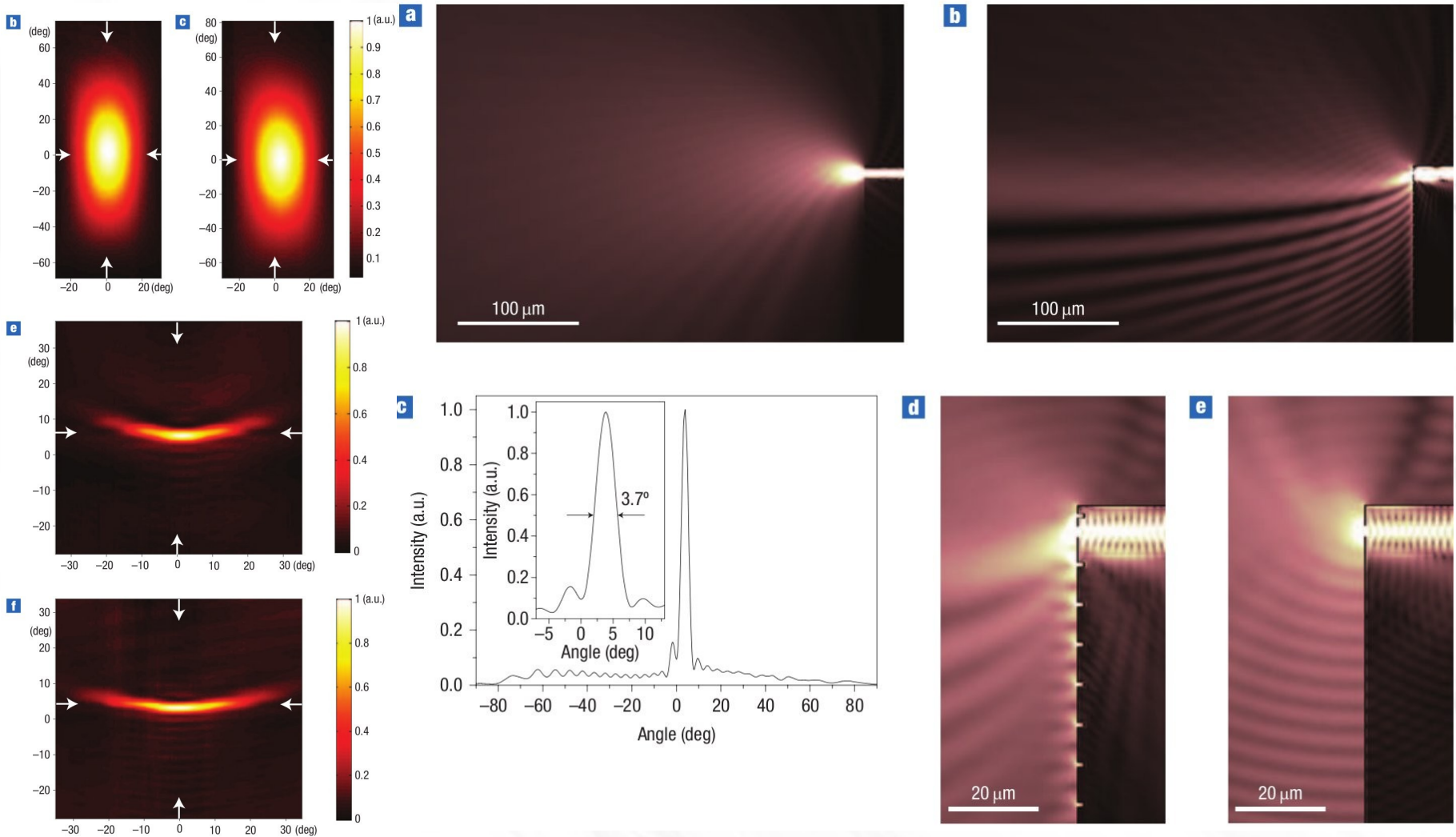


- Inversion des Grating Prinzips
- Gesamt Fläche als Austrittsfläche daher geringere Divergenz
- Verbesserung von  $62^\circ$  auf  $2,4^\circ$

Schematische Darstellung zweier Testdesigns. b) Gitter in  $1,7\mu\text{m}$  Metallschicht c) Gitter in Facette und späteres bedampfen.

Aus N. Yu et al. Nphoton 152 (2008)

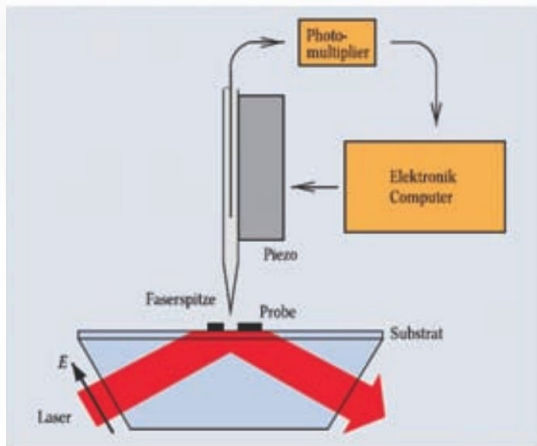
# Anregung von Plasmonen



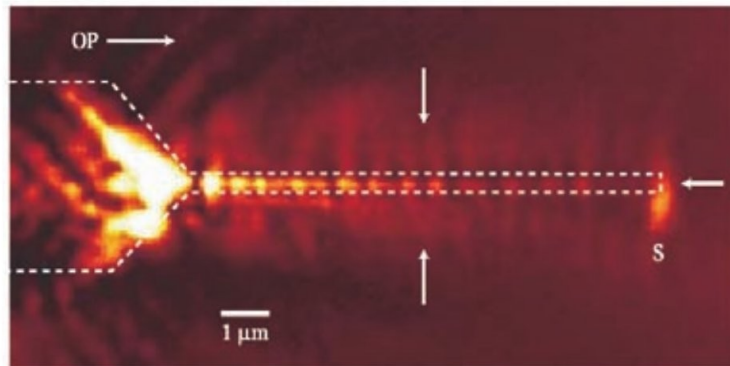
Fernfeld Aufnahme (links) Modellierung (rechts) der Intensitätsverteilung aus N.Yu nphoton 152, (2008)

# Plasmonic Wave Guide

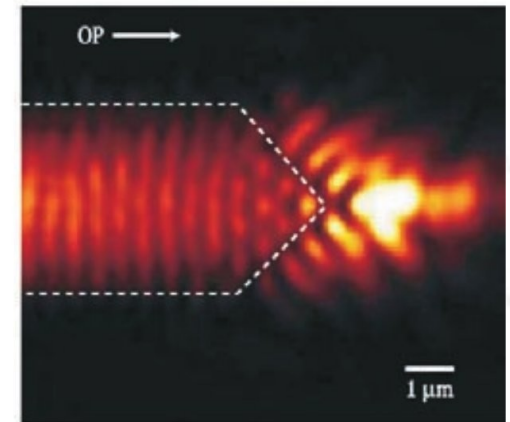
(a)



(b)



(c)



a) Prinzip der Messung von SPPs mit SNOM b) &c) SNOM Bilder von sich entlang eines Nanogold drahtes ausbreitenden SPPs

- Kopplung der SPP bei dünner Metallschicht
- Zwei Moden  $\omega_{\pm} = \omega_{SP} (1 \pm \exp(-\beta d))^{0.5}$
- $\omega_{+}$  hat große Reichweite, da  $\text{Im}(\omega_{+})$  mit  $d^2$  skaliert.



# Herstellung Plasmonischer Strukturen

- Electron beam lithographie
- Ion beam lithographie
- Ion beam milling
- Selfassembly

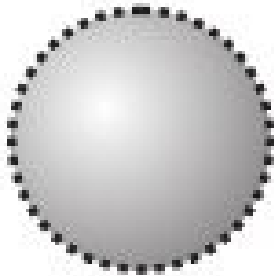
# Anwendungsbeispiele

- Plasmon Resonance<sup>1</sup>
- Surface enhanced Raman Scattering
- Fluorescence Enhancement
- Surface Plasmon Sensoren

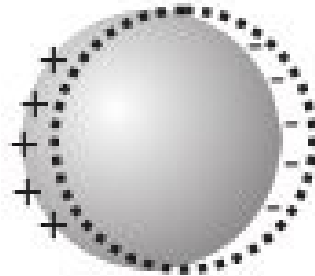


# • Plasmon Resonance<sup>1</sup>

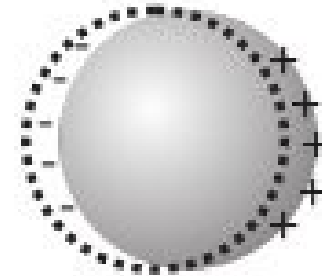
$E=0$



$E(t=0) > 0$



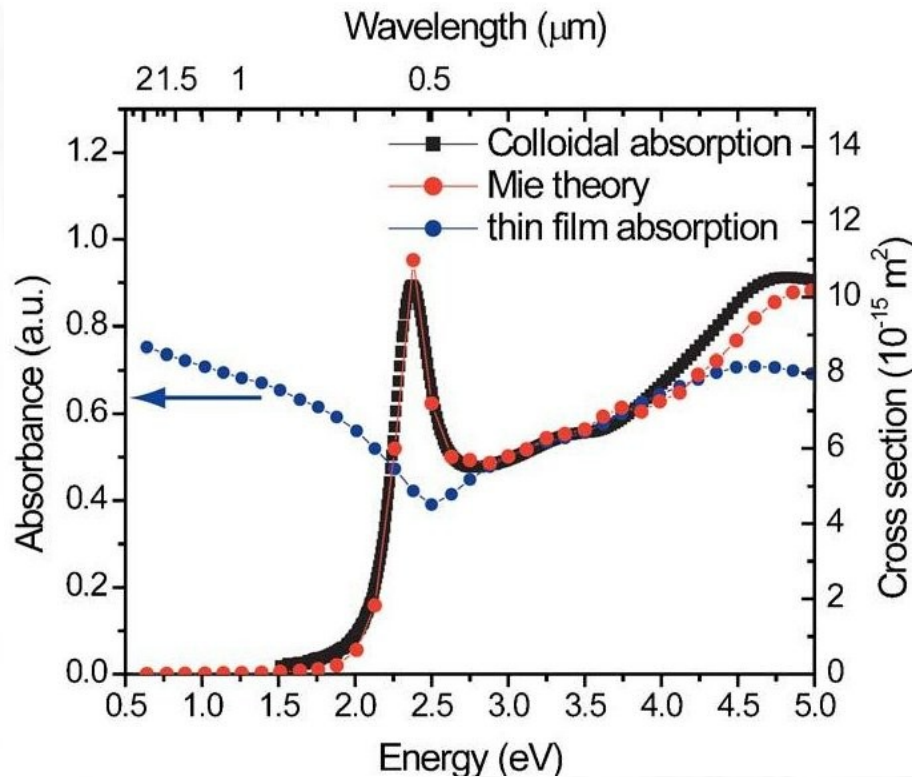
$E(t=\tau/2)$



Darstellung der Auswirkung eines externen E-Feldes auf die Partikel aus Buch von O.Benson

- Localized surface plasmons (LSP)
- Partikel kleiner der Eindringtiefe des EM Feldes wirken wie Dipol
- Anregbar mit direkter Beleuchtung da gekrümmte Oberfläche
- Feldverstärkung in Größenordnung 10

# Bsp Plasmon Resonance<sup>1</sup>



Absorptionsspektrum eines Goldfilms  
aus S. A. Maier Journal of Appl Phy 98

$$P = \epsilon_{Part} \epsilon_{Umg} \alpha E_0$$

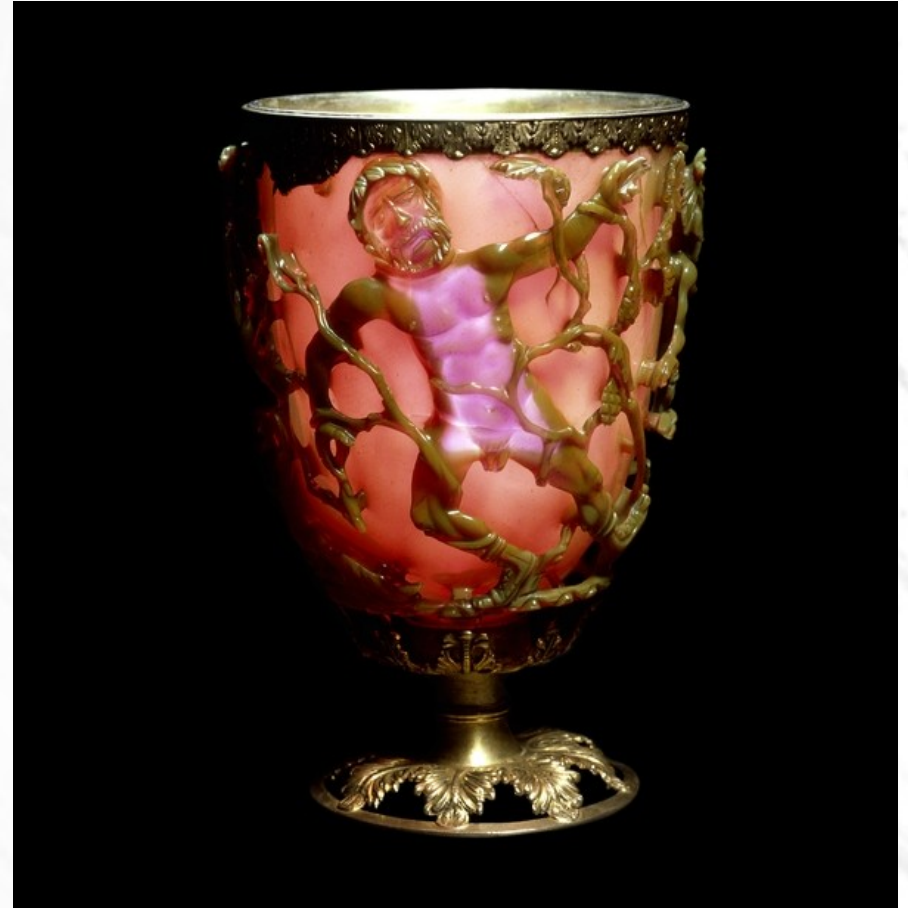
$$\alpha = 4 \pi \epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon_{Part} - \epsilon_{Umg}}{\epsilon_{Part} + 2 \epsilon_{Umg}}$$

$$\rho_{scatt} = \frac{k^4}{6 \pi \epsilon_0^2} |\alpha^2(\omega)|$$

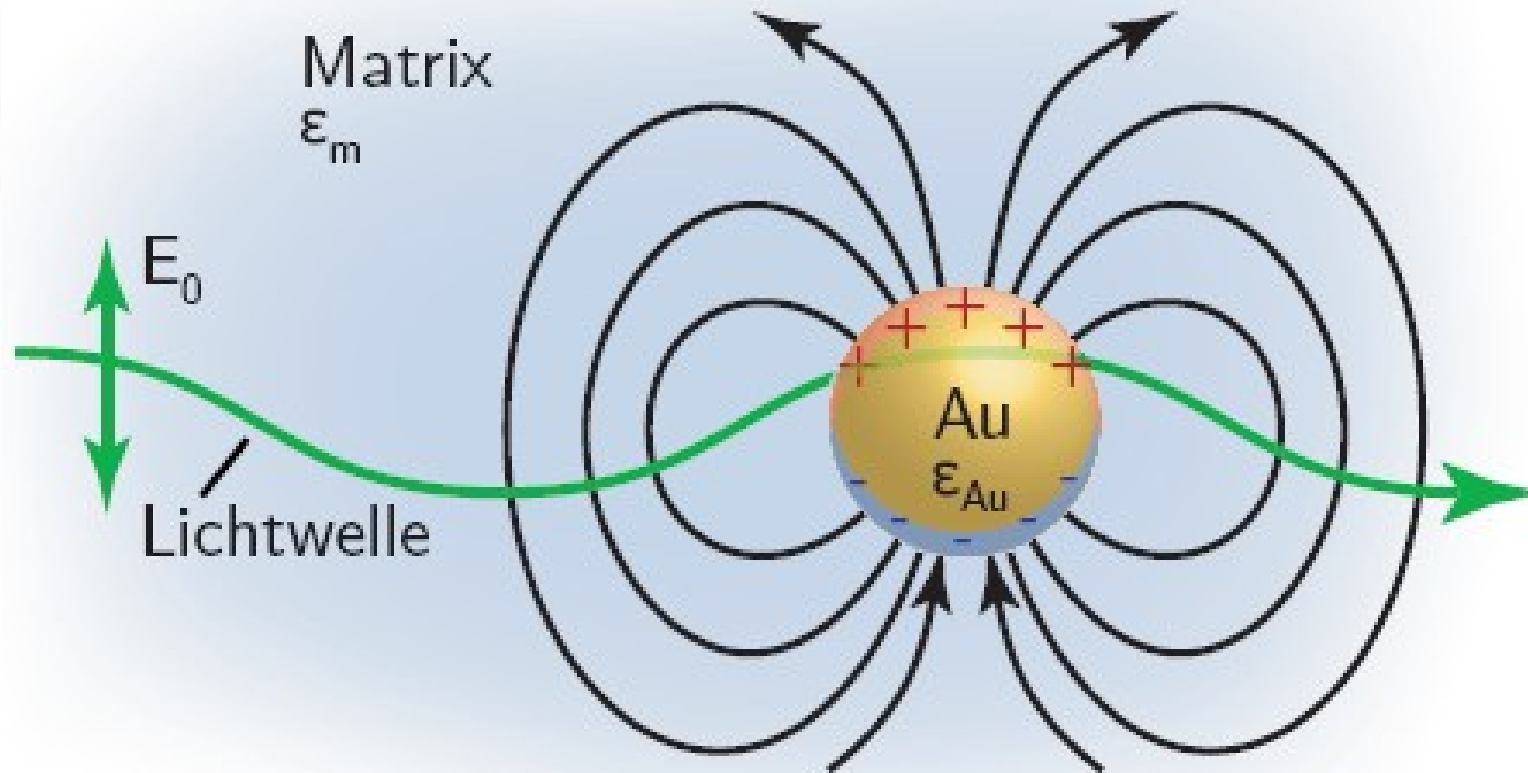
$$\rho_{abso} = \frac{k}{\epsilon_0} \Im(\alpha(\omega))$$

- Effekt für Farbgläser benutzt
- Bsp Gold absorbiert Grün und Blau

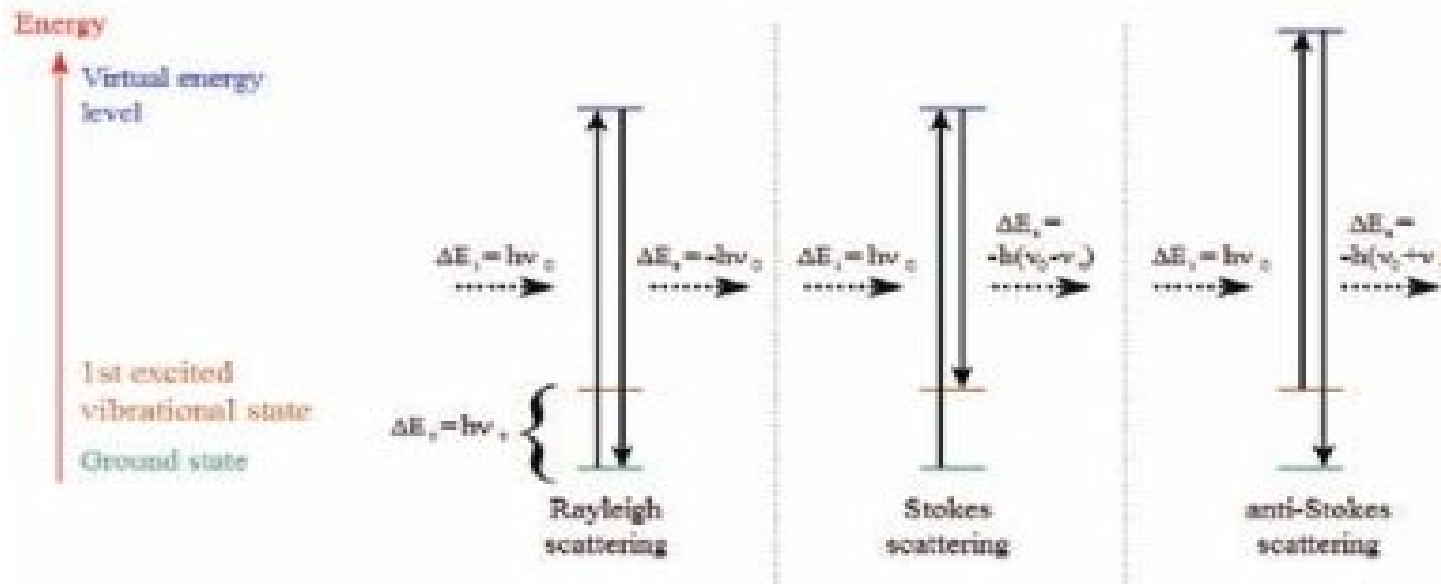
# Bsp Plasmon Resonance<sup>1</sup>



# Plasmon Resonance<sup>1</sup>



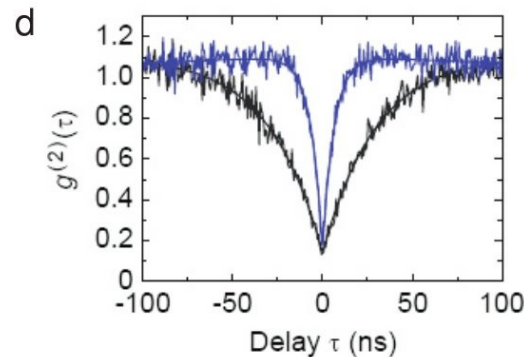
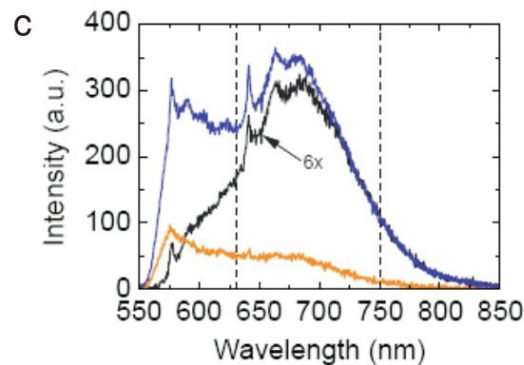
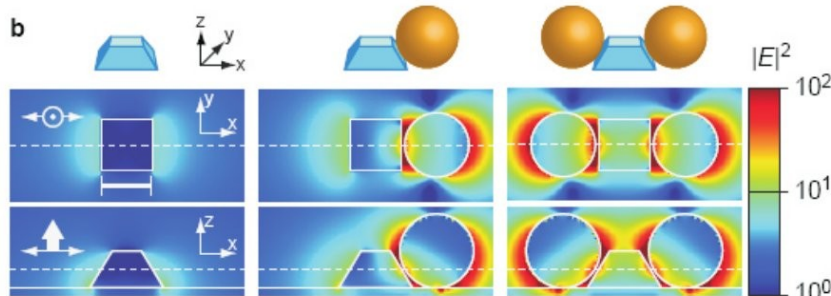
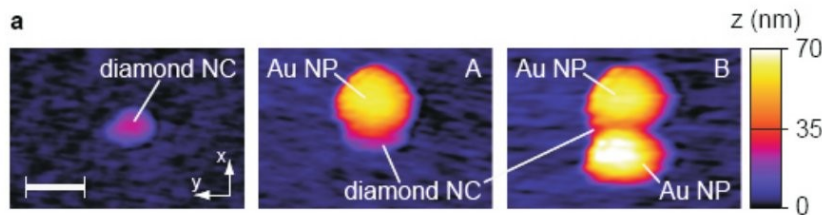
# Surface Enhanced Raman Scattering (SERS)



- Raman Effekt (inelastische Streuung zwischen Photon und Molekül vermittelt durch Schwingung)
  - $\rho_{\text{Raman}} \ll \rho_{\text{Fluoreszenz}}$  Verbesserung SERS bis zu  $10^{14}$
- Bedingt durch größeres E Feld, lightning rod, Umgebung



# Bsp Fluorescence Enhancement



- Fluoreszente Probe in Nähe von Nanopartikel
- Erhöhung der Fluoreszenz durch Verstärktes E-Feld

a) AFM Bild Diamant, Diamant mit 1 bzw. 2 Goldpartikel(n)

b) Simulation der Verstärkung

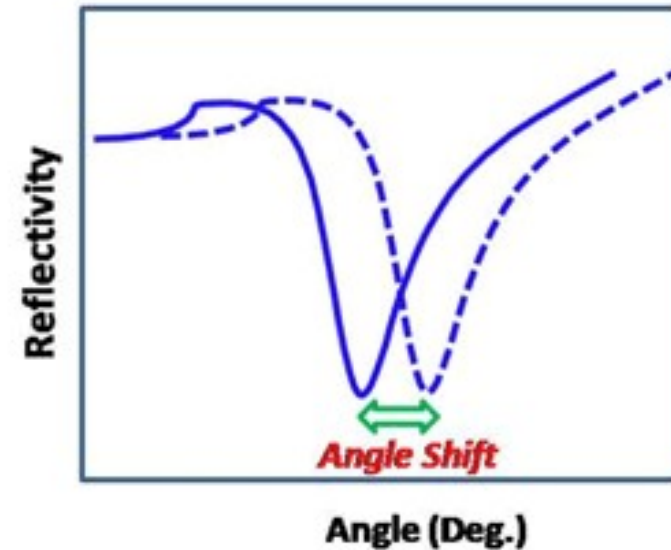
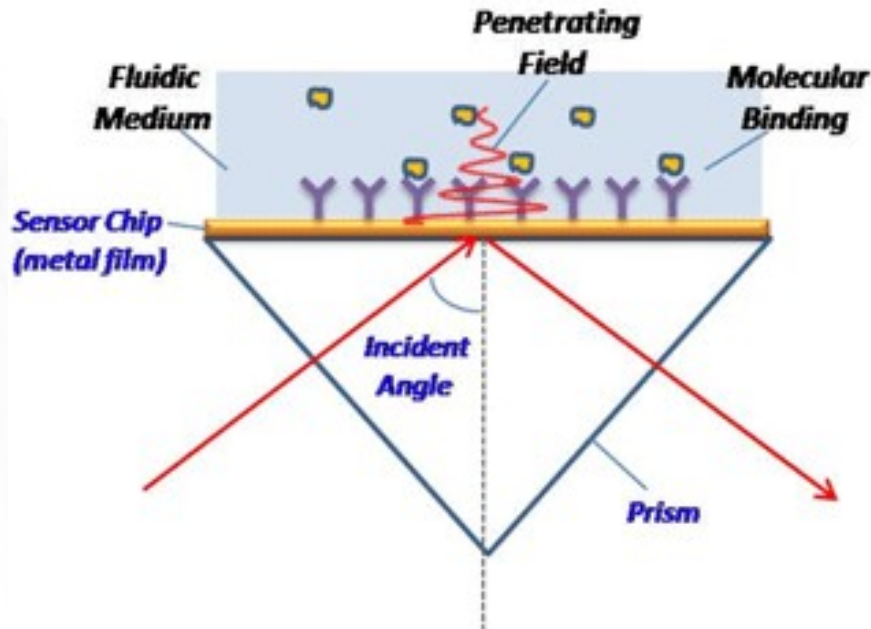
c) Fluoreszenzspektren Diamant pur (Schwarz), A (Rot), B (Blau)

d) Autokorrelation

Aus S. Schietinger et al., Nan Lett (2009)



# Bsp Surface Plasmon Sensoren



Quelle: biosensingusa.com

- Durch Bindung Änderung von  $\epsilon$  und somit  $\beta$
- $\beta = \omega/c(\epsilon_{\text{Prism}})^{0,5} \sin \Theta$

# Zusammenfassung

## Wichtige Eigenschaften

- Stark lokalisiert
- Verstärkung des EM Feldes
- Geringe Propagationslängen

## Wichtige Anwendungen

- SERS
- Fluorescence Enhancement
- Surface Plasmon Sensor
- Plasmon Resonance
- Plasmonic Wave Guides
- Nicht Lineare Optische Bauteile

Ende

# Anhang<sup>1</sup>

## 1) Maxwell und Wellengleichung

# Anhang

Plasmafrequenz des freien Elektronengases

# Anhang

## SPP an Grenzflächen

*Betrachte ebene Grenzfläche zwischen absorbtionsfreiem Dielektrika mit  $\epsilon_2 > 0$  und einem Leiter mit  $\Re(\epsilon_1) < 0$ . (Erfüllt falls  $\omega < \omega_p$ )*

*Stetigkeit von  $H_y$  und  $\epsilon_1 E_z$  an Grenzfläche*

$$A_1 = A_2 \quad \frac{k_2}{k_1} = \frac{-\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

*Aus der Wellengleichung für  $H_y$*

$$k_1^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_1$$

$$k_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_2$$

*Es folgt die Dispersionsrelation*

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$



# Multilayer Systeme

Dispersionrelation und Moden

# Anhang

LSP an Kugel  $\lambda > d$