

“Large scaling scanning microscope”. Demonstratiemodel Near-Field Scanning Optical Microscope (NSOM).

Onderzoek van onderwijs van Erwin Bosma, ter afsluiting van de master Science
Education and Communication-specialisatie Science Education Natuurkunde.



ELAN instituut voor Lerarenopleiding, Wetenschaps- en techniekcommunicatie &
Onderwijspraktijk.

1^e begeleider: Dr. J.T. van der Veen

2^e begeleider: Dr. Ir. H.J. Pol

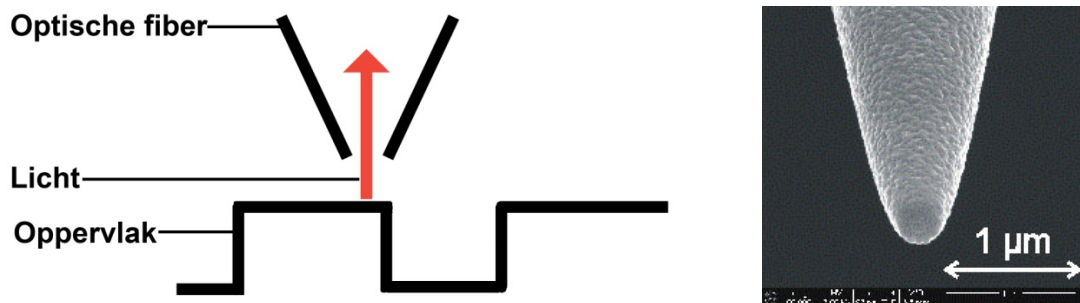
augustus 2012

Black box

Vaak is een wetenschappelijke opstelling niet inzichtelijk voor het algemene publiek. Een opstelling wordt dan meestal gezien als een zwarte doos. De wetenschapper drukt een paar knopjes in en na verloop van tijd komt er een plaatje tevoorschijn. Wat er precies gemeten wordt en hoe dat gedaan wordt is dan niet bekend. In dit artikel wordt een demo-opstelling beschreven, die gebouwd is als bacheloropdracht bij de vakgroep Optical Sciences van de Universiteit Twente. Na deze bacheloropdracht is er vanuit Elan (instituut voor Lerarenopleiding, Wetenschaps- en techniek-communicatie & Onderwijspraktijk, Universiteit Twente) gekeken wat deze opstelling in het onderwijs kan betekenen. Hieruit is het artikel "Large scale scanning probe microscope: Making the shear-force scanning visible." (Bosma, Offerhaus et al. 2010)(Bijgevoegd als bijlage) ontstaan, wat gepubliceerd is in het blad *American Journal of Physics* van de *American association of physics teachers*. In dit verslag zal kort in worden gegaan op de techniek van NSOM en shear-force feedback, daarna wordt kort uitgelegd hoe de demo-NSOM shear-force feedback demonstreert en wordt er besproken wat de mogelijkheden van deze opstelling zijn in het voorgezet onderwijs.

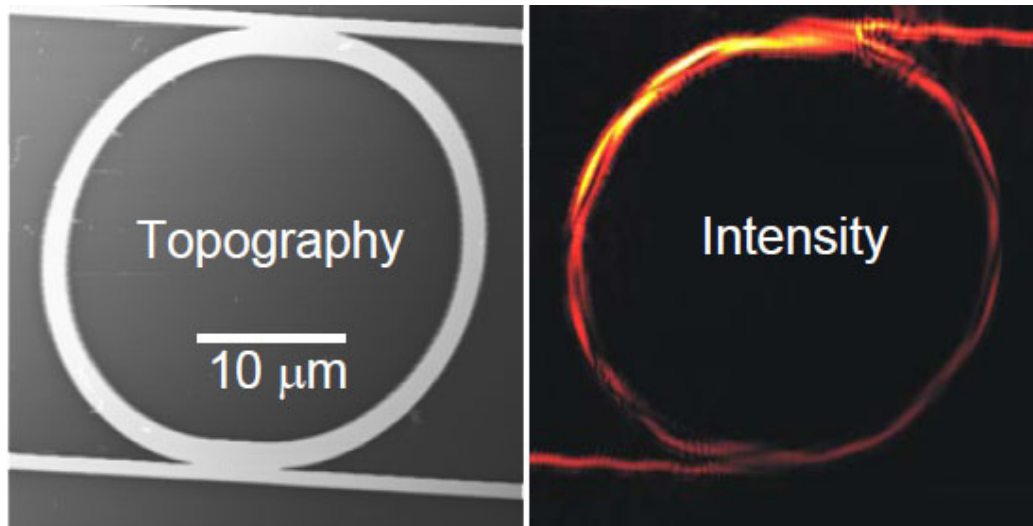
Near-field Scanning Optical Microscopy (NSOM)

Één van de expertise gebieden van de vakgroep Optical Sciences is *Near Field Scanning Optical Microscopy* (NSOM)(Betzig, Trautman et al. 1991; Karrai and Grober 1995; Rensen 2002; Jose, Segerink et al. 2011). Bij deze techniek wordt er met een speciaal geprepareerde optische fiber een oppervlak afgetast (Figuur 1).



Figuur 1: Links: Schematische werking NSOM. Rechts: Speciaal geprepareerde NSOM-fiber.

Met deze techniek kan tegelijkertijd de optische informatie als de topografische kenmerken van een oppervlak in kaart worden gebracht.



Figuur 2: NSOM metingen, links topografisch en rechts optisch (Gersen, Klunder et al. 2004).

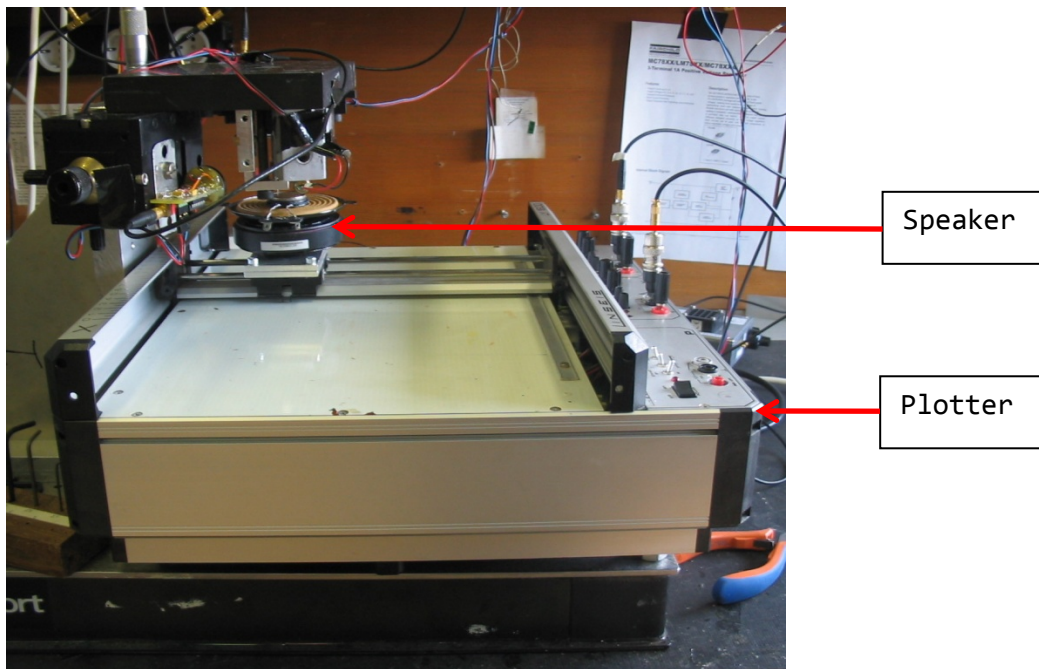
De topografische gegevens worden verkregen door gebruik te maken van “shear force feedback”. De optische fiber zit bevestigd aan een stemvork, die wordt aangedreven op zijn eigenfrequentie. De fiber wordt verplaatst over het te meten oppervlak, wanneer de optische fiber dicht bij het oppervlak komt wordt de trilling van de stemvork beïnvloed. Door deze beïnvloeding te gebruiken als feedback signaal kan de naald op een vaste hoogte boven het oppervlak gehouden worden. Met dit feedback signaal wordt er uiteindelijk een topografisch beeld opgebouwd. Door op elke plek ook de hoeveelheid licht te meten kan er bestudeerd worden hoe licht zich gedraagt in materialen (Figuur 2).

Om te zorgen dat aan geïnteresseerden duidelijker gemaakt kon worden hoe deze shear-force feedback werkt is een demo-opstelling gemaakt. Aangezien de benodigde natuurkundige kennis beperkt is om de fysische eigenschappen te begrijpen (binnen eindexameneisen natuurkunde havo en vwo), is er ook onderzocht of deze opstelling geschikt is voor het voorgezet onderwijs en voor beginnende studenten aan HBO's/Universiteiten. Vanuit de vakgroep waren enkele ontwerpeisen:

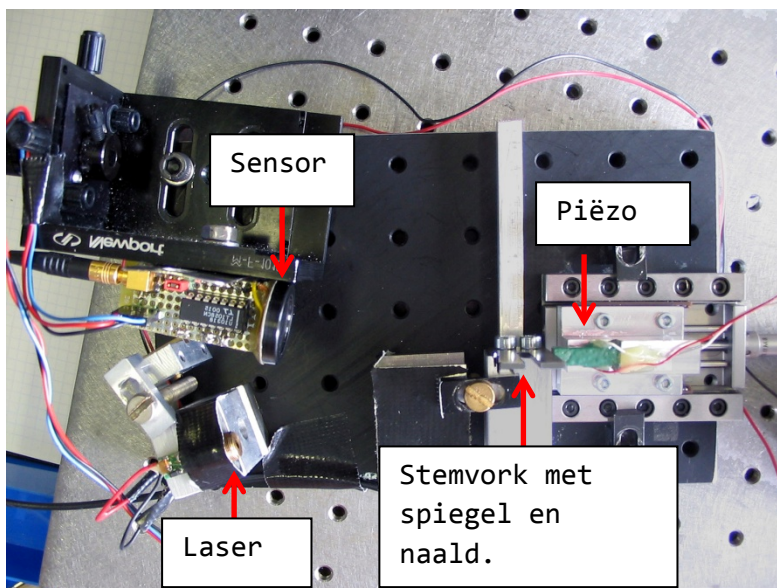
- sangebied ter grote van euromunt
- stemvork in hoorbaar frequentiedomein
- zelfde software als originele opstelling
- +/- factor 1000 groter

Demo-NSOM

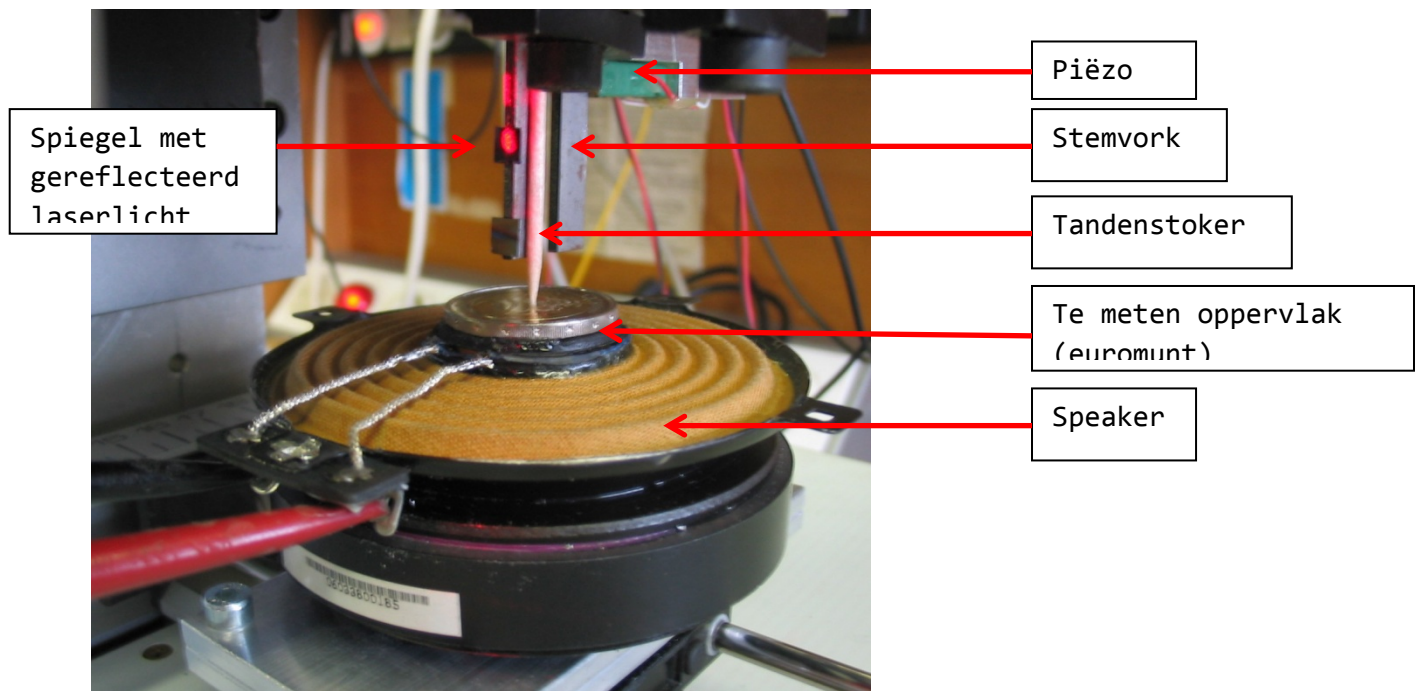
Het is belangrijk om te weten bij de demo-opstelling dat deze alleen de topografische informatie van een oppervlak kan meten, doordat er geen optisch gevoelige naald wordt gebruikt (De naald bestaat bij de demo-NSOM uit een houten tandenstoker.). Uiteindelijk is er bij het demomodel gebruik gemaakt van een plotter voor de beweging in de x,y-richting en een speaker voor de beweging in de z-richting (Figuur 3). De stemvork (+/- 6kHz) wordt aangedreven door middel van een piëzoelektrisch kristal of via magnetische excitatie. De trilling wordt gemeten door met een laser op een kleine spiegel te schijnen die op de stemvork gemonteerd zit. Door de trilling van de gereflecteerde laserbundel te meten met een sensor kan het feedback signaal bepaald worden (Figuur 4, Figuur 5).



Figuur 3: Demo NSOM: Duidelijk is de plotter te zien die de beweging in de x,y-richting mogelijk maakt en de speaker voor de z-richting.



Figuur 4: Platform waarop stemvork met spiegel en naald, aandrijfpiëzo, laser en sensor gemonteerd zijn.



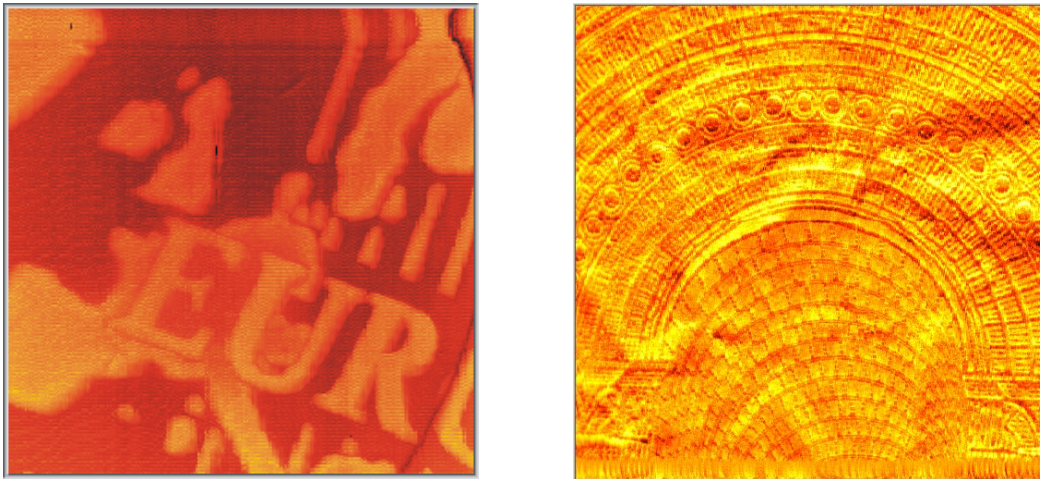
Figuur 5: Meting van het oppervlak van een euromunt.

In Tabel 1 wordt de eigenschappen van de demo-NSOM vergeleken met de echte NSOM opstelling.

Eigenschap	NSOM	Demo-NSOM
Eigenfrequentie	32kHz	6kHz
Vorklengte	3.2mm	18mm
Naald	Optische fiber	Tandenstoker
Scantijd	5 min.	5 min.
Scanoppervlak	20x20 μm^2	Euromunt
z-resolutie	2-5 nm	10 μm
x,y-resolutie	50 nm	100 μm
Q-factor	300-600	150-300
Massa stemvork (genormaliseerd)	1	1000
Kosten	€100.000,-	€7210,- (materiaal = €2210,- Arbeidstijd = €5000,-)

Tabel 1: Vergelijking NSOM en Demo-NSOM.

De demo-NSOM is zo gevoelig dat niet alleen het topografisch beeld van een euromunt gemeten kan worden, maar zelfs de dikte van de inkt op bankbiljetten gemeten kan worden (Figuur 6).



Figuur 6: Links: Topografisch beeld van een gedeelte van een 2 euro munt. Rechts: Topografisch beeld van een gedeelte van een 10 euro biljet.

Doordat de dimensies van de samples en van de onderdelen van de opstelling macroscopisch zijn, is het erg makkelijk om een inzicht te krijgen in de werking van het de demo-opstelling. Hierdoor kan voor een groot gedeelte van de denkbeeldige black-box bij de echte NSOM-opstelling weggehaald worden.

In het onderwijs

Het is essentieel voor wetenschapspopularisatie dat leerlingen (en studenten) in contact gebracht worden met de laatste ontwikkelingen in de wetenschap en de wetenschapswereld (Hobson 2001). Dit project kan dan ook gezien worden tussen andere initiatieven zoals practica en wetenschapsprojecten die op school ontwikkeld en uitgevoerd worden (bijvoorbeeld het HiSparc project www.hisparc.nl, waarbij op scholen metingen worden gedaan naar kosmische deeltjes), projecten waarbij specialisten langskomen op school (zoals het rondreizende Ioniserend Stralen practicum, waarbij metingen door leerlingen worden gedaan aan radioactieve deeltjes), en projecten waarvoor leerlingen naar een locatie toe moeten (bijvoorbeeld: musea, wetenschapsdiscussies in science cafés en opendagen van universiteiten).

Er zijn meerdere mogelijkheden voor het gebruik van de demo opstelling in het onderwijs onderzocht. Daarbij is gekeken of het mogelijk is voor een school:

- 1) Om de opstelling zelf te bouwen.
- 2) De opstelling van afstand (via internet) gebruikt zou kunnen worden.
- 3) De opstelling beschikbaar stellen.

Om te zorgen dat de opstelling op school nagebouwd zou kunnen worden en of deze opstelling interessant voor het voorgezet onderwijs zijn er de volgende eisen/onderzoekspunten:

- Goedkoop (tot +/- €1000,-)
- Robuust
- Door TOA te construeren.
- Gebruik makend van bestaande ICT (CoachLab www.cma-science.nl)
- Inzichtelijk
- Aansluiting examenstof

Na inventarisatie van de gemaakte kosten bleek dat de demo-NSOM +/-€7000,- heeft gekost. Voor €2000,- zijn dit materiaalkosten en €5000,- arbeidskosten van specialisten. De opstelling op zich is behoorlijk stevig, maar vereist vaak een ingreep van een expert om naar behoren te functioneren. De gebruikte technieken en elektronica staan erg dicht bij de originele opstelling. Hierdoor is, ondanks dat elektrische schema's en een bouw instructie aangeleverd kunnen worden, het niet reëel dat de technische staf van een school de opstelling zonder hulp van buitenaf zou kunnen maken. Een school zou er wel voor kunnen kiezen om een opstelling van een verwante microscopie techniek te bouwen. Gorazd(2008) en Berger(2002) beschrijven opstellingen waarbij een Atomic Force Microscope (AFM) nagebouwd kan worden. Veel scholen gebruiken de onderzoeksomgeving CoachLab. Deze omgeving is erg flexibel en is bruikbaar bij erg veel practica. Deze omgeving is alleen niet geschikt om de demo opstelling mee aan te sturen, aangezien de samplefrequentie niet hoog genoeg is. De opstelling is tijdens gebruik erg inzichtelijk. Wanneer de stemvork goed aangedreven wordt is deze te horen en tijdens metingen is duidelijk te zien hoe het oppervlak afgetast wordt en het topografische beeld wordt opgebouwd. De kennis die nodig is om de natuurkunde achter de opstelling te begrijpen valt bij natuurkunde havo onder exameneis C1 (Trillingen en golven) en bij natuurkunde vwo onder exameneis E1 (trillingen en golven). Bij havo en vwo zijn atoomfysica komen te vervallen. Uit dit overzicht is te concluderen dat het te duur en te ingewikkeld is voor een school om zelf een opstelling te maken. Vanuit de vakgroep is aangegeven dat het niet reëel is om de opstelling bijvoorbeeld met webcams en een interface op internet beschikbaar te maken. Doordat de opstelling regelmatig "een zetje" nodig heeft om naar behoren te werken zou de technische staf van de vakgroep waarschijnlijk regelmatig ondersteuning moeten geven. Deze tijd heeft de technische staf niet beschikbaar, waardoor dit geen optie is. De vakgroep Optical Sciences is op dezelfde plek gevestigd als het leerlingenlab van de Universiteit Twente. Hier kunnen leerlingen gebruik maken van voorzieningen die niet aanwezig zijn op school en deze gebruiken voor bijvoorbeeld een profielwerkstuk. Het is voor leerlingen mogelijk om hier te werken met de opstelling en de juiste ondersteuning te krijgen. Hiervoor kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van een standaard opdrachtenformulier (zie bijlage) of kunnen de leerlingen een vrij project starten waarbij de opstelling gebruikt wordt.

Op het moment is de opstelling intern in de groep gebruikt om studenten voor te bereiden op het gebruik van echte NSOM opstellingen. De gebruikte software komt overeen met de software die bij de echte opstelling en meetfouten die optreden bij de demo opstelling komen ook voor bij de echte opstelling, waardoor studenten ervaring op kunnen doen. Daarnaast is de opstelling intern voor demonstraties gebruikt en bij een leerstoel overkoepelend overleg van Applied Nanophotonics, waarvan de vakgroep Optical Sciences onderdeel is, om aan andere natuurkundigen van de Universiteit Twente de werking van shear-force feedback te demonstreren. De opstelling is door bachelorstudenten nog enigszins verder ontwikkeld, door onderzoek te doen of de tandenstoker door een betere/optisch gevoelige naald vervangen kon worden. Buiten de UT heeft de SAXION hogeschool Enschede het artikel aangevraagd om te gebruiken bij colleges over nanotechnologie en nanodeeltjes. en hebben bachelorstudenten uit Parijs een aanvraag voor informatie gedaan om een gedeelte van de opstelling na te bouwen. De opstelling is op het moment transporteerbaar,

maar is nog niet uitontwikkeld (wat nog door bachelorstudenten uitgewerkt zou kunnen worden).

Concluderend is dit een uitermate geschikte opstelling voor leerlingen uit het voorgezet onderwijs om te gebruiken voor hun profielwerkstuk en beroepsoriëntatie. Hierdoor vergaren ze niet alleen kennis over moderne microscopie technieken, maar ontwikkelen ze ook wetenschappelijke geletterdheid door: het bestuderen van een wetenschappelijke opstelling en het contact wat ze opdoen met een universiteit en een onderzoeksgroep.

Berger, R. (2002). "The Atomic Force Microscope: A Low-Cost Model." The Physics Teacher **40**(8): 502-502.

Betzig, E., J. K. Trautman, et al. (1991). "Breaking the Diffraction Barrier: Optical Microscopy of a Nanometric Scale." Science **251**(5000): 1468-1470.

Bosma, E., H. L. Offerhaus, et al. (2010). "Large scale scanning probe microscope: Making the shear-force scanning visible." American Journal of Physics **78**(6): 562-562.

Gersen, H., D. J. W. Klunder, et al. (2004). "Propagation of a femtosecond pulse in a microresonator visualized intime." Opt. Lett. **29**(11): 1291-1293.

Gorazd, P. and K. Janez (2008). "Nano goes to school: a teaching model of the atomic force microscope." Physics Education **43**(1): 37.

Hobson, A. (2001). "Teaching relevant science for scientific literacy." J. Coll. Sci. Teach **30**: 238-243.

Jose, J., F. Segerink, et al. (2011). "Imaging of surface plasmon polariton interference using phase-sensitive photon scanning tunneling microscope." Applied Physics A: Materials Science & Processing **103**(3): 673-676.

Karrai, K. and R. D. Grober (1995). "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes." Applied Physics Letters **66**(14): 1842-1844.

Rensen, W. H. J. (2002). Tuning fork tunes: exploring new scanning probe techniques. Optical Sciences. Enschede, University of Twente: 117.

Large scale scanning probe microscope: Making the shear-force scanning visible

E. Bosma,⁴⁰ H. L. Offerhaus, J. T. van der Veen, F. B. Segerink, and I. M. van Wessel

*Optical Sciences Group, Faculty of Science and Technology, MESA+ Research Institute,
University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands*

(Received 28 July 2009; accepted 26 January 2010)

We describe a demonstration of a scanning probe microscope with shear-force tuning fork feedback. The tuning fork is several centimeters long, and the rigid fiber is replaced by a toothpick. By scaling this demonstration to visible dimensions the accessibility of shear-force scanning and tuning fork feedback is increased. © 2010 American Association of Physics Teachers.

[DOI: 10.1119/1.3319657]

I. INTRODUCTION: SCANNING SURFACES

The function of scientific devices is often not obvious from their appearance. When components are very small and unfamiliar materials are used, many people regard the setup as a black box. An example of black boxes are scanning probe microscopes, which are a family of instruments used to study the surface properties of materials from the atomic to the micron level. The best known are the scanning tunneling microscope¹ (STM) and the atomic force microscope (AFM).^{2,3} In STM a voltage is applied between the tip and a surface. When the distance between the tip and the surface is less than 1 nm, electrons will tunnel⁴ between the tip and the surface. The closer the tip is to the surface, the larger the current between the tip and the surface. The current can therefore be used to image the surface directly. AFM is based on the attractive van der Waals and repulsive Pauli forces between the tip and the surface. By using AFM nonconducting surfaces can also be imaged because no current is required to flow.

The near-field scanning optical microscope⁵ is a version of AFM that uses an optical fiber as the scanning tip. The fiber is pulled or etched and coated with metal except at the very end (see Fig. 1). The use of an optical probe as the scanning tip provides access to simultaneous topographical and optical information on the surface.

For our demonstration this fiber is replaced by a toothpick. Although a toothpick cannot pick up optical information, it can pick up topographical information. A near-field scanning optical microscope constructed this way differs from an AFM by using a stiff probe instead of a flexible cantilever. A stiff probe requires a different feedback system. To measure an optical signal the toothpick could be replaced by an optically transparent material such as polyethylene. The emphasis in this article is on the shear-force feedback.

Conventional optical microscopes are limited by diffraction to a resolution on the order of half of the wavelength of light. As the light propagates from the emitters in the sample to the collection objective, diffraction effectively spreads the signal from the individual emitters over a larger area. The resolution d is given by

$$d = 0.61 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

where λ is the wavelength of the light and NA (Ref. 6) is the numerical aperture of the optical system. For microscopes that use visible light, Eq. (1) results in a resolution of the order of 300 nm. Near-field microscopes capture the evanes-

cent or nonpropagating fields of light before it diffracts by placing a probe tip very close to the surface.⁷ In this way the optical resolution is not limited by diffraction but is determined by the opening in the tip, which is typically 50 nm. Different techniques are used to control the distance between the tip and the surface. For rigid tips, shear-force tuning fork feedback is the preferred choice.

To image a surface using a scanning microscope, the tip is moved over the surface of the sample using piezoelectric elements. Piezoelectrics have the ability to create an electric potential when stress is applied or can deform when a potential is applied⁸ so that high precision movement can be coupled to electrical control. To prevent the tip from crashing into the surface, the distance between the tip and the surface has to be regulated using some kind of feedback such as the shear force.⁹⁻¹² In a regular setup the typical length of the prongs of the tuning fork is 3.2 mm and the fiber has a diameter of 125 μm .

The small dimensions of these elements are an obstacle when demonstrating the device to people who are not familiar with scanning probes. To increase the accessibility of the technique, we constructed an enlarged demo of the topographical imaging part. Our goal was that the demonstration would have the following desired characteristics. (1) The resonance frequency of the tuning fork should be in the audible range. (2) The tip must be of a macroscopic scale (for example, centimeters). (3) The scan speed for an image must be acceptable, for example, an image must be scanned within 5 min. (4) The scanned sample area (for example, a coin) should be clearly visible by eye. (5) The image produced should be of reasonable quality. (6) The feedback system must be comparable to the original setup. (7) The setup must be robust and allow for transport. (8) Finally, the software used to control the position of the tip relative to the sample must be the same as the original near-field scanning optical microscopy software.

The near-field scanning optical microscopy software is available from our group on request. It has been used by students for more than a decade. The program is not tailored to this application, but it is a big time saver in building the instrument.

II. SHEAR-FORCE FEEDBACK

In shear-force feedback the tip is connected to a tuning fork and changes in the resonance of the fork are used for feedback. The tuning fork in a conventional near-field scanning optical microscopy setup is the same tuning fork as

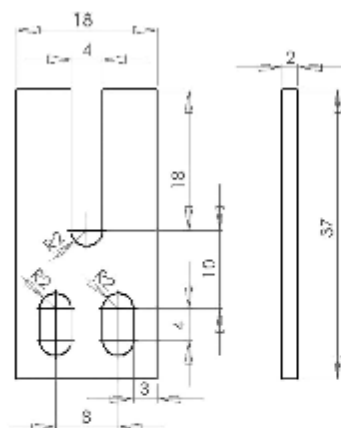


Fig. 4. Dimensions in millimeter of the tuning fork.

designed and tested, yielding the basic design shown in Fig. 4.

Tuning forks generally have multiple modes of vibration with different resonance frequencies. Figure 5 shows our results for the first four resonances of a large metal tuning fork, obtained from simulations using a finite element method. The modes shown are fundamental vibration modes. Higher order modes with higher resonance frequencies consisting of overtones are also possible. The Q factors are different for each mode and depend on the material properties and dimensions.

For the demonstration setup shown in Fig. 7, the fourth resonance mode of the tuning fork is used because it has the appropriate Q factor and the prongs move in a convenient

way. The center of mass does not move, which avoids strain on the connecting parts, and the prongs move only in the x -direction, which avoids coupling to other movements.

The resonance of the tuning fork is monitored using a beam deflection method often used in AFM in which a laser beam is reflected by a little mirror on the tuning fork and positioned on a split detector, as indicated in Fig. 6. The vibrational movement of the tuning fork results in an oscillating voltage. The tuning fork can be driven by a piezoelectric element as in Fig. 7(c). The excitation of the tuning fork by magnetic excitation (by attaching a permanent magnet on the base of the tuning fork and applying an alternating magnetic field) is also possible [see Fig. 7(d)]. The frequency response of the tuning fork can be measured by applying a white noise signal that covers all frequencies on the dither and measuring the response of the tuning fork. The transformation of the time-response to the frequency-domain shows the tuning fork resonances. The measured response (not shown) differs slightly from the simulated values, which is attributed to the addition of the toothpick and mirror on the tuning fork.

The phase difference between the driving signal and the detector signal is measured and used for feedback on the height positioning. The height positioning was achieved through a voice-coil actuator. To avoid a slow response of the actuator, the mass of the moving parts of the voice-coil actuator must be kept small, and thus the weight of the samples should be limited. The optical fiber of the near-field scanning optical microscopy is replaced by a toothpick glued to the side of the tuning fork. The stiffness of the tuning fork dominates the Q factor of the system. Actual values are obtained from the tuning fork transfer measurement, as described in Sec. III. Friction between the toothpick and the surface introduces the Δy needed for feedback. Instead of the toothpick, an optical tip/rod made from polyethylene can also be used, for example. The XY -positioning on the surface is achieved by an XY -plotter. Just as in the near-field scanning

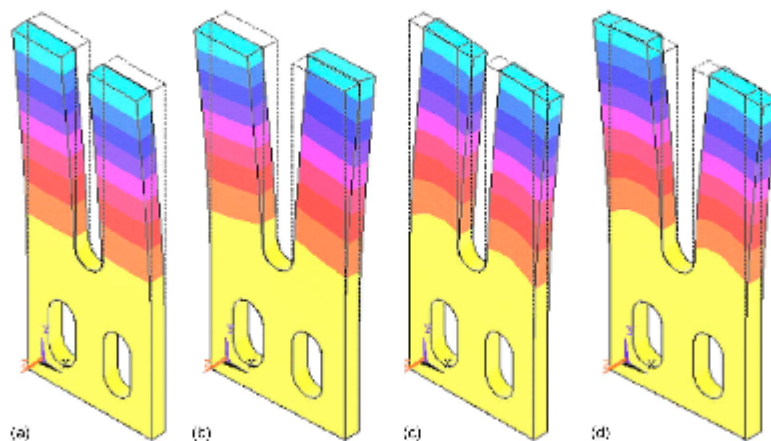


Fig. 5. Simulations of the first four vibration modes of a tuning fork. (a) Mode 1, $f_m=1622$ Hz. (b) Mode 2, $f_m=1765$ Hz. (c) Mode 3, $f_m=6255$ Hz. (d) Mode 4, $f_m=6360$ Hz.

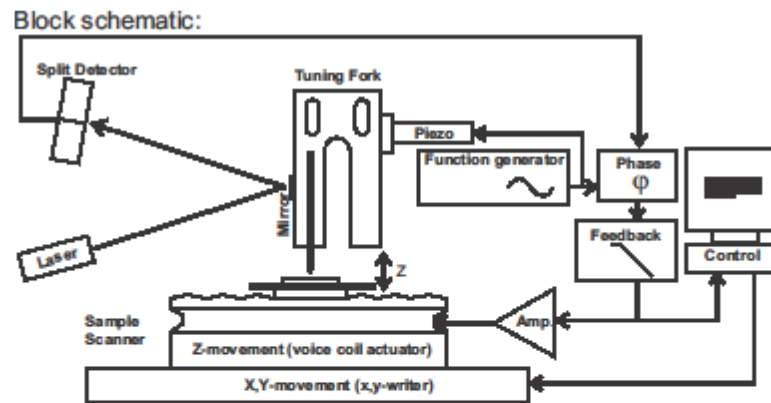


Fig. 6. Schematic overview of the demonstration setup.

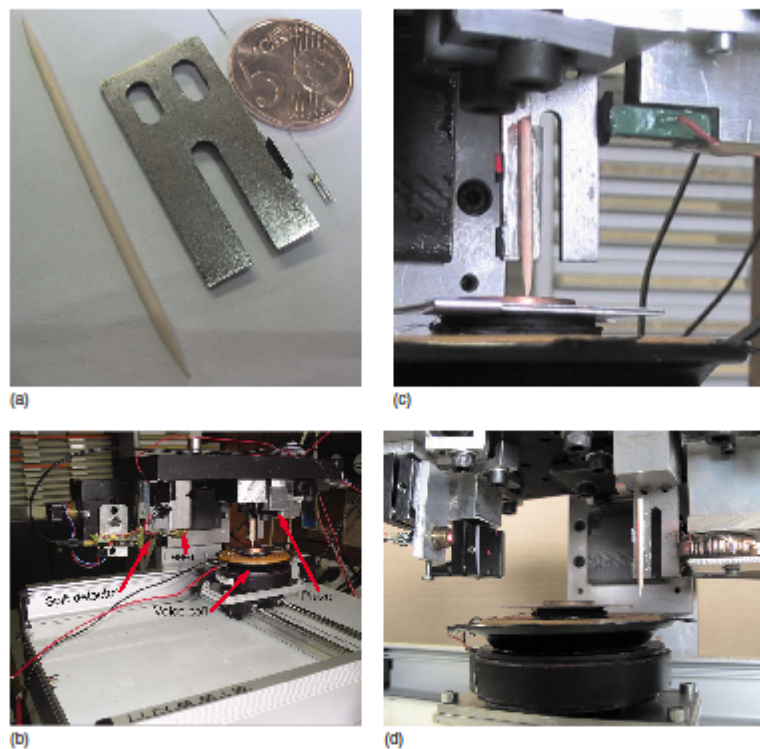


Fig. 7. Pictures of the giant scanning probe microscope. (a) Toothpick and tuning fork compared to a real near-field scanning optical microscopy tuning fork with glass fiber. (b) Overview of the basic setup with excitation by a piezoelectric element. (c) Close-up of excitation with a piezoelectric element. (d) Alternative setup with magnetic excitation and angular adjustments.

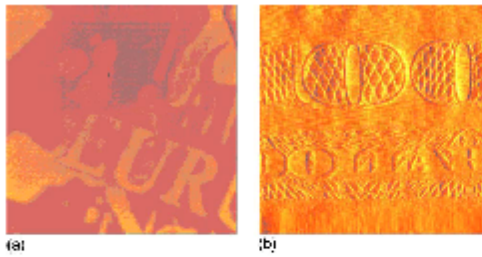


Fig. 8. Images obtained with the giant scanning probe microscope using a toothpick. (a) Scan of a 2 Euro coin. (b) Scan of a 100 dollar banknote.

optical microscopy setup, the setup is sensitive to vibrations and thermal drift. By placing a transparent casing around the setup, influences from the environment were reduced.

IV. RESULTS

Figure 8(a) shows a scan of a 2 Euro coin where the brightness depicts the height. The darkened square on the Euro coin shows the damage caused by a sharp metal tip and feedback that was set too tight, resulting in a tip that scraped over the surface. Figure 8(b) shows a scan of a \$100 dollar note. The height resolution is sufficient to measure the thickness of ink on the notes, which is of the order of several tens of microns.

The in-plane resolution (x - y) is determined not only by the number of measurement points but also by the convolution between the tip and the surface. The measured signal is the convolution of the tip function and surface function. To reduce the convolution the tip can be made sharper or replaced by a diamond tip, but the toothpick was used for its entertainment value. The height (z) resolution is less dependent on the surface of the tip because the change of the resonance is determined mostly by the part of the tip that is closest to the surface.

To specify the similarities and differences between our demo and the real thing, some characteristics of a near-field scanning optical microscopy setup and the demo-setup are compared in Table I.

V. CONCLUSIONS

A demonstration model of a near-field scanning optical microscopy with shear-force tuning fork feedback was constructed and operated. It provides a visible version of how real scanning probes work. The setup has already served at various occasions for promotional purposes. Improvements

Table I. Comparison of demonstration and real near-field scanning optical microscopy setups. Note that many of the operating characteristics are similar except for the scale of the tip and the scanning area. For one-fiftieth of the cost you can scan an area that is 200 times larger.

Characteristics	Near-field scanning optical microscopy	Demonstration
Frequency	32 kHz	6 kHz
Prong length	3.2 mm	18 mm
Tip	Optical fiber	Toothpick
Scan time	5 min	5 min
Scanned area	$20 \times 20 \mu\text{m}^2$	Euro coin
Height resolution	2–5 nm	1 μm
In-plane resolution	50 nm	100 μm
Q factor	300–600	150–300
Tuning fork mass (normalized)	1	1000
Costs	100000 Euros	2000 Euros

can be made to make the setup more mobile: The base could be reduced and the wiring optimized. The material costs of this setup (assuming a standard laboratory infrastructure) are estimated to be 2000 Euros.

^{a)}Electronic mail: os@utw.twente.nl

¹G. Binnig and H. Rohrer, "Scanning tunneling microscopy," *IBM J. Res. Dev.* **30** (4), 355–369 (1986).

²G. Binnig, C. Quate, and C. Gerber, "Atomic force microscope," *Phys. Rev. Lett.* **56**, 930–933 (1986).

³K. van der Werf, C. Putman, B. de Grooth, F. Segerink, E. Schipper, N. van Hulst, and J. Greve, "Compact stand-alone atomic-force microscope," *Rev. Sci. Instrum.* **64** (10), 2892–2897 (1993).

⁴D. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics* (Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995).

⁵E. Betzig, J. Trautman, T. Harris, J. Weiner, and R. Kostelak, "Breaking the diffraction barrier: Optical microscopy of a nanometric scale," *Science* **251**, 1468–1470 (1991).

⁶E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, Boston, MA, 2002).

⁷B. Saleh and M. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. (Wiley, Hoboken, NJ, 2007).

⁸F. J. Holler, D. A. Skoog, and S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 6th ed. (Cengage Learning, Florence, KY, 2007).

⁹K. Karrai and R. Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes," *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1842–1844 (1995).

¹⁰W. Atia and C. Davis, "A phase-locked shear-force microscope for distance regulation in near-field optical microscopy," *Appl. Phys. Lett.* **70**, 405–407 (1997).

¹¹W. Rensen, N. van Hulst, A. Ruiter, and P. West, "Atomic steps with tuning-fork-based noncontact atomic force microscopy," *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1640–1642 (1999).

¹²W. Rensen, Ph.D. thesis, "Tuning fork tunes: Exploring new scanning probe techniques," University of Twente, Enschede, 2002.

¹³J. Friedl and E. Carry, "Introduction to the quartz tuning fork," *Am. J. Phys.* **75**, 415–422 (2007).

Bijlage 2: Voorbeeld opdrachtformulier demo-NSOM

Zoek informatie op over de werking van Near-field Scanning Optical Microscopy.

Beschrijf in je eigen woorden wat er met deze opstelling gemeten wordt:

Bij de opstelling ligt een losse stemvork met daaraan een naald geplakt. Dit is een standaard stemvork van 440Hz.

Leg uit wat de 440Hz inhoudt bij deze stemvork:

Sla de stemvork aan en raak met de naald het oppervlak van de tafel aan. Wat gebeurt er met de amplitude en frequentie van de stemvork?

De demo-NSOM en de echte NSOM opstelling maken hiervan gebruik om een beeld te maken van een oppervlak. Lees de informatie bij de demo-NSOM. Volg de instructies voor het maken van een meting. Druk de meting af en voeg deze bij dit opgavenformulier. Leg in je eigen woorden uit hoe het kan dat er met een stemvork en een satéprikker een oppervlak in beeld wordt gebracht:

[illegible]

[illegible]