

NANOMEDIEN: DER DRITTE MEDIENUMBRUCH?

Ein Interview mit dem Nanoforscher
Robert A. Freitas Jr.

VON TRISTAN THIELMANN

2029: Das Einsetzen von Displays ins menschliche Auge ist an der Tagesordnung, wobei zwischen permanenten Implantaten und temporären Implantaten (vergleichbar den heutigen Kontaktlinsen) gewählt werden kann. [...] Eine Vielzahl von neuronalen Implantaten wird angeboten, die die Fähigkeit der visuellen und akustischen Wahrnehmung [...] erheblich steigern können. [...] Dreidimensionale, projizierte Holographiedisplays befinden sich weltweit im Einsatz. Mikroskopisch kleine nanotechnische Roboter verfügen nun über Mikrogehirne, die es von ihrer Geschwindigkeit und Kapazität her mit dem menschlichen Gehirn aufnehmen können. Vor allem in der Industrie werden diese ‚Nanobots‘ eingesetzt, zunehmend aber auch in der Medizin.¹

Diese Zukunftsvision des KI-Forschers Ray Kurzweil basiert auf der Idee, dass wir eines Tages, über Milliarden kleinster Nanoroboter in unserem Gehirn verfügen, die in der Lage sind, eine komplett immersive virtuelle Realität zu erzeugen. Bereits für 2019 hat Kurzweil die erste Benutzung dreidimensionaler Displays angekündigt, die allerdings noch nicht direkt auf das Gehirn wirken, sondern zunächst in Brillen oder Kontaktlinsen eingebaut sind. Retina(l)displays projizieren Bilder direkt auf die Netzhaut,² überlagern so als virtuelles Environment die ‚reale‘ Umgebung und sollen dabei sogar noch das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges übertreffen.³ „Diese implantierten visuellen Displays agieren zugleich wie Kameras und zeichnen visuelle Eindrücke auf, sind damit also Input- und Output-Geräte.“⁴ Was sich wie Science Fiction anhört, versucht der Nanowissenschaftler Robert A. Freitas Jr. in technischen Designstudien zu realisieren.

In *Engines of Creation* hat der US-amerikanische Ingenieur Eric Drexler schon 1986 das Konzept einer ‚Molekularen Nanotechnologie‘ entworfen, dessen Kern-

1 Kurzweil, Ray: *Homo S@piens. Leben im 21. Jahrhundert – Was bleibt vom Menschen?*, Köln 1999, S. 339.

2 Als Datenbrille wird ein solches ‚Virtual Retinal Display‘ seit 2004 von Microvision seriell hergestellt. Vgl. Seefeldt, Katja: „Der Monitor geht ins Auge. Ein neues Mini-Display schreibt Bilder direkt auf die menschliche Netzhaut“, in: *Telepolis*, 29.04.2004, <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/17/17313/1.html>, 08.08.2007. Vgl. auch <http://www.microvision.com>, 08.08.2007.

3 Vgl. Kurzweil (wie Anm. 1), S. 314-318.

4 Kurzweil (wie Anm. 1), S. 339.

stück winzige selbstreplizierende Nanoroboter sind.⁵ Diese auch Nanobots genannten ‚Maschinen‘ sollen in der Lage sein, mit Manipulatoren (Armen und Händen) einzelne Atome und Moleküle ‚anzufassen‘. Während sich Drexler von der Idee der Nanoroboter distanziert hat, arbeitet Robert Freitas daran, diese eines Tages als medizinische Werkzeuge einzusetzen. Bei der umstrittenen molekularen Nanotechnik geht es um Arbeiten auf der Ebene von Atomen, die nicht einmal Millionstel Millimeter (Nanometer) groß sind. Nahrung, Geld, Medien, schlicht alles, was der Mensch zum Leben benötigt, würde sich demnach aus einer Art „Nanonebel“⁶ mit „Schwarmintelligenz“⁷ entwickeln können – ein Stoff, den Michael Crichton zu seinem Thriller *Beute* verwoben hat⁸.

Zu den von Freitas geschilderten Fähigkeiten der Nanobots gehört nicht nur das Kommunizieren mit Organen, Geweben, Zellen und anderen Nanobots, sondern auch die Informationsübertragung [*messaging*] aus dem Körper heraus.⁹ Wie Kurzweils Vision zeigt, könnte insbesondere das okulare Messaging vom Nanorobot zum Menschen einen neuen Schritt in der Medienevolution darzustellen.

Für das Outmessaging¹⁰ bedarf es einer nanorobotischen Manipulation der sensorischen Kanäle, die der bewussten menschlichen Wahrnehmung zugänglich sind, wie der Seh-, Gehör-, Geschmacks-, Geruchs- oder Tastsinn. Hierzu müssten Nanobots einen der natürlichen Sinne überlagern: a) durch Erzeugung eines künstlichen Reizes, b) durch direkte Stimulation des Rezeptors zu einem Zeitpunkt, an dem kein natürlicher Stimulus vorliegt, oder c) durch Auslösung eines künstlichen Aktionspotentials in den afferenten Nerven, die die entsprechende Information vom Sensor zum Gehirn übertragen.¹¹

Beim okularen Outmessaging senden Freitas zufolge Nanobots Photonen direkt ins Auge und erzeugen so einen künstlichen visuellen Reiz. Das Retinaldisplay würde dabei von Photonen emittierende Nanobots ‚gespeist‘, die sich bei-

5 Vgl. Drexler, Eric: *Engines of Creation*, New York u.a. 1986. Das Buch beeinflusste nachhaltig die Cryonic-Bewegung der 1980er Jahre, deren Anhänger sich nach ihrem Tod einfrieren ließen, in der Hoffnung, durch die molekulare Nanotechnologie wiederbelebt zu werden.

6 Vgl. John Storrs Halls Konzept eines ‚Foglets-Nebels‘ in: Hall, John Storrs: „Utility Fog: A Universal Physical Substance“, in: NASA Lewis Research Center (Hrsg.): *Vision 21: Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace*, Washington, DC 1993, S. 115-126.

7 Vgl. Bonabeau, Eric u.a.: *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, New York u.a. 1999.

8 Vgl. Crichton, Michael: *Beute*, München 2002.

9 Vgl. Freitas, Robert A. Jr.: *Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities*, Austin, Tex. 1999, S. 188ff.

10 Kommunikationsdaten, die von einer extrarobotischen Quelle zu einem Nanoroboter fließen, werden als ‚Inmessaging‘ (Informationsaufnahme) bezeichnet. Ist der Nanorobot der Sender bzw. die Quelle der Datenübertragung wird dies als ‚Outmessaging‘ (Informationsabgabe) bezeichnet. Vgl. Freitas (wie Anm. 9), S. 188.

11 Vgl. Freitas (wie Anm. 9), S. 197.

spielsweise in der Lidbindehaut, auf der Kornea oder auch innerhalb einzelner Stäbchen und Zapfen befinden.¹² Je nachdem wo die Nanobots für das Retinaldisplay stationiert sind, unterscheidet Freitas zwischen der ‚Extraretinalen Projektion‘¹³, der ‚Foveaprojektion‘¹⁴, der ‚Ganglionstimulation‘¹⁵ und der ‚Direkten Photorezeptorstimulation‘, bei der in jedes der 256 Millionen Stäbchen und Zapfen des menschlichen Auges ein einzelner Photonen emittierender Nanoroboter platziert werden würde.

Die Nanorobotik wird aus medienwissenschaftlicher Sicht vor allem dann interessant, wenn sich In-vivo-Nanobots zu koordinierten Aggregaten verbinden, die groß genug sind, um die Wirkung eines makroskopischen [*macroscale*]¹⁶ Kommunikationsgerätes zu emulieren, wie beispielsweise subdermale Nanolautsprecher (*talking tattoos*) oder Hautdisplays. Hierzu führte ich mit Robert Freitas das folgende Interview.

Thielmann: Die Verheißungen der Nanowissenschaft bieten für die Medizin große Herausforderungen und Potentiale. Fast alle davon finden in Ihrem Buch *Nanomedicine, Volume I* Erwähnung, in dem Sie als erster Wissenschaftler die technischen Grundlagen für die medizinischen Anwendungen der Nanotechnologie und Nanorobotik diskutieren. In einem Kapitel, das wir in dieser *Navigationen*-Ausgabe übersetzt haben, beschreiben Sie erstmals die Funktionsweise eines dermalen Displays. Wann glauben Sie, werden wir solche nanorobotischen Hautdisplays in Funktion sehen?

Freitas: Das programmierbare Hautdisplay stellt zurzeit noch ein rein theoretisches Design für ein künftiges implantierbares nanomedizinisches System dar. Um ein solches System herzustellen und einzubauen, muss man in der Zukunft zunächst einmal in der Lage sein, diamantartige Strukturen in einer Präzision aufzubauen, die bis auf die molekulare Ebene reicht. Dafür kann man die Rasterkraftmikroskopie oder ähnliche Methoden kombiniert mit den Verfahren der Diamant-Mechanosynthese¹⁷ einsetzen. Als nächstes muss dann die Möglichkeit

12 Vgl. Freitas (wie Anm. 9), S. 201f.

13 Dabei müssen die Photonen emittierenden Nanobots eine Photonenflussdichte erzeugen, die mindestens so hoch ist wie die vorhandene Lichteinstrahlung aus der Umgebung.

14 Die Fovea ist ein kleines Grübchen in der Macula lutea; sie liegt in der Verlängerung der Sehachse und stellt den Punkt des schärfsten Sehens dar.

15 Da die Netzhaut invers gebaut ist, können neurostimulatorische Nanoroboter, die auf der nach innen gerichteten Retinaoberfläche befestigt sind, künstliche Aktionspotentiale direkt in den Axonen der afferenten Ganglienzellen auslösen, die die Signale aus den Stäbchen und Zapfen zum Nervus opticus (dem zweiten Hirnnerven) übertragen.

16 Vgl. Hall, John Storrs: *Nanofuture. What's Next for Nanotechnology*, Amherst, N.Y. 2005, S. 319: „*Macroscale*: This refers to things and phenomena of ordinary size that behave the way we're use to.“

17 Anm. d. Ü.: Die ‚Mechanosynthese‘ bezeichnet ein Verfahren der ‚molekularen Fertigung‘, bei der ‚Assembler‘ gezielte einzelne Atome greifen und platzieren. Vgl. Drexler

geschaffen werden, daraus feste Bauteile herzustellen und sie zu Maschinensystemen zusammensetzen, bis hin zu Nanorobotern, und das in großen Mengen. Schließlich wird sich daran noch eine Phase der Sicherheits- und Biokompatibilitätstests für eine Zulassung durch die FDA (Food and Drug Administration, T.T.) anschließen. Aber ich würde mich nicht wundern, wenn die ersten solchen Systeme irgendwann in den 2020er Jahren verfügbar wären.

Thielmann: Können Sie noch einmal kurz schildern, wie die Visualisierung des Hautdisplays funktioniert?

Freitas: Wie die mehrfarbigen Pigmente in einer Tätowierung halten sich die Milliarden von Nanorobotern – von denen jeder die Größe eines Staubpartikels hat, das das menschliche Auge nicht mehr einzeln wahrnehmen kann – in den oberen Hautschichten auf und behalten immer ihre relative Position zueinander in der zuvor festgelegten Anordnung. Auf diese Weise bilden sie die Pixel eines Bildschirms. Wenn sie ausgeschaltet sind, emittieren die Nanoroboter kein Licht und die Haut nimmt ihre normale Färbung an. Wenn sie angeschaltet sind, emittieren die Nanobots Photonen, die die äußerste (relativ lichtdurchlässige) Schicht der Epidermis durchdringen und das sichtbare Display erzeugen. Licht wird durch LED-artige Strahler erzeugt, die in den oben liegenden Nanobots integriert sind. Die Nanoroboter zapfen lokale Sauerstoff- und Glukosequellen für ihre Energieversorgung an, können aber bei Bedarf auch die Leistung einer Reservebatterie oder andere Energiequellen nutzen.

Thielmann: Und wie würde man die Anzeige an- oder ausschalten?

Freitas: Kurz zusammengefasst: Das Display wird ausgeschaltet oder auf eine andere Anzeige umgeschaltet, indem man mit dem Finger das entsprechende Symbol auf dem Display berührt. Wenn das Hautdisplay ausgeschaltet ist, kann man es einschalten, indem man in einem kodierten Rhythmus im Bereich der Anzeige auf die Haut tippt. Die Nanoroboter überwachen die lokale Umgebung ständig auf solche Klopfsignale hin, und wenn sie die richtige kodierte Reihenfolge registrieren, fahren sie die Anzeige hoch und zeigen ein Startmenü auf dem Bildschirm. In der Animation ist der Kode ein einzelnes, gefolgt von einem zweimaligen Klopfen.¹⁸ Je nach Vorliebe wird der Nutzer vielleicht auch einfachere oder kompliziertere Aktivierungssequenzen wählen.

Thielmann: Um das Hautdisplay kontinuierlich mit Informationen zu versorgen, ist doch sicherlich auch ein Datenspeicher notwendig. Wo würden die entsprechenden Daten abgelegt werden – vielleicht in einem Pocket-PC?

(wie Anm. 5). Bei der ‚Diamant-Mechanosynthese‘ werden die molekularen Bausteine zu diamantartigen Strukturen zusammengefügt.

18 Anm. d. Ü.: Die hier von Freitas erwähnte Bewegtbild-Animation ist abrufbar unter: <http://www.nanogirl.com/museumfuture/dermaldisplay.htm>, 08.08.2007.

Freitas: Für ein medizinische Hautdisplay werden in Echtzeit Daten von Milliarden stationärer und mobiler Nanoroboter gesammelt, die sich – völlig unabhängig von den in der Haut eingebetteten Display-Nanorobotern – im Körper aufhalten. Diese Monitor-Nanobots können in Geweben, Knochen oder Blut lokalisiert sein. Sie geben die von ihnen ermittelten Daten über verschiedenste physiologische Parameter in Echtzeit zurück an ein Kommunikationsnetzwerk aus zusätzlichen Nanorobotern, die speziell für Kommunikations- und Netzwerkaufgaben konzipiert sind; und das dermale Anzeigesystem kann dieses interne Datennetz anzapfen und auf die relevanten Daten je nach Bedarf zugreifen. Riesige Datenmengen können dabei in kleinen Knotenpunkten zwischengespeichert werden, die wie eine Zweigbibliothek überall (im Inneren des Körpers) lokalisiert sind. Angenommen, die Datenspeicherdichte beträgt 1 Bit je 40 Kubiknanometer, wie es für mechanische RAM-artige Speicher der Fall ist und auch für ein Diamantstab-Schieberegister plausibel ist, dann könnten solche lokalen Datencaches $\sim 10^{16}$ Bit pro Kubikmillimeter speichern. Die Daten würden also im Körper des Nutzers abgelegt, nicht irgendwo außerhalb.

Thielmann: Ihr Hautdisplay zielt ja in erster Linie darauf, die Patienten in die Lage zu versetzen, ihren Krankheitszustand bis in Einzelheiten jederzeit selbst zu überprüfen, ohne dass sie dafür einen Arzt oder ein Labor aufsuchen müssen. Wird dabei nicht eine ungeheure Datenmenge anfallen?

Freitas: Die verfügbare Datenmenge wird immens sein. Die Daten werden bis ins feinste Detail gehen; sie können aktualisiert werden, so oft der Patient es wünscht oder es unter praktischen Gesichtspunkten sinnvoll ist, und sie können permanent in Datenknotenpunkten im Körper des Patienten gespeichert werden. Ärzten und Notdiensten kann der Zugriff auf diese Informationen gewährt werden, sodass sie sich in Sekundenschnelle wichtige Informationen herunterladen können, die sie heutzutage nur in Stunden oder Tagen einholen können – wenn sie sie denn überhaupt bekommen. Dadurch können die Mediziner schnellere und genauere Diagnosen stellen und den Behandlungsfortschritt buchstäblich im Sekundentakt überprüfen, indem sie die Auswirkungen ihrer Behandlung auf den Körper präzise und detailliert aufzeichnen. So kann durch die Beobachtung der Körperreaktion die Behandlung dann auch schneller, d.h. sekundenschnell, angepasst werden. Die Krankenakten werden im Körper des jeweiligen Patienten aufbewahrt, wodurch sich die heutigen Probleme von schlampiger medizinischer Dokumentation und fehlender Verfügbarkeit von Informationen bei einem Unfall weitgehend erledigen. Trägt der Patient seine Krankenakte im eigenen Körper, dann hat er auch das letzte Wort darüber, wer Einblick in seine medizinischen Daten erhält. Das Hautdisplay könnte übrigens auch als eingebauter Pocket-PC, PDA, iPod und Videorecorder in einem benutzt werden und müsste dabei noch nicht einmal aufgeladen werden oder neue Batterien bekommen, weil sie ja ihre Energieversorgung aus den normalen, körpereigenen Glukosevorräten des Nutzers bezieht; das kann doch richtig lustig werden!

Thielmann: In-vivo und epidermale Nanobots – also Nanoroboter im Körper und auf der Haut – können so programmiert werden, dass sie mobile Kommunizyten¹⁹ nutzen. Beispielsweise wurde bei IBM bereits 1996 ein Patch kreiert, das – auf der Hand eines Menschen befestigt – in der Lage war, kleinere Datenmengen über den Hautkontakt zu übertragen, wenn dieser Mensch einem anderen Menschen mit einem Empfänger-Patch die Hand schüttelte.²⁰ Mithilfe von Nanotechnologie und Nanorobotern könnte eine solche Informationsübertragung große Mengen von Daten umfassen. Wird es vielleicht in Zukunft möglich sein, eine ganze Bibliothek durch einen Händedruck zu übertragen?

Freitas: Kommunizyten hat man sich ursprünglich als In-vivo-Nachrichtenübermittler vorgestellt, aber sie könnten in abgewandelter Form auch dazu benutzt werden, bei einem Händedruck große Informationspakete zwischen verschiedenen Menschen zu befördern. Selbst lineare DNS kann 1 Bit pro Kubiknanometer speichern, und spiralig gewundene Molekülbänder aus Fluorcarbon können ~26 Bit/Kubiknanometer unterbringen. Ein Kommunizyt mit einem Datenspeicher von nur 1 Kubikmikrometer Volumen an Bord könnte also 26 Gigabit enthalten, und das in einem winzigen Volumen, das etwa dem eines kleinen Bakteriums entspricht.

Thielmann: Wie Sie in Kapitel 7 Ihres Buches *Nanomedicine, Volume I* erklären, besteht die besondere Fähigkeit der Nanorobots darin, zu kommunizieren. In Bezug auf die In-vivo-Kommunikation verweisen Sie auf die Möglichkeiten des akustischen/elektromagnetischen Broadcastings, elektrischer Kabelsysteme, postbotenartige Kommunizyten und Datenprotokolle wie TCP/IP. Das hört sich für mich als Medienwissenschaftler sehr bekannt an. Welche dieser kommunikationstechnologischen Modalitäten würden Sie für Nanorobotiksysteme präferieren?

Freitas: Jede der von Ihnen erwähnten Modalitäten könnte für Nanorobotiksysteme anwendbar sein. Die akustische Nachrichtenübermittlung erscheint besonders interessant für große Populationen von In-vivo-Nanobots, die im Körper nicht mehr als 100-200 Mikrometer voneinander entfernt und Bestandteile eines In-vivo-Kommunikationsnetzwerks sind. Dabei wird die Bandbreite allerdings wahrscheinlich auf 10 MHz oder weniger beschränkt sein. Kommunizyten sind im Prinzip mobile ‚Postboten‘, die große Informationsmengen relativ langsam befördern können – so ähnlich, wie wenn Sie Kisten voller Festplatten mit einem Lastwagen quer durch die Stadt fahren, anstatt die entsprechende Information elektronisch zu übermitteln. Über Glasfaser kann man Informationen mit großer

19 Vgl. Freitas (wie Anm. 9), S. 185: „A useful supplemental means of information transport throughout the body is a mobile mass-storage memory device called a communcycte. Communcyctes may serve an analogous function to postal carriers – messages are delivered to them, passed among them, and eventually delivered by them to the intended recipients. Mass mailings to selected recipient subpopulations are also possible.

20 Vgl. Ziegler, Peter-Michael: „Shake-Hands. Datentausch per Hautkontakt“, in: *heise mobil*, 31.10.2002, <http://www.heise.de/mobil/artikel/50880>, 08.08.2007.

Bandbreite kommunizieren. Wir könnten uns ein vielschichtiges System vorstellen, in dem Nanoroboter mit niedriger Bitrate mit lokalen Kommunikationsknotenpunkten kommunizieren. Jeder Knoten könnte lokal Informationen empfangen, übermitteln und speichern. Die Knoten wären durch optische Kabel miteinander verbunden, die über Output-Ports als Schnittstelle zu makroskopischen Verbindungen verfügen, so dass man Informationen in den Körper hinein, durch den Körper hindurch und aus dem Körper heraus transportieren könnte. Um Ihnen eine Vorstellung von den Größenordnungen zu geben: Diese Nanoroboter wären vielleicht einige Mikrometer groß, die Knoten hätten eine Größe von 10-100 Mikrometern, und die Glasfaserkabel zur Verbindung der Knoten könnten Durchmesser von Mikrometern oder Zehntelmikrometern haben. Natürlich müssten die fixen Elemente dieses Kommunikationsnetzwerks so entwickelt werden, dass sie auch über lange Zeiträume biokompatibel mit dem menschlichen Körper sind – dieses Thema habe ich ausführlich in *Nanomedicine, Volume IIA* diskutiert.²¹

Thielmann: Wenn einer der Schlüsselaspekte für die Realisierung des okularen Outmessagings eine Mindestbandbreite im Körper ist, die durch ein Glasfasernetzwerk ermöglicht werden soll, könnte man dann davon sprechen, dass es Parallelen zwischen der nanomedizinischen und der medientechnologischen Entwicklung gibt? Schließlich wurde die Medienevolution schon immer durch das Streben nach größerer Bandbreite zur Optimierung der Kommunikation bestimmt. Und sehen Sie in diesem Zusammenhang vielleicht sogar eine Verbindung zwischen der Diskussion um medientechnologische und nanotechnologische Potentialen und Ängste? Ich denke hier insbesondere an die Frage, ob der Open-Source-Ansatz auch für die Nanotechnologie anwendbar ist.

Freitas: Die Ausweitung der Medien in den menschlichen Körper hinein ist ja nur eine Fortsetzung der ständig zunehmenden Durchdringung unseres Lebens mit Kommunikationen jeder Art. Die Kommunikation hat eine jahrhundertlange Entwicklung hin zu immer größerer Geschwindigkeit, Bandbreite, Wiedergabetreue und inhaltlicher Vielfalt der Informationsübermittlung hinter sich, und dieser Trend setzt sich jetzt fort in den menschlichen Körper hinein. Das programmierbare Hautdisplay ist dafür ein gutes Beispiel, aber es selbst stellt eigentlich nur die Schnittstelle für den Nutzer dar, die Spitze eines riesigen Eisbergs aus Kommunikations- und Datenübertragungsaktivitäten, die dann innerhalb des Körpers oder auch zwischen den Maschinen im Körper und der äußeren Welt ablaufen. Es gibt ja bereits Autos, die automatisch ein Fehlersuchprogramm ablaufen lassen und das Ergebnis dann über ein äußeres Netzwerk an den Eigentümer übermitteln. In ähnlicher Weise könnten Daten aus jedem Ihrer Organe in Realtime an die jeweiligen medizinischen Spezialisten übermittelt werden – aus Ihrem Herzen gehen die Daten an Ihren Kardiologen, aus dem Dickdarm zum Gastroenterologen und

21 Vgl. Freitas, Robert A.: *Nanomedicine, Volume IIA: Biocompatibility*, Richardson, Tex. 2003. Abrufbar unter: <http://www.nanomedicine.com/NMIIA.htm>, 08.08.2007.

so weiter –, wo sie professionell Tag und Nacht überwacht werden. Eines Tages könnten Sie also eine Email von Ihrem Kardiologen bekommen, in der drin steht, dass Sie Ihr Herz zu ihm in die Sprechstunde bringen müssen, damit er es mal eben auf Vordermann bringen kann – obwohl Sie selbst noch gar nicht bemerkt hatten, dass irgendetwas nicht in Ordnung ist. Solche neuen Technologien machen manchen Menschen Angst, aber da die sie nachweislich zuverlässig und ohne unerwünschte Nebenwirkungen Leben retten können, werden sie sicher allmählich als normal akzeptiert werden – so wie auch Narkosen und Antibiotika in der heutigen Medizin zu normalen und nicht mehr beängstigenden Technologien geworden sind.

Thielmann: Einige Ihrer Anwendungen, wie das extraretinale Display für das okulare Outmessaging oder das Hautdisplay als ein ‚makroskopisches‘ Kommunikationsmedium, sind von Ihnen entwickelt worden, um Patienten medizinische Informationen zur Verfügung zu stellen. Werden diese Nanomedien Ihrer Ansicht nach die Mediennutzung grundsätzlich und radikal verändern? Und glauben Sie, dass Nano- und Quantencomputing eine disruptive Technologie sind, die eine neue Medienepoche einläuten – vielleicht in ähnlicher Weise, wie dies beim Medienumbuch von analogen zu digitalen Medien stattgefunden hat?

Freitas: Ich denke die Antwort ist ja. So wie digitale Medien in vielen Fällen die analogen Medien ersetzt haben, sind nanotechnologische Medien in der Lage, den Rundfunk durch einen Zielfunk [*narrowcasting*] zu ersetzen. Und wenn ich ‚Zielfunk‘ sage, meine ich: extrem gezielt! Informationen können dabei nicht nur gezielt an eine bestimmte Person übermittelt werden, sondern zu oder von den einzelnen Organen, Geweben oder sogar Zellen eines Menschen, inklusive den Zellen von Auge, Ohr oder gar Gehirn. Die Möglichkeiten sind hier wirklich atemberaubend.