

Aufbau und Justage eines Leckstrahlmikroskopes zum Nachweis des plasmonischen Spin-Hall-Effektes

Hanno Christiansen

März 2021

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	2
2 Theorie	2
2.1 Oberflächen-Plasmon-Polariton (SPP)	2
2.1.1 Dispersion	2
2.1.2 Anregung	4
2.1.3 Leckstrahlung	5
2.2 Plasmonischer-Spin-Hall-Effekt	6
2.2.1 Raumfrequenzspektrum von Elektromagnetischen-Feldern	6
2.2.2 Raumfrequenzspektrum der Elektromagnetische Strahlung eines oszillierenden Dipols	7
2.2.3 Analyse des SPP Spins	8
3 Messung und Methoden	10
3.1 Leckstrahlmikroskopie	10
3.1.1 Immersionsobjektiv	10
3.1.2 Fourier-Optik	11
3.2 Einstellung der Polarisation des Lasers	11
3.3 Details des optischen Aufbaus	12
3.3.1 Veränderungen des vorhandenen Aufbaus	12
3.4 Probe	15
3.5 Justage des Aufbaus	16
3.6 Messung	16
4 Ergebnisse und Diskussion	17
4.1 Überprüfung der Funktionsweise des LRM	17
4.2 Diskussion	17
5 Zusammenfassung und Ausblick	19
A Literatur	19
B Technische Zeichnungen	19
C Liste der verwendeten Komponenten	19

1 Einführung

2 Theorie

2.1 Oberflächen-Plasmon-Polariton (SPP)

Ein Oberflächen-Plasmon-Polariton (engl. Surface-Plasmon-Polariton SPP) ist das quantisierte Quasiteilchen, der an das elektromagnetischen Feld gekoppelten Elektronen-Dichte-Oszillation, an einer Dielektrikums-Metall-Grenzschicht. Durch die spezielle Form dieser Geometrie ist es möglich, trotz des rein longitudinalen Charakters der Elektronen-Dichte-Oszillation, ein elektromagnetisches Feld mit transversalen Komponenten zu erzeugen. Diese transversalen Komponenten sind notwendig, um damit eine Kopplung an das rein transversale elektromagnetische Feld des Vakuums tendenziell zu ermöglichen. Die einfachste Geometrie in der SPPs auftreten können ist ein Zwei-Schichtsystem. Der Halbraum oberhalb der xy -Ebene mit $z > 0$ sei von einem Dielektrikum mit der Dielektrizitätskonstante ϵ_D ausgefüllt. Der Halbraum unterhalb der xy -Ebene mit $z < 0$ sei von einem Metall mit der im allgemeinen komplexen Dielektrischen-Funktion $\epsilon(\omega)$ ausgefüllt. An der Grenzschicht zwischen diesen beiden Halbräumen können SPPs propagieren. Um nun einige Charakteristische Eigenschaften von SPPs zu erläutern, gehe ich davon aus, dass das SPP entlang der x -Achse propagiert und entlang der y -Achse homogen ist. So wird das Problem effektiv 2-dimensional. Wie in [5] gezeigt, lassen sich die elektromagnetischen Felder eines SPPs in dieser einfachen Geometrie durch folgende Ausdrücke beschreiben:

$$\vec{E}_n = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \pm k_{\text{spp}}/k_{z,n} \end{pmatrix} E_0 \exp(i(k_{\text{spp}}x + k_{z,n}|z| - \omega t)) \quad (1)$$

$$\vec{H}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} H_0 \exp(i(k_{\text{spp}}x + k_{z,n}|z| - \omega t)) \quad (2)$$

Der Index n beschreibt hierbei das Material (M für das Metall, D für das Dielektrikum). Das \pm ist $+$ für das Metall und $-$ für das Dielektrikum. ω ist die Winkelfrequenz der Anregung. k_{spp} ist der im allgemeinen komplexe Wellenvektor der Anregung. k_{spp} ist für beide Medien gleich. Der Realteil $\Re\{k_{\text{spp}}\}$ des komplexen Wellenvektors lässt sich in die Wellenlänge $\lambda_{\text{spp}} = 2\pi/\Re\{k_{\text{spp}}\}$ des SPP umrechnen. Der Imaginärteil $\Im\{k_{\text{spp}}\}$ beschreibt das Dämpfungsverhalten des SPP entlang der Ausbreitungsrichtung. Es lässt sich über $L_{\text{spp}} = 1/(2\Im\{k_{\text{spp}}\})$ eine Propagationslänge definieren. Nachdem das SPP eine Propagationslänge zurückgelegt hat, sind die ursprünglichen Intensitäten des SPP auf 1/e ihres ursprünglichen Betrages zurückgegangen.

Analog beschreibt $\Re\{k_{z,n}\}$ den Exponentiellen-Abfall der Anregung, wenn man sich von der Grenzfläche entfernt. Hier lassen sich die Eindringtiefen $\delta_{M,D}$ definieren, die angeben nach welcher Entfernung in z-Richtung die ursprüngliche Feldstärke auf 1/e abgeklungen ist. Das SPP hat sowohl transversale, als auch longitudinale Komponenten des Elektrischen Feldes. Das magnetische Feld ist rein transversal. Daher spricht man auch von einer Transversal-Magnetischen Anregung (TM). Der quantitativer Verlauf des elektrischen Feldes für ein rein reelles k_{spp} und ein rein imaginäres $k_{z,n}$ ist in Abb. 1 dargestellt.

2.1.1 Dispersion

Die Herleitung der Dispersionsrelation orientiert sich an den Ausführungen in [1, pp. 261–ff] und kann dort im Detail nachvollzogen werden. Ich beschränke mich hier auf eine kurze Beschreibung des Vorgehens. Damit die oben angesetzten elektromagnetischen Felder (1), (2) die Maxwellgleichungen (3) und die Randbedingungen an der Grenzschicht erfüllen, müssen die Bedingungen

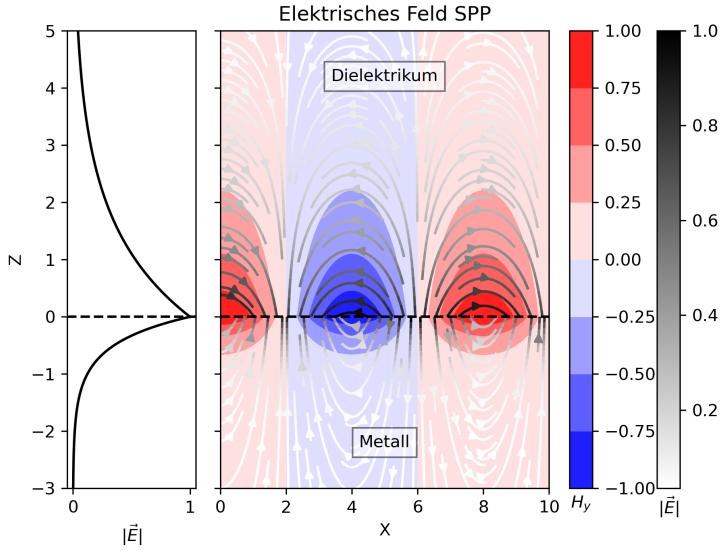


Abbildung 1: Quantitativer Verlauf des Elektrischen Feldes eines SPPs entlang einer Metall-Dielektrikums-Grenzschicht in der xy-Ebene mit Ausbreitungsrichtung in positiver x-Richtung

(4a), (4b) gelten. (Hierbei handelt es sich um den Spezialfall nicht magnetischer Materialien.)

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= 0 & \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{k_{z,M}}{\epsilon_M} + \frac{k_{z,D}}{\epsilon_D} = 0 \quad (4a)$$

$$k_{\text{spp}}^2 + k_{z,n}^2 = \epsilon_n \left(\frac{\omega}{c} \right)^2; \text{ für } n = M, D \quad (4b)$$

$\epsilon_{M,D} = \epsilon_{M,D}(\omega)$ sind hierbei die Permittivitäten der Materialien in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz. Aus Gleichung (4b) folgt $k_{z,n} = \sqrt{\epsilon_n k_0^2 - k_{\text{spp}}^2}$. Diese Beziehung legt den Zusammenhang zwischen k_{spp} und $k_{z,n}$ fest. Außerdem lässt sich hieraus erkennen, dass für typische Materialien $\text{Im}\{k_{z,n}\} \gg \text{Re}\{k_{z,n}\}$. Durch die Dominanz des Imaginärteils über den Realteil der Wellenvektorkomponente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, fallen die Felder senkrecht zu Ausbreitungsrichtung exponentiell ab. Man spricht deswegen von evaneszenten Feldern. Die Anregung ist daher stark an die Grenzfläche gebunden. Durch das Lösen der Bedingungen (4a), (4b) ergibt sich die Dispersionsrelation des SPP an einer Grenzschicht zwischen einem Metall und einem Dielektrikum zu:

$$k_{\text{spp}}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_D \epsilon_M(\omega)}{\epsilon_D + \epsilon_M(\omega)}} = k_0(\omega) n_{\text{eff}}(\omega) \quad (5)$$

Hierbei ist $k_0 = \omega/c$ die Dispersion von elektromagnetischer Strahlung in Vakuum. Und $n_{\text{eff}}(\omega)$ wird als effektiver Brechungsindex der Anregung bezeichnet. Die Dispersion kann über den Zusammenhang $E = \hbar\omega$ auch in Abhängigkeit der Energie dargestellt werden.

Im folgenden werden die Messdaten der Dielektrischen-Funktion von Gold aus der Publikation [7] verwendet, um den Verlauf der Dispersion einer Vakuum-Gold Mode qualitativ

zu analysieren. Die Publikation stellt Messdaten für unterschiedliche Oberflächenrauhigkeiten zur Verfügung. In dieser Arbeit wurden die Messdaten für aufgedampftes Gold verwendet. Für die Berechnung der Dispersion wurde $\epsilon_D = n_D^2 = 1.52^2$ verwendet. In der Dispersionskurve Abb. ?? ist zu erkennen, dass die Dispersionskurve bei einer Anregungs-Energie von $E = hc/\lambda_{\text{HeNe}} = 1.95\text{eV}$ rechts von der Lichtlinie des jeweiligen Mediums liegt. Diese k-Differenz

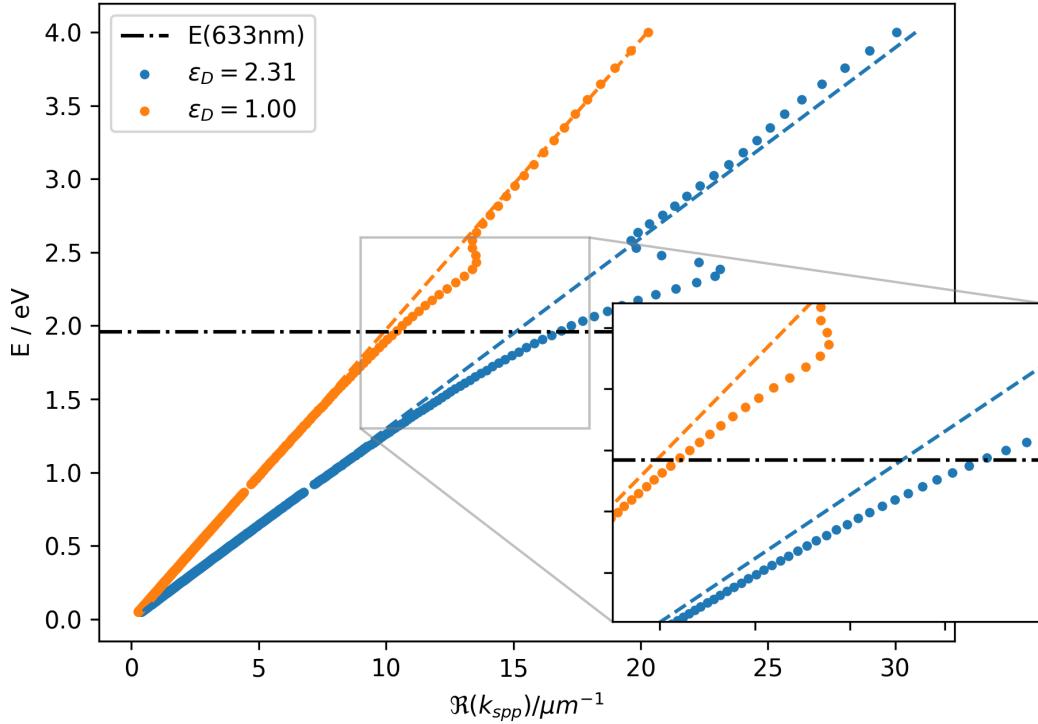


Abbildung 2: Dispersionskurve der Gold-Vakuum und der Gold-Glas Mode. Die Lichtlinien im jeweiligen Medium sind zur Orientierung gestrichelt gekennzeichnet

sorgt dafür, dass SPPs nicht ohne weiteres von elektromagnetischer Strahlung des Vakuums angeregt werden können.

2.1.2 Anregung

Um trotz der k-Differenz in der Dispersionsrelation SPPs mit elektromagnetischer Strahlung anregen zu können, ist es notwendig, den k-Wert der Anregungsstrahlung zu erhöhen. Hierfür gibt es unterschiedliche Mechanismen.

Kretschmann-Konfiguration In der Kretschmann Konfiguration wird ausgenutzt, dass man den auf eine Ebene projizierten Anteil eines Wellenvektors durch Einfallsinkel verkleinern kann. Da der Wellenvektor allerdings vergrößert werden muss, um ein SPP mit Strahlung aus Dielektrikum anzuregen, ist es notwendig ein System mit mehr als zwei Schichten zu verwenden. Ein dünner Metallfilm wird zwischen zwei Dielektrika mit $\epsilon_{D_1} > \epsilon_{D_2}$ eingeschlossen. So ist es möglich, den Wellenvektor der Anregenden Strahlung zunächst durch Wechsel in das Dielektrikum 1 mit $\epsilon_{D_1} > \epsilon_{D_2}$ zu vergrößern, und dann durch den Einfallsinkel zu Grenzschichtebene exakt an das

SPP der Mode Metall-Dielektrikum2 anzupassen. Dieses Verfahren wird bei der Kretschmann-Konfiguration verwendet. Ein schematischer Aufbau der Kretschmann Konfiguration ist Abb. 3 zu entnehmen. Die Anregungsstrahlung tritt hier zunächst in das Prisma ein. Hierdurch wird

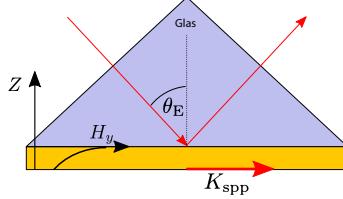


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Kretschmann-Konfiguration. Die Abbildung ist aus [3] entnommen

der Wellenvektor der Anregungsstrahlung um $k_{D_1} = k_0\sqrt{\epsilon_{D_1}}$ vergrößert. Das Material des Prismas wird so gewählt, dass der Wellenvektor größer als der Wellenvektor des SPPs (5) ist. Der Einfallsinkel θ_E wird so gewählt, dass die Projektion von k_{D_1} auf die Goldoberfläche gerade k_{spp} entspricht. Es gilt also:

$$\sin(\theta_E) = \frac{\Re\{k_{spp}\}}{k_{D_1}} \quad (6)$$

$$\Rightarrow \boxed{\Re\{k_{spp}\} = \sin(\theta_E)k_0\sqrt{\epsilon_{D_1}}} \quad (7)$$

Bei der Reflektion einer elektromagnetischen Welle an einem Metall, dringen in das Metall evanescente Felder ein. [6]. Ist die Metallschicht dünn genug, haben diese evaneszenten Felder an unteren Grenzfläche des Metalls noch ausreichend Intensität, um dort ein SPP anzuregen. Dies ist möglich, da die k -Komponenten wie oben erläutert an einander angepasst worden sind. Die in Abb. 3 gezeigte Geometrie nutzt für das Dielektrikum 1 ein Prisma, um die Einkopplung der elektromagnetischen Welle aus dem Vakuum in das Dielektrikum1 möglichst effektiv zu gestalten. Als Dielektrikum 2 wurde hier Luft verwendet.

Anregung an Strukturen Eine weitere Möglichkeit, die Wellenvektordifferenz zu überwinden stellen scharfe Strukturen an der Metalloberfläche da. An diesen Strukturen streut das anregende Licht, und kann somit ausreichend k gewinnen, um ein SPP anzuregen. Diese Strukturen können entweder künstlich hergestellt werden, oder es werden Defekt-Stellen auf der Probe genutzt. Da die Struktur scharf im Ortsraum ist, besitzt Sie ein breites Raumfrequenzspektrum.
...

2.1.3 Leckstrahlung

Leckstrahlung ist der inverse Effekt zur Anregung in der Kretschmann-Konfiguration. In einem Dreischichtsystem Dielektrikum1-Metall-Dielektrikum2 kann ein an der Grenzfläche Dielektrikum1-Metall propagierendes SPP, durch evanescente Felder, durch den Metallfilm in das Dielektrikum2 abstrahlen. Dies ist nur möglich, wenn $\epsilon_{D_2} < \epsilon_{D_1}$ ist, da sonst die Phasenanpassungsbedingung (6) nicht erfüllt werden kann. Diese Strahlung tritt dann unter einem Winkel θ_L aus der Probe, so dass die Phasenanpassungsbedingung gerade erfüllt ist. Diese in das Dielektrikum 2 abgestrahlte Strahlung bezeichnet man als Leckstrahlung. Für das auftreten von Leckstrahlung muss der Metallfilm ausreichen dünn sein, damit die evaneszenten Felder des SPP an der zweiten Grenzschicht noch ausreichend Intensität aufweisen. Durch die Phasenanpassungsbedingung (6) kann

einem Bestimmten Abstrahlwinkel θ_L ein konkreter $\text{Re}\{k_{\text{spp}}\}$ zugeordnet werden und umgekehrt. Dieser Umstand wird bei der Leckstrahlmikroskopie ausgenutzt, um den Wellenvektor des SPP zu bestimmen.

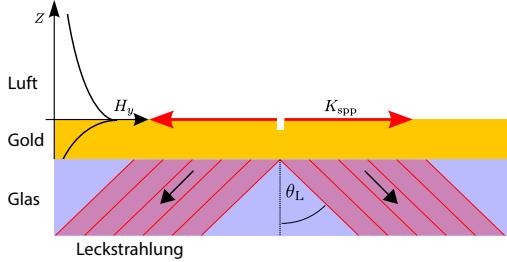


Abbildung 4: Schematischer Aufbau der Abstrahlung von Leckstrahlung. Die Abbildung ist aus [3] entnommen

2.2 Plasmonischer-Spin-Hall-Effekt

Der Plasmonische-Spin-Hall-Effekt beschreibt, wie an einer räumlich symmetrischen Struktur angeregte SPPs, abhängig von der Polarisation der anregenden Strahlung, in unterschiedliche Richtungen propagieren. Speziell propagiert das SPP bei links-zirkular polarisierter Strahlung in eine um 180° verschiedene Richtung zu dem SPP, dass mit rechts zirkular polarisiertem Licht angeregt worden ist.

2.2.1 Raumfrequenzspektrum von Elektromagnetischen-Feldern

Um den Plasmonischen-Spin-Hall-Effekt zu verstehen, ist es zunächst notwendig, die Raumfrequenzdarstellung von Elektromagnetischen Feldern zu verstehen. Die folgenden Ausführungen orientieren sich an [6], wobei in dieser Arbeit nur der etwas einfacherer 2D-Fall ausgeführt wird.

Das Elektrische Feld am Ort $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ sei durch $\vec{E}(\vec{r})$ gegeben. Die Zeitabhängigkeit von \vec{E} sei durch $\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}\{\vec{E}(\vec{r}) \exp(-i\omega t)\}$ gegeben. Dann lässt sich $\vec{E}(\vec{r})$ durch eine Fouriertransformation in x -Richtung wie folgt darstellen:

$$\vec{E}(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \hat{\vec{E}}(k_x, z) \exp(ik_x x) \quad (8)$$

$$\hat{\vec{E}}(k_x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dx \vec{E}(x, z) \exp(-ik_x x) \quad (9)$$

Wenn wir davon ausgehen, dass das Medium entlang der x -Achse homogen, isotrop, linear und quellfrei ist, muss das Elektrische Feld, die sich unter diesen Bedingungen aus den Maxwellgleichungen (3) ergebende Helmholtz-Gleichung $(\vec{\nabla}^2 + k^2) \vec{E}(\vec{r}) = 0$, erfüllen. Einsetzen von (8) in die Helmholtz-Gleichung ergibt mit der Definition $k_z := \sqrt{k^2 - k_x^2}$ folgenden Zusammenhang:

$$\hat{\vec{E}}(k_x, z) = \hat{\vec{E}}(k_x, z=0) \exp(\pm ik_z z) \quad (10)$$

Das Vorzeichen legt hier die Propagationsrichtung fest. Einsetzen in (8) ergibt:

$$\vec{E}(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \hat{\vec{E}}(k_x, z=0) \exp(i(k_x x \pm k_z z)) \quad (11)$$

Wenn also das Raumfrequenzspektrum für einen z -Wert bekannt ist, lassen sich die Spektren für alle anderen z -Werte gemäß (10) berechnen. Für einen festen Wert von k_x gibt es, je nach dem ob k_x größer oder kleiner als k ist zwei unterschiedliche Lösungen. Wenn $k_x^2 < k^2$ ist, ist $k_z := \sqrt{k^2 - k_x^2}$ eine reelle Zahl. Daher handelt es sich nach (10) um eine ebene Welle, die entlang der z -Achse propagiert. Wenn hingegen $k_x^2 > k^2$ ist, ist $k_z := \sqrt{k^2 - k_x^2}$ eine imaginäre Zahl. Dann handelt es sich bei (10) um eine evanescente Welle, die entlang der z -Achse exponentiell abklingt. In dem Raumfrequenzspektrum kann man also zwischen Bereichen mit Ebenen-Wellen und Bereichen mit Evaneszenten-Wellen unterscheiden. Dieses Konzept lässt sich ohne weiteres auch auf 3 Raumdimensionen und das Magnetische Feld erweitern.

2.2.2 Raumfrequenzspektrum der Elektromagnetische Strahlung eines oszillierenden Dipols

Wenn man das oben beschriebene Verfahren auf einen Elliptisch-Polarisierten Dipol anwendet, lässt sich das Raumfrequenzspektrum bestimmen. Hier werde ich mich wieder auf den 2-Dimensionalen Fall beschränken. Das zeitabhängige Dipolmoment sei:

$$\vec{P}(t) = \Re \left[\underbrace{\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix}}_{\vec{P}} \exp(-i\omega t) \right]$$

p_x und p_y sind im allgemeinen komplexe Zahlen. So kann \vec{P} auch Elliptische Polarisationen darstellen. Das Die y -Komponente des Magnetfeldes dieses Dipols lässt sich nun, wie in [6] und [8] gezeigt wird, analog zu den obigen Ausführungen in Raumfrequenzanteile zerlegen.

$$H_y(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \hat{H}_y(k_x, z) \exp(ik_x x) \quad (12)$$

mit

$$\boxed{\hat{H}_y(k_x, z) = \frac{i\omega}{8\pi^2} \left\{ p_z \frac{k_x}{k_z} \mp p_x \right\} \exp(ik_z|z - z_{\text{Dipol}}|)} \quad (13)$$

z_{Dipol} ist hierbei die Position des Dipols auf der z -Achse. k_z lässt sich wieder über die Differenz von k_x zur Gesamtwellenzahl k berechnen. $k_z := \sqrt{k^2 - k_x^2}$ Wenn k_x schon den gesamten Anteil der Gesamtwellenzahl "aufgebraucht" wird k_z imaginär und die resultierende Welle deswegen evanescent. Wenn k_x einen Anteil der Gesamtwellenzahl "übrig lässt", bleibt k_z reell und die Welle kann propagieren. Ähnlich wie bei der Leckstrahlung, ergibt sich ein durch die Phasenanpassungsbedingung ein Winkel zur z -Achse, unter dem die Welle mit bestimmten k_x propagiert: $\theta = \arcsin(k_x/k)$. Da $k = \omega/c$ hängt das Raumfrequenzspektrum nur von dem äußeren Parameter ω bzw. k ab.

Analyse des Dipol-Raumfrequenzspektrums Die Analyse des Raumfrequenzspektrums erfolgt in dieser Arbeit rein quantitativ unter Verwendung von willkürlichen Einheiten.

Linear polarisierte Dipol in x -Richtung Der Dipol sei:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Der Real und Imaginär Teil des Raumfrequenzspektrums in einer halben Wellenlänge unterhalb des Dipols lässt sich nun plotten. k_x wurde hierbei in Einheiten von k dargestellt. Die Raumfrequenzspektrums-Amplitude wurde in dem Bereich der Darstellung auf 1 normiert. Das Raumfrequenzspektrum des in x -Richtung orientierten Dipols hat eine gerade Parität, ist also achsensymmetrisch.

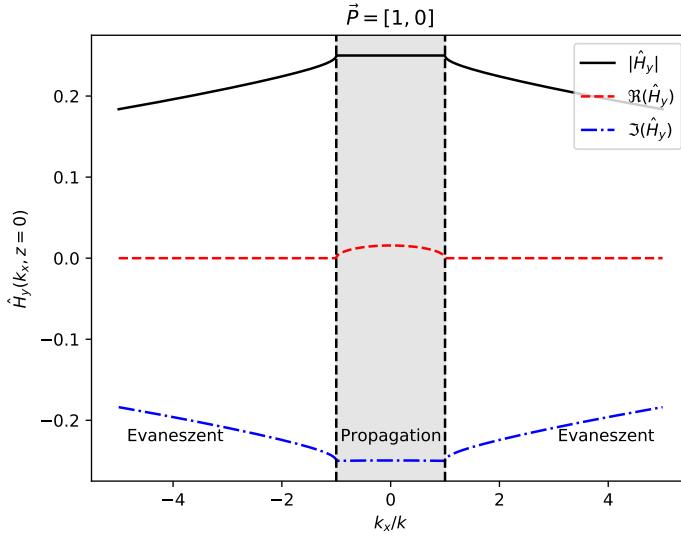


Abbildung 5: Raumfrequenzspektrum in der z -Ebene, eines entlang der x -Achse orientiertem linear polarisiertem Dipol. Position des Dipols bei $z_{\text{dipol}} = 0.01\lambda$

Linear polarisierte Dipol in z -Richtung Der Dipol sei:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ -i \end{pmatrix}$$

Das Raumfrequenzspektrum dieses Dipols zeigt ungerade Parität, ist also punktsymmetrisch um den Ursprung.

Zirkular polarisierte Dipol Der Dipol sei:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$

Das Raumfrequenzspektrum aus der phasenverschobenen Überlagerung der beiden Dipole ist asymmetrisch. Im negativen x -Bereich überlagern sich die Spektren destruktiv, im positiven Bereich konstruktiv. Wenn nun sehr nah an dem Zirkular polarisierten Dipol ein Schichtsystem, dass die Anregung von SPPs unterstützt positioniert wird, kann durch den Teil des Spektrums der dem effektiven Brechungsindex der SPP-Mode entspricht ein SPP angeregt werden. Das Vorzeichen von k_x entspricht hierbei der Anregungsrichtung des SPPs. Da $\hat{H}_y(k_{\text{spp}}) \neq \hat{H}_y(-k_{\text{spp}})$ findet die Anregung bevorzugt in eine Richtung statt. Diese Richtung ist abhängig von dem Drehsinn des zirkular polarisierten Dipols. Das Nahfeld einer zirkular polarisierten Dipole ist also anisotrop, obwohl das Fernfeld welches man durch substituieren von $k_x = k_o \sin(\theta)$ erhält, isotrop ist.

2.2.3 Analyse des SPP Spins

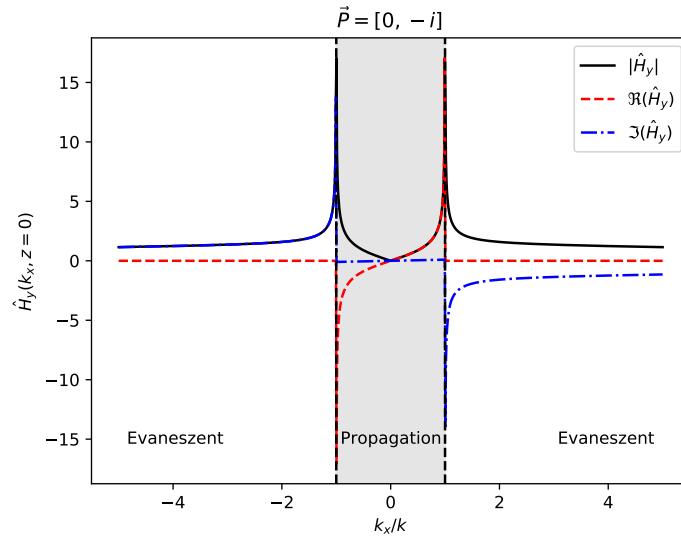


Abbildung 6: Raumfrequenzspektrum in der z -Ebene, bei entlang der z -Achse orientiertem linear polarisiertem Dipol. Position des Dipols bei $z_{\text{dipol}} = 0.01\lambda$

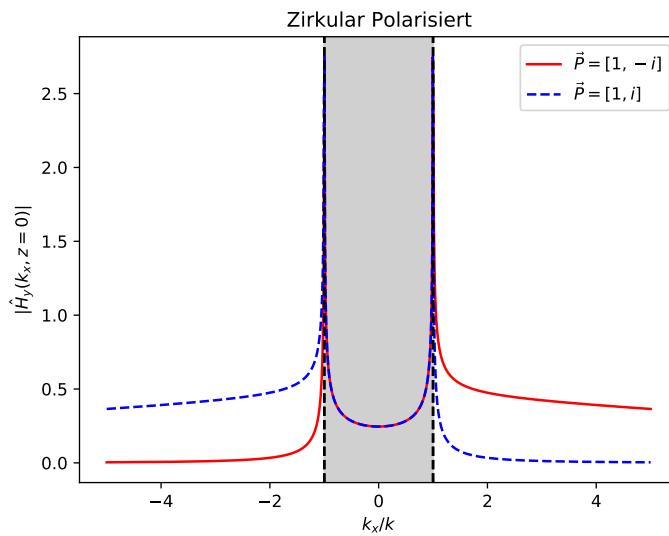


Abbildung 7: Betrag des Raumfrequenzspektrums in der z -Ebene, bei links und rechts zirkular polarisiertem Dipol. Position des Dipols bei $z_{\text{dipol}} = 0.01\lambda$

3 Messung und Methoden

3.1 Leckstrahlmikroskopie

In dieser Arbeit wurde ein Leckstahlmikroskop verwendet, um den plasmonischen Spin-Hall Effekt experimentell nachzuweisen. Ein LRM hat gegenüber anderen Methoden zur Untersuchung Plasmonischer Systeme den Vorteil, dass es rein optisch arbeitet und deswegen nicht auf aufwendige Vakuum-Technik angewiesen ist. Ein Leckstahlmikroskop nutzt aus, dass SPPs in einem Mehrschichtsystem wie in Section 2.1.3 erläutert, Leckstrahlung unter einem spezifischen Winkel in ein Substrat abstrahlen können. Als Probe wurde in dieser Arbeit ein auf ein Glassubstrat aufgedampfter Goldfilm verwendet. Das Schichtsystem ist also Luft-Gold-Glas.

Ein Defekt auf der Probe wird zunächst von der Luftseite mit einem Laser bestrahlt. An der Luft-Gold Grenzflächen werden hierdurch SPPs angeregt. Diese SPPs strahlen nun Leckstrahlung in das Glassubstrat ab. Außerdem wird ein Teil des Lasers direkt transmittiert. Auf der Glasseite der Probe wird mit einem Immersionsobjektiv die Leckstrahlung und der direkt transmittierte Laser gesammelt und abgebildet. Aus diesem Bild wird mit Hilfe eines 4f-Aufbaus die Leckstrahlung selektiert, welche unter dem spezifischen Leckstrahlwinkel aus dem Glassubstrat ausgetreten ist. So ist es möglich, die plasmonischen Anregungen ohne Störungen des direkt transmittierten Strahles zu beobachten. Das in dieser Arbeit verwendete Leckstrahlmikroskop basiert auf dem Aufbau, den Joris Jarusiewski im Rahmen seiner Masterarbeit [3] entwickelt hat.

3.1.1 Immersionsobjektiv

Da der Winkel, unter dem das SPP Leckstrahlung in das Glas abstrahlt, größer ist, als der kritische Winkel für die Totalreflektion an der Grenzschicht Dielektrikum-Luft, muss für das Abbilden der Leckstrahlung ein Immersionsobjektiv verwendet werden. Ein Immersionsobjektiv nutzt ein Immersionsöl, dass zwischen Objektiv und Probe aufgebracht wird. Durch die Adhäsions- und Kohäsionskräfte in dem Öl, ist es möglich dauerhaft einen kleinen Öltropfen zwischen Objektiv und Probe zu halten. Der Brechungsindex des Öls ist so auf das Glas der Probe angepasst, dass beide einen ähnlichen Brechungsindex aufweisen. Dadurch tritt an der Grenzfläche für die Leckstrahlung keine Totalreflektion auf. Durch den großen Winkel, unter dem die Leckstrahlung aus der Probe austritt ist es außerdem Notwendig, dass das Objektiv einen großen Maximalen Öffnungswinkel aufweist, damit die Leckstrahlung korrekt abgebildet wird und nicht im Inneren des Objektives absorbiert wird. Die Fähigkeit eines Objektives Licht unter großen Winkeln zur optischen Achse aufzunehmen, lässt sich durch die Numerische Apertur $NA = n_{\text{oil}} \sin \theta_{\max}$ beschreiben. θ_{\max} ist hierbei der halbe Maximale Öffnungswinkel des Objektives. Eine große Numerische Apertur bedeutet, dass das Objektiv Licht noch unter großen Winkeln zur optischen Achse aufnehmen kann. Das in dieser Arbeit verwendete Immersionsobjektiv war unendlich korrigiert. Dies bedeutet, dass die Korrekturen der Abbildungsfehler des Objektives darauf abgestimmt worden sind, dass die Probe in der Brennweite des Objektives steht. Wenn die Probe in der Brennweite des Objektives steht, ist die Strahlung welche aus dem Objektiv austritt, parallel und das Zwischenbild entsteht erst im Unendlichen. Um dieses Zwischenbild in eine endliche Distanz zu verschieben, ist noch eine weitere Sammellinse, die sogenannte Tubuslinse notwendig. Ein unendlich korrigierte Objektiv kann auch außerhalb dieser Betriebsart verwendet werden. Allerdings treten dann zunehmend Fehler in der Abbildung auf. Der korrekte Betrieb des Objektives kann durch die Position des 1. Zwischenbildes hinter der Tubuslinse überprüft werden. Liegt das Zwischenbild hinter der Tubuslinse genau in der Brennweite der Tubuslinse, liegt die Probe in der Brennweite des Objektives und die Abbildung des Objektives ist optimal korrigiert.[4]

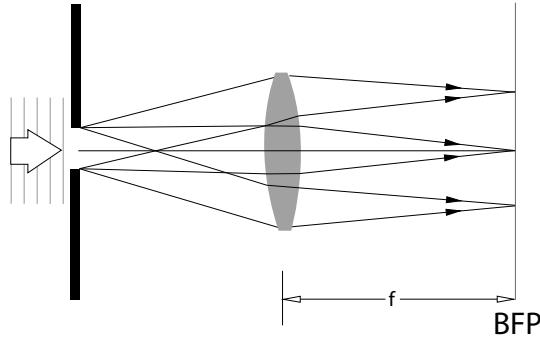


Abbildung 8: Eine Sammellinse erzeugt das Frauenhofersche-Beugungsbild in ihrer hinteren Brennebene(BFP). Parallelle Strahlen werden in Abhängigkeit ihres Winkels zur optischen Achse auf einem Punkt in der BFP fokussiert. Die Abbildung ist an [?] angelehnt.

3.1.2 Fourier-Optik

Da hinter der Probe nicht nur die Leckstrahlung, sondern auch die Strahlung des direkt transmittierten Strahls zu beobachten ist, ist es notwendig, die Leckstrahlung zu selektieren. Die Leckstrahlung tritt dank der notwendigen Phasenanpassung nur unter einem charakteristischen Winkel zur optischen Achse (6) aus der Probe aus. Daher ist es möglich, die Leckstrahlung durch ihren Emissionswinkel zu identifizieren. Hierfür ist die Fourier-Optik nützlich. Eine Sammellinse besitzt die Eigenschaft, in der hinteren Brennebene (BackFocalPlane BFP) ein Winkel aufgelöstes Bild von der Strahlung die sie erreicht, zu erzeugen.[2] Die Position eines Lichtstrahles in der BFP ist also nur von dem Winkel des Strahls zur optischen Achse, nicht aber von der absoluten Position des Strahles vor der Linse abhängig. So ist es möglich bestimmte Emissionswinkel aus dem Bild herauszufiltern.

4f-Aufbau Im Allgemeinen wird für diese optische Filterung ein sogenannter 4f Aufbau verwendet. Ein 4f-Aufbau besteht aus zwei Linsen mit der Brennweite f , die im Abstand $2f$ zueinander positioniert werden. Die beiden Linsen werden so positioniert, dass sich im Abstand f von der ersten Linse das Zwischenbild des Immersionsobjektivs befindet. Zwischen den beiden Linsen entsteht nun ein winkelauflösendes Fourierbild. Zwischen den beiden Linsen können nun Teile des Fourierspektrums herausgefiltert werden. Die zweite Linse erzeugt nun aus dem gefilterten Fourierspektrum wieder das Ortsbild, welches nun nur noch aus den gefilterten Komponenten besteht. Der 4f Aufbau ist schematisch in Abbildung 9a erläutert.

3.2 Einstellung der Polarisation des Lasers

Um den optischen Spin-Hall-Effekt nachweisen zu können, ist es notwendig, die Polarisation der Anregung zu kontrollieren. Hierfür wurde ein Polfilter und eine $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte verwendet. Der verwendete He-Ne Laser der Firma ThorLabs ist linear Polariert. Um die Polarisationsebene des Lasers präzise festzulegen wurde ein lineare Polfilter verwendet. Der Polfilter wurde auf eine Polarisation parallel zur Einfallsebene eingestellt und der Laser dann so entlang der optischen Achse gedreht, dass die gemessene Intensität hinter dem Polfilter maximal ist.

Verzögerungsplatte Eine Verzögerungsplatte besteht aus einem Doppelbrechenden Kristall und hat deswegen eine langsame und eine schnelle Achse. Die beiden Achsen haben einen Winkel von 90 Grad zueinander und stehen senkrecht auf der optischen Achse. Wenn das Verzögerungsplättchen so dimensioniert ist, dass die Phasendifferenz, die eine EM-Welle beim

Durchgang durch das Plättchen erfährt $\delta\phi = \pi/4$ ist, spricht man von einem $\lambda/4$ -Verzögerungsplättchen. $\lambda/4$ -Verzögerungsplättchen kann aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisierte Licht erzeugen, wenn eine der beiden Kristallachsen eine Orientierung von 45° zur ursprünglichen Polarisationsachse des Lasers aufweist.

3.3 Details des optischen Aufbaus

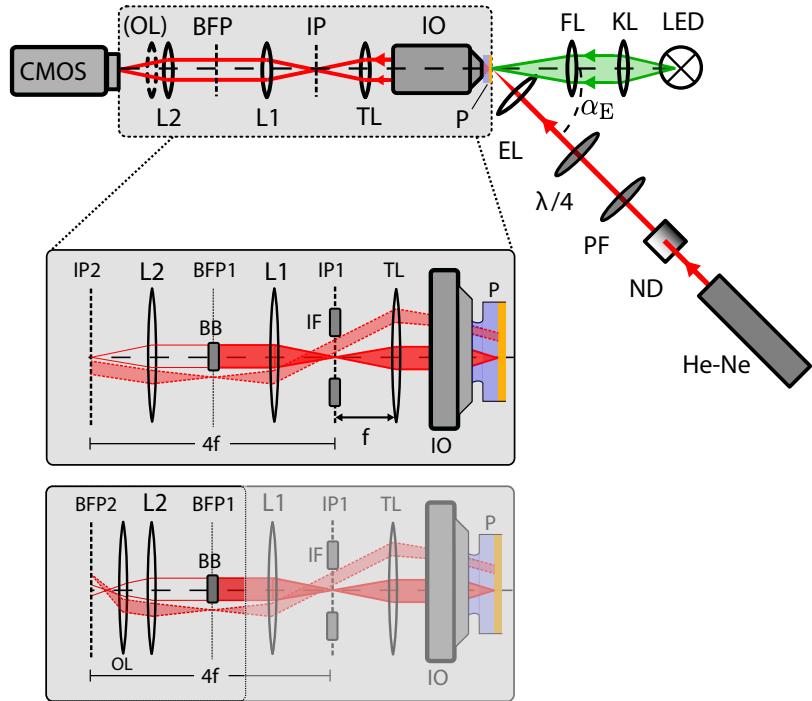
In dieser Arbeit wurde der Aufbau von *Jaruszewski* in einigen Details verbessert und umgerüstet, so dass der Laser auch unter schrägen Einfall auf die Probe gerichtet werden kann. Die Verwendeten Komponenten sind detailliert in Anhang ... aufgelistet. Der Aufbau ist in Abbildung 9a schematisch dargestellt. In dieser Arbeit wurde als Anregungslaser ein He-Ne Dauerstrich Laser der Firma Thorlabs mit einer Leistung von $P = 35\text{mw}$ verwendet. ($\lambda = 633\text{nm}$) Der Laser ist linear polarisiert. Um die Polarisation des Lasers gezielt von linearer Polarisation zu zirkulare Polarisation regeln zu können, wurde ein $\lambda/4$ -Plättchen eingesetzt. Um den CMOS-Detektor vor Beschädigungen zu schützen, wurde außerdem ein Neutraldichtefilter verwendet, um den Laser abzuschwächen. Um die Fokussierung der Probe zu erleichtern, wurde außerdem eine LED-Hintergrundbeleuchtung verwendet. Das Licht der LED wurde mit einer Sammellinse($f=...$) kollimiert, und mit einer weiteren Linse FL $f_{FL} = 50\text{mm}$ auf die Probe fokussiert. Diese Linse wurde bei Bedarf mit einer Magnetsäule grob an der richtigen Stelle vor der Probe positioniert.

3.3.1 Veränderungen des vorhandenen Aufbaus

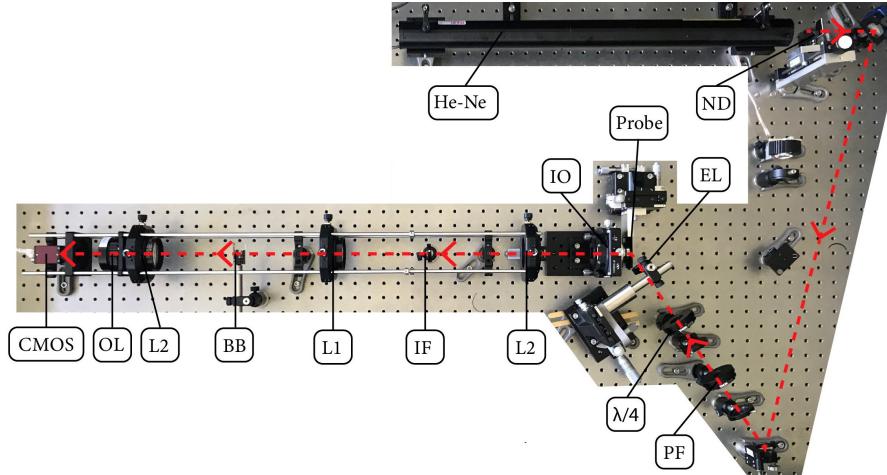
Einkoppellinse Aus geometrischen Gründen war es nicht mehr möglich, den Laser mit einem Objektiv auf die Probe zu fokussieren, da sonst das Objektiv mit der Probe kollidieren würde. Stattdessen wurde eine Sammellinse als Einkoppellinse (EL) verwendet mit $f_{EL} = 30\text{mm}$. Die Wahl der Brennweite der Einkoppellinse ist ein Kompromiss: Je kleiner die Brennweite ist, desto kleiner lässt sich der Laser fokussieren. Wenn die Brennweite allerdings zu klein ist, kollidiert die Linsenhalterung mit der Probe. Mit kleinerer Brennweite sind also nur kleinere Einfallswinkel zur Probenormale möglich. Um trotzdem eine möglichst kleine Brennweite verwenden zu können, wurde eine sehr kompakte Linsenhalterung verwendet. Diese Halterung wurde über einen Querarm an einer xyz-Verfahreinheit montiert, so dass man die Linse in allen drei Raumrichtungen verfahren kann. Dies ist wichtig, um den Laser gezielt auf den Punkt zu fokussieren, an welchem die optische Achse die Probe schneidet. Dieser Aufbau ist in Abbildung 10 gezeigt

Probenhalterung Die Probenhalterung des alten Aufbaus hatte das Problem, dass die senkrechte Ausrichtung der Probe zur Optischen Achse nur grob per Auge erfolgen konnte. Dadurch war beim Verfahren der Probe ein ständiges Nachfokussieren notwendig. Außerdem hatte die Halterung nicht ausreichend Stabilität, was die Fokussierung zusätzlich erschwert hat. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Probenhalterung entwickelt. Diese Probenhalterung behebt die Schwachstellen der alten und hat außerdem einen Anschlag für die Probe, so dass es prinzipiell möglich ist, anhand der Skalen an den Mikrometerschrauben der Verfahreinheit Koordinaten abzulesen. So ist es möglich trotz Probenwechsel später wieder die gleichen Orte auf der Probe anzufahren. Die Probenhalterung wurde von der Uni-Werkstatt gefertigt. Eine Technische Zeichnung der Probenhalterung ist im Anhang zu finden.

Cage-System Sämtliche Optiken hinter dem Immersionsobjektiv wurden in ein Cage-System der Firma *Thorlabs* integriert (Abbildung 12). Das Cage-System besteht aus quadratischen Halterungen, die in ihren Eckpunkten Bohrungen habe, durch welche sich Edelstahlstäbe schieben lassen. Diese Fixierung der Halterungen an vier Punkten verhindert ein Verkippen der Linsen entlang der optischen Achse. Die Halterungen können entlang der optischen Achse auf



(a) Schematischer Aufbau

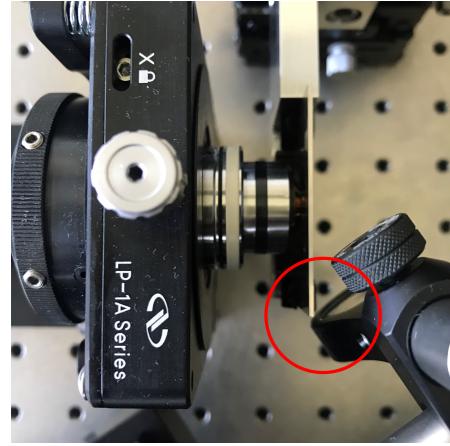


(b) Foto des Aufbau

Abbildung 9: Die Komponenten des Aufbaus sind: CMOS-Sensor (CMOS), Optionale Linse (OL), Linse2 (L2), BeamBlock (BB), Linse1 (L1), ImageFilter (IF), Linse2 (L2), Immersionsobjektiv (IO), Probe, Einkoppel-Linse (EL), Verzögerungsplättchen ($\lambda/4$), Polarisationsfilter (PF), Neutraldichtefilter (ND), He-Ne Laser (He-Ne). Außerdem ist auch noch eine LED Hintergrundbeleuchtung verbaut. In Rot ist schematisch der Strahlengang des Lasers eingezeichnet. Die Abbildung des Schematischen Aufbaus ist an die Abbildung von Jaruschewski [3] angelehnt.



(a) Querarm



(b) Kollision Linse mit Probe

Abbildung 10: Diese Abbildungen zeigen die Linsenhalterung welche über einen Querarm an einer xyz-Verfahreinheit montiert ist, und die Kollision zwischen Linsenhalterung und Probe

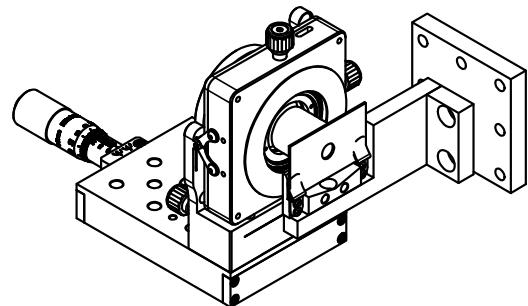


Abbildung 11: Probenhalter mit Montierter Probe vor dem Immersionsobjektiv

den vier Eckstäben verschoben werden. Für die Linsen TL, L1, L2 wurden xy-Halter verwendet, die senkrecht zur optischen Achse mit feinen Justierschrauben sehr genau verstellt werden können. Im Laufe dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass diese sehr feine Justierung nicht notwendig gewesen wäre. Die Tubuslinse TL des Herstellers *Zeiss* ist in einem Halter mit einem $M32 \times 0.5$ Gewinde montiert. Eine Technische Zeichnung der Tubuslinse ist in (...) zu finden. Für dieses Gewinde stellt *Thorlabs* keine Komponenten her, deswegen war ein Adapter notwendig. Eine Technische Zeichnung dieses Adapters ist in (...) zu finden. Die optionale Linse OL wurde mit einer Magnethalterung in dem Cage-System montiert. Diese Halterung ermöglicht es, die Linse sehr einfach zu entfernen und so zwischen der Darstellung der Image-Plane und Backfocal-Plane zu wechseln. Außerdem wurde die OL in einem längerem Gewindetubus montiert, so das ein präzises Verfahren der Linse entlang der optischen Achse möglich ist. Die ist notwendig, um die BFP präzise zu fokussieren. Ist die richtige Position der OL einmal bestimmt, kann der Gewindetubus mit einem Gewindering gekontert werden. Auch der CMOS-Sensor der Firma *Allied-Vision* wurde in das Cage-System integriert. Hierfür war ein Adapter von der Kameraobjektiv-Gewindenorm *C-Mount* auf die Gewindenorm *SM-2* des Cage-Systems Herstellers *Thorlabs* notwendig. Ein Technische Zeichnung des Cage-Systems ist im Anhang (...) zu finden. Der BeamBlock (BB) und der ImageFilter (IF) sind mit Magnetsäulen auf dem optischen Tisch befestigt.

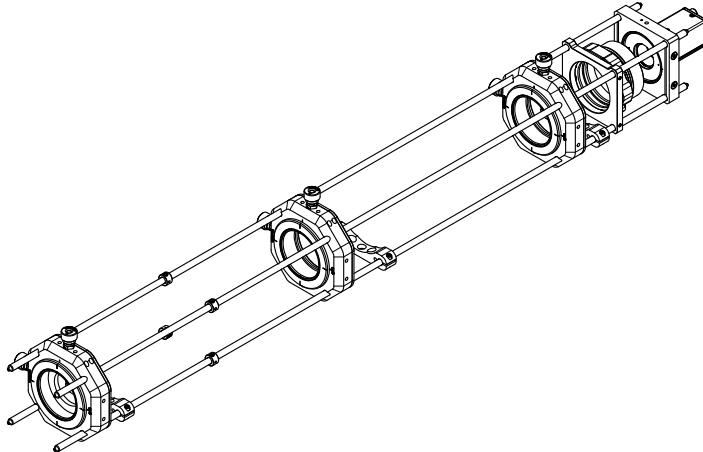


Abbildung 12: Komponenten im Cage-System montiert

3.4 Probe

Die ersten Messungen dieser Arbeit wurden mit Proben, die noch durch die Messungen von Jaruszewski [3] vorhanden waren durchgeführt. Da diese Proben jedoch auch auf der Goldseite mit Immersionsöl verdreckt waren, wurden später neue Proben verwendet, diese Proben wurden von Till Leißner in Sonderborg hergestellt. Hierfür wurden Deckgläser der Firma *Carl Zeiss* mit einem Brechungsindex von $n_{\text{Glas}} = 1.52$ verwendet. Die Deckgläser wurden mit einer $d_{\text{Gold}} = 50\text{nm}$ dicken Goldschicht bedampft. Die Deckgläser haben eine Dicke von $d_{\text{Glas}} = 170\mu\text{m}$. Als Anregungsstruktur wurden Defektstellen verwendet. Die Proben wurden in kleine Edelstahlbleche (Technische Zeichnung ??) eingeklebt, welche wiederum in die Probenhalterung passen. Damit die Proben auf der Goldseite nicht mit Immersionsöl verdreckt werden, wurden die sie mit einem Epoxid-Kleber in die Edelstahlbleche eingeklebt.



(a) Goldseite

(b) Glasseite

Abbildung 13: Die Bilder zeigen die in das Edelstahlblech eingeklebte Probe. In rot ist die Verklebung markiert. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Klebung dicht ist, so dass kein Öl von der Glasseite auf die Goldseite laufen kann.

3.5 Justage des Aufbaus

Die allgemeine Justage des LRM verlief, bis auf das Justieren des Lasers auf die Probe, wie von Jaruschewski [3] beschrieben. Dieses war durch den notwendigen schrägen Einfall des Lasers auf die Probe deutlich erschwert. Die Justage erfolgte mit montierter Probe. Als erste wurde die Probe mit Hilfe der Hintergrundbeleuchtung in den korrekten Abstand zum IO gebracht (Im korrekten Abstand ist das Bild der Probe scharf zu sehen). Als nächstes wurde der Laser mit zwei Spiegeln grob in dem erwünschten Winkel auf die Probe justiert. Danach wurden Einkoppellinse, $\lambda/4$ -Plättchen und Polfilter in den Strahlengang gestellt. Die Feinjustierung des Lasers auf die Probe wurde nun durch das Verschieben der Einkoppellinse durchgeführt. Hierbei war es hilfreich, den Strahl durch das Verfahren der EL entlang der optischen Achse etwas zu de-fokussieren, so dass man die Randbereiche des Strahls über den CMOS-Sensor in der Image-Plane auch schon sehen kann, wenn der Strahl noch nicht exakt die optische Achse trifft. Sobald ein Teil des Strahles in der Image-Plane detektiert worden ist, wird er durch weiteres bewegen der Linse zentriert und dann sukzessive weiter fokussiert. Durch das Verkippen der Einkoppellinse zum Laser, wandert der Strahl beim Fokussieren des Lasers stark auf der Probe. Das Verkippen der Linse wird, sobald der Laser optimal fokussiert ist, behoben. Hierfür wird der Laser durch die beiden Spiegel sukzessive so einjustiert, dass der Spot auf der Probe beim de-fokussieren des Lasers nicht mehr wandert.

3.6 Messung

Zunächst wurde die Funktionsfähigkeit des LRM durch einige Probe-Messungen, die mit den Daten von Jaruschewski [3] und Ebel [9] verglichen worden ist, überprüft. Da für den Nachweis des Plasmonischen-Spin-Hall-Effektes keine Kenntnisse über den Betrag des Wellenvektors notwendig ist, wurde auf eine Kalibrierung der BFP verzichtet. Die in den Abbildungen dargestellten Skalen von $|\vec{k}_{\text{SPP}}|$ wurden durch die bekannte Luft-Gold Mode berechnet. Die Polarisation des Lasers wurde so ausgerichtet, dass sie bei Orientierung des $\lambda/4$ -Plättchen $\beta_{\lambda/4} \in \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$ parallel zur Einfallsebene des Lasers liegt. Dann wurde ein geeigneter Defekt auf der Probenoberfläche gesucht. Das Vorgehen hierbei war, die Probe zu verfahren und dabei das Bild der BFP zu beobachten. Sobald der Laser hierbei auf einen Defekt trifft, sind in der BFP die charakteristischen Fringes der Leckstrahlung zu erkennen. Das Ziel war es,

einen Defekt zu finden, der möglichst symmetrisch abstrahlt. Nachdem ein geeigneter Defekt gefunden worden ist, wurden Bilder der FP und der BFP für unterschiedliche Orientierungen des $\lambda/4$ -Plättchen bei gleichbleibender Belichtungszeit aufgenommen.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Überprüfung der Funktionsweise des LRM

In diesem Abschnitt soll kurz überprüft werden, ob die Messdaten des LRM tatsächlich Plasmonischer Natur sind. Dafür wurden die Anregung an einem Punktdefekt bei einem Einfallsinkel $\alpha_E = 60^\circ$ bei linearer Polarisation parallel zur Einfallsebene untersucht. Da die Begrenzung der BFP durch die NA nur vom Immersionsobjektiv und dem Brechungsindex des verwendeten Immersionsöls abhängt, ist diese Begrenzung gut geeignet, um eine Kalibrierung der BFP zu ermöglichen. In dieser Arbeit sowohl das gleiche Immersionsöl als auch das gleiche Immersionsobjektiv wie in [3] verwendet. Daher kann die Kalibrierung aus dieser Arbeit übernommen werden. Dort wurde durch eine SPP-Mode mit bekanntem k_{SPP} der Wert der Numerischen Apertur der Kombination Immersionsobjektiv-Immersionsoel auf $\text{NA}_{\lambda=633\text{nm}} = 1.216 \pm 0.005$ bestimmt. Anhand dieser Kalibrierung wurde der Wert von k_{SPP} bestimmt.

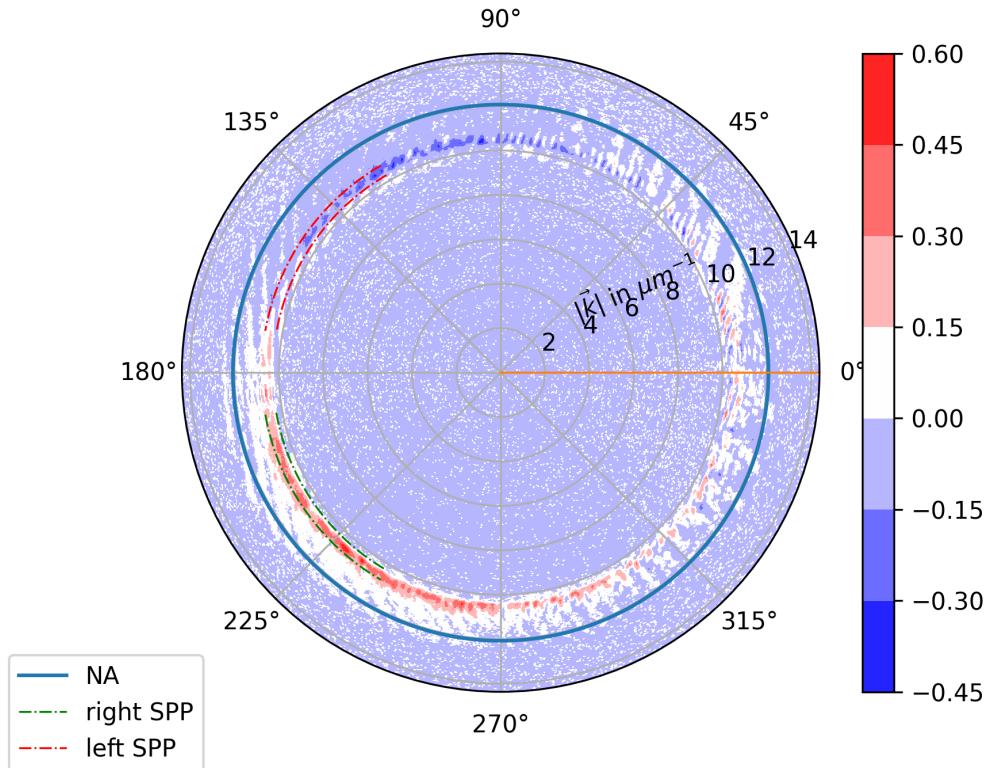


Abbildung 14: Die Abbildung zeigt in rot und grün die Integrationsmasken. Außerdem zeigt sie die Differenz zwischen dem Winkel 44 und 134

4.2 Diskussion

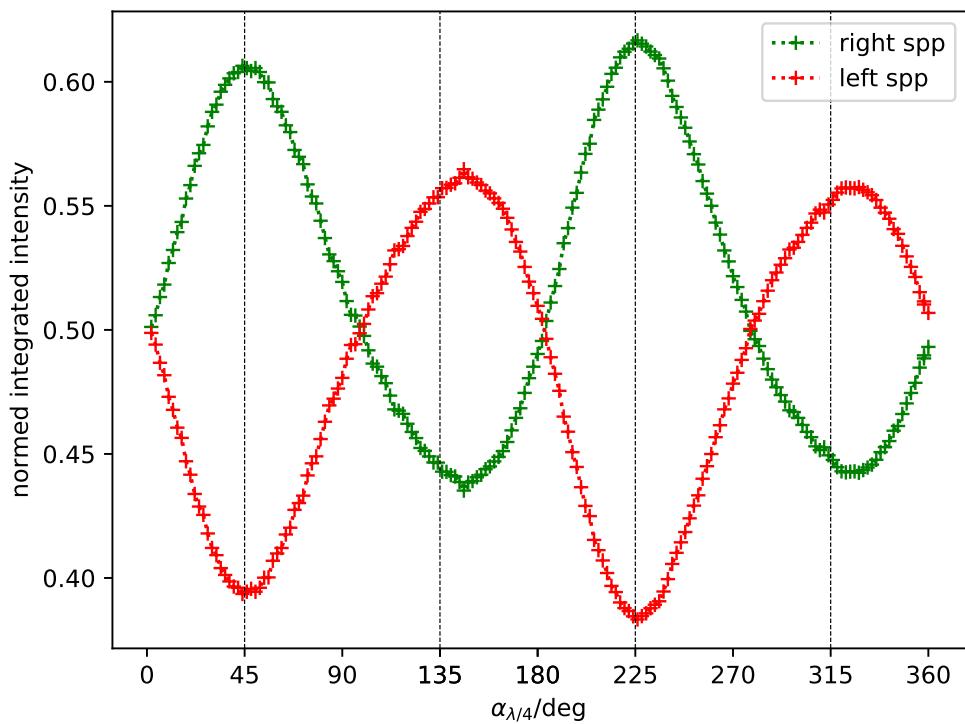


Abbildung 15: Kontrastverhältnis

5 Zusammenfassung und Ausblick

A Literatur

- [1] M. Fox. *Optische Eigenschaften von Festkörpern*. De Gruyter Oldenbourg, München and Wien, 2020. ISBN 9783110669138. doi: 10.1515/9783110669138.
- [2] Hecht, Bielefeldt, Novotny, Inouye, and Pohl. Local excitation, scattering, and interference of surface plasmons. *Physical review letters*, 77(9):1889–1892, 1996. doi: 10.1103/PhysRevLett.77.1889.
- [3] Joris Jaruszewski. *Aufbau eines Leckstrahlungsmikroskopes zur Untersuchung plasmonischer Systeme*. Masterarbeit, Kiel, 2020.
- [4] S. Kühl, B. Ilsinger, S. Lenz, and M. Thaler. *Grundlagen der Licht- und Elektronenmikroskopie*, volume 4864 of *UTB*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2018. ISBN 9783838548647. URL <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838548647>.
- [5] S. A. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and applications*. Springer, New York, 2007. ISBN 9780387331508.
- [6] L. Novotny and B. Hecht. Theoretical foundations. In L. Novotny and B. Hecht, editors, *Principles of nano-optics*, pages 12–44. Cambridge University Press, Cambridge, 2012. ISBN 9780511794193. doi: 10.1017/CBO9780511794193.004.
- [7] R. L. Olmon, B. Slovick, T. W. Johnson, D. Shelton, S.-H. Oh, G. D. Boreman, and M. B. Raschke. Optical dielectric function of gold. *Physical Review B*, 86(23), 2012. ISSN 1098-0121. doi: 10.1103/PhysRevB.86.235147.
- [8] F. J. Rodríguez-Fortuño, G. Marino, P. Ginzburg, D. O’Connor, A. Martínez, G. A. Wurtz, and A. V. Zayats. Near-field interference for the unidirectional excitation of electromagnetic guided modes. *Science*, 340(6130):328–330, 2013. ISSN 1095-9203. doi: 10.1126/science.1233739.
- [9] Sven Ebel. *Aufbau und Test eines Leckstrahlenmikroskops*. Bachelorarbeit, Kiel, 2019.

B Technische Zeichnungen

C Liste der verwendeten Komponenten