

Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten von Virtual Retinal Displays

Marek Doniec
22. November 2003

Universität Karlsruhe (TH)
marek@ira.uka.de
Proseminar: Informatik in der Medizin (WS 03/04)

Virtual Retinal Displays (VRDs) eröffnen im Bereich der Erweiterten Realität völlig neue Möglichkeiten bezüglich der optischen Darstellung von Informationen. Diese Proseminararbeit beschreibt kurz den Aufbau des Menschlichen Auges und den Sehvorgang. Anschließend wird dann die Funktionsweise der VRDs und deren Einsatzmöglichkeiten vorgestellt. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf den Bereich Sehhilfen gelegt.

1 Einleitung

Viele der Arbeiten, die heutzutage von Menschen verrichtet werden, verlangen, dass man sehr viele Informationen auf einmal im Überblick behält. Oft sind es so viele, dass es schwer fällt, diese sinnvoll zu visualisieren, ohne den Menschen bei seiner Tätigkeit zu hindern. Ein Beispiel hierfür ist die Medizin, sich Tag für Tag weiterentwickelt und neues Wissen über den menschlichen Körper und Möglichkeiten der Heilung hervorbringt. Dank dieser Entwicklung ist es heutzutage möglich bereits vor einer Operation den Verlauf zu planen und Position und Art des Problems (z.B. eines Tumors) zu bestimmen. Viele der zur Verfügung stehenden Informationen sind dann digital verfügbar, verlieren jedoch an Genauigkeit, da der Chirurg sie während einer Operation von einem zweidimensionalen Monitor selbst auf den Patienten übertragen muss. Die Idealvorstellung, dass diese Informationen direkt verfügbar sind, hat den Begriff „Erweiterte Realität“ (engl. Augmented Reality) geprägt. D.h. beim Beispiel der Medizin, dass der Chirurgen direkt am Patienten sieht, wo er den Schnitt machen muss. Bei der Erweiterten Realität stellt sich das Problem, dem Benutzer (Chirurgen) zusätzlich zu seinem herkömmlichen Sichtfeld gesonderte Informationen zur Verfügung zu stellen. Diese sollen ihm nach Möglichkeit so real wie die Welt um ihn vorkommen und direkt mit ihr gekoppelt sein. Um dies zu verwirklichen, eignet sich besonders das 1991 am Human Interface Technology Lab der University of Washington erfundene Virtual Retinal Display (VRD). Es ermöglicht, wie auch herkömmliche Head-Mounted Displays (HMDs, meist durch kleiner direkt vor dem Auge angebrachte LCD-Anzeigen realisiert) das Sichtfeld des Benutzers mit dreidimensionalen Bilddaten zu erweitern ohne, dass dieser gezwungen wird, dauernd auf einen Monitor zu schauen. Im Gegensatz zu HMDs ist dieses jedoch wesentlich heller, so dass es auch bei Umgebungslicht verwendet werden kann [1].

2 Das menschliche Auge

Im Folgenden wird zunächst die Funktionsweise eines einzelnen Auges erklärt. Anschließend wird das Zusammenspiel beider Augen sowie das daraus resultierende Räumliche sehen vorgestellt.

Das Auge funktioniert ähnlich wie eine Kamera. Die von einem Objekt reflektierten Lichtstrahlen gelangen durch die Pupille hindurch, die wie die Blende bei einer Kamera die einfallende Lichtmenge bestimmt. Anschließend werden die Lichtstrahlen von der Linse (siehe Abb. 1) gebündelt und gelangen dann durch den Glaskörper. Dort kreuzen sie sich und fallen schließlich seitenverkehrt auf die Netzhaut (Retina). Dort entsteht das eigentliche Bild, welches allerdings seitenverkehrt ist (links und rechts, sowie oben und unten sind vertauscht). Die Netzhaut wandelt diese Helligkeits- und Farbinformationen in Stromimpulse um und leitet diese Informationen über den Sehnerv an das Gehirn weiter. Die Umwandlung geschieht im Detail durch eine Drehbewegung des Farbstoffmoleküls Retinal, welches Bestandteil des von der Netzhaut produzierten Sehpurpurs ist. Dieses elektrische Signal wird dann von Ganglienzellen verstärkt und zusammengefasst. Dieser Vorgang soll nicht Thema dieser Seminararbeit sein und wird daher nicht näher erörtert. Der interessierte Leser findet mehr Informationen zu diesem interessanten Thema unter [2].

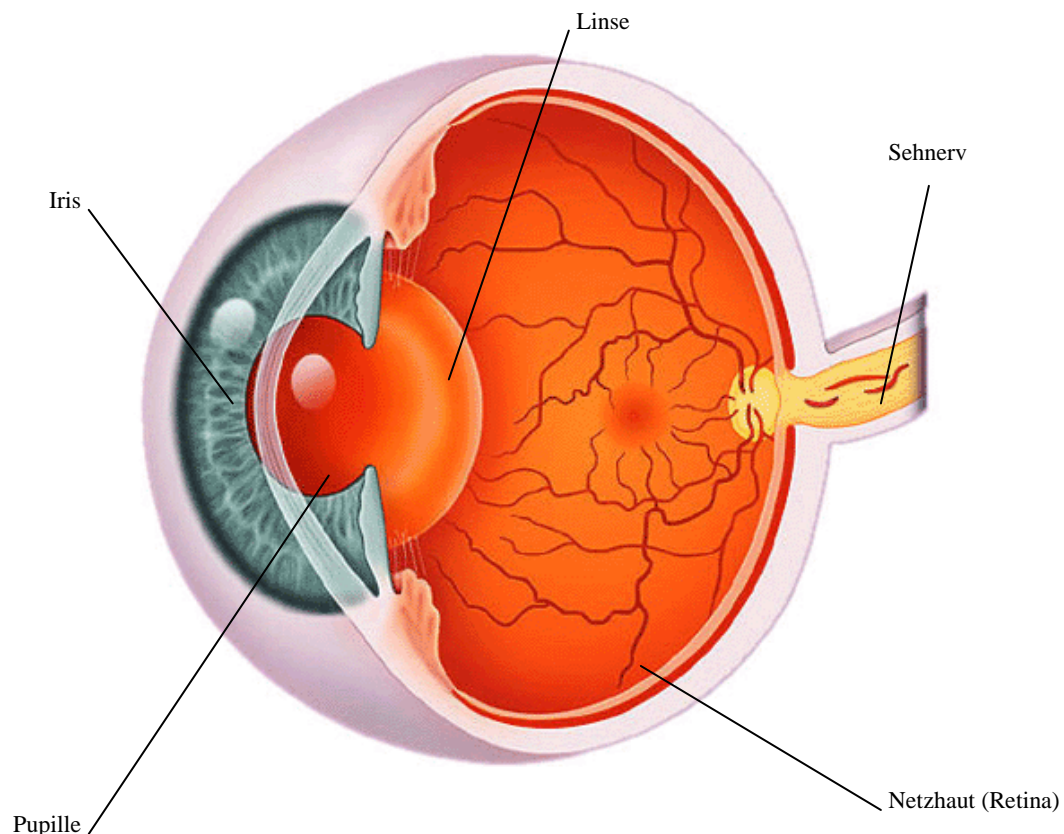


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines menschlichen Auges [3]

Wichtig für das Verständnis, wie ein VRD das (Farb-) Bild auf der Netzhaut erzeugt, ist die Einteilung der Umwandlungszellen in zwei Typen. Erstens die Stäbchenzellen, von denen es wesentlich mehr gibt. Diese ermöglichen es uns bei extrem schlechten Lichtverhältnissen zu sehen (z.B. bei Nacht) sowie extreme feine

Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Sie liefern jedoch keine Wellenlängeninformationen. Der zweite Zelltyp sind die Zäpfchenzellen, welche die Farbinformationen wahrnehmen. Sie reagieren verschieden stark bei unterschiedlicher Wellenlänge des einfallenden Lichts und sind wiederum in 3 Typen unterteilt: Einer, der hauptsächlich im roten Bereich des Sichtbaren Lichts reagiert (Maximum bei ~620nm), einer bei grünem Licht (Maximum bei ~520nm) und einer bei blauem Licht (Maximum bei ~450nm). Abbildung 2 zeigt einen schematischen Querschnitt durch die Netzhaut, auf dem man die einzelnen Zellen sehen kann. Die Empfindlichkeiten bezüglich der Wellenlänge nehmen bei jedem Typ ab, wenn man sich vom Maximum wegbewegt (Vergl. Abb. 3). Das Gehirn erzeugt aus den vom jedem Zäpfchenzellentypen wahrgenommenen Intensitäten schließlich die Information der wahrgenommenen Farbe [5]. Zusammengenommen reagieren die Stäbchenzellen im Wellenlängenbereich von ca. 400 bis 700nm, wodurch sich das sichtbare Spektrum definiert. Um also alle für den Menschen sichtbaren Farben (Wellenlängen) zu imitieren, reicht es, lediglich Strahlen mit drei verschiedenen Wellenlängen, jeweils eine im Bereich des Maximums eines Zäpfchenzellentyps, auf die Netzhaut zu projizieren. Wir werden später sehen, dass das VRD sich genau diese Eigenschaft zunutze macht.

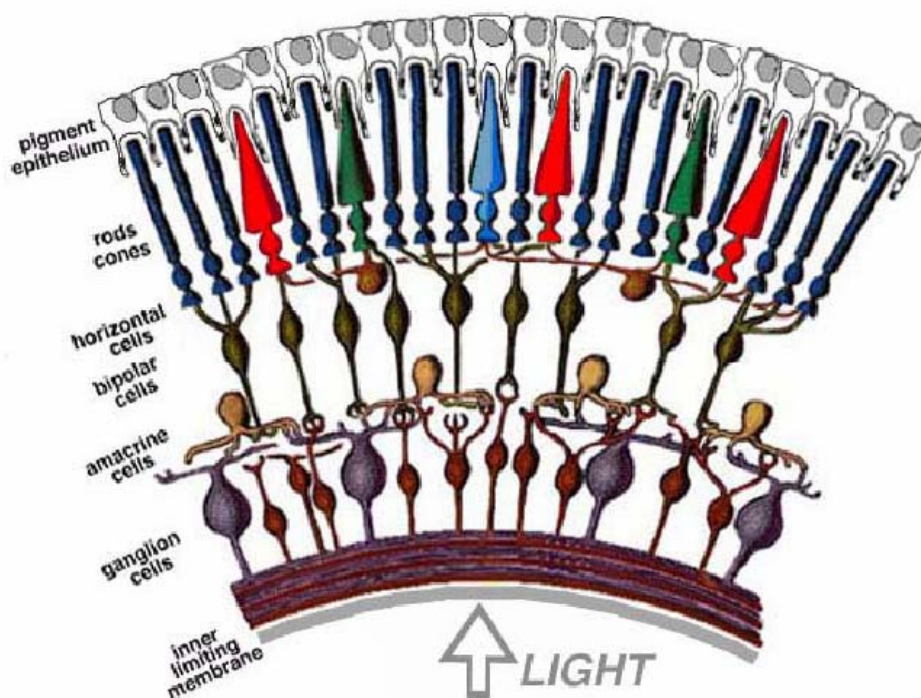


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Netzhaut [4]

Interessant ist noch, wie der Mensch räumlich sieht. Ein einzelnes Auge ist, so wie ein Fotoapparat auch, nur imstande ein zweidimensionales Bild aufzunehmen, das keine Tiefeninformationen enthält. Da die Augen leicht versetzt liegen, nehmen sie leicht verschiedene Bilder von der Umgebung wahr, wodurch das Gehirn die Tiefeninformationen erhalten kann. Man nennt dieses stereoskopische Sicht. Die Realisierung bei einem binokularen VRD stellt sich dann folgendermaßen dar, indem für jedes Auge ein leicht verschiedenes Bild berechnet wird und somit eine „echte“

Darstellung von dreidimensionalen Objekten ermöglicht wird, die auf einem Monitor nicht möglich ist [1].

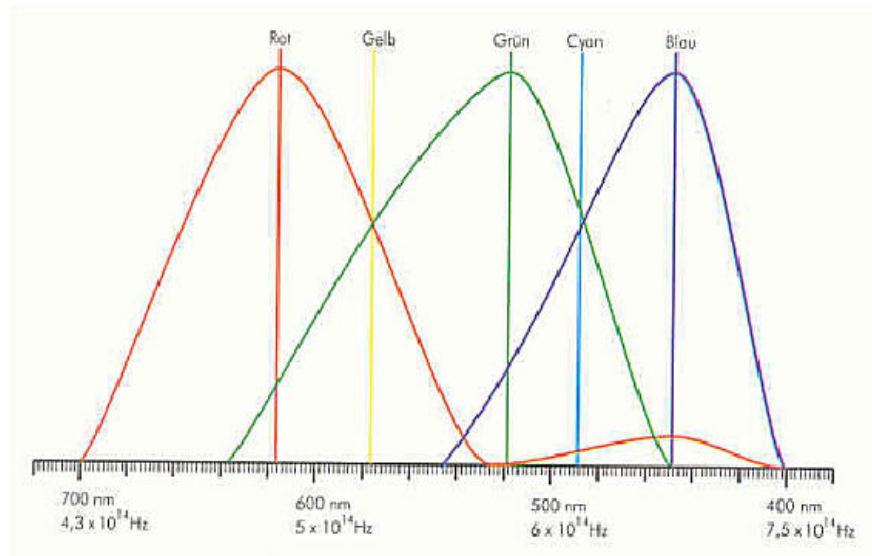


Abbildung 3: Empfindlichkeiten der 3 Zäpfchzellentypen [5]

3 Funktionsweise des VRD

Wie funktionieren diese VRDs? Im Gegensatz zu einem herkömmlichen CRT-Monitor, bei dem das Bild auf einen Bildschirm projiziert wird und von dort erst ins menschliche Auge gelangt, wird bei einem VRD das Bild mit Hilfe eines Laserstrahls direkt auf die Netzhaut des Betrachters projiziert wo es sich mit dem Bild der realen Welt vereint. Im Detail setzt sich das VRD dabei aus folgenden Komponenten zusammen, die im nachfolgenden Text weiter beschrieben werden (vgl. Abb. 4):

- Steuerelektronik
- Modulierte Laserquelle
- Scanner
- Ausgabeoptik

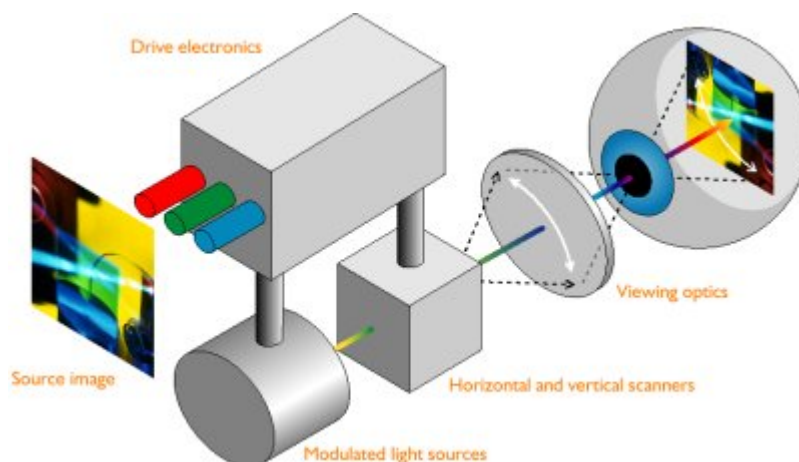


Abbildung 4: Grobes Schema eines VRD [1]

Die Steuerelektronik erhält das Eingangsvideosignal, das z.B. von einer herkömmlichen Grafikkarte erzeugt wird, und extrahiert Informationen über die einzelnen Bildpunkte und deren Helligkeit. Diese Bildpunkte werden dann durch Helligkeitsmodulation des Laserlichts erzeugt. Im kommerziellen Bereich sind momentan hauptsächlich monochrome VRDs üblich, bei denen lediglich ein roter Laserstrahl moduliert wird. Bei Farb-VRD, die noch in der Entwicklung stecken, sind dies 3 Laserstrahlen (rot, grün und blau) von denen jeder einzeln moduliert und anschließend alle drei zu einem Strahl zusammengeführt werden. Der Lichttransport erfolgt bei Farb-VRDs unter zu Hilfenahme von Lichtleitfasern, da so die zumeist große und schwere Lichtquelle vom Rest der Apparatur getrennt werden kann. Bei tragbaren Apparaturen entfällt dieser Teil und die Lichtquelle bilden eine (monochromes Bild) oder mehrere Laserdioden (vollfarbigen Display) [1].

Dieser Strahl wird dann auf die beiden Scanner umgeleitet. Es gibt verschiedene Arten von Scannern. Der in Abb. 5 dargestellte Mechanical Resonant Scanner (MRS) besteht aus einem ca. 3x6mm großen Spiegel, der auf einer als Achse dienenden Feder gelagert ist und, angeregt durch Spulen, sehr schnell (je nach Bildauflösung ca. 15 kHz) hin und her schwingt. Der vertikale Scanner erzeugt dabei die Bildzeilen und der horizontale Scanner bewegt den Strahl schließlich in jeder Zeile von Pixel zu Pixel [1, 6, 7].

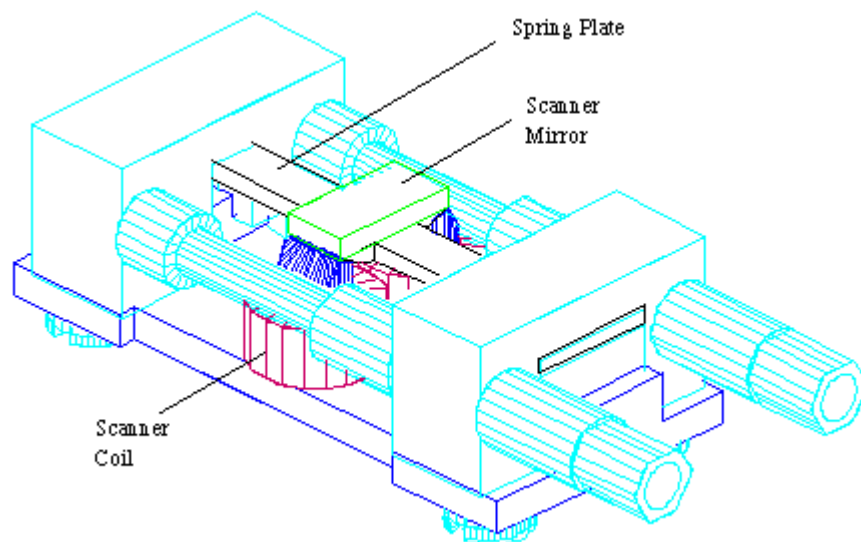


Abbildung 5: Mechanical resonant scanner [6]

Mittlerweile werden die beiden Scanner oft in einem einzigen vereint. Microvision (www.mvis.com), die VRDs kommerziell herstellt, benutzt dabei so genannte micro-electromechanical scanner (MEMS, Abb. 6 und 7). Ein MEMS ist ein auf zwei Achsen angebrachter Spiegel, der weniger als 1mm² klein ist. Er vereint die Funktionen des horizontalen und des vertikalen Scanners und ermöglicht dadurch eine wesentlich kleinere Gerätegröße [8].

Das durch die Scanner erzeugte Bild wird anschließend durch eine Linse aufgefächert, da es sonst nur einen sehr kleinen Bereich der Netzhaut treffen würde und über einen halbdurchlässigen Spiegel, der direkt vor dem Auge sitzt, durch die Pupille auf die Netzhaut projiziert. Der halbdurchlässige Spiegel führt dazu, dass das Bild der realen Welt nur abgedunkelt, jedoch sonst in keiner Weise verändert wird [1].

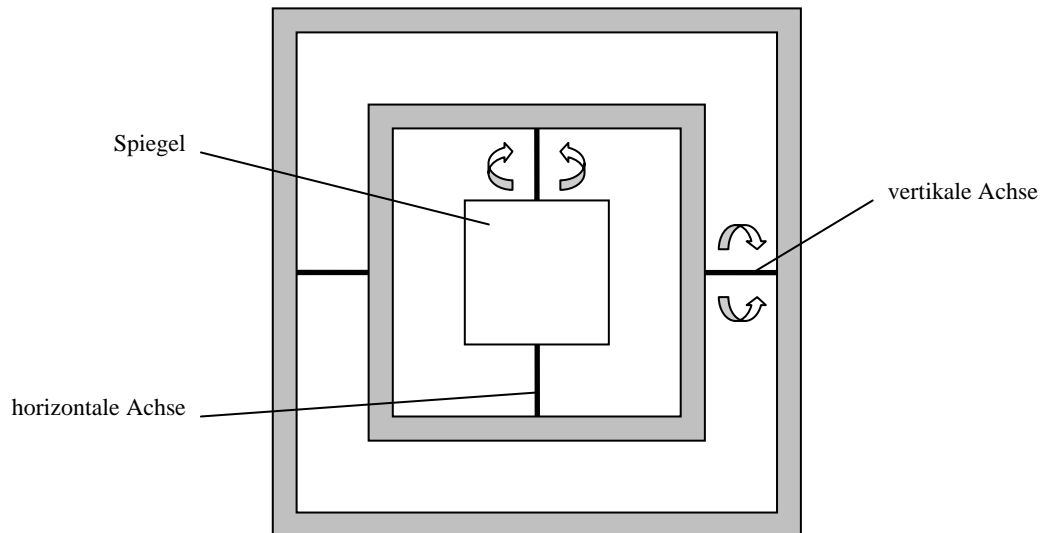


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines MEMS

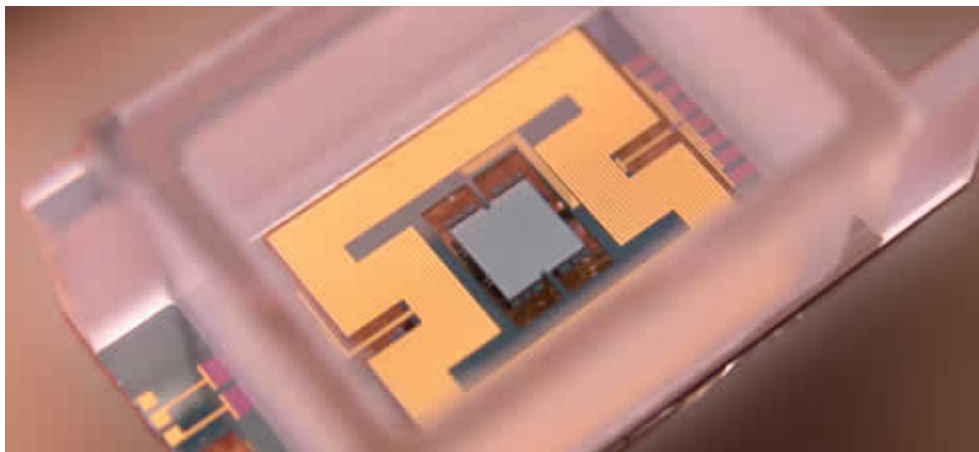


Abbildung 7: Micro-Electromechanical Scanner [8]

4 Gefahr für das Auge durch Laserstrahlung

Es stellt sich die Frage, inwieweit die von einem VRD erzeugte Laserstrahlung schädlich für das Auge ist. Die größte Gefahr besteht darin, dass die Scanner blockieren und der Laserstrahl, der sonst über die gesamte Netzhaut verteilt wird, auf einem einzigen Punkt stehen bleibt. Die dort absorbierte Energie übersteigt dann die herkömmlichen Werte eines Pixels um mehr als das Hunderttausendfache. Nach Angaben des HIT Lab an der University of Washington liegt die vom VRD erzeugte Gesamtenergie des Laserstrahls bei 100 bis 300 nW. Diese ist um zwei bis drei Größenordnungen unter der maximal zulässigen Laserstrahlungsmenge, die noch keine bleibenden Schäden am Auge verursacht (Maximum Permissible Exposure, MPE). Selbst bei einem Ausfall der Scanner bräuhete der Strahl über zwei Stunden um Schaden, wie z.B. Netzhautverbrennungen, zu verursachen. Nach Angaben von

Microvision und Telesensory (Hersteller und Vertreiber von elektronischen Sehhilfen für Sehbehinderte, www.telesensory.com) genügen ihre VRDs dem ANSI-Standard „For Safe Use of Lasers“, sowie dem „Sicherheit von Laserprodukten“ Standard der EU. Zudem sind die VRDs meist mit einer failsafe Funktion ausgestattet, die die Laserquelle abschaltet, sobald die Scanner stehen bleiben oder ein anderer Fehler entdeckt wird [9].

5 Anwendungs- und Forschungsgebiete

5.1 Medizin

Das VRD eignet sich besonders für den Gebrauch in der Medizin, in der der Einsatz von Bilddaten und deren Analyse zum Alltag gehört. Ein mit einem VRD ausgestatteter Chirurg kann direkt am Patienten sehen, wo er schneiden muss. Bei einer Gehirnoperation z.B. kann er bereits vor dem Auftrennen der Schädeldecke das Gehirn sehen (Abb. 8). Die Bilder erscheinen ihm dreidimensional (siehe Abschnitt 2), wodurch der Eindruck eines „Röntgenblicks“ erreicht wird. So können z.B. Röntgenbilder direkt auf den Patienten übertragen werden. Der Arzt hat dann nicht mehr ein zweidimensionales Röntgenbild vor sich, sondern sieht direkt am Patienten jeden Knochen im Raum, als ob das gesamte Gewebe rundum durchsichtig geworden wäre. Gefahr besteht dabei keine, denn fällt das VRD aus, so hat der Arzt immer noch volle Sicht. Er ist also kein Stück gehindert bei dem, was er gerade tut. Hinzu kommt, dass die vom VRD erzeugten Bilder wesentlich besser in der hellen Umgebung eines Operationssaals zu erkennen sind, als die von anderen HMDs. Dieses liegt an der, bereits oben beschriebenen, hervorragenden Lichtstärke des VRD im Gegensatz zu LCDs [1, 10].



Abbildung 8: Erweiterte Realität in der Medizin [10]

5.2 Militär

Ebenfalls beim Militär findet das VRD viele Einsatzmöglichkeiten. So entwickelt das HIT Lab ein interaktives VRD (IVRD) für US Navy Piloten. Dabei geht es darum, dem Piloten so viele Informationen wie möglich über sein normales Sichtfeld zu projizieren, die er sonst nicht auf einmal sehen könnte. Dazu gehört z.B. eine 360° Rundumsicht oder das Aufhellen des natürlich wahrgenommenen Bildes [1]. Das VRD ist dabei die einzige Anzeigenart, deren Bild hell genug ist, um bei hellem Sonnenlicht immer noch klar und deutlich vom Piloten wahrgenommen zu werden [1].

5.3 Industrie

Ein Mechaniker, der z.B. in der Reparatur arbeitet, ist oft während seiner Arbeit gezwungen, in Anleitungen und Datenblätter zu schauen und das dort gefundene Wissen auf das eigentliche Objekt zu übertragen. Beim Einsatz eines VRD könnten diese Informationen direkt in sein natürliches Sichtfeld eingebettet werden, was seine Effizienz deutlich steigern und Arbeitszeit senken würde. So hat eine Studie von Microvision ergeben, dass eine Gruppe von Krankenwagenmechanikern die Reparaturzeit einzelner Wagen beim Einsatz eines VRD mit tragbarem Computer und Sprachinterface um bis zu 70% senken konnte.

In Verbindung mit GPS und anderen Positionierungssystemen ließe sich das VRD auch beim Benutzen von Baggern und anderen Abbaumaschinen einsetzen. So könnte der Arbeiter bei Benutzung eines VRD direkt sehen, welches Gebiet er ausheben muss, ohne dass dieses vorher real abgesteckt werden muss.

5.4 Medien und Unterhaltungselektronik

Handys und Organizer bieten heute immer mehr Funktionalität, die oft daran scheitert, dass das Display die vorhandenen Informationen nicht geeignet darstellen kann. Würde man alle Handheld-Geräte mit einem VRD, wie es in Abb. 9 zu sehen ist, ausstatten, so könnte man trotz extrem kompakter Bauweise im Auge des Betrachter ein Bild erzeugen, das von der wahrgenommenen Größe einer Kinoleinwand gleicht. Zudem verbraucht das VRD wesentlich weniger Energie, als ein TFT Display, da beim VRD die gesamte abgestrahlte Lichtenergie ins Auge fällt, während ein TFT Display in alle Richtungen Lichtenergie ausstrahlt und nur ein Bruchteil davon ins Auge gelangt [1].



Abbildung 9: Ein Handy mit VRD [1]

6 Das VRD als Sehhilfe

Bei ersten Vergleichstests zwischen VRD und CRT Monitor stellte man zufällig fest, dass Personen mit Sehschäden besser mit einem VRD zurechtkamen, als mit einem herkömmlichen CRT Monitor [11].

In einer von Conor Kleweno durchgeführten Studie wurde die Tatsache weiter untersucht [12]. 13 Testpersonen mit Sichtschiiden unterschiedlicher Ursache wurden jeweils auf Lesegeschwindigkeit und Detailwahrnehmung getestet. F#ur die Ermittlung der Lesegeschwindigkeit wurden den Testpersonen 20 Sekunden lang W#or#ter angezeigt, die sie laut vorlesen mussten und als Ergebnis die Anzahl richtig gelesener W#or#ter genommen. F#ur die Detailwahrnehmung wurden jeweils f#unf Landholts „C’s“ (siehe [12]) pro Zeile angezeigt und als Ergebniswert die Nummer der Zeile genommen, in der drei der f#unf „C’s“ richtig erkannt wurden. Dabei wurde jeder Test bei allen Personen mit einem monochromen rot-schwarz VRD sowie mit einem CRT Monitor durchgef#uhrt. Anschließend wurden die Testpersonen befragt, welches der Ger#ate f#ur sie ein klareres und sch#arferes Bild erzeugte und welches ein helleres. Neun der 13 Befragten empfanden das vom VRD projizierte Bild als klarer, w#ahrend nur zwei dasselbe vom CRT Monitor behaupteten. Zwei weitere empfanden beide Bilder als gleichklar. Zehn Befragte empfanden, dass das VRD ein helleres Bild erzeugt, als der CRT Monitor, zwei fanden beide Bilder gleichhell und nur eine Person empfand das CRT Bild als heller. Sechs von 13 Personen hatten zudem eine erh#ohte Detailwahrnehmungsr#ate bei Benutzung des VRD im Gegensatz zum CRT Monitor. Diese f#ur das VRD sprechenden Ergebnisse traten vorwiegend bei Personen mit durch Sch#aden an der Linse verursachten Sichteinschr#ankungen. Man erkl#art sich diesen Effekt vorwiegend dadurch, dass der Durchmesser des Laserstrahls, der in Auge eindringt, maximal 0.8mm gro#o ist und durch die Linse verursachte Diffusionseffekte sich somit im Vergleich zum Bildstrahl der CRT Monitors, der fast die gesamte Linse trifft, nur geringf#ugig auswirken. Zudem nimmt nach Stiles und Crawford die Helligkeit des ins Auge treffenden Strahls ab, je weiter er vom Zentrum der Pupille auftritt [13]. Nach Kleweno ist bei einer durchschnittlich ge#offneten Pupille von 3.3mm besteht bereits eine Helligkeitszunahme von 15% beim VRD gegen#uber dem CRT Monitor zu erkennen [12].

Die Tests der Lesegeschwindigkeit hingegen wiesen zwar wieder (leichte) Vorteile beim Benutzen des VRDs bei Personen mit Schäden an der Augenoptik auf, zeigten jedoch einen Rückfall der Lesegeschwindigkeit bei anderen Testkandidaten. Besonders bei Personen mit Schäden an der Netzhaut fiel die Leserate beim VRD im Vergleich zum CRT Monitor deutlich. Dies passiert hauptsächlich, da die Worte aus ihrem verringerten Sichtbereich herausfielen. Damit zeigt sich, dass das VRD für Personen mit Netzhautschäden eher ungeeignet ist, da es für sie schwer ist, das Bild überhaupt zu finden. Anzumerken ist, dass sich zwölf der 13 Testpersonen darüber beschwerten, wie unangenehm der rot-schwarz Kontrast sei. Es ist statistisch nachgewiesen, dass der rot-schwarz Kontrast im Vergleich zu grün-, blau- oder weiß-schwarz Kontrast eine langsamere Lesegeschwindigkeit hervorruft. Somit würden sich farbige VRDs wesentlich besser als Sehhilfe eignen, als monochrome VRDs mit rotem Laser [12].

Ein weiter Ansatz das VRD als Sehhilfe zu benutzen geht noch einen Schritt weiter. Man will hier das VRD nicht nur bei der Arbeit am Computer einsetzen, sondern zum Verstärken der Wahrnehmung allgemein. Das Schema eines solchen Gerätes ist in Abb. 10 zu sehen. Dabei soll eine Kamera die Umgebung aufnehmen und an einen Computer weitergeben. Dieser verstärkt das Bild oder hebt wichtige Informationen hervor und gibt es dann über das (vorzugsweise Farb-) VRD an den Benutzer weiter. Dieser sieht also immer noch alles, was er sonst sehen würde, kriegt jedoch alle Bilddaten verstärkt. Er ist also, selbst wenn das VRD ausfällt oder der Computer mit der Verarbeitung der Bilddaten nicht nachkommt, immer noch soweit reaktionsfähig, wie er ohne das Gerät wäre [14].

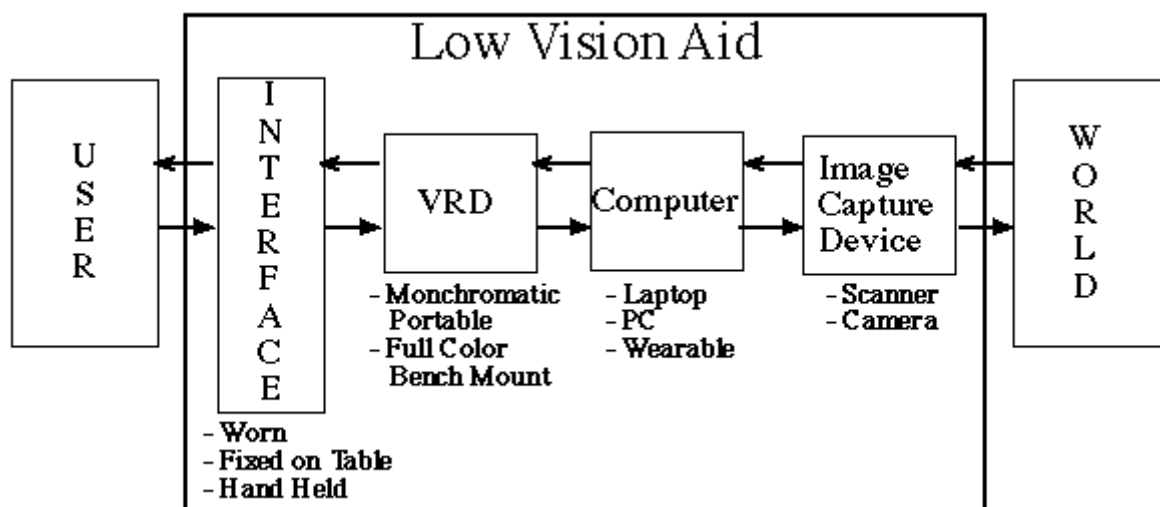


Abbildung 10: Schema einer erweiterten Sehhilfe [14]

7 Zusammenfassung

Zusammenfassen kann gesagt werden, dass das VRD sich in nicht allzu ferner Zukunft zumindest gegenüber den anderen HMDs durchsetzen wird. Dies liegt vor allem an der größeren Helligkeit, denn herkömmliche HMD lassen sich bisher nur bei hellen Umgebungen einsetzen, wenn das Bild der echten Welt stark abgedunkelt wird. Das

VRD hingegen ist selbst bei hellem Sonnenlicht noch gut zu erkennen. In einigen Gebieten, wie z.B. dem Operationsaal (siehe Einleitung), könnte das VRD auch teilweise bisher eingesetzte Monitore ersetzen, da es wesentlich handlicher ist. Auch als Sehhilfe hat das VRD ein gewisses Potential, wie die oben beschriebene Studie von Kleweno [12] zeigt. Die in Abschnitt 5 dieser Arbeit angesprochenen Gebiete sind dabei nur Beispiele, in denen das VRD sinnvoll eingesetzt werden kann. Sicherlich gibt es eine Fülle von weiteren Gebieten, in denen das VRD vorteilhaft zum Einsatz kommen könnte.

Referenzen

- [1] Panos Fiambolis, Virtual Retinal Display
http://www.cs.nps.navy.mil/people/faculty/capps/4473/projects/fiambolis/vrd/vr_d_full.html [Stand: 22.11.2003]
- [2] Prof. Dr. Peter Entel, Prof. Dr. Volker Buß, Das Menschliche Auge auf der Festplatte, http://www.rasch-multimedia.de/info/download/pdf/forum2000/heterogene_systeme.pdf [Stand 22.11.2003]
- [3] Dr. med. Tobias Neuhaus, Der Aufbau des menschlichen Auges,
<http://augenspezial.de/themen.asp?iid=441> [Stand 22.11.2003]
- [4] E. Zrenner, Verlaufsprotokoll eines Neurobiologischen Seminars zum Thema Bionik und Neurobionik, Will Retinal Implants Restory Vision? ?
http://www.bio2.rwth-aachen.de/teaching/ss02/Seminar/protoll_eltrop.pdf
[Stand 22.11.2003]
- [5] Author unbekannt, BG Babenbergerring, Wiener Neustadt, <http://www.bg-bab.ac.at/~mathe/infoweb/farbe.htm> [Stand 25.11.2003]
- [6] Richard S. Johnston, Development of a commercial retinal scanning display
<http://www.hitl.washington.edu/publications/p-95-5/> [Stand 22.11.2003]
- [7] Martin Kirchner, Technische Realisierung und medizinische Anwendung von Head-Mounted-Displays,
http://www.ipr.ira.uka.de/~megi/SEMINAR/SS_03/HMD.pdf [Stand 25.11.2003]
- [8] Microvision, What is MEMS? <http://www.mvis.com/technology/mems.html>
[Stand 22.11.2003]
- [9] Erik Viirre, Richard Johnston, Homer Pryor, Satoru Nagata and Thomas A. Furness III, Journal of Laser Applications (1990) 9, 253-260, Laser Safety Analysis of a Retinal Scanning Display System,
<http://www.hitl.washington.edu/publications/r-97-31/> [Stand 25.11.2003]
- [10] Jim Vallino, Introduction to Augmented Reality
<http://www.se.rit.edu/~jrv/research/ar/introduction.html#Section1.2.1> [Stand 22.11.2003]
- [11] Nathan Croft, The Daily, Seeing the world in a whole new light,
<http://archives.thedaily.washington.edu/2000/042400/news.html> [Stand 25.11.2003]

- [12] Conor P. Kleweno, BS; Eric J. Seibel, PhD; Erik S. Viirre, MD, PhD; John P. Kelly, PhD; Thomas A. Furness III, PhD, The virtual retinal display as a low-vision computer interface: a pilot study,
<http://www.vard.org/jour/01/38/4/klewe384.htm> [Stand 25.11.2003]
- [13] Stiles WS, Crawford BH., The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at different points. Proc R Soc Lond 1933;B112:428-50.
- [14] HIT Lab, University of Washington, Design for a Low Vision Aid
<http://www.hitl.washington.edu/research/lvoid/> [Stand 22.11.2003]
- [15] Leslie Versweyveld, Virtual Medical Worlds, Virtual Retinal Display forms ideal solution for low vision disability and surgical application
<http://www.hoise.com/vmw/articles/LV-VM-05-98-20.html> [Stand 22.11.2003]