

Scanning Nearfield Optical Microscopy

SNOM / NSOM / Optische Nahfeldmikroskopie

Leonard Burtscher

Seminarvortrag am 16. Januar 2004

Motivation

Seit der ersten Verwendung eines Lichtmikroskops für biologische Untersuchungen durch van Leeuwenhoek im 17. Jahrhundert wurde die Mikroskopie ständig weiterentwickelt. Doch auch die Verwendung stark verbesserter Linsen, zahlreicher Kontrastverfahren und spezieller Medien zur Steigerung der numerischen Apertur vermochten die theoretische Auflösungsgrenze (Abbe-Theorie, [7]) eines Lichtmikroskops von etwa $\frac{\lambda}{2}$ nicht zu brechen.

Im Jahr 1928 schlug daher Edward Hutchinson Synge[9] vor, das sog. Nahfeld für die Steigerung der Auflösung des Lichtmikroskops zu verwenden. Das Nahfeld ist charakterisiert durch Größenordnungen, die viel kleiner als die verwendete Wellenlängen sind, typischerweise $< \frac{\lambda}{10}$. Ein anschauliches Beispiel für das Nahfeld ist das Stethoskop eines Arztes, mit dem das Herz untersucht wird. Mit diesem Gerät ist es dem Arzt möglich, das Herz auf ca. 10 cm genau zu lokalisieren obwohl die Wellenlänge (Bassfrequenzen von etwa 100 Hz, also $\frac{c}{f} \approx 3m$) deutlich größer ist. Am Beispiel des Stethoskops kann man gut die für die SNOM wesentlichen Parameter aufzeigen. Diese sind:

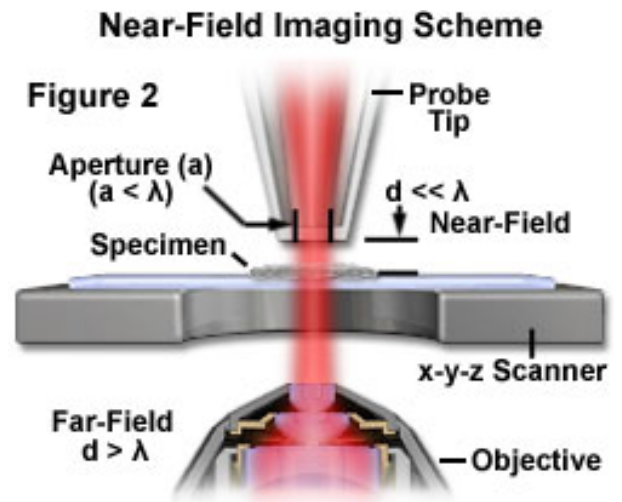
- Im Verhältnis zur Wellenlänge kleine Sonde (Stethoskop)
- Sonde nahe an Probe (Körper)
- Abrastern der Probe

Für elektromagnetische Wellen im optischen Bereich ($\lambda \approx 500nm$) muss man mit Größenordnungen von 50 nm rechnen. Instrumentell war eine Nahfeld-Optik im Jahre 1928 daher noch nicht möglich: Die ersten Realisierungen einer Nahfeld-Optik gab es im Jahr 1972 mit Mikrowellen.

Weitere Fortschritte in der Nano-Mechanik – vorangetrieben vor allem durch die Erfindung des Raster-Tunnel-Mikroskops (STM) durch Binnig/Rohrer im Jahr 1981 – führten im Jahre 1984 zum ersten

SNOM mit sichtbarem Licht (Pohl, Denk, Lanz [6]). Heute sind SNOMs ab ca. 130.000 € erhältlich.

Idee



Prinzip der optischen Nahfeldmikroskopie

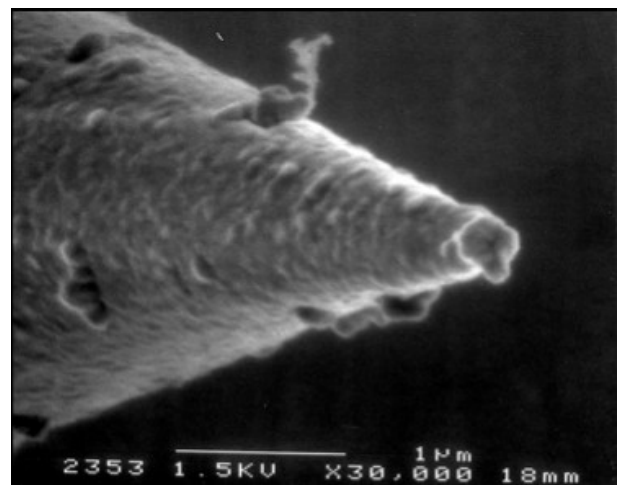
Die Auflösung der „normalen“ Optik (Fernfeldoptik) ist durch Beugungseffekte auf Auflösungen von der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge begrenzt. Im Nahfeld treten diese Effekte noch nicht auf, dementsprechend mehr Information steckt in diesem sog. „forbidden light“. Um dieses nicht-propagierende Licht in Fernfeldlicht, das von gewöhnlicher Mikroskop-Optik registriert werden kann, zu verwandeln, benötigt man eine Nano-Sonde, die das Licht aus dem Nahfeld durch Streuung in propagierendes Fernfeldlicht verwandelt.

Instrumentelle Realisierung

Bei der Umsetzung in ein Instrument sind vor allem folgende Komponenten von prinzipieller Bedeutung:

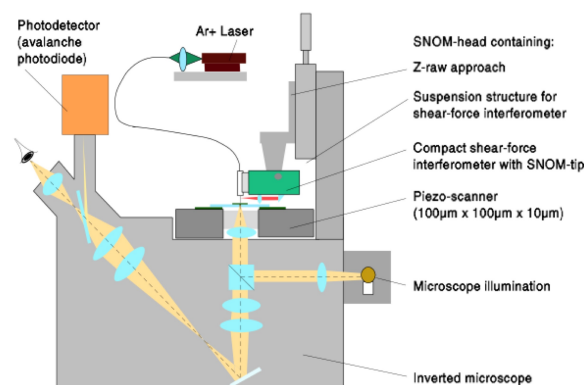
- Laser ($P \approx 1mW$) zur Beleuchtung
- stabile Aufhängung (Niesen erzeugt Vibrationen mit einer Amplitude von etwa $1\mu m!$)
- Spitze mit möglichst kleinem Loch (typisch: $30nm$). Moderne SNOM-Spitzen werden mit chemischen Ätzverfahren aus Glasfasern hergestellt und anschließend zur Lichtbegrenzung mit einem Metall (meist Aluminium wegen der geringen optischen Eindringtiefe von ca. $6nm$) bedampft. Die SNOM-Spitze war lange Zeit die größte technische Hürde für die Umsetzung der SNOM
- nm -genaue Abstandsregelung (diverse Verfahren)
- nm -genau xy-Positionierung (Piezo-Mechanik)
- Detektor (Photomultiplier und lichtempfindliche CCD)

ter als bei Bildern, die im Transmission-Modus aufgenommen wurden.



Eine SNOM-Spitze (chemisch geätzt).

Bild: Institute of applied optics, Lausanne (CH)



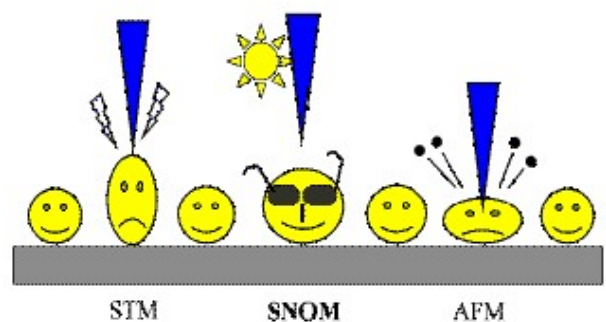
SNOM-Aufbau

Bild: Institute of applied optics, Lausanne (CH)

Genauso wie bei der Lichtmikroskopie gibt es auch bei der optischen Nahfeldmikroskopie verschiedene Betriebsarten. Bei durchsichtigen Proben wird der technisch am besten umsetzbare „Transmission mode“ verwendet (Beleuchtung durch Nahfeldsonde von oben, Registrierung des transmittierten Lichts von unten), bei nicht-durchsichtigen Proben wird der „Reflection mode“ verwendet. Dabei wird entweder die Nanosonde zur Beleuchtung verwendet und das reflektierte Licht mit einem konventionellen Mikroskop betrachtet oder mit Fernfeld-Licht beleuchtet und die Reflexion mit der Nano-Sonde registriert. Bei Reflektions-Bildern ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis üblicherweise drastisch schlech-

Überblick Nano-Optik

Super-scharfe Aufnahmen von einzelnen Molekülen oder gar Elektron-Wellenfunktionen kann die SNOM (bislang) nicht liefern. Die Auflösung der SNOM steht mit derzeit etwa $30nm$ hinter denen verwandter nano-optischer Technologien wie Raster-Tunnel-Mikroskopie (STM, ca. $0,2nm$) oder Raster-Kraft-Mikroskopie (AFM, ca. $5nm$) deutlich zurück. Die Vorteile der SNOM liegen in ihrer breiten Anwendbarkeit. SNOM ist eine nicht-invasive Methode und daher gerade für biologische Objekte interessant, die meistens bereits bei der Präparation für AFM / STM – spätestens aber nach der Untersuchung – tot sind.

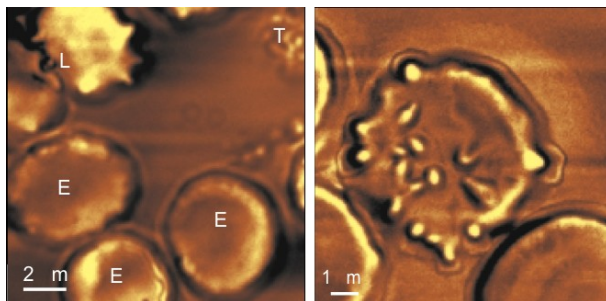


Während bei STM und AFM auf die Atome eine Kraft ausgeübt wird, ist die SNOM nicht-invasiv.

Bild: Jasco Ltd. (UK)

Ergebnisse

Das Hauptanwendungsgebiet der SNOM sind also biologische oder andere sensible Proben, die bei einer Untersuchung mit anderen (besser-auflösenden) nano-optischen Verfahren zerstört würden. Auf dem Bild sind menschliche Blutzellen (E: Erythrozyten, L: Leukozyten, T: Thrombozyten) zu sehen. Mit konfokaler Lasermikroskopie (links), die als beste konventionelle (d.h. Fernfeld-) Mikroskopier-Technik gilt, sind vom Leukozyten (L) nur Umrisse erkennbar, mit SNOM (rechts) sind sogar die kleinen Pseudopodien erkennbar. Der Maßstab ist falsch und müsste in μm angegeben sein.



Beschreibung siehe Text
Bild: Jasco Ltd. (UK)

Anwendungen

Eine schon von vielen Elektronik-Firmen erkannte Anwendungsmöglichkeit der SNOM liegt in der weiteren Verkleinerung der Strukturen von optischen Speichermedien. Derzeitige Speicherdichten von etwa 1 (CD-ROM) bis 10 (DVD) GBit/Inch² könnten mit nahfeld-optischen Verfahren auf über 100 GBit/Inch² vergrößert werden. Erste Experimente dazu sind bereits erfolgreich durchgeführt worden[2].

Eine weitere Anwendung besteht in der Nahfeld-Lithografie für die Produktion von Computer-Chips.

Ausblick

Um die Auflösung der SNOM zu steigern werden neuartige aperturlose Nano-Proben untersucht. Da-

mit soll das prinzipielle Auflösungslimit von etwa 12 nm (doppelte Eindringtiefe optischen Lichts in die Aluminium-Beschichtung) umgangen werden.

Immer beliebter werden Kombinationen von mehreren Mikroskop-Typen[1], die die gleichzeitige Untersuchung der Probe auf zahlreiche Merkmale hin erlauben.

Literatur

- [1] A. Lewis et. al. Near-field optics: from subwavelength illumination to nanometric shadowing. *Nature Biotechnology*, 21(11):1378–1386, 2003.
- [2] F. Kiendl et. al. Optimierung konventioneller und magnetooptischer Speichermedien mittels optischer Rasternahfeldmikroskopie. *BMBF-Förderkennzeichen 13N6585A/7*, 2001.
- [3] MPI für Biochemie (Martinsried). <http://www.biochem.mpg.de/baumeister/spm/home.html>.
- [4] Omicron GmbH. <http://www.omicron.de/>.
- [5] Florida State University; National High Magnetic Field Laboratory. Umfangreiche Website rund um Mikroskopie. <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/techniques/nearfield/nearfieldhome.html>.
- [6] D. W. Pohl; W. Denk; M. Lanz. Optical stethoscopy: image recording with resolution $\lambda/20$. *Applied Physics Letters*, 44(7):651–653, 1984.
- [7] D. Meschede, editor. *Gerthsen Physik*. Springer, 2002.
- [8] Michael A. Paesler; Patrick J. Moyer. *Nearfield Optics*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [9] E. H. Synge. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region. *Philosophical Magazine*, 6:356–262, 1928.
- [10] Universität Ulm. Verständliche Einführung in SNOM. <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/SNOMWeb/snom/Nahfeldoptik/snom.html>.
- [11] E. Betzig; P. L. Finn; J. S. Weiner. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy. *Applied Physics Letters*, 60(20):2484–2486, 1992.