

# Virtual Reality und Augmented Reality (VR/AR)

*Auf dem Weg von der Nische zum Massenmarkt*

Ralf Dörner · Wolfgang Broll  
Paul Grimm · Bernhard Jung

## Preise, Perspektiven, Potenziale

Unter 300 € soll sie kosten. Ende 2014 soll sie als Produkt erscheinen. Die Oculus Rift, eine Brille, die ihre Träger in eine Virtuelle Realität (VR) versetzen kann. Bisherige VR-Brillen kosten oft mehr als das Zehnfache und vermitteln aufgrund eines eingeschränkteren Sichtfelds keinen derart guten Eindruck einer virtuellen 3D Welt. Bessere Hardware für einen Bruchteil des Preises? Kein Einzelfall. Ein neues Anwendungsfeld macht es möglich: Entertainment. Statt wie bisherige VR Hardware eine kleine Zielgruppe z. B. für industrielle Anwendungen zu adressieren, zielen neue Geräte auf den Computerspielemarkt, einen Massenmarkt. Nach einer vom Bundesverband Interaktive Unterhaltungssoftware in Auftrag gegebene Studie der GfK wird das Marktvolumen allein in Deutschland mit 1,82 Milliarden Euro beziffert. Die Firma Oculus VR brauchte vor dem Hintergrund derartiger Marktperspektiven nur vier Stunden, um über Crowdfunding mittels der Online-Plattform Kickstarter 250.000 US\$ als Startkapital zu sammeln. Das Unternehmen wurde inzwischen für ca. zwei Milliarden US\$ aufgekauft. Insgesamt bieten derart erschwingliche Hardware und derart hohe Investitionen für die Anwendbarkeit und die Verbreitung von VR neue Perspektiven. Wird VR also massentauglich werden können?

VR verfolgt das Ziel, Nutzer in eine scheinbare Welt zu versetzen, in der sie sich präsent fühlen. Dazu werden Technologien eingesetzt, die das Eintauchen, die Immersion, in diese virtuelle Welt erleichtern sollen, indem künstliche Reize für die visuelle und auditive Wahrnehmung erzeugt werden, manchmal auch für weitere Sinne wie den haptischen Sinn oder den Gleichgewichtssinn. Spezielle VR-Brillen spielen über ein Display dem rechten

und linken Auge Bilder einer virtuellen 3D Welt ein. Außerdem ermittelt ein Sensor die aktuelle Kopfposition und Blickrichtung, sodass man sich in der virtuellen Welt durch Drehen des Kopfes einfach umschauen kann, genauso wie man es auch aus der Realität gewohnt ist. Im Extremfall einer perfekten VR könnte man virtuelle Welt und Realität nicht mehr unterscheiden. Dies wird in einigen Science Fiction Filmen, z. B. „Die Matrix“ dargestellt, in denen die künstlichen Reize über eine Art Steckdose direkt in das Gehirn eingespielt werden. Soweit muss man aber nicht gehen, auch heute schafft man es schon, überzeugende virtuelle Umgebungen zu realisieren. Bei Menschen, die man an die Dachkante eines virtuellen Wolkenkratzers stellt, kann man erhöhten Pulsschlag und feuchte Hände feststellen. Und das obwohl diese Menschen wissen, dass sie nicht an einem gefährlichen Abgrund, sondern in einer sicheren VR Umgebung stehen. Hier kommt eine Eigenschaft von Menschen zum Tragen, die der Philosoph Samuel T. Coleridge „willing

---

DOI 10.1007/s00287-014-0838-9  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

---

Ralf Dörner  
FB Design, Informatik, Medien, HS RheinMain,  
Unter den Eichen 5, 65195 Wiesbaden  
E-Mail: ralf.doerner@hs-rm.de

Wolfgang Broll  
Fakultät für Informatik und Automatisierung/Fakultät für  
Wirtschaftswissenschaften und Medien, TU Ilmenau,  
Ehrenbergstr. 29, 98693 Ilmenau  
E-Mail: wolfgang.broll@tu-ilmenau.de

Paul Grimm  
FB Angewandte Informatik, HS Fulda,  
Marquardstrasse 35, 36039 Fulda  
E-Mail: paul.grimm@cs.hs-fulda.de

Bernhard Jung  
Fakultät für Mathematik und Informatik,  
TU Bergakademie Freiberg,  
Bernhard-von-Cotta-Strasse 2, 09596 Freiberg  
E-Mail: jung@tu-freiberg.de

suspension of disbelief“ nannte. Menschen blenden einfach aus, dass sie sich offensichtlich in einer künstlichen Wirklichkeit befinden – genauso wie man sich bei synchronisierten Filmen nicht ständig daran stößt, dass James Bond als englischer Agent immer perfektes Deutsch spricht.

Warum sollte man Menschen in eine VR versetzen wollen? Kaum ein Auto oder Flugzeug wird heute mehr gebaut ohne Nutzung von Methoden aus der Virtuellen Realität. So können beispielsweise Entwürfe realitätsnäher visualisiert und Prototypen kostengünstiger erstellt werden, als dies im traditionellen Modellbau der Fall ist. In einer virtuellen Fabrik kann man die geplante Architektur des Gebäudes und die darin stattfindenden Produktionsprozesse verständlich darstellen und analysieren. Planungsfehler lassen sich in der virtuellen Realität deutlich preiswerter beseitigen. Neben Anwendungen in Unternehmen kann VR aber auch der Unterhaltung dienen. Man kann phantastische Spielwelten oder historische Orte erleben – oder im Führerstand eines Zuges durch ein virtuelles Deutschland fahren. Neuartige Lernumgebungen werden mit VR geschaffen. Daten, z. B. aus der Medizin, können eingängig visualisiert werden. Das Potenzial ist enorm. Ganz grundlegend ist der Vorteil, dass man eine perfekte VR als perfekte Benutzungsschnittstelle für Software begreifen kann. Die Nutzer können einfach so handeln, wie sie es gewohnt sind (z. B. den Kopf drehen, um sich umzuschauen), und blenden aus, dass sie mit einem Computerprogramm interagieren. Anwendungen und Zielsetzungen existieren also, die durchaus für einen breiten Massenmarkt interessant sind – und dass nicht nur im Bereich des Entertainment.

Im Folgenden betrachten wir zunächst, welche neue preiswerte Hardware für VR nutzbar ist, und welche massentauglichen Anwendungen damit realisiert werden könnten. Danach gehen wir auf eine Weiterentwicklung des VR-Begriffs hin zu Mixed Reality (MR) ein. Darunter versteht man, dass sich Realität und VR nicht ausschließen, sondern als zwei Pole mit einem kontinuierlichen Übergang aufgefasst werden können (das sogenannte Milgram-Kontinuum, vgl. [11]) Ergänzt man z. B. den Blick auf die reale Welt um virtuelle Bildteile, erhält man eine Augmentierte Realität (AR). Potenzial für eine weite Verbreitung von AR-Techniken entstand in den letzten Jahren insbesondere durch

die mittlerweile allgegenwärtigen Smartphones und Tablet-PCs. Aber auch für den High-End Bereich von VR-Installationen in der Wirtschaft und Wissenschaft bietet die neue Generation preiswerter VR-Hardware neue Einsatzmöglichkeiten. Zum Beispiel werden heute besonders hochauflösende CAVEs (vgl. Abb. 5) z. T. als gekachelte Displays bestehend aus 20 und mehr Einzeldisplays realisiert. Aber auch bei der Interaktion in CAVEs und anderen High-End VR-Installationen findet die neue Generation preiswerter Geräte für den Massenmarkt vielfältige Anwendung.

### Sehen, Gehen, Gestikulieren

Wie erkennt das VR-System die Aktionen des Nutzers? Wie kann das VR-System eine Virtuelle Welt darstellen und die Sinne des Nutzers ansprechen? Hierfür werden VR-Ein- und Ausgabegeräte genutzt, die zum einen als Sensoren Teilaspekte der realen Welt aufnehmen und zum anderen die virtuellen Daten mittels Rendering ausgeben (s. Abb. 1). Für viele VR-Ein- und Ausgabegeräte existieren mittlerweile preiswerte und auch bessere Alternativen in Ergänzung zu den bisher genutzten. Auffällig sind beispielsweise neu entwickelte Technologien wie die Brille Avegant Glyph [1], die Omni von Virtuix [14], welche ein Herumlaufen in einer virtuellen Welt ermöglicht, die Microsoft Kinect, welche die Bewegungen eines Nutzers aufzeichnet, die Leap [10], welche Fingerbewegungen exakt aufnehmen kann, oder das Armband Myo [13], welches Armbewegung aufzeichnet.

Die Weiterentwicklung in Bezug auf Funktionalität und Kosten kann am Beispiel der Navigationsunterstützung aufgezeigt werden. Wie kann der Nutzer in einer Virtuellen Welt sich an eine bestimmte Position bewegen? Es wurden unterschiedliche Vorgehensweisen genutzt. Angefangen über eine Steuerung mittels Joysticks, Flysticks (ein frei im Raum nutzbarer Joystick) und Fingergesten wurde das natürliche Gehen meistens mithilfe einer anderen Interaktionsform umgesetzt. Der VR-Pionier Jaron Lanier beschrieb dies einmal so: „after some time in Cyberspace, people try to walk through walls or try to move by pointing a finger“ [4]. Cyberwalk [6] und Virtusphere [15] sind Projektbeispiele, deren Ziel es war, ein natürliches Gehen in virtuellen Welten zu ermöglichen. Mit großem technischem Aufwand und entsprechend hohen Kosten wurden gute, aber aufgrund von Kosten und Raumbedarf

# { VIRTUAL REALITY UND AUGMENTED REALITY (VR/AR)

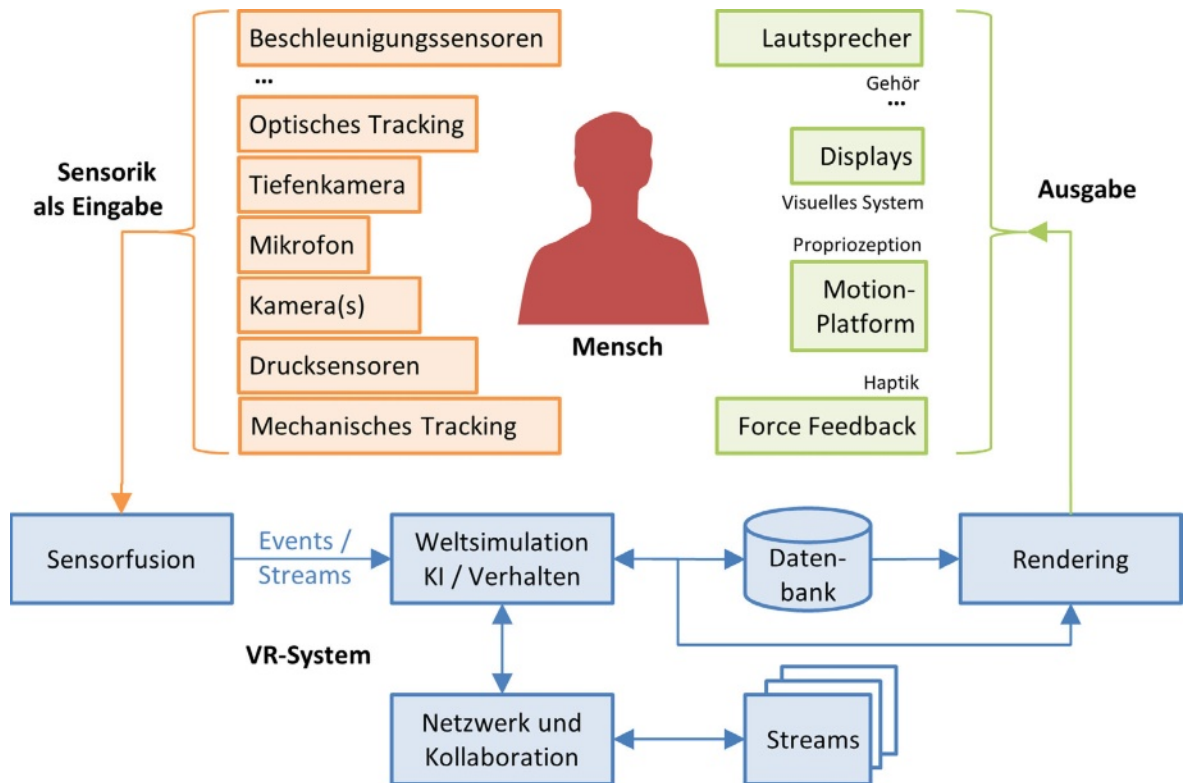


Abb. 1 Überblick über ein VR-System [5]

leider nicht massentaugliche Lösungen entwickelt. Die Virtuix Omni dagegen ermöglicht heute für 500 € ein Herumlaufen in einer virtuellen Welt. Durch den Einsatz von speziellen Rutschschuhen auf einer schrägen Fläche konnte auf aufwendige Förderbänder und Rollensysteme verzichtet werden.

Die Kamera Kinect von Microsoft ist ein weiteres Beispiel, welchen Einfluss die Adressierung des Massenmarktes auf die Kosten von Eingabegeräten hat. Für den Verkauf dieser Tiefenkamera, die als Erweiterung der Spielkonsole Xbox angeboten wurde, gab es eine Auszeichnung des Guinness-Buch der Rekorde für das bislang am schnellsten verkaufte Gerät im Bereich der Unterhaltungselektronik. Vor der Einführung haben Tiefenkameras mehr als das 20-fache gekostet. Die Kinect wird in vielen VR-Aufbauten als Tracking-Gerät (Gerät zur Verfolgung von Position und Orientierung eines Objekts) eingesetzt. So kann sie zum Einsatz kommen, um das Gehen in einer Motion Platform wie der bereits genannten Virtuix Omni zu erkennen. Im Bereich der Entwicklung von Technologien für das Tracking sind viele weitere Firmen aktiv: Leap Motion bietet einen stereokame-

rabasierten Sensor zum Hand- und Finger-Tracking an. Für 79 € können bis zu zehn Finger und deren Bewegungen erfasst werden. Der Nachteil ist, dass das Interaktionsvolumen recht klein ist. Für Kosten von unter 400 US\$ ist von PrioVR ein System zur Aufnahme von Körperbewegungen – z. B. zur Übertragung auf 3D Modelle – erhältlich, welches durch die Nutzung von 8 bis 17 Bewegungssensoren die Gelenkbewegungen eines Nutzer aufnimmt [12]. Gegenüber kamerabasierten Verfahren (s. Abb. 2) liegt dabei der Vorteil darin, dass Verdeckungen oder schlechte Beleuchtungssituationen keinen Einfluss auf die Tracking-Ergebnisse haben. Thalmic Labs geht noch einen Schritt weiter und bietet für 149 US\$ ein Armband an, welches nicht nur Bewegungsdaten auf neun Achsen auswertet, sondern darüber hinaus noch die elektrischen Aktivitäten der Muskeln.

Die beispielhaft genannten Preise sind zwar nur Momentaufnahmen, illustrieren aber deutlich wie erschwinglich diese Technologien geworden sind. Dabei stellen die hier aufgeführten Technologien nur eine kleine Auswahl an Beispielen dar, die auch gar nicht alle Bereiche abdeckt. So hat sich z. B. auch der



**Abb. 2 Aufnahme von Bewegungsdaten**

Bereich der Displaytechnologien in Bezug auf Auflösungsvermögen und Größe enorm weiterentwickelt, während die Kosten eher reduziert wurden. Der nächste Schritt ist die weitere Miniaturisierung und die damit einhergehende mobile Nutzung. Auf vielen mobilen Geräten steht heute eine enorme Rechenleistung zur Verfügung. Ein aktuelles Smartphone hat zudem heute eine höhere 3D-Leistungsfähigkeit als dedizierte Grafikkarten früherer Zeiten. Die Kombination aus miniaturisierten Ein- und Ausgabegeräten mit mobil verfügbarer Rechen- und Grafikleistungsfähigkeit wird die Grundlage für weitere Entwicklungen sein.

### **Lokalisieren, Registrieren, Augmentieren**

Augmentierte Realität (engl. Augmented Reality) erlaubt uns, einen erweiterten oder angereicherten, also augmentierten Blick auf unsere Umgebung. Was bedeutet das? Das heißt, dass die Realität um virtuelle Inhalte ergänzt wird, welche sich im besten Fall derart nahtlos darin einfügen, dass sie von realen Inhalten weder in ihrem Aussehen, noch in ihrer Handhabung zu unterscheiden sind.

Die Augmentierte Realität (AR) ist ein Bereich des MR-Kontinuums nach Milgram [11], in welchem der Anteil der Realität deutlich überwiegt, d. h. der Benutzer agiert primär in seiner Realität. Während in populärwissenschaftlichen Artikeln und Berichten häufiger bereits jegliche Art von Überlagerung eines realen Kamerabildes mit weiteren Informationen (Text, Symbole, etc.) als AR bezeichnet wird, hat sich im wissenschaftlichen Umfeld die Definition nach Azuma [2] etabliert. Hierbei wird AR als interaktive Echtzeitumgebung

beschrieben, in welcher virtuelle Inhalte perspektivisch korrekt in das reale Umfeld des Nutzers eingeblendet werden. Unter „perspektivisch korrekt“ versteht man in diesem Zusammenhang die sogenannte geometrische Registrierung, d. h. ein virtuelles (dreidimensionales) Objekt wird derart in der Realität verortet, dass es unabhängig von Betrachtungsstandpunkt so aussieht, als würde es sich genau an diesem Ort in der Realität tatsächlich auch befinden (s. Abb. 3b). Zur Verdeutlichung zwei Beispiele: Bei Autos mit Rückfahrkameras werden in das Bild abhängig von Lenkeinschlag perspektivisch korrekt die Fahrspuren eingezeichnet. Dies erfüllt alle Voraussetzungen für AR. Eine Navigationsinformation eingeblendet in das Sichtfeld des Fahrers über ein Head-Up-Display (HUD) ist jedoch kein AR im eigentlichen Sinne. Es fehlt sowohl an der perspektivisch korrekten Einblendung als auch an der Interaktivität.

In der Praxis wird AR dadurch realisiert, dass man mithilfe entsprechender Sensorik und Verfahren des Computersehens die Position und Lage des Betrachters im Verhältnis zu seiner Umgebung ermittelt. Basierend auf diesen Informationen wird dann die Position, Orientierung und Perspektive der virtuellen Inhalte entsprechend berechnet und dargestellt. Dabei werden die virtuellen Inhalte entweder additiv über ein Videobild der Realität gelegt oder diese wird optisch (z. B. mithilfe eines semitransparenten Spiegels oder eines Prismas) überlagert. Auch wenn die visuelle Wahrnehmung die für den Menschen wichtigste ist, so ist AR keinesfalls auf die rein visuelle



**Abb. 3 (a) Früher Prototyp eines mobilen AR-Systems an der Columbia University aus dem Jahre 1997, (b) geometrisch korrekte Registrierung virtueller 3D-Inhalte in der realen Umgebung in einem Smartphone-basierten System der TU Ilmenau im Jahr 2014**

Augmentierung unserer Umgebung begrenzt, sondern kann sich selbstverständlich auf alle Sinne erstrecken.

Im Gegensatz zur Virtuellen Realität war die Augmentierte Realität schon sehr früh losgelöst von stationären Anwendungsszenarien. Während sich die Nutzer bei VR physisch innerhalb eines Raumes aufhalten, begann man bei AR bereits nach kurzer Zeit nach mobilen Lösungen zu suchen. Eines der ersten Beispiele hierfür war die „Touring-Machine“ der Columbia University [8] (s. Abb. 3a). Anfangs bedeutete dies allerdings, dass die Anwender hierbei meist schwere Rucksäcke mit sich tragen mussten, um die nötige Rechenleistung und Sensorik portabel zu machen. Auch lag die Nutzungsdauer aufgrund der geringen Akkulaufzeiten und des hohen Stromverbrauchs eher im Bereich von Minuten als von Stunden. Dies stellte insofern kein wirkliches Problem dar, als kein Nutzer ein solches System freiwillig länger hätte tragen wollen. Ein wirkliches Problem, was auch hier einer weiteren Verbreitung entgegenstand, waren die Kosten. Zu denen für einen leistungsfähigen Laptop (meistens eher eine sogenannte Mobile Workstation) kamen die Kosten für ein spezielles Display sowie GPS, Inertialsensoren, Magnetometer, Kameras, etc. sodass die Systemkosten schnell im mittleren fünfstelligen Bereich lagen. Der erforderliche jeweilige individuelle Zusammenbau der Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem war ein weiteres Manko, was einer

größeren Verbreitung und Nutzung grundsätzlich entgegenstand.

Die Voraussetzung für die weite Verbreitung von Anwendungen der Augmentierten Realität änderte sich grundsätzlich mit der Verbreitung von Smartphones. Plötzlich gab es eine große Menge von Nutzern, welche die notwendige Hardware bereits immer bei sich trugen. Moderne Smartphones verfügen über eine Rechen- und Grafikleistung, die denen der damaligen Laptops häufig deutlich überlegen ist. Darüber hinaus integrieren sie bereits alle für AR erforderlichen Sensoren. Angefangen von einer Kamera, den GPS- und Inertialsensoren, sowie den Magnetometern. Das gleiche gilt für aktuelle Tablets. Durch die rückwärtige Kamera kann die Umgebung erfasst werden. Ferner kann das Kamerabild für Positions- und Lageschätzung basierend auf Verfahren des Computersehens eingesetzt werden. Dafür wurden bei AR über ein Jahrzehnt markenbasierte Ansätze, bei welchen Schwarz-Weiß-Marken ähnlich denen bei Crash-Tests Verwendung finden, verwendet. Mittlerweile setzen moderne Systeme – nicht zuletzt aufgrund der inzwischen verfügbaren deutlich höheren Rechenleistung- zunehmend auf merkmalsbasierte Ansätze. Durch den Vergleich der Positionen und Eigenschaften der aus dem Kamerabild extrahierten Merkmale mit denen, welche im System vorhanden sind, lässt sich hierbei in Ergänzung zur groben globalen Positionierung mittels GPS die genaue Po-



**Abb. 4 Google's Glass – ein Repräsentant für die neue Generation leichter und verhältnismäßig unauffälliger Datenbrillen, welche es ermöglichen, virtuelle Inhalte in die Umgebung des Nutzer einzublenden und in naher Zukunft vielleicht genauso alltäglich werden wie heutzutage Mobiltelefone**

sition und Lage des Betrachters bzw. der Kamera ermitteln.

Ein großes Manko sogenannter Handheld-Systeme wie Smartphones oder Tablets ist jedoch die Entkopplung der AR von der realen Sicht der Nutzer. Hier wird lediglich die Sicht der Kamera augmentiert. Da die Geräte i. d. R. über keine stereoskopischen Displays und nur eine (rückwärtige) Kamera verfügen, ist das entstehende Bild zwar für diese perspektivisch korrekt, nicht jedoch für den Betrachter. Aus Sicht der Benutzer würde ein solches Gerät idealerweise wie eine sogenannte „magische Linse“ [3] funktionieren, d. h. man würde die Realität dahinter wie durch ein Fenster sehen, jedoch erweitert um die virtuellen Inhalte. Eine solche Form erfordert bislang jedoch die Nutzung entsprechender für AR geeigneter, am Kopf befestigter Displays (Head-Mounted Displays, HMDs). Solche HMDs haben jedoch leider noch nicht den Grad an Alltags-tauglichkeit erreicht, wie dies bei Smartphones oder Tablets für AR bereits der Fall ist.

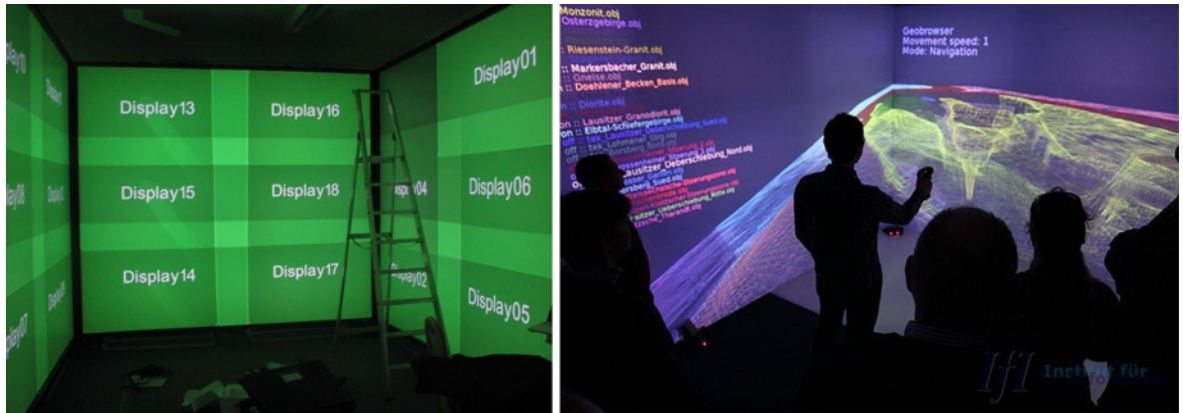
Man könnte sagen, Google Glass (s. Abb. 4) sei für AR, was Oculus Rift für VR ist. Dies würde jedoch nicht ganz den Tatsachen entsprechen. Zwar zeigt Google Glass den Weg in Richtung zukünftiger AR-Displays, jedoch ist der Bereich des Sichtfelds,

welches hier zurzeit abgedeckt wird, so gering, dass es für eine echte Augmentierung der Umgebung nicht ausreicht. Dennoch ist diese aktuelle Entwicklung, welche bereits zu weiteren Produktankündigungen geführt hat (z. B. Epson Moverio BT-200, Atheer One oder LASTER SeeThru) ein wichtiger Schritt für die zukünftige Verbreitung von AR. Mit der Verbreitung von HMDs wird das Einblenden virtueller Inhalte in unsere Umgebung zunehmen und bei stetiger Weiterentwicklung der Display-Technik (vergleichbar mit Smartphones ist zu erwarten, dass jährlich eine neue, leistungsfähigere Generation erscheinen wird) werden diese in naher Zukunft echtes AR fast immer und überall ermöglichen. 2002 sagte der bekannte Science-Fiction-Autor und Hugo-Award Preisträger Vernor Vinge: „In 10 years from now, there will be no naked eyes“. Damit war er ein wenig zu optimistisch, doch mittlerweile erscheint dies auf Basis der aktuellen Entwicklungen greifbar.

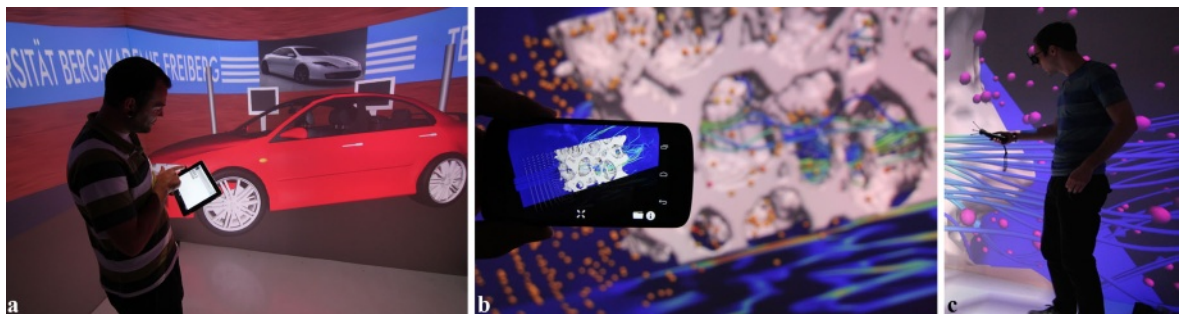
### **Hochauflösend, High-End, Hochpreisig?**

Neben den bislang dargestellten neuen VR-Geräten für den Massenmarkt sind High-End VR-Installationen vor allem in Wissenschaft und Wirtschaft nach wie vor weit verbreitet. So zählt der VR-Atlas des Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach allein über 100 High-End VR-Installationen in Deutschland [16]. Auch bei VR-Installationen des High-End Bereichs kommen dabei zunehmend preiswerte Hardware-Komponenten zum Einsatz. So haben schon seit längerer Zeit PC-Cluster dedizierte Grafikserver, z. B. der in den 1990er-Jahren dominanten Firma SGI, abgelöst. Im Folgenden wird exemplarisch gezeigt, wie neue, preiswerte Hardware zur Innovation in der High-End VR beiträgt.

So können z. B. ultrahochauflösende visuelle Displays zu vergleichsweise geringen Kosten durch den kombinierten Einsatz gekachelter Einzeldisplays realisiert werden. So besteht z. B. die 2012 fertig gestellte CAVE2 der University of Illinois aus insgesamt 72 stereofähigen LCD-Monitoren [7]. Die Monitore sind dabei in Form eines Zylinders mit ca. 7 m Durchmesser und 2,4 m Höhe angeordnet, wobei die Displaygrenzen allerdings noch durch die Monitorrahmen sichtbar bleiben. Zur Realisierung vollständig nahtloser Displays bieten sich Multi-projektorsysteme an, in welchen eine oder mehrere Leinwände durch jeweils mehrere Projektoren ab-



**Abb. 5** Die CAVE der TU Bergakademie Freiberg besteht aus 25 Einzelprojektoren aus dem für VR-Installationen vergleichsweise niedrigpreisigen Segment. Zusammen ergibt sich eine Auflösung von ca. 50 Megapixeln, was weit über der Auflösung von CAVEs der ersten Generation liegt



**Abb. 6** (a) Systemsteuerung per Tablet. (b) Smartphone zur Navigation in einer 3D-Simulation. (c) 3D-geortete Nintendo WiiMote

gedeckt werden. Abbildung 5 zeigt als Beispiel die 2009 fertig gestellte XSITE CAVE der TU Bergakademie Freiberg, die durch den kombinierten Einsatz von 25 Einzelprojektoren eine Gesamtauflösung von ca. 50 Megapixeln erreicht. In solchen Systemen ist zu gewährleisten, dass die Projektoren ein einheitliches Bild liefern, in welchem die Übergänge zwischen den einzelnen Projektoren nicht mehr wahrnehmbar sind. Dies wird durch den Einsatz von Kalibrierverfahren erreicht, die idealerweise sowohl die geometrische Anordnung der Displays wie auch Unterschiede in der Farbdarstellung der einzelnen Projektoren erfassen und ausgleichen. Verfahren zur geometrischen und photometrischen Kalibrierung von Multiprojektorsystemen sind Gegenstand aktiver Forschung, z. B. [9], wobei seit einigen Jahren auch kommerzielle Lösungen verfügbar sind.

Bei der Interaktion in CAVEs erfahren Tablets und Smartphones, aber auch Eingabegeräte für Spielkonsolen zunehmende Verbreitung. Eine erste Art der Verwendung betrifft Aufgaben der sogenannten Systemkontrolle. Hierbei wird auf dem

mobilen Gerät ein konventionelles 2D GUI dargestellt, über welches der Nutzer z. B. die aktuelle Anwendung parametrisieren oder zwischen Anwendungen wechseln kann (s. Abb. 6a). Darüber hinaus können mobile Geräte zur Navigation in der virtuellen Umgebung verwendet werden. Dabei wird die 3D-Szene, evtl. in einer niedrig aufgelösten Version, auch auf dem mobilen Gerät dargestellt. Mittels Multi-Touch Interaktionen, z. B. Pinch-Gesten zum Zoomen, wird der sichtbare Ausschnitt auf dem mobilen Gerät verändert und synchron dazu in die CAVE übertragen (s. Abb. 6b). Noch weitergehende Interaktionsmöglichkeiten ergeben sich durch die Verbindung von mobilen Geräten mit Tracking-Systemen. So bietet z. B. die Fa. ART, ein Hersteller von High-End Tracking-Systemen, spezielle optische Marken für Tablets, GamePads und andere Steuergeräte aus dem Spielbereich an. Dadurch wird die Position und Lage des jeweiligen Eingabegeräts erfasst und für räumliche Interaktionen, z. B. Objektauswahl durch Zeigen im 3D-Raum, nutzbar gemacht. So verbindet z. B. die Kombina-

tion aus Nintendo Wiimote und 3D-Tracker die Eingabemöglichkeiten der Wiimote, d. h. mehrere Tasten und Steuerkreuz samt steuerbarem Vibrationsfeedback, mit einer exakten räumlichen Ortung (s. Abb. 6c).

## Ausblick

Seit Ivan Sutherland in den 60er-Jahren mit ersten Arbeiten im Bereich immersiver Technologien begann, hat VR sich in einem Nischenmarkt erfolgreich etabliert. Durch den erheblichen Preisverfall bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsfähigkeit von für VR und AR benötigter Hardware (z. B. Displaysysteme, Grafikprozessoren, CPUs, Tracking-Systemen, Kamerasysteme) nicht zuletzt aufgrund deren Nachfrage im Massenmarkt für Computerspiele ist ein Hindernis für einen breiteren Einsatz von VR/AR-Technologie reduziert worden. Dies eröffnet VR/AR neue Chancen, denn diese Technologie bringt einen Mehrwert für zahlreiche Anwendungsfälle nicht nur im Bereich Unterhaltung, sondern auch in den Bereichen Medizin, Kultur, Wirtschaft, Informationsvisualisierung, Ausbildung oder Architektur. VR/AR kann die Usability von Software erhöhen. Dies macht VR/AR zu einem Kandidaten für den Massenmarkt. Es bleiben aber eine Reihe weiterer Hindernisse. So bedarf es im komplexen und interdisziplinären Arbeitsfeld VR/AR gut ausgebildeter Fachkräfte. Erst in 2014 ist eines der wenigen deutschsprachigen Lehrbücher [5] zu dem Thema durch eine Initiative in der Fachgruppe VR /AR der Gesellschaft für Informatik erschienen. Weitere Hindernisse liegen auf den Gebieten der Erreichung von Echtzeit bzw. Latenzanforderungen, in der Simulationstechnik, in der Erstellung von qualitativ hochwertigem aber gleichzeitig bezahlbarem 3D Content und auf dem Gebiet der Wahrnehmungspsychologie z. B. hinsichtlich Benutzerakzeptanz oder

möglichen Nebenwirkungen der VR wie der Simulatorkrankheit. Allerdings bietet der Preisverfall auch einen neuen Schub für Forschung und Entwicklung im Bereich VR/AR, denn durch die ehemals hohen notwendigen Investitionen in Hardware war dies oft auf wenige Zentren beschränkt. So wird vielleicht der Extremfall der perfekten VR nie erreicht, aber der Weg hin zum Massenmarkt kann zu signifikanten Verbesserungen in der Interaktion von Mensch und Computersystem führen und den Zugang von Menschen zu virtuellen Welten oder augmentierten Realitäten erleichtern.

## Literatur

1. Avegant Homepage (2014) <http://www.avegant.com/>, last access: 15.4.2014
2. Azuma R (1997) A Survey of augmented reality. *Presence-Teleop Virt* 6(4): 355–385
3. Brown LD, Hua H (2006) Magic Lenses for augmented virtual environments. *IEEE Comput Graph* 26(4):64–73
4. Café Alpha (2014) <http://cafealpha.blogger.de/?day=20100327>, last access: 15.4.2014
5. Dörner R, Broll W, Grimm P, Jung B (2014) *Virtual und Augmented Reality – Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer, Berlin Heidelberg
6. Guizzo E (2014) CyberWalk: Giant Omni-Directional Treadmill To Explore Virtual Worlds. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/cyberwalk-giant-omnidirectional-treadmill-to-explore-virtual-worlds>, last access: 15.4.2014
7. Febretti A, Nishimoto A, Thigpen T, Talandis J, Long L, Pirtle JD, Peterka T, Verlo A, Brown M, Plepys D, Sandin D, Renambot L, Johnson A, Leigh J, CAVE2 (2013) A Hybrid Reality Environment for Immersive Simulation and Information Analysis. *Proceedings of IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality 2013*, San Francisco, CA, 2. Apr. 2014
8. Feiner S, MacIntyre B, Hoellerer T, and Webster A (1997) A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Proc. ISWC '97 (Int. Symp. on Wearable Computers)*, Cambridge, MA, 13–14 October, pp 74–81
9. Heinz M (2013) *Kalibrierverfahren und optimierte Bildverarbeitung für Multiprojektorsysteme*. Dissertation, TU Chemnitz, Fakultät für Informatik
10. Leap Motion Homepage (2014) <https://www.leapmotion.com/>, last access: 15.4.2014
11. Milgram P, Takemura H, Utsumi A, Kishino F (1994) Augmented Reality: A Class of Displays in the Reality – Virtuality Continuum. *Proc SPIE* 2351:282–292
12. PrioVR Homepage (2014) <http://www.priovr.com>, last access: 15.4.2014
13. Thalmiclabs Homepage (2014) <https://www.thalmic.com/en/myo/>, last access: 15.4.2014
14. Virtuix Homepage (2014) <http://www.virtuix.com/>, last access: 15.4.2014
15. Virtusphere Homepage (2014) <http://www.virtusphere.com/>, last access: 15.4.2014
16. VR Atlas (2014) <http://www.vdc-fellbach.de/wissen/atlas-virtual-reality-installationen>, letzter Zugriff: 15.4.2014