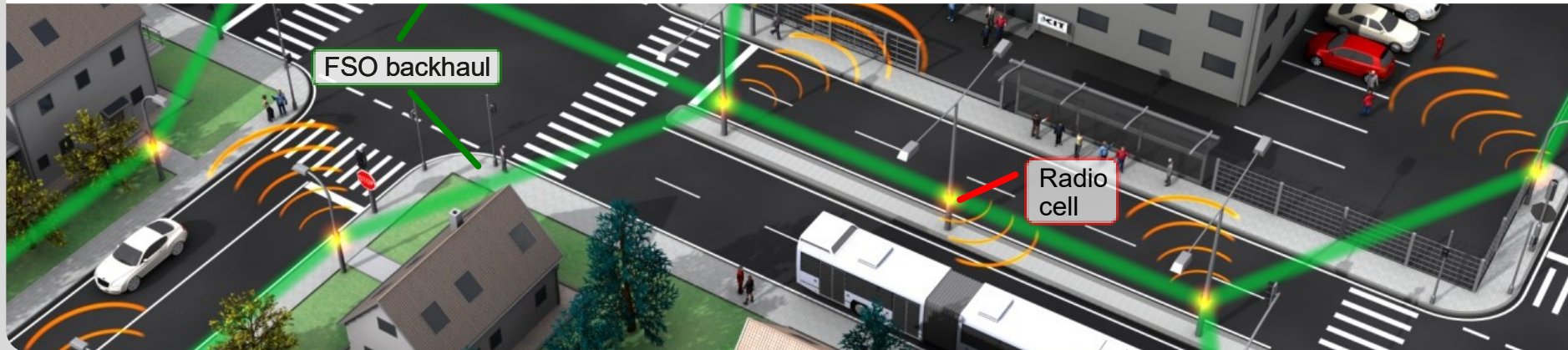


Elektromagnetische Wellen (EMW)

Übung 7

Jonas Krimmer, Patrick Matalla und Sebastian Randel



Administratives

- Unterlagen zur Vorlesung und Übung sowie Diskussionsforen finden Sie im [ILIAS-Portal](#)
- Kontaktdaten Übungsleiter
jonas.krimmer@kit.edu
patrick.matalla@kit.edu
- Die Übung wird nicht aufgezeichnet
- Das heutige Übungsblatt wird eingesammelt

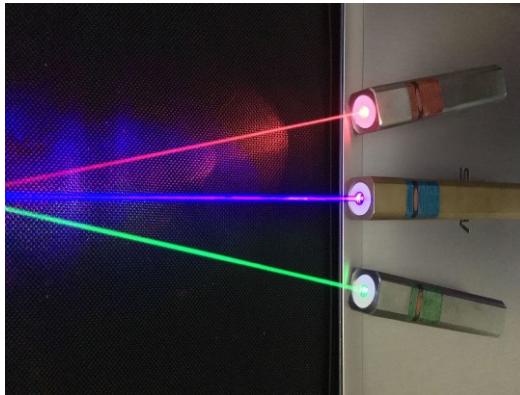
Oktober	November	Dezember	Januar	Februar
1 Fr	1 Mo	1 Mi Vorlesung 8	1 Sa	1 Di
2 Sa	2 Di	2 Do	2 So	2 Mi Vorlesung 15
3 So	3 Mi Vorlesung 4	3 Fr	3 Mo	3 Do
4 Mo	4 Do	4 Sa	4 Di	4 Fr
5 Di	5 Fr	5 So	5 Mi	5 Sa
6 Mi	6 Sa	6 Mo Übung 5	6 Do	6 So
7 Do	7 So	7 Di	7 Fr	7 Mo Übung 12
8 Fr	8 Mo Übung 1	8 Mi Vorlesung 9	8 Sa	8 Di
9 Sa	9 Di	9 Do	9 So	9 Mi Fragestunde
10 So	10 Mi Vorlesung 5	10 Fr	10 Mo Übung 8	10 Do
11 Mo	11 Do	11 Sa	11 Di	11 Fr
12 Di	12 Fr	12 So	12 Mi Vorlesung 12	12 Sa
13 Mi	13 Sa	13 Mo Übung 6	13 Do	13 So
14 Do	14 So	14 Di	14 Fr	14 Mo
15 Fr	15 Mo Übung 2	15 Mi Vorlesung 10	15 Sa	15 Di
16 Sa	16 Di	16 Do	16 So	16 Mi
17 So	17 Mi Vorlesung 6	17 Fr	17 Mo Übung 9	17 Do
18 Mo Vorlesung 1	18 Do	18 Sa	18 Di	18 Fr
19 Di	19 Fr	19 So	19 Mi Vorlesung 13	19 Sa
20 Mi Vorlesung 2	20 Sa	20 Mo Übung 7	20 Do	20 So
21 Do	21 So	21 Di	21 Fr	21 Mo
22 Fr	22 Mo Übung 3	22 Mi Vorlesung 11	22 Sa	22 Di
23 Sa	23 Di	23 Do	23 So	23 Mi
24 So	24 Mi Vorlesung 7	24 Fr	24 Mo Übung 10	24 Do
25 Mo Übung 0	25 Do	25 Sa	25 Di	25 Fr
26 Di	26 Fr	26 So	26 Mi Vorlesung 14	26 Sa
27 Mi Vorlesung 3	27 Sa	27 Mo	27 Do	27 So
28 Do	28 So	28 Di	28 Fr	28 Mo
29 Fr	29 Mo Übung 4	29 Mi	29 Sa	
30 Sa	30 Di	30 Do	30 So	
31 So		31 Fr	31 Mo Übung 11	

Themenübersicht

Übung	Aufgabe	Thematik
Übung 0	-	Mathematische und physikalische Grundlagen
Übung 1	A1, A2, A3	Wellengleichungen, ebene Wellen, Fourierreihen
Übung 2	A4, A5	Poynting-Vektor, Phasen- & Gruppengeschwindigkeit
Übung 3	A6, A7	Polarisation, Hertzsche Dipol
Übung 4	A8	Hertzscher Dipol, Dipolantenne
Übung 5	A9	Grenzflächenübergänge
Übung 6	A10, A11	Kirchhoffsches Beugungsintegral, Fresnel Näherung
Übung 7	A12, A13	Gaußscher Strahl, Strahlenoptik

Der Gaußsche Strahl - Intro

- Bisher: Ebene Wellen mit unendlich breiter Phasenfront → unendlich viel Energie in Welle
- Realität: Transversale Beschränkung der Welle
- Deutlich wird dies z.B. wenn man sich einen Laserstrahl anschaut
- Kombiniert Methoden der Strahlen- und Wellenoptik



Bildquelle: [Laserpointer – Wikipedia](#)



Bildquelle: [Der Laserleitstern des VLT | ESO Österreich](#)

Paraxiale Näherung

- Ansatz für Feldgröße $\underline{U}$

Transversale räumliche
Feldbegrenzung

$$\underline{U}(\rho, \phi, z) = \underline{U}_0 \underline{\psi}(\rho, \phi, z) \exp(-jkz)$$

Zeitliche Abhängigkeit
 $\exp(j\omega t)$ hier der Einfachheit
halber außen vor gelassen.

- Helmholtzgleichung in kartesischen Koordinaten

$$\frac{\partial^2 \underline{\psi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{\psi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{\psi}}{\partial z^2} - j2k \frac{\partial \underline{\psi}}{\partial z} = 0$$

Vernachlässigbar
klein

Auch klein, aber...

Sehr groß, da hohe Frequenzen bei optischen
Wellen. z.B. roter Laser:
 $\lambda \approx 700 \text{ nm}$, $f = 429 \text{ THz}$, $k = 8.98 \cdot 10^6 \text{ 1/m}$

- Paraxiale Näherung: Der transversale Feldverteilung des Strahls ändert sich nur sehr geringfügig mit z
 - Beispiel: Die Strahldicke handelsüblicher Laser nimmt mit „nur“ 1 mm/m zu.
- Daher Helmholtzgleichung in Zylinderkoordinaten und der paraxialen Näherung

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \underline{\psi}}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \underline{\psi}}{\partial \phi^2} - j2k \frac{\partial \underline{\psi}}{\partial z} = 0$$

Der Gaußsche Strahl

- Als Lösungsansatz für die Helmholtzgleichung beschreiben wir den Gaußschen Strahl

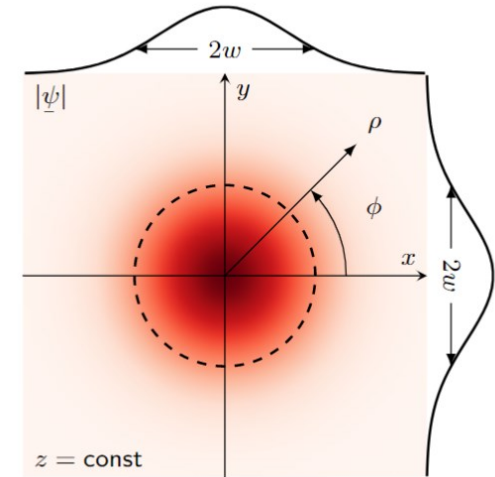
Da Strahl rotationssymmetrisch ist fliegt die Winkelabhängigkeit raus

Beim Radius $\rho = w(z)$ ist der Exponent -1 . Der Exponentialterm ist somit $1/e \rightarrow w(z)$ ist $1/e$ -Radius

Das Feld klingt Gaußförmig mit ρ ab

$$\underline{\psi}(\rho, z) = \underbrace{\exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2(z)}\right)}_{\text{Gaußscher Fleck}} \underbrace{\exp\left(-j \frac{k\rho^2}{2R(z)}\right)}_{\text{gekrümmte Phasenfront}} \underbrace{\exp\left(-j \underline{P}(z)\right)}_{\text{weitere } z\text{-Abhängigkeit}}$$

Querschnitt durch einen Gauß-Strahl



■ Strahlparameter Beziehung

$$\frac{1}{\underline{q}} = \frac{1}{R} - j \frac{2}{kw^2(z)}$$

■ Rayleigh-Länge

$$z_R = \frac{kw_0^2}{2}$$

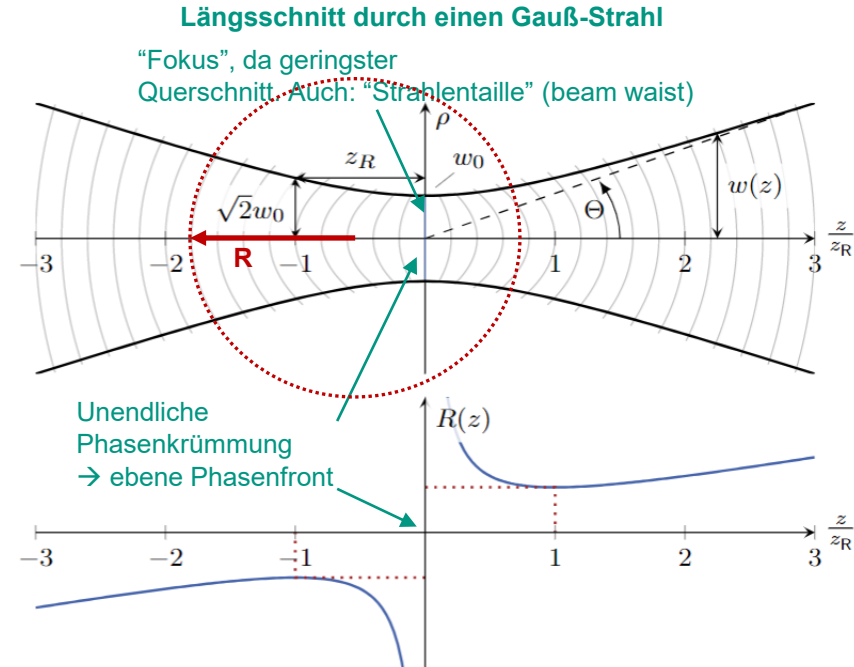
■ Strahlradius

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}$$

■ Krümmungsradius

$$R(z) = z \left(1 + \frac{z_R^2}{z^2} \right)$$

■ Krümmung ist $\frac{1}{R}$, d.h. ist die $R(z)$ klein, ist die Krümmung am stärksten



Mehr Informationen: “*Laser Beams and Resonators*”, H. Kogelnik und T. Li, 1966.

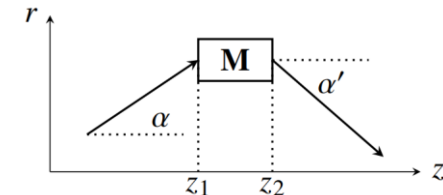
Strahlenoptik

- Für Lichtwellen ist die transversale Feldverteilung und auch der Divergenzwinkel sehr gering
- Der Gaußsche Strahl behält daher auch für weite Propagationsdistanzen seinen Strahlencharakter bei
- Die Strahlenoptik (auch geometrische Optik) vereinfacht einen Gaußschen Strahl in grober Näherung als einen Lichtstrahl mit
 - $w_0 = 0, \theta = 0$
- Ein Lichtstrahl wird einzig durch seinen Abstand zur optischen Achse (Symmetrieachse eines rotationssymmetrischen optischen Systems) und der Strahlneigung

$$\mathbf{r}(z) = \begin{pmatrix} r(z) \\ \alpha(z) \end{pmatrix}$$

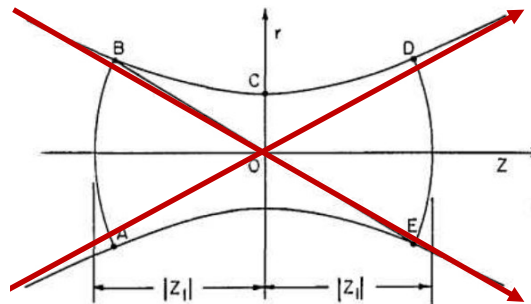
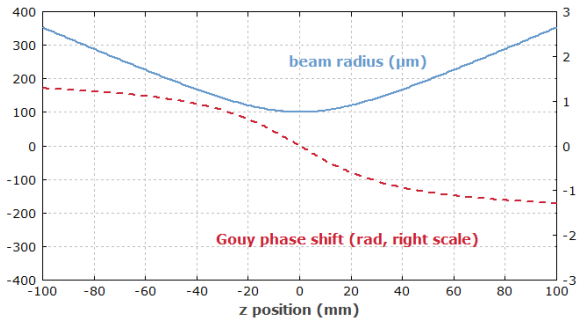
- Ein optisches System $\mathbf{M}$ transformiert einen eintreffenden Strahl $\mathbf{r}(z)$ in einen austretenden Strahl $\mathbf{r}'(z)$

$$\mathbf{r}'(z_2) = \mathbf{M}\mathbf{r}(z_1) = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r(z_1) \\ \alpha(z_1) \end{pmatrix}$$



Gouy-Phasenverschiebung

- Die Strahlenoptik genügt als grobe Näherung in der technischen Optik
- Für kleinere Betrachtungsräume (kleineres z) bedarf es jedoch die Divergenz des Gaußschen Strahls zu berücksichtigen. Die Divergenz eines Gaußschen Strahls kann in genügend großem Abstand vom Fokus mit zwei Strahlen modelliert werden
- Aus der geometrischen Optik wird deutlich: Im Fokus kreuzen sich die Lichtstrahlen. Ein Bild auf der linken Seite wird auf der rechten Seite umgekehrt angezeigt.
- Diese Phasenverschiebung wird mit der Gouy-Phasenverschiebung modelliert.



- Warum ist der Gaußsche Strahl nicht auf einen Punkt fokussiert wie es die geometrische Optik vorhersagt?
 - Ist die Lichtintensität auf einen infinitesimal kleinen Punkt gebündelt, entspricht dies einer unendlichen Energie in diesem Punkt. Dies ist physikalisch nicht möglich.
 - Je kleiner der Fokuspunkt, desto größer der Divergenzwinkel. Der Winkel kann aber nicht für eine gegebene Wellenlänge unendlich groß werden $\rightarrow$ Konsequenz der Heisenbergschen Unschärferelation. Quantentheorie vs. Geometrische Optik

Mehr Informationen: "Intuitive explanation of the phase anomaly of focused light beams", Robert W. Boyd, 1980.

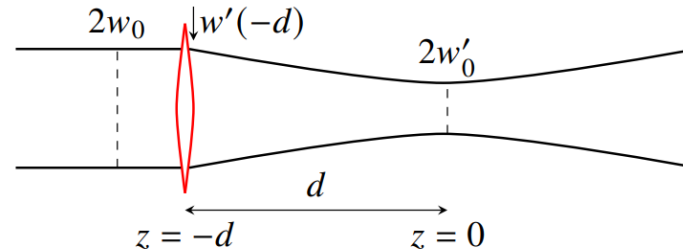
Aufgabe 12

Das elektrische Feld eines sich in $+z$ -Richtung ausbreitenden Gaußschen Strahls sei in Zylinderkoordinaten gegeben als

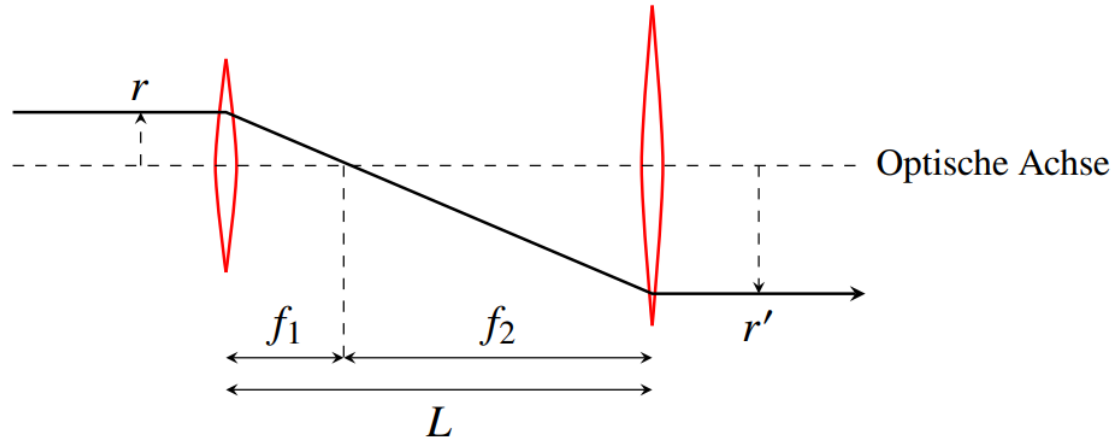
$$\underline{E}(\rho, z, t) = \underline{E}_0 \underline{\psi}(\rho, z) \exp(j(\omega t - kz)) \underline{e}_x.$$

Hierbei beschreibt $\underline{E}_0$ die Feldamplitude, $\underline{\psi}(\rho, z)$ die transversale Feldverteilung des Strahls und der Exponentialterm die räumliche Ausbreitung in z -Richtung und die zeitliche Entwicklung mit t . Da wir den Strahl als rotationssymmetrisch annehmen, ist die transversale Feldverteilung nicht von ϕ abhängig. $\underline{\psi}(\rho, z)$ ist mit der Gouy-Phasenverschiebung $\varphi_G(z) = \arctan(z/z_R)$ gegeben durch

$$\underline{\psi}(\rho, z) = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-j \frac{k\rho^2}{2R(z)}\right) \exp\left(j \varphi_G(z)\right).$$



Aufgabe 13



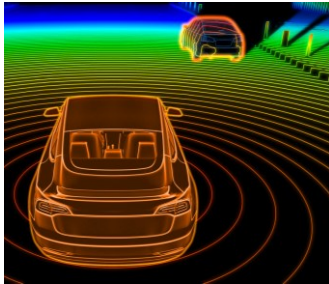
Photonik

- **Optische** Verfahren & Technologien zur Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von **Informationen**
- Pendant zur Elektronik mit Licht

Optische
Kommunikation



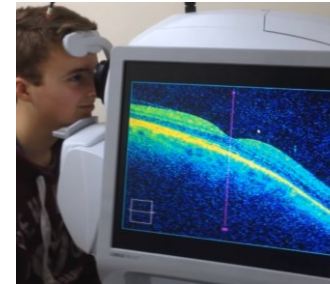
Optische
Messtechnik



Material-
bearbeitung



Medizintechnik



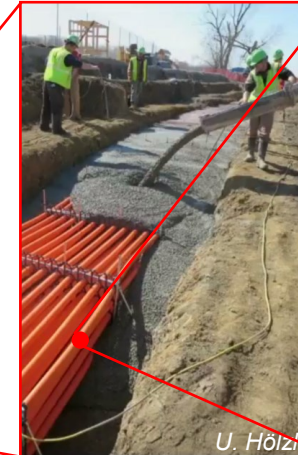
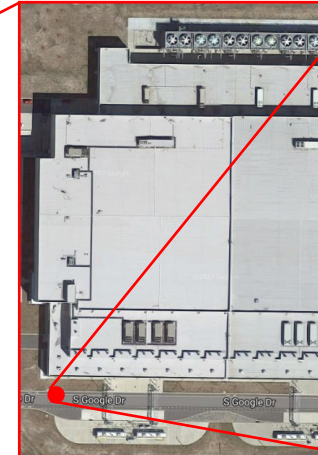
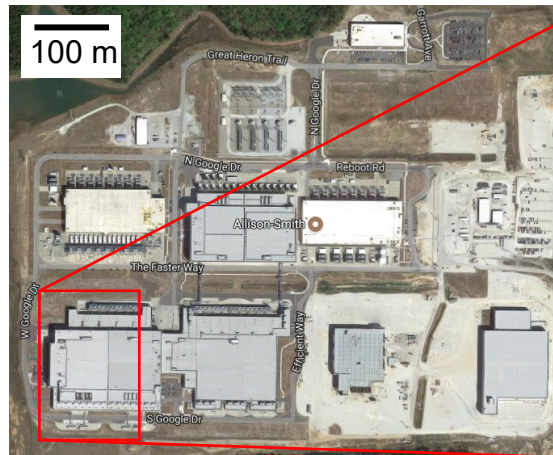
Ultraschnelle
Signalverarbeitung



Photonische Integration

- Analog zur elektronischen Integration im 20. Jhd.
- Integration photonischer Schaltungen
 - Kleinere Bauteile → Chip-Integration
 - Umfassendere Funktionalität
 - Energieeffizienz

Ernsthaft?



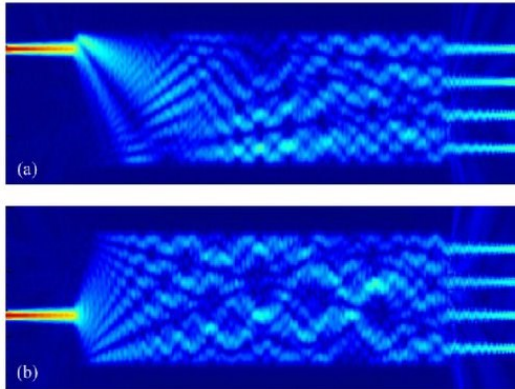
U. Hölzl

U. Hölzle

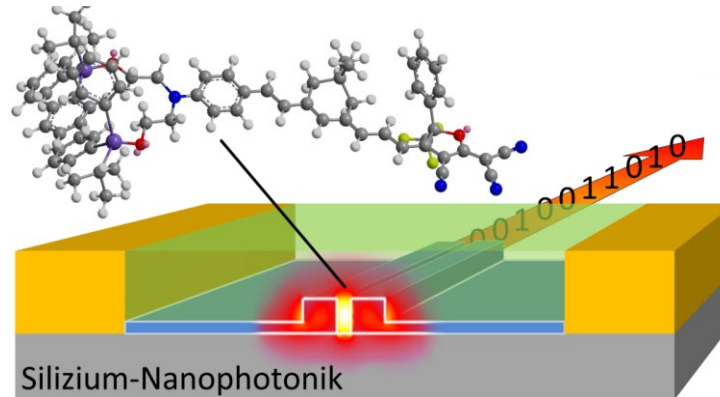
Welleneffekte

- Licht als Welle in Wellenleitern/Bauteilen & Glasfasern
- Feldverteilung durch Lösen der Maxwell-Gleichungen

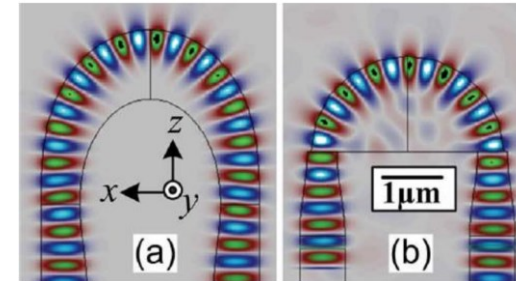
Multimoden-
Interferometer



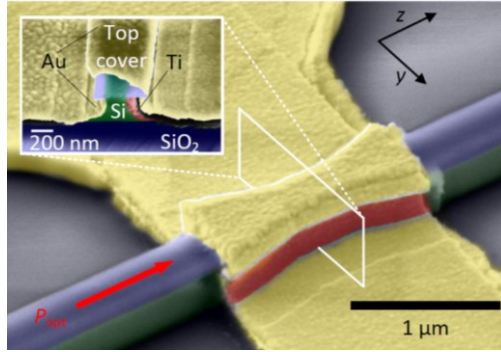
Elektro-Optischer
Modulator



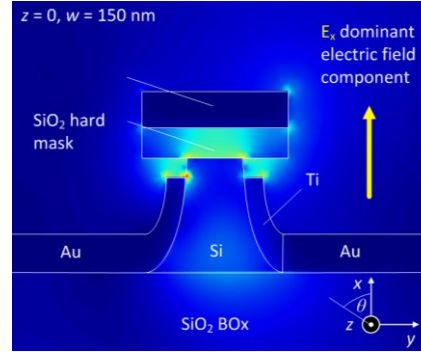
Gebogene
Wellenleiter



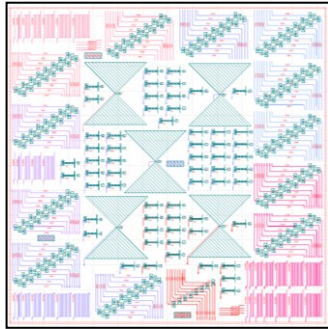
Von der Idee zur Realisierung



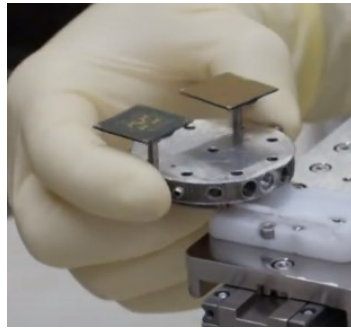
Konzeption



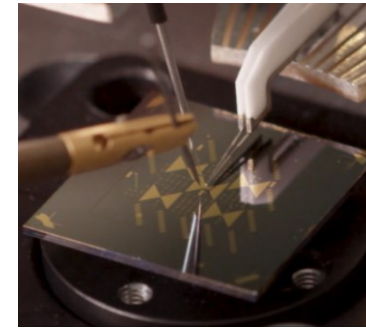
Numerische Simulation



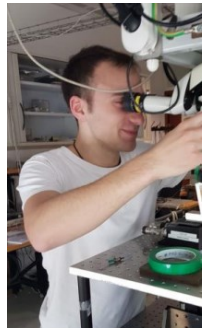
Chipdesign



Fabrikation im Reinraum des IMT (Campus Nord)

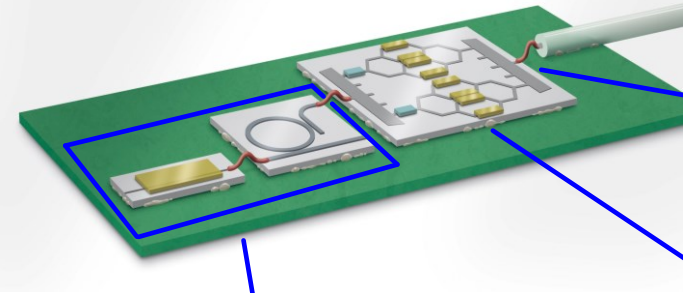


Charakterisierung des Bauteils



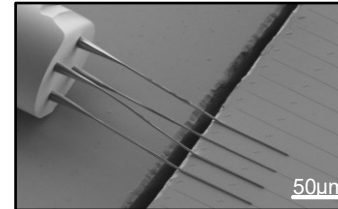
Photonische Integration am IPQ

Optische Kommunikation

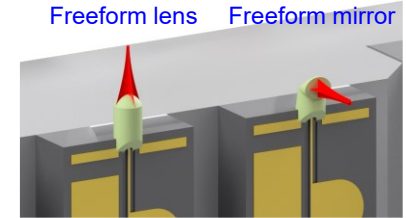


3D-gedruckte
Polymerwellenleiter
und Linsen

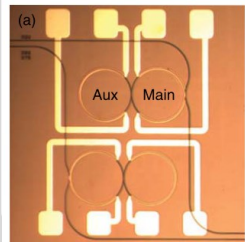
Coupling to (multi-core) fibers



Freeform lens Freeform mirror

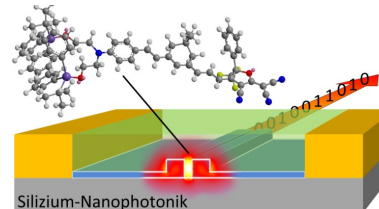


Kammgeneratoren

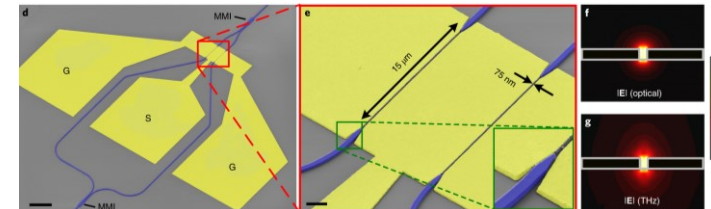


Siliziummodulatoren

Silicon-Organic Hybrid



Plasmonic-Organic Hybrid



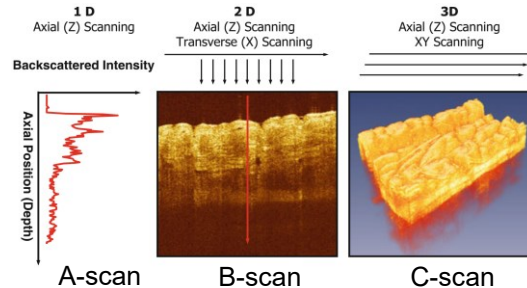
Photonische Integration am IPQ

Optische Messtechnik

Integrierte Lidar-Chips

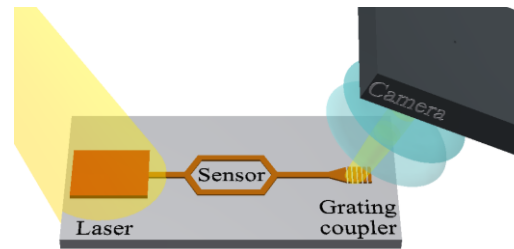


Optische Kohärenztomographie



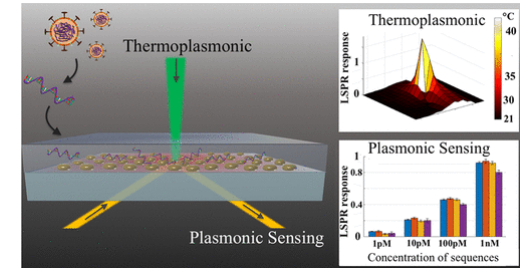
Optische Analytik

Integrierte Sensoren für Vor-Ort-Diagnose



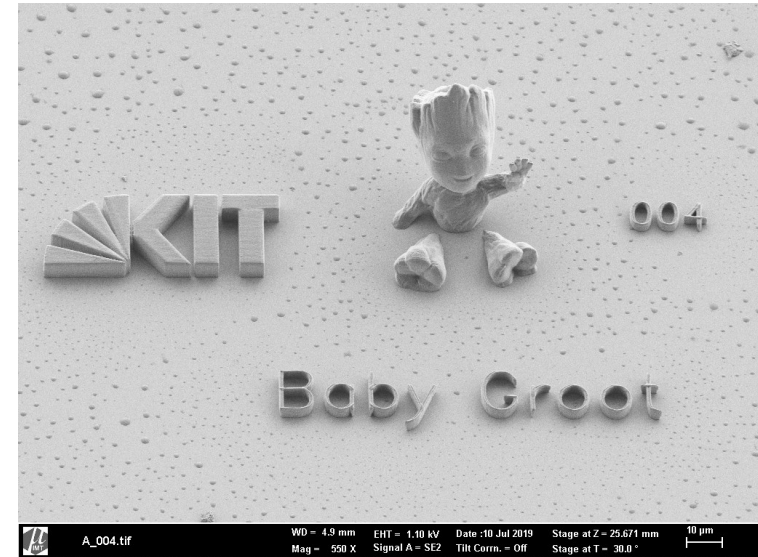
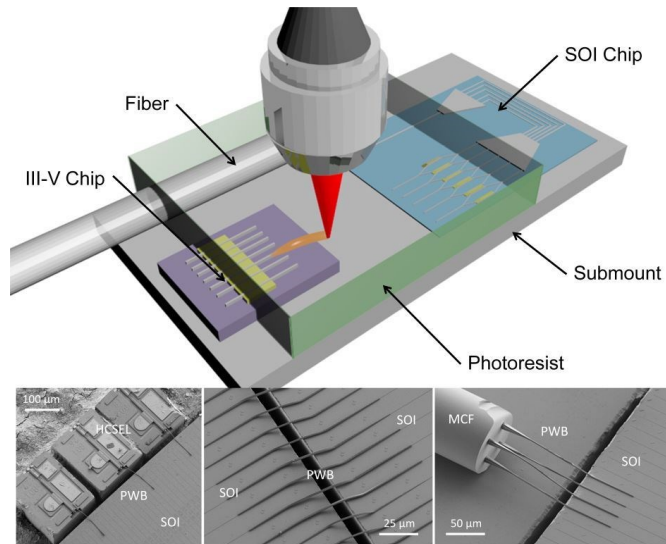
Dual-Functional Plasmonic Photothermal Biosensors for Highly Accurate Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Detection

Guangyu Qiu, Zhibo Gai, Yile Tao, Jean Schmitt, Gerd A. Kullak-Ublick, and Jing Wang*



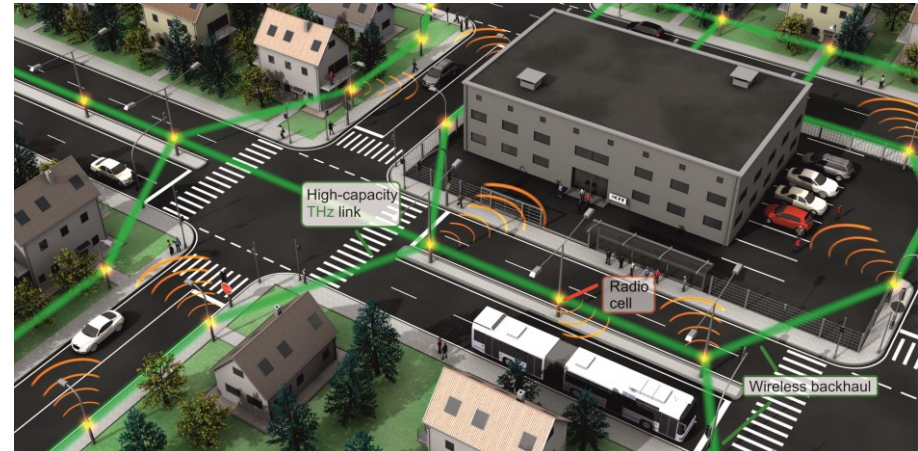
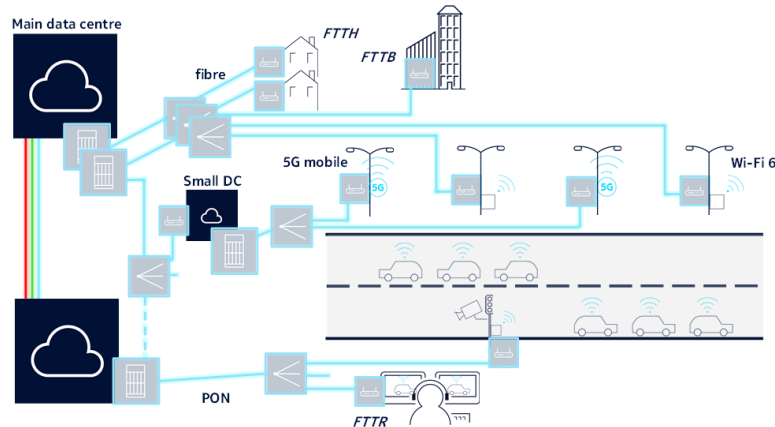
Zwei-Photonen-Lithographie

- Flüssiges Photomaterial härtet aus, wenn es mit UV-Licht bestrahlt wird.
- Da die Lichtleistung im Fokus auf eine geringe Fläche gebündelt ist, härtet an dieser Stelle das Material aus. Dies erlaubt das „3D-Drucken“ von sub-Wellenlängen Strukturen.



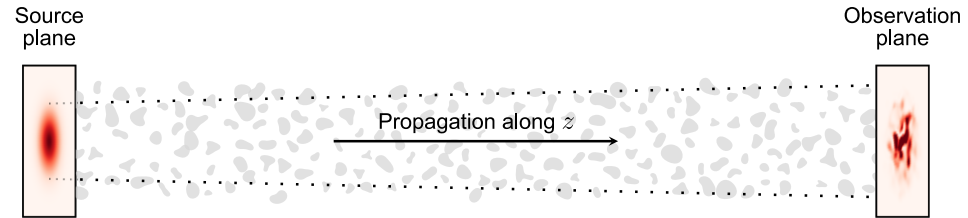
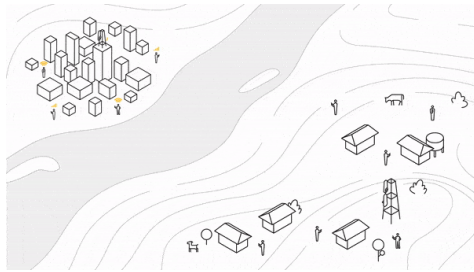
Optische/Terahertz Datenübertragung

- Steigender Bedarf an Datenrate
 - Social Media, Streaming, E-Learning/Meetings, Internet of Things, Industrie 4.0, autonomes Fahren, etc.
- Ein Großteil der Elektrizität wird bis 2030 für die Telekommunikation benötigt
 - Schnellere Datenraten bei gleichzeitig reduziertem Energiebedarf → Chip-Integration
 - Flexiblere Kommunikationsnetze für z.B. die intelligente Stadt der Zukunft



Optische Kommunikationstechnik am IPQ

■ Freiraum Datenübertragung



■ Optische Zugangsnetze mit künstlicher Intelligenz in Städten

