

Scanning Thermal Microscopy

Quantitatives Messen thermischer Leitfähigkeit
mit nm-Auflösung

Verena Leitgeb

Materials Center Leoben (MCL)

www.mcl.at

Scanning Thermal Microscopy

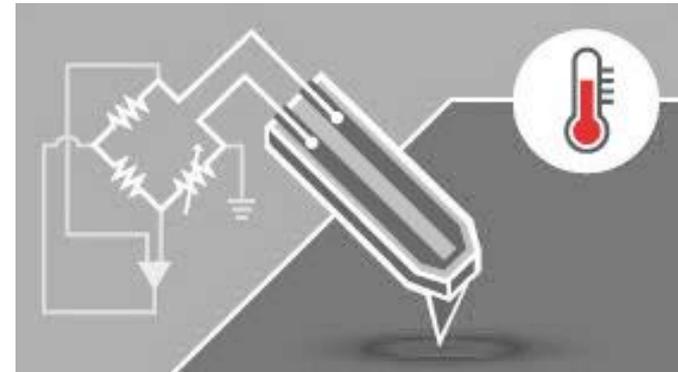
Quantitatives Messen thermischer Leitfähigkeit
mit nm-Auflösung

Inhalt

- Motivation
- Funktionsprinzip SThM
- Quantitatives Messen thermischer Leitfähigkeiten
- Ausblick

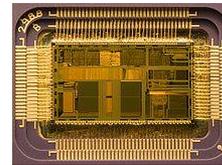
Motivation

- **Temperaturen und thermische Leitfähigkeit im nm-Bereich**



www.parkafm.com

- **Zunehmende Miniaturisierung**
Strukturen im nm-Bereich



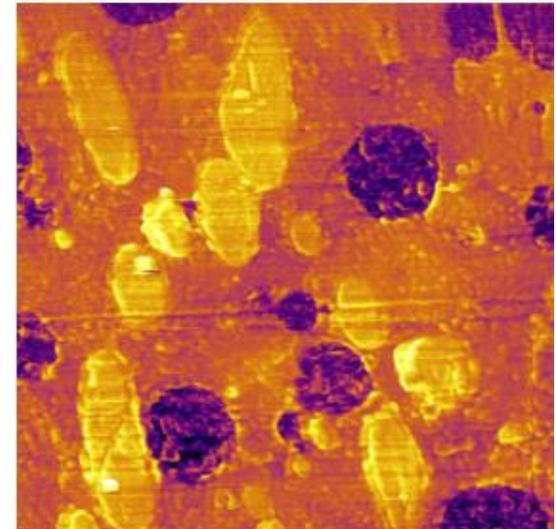
from left to right: <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/658551>
Seoul Semiconductor (SSC) LED Scheinwerfer
<https://www.real.de/product/316617148/>



- **Thermal Management – Neue Fragestellungen**
 - Wärmeableitung in Nanostrukturen
 - Thermische Prozesse an Interfaces
 - Entwicklung neuer Materialien

Motivation

- **Thermische Charakterisierung im nm-Bereich**
 - Charakterisierung und Optimierung nanostrukturierter Materialien
 - Besseres Verständnis Fehlermoden



Scanning Thermal Microscopy of a Ternary Polymer

<https://www.asylumresearch.com/Gallery/Nanomechanics/SThM/SThM2.shtml>

- **Messen thermischer Eigenschaften**

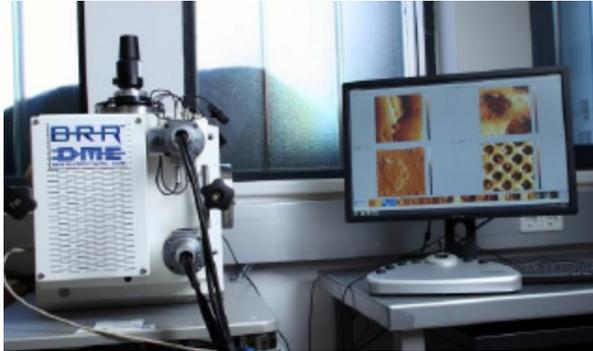
- Infrared Thermography
- Laser Thermo-Reflectance
- Micro-Raman Spectroscopy



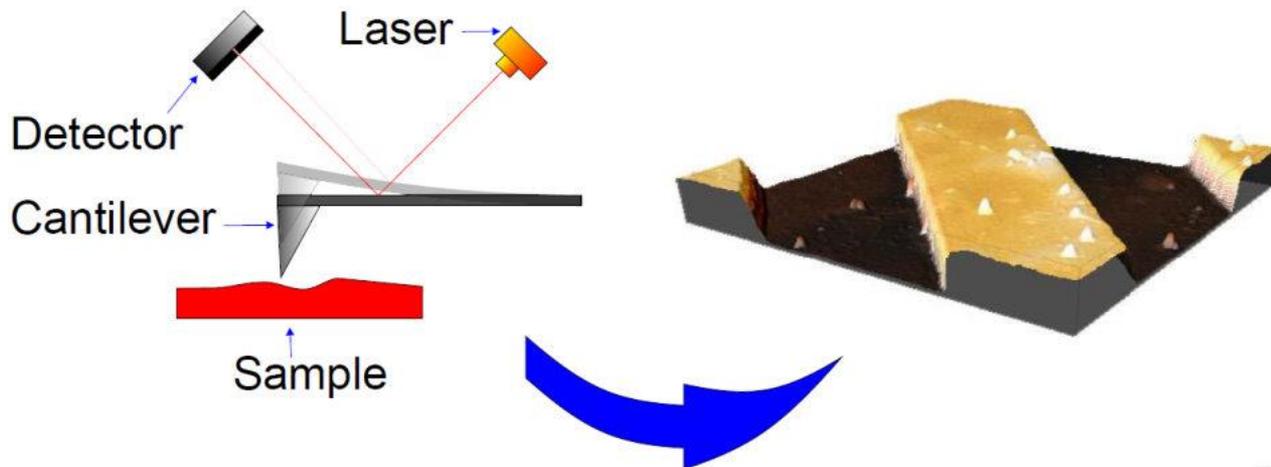
optisches Auflösungslimit
> 200 nm

- **SThM: laterale (in-plane) Auflösung < 30 nm**

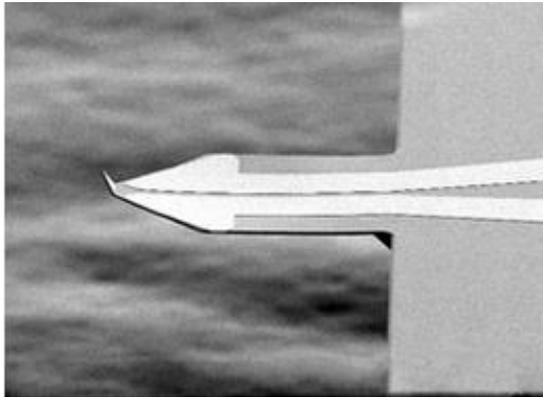
Funktionsprinzip



- Abrastern der Oberfläche mit nm-scharfer Spitze
- Aufnahme der Biegung des Cantilevers
- Informationen über Oberflächenbeschaffenheit
 - Topographie
 - Elektrische Eigenschaften
 - **Thermische Eigenschaften**



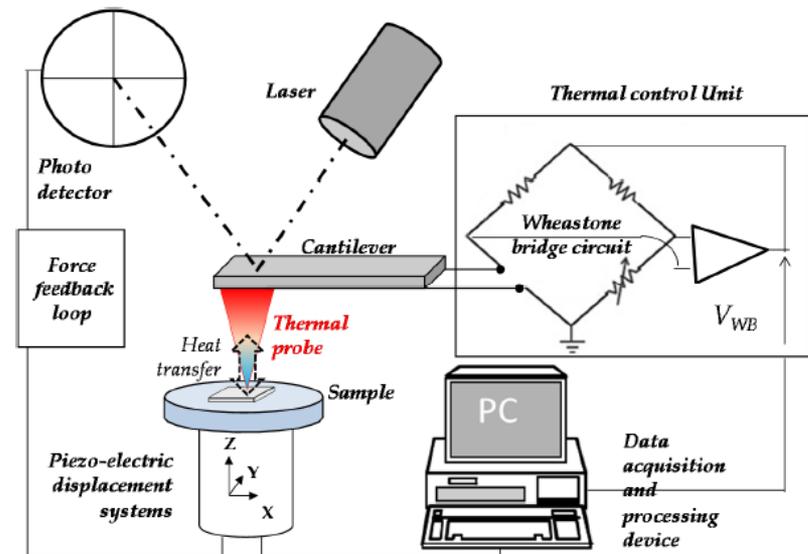
Funktionsprinzip



SEM images of Nanolithographed SThM probes from Bruker.

- **Resistive Messspitze** Teil von Wheatstonescher Brücke
- Frequenz-modulierte Messungen
-> quantitative Ergebnisse
- Nicht möglich mit Thermoelement

- SiN Cantilever mit nanostrukturierten Leiterbahnen
- Elektrischer Widerstand von elektrisch leitfähiger (metallener) Messspitze korreliert mit Temperatur



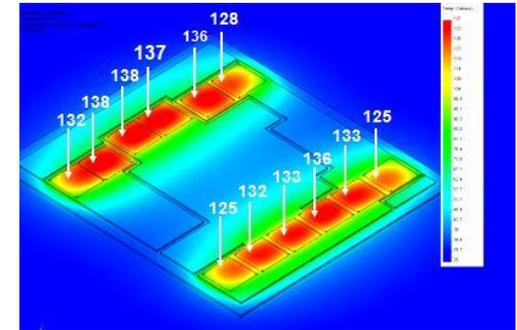
General layout of a SThM AFM-based system.

Gomès S., Assy A., and Chapuis P.-O., "Scanning Thermal Microscopy: a review", 2015, Physica Status Solidi (a) 212 pp 477-494.

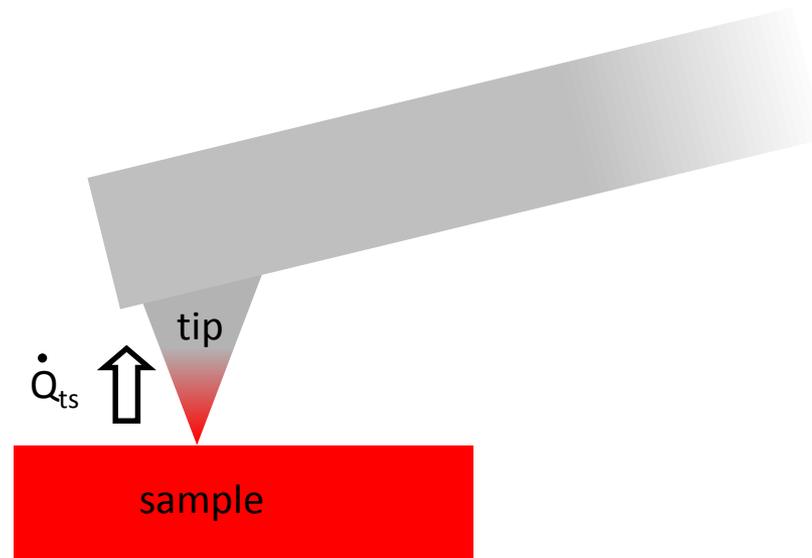
Funktionsprinzip

Operationsmoden – Passiver Modus

- Thermometrie: Temperaturmaps
- Sehr kleiner elektrischer Strom an Messspitze
 - > Messen elektrischer Widerstand
 - > Minimale Joule-Erwärmung
- Wärme von Mess-Sample (Probe) zur Messspitze
 - > Änderung Widerstand der Messspitze



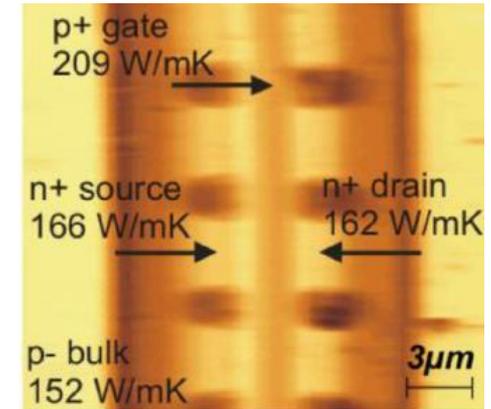
<http://www.powerguru.org/heat-transfer-in-power-semiconductor-devices/>



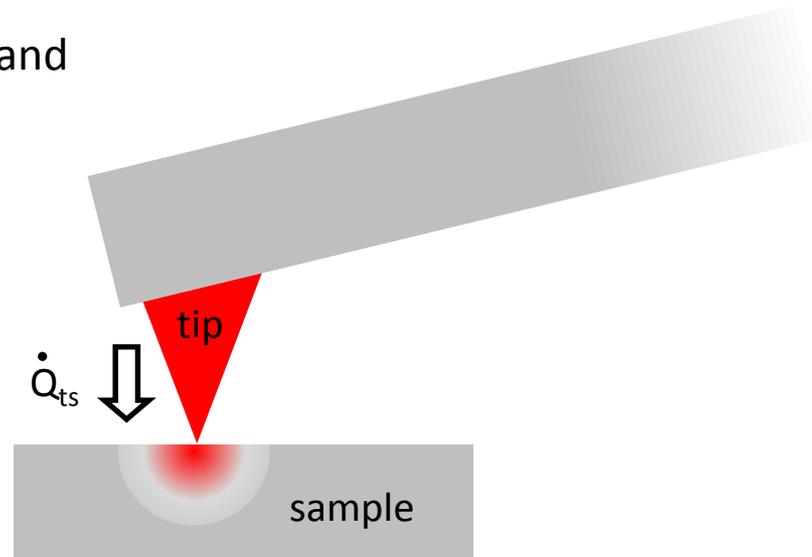
Funktionsprinzip

Operationsmoden – Aktiver Modus

- Messen thermischer Leitfähigkeit
- Höherer elektrischer Strom durch Messspitze
-> Heiße Spitze als Nano-Wärmequelle
- Thermische Leitfähigkeit von Sample bestimmt
Entwärmung der Messspitze
- Temperatur Messspitze über
Messung elektrischer Widerstand



Quantitative thermal conductivity measurements of different doped regions in an n-MOSFET. Image taken from T.H.Lee et al., 27th International Symposium for Testing and Failure Analysis, 2001.



Quantitatives Messen thermischer Leitfähigkeiten

Die 3ω Methode

D. G. Cahill, Rev. Sci. Instrum., 61, 802-8, 1990.
G. Fiege et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 32 No 5 (7 March 1999) L13-L17.

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t) \quad I \dots \text{Strom durch Messspitze}$$

$$P(t) = I^2 \cdot R = I(t)^2 \cdot R = \frac{I_0^2 R}{2} \cdot (1 + \cos(2\omega t)) \rightarrow T(t) = T_0(t) + \Delta T \cdot \cos(2\omega t + \varphi)$$

Widerstand R hängt ab von Temperatur T :

$$U(t) = R(t) \cdot I(t) \quad \dots = R_0 I_0 \cos(\omega t) + \frac{\Delta R I_0}{2} \cdot [\cos(3\omega t + \varphi) + \cos(\omega t + \varphi)]$$

3ω Anteil der Spannung:

$$U_{3\omega} = \frac{\Delta R I_0}{2} = \frac{\alpha \cdot R_0 \cdot \Delta T \cdot I_0}{2}$$

$U_{3\omega}$ Anteil der Spannung ist proportional zu Temperaturänderung ΔT

Unter Berücksichtigung $\Delta T = \frac{P}{\pi} \lambda [C - \ln(\omega)]$

Thermische Leitfähigkeit λ als Proportionalitätsfaktor

$$\frac{U_{3\omega_1} - U_{3\omega_2}}{\ln(\omega_1) - \ln(\omega_2)} = \frac{1}{4} I_0 \cdot \frac{dR}{dT} \cdot \frac{P}{\pi \cdot \lambda}$$

Messe bei unterschiedlichen Frequenzen um λ zu bestimmen

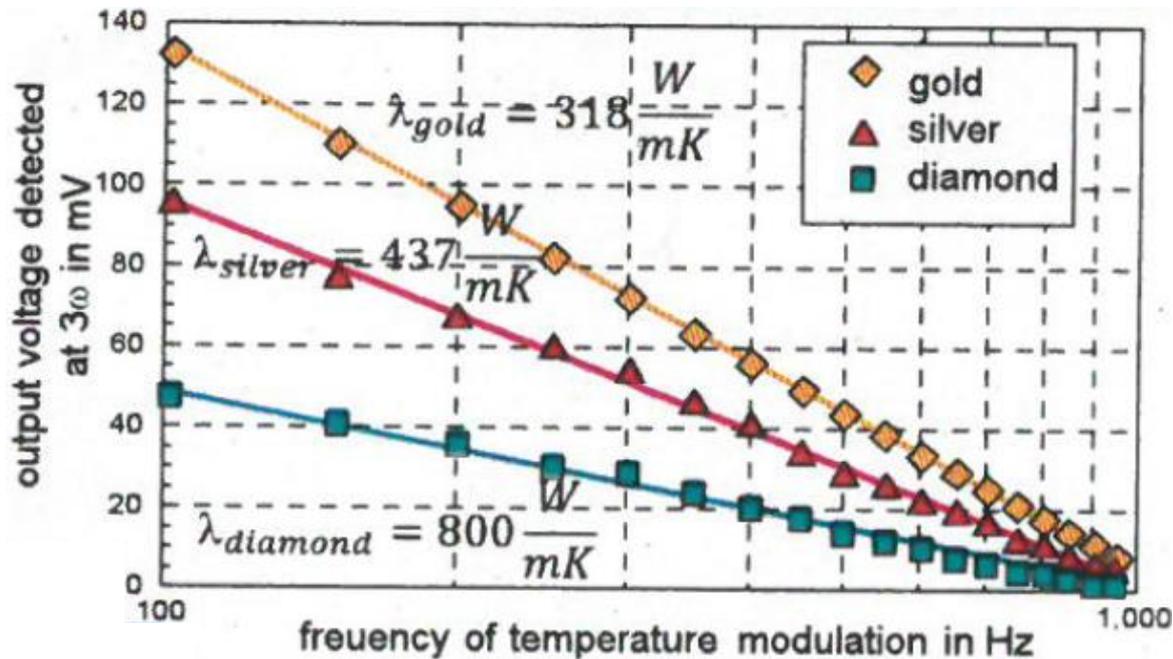
Quantitatives Messen thermischer Leitfähigkeiten Die 3ω Methode

Thermische Leitfähigkeit λ als Proportionalitätsfaktor

$$\frac{U_{3\omega_1} - U_{3\omega_2}}{\ln(\omega_1) - \ln(\omega_2)} = \frac{1}{4} I_0 \cdot \frac{dR}{dT} \cdot \frac{P}{\pi \cdot \lambda}$$

$\frac{dR}{dT}$... Temperaturkoeffizient der Messspitze

P ... Leistung von Messspitze in Sample

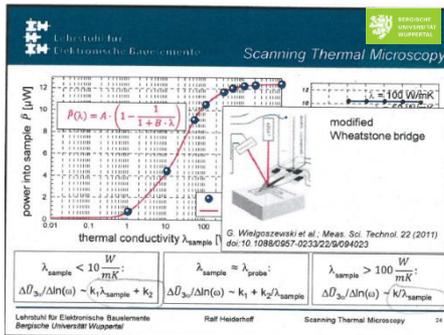


G. Fiege et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 32 No 5 (7 March 1999) L13-L17.

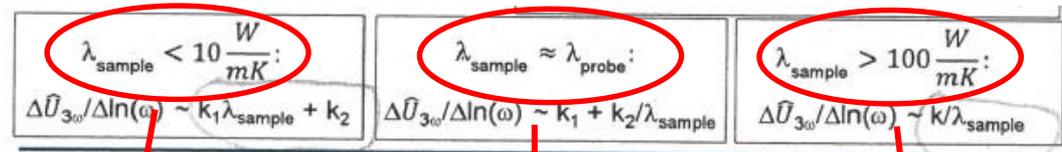
Quantitatives Messen thermischer Leitfähigkeiten Die 3ω Methode

- Leistung P hängt ab von
- Messspitze
 - Leitfähigkeit Sample (zu untersuchende Probe)

Kalibration Messspitze: Referenz-Sample mit ähnlicher thermischer Leitfähigkeit λ



Wählen des passenden Messbereichs



Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
Bergische Universität Wuppertal

Ralf Heiderhoff

Scanning Thermal Microscopy 24

$$\frac{U_{3\omega_1} - U_{3\omega_2}}{\ln(\omega_1) - \ln(\omega_2)}$$

$$\sim k_1 \lambda_{\text{sample}} + k_2$$

$$\sim k_1 + k_2 / \lambda_{\text{sample}}$$

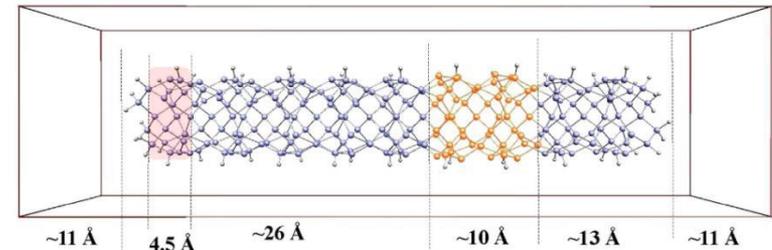
$$\sim k / \lambda_{\text{sample}}$$

→ Leistung P abhängig von λ_{sample}

Quantitatives Messen thermischer Eigenschaften mit sub-30 nm Auflösung

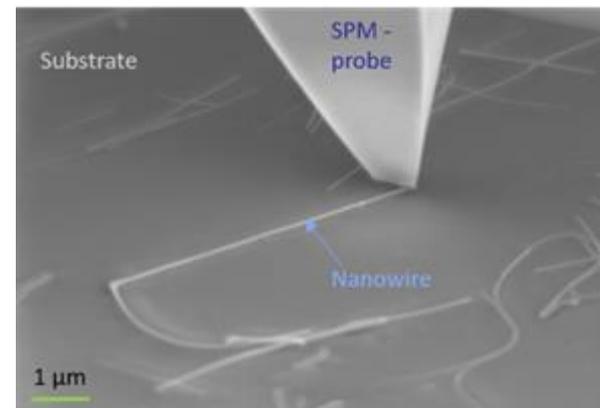
Ausblick – SThM Anwendungen am MCL

- Charakterisierung thermischer Eigenschaften an Interfaces von Dünnschichtsystemen
- Gleichzeitige Aufnahme Topographie und thermische Eigenschaften als Input für Modellierung thermischer Transport via ab-initio Molecular Dynamic



Simulation cell representing layered system. Gibbons, Bebek, Kang, Stanley, and Estreicher, J. of Applied Physics 118 (2015).

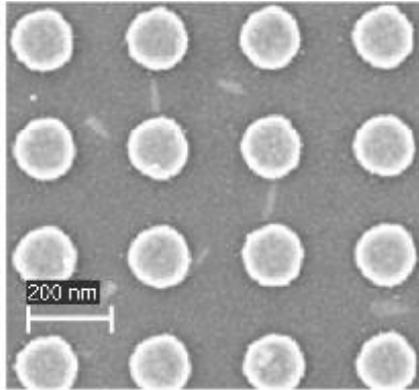
- Thermische Charakterisierung von Nanowires und Nanopartikel als Bestandteil neuer Sensoren
- Kombination SThM + SEM



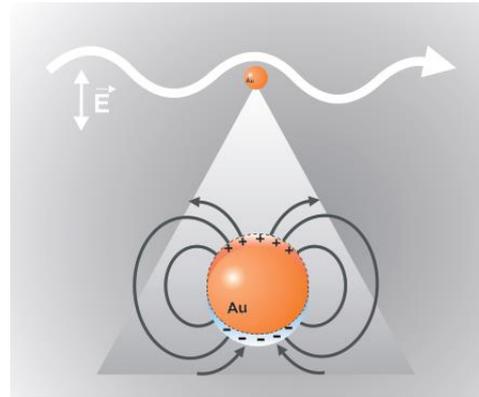
SEM image of SPM probe on SnO₂ Nanowire. Leitgeb, Fladischer, Hitzel, and Köck, submitted to: Microelectron. Eng., 2018.

Ausblick – SThM Anwendungen am MCL

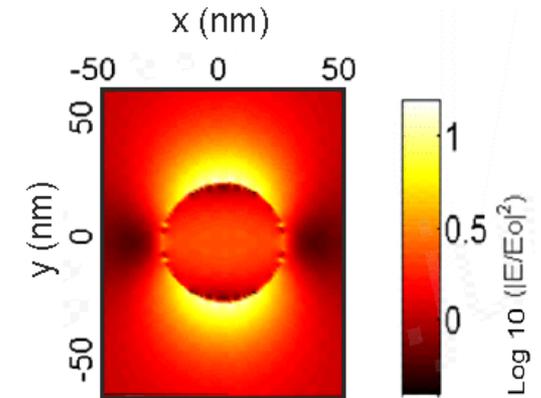
- Thermoplasmonik



SEM image of Au nanodisks

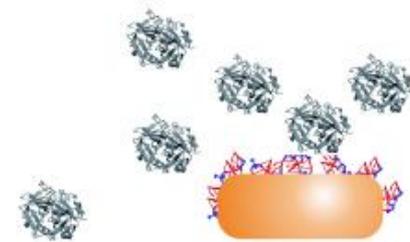


Excitation of plasmonic particle by incident light field



Leitgeb, Trügler, Köstler, Krug, Hohenester, Hohenau, Krenn, and Leitner, *Three dimensional sensitivity characterization of plasmonic nanorods as refractometric biosensors*, *Nanoscale*, **2016**, 8, 2974-2981.
Häfele, Trügler, Köstler, Hohenester, Hohenau, Krenn, and Leitner, *Local refractive index sensitivity of gold nanodisks*, *Opt. Express*, **2015**, 23, 10293-300.

- Plasmonische Partikel als Nano-Heatsources
- Biosensoren mit Temperaturkontrolle



Plasmonic particle as biosensor

- Weitere Gebiete?

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Acknowledgement

Financial support by the Austrian Federal Government (in particular from Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie and Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft) represented by Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH and the Styrian and the Tyrolean Provincial Government, represented by Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH and Standortagentur Tirol, within the framework of the COMET Funding Programme is gratefully acknowledged