

DAS NANOROBOTISCHE HAUTDISPLAY

VON ROBERT A. FREITAS JR.¹

Bei dem programmierbaren Hautdisplay handelt es sich um eine sehr effiziente Nanoroboter-aggregierte Benutzerschnittstelle. Pigmenttätowierungen², Feuermale, Blutschwämmchen (einfache Hämangiome) und anderen Muttermale sind ein eindeutiger Beleg dafür, dass kleine, biokompatible Partikel permanent in die Dermis implantiert werden können und über eine Zeitspanne von Jahrzehnten oder länger ihren Ort nicht verlassen. Dementsprechend könnten wohl auch Hautdisplays über sehr lange Zeiträume eine stabile Position einnehmen.

Nehmen Sie eine Population von ~ 3 Milliarden Display-Nanobots, die 200-300 Mikrometer tief unter der Hautoberfläche eingebettet werden und ein $6\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ großes Rechteck auf der ebenen Fläche des Handrückens oder der glatten inneren Oberfläche des Unterarms bedecken. Die Nanoroboter haben ein Volumen von $\sim 1\text{ }\mu\text{m}^3$ und nehmen damit nur 1% des 300 mm^3 umfassenden Gewebavolumens ‚vor Ort‘ ein. Bei einem angenommenen optimierten Wirkungsgrad von 10% für die ergooptische Konversion verbraucht jedes Device $\sim 10\text{ pW}$ für die Erzeugung sichtbarer Photonen in den gewünschten Farben und in einer Intensität von $\sim 1\text{ pW}/\mu\text{m}^2$ oder $1\text{ Watt}/\text{cm}^2$, um eine bequeme Sichtbarkeit zu ermöglichen.³ Sichtbare Photonen werden in 10-100 Mikrometer Tiefe vollständig gestreut, aber fast gar nicht absorbiert, sodass 50% der gestreuten Photonen, die am Ende die Hautoberfläche erreichen, ein diffuses Leuchten hervorrufen. Für die Installation und für Positionskorrekturen müssen die Display-Nanobots zumindest bis zu einem gewissen Grad mobil sein, und einige zusätzliche Nanodevices werden wahrscheinlich noch benötigt, um bei Rechenoperationen, Datenspeicherung, externer Kommunikation und anderen hauswirtschaftlichen Aufgaben zu helfen.

Bei einer Versorgung durch kontinuierlich verfügbare chemische Brennstoffe könnte die Anzeige nur 0,1 - 1 Sekunde lang arbeiten, bevor die Nanobots den

1 Im Original erschienen in: Freitas, Robert A. Jr.: *Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities*, Austin, Tex. 1999, S. 204-206 [Auszug aus Kapitel 7.4.6.7 „Macroscale Outmessaging Transducers“], <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.6.7.htm>, 08.08.2007. Für den Abdruck in *Navigationen* hat der Autor den Titel geändert in „The Nanorobotic Dermal Display“.

Aus dem Amerikanischen übersetzt von Tristan Thielmann.

Die deutsche Übersetzung erfolgte mit Genehmigung des Autors. Eine Übersetzung in andere Sprachen wie auch jedwede anderweitige Verwendung des Textes ist nur mit Einwilligung des Autors gestattet.

2 Vgl. Sperry, Kris: „Tattoos & Tattooing: Part I: History and Methodology“, in: *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, Jg. 12, 1991, S. 313-319.

3 Vgl. Kapitel 5.3.7 in: Freitas, Robert A. Jr.: *Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities*, Austin, Tex. 1999.

gesamten Oxyglukosevorrat in dem begrenzten Gewebesvolumen vor Ort verbraucht hätten. Demzufolge ist es erforderlich, einen großen Energiepufferspeicher einzubauen, der (bei einer angenommenen Energiespeicherdichte von 10^{10} Joule/m³)⁴ 40% des Gerätevolumens einnehmen würde. Ein solcher Speicher würde eine Funktionsdauer von ~ 1000 Sekunden ermöglichen, sofern zu jedem Zeitpunkt nur 20% aller Pixel Photonen abstrahlen. Diese Energiemenge kann aus dem lokalen Oxyglukosenachschub innerhalb etwa eines Tages resorbiert werden. Daraus ergibt sich ein langfristiger Arbeitszyklus von $\sim 1\%$ (~ 14 Minuten/Tag) für die Anzeige, auch wenn der Puffer in Einzelfällen das Display bis zu ~ 21 Minuten lang betreiben kann, bevor er leer läuft. Diese Limitierung durch die Energieversorgung lässt sich vollständig umgehen, indem man zusätzliche Energie aus z.B. einer Armbanduhr-großen akustischen Quelle⁵, einem speziellen transvaskulären Energieorgan⁶ oder photovoltaischen Kollektoren (~ 30 pW/ μm^2 bei wolkenlosem Mittagshimmel; ~ 1 pW/ μm^2 in einem gut beleuchteten Raum)⁷ bereitstellt oder ein passives (reflektierendes) Display benutzt, das für einige Zwecke sicherlich genügen mag.

Eine Anordnung aus 3 Milliarden Nanobots kann so programmiert werden, dass sie viele Tausende verschiedener Anzeigen bilden. Jede Anzeigenkonfiguration ist fähig

1. zur Datenausgabe und Darstellung der Informationen, die über ein Kommunikationsnetzwerk von der größeren, überall im Körper verteilten In-vivo-Nanoroboter-Population empfangen wurden, und
2. zur Annahme einer Dateneingabe des Patienten und zur Weiterleitung der Daten (über das Kommunikationsnetzwerk) an geeignete interne Nanoroboter-Subpopulationen.

Auch Full-Motion-Animationen oder Videos könnten bis zum 10^7 -Bit/sec-Limit des mobilen Kommunikationsnetzwerks ausgestrahlt werden; Fasernetzwerke bieten sogar Datenübertragungsraten von bis zu $\sim 10^9$ Bit/sec⁸. Abbildung 1 - 8 zeigt eine Auswahl alternativer Displaydarstellungen (in natürlicher Größe) aus den vielen tausend vorstellbaren Möglichkeiten.⁹

4 Vgl. Kapitel 6.2.3 in: Freitas (wie Anm. 3).

5 Vgl. Kapitel 6.4.1 in: Freitas (wie Anm. 3).

6 Vgl. Kapitel 6.4.4 in: Freitas (wie Anm. 3).

7 Vgl. Kapitel 4.9.4 und 6.3.6 in: Freitas (wie Anm. 3).

8 Vgl. Kapitel 7.3.1 in: Freitas (wie Anm. 3).

9 Anm. d. Ü.: Freitas verweist im Originaltext auf eine vergleichbare, weniger detailliert ausgearbeitete Abbildung. Diese ist abrufbar unter: <http://www.nanomedicine.com/NMI/Figures/7.7A.jpg>, 08.08.2007. Die Nummerierung der Abbildungen wurde angepasst.

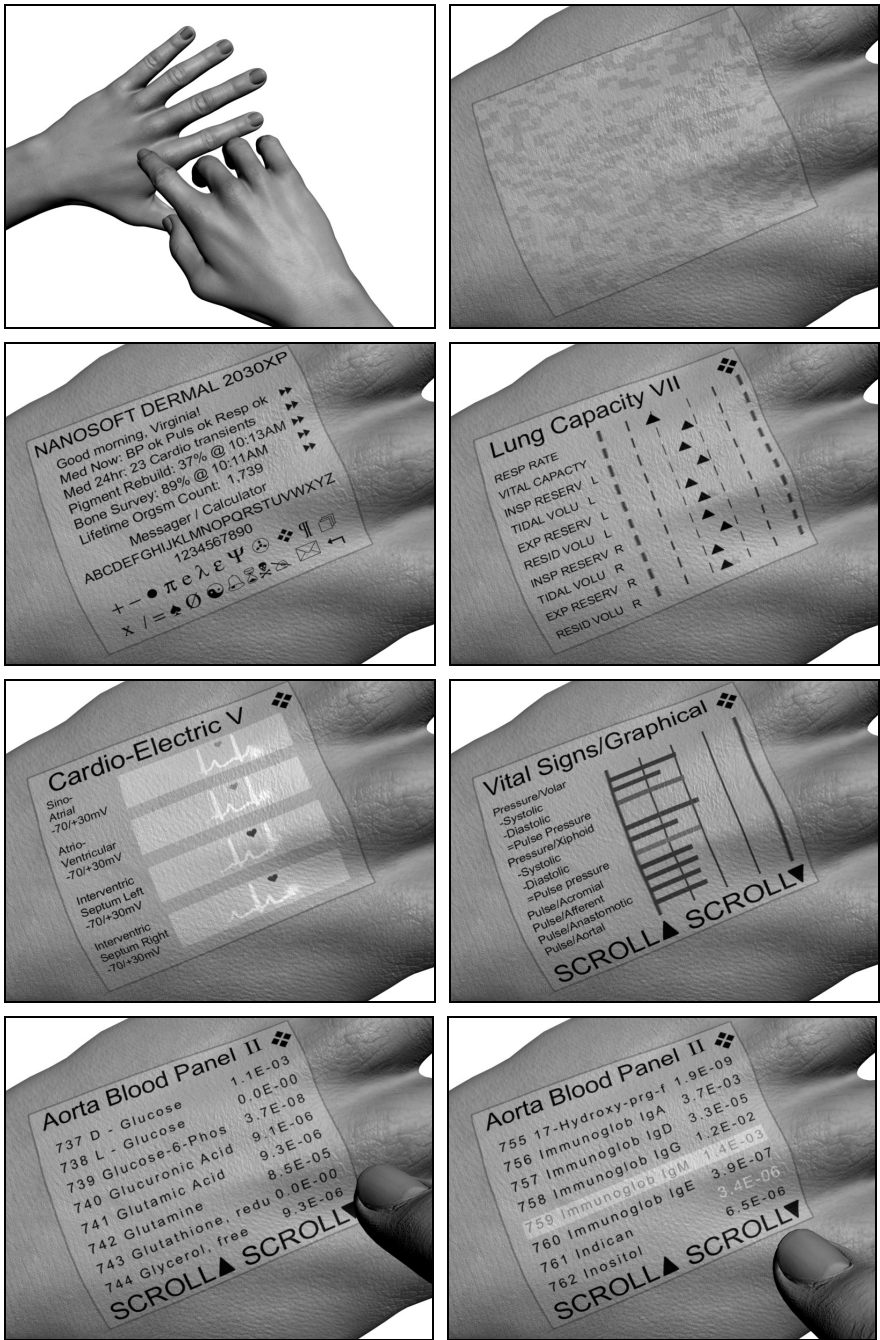


Abb. 1-8: Freitas' Hautdisplay illustriert von Gina Miller¹⁰.

10 Copyright © 2005 Gina Miller und Robert A. Freitas Jr.

Für die Informationszufuhr zum Display ist eine Population sensorischer Nanobots erforderlich, die im ganzen Körper verteilt und untereinander durch ein Kommunikationsnetzwerk verbunden sind. So erfordert beispielsweise das „Lebenszeichen“-Panel [„*Vital Signs*“ panel; Abb. 6, T.T.] die Stationierung mindestens eines Telemetrie-Nanoroboters in jeder von einigen hundert Arterien des menschlichen Körpers (oder eventuell auch hinter jeder Venenklappe des gesamten Venensystems¹¹), der periodisch die lokalen Blutdruckdaten übermittelt.

Die Anzeige selbst hat im dritten Beispiel („*Messenger/Calculator*“) 60 je $(0,5\text{ cm})^2$ große Eingabetasten und ein $2\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ großes Ausgabefeld. In diesem Feld können 7 Reihen mit je 30 Zeichen angezeigt werden; dabei ist jedes Zeichen $(2\text{ mm})^2$ groß und zwischen den Zeilen bleibt ein freier Raum von je 1 mm. Die Zeichen werden mit $500\text{ }\mu\text{m}$ breiten Linien geschrieben; das entspricht mehr als dem Zehnfachen des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges im normalen Leseabstand von 30 cm. Etwa 500 Millionen aktive Nanoroboter sind an der bildlichen Darstellung der 60 Eingabetasten beteiligt. Die Display-Nanobots im Gewebe sind durchschnittlich $\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ voneinander entfernt, kontrollieren aber ihre relativen Positionen mindestens zehnmal pro Sekunde. Durch Berührung mit dem Finger [Abb. 7 und 8, T.T.¹²] wird die Haut um etwa 500 Mikrometer eingedrückt; dadurch kommt es zu heftigen und leicht registrierbaren Lageänderungen der darunter liegenden Nanodevices, aus denen auf die gewählte Taste geschlossen werden kann. Dehnung der Haut oder Beugebewegungen der angrenzenden Gelenke, die mit der Nachrichtenübertragung nichts zu tun haben, können ohne Schwierigkeiten von den Eingabeberührungen unterschieden werden. Die Anzeige kann durch Antippen der Haut mit dem Finger, zeitlich kodierte Händeklatschen oder Ähnliches aktiviert bzw. deaktiviert werden, und sie bleibt unsichtbar unter der Epidermis, solange sie nicht erleuchtet oder in Gebrauch ist.

Das Display könnte durch ausgeprägte Körperbehaarung oder besonders dunkle Hautpigmentierung gestört werden. Hämatome, Wundschorf, Schnitte oder Narben nach der Installation oder auch die Faltenbildung auf dem Handrücken könnten die Lesbarkeit der Anzeige teil- bzw. zeitweise beeinträchtigen. Die Positionskontrolle der Nanoroboter ermöglicht jedoch die nahezu perfekte Aufrechterhaltung der Anzeigengeometrie bis zum Abklingen der Verletzung, sofern es sich nicht um größere Abriss- oder Schnittwunden mit wesentlichem Gewebeerlust, um tiefe Verbrennungen, Exkorationen oder Skalpierungen handelt.

Anm. d. Ü.: Eine 3-minütige Animation des Hautdisplays ist abrufbar unter: <http://www.nanogirl.com/museumfuture/dermaldisplay.htm>, 08.08.2007. Millers Illustrationen ergänzen auf Wunsch des Autors diesen Artikel.

11 Anm. d. Ü.: An dieser Stelle verweist Freitas auf eine Abbildung, die abrufbar ist unter: <http://www.nanomedicine.com/NMI/Figures/8.3.jpg>, 08.08.2007.

12 Anm. d. Ü.: Freitas verweist im Originaltext auf eine vergleichbare, weniger detailliert ausgearbeitete Abbildung. Diese ist abrufbar unter: <http://www.nanomedicine.com/NMI/Figures/7.7B.jpg>, 08.08.2007.

Eine vergleichbare Technologie stellt 1998 ein $\sim 1 \text{ cm}^2$ großes, auf einem vollständig digitalen Chip [*Digital Micromirror Device*, T.T.] angebrachtes Projektionsdisplay dar, das von Texas Instruments entwickelt wurde und auf der Grundlage von 307.200 unabhängig voneinander drehbaren, winzigen Einzelspiegeln arbeitet.¹³ Jeder dieser Spiegel ist $16 \mu\text{m}^2$ groß und reflektierte durch Drehung um je $\pm 10^\circ$ farbige Lichtimpulse auf einen Bildschirm.¹⁴ Armbanduhrgroße persönliche Überwachungsgeräte für ein regelmäßiges Biomonitoring wurden von der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) in den Vereinigten Staaten¹⁵ sowie im privaten Sektor für die Sportmedizin¹⁶ entwickelt.

13 Anm. d. Ü.: Es handelt sich hierbei um das so genannte *Digital Light Processing* (DLP), eine von Texas Instruments patentierte Technologie, die in Video-Projektoren und Rückprojektions-Fernsehern Anwendung findet. Vgl. <http://www.dlp.com>, 08.08.2007.

14 Vgl. Cohen, Jon: „Interdisciplinary Talkfest Prompts Flurry of Questions“, in: *Science*, Vol. 270, 24.11.1995, S. 1294; Gabriel, Kaigham J.: „Engineering Microscopic Machines“, in: *Scientific American*, Jg. 273, Nr. 3, 1995, S. 150-153.

15 Vgl. Kind, Peter: „Personnel Status Monitor (PSM) System“, <http://www.sainc.com/arpa/abmet/sarcos.htm>, 08.08.2006. Vgl. auch Satava, Richard: „Combat Casualty Care“, <http://www.darpa.mil/arpa/tech-96/transcripts/satava.html>, 08.08.2006.

16 Vgl. Anderson, Ian: „Radio Transmitters Keep Tabs on Players“, in: *New Scientist*, Jg. 162, 05.06.1999.

