

die durch diese Manipulationen ausgelöst werden, auf die Verarbeitungsmechanismen im Gehirn. Eine Frage, die uns hierbei beschäftigt, ist, wie simultane Informationen aus verschiedenen sensorischen Kanälen im Gehirn kombiniert werden. Wir konnten zeigen, dass die Verarbeitung auf statistisch optimalen Mechanismen beruht. Das heißt, das Gehirn nutzt alle ihm zur Verfügung stehenden Informationen und kombiniert sie in einer solchen Weise, dass das resultierende Signal eine möglichst kleine Varianz aufweist. Andere Untersuchungen gingen der Frage nach, inwieweit sich optische Täuschungen auch auf die Motorik auswirken. Entgegen der Vorhersage einiger kürzlich aufgestellter Theorien fanden wir, dass optische Täuschungen die Motorik in ähnlicher Weise beeinflussen wie die Wahrnehmung.

Blicksteuerung bei Insekten. – Die Fruchtfliege *Drosophila* hält ihren Körper im Schnellflug flach (circa 20 Grad) und im Schwebflug steil aufgerichtet (bis 60 Grad). Dadurch sollten die visuellen Bewegungsdetektoren im Komplexauge relativ zur Umgebung erheblich verdreht, und die Bewegungssignale für die Flugsteuerung verfälscht werden. *Drosophila* verringert aber solche Fehler durch eine Abwärtsneigung des Kopfes im Flug um durchschnittlich 30 Grad. Dieses Verhalten wird nicht durch eine sensorische Erfassung der aktuellen Körperhaltung im Raum gesteuert, sondern ist ein angeborener, konstitutiver Teil des Flugzustands selbst.

Aktueller Forschungsschwerpunkt

Virtual Reality (VR) als Methodik für psychophysische Experimente

Betrachten wir die Dinge in unserer Umwelt naiv, so gehen wir Menschen

wie selbstverständlich davon aus, dass sie existieren, und zwar mit genau den Eigenschaften, die wir an ihnen erkennen. Wer etwas über Wahrnehmungsvorgänge lernen möchte, beginnt allerdings am besten damit, sich selbst beim Wahrnehmen kritisch zu beobachten. Dabei fällt auf, dass es Phänomene gibt, die ihren Ursprung nicht in der Außenwelt, sondern in der Arbeitsweise von Gehirn und Sinnesorganen haben. Mit diesen Dingen beschäftigt sich eine Disziplin, deren Ursprünge in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreichen. Der deutsche Physiologe Gustav Theodor Fechner (1801 bis 1887) prägte hierfür den Begriff „Psychophysik“. In der traditionellen Psychophysik geht es um die gezielte Manipulation des Sinnesinputs und die Beobachtung der Beziehung zwischen Reiz und Reaktion. Ist man darüber hinaus am Zusammenspiel mehrerer Sinnesmodalitäten interessiert, also z. B. am Seh- und am Tastsinn, so sucht man nach Verfahren, mit denen man diese getrennt manipulieren, im Extremfall sogar ganz durch künstliche Reize ersetzen kann. Man nähert sich dem Bereich der virtuellen Realität.

Virtual Reality. – Virtuelle Realität (VR) ist also der teilweise Ersatz natürlicher Sinneseindrücke mehrerer Modalitäten durch synthetische, meist mit dem Computer generierte Sinnesreize. VR zeichnet sich durch ein hohes Maß an Interaktivität und die gleichzeitige, kohärente (also übereinstimmende) Simulation des Inputs der einzelnen Sinnesmodalitäten aus. Virtuelle Umgebungen (englisch *virtual environments*, VE) sind die in VR simulierten Welten, die das Ziel verfolgen, die reale Welt zeitweilig zu ersetzen.

VR-Technologie im Überblick. – Hauptsächlich erleben wir in der Anwendung von VR-Methoden visuelle, vestibuläre, haptische und auditive Stimulationen. Geruch und Ge-

schmack werden derzeit – zumindest an unserer Forschungseinrichtung – noch nicht verwendet und sind synthetisch auch schwierig zu produzieren. Außerdem sind diese Sinne – zumindest beim Menschen – nicht in erster Linie ausschlaggebend für Navigation und Raumkognition, eine der Hauptfragestellungen unserer VR-Forschung.

Fast alle VR-Systeme versuchen zunächst, die visuelle Stimulation, also das beiden Augen dargebotene Bild, zu optimieren. Hierzu verwenden wir in unseren Experimenten entweder Großleinwandprojektionen oder Datenhelme mit Miniaturbildschirmen (so genannte Head Mounted Displays, HMD, **Abb. 1**). Da das Anwendungsinteresse aus allen Richtungen sehr breit ist und die Entwicklung bereits auf eine lange Geschichte zurückblicken kann, existieren im Bereich der visuellen Simulationen ausgereifte Softwarewerkzeuge. Allerdings wirken die gängigen virtuellen Realitäten derzeit leider oft noch ein wenig steril – Dreck scheint es in virtuellen Welten nicht zu geben.

Die vestibuläre Simulation, also die Manipulation der wahrgenommenen Eigenbewegung, erfolgt in un-



Abb. 1: Head Mounted Display (HMD).

seren Experimenten mit einer elektrisch gesteuerten Bewegungsplattform (**Abb. 2**). Mithilfe dieser Apparatur kann man durch Bewegung im Raum in allen sechs Freiheitsgraden (obenunten, linksrechts, hintenvorne) untersuchen, ob und wie der Mensch seine Position im Raum und deren Veränderung wahrnimmt und erkennt. Wer interessiert sich für solche Erkenntnisse? Da stehen auf der einen Seite die Ingenieurwissenschaften, etwa Automobilhersteller, Flugzeugbauer oder Trainingseinrichtungen z. B. der Bundeswehr, auf der an-

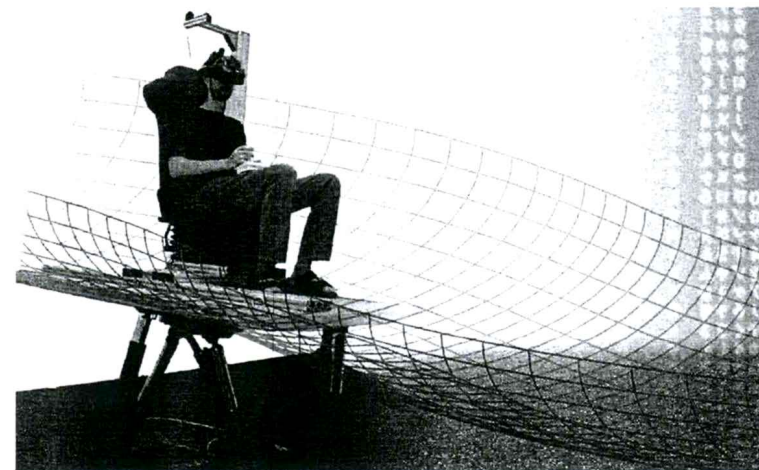
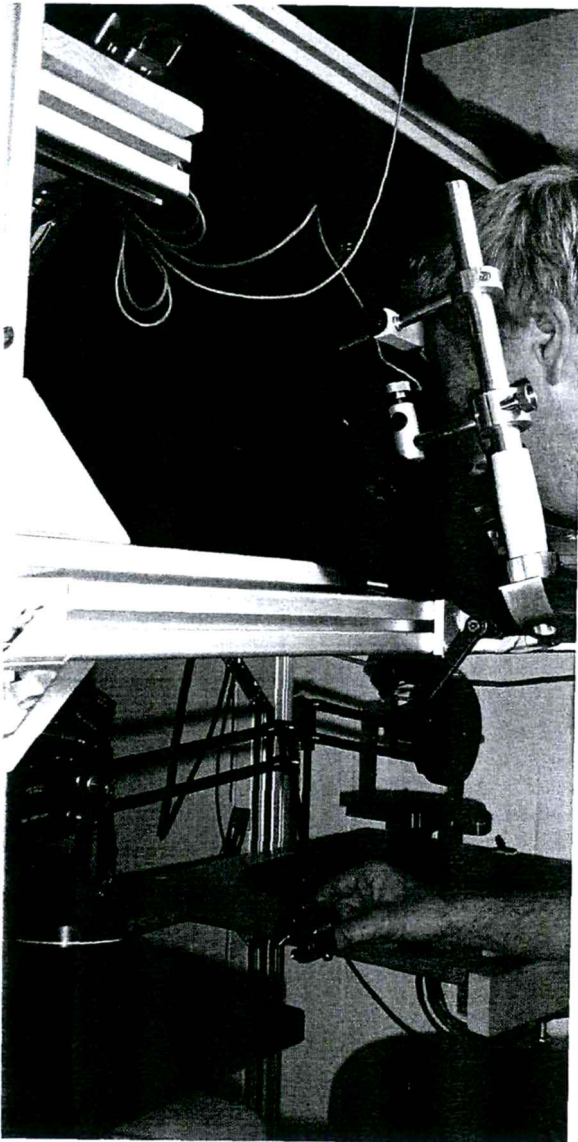


Abb. 2: Bewegungsplattform.

deren Seite die Unterhaltungsindustrie, vor allem Vergnügungsparks. Wissenschaftliche Grundlagenforschung im VR-Sektor dagegen ist eher dünn gesät. Es gibt einige wenige klinische Fragestellungen, etwa bei der Erforschung von Erkrankungen des Gleichgewichtsorgans. Statt

Abb. 3: Virtuelles Greifen mit dem „PHANToM“-System.



solide Grundlagenforschung zu betreiben, ist man jedoch bisher im Bereich der Bewegungssimulatoren über „Kochrezepte“ noch nicht hinaus gekommen. Noch dazu ist bei vergleichbarer Qualität die vestibuläre Stimulation um ein Vielfaches aufwendiger und teurer im Vergleich zur visuellen Simulation. Diese Lücke zu schließen ist eines der Ziele unserer VR-Forschung.

Subtiler und daher noch heikler ist die haptische (oder taktile) Simulation in VR. Hier sind nur wenige Systeme verfügbar, die allesamt keine vollständig natürliche Stimulation – etwa die der ganzen Hand – zustande bringen. In unserer Abteilung sind „PHANToM“-Systeme (Abb. 3) im Einsatz. Diese sind in der Lage, Greifbewegungen einzelner Finger aufzuzeichnen und taktile so zu steuern, dass man virtuelle Gegenstände nicht nur sehen, sondern auch anfassen und fühlen kann. Leider gibt es bis zum heutigen Tag noch keinen einheitlichen Software-Standard in diesem Bereich, der eine mehrere Forschungsgruppen übergreifende Arbeit ermöglichen würde.

Das auditive Element im virtuellen Raum wird in der Regel durch handelsübliche Soundkarten eingefügt. Einfache Klänge und Sprachausgabe sind hierbei inzwischen Standard. Eine realistische räumliche Simulation von Klängen ist allerdings nicht so trivial wie es scheint, da hierzu z. B. detailliert die Reflexionseigenschaften eines Raumes einberechnet werden müssen.

Vorteile und Schwierigkeiten. – Wie eingangs erwähnt, hat man mit dem Einsatz von VR-Technologie die Möglichkeit, Kontrolle über alle Sinnesmodalitäten zu erreichen. Man kann Laborsituationen herstellen, die eine Wiederholbarkeit der Experimente ermöglichen, eine der Grundvoraussetzungen wissenschaftlichen Arbeitens. Darüber hinaus ist es sehr

einfach möglich, die Versuchsparameter nach Belieben zu modifizieren und die Messdaten unmittelbar zu erfassen, da alle Daten bereits zur weiteren Verarbeitung im Rechner zur Verfügung stehen. Diese Vorteile machen aus VR eine wertvolle Methode in der biokybernetischen Grundlagenforschung.

Doch nicht allein die hohen Kosten reduzieren derzeit noch den Enthusiasmus bei der Anwendung von VR-Technologien. Oft sind auch die Möglichkeiten zur Interaktion allzu sehr eingeschränkt. Die Achillesverse bei den VR-Systemen ist und bleibt die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Je weniger intuitiv die Bedienung der Systeme, desto unwirklicher wird die vorgespielte „Realität“. Noch immer lässt es sich nicht vermeiden, dass Menschen futuristisch anmutend verkabelt und so in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt werden. Dies alles führt leider auch heute noch zu einer eingeschränkten Natürlichkeit in virtuellen Welten.

Experimente. – Die Experimente der Abteilung Psychophysik innerhalb des Arbeitsfeldes „Virtual Reality“ sind in drei Hauptgebiete gegliedert. Unter der Überschrift „Sensorintegration“ studieren die Forscher das Zusammenspiel zwischen visueller und vestibulärer bzw. visueller und haptischer Wahrnehmung. Wie werden verschiedene Sinnesmodalitäten zusammengeführt? Wie wirken sich die Verrechnungsmechanismen auf unsere Handlungsfähigkeit aus? Wie kombinieren Autofahrer verschiedene Informationsquellen im visuellen Feedback, um ihre Fahrtrichtung zu kontrollieren? Ergebnisse zeigen, dass die Vielzahl an Hinweisreizen, teilweise auch noch zu unterschiedlichen Zeitpunkten, genau dann tatsächlich zu systematischen Fahrfehlern führt, wenn sie inkompatibel sind, also nicht zusammen-

passen. Diese Fragestellung leitet bereits über zum zweiten Schwerpunkt „Selbstlokalisierung in virtuellen Welten“. Die Kernfragen dabei sind: Woran erkennt das Gehirn, wo sich der Körper im Raum befindet? Nach welchen Kriterien erzeugt das Gehirn eine Karte von seiner (virtuellen) Umgebung? Wie wirken sich Objekte und Landmarken auf diese interne Landkarte aus? Schließlich geht es in einem Kooperationsprojekt mit der Universität Tübingen zum Stichwort „Raumkognition“ um unsere Fähigkeit, uns in bekannten oder fremden Umgebungen zu bewegen und zu recht zu finden. Gemeinsam haben all diese Fragestellungen, dass sie mehrere Sensormodalitäten betreffen. Diese führen zu einer Art „Repräsentation“ des Menschen in seiner Umwelt, die sich nun wiederum mit Methoden der VR untersuchen lässt.

Die Ergebnisse bisheriger Forschungen im Detail zu schildern, würde den Rahmen dieses Berichts sprengen. Einzelheiten sind in zahlreichen Publikationen des Instituts nachzulesen. Einige verblüffende Resultate seien aber doch kurz angerissen: Eigentlich wäre es naheliegend gewesen, dass so verschiedene Sinnesmodalitäten wie die Wahrnehmung der Position im Raum und beispielsweise das Hören auch völlig unterschiedlich organisiert sind, zumal ja von evolutionär getrennten phylogenetischen Entwicklungen dieser Sinnesleistungen auszugehen ist. Trotzdem weisen unsere Experimente überraschend darauf hin, dass bei der Zusammenführung visueller und vestibulärer Sinnesindrücke ähnliche Verrechnungsmechanismen verwendet werden wie bei der Integration von visuellen und haptischen Eindrücken. Dass unser Gehirn darüber hinaus bei der Verrechnung der visuellen und haptischen Sinnesindrücke eindeutig nach statistisch optimalen Maßstäben vorgeht, es sich also ver-

hält wie ein ausgebildeter Mathematiker, ist ein weiteres erstaunliches Ergebnis unserer Forschungen. In Zukunft könnten diese Erkenntnisse zu einheitlichen Modellen für die Erklärung der Sensorintegration führen. Ein weiteres ebenfalls markantes Ergebnis betrifft das so genannte „spatial updating“, die Fähigkeit, sich Objektpositionen zu merken oder Szenen wiederzuerkennen, wenn man sich um die eigene Achse gedreht hat bzw. wenn diese Drehung virtuell simuliert wurde. Wider die Erwartung verbessert sich diese komplexe kognitive Leistung, wenn man fotorealistische Kulissen im virtuellen Raum benutzt. Als Nebenprodukt unserer Forschungen erhoffen sich die Forscher neue Anregungen und Ideen für kostengünstigere und technisch einfachere Bewegungssimulatoren, die mit wenig tatsächlicher Bewegung ein überzeugendes „spatial updating“ erzeugen.

Zusammenfassung. – Virtual Reality-Technologien eignen sich hervorragend für die Durchführung psychophysischer Experimente (Abb. 4). Die aktuelle Technik erlaubt eine verbesserungsfähige, aber dennoch zunächst hinreichend angemessene Darstellung der simulierten Welt in mehreren Sinnesmodalitäten, visuell, vestibulär, haptisch und auditiv. In den aktuellen wissenschaftlichen Fragestellungen überwiegen zunehmend kognitive Aspekte. Die viel versprechenden Ergebnisse unserer Arbeitsgruppe führen dabei zu immer komplexeren experimentellen Fragestellungen. Drei Kernfragen werden in den nächsten Jahren die Forschungsausrichtung im Bereich VR der Abteilung Psychophysik bestimmen: Wie wird die Eigenbewegung im Gehirn repräsentiert, angepasst und verrechnet? Welche kognitiven Einflüsse auf Reflexe (beispielsweise den vestibulär-okulären Reflex) kann man fest-



Abb. 4: Radfahren im virtuellen Tübingen.

stellen? Und wie „real“ muss VR sein, um als Wirklichkeit akzeptiert zu werden? Mit diesen Fragestellungen leistet unser Institut einen Beitrag zu den weltweiten Bemühungen, virtuelle Umgebungen real und unverwechselbar zu erzeugen und damit Erkenntnisse über Wahrnehmung und Bewegungskoordination des menschlichen Gehirns zu gewinnen (Rosenzweig, von der Heyde).

Abteilung Vergleichende Neurobiologie

Direktor: Prof. Dr. Kuno Kirshfeld

Arbeitsgebiete

Psychophysik der Zeitwahrnehmung. Es ist bekannt, dass die Wahrnehmung von bewegten Objekten etwa eine Zehntelsekunde früher erfolgt als diejenige nicht bewegter Objekte, wenn sie z. B. mit einem kurzen Blitz beleuchtet werden. Die Interpretation ist: Bewegte Objekte stellen eine Gefahr dar, und deshalb erfolgt ihre Verarbeitung im Nervensystem besonders schnell. Zutreffend ist diese Interpretation aber nur, wenn nicht nur die Wahrnehmung bewegter Objekte besonders schnell erfolgt, sondern und zwar entscheidend, wenn die Reaktion (z. B. Flucht) besonders schnell erfolgen kann. Wir untersuchten die Reaktionszeit auf bewegte und nichtbewegte Objekte. Die Versuchspersonen mussten eine Taste drücken, wenn ein bewegter Balken eine bestimmte Position erreicht hat. Versuchspersonen sind dazu mit einer erstaunlichen Präzision (± 40 Millisekunden) in der Lage. Bewegt sich der Balken dagegen in Sprüngen, d. h. diskontinuierlich, sodass keine Bewegung auf der Netzhaut stattfindet, drücken die Versuchspersonen die Taste etwa 100 Millisekunden zu

spät. Das heißt, nicht nur die Wahrnehmungs-, sondern auch die Reaktionszeit auf bewegte Objekte ist verkürzt, was die oben genannte Interpretation stützt.

Geschlechtsspezifische Verteilung der Lichtsinneszellen in der menschlichen Netzhaut. – Unsere Farbwahrnehmung wird durch drei verschiedene Typen von Lichtsinneszellen (Zapfen) vermittelt: Sie sind jeweils im blauen, grünen und roten Spektralbereich empfindlich (so genannte S-, M- und L-Zapfen). Wir haben ein einfaches Testverfahren erarbeitet, mit dem es möglich ist, bei Versuchspersonen quantitativ zu bestimmen, wie viele M- und L-Zapfen jeweils in ihrer Netzhaut vorhanden sind. Bekannt war, dass es sehr viel mehr L-Zapfen als M-Zapfen gibt. (Der prozentuale Anteil der S-Zapfen ist wesentlich geringer und wird hier nicht weiter besprochen.) Das überraschende Ergebnis: Das Verhältnis von L- zu M-Zapfen ist bei Männern anders als bei Frauen. Während bei Frauen dieses Verhältnis im Bereich von 1 zu 6 schwankt, wobei die Häufigkeitsverteilung zwei Maxima aufweist, zeigt die Verteilung bei Männern nur ein Maximum und schwankt lediglich im Bereich von 1 zu 4. Da die Gene, die die Sehfärbstoffe kodieren, auf dem so genannten X-Chromosom liegen, liegt der Unterschied wahrscheinlich daran, dass Frauen zwei, Männer nur ein X-Chromosom besitzen.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen kortikalen Arealen. – Bekanntermaßen ist die Hirnrinde (Kortex) anatomisch und funktionell in verschiedene Areale gegliedert. Der Zusammenhang zwischen dem histologischen Bild und der Funktion des betreffenden Areals ist weitgehend unverstanden. Es wurde deshalb folgenden Fragen nachgegangen: Stimmen die verschiedenartigen, histologisch bestimmten und die über die Funktion ermittelten Kartierun-