

Virtuelle Haptik

Ralf Bähren
Vordiplom 2001
Fachhochschule Köln
Fachbereich Design

Hauptthema bei Prof. Gui Bonsiepe
im Lehrgebiet Interface-Design
März 2001

Inhalt

1. Die Entfremdung des Körpers	4
2. Zur Bedeutung des Tastsinns im Gefüge der Sinne	8
Tasten ist Orientierung	
Emotionale Berührung	
3. Der Tastvorgang	12
Neurophysiologische Grundlagen	
Besonderheiten	
4. Digitale Interaktion	14
Überlegungen	
Forschung und Entwicklung	
Anwendungsbereiche (Force- und Touch-Feedback)	
Physische Interaktion	
Anwendungen für den Massenmarkt	
Einschätzung	
5. Virtuelle Haptik	24
Voraussetzungen	
Ein Sinn lässt sich narren	
Berühren ohne Berührung	
Konstruktion von Empfindungen	
Haptische Simulation	32
Virtuelle These	
Das Graphical User Interface	
Die Bedeutung der Computer-Maus	
Die Eigenarten der Computer-Maus	
Möglichkeiten der Umsetzung	
Regeln der Simulation	
6. Ein exemplarisches Interface	40
Überlegungen	
Touchablez - Das Spiel	
Umsetzung	
7. Abschließende Bemerkungen	44
8. Anhang	46
Quellen und Literaturverweise	
Links	
Dank	



1. Die Entfremdung des Körpers

«Der virtuelle Mensch sitzt unbeweglich vor seinem Computer, vollzieht den Liebesakt per Bildschirm und hält seine Kurse via Telekonferenz ab. Er wird zu einem motorisch - und zweifelsohne auch geistig - Behinderten»

Baudrillard

Als einer unserer existenziellen Sinne scheint der Tastsinn im Kontext des körperlosen Fernseh-, Computer- und Internet-Zeitalters zunehmend seine Bedeutung zu verlieren.

Die Befürchtungen Baudrillards deuten es an: Körperliche Empfindungen begegnen uns, von Rücken- oder Nackenschmerzen einmal abgesehen, auf den Wegen unseres Daten-Dschungels selten. Lässt man einmal die ohnehin bedeutungsarmen Berührungen von Maus und Tastatur außer acht, erfolgt die Wahrnehmung von Inhalten per Computer & Co fast ausschließlich visuell und akustisch. Es entsteht eine deutliche Trennung zwischen körperlicher Aktion und sinnlicher Wahrnehmung. Den passiven Sinnen des Hörens und Sehens scheint diese komplexe Art der Interaktion wohl gerecht zu werden. Die Fähigkeiten des Tastsinns jedoch, die sowohl aktive und passive Komponenten vereinen, sind durch die ausbleibenden Wahrnehmungen gestört. Dem vernachlässigten Akt des Berührens, der insbesondere auf unser emotionales Befinden bedeutenden Einfluss hat, begegnen wir allenfalls ansatzweise, oder nur in entlegenen Ecken des globalen Datenstroms. Dieses einseitige und unsensible Verhältnis der haptischen Interaktion, sowie die spürbare «Mauer» des Bildschirms bilden die Grenze zwischen fassbarer und visuell-akustisch orientierter Welt. Der «virtuelle Mensch» bewegt sich in einem Zustand virtueller Schwerelosigkeit¹ mit Lichtgeschwindigkeit über den Globus und lässt den Körper dabei am Schreibtisch zurück. Seine Kommunikation, seine Handlungen und seine Erlebnisse erfolgen trotz körperlichen Einsatzes ohne körperliche Präsenz.

1. Die Entfremdung des Körpers

Die Abkehr von der Körperlichkeit ist kein ausschließlich digitales Phänomen. Bereits das Telefon, das Radio oder der Fernseher – automatische Maschinen verlangen von unserem Körper oft nicht mehr als einen bescheidenen Knopfdruck. Mit dem Preis des ausbleibenden Feedbacks. Hygiene- und Schönheitswahn erziehen uns zu makelloser – und damit berührungsarmer Haut. Zwischenmenschliche Berührungen implizieren schnell den Verdacht der sexuellen Nötigung. Das Verschwinden von Begrifflichkeiten und Redewendungen, die den Körper als Metapher gebrauchen («jemandem die Haut voll schlagen» oder «seine Haut teuer verkaufen»), ist nur eines der Indizien, die uns den Weg in eine körperarme Zukunft weisen möchten. Extrem formuliert, scheint bereits der Fortschritt des Faustkeils als erster Schritt zum Verlust des direkten, physischen Kontakts.

Diesen ernüchternden Aussichten zum Trotz, lassen sich jedoch auch gegenläufige Tendenzen feststellen. Schon der ausgelassen körperbetonte Tanz zur Rockmusik oder die exzentrische Körperlichkeit der 60er und 70er Jahre erscheinen wie explosive Regungen des unterdrückten Körpers. Wer sich dazu die Techno-Bewegung der heutigen Zeit vor Augen führt, erkennt, dass ein körperlicher Ausgleich vonnöten scheint. Besonders der Tanz erlaubt die sehnlich vermissten physischen Empfindungen, und verlässt dabei oft die sonst vorherrschenden Berührungs-Konventionen. Trendige Extremsportarten wie Bungee-Jumping ermöglichen maximale Propriozeption, die Empfindung des eigenen Leibes und dessen Umgebung.

Selbst die digitale Welt scheint zu reagieren. Look and Feel: Die wachsende Bedeutung einer «fühlbaren» Interaktion lässt die Hoffnung zu, dass zwischen Bits und Bytes die Tasterlebnisse wieder erwachen. Das Tasten und Spüren scheint der nächste Angriffspunkt der elektronischen Kolonialisierung².



«Die Welt als Erweiterung der Haut ist sehr viel interessanter als die Welt als Erweiterung des Bildes»

Der Kommunikationswissenschaftler Derrick de Kerckhove verweist damit auf die wegweisenden Ideen der medialen Kunst: Stelarc, ein australischer Computer- und Robotik-Künstler erwägt die elektronische Fremdsteuerung des Körpers, sogar die Verschmelzung des Körpers mit der elektronischen Datenwelt. Weitere Ansätze sprechen von der Anpassung des Tastsinns an «virtuelle Bewegungsformen» und zählen auf die taktile Dominante in einem, auf das Visuelle zielende System³. Paul Virillo erwähnt die «taktile Perspektive»⁴, die eine Berührung auf Distanz in heutige Interaktionsformen hineininterpretiert.

Die Datenwelt scheint in greifbare Nähe zu kommen.

2. Zur Bedeutung des Tastsinns im Gefüge der Sinne

Tasten ist Orientierung

Die Haut, das größte Sinnesorgan unseres Körpers, mit dem wir spüren und empfinden, scheint im Vergleich zu den dominanten Gesichtssinnen (Sehen, Hören) sekundär. Wenn man im ersten Moment den Verlust des Tastens erwägt, scheint dieser - im Vergleich zu Blind- oder Taubheit relativ ertragbar. Nicht mehr Tasten zu können hieße im ersten Moment einen vertretbaren Verlust an Zusatzinformation (zu Bild und Ton) zu erfahren, der jedoch leicht durch die übrigen Sinne zu kompensieren wäre. Die Information einer harten Steinoberfläche ließe sich auch durch Optik und Berührungsklang entziffern. Doch sind es nicht diese wissensvermittelnden Informationen die uns durch den Verlust verloren gingen. Die taktile Information greift meist schon, bevor wir sie kognitiv verarbeitet haben. Wie schnell dadurch die Interaktionsfähigkeit beeinflusst werden kann, kann sich anschaulich ins Gedächtnis rufen, wer einmal versucht hat, mit Handschuhen einen kleinen Reißverschluss zu öffnen. Nicht nur, dass die Handschuhe die Finger dick und weich umhüllen und uns schon dadurch behindern, sie nehmen uns auch die subtilen taktilen Informationen mit denen wir sonst so selbstverständlich greifen.

Der Verlust des Tastsinns raubte uns unsere komplexen Fähigkeiten mit

der physischen Umwelt zu interagieren.

Die, im Vergleich zu den anderen Sinnen, sehr frühe Entwicklung des Tastsinnes, ist Indiz für dessen Bedeutung. Schon im Mutterleib, bevor Augen und Ohren fertig ausgebildet sind, reagiert der Embryo auf Berührung. Nach der Geburt orientiert sich der Säugling hauptsächlich über die sog. «niederen Sinne» in seiner direkten Umgebung. Das erforschen und sprichwörtliche «begreifen» der spannenden Welt, das Berühren von Gegenständen, das in-den-Mund nehmen von Dingen, bildet die Basis unserer so selbstverständlichen Orientierung und Interaktion in der uns umgebenden Welt. Die Unmittelbarkeit der Tastreize (im Kontrast zu visuellen Reizen, die wir meist kognitiv decodieren müssen) macht das Tasten durch die langjährige Erfahrung so selbstverständlich.

Dies mag einer der Gründe sein, warum uns das Anfassen der Dinge die größte Sicherheit beim Verifizieren der plastisch-materiellen Realität gibt. Was tastbar ist, existiert. Wo unsere Augen oder Ohren noch getäuscht werden können, beweist uns der Tastsinn, sozusagen als letzte Instanz, die Existenz physischer Objekte: Ein, ins Wasser gehaltener Stab erscheint durch die Lichtbrechung geknickt, ein kurzes Berühren des Stabes beweist uns die trügerische Illusion.

Meist geschehen Tastwahrnehmungen jedoch im Einklang mit visuellen und akustischen Reizen, oft sogar eilt der Berührung von Objekten Bild und Klang schon voraus, und verrät dabei bereits dessen taktile Eigenschaften. Wir müssen ein Stück Stoff nicht erst berühren, um zu wissen, wie es sich anfühlt, unsere langjährige Erfahrung mit Materialien und deren physikalischen Eigenschaften (Gewicht, Reibung, Temperatur, etc.) erweckt aus visuellen und akustischen Reizen meist sehr genaue Tastvorstellungen. Umso größer ist dann unser Erstaunen, wenn sich beim Berühren herausstellt, dass uns die Gesichtssinne dabei getäuscht haben. Bestimmte weiche und elastische Kunststoffe zum Beispiel, die auf den ersten Blick wie steinharte Fliesen aussehen, werden unter anderem im Möbeldesign als Gimmick eingesetzt.

Diese enge Verknüpfung des Tastsinnes mit dem Seh- und dem Hörsinn bildet die Grundlage für ein «virtuelles Tasten», auf das ich später detaillierter eingehen werde.



2. Zur Bedeutung des Tastsinns im Gefüge der Sinne

«Ich glaube wir können mit Sicherheit sagen, dass das nicht angefasste Tier ein emotional unbefriedigtes Wesen ist. Man hat die Befriedigung taktiler Bedürfnisse bisher nicht als lebenswichtig betrachtet, das heißt, wenn man 'lebenswichtig' so definiert, dass ein Bedürfnis erfüllt werden soll. Tatsächlich ist das Berührungsbedürfnis aber ein Lebensbedürfnis, denn es muss befriedigt werden, wenn der Organismus weiterleben soll. Hört die Hautstimulation vollkommen auf, dann stirbt der Organismus.»

Ashley Montagu



Emotionales Tasten

Im Hinblick auf unser emotionales Befinden spielt der Tastsinn eine entscheidende Rolle. Damit verbundene Begrifflichkeiten, wie «berührt» oder «ergriffen» sein, sich in seiner «Haut» wohlfühlen, oder das sprichwörtliche «unter die Haut gehen» deuten einen intensiven Zusammenhang schon an. Zärtliche Streicheleinheiten oder ein wohliges Bad in der Wanne, ebenso aber auch Zahnschmerzen oder eisige Kälte wecken Empfindungen, deren Intensität unser Befinden besonders beeinflusst. Selten werden rationale Umstände so schnell zur Nebensache wie bei intensiven körperlichen Empfindungen. Sexuelle Erfahrungen bilden dabei wohl den Höhepunkt dieser Empfindungen und sind die treibende Kraft eines instinktiven Berührungsbedürfnisses. Das genaue Gegenteil, die körperliche Berührungslosigkeit, führt früher oder später zum Gefühl der Einsamkeit, das oft durch Ersatzbefriedigungen wie Haustiere (oder Kuscheltiere) kompensiert werden muss.

Im Zusammenhang mit zwischenmenschlichen Berührungen stechen besonders diejenigen heraus, die unangenehme Empfindungen auslösen. Der Unterschied zwischen Schmusen und Grapschen hat dabei meist rationale Ursachen. Auf der einen Seite stehen die, durch Erziehung entstandene Tabuisierung des körperlichen Kontakts und dessen Schamgefühle, die zu «unangenehmen Berührungen» führen können. Demgegenüber gilt die - schon im Grundgesetz verankerte - «Unantastbarkeit» (der Würde) des Menschen zumindest theoretisch als allgemein akzeptiert. Berührung wird somit im schlimmsten Falle verletzend und beleidigend: «Fass mich bloß nicht an...»

Zudem besitzen Berührungen oft sehr starken zeichenhaften Charakter: Ein Schulterklopfen oder ein Händedruck sind mehr als nur ausgetauschte Körperlichkeit - hier werden Botschaften über Berührung semiotisch visualisiert. Die begrüßenden Wangenküsschen sind weniger beabsichtigter Berührungsaustausch als vielmehr ein abstraktes Zeichen der Herzlichkeit und Zusammengehörigkeit.

Neurophysiologische Grundlagen

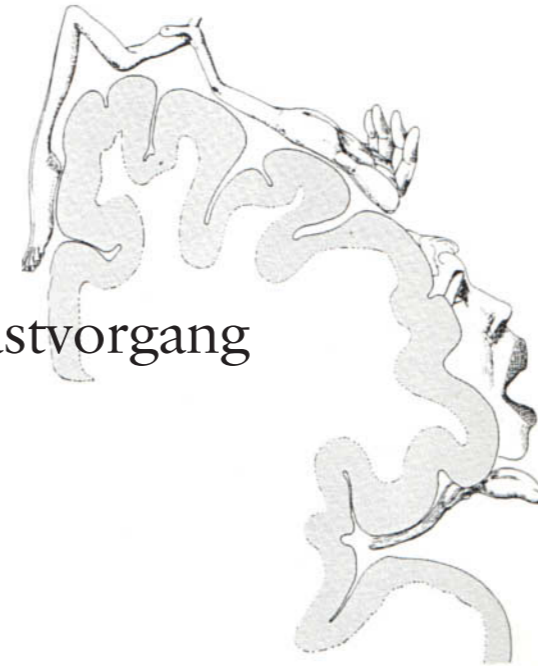
Der Tastsinn wird im allgemeinen als das «haptisch-somatische System» bezeichnet, das sich aus mehreren Komponenten zusammensetzt. Die Unterteilung gliedert sich dabei in die sog. Hautsinne, die taktile Wahrnehmung, Temperatur- und Schmerzsinne beinhalten, sowie in die Haltungssinne mit Bewegungs- und Kraftsinne. Die Wahrnehmung der Hautsinne wird oft auch als «taktile» oder «somatosensorische» Wahrnehmung bezeichnet, die der Haltungssinne als «kinästhetisch» oder «propriozeptiv».

Die Hautsinne besitzen vier unterschiedliche Rezeptoren, die jeweils für bestimmte Reizkategorien zuständig sind, dazu gehören Temperatur, Schmerz, unterschiedliche Arten von Vibrationen, sowie unterschiedliche Berührungsgeschwindigkeiten. Diese Rezeptoren erzeugen verschiedene Reizmuster, die zusammen das Tastbild ergeben. Die Reize werden dabei über das zentrale Nervensystem in den «somatosensorischen Kortex» des Gehirns geleitet, in dem sie, je nach Körperteil in unterschiedlich großen Regionen verarbeitet werden. Die Größe der Regionen sind maßgebend für die Auflösungen der Tastwahrnehmung, die je nach Funktion und Bedarf der Körperregion unterschiedlich hoch sind. So haben besonders Hände, Gesicht und Lippen eine hohe, Rücken oder Beine eine vergleichsweise niedrige Dichte von Rezeptoren. Die Haltungssinne verfügen über verschiedene Rezeptoren in Gelenken und Muskeln, die je nach Stellung oder Anspannung unterschiedliche Impulse abgeben und Bewegungsempfindungen auslösen.

Im Allgemeinen sind taktile und kinästhetische Reize in ihrer neuronalen Struktur sehr ähnlich zu visuellen Reizen, die verarbeitenden Hirnregionen liegen dicht beieinander und hinterlassen wie diese Erinnerungen im Gehirn.

Ein gewöhnliches Tastgefühl entsteht meist aus einem Zusammenspiel aus taktilen und kinästhetischen Empfindungen, und deren Verarbeitung im Gehirn. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Arten der Berührung unterschieden: Die passive Berührung, bei der das Tastorgan in Ruhe ist, und das betastete Objekt sich an der Haut entlang bewegt, sowie die aktive Berührung, die durch aktive Bewegung einen ruhenden Körper betastet. Verschiedene Arten der Abtastung (hin- und herbewegen, drücken, umfassen, etc.) können dabei unterschiedliche Arten der Wahrnehmung auslösen.

3. Der Tastvorgang



Querschnitt durch den somatosensorischen Cortex mit den für die einzelnen Körperteile zuständigen Regionen

Die Tastwahrnehmung kann dabei von verschiedenen Faktoren wie Denken, emotionalen Umständen, sowie auch kulturellen Einflüssen («Ein Indianer spürt keinen Schmerz») beeinflusst werden. Ein populäres Beispiel hierzu ist der «Placebo-Effekt» bestimmter Schmerzmittel. Erwähnt sei, dass auch bestimmte chemische Substanzen (Betäubungsmittel, etc.), sowie halluzinogene Drogen die Tastwahrnehmung vorübergehend stark beeinflussen können.

Besondere Eigenschaften

Tasten ist im Vergleich zu anderen Sinneswahrnehmungen fast immer ein synästhetischer Vorgang, der besonders visuelle und akustische, und zum Teil auch olfaktorische (=geschmackliche) Wahrnehmungen in den Wahrnehmungsvorgang mit einbezieht. Diese Simultanität der Sinneswahrnehmung erzeugt eine besonders hohe Komplexität der aufgenommenen Information: Gestalt, Oberfläche, Härte, Temperatur, etc.

Als einziger der fünf Sinne kann der Tastsinn als «aktiv» bezeichnet werden, da er durch verschiedenartige Bewegungen am gleichen Objekt verschiedenartige Empfindungen hervorrufen kann.



4. Digitale Interaktion

Überlegungen

Der wohl größte Teil unserer Interaktion mit der physischen Welt geschieht über das haptische System. Es bietet uns die Möglichkeit, Dinge um uns herum äußerst präzise zu beeinflussen, zu bewegen oder zu erfahren. Dabei bedient es sich einer großen Bandbreite der Wahrnehmung und Handlung, angefangen beim leisen Windhauch den wir auf der Haut spüren bis hin zur rohen Kraft, die wir benötigen um ein schweres Möbelstück zu bewegen.

Das haptische System besteht, im Vergleich zum visuellen System beispielsweise, nicht nur aus passiver, also rezeptiver Informationsaufnahme, sondern ermöglicht uns gleichzeitig, aktive Handlungen durchzuführen. Diese simultane Fähigkeit ist die Grundvoraussetzung konkreter Interaktion.

Diese Grundvoraussetzung scheint bei der Interaktion mit Maschinen oder Computern gestört. Wir handeln zwar über unser haptisches System, mit Tastatur, Maus oder ähnlichem (Joystick; Touchpad; Navigationsstift; etc.), nehmen aber die dadurch ausgelöste Information über unser visuelles System wahr. Wenn ich beispielsweise das Fenster eines Computerprogramms schließen möchte, ist mir das nur möglich, in dem ich haptische Aktion (ich bewege die Maus) mit visueller Rezeption (ich sehe die Bewegung des Zeigers) kombiniere. Die haptische Rezeption ist hierbei wertlos geworden.

Ein Extrembeispiel dieses Rezeptionsverlustes zeigt sich bei der Interaktion mit Touch-Screens. Hier findet eine scheinbar unmittelbare haptische Interaktion mit einem digitalen Interface statt, dennoch vermitteln mir die Nervenzellen meiner Fingerspitzen nur die Information einer berührten Glasscheibe, nicht aber die Reaktion des Interface. Dies führt insbesondere bei fehlendem visuellen oder akustischen Feedback zu einem Informationsverlust der die Interaktion erheblich einschränkt.

Um eine, dem Tastsinn adäquate Interaktion zu ermöglichen, müssen also Wege gefunden werden, eine zusätzliche haptische Informationsschnittstelle zu integrieren. Am idealsten sollte sie dort lokalisiert sein, wo auch die Handlungen der Aktion ausgeführt werden. Diese haptische Rückkoppelung kann (je nach Bedarf) sowohl taktil als auch kinästhetisch erfolgen.

Erste Untersuchungen und Anwendungen mit kinästhetischem Feedback finden sich bereits in den 50er Jahren im Zusammenhang mit Telerobotik. Dort wurden große Roboterarme mit Hilfe eines Joystickähnlichen Eingabegerätes gesteuert und darüber die am Roboter entstehenden Kräfte simuliert. Mitte der 80er Jahre entstanden erste taktile Displays, die vor allem im Bereich der Blinden-Schreibmaschine eingesetzt wurden. Diese Forschung führte, besonders im Bereich der immer schneller werdenden Computer, zu verschiedensten Entwicklungen im Bereich der haptischen Interaktion, welche inzwischen äußerst detaillierte Tasterfahrten ermöglichen.

Forschung und Entwicklung |⁵ 4. Digitale Interaktion

Die haptisch-digitale Interaktion hat sich in den letzten Jahren zu einem sehr ernstzunehmenden Forschungs- und Wirtschaftszweig herausgebildet, der mit hohem Aufwand neue, interessante Ansätze und Anwendungen zum Umgang mit computergesteuerten Medien eröffnet. Dabei spielen die Technologie des «Force-Feedback» (Kraft-Rückkopplung) sowie des «Touch-Feedback» die zentrale und vielversprechendste Rolle. Hauptsächlich handelt es sich hierbei um Eingabegeräte, die mit Hilfe von computergesteuerten Motoren Kräfte, Vibrationen oder Strukturen simulieren, meist im Zusammenhang mit Virtual Environments. Diese Technologien kommen bereits in verschiedenen Bereichen (Medizin, CAD, Forschung, Entertainment) mit großem Erfolg zum Einsatz und werden, diversen Einschätzungen zu Folge, in Zukunft eine entscheidenden Rolle in der Human-Computer-Interaction spielen.

Große Forschungseinrichtungen, darunter besonders das Touchlab des MIT, die Rutgers University of New Jersey, die University of North Carolina, sowie das IGD Darmstadt und diverse andere Forschungseinrichtungen in den USA, Europa und Japan, beschäftigen sich seit etwa fünfzehn Jahren intensiv mit den Möglichkeiten der haptischen Interaktion. Besonders nennenswert ist dabei das am Touchlab entwickelte *PHANTOM Haptic Interface*, vertrieben von der Firma SensAble Technologies, Inc., sowie der *Cyber-Touch* der Firma Virtex. Diese Entwicklungen bilden in vielen Fällen einen Ausgangspunkt der Forschungen. Das PHANTOM - Interface (entwickelt :1993), das als Desktop-Gerät konzipiert ist, besteht im wesentlichen aus einem dreifach gelagerten, freibeweglichen Arm, dessen Ende mit einem Stift oder einer Art Fingerhut in den drei Raumdimensionen fast reibungslos gesteuert werden kann. Drei computergesteuerte Motoren übertragen die Kraft-Rückkopplung auf die Raumachsen. Dadurch lassen sich mit entsprechender Software und starken Rechnerleistungen äußerst realitätsnahe Kraftverhältnisse (z.B. die Grenzen eines Objekts und dessen Festigkeit) sowie Vibrationen simulieren, die meist im Zusammenspiel mit gerenderten Echtzeit-Simulationen eine breite Basis an Einsatz- und Untersuchungsmöglichkeiten bieten.

Der Cyber-Touch ist ein Datenhandschuh, der an bestimmten Stellen (Fingerspitzen und Handinnenfläche) mit mikrotaktilen Displays ausgestattet ist. Über kleine Vibratoren kann dabei fein steuerbarer Druck und Vibration auf die jeweilige Handregion übermittelt werden. Damit werden vor allem virtuelle Berührungen und Schwingungen simuliert, die ebenfalls zusammen mit Echtzeit-Simulationen realitätsnahe Greifsituationen ermöglichen.



Sowohl nach dem Vorbild des PHANTOM, sowie des Cyber-Touch gibt es verschiedene Ansätze, die deren Prinzip zum Teil aufgegriffen und weiterentwickelt haben.

Neben diesen Entwicklungen gibt es Ansätze für taktile Displays, die mit kleinen, einzeln ansteuerbaren Stiften (shape memory alloys) oder pneumatischen Luftblasen die Simulation von Oberflächenmustern ermöglichen, sowie kleine piezoelektrische Summer und Lautsprecher, ebenfalls für vibrotaktile Stimulation. Versuche, die mit direkter elektrischer Nerveizung taktile Empfindungen hervorrufen, sind dabei wegen ihrer unangenehmen Nebeneffekte nicht weiter verfolgt worden.

Die einzelnen Forschungen selbst gehen dabei in unterschiedlichste Richtungen. Von neurophysiologischen Untersuchungen, Machbarkeitsstudien zur funktionalen Nutzung des Tastsinns, bis hin zu konkreten Produktentwicklungen hat sich ein weites Betätigungsfeld eröffnet, das immer stärker zu einem bedeutenden Element der Technologie-Entwicklung heranwächst.

4. Digitale Interaktion

Anwendungsbereiche (Force- und Touch-Feedback)

Ein Anwendungsbereich, der im Zentrum der Aufmerksamkeit steht, ist der Einsatz haptischer Interfaces in der Medizin. Trainingssimulatoren für die minimal-invasive Chirurgie simulieren realistische Eigenschaften der menschlichen Organe und Gewebe, um risikoreiche Operationen wirklichkeitsgetreu nachahmen und gefahrlos trainieren zu können. In ähnlicher Weise können typische haptische Eigenschaften von Tumoren oder bestimmten krankhaften Veränderungen simuliert werden, und damit auf patientenschonende Art zur Ausbildung beitragen. Erste Anwendungen in der Telemedizin, die gerade im Kontext der weltweiten Vernetzung eine zunehmende Rolle spielen, bedienen sich ebenfalls haptischer Interaktion um haptische Eindrücke bei Eingriffen zu übermitteln. Im Bereich der Rehabilitation werden Trainingsgeräte eingesetzt, die Schlaganfall-geschädigten Patienten beim Wiederaufbau ihrer kinästhetischen Fähigkeiten helfen sollen.

Ein nicht minder bedeutender wissenschaftlicher Forschungsbereich behandelt die taktile Vermittlung von Daten, Größen oder Eigenschaften. So können Chemiker beispielsweise molekulare Strukturen und deren besonderen Eigenschaften und Kräfte über haptische Interfaces ertasten. Ähnlich kann taktiler Feedback auch als Übermittler von abstrakten Informationen (z.B. mathematischen Funktionen, komplexen, multidimensionalen Daten, etc.) eingesetzt werden. Dies eröffnet insbesondere der Ausbildung von Blinden neue Möglichkeiten.

Besondere wirtschaftliche Relevanz haben Entwicklungen zur Produktionsoptimierung, hauptsächlich in der Automobilindustrie. Montageprozesse, und die dabei auftretenden Kräfte und Beanspruchungen können vorab simuliert werden und dadurch kostspielige Prototypen und Tests ersparen.

Weitere Anwendungsbereiche finden sich in Bereichen des 3D-Modelling sowie der erweiterten Computeranimation, die besonders auf detaillierte und realistische Objektbewegungen angewiesen sind.

physische Interaktion (allgemein)

Wegbereiter dieser anwendungsorientierten Forschung sind intensive Untersuchungen und Experimente zu realitätsnahen Tasterlebnissen (Touchlab), Studien über die Eigenschaften haptischer Interaktion (z.B. Greifbewegungen; Rutgers University), sowie Entwicklungen leistungsfähiger Software («Ghost», MIT).

Die dabei entstandenen Ergebnisse und Richtlinien gelten heute als Basis für Anwendungen und weitere Forschungen⁶.

Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Forschungsprojekte, die sich etwas allgemeiner mit möglichen Schnittstellen physikalisch-digitaler Interaktion beschäftigen. Die Tangible Media Group des MIT, beispielsweise, sucht nach Möglichkeiten, Graphical User Interfaces (GUI) durch «fassbare» Interaktion («Tangible Bits») zu erweitern oder zu ersetzen (z.B. physikalische Objekte als Datenspeicher). Im Mittelpunkt stehen dabei die komplexen, natürlich erlernten sinnlichen Fähigkeiten des Menschen.

In eine ähnliche Richtung weisen die Forschungsprojekte *Vision of the future* und *la casa prossima futura* (Das Haus der näheren Zukunft) von Philips Design. Auch hier liegt der Schwerpunkt der Studien zukünftiger Entertainment-/ und Kommunikationstechnologie auf physikalisch greifbarer und dadurch begreifbarer Interaktion.



Seit etwa fünf Jahren beginnen einfache Anwendungen haptischer Interaktion für ein breites Publikum Fuß zu fassen. Bisher jedoch beschränken sich diese hauptsächlich auf den Bereich des multimedialen Entertainments. Videospiele in Spielhallen, auf Spielkonsolen und PCs erweitern ihre virtuellen Welten durch Einsatz von rüttelnden Joysticks, Lenkrädern und sog. Rumble Packs (eine Art vibrierender Rucksack). Dazu heißt es auf der Web-Seite des Unternehmens Immersion Corporation:

«Stellen Sie sich vor, Sie fliegen in einem Raumschiff durch unsere Ga-laxis und spüren die Wiedereintrittskräfte, wenn Sie das Schiff in die Atmosphäre lenken. Stellen Sie sich vor, Sie werden in einem Rennauto aus der Bahn getragen und spüren das Rucken und Springen des Fahrzeugs bei der Berührung mit unebenem Gelände. Stellen Sie sich vor, Sie fühlen die Fliehkräfte auf sich einwirken, wenn Sie mit einem F16 Jet eine enge Kurve fliegen.[...] Es eröffnet sich ein Feld unbegrenzter Möglichkeiten.»

Ich konnte mich selbst bei einem Besuch in Kölns größter Spielhalle da-von überzeugen, dass die Spiele-Industrie ihren Werbetexten noch etwas hinterher läuft, da die Effekte größtenteils sehr unbeholfen wirken. Dennoch erhöht sich das Realitätsgefühl der Simulation spürbar und es ist vermutlich eine Frage der Zeit, bis sich die virtuellen Welten der «Echten» zum Verwechseln ähnlich anfühlen.

Inzwischen gibt es bereits ganze Alphabete von taktilen Effekten, wie z.B. das typische Rütteln eines MGs oder bestimmte Lenkkräfte bei Renn-simulationen, deren Realitätsgrad sich mit zunehmender Verbreitung und verbesserter Hardware noch deutlich verbessern wird. Nicht zu unterschätzen ist wohl auch die drängende Vorreiterrolle der Videospiele, die schon zur hohen Anforderung an die Rechen- und Grafikleistung heutiger PCs geführt haben. Möglicherweise könnte auf diesem Wege auch die taktile Interaktion den Sprung in einen breiten Anwendermarkt schaffen.

Der erste Schritt hierzu scheint bereits getan: Seit September ist die erste Computer-Maus mit Force-Feedback auf dem Markt erhältlich (iFeel-Mouse, Logitech, ab DM 99,-). Diese Maus hat dank optischer Abtastung keine Kugel im Inneren und somit Platz für einen kleinen Motor, der mit Hilfe von Vibrationen taktile Effekte spürbar macht.

Diese werden beim Überfahren von Objekten (Schaltflächen, Hyperlinks und Dropdown-Menüs) sowie bei Aktionen (Drag&Drop, Fenster verschieben oder aufziehen, etc.) aktiviert und sollen damit das Navigieren mit der Maus einfacher, effizienter und spannender machen. Die Firma Logitech selbst spricht von einer «komplett neuen Kategorie von Zeigegegeräten» und preist ihr Gerät als «revolutionären Schritt» in der Mensch-Maschine Interaktion. So sollen E-Commerce Applikationen beispielsweise die angebotene Ware ertastbar machen und Textilien dem Fühl-Test des Käufers unterzogen werden.

Im praktischen Test erfüllte die Maus meine hohen Erwartungen leider nicht im geringsten. Neben kleineren Software-Fehlern macht sich besonders das laute Vibrationsgeräusch der Maus als störender Zusatzeffekt bemerkbar. Die Vibrationen selbst sind eher ein lustiges Gimmick, als dass sie beim Navigieren hilfreich wären. Beispielhafte Effekte und fühlbare Strukturen auf der Web-Seite des Unternehmens Immersion, die für die entwickelte Software verantwortlich zeichnen, sind nicht geeignet um realistische Eindrücke zu erzielen. Meiner Einschätzung nach wird es die iFeel-Mouse äußerst schwer haben, sich - bei ihrem jetzigen Entwicklungsstand - für eine breite Masse durchzusetzen:

«It sounds cool, but it doesn't sound like a revolutionary technology that's going to change the world. Sure, people like to feel stuff. But it seems kind of like aroma disks: They're cool, but do they really mean anything?» |⁷





4. Digitale Interaktion

Bemerkungen

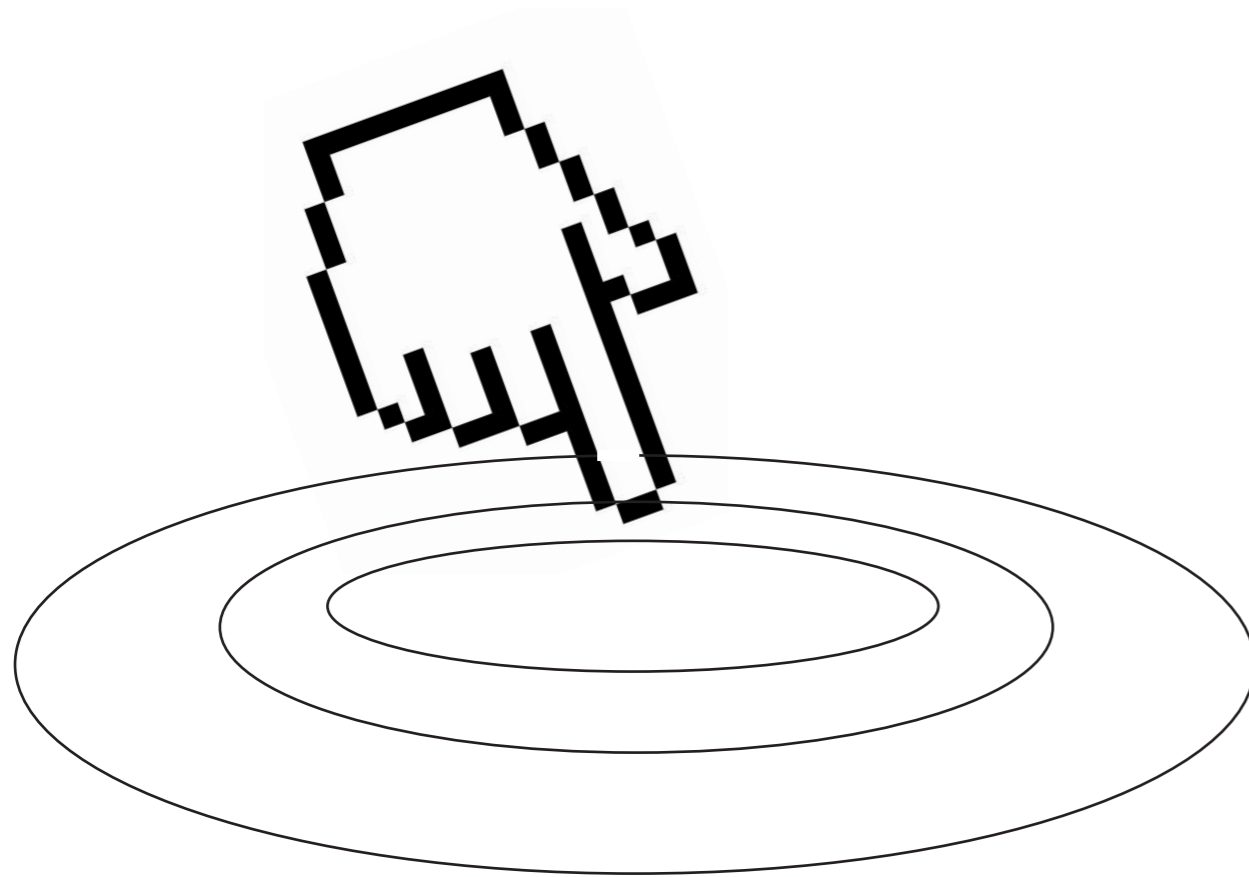
Es hat den Anschein, dass für den breiten Markt des Desktop-Computing für eine Force-Feedback Technologie bisher noch keine passenden Schnittstellen gefunden sind. Auch wenn die fühlbare Maus zumindest einen Schritt in die richtige Richtung getan hat, sind deren Einsatzvorteile gegenüber einer herkömmlichen Maus meiner Meinung nach viel zu gering, als dass sie eine entscheidende Interaktionsverbesserung darstellen könnten.

Zudem stellt sich allgemein die Frage, ob Maus und Tastatur (ohne ein Relikt der mechanischen Schreibmaschine) auf kurz oder lang als Eingabegeräte nicht bereits ihrem Verschwinden entgegensteuern. Touchpads und Fingerjoysticks, sowie Stift-basierte Dateneingabe und Navigation, wie sie bei Palm- und Laptops bereits erfolgreich zum Einsatz kommen, ebenso wie Spracheingabe und -Navigationssysteme weisen bereits den Weg.

Geräte mit «guten» Tasteigenschaften, wie das inzwischen schon relativ breit vertriebene PHANTOM-Interface zielen mit Preisen ab ca. 30 000,- DM (ohne Software) und beschränktem Einsatzfeld auf einen Markt, der nur im hochprofessionellen Einsatz rentabel erscheint.

Ein weiteres und schwer zu überwindendes Hindernis stellt außerdem die (vor allem durch Monopolstellungen und Kompatibilität ausgelöste) stagnierende Interface-Entwicklung der aktuellen Graphical-User Interfaces dar. Zwar sind die auf simplen zweidimensionalen Metaphern beruhenden Systeme wie Microsoft Windows oder Apple's MacOS eine allgemein akzeptierte und relativ leicht erlernbare Lösung, diese wird jedoch den Anforderungen moderner Computerstrukturen und deren Komplexität keineswegs gerecht⁸. Die Einbindung haptischer Interaktion in diese Systeme wäre lediglich ein Tropfen auf den heißen Stein. Vermutlich kann eine umfassende Force-Feedback Interaktion nur dann ernsthaft zum Einsatz gelangen, wenn sie in derartige Interface-Entwicklungen konsequent miteinbezogen würde.

Vor diesem Hintergrund taucht die Frage auf, wie und ob überhaupt eine haptische Interaktion in bestehende GUI-Systeme und deren vermutlichen noch Jahre währenden Fortbestand integriert werden kann. Deren, am Monitor orientierte, zweidimensionale Ausrichtung in Einklang mit räumlicher Taktilität zu bringen scheint also kein leichtes Unterfangen. Daher möchte ich im folgenden einen Ansatz vorstellen, der interaktive Tasterlebnisse aus einer anderen und neuen Perspektive anzugehen versucht.



5. Virtuelle Haptik

Voraussetzungen

Ein Sinn lässt sich narren

Im Laufe meiner Recherche bin ich häufig auf Hinweise gestoßen, die besagen, dass Tasteindrücke zum Teil äußerst stark von den Empfindungen anderer Sinne beeinflusst werden. Teilweise geht der Einfluss dieser Sinnesempfindungen sogar so weit, dass regelrecht falsch getastet wird:

Der Zeigefinger fährt über das raue Sandpapier. «Die Oberfläche ist glatt» sagt die Testperson. «Bloß eine Sinnestäuschung», klärt der Versuchsleiter auf. Die Testperson sieht das betastete Objekt nur auf einem Bildschirm, auf dem es glatt erscheint. Der Visuelle Eindruck überlagert die Information aus den Fingerkuppen.»⁹

Solche Experimente belegen, was ohnehin schon lange eine wichtige Rolle in der Erforschung des Tastsinns spielt: Tasten ist ein synästhetischer Vorgang. «Tastbilder», die unser Gehirn verarbeitet und speichert, basieren nicht nur auf rein phänomenalen Reizen, die wir über unsere taktilen und kinästhetischen Rezeptoren erhalten. Maßgeblich werden sie auch durch visuelle und akustische Begleitreize geformt, die während des Tastvorgangs hervorgerufen werden. Diese Beeinflussung kann sowohl durch akustische oder visuelle Reizung festgestellt werden, sowie besonders deutlich bei deren Zusammenspiel. David Katz hat schon zu Beginn der 20er Jahre in seinen Experimenten festgestellt, dass fehlender akustischer Reiz ein deutliches Nachlassen der Genauigkeit des Tastempfindens zur Folge hat¹⁰.

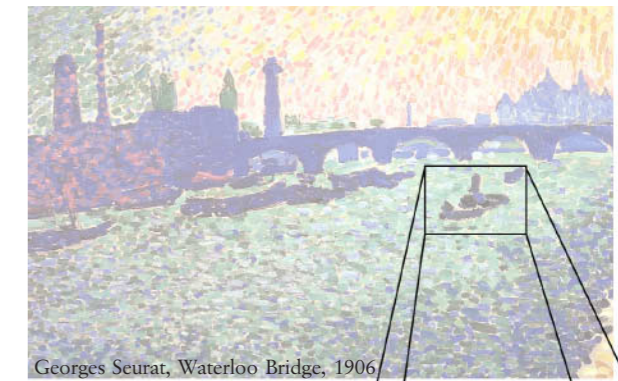
Anders herum können moderne Virtual Reality-Systeme auch ohne taktilen Feedback durch die hohe Qualität von dreidimensionalen Tonreproduktionen die Immersion - das Gefühl der tatsächlichen Anwesenheit im virtuellen Raum - enorm steigern. Wenn der Benutzer ein virtuelles Objekt mit dem Datenhandschuh zu berühren scheint, übernehmen visuelle Deformation und das simulierte Berührungsgeschall die Rolle, die üblicherweise vom Tastsinn erledigt wird. Was hierbei erzeugt wird, ist also keine tatsächliche Tastempfindung, sondern eine vom System hervorgerufene Reizsituation, die der Benutzer zu einer Tastvorstellung konstruiert, welche im Gehirn mit seinen vorhandenen synästhetischen Tasterinnerungen verglichen wird.

Berühren ohne Berührung

Berührung muss also nicht immer tatsächliche Berührung sein. Die Literatur zeigt in unzähligen Beispielen, wie geschilderte Berührung, eine Berührungsvorstellung im Leser erzeugt¹¹. Dieser spürt, in dem er sich in die Handlung hineinversetzt, stellvertretend für die Handlungsfiguren. Dabei ist die reine Vorstellung des Tasterlebnisses oft so genau, dass wir uns selbst geringe Tastreize, wie zum Beispiel das Streicheln mit einer Feder detailliert vor unser «taktilen» Auge führen können. Meist geschieht dies durch die visuelle Imagination des Tastvorgangs: wenn wir an die Berührung mit der Feder denken, stellen wir uns nicht nur die abstrakte Reizung auf unserer Haut vor, wir haben die Feder, die auf unserer Haut entlang fährt, vor Auge. Wir können bei diesen Vorstellungen sogar so weit gehen, dass wir selbst mit tastarmen Körperteilen wie der Schulter feinste Tastnuancen zu erkennen glauben, die in der Realität mit diesem Körperteil überhaupt nicht erkennbar wären. Meist jedoch geschehen diese Imaginationen mit der Vorstellung der Hand als tastendes Organ, da wir damit die häufigsten Tasterfahrungen und -erinnerungen haben. Diese Erfahrungen spielen bei der sog. Gedächtnistastung¹² eine zentrale Rolle: wir spüren nur was wir bereits berührt haben. Wenn uns jemand von einer Verletzung erzählt, können wir uns diese aus eigenen Erfahrungen von den Schmerzen einer vergleichbaren Verletzung vorstellen, ein Kopfschuss aber entzieht sich unserer Vorstellungskraft, wir haben ihn schließlich noch nicht erlebt.

Neben mündlichen oder schriftlichen Erzählungen können besonders Bilder oder Geräusche solche Gedächtnistastungen hervorrufen. Eine im Fernsehen gezeigte Operation verwendet eine visuelle «Erzählung» die wir in unserer Vorstellung auf unseren eigenen Körper projizieren. Eine dazu passende Geräuschkulisse intensiviert die Empfindung zusätzlich.

5. Virtuelle Haptik Voraussetzungen



Georges Seurat, Waterloo Bridge, 1906



Einzelne Farbreize werden im Gehirn zu einem schlüssigen Bild zusammengesetzt.

Konstruktion von Empfindungen

Die Wahrnehmungsforschung beschäftigt sich heute intensiv mit Fragen, die bereits in der konstruktivistischen Philosophie eine wichtige Rolle spielen: Die sinnliche Erfahrung unserer Realität basiert nicht nur auf aufgenommenen Sinnesreizen, vielmehr ist sie Resultat eines intelligenten Konstruktionsprozesses, an dem unser Gehirn entscheidend beteiligt ist.

Als anschauliches Beispiel aus der visuellen Wahrnehmung kann die Malerei des Pointillismus dienen: aus einzelnen kleinen Farbtupfern, die wie zufällig auf der Leinwand verstreut scheinen, konstruiert unser Gehirn ein komplettes Bild. Wir sehen also nicht nur die Sinnesreize, die auf unsere Augen einwirken (die einzelnen Farbtupfer), sondern nutzen diese Reize um sie zu einem sinnigen Bild zusammenzusetzen. Diese Fähigkeit zur Konstruktion begegnet uns ebenso beim Tastsinn¹³.

Meist ist der Vorgang der Konstruktion ein unbewusster und automatisierter Prozess und geschieht über die Zuordnung von Erfahrungsmustern, die uns damit die Basis für eine schnelle und unkomplizierte Wahrnehmung bieten – wir müssen nicht jedes Mal überlegen, wie wir die aufgenommenen Reize interpretieren sollen. Diese Erfahrungsmuster beschränken sich, besonders in komplexen Wahrnehmungssituationen, nicht nur auf einen Sinn, sondern beinhalten meist verschiedene Sinneskombinationen: Ein Autofahrer beispielsweise, kann nur über diese Art der kombinierten Wahrnehmung (Verkehrssituation, Fahrtgeräusche, haptische Rückmeldung vom Lenkrad, Wagenbewegungen, etc.) die unzähligen Informationen erfassen und zu sinnvollen Mustern verarbeiten. Diese «multisensiblen» Erfahrungsmuster können selbst dann noch zugeordnet werden, wenn einer der Sinne versagt, auch wenn dieser Sinn normalerweise maßgeblich zur Erfahrung beiträgt. Die Information aus den Reizen der übrigen Sinne reichen aus, um eine entsprechende Empfindung der Situation zu ermöglichen.

5. Virtuelle Haptik

haptische Simulation

Virtuelle These

Basierend auf diesen erstaunlichen Eigenschaften unserer Sinne möchte ich versuchen, taktile sowie kinästhetische Empfindungen ohne phänomenalen Sinnesreiz, also nur mit Hilfe von Empfindungskonstruktion über visuelle und/oder akustische Reize hervorzurufen. Dass diese Empfindungen dabei nicht an reale Tastempfindung heranreichen können ist selbstverständlich. Sie ermöglichen jedoch eine Art der digitalen Interaktion, die stärker als in bisherigen Ansätzen auf den physischen Gesetzen der Interaktion beruht.

Das Graphical User Interface

Ich möchte mich methodisch weitgehend auf das Prinzip der mausgesteuerten Graphical User Interfaces (Maus-Steuerung, 2D-Bildschirmorientiert) beschränken, da diese vermutlich noch für längere Zeit die Basis einer breiten Nutzung bilden werden, und damit einen vernünftigen Ausgangspunkt für Überlegungen bieten. Des Weiteren möchte ich versuchen, mich in einem Bereich möglicher Anwendungen zu bewegen, die heute bereits ohne weiteres realisierbar sind. Die große Verbreitung dieser Interaktion sowohl für Computersysteme sowie der davon abhängige größte Teil des Internet spricht für eine breite Anwendbarkeit. Zudem erscheint mir das bestehende Interfacesprinzip durch bescheidene haptische Interaktion als interessanter Ansatzpunkt.

An sich orientieren sich Plattformen wie Microsoft Windows oder MacOS bereits deutlich an unserer physischen Umgebung. Die benutzten Metaphern stammen fast alle aus unserer fass- und tastbaren Umwelt: kleine Händchen, die graue Schaltflächen drücken, Papierkörbe, die vom Prinzip her ähnlich funktionieren wie in der realen Welt, sowie ein Schreibtisch, dessen Funktionen (inklusive Unordentlichkeit) sich



Elemente der Windows-Benutzeroberfläche



Quicktime-Player (Apple)



Benutzer-Interface von www.amazon.de

an seinem physischen Pendant orientiert. Das Bewegen von Daten per Drag&Drop kommt einer physischen Bewegung sehr nahe: wir greifen etwas, bewegen es dorthin wo wir es haben möchten, und lassen es fallen. Daten werden, wie in einem richtigen Büro in Ordnern abgelegt, Register helfen, in komplexen Menüs die Übersicht zu bewahren. Die Macintosh-Variante (MacOS) zeigt uns durch grafische Oberflächenstrukturierung sogar, wo genau ein Objekt gegriffen werden muss, um verändert oder verschoben zu werden.

Wer möchte kann sich seine Aktionen durch Geräusche aus verschiedenen Soundbibliotheken kommentieren lassen. Diese kreieren je nach Vorliebe des Benutzers mehr oder weniger sinnvolle Geräuschkulissen.

Besonders Computerspiele, sowie Programme zur Multimedia-Steuerung und -Bearbeitung suchen die Metaphern zu ihren physischen Pendants: Ein Musikprogramm, das wie ein Mischpult aussieht, zeigt dem versierten Mischpult-Nutzer mit 3D-Reglern, Tasten und Knöpfen sehr anschaulich, wie er das Programm zu bedienen hat.

In ihrem Grundkonzept halte ich diese metaphorartige Sprache für durchaus sinnvoll und praktisch, hilft sie uns doch, uns in der komplexen Datenwelt zumindest an Bekanntem zu orientieren. Wie ein Reisender, der die pantomimischen Gesten der Einheimischen entziffert, können wir uns an den Metaphern orientieren, und handeln auch ohne die geringste Kenntnis von Programmiersprachen oder Tastaturbefehlen.

Etwas schwieriger ist die Orientierung im Internet, da im Vergleich zu den gewöhnlichen GUI-Systemen keine einheitliche «Grammatik» im Umgang mit Interaktionselementen existiert. Verschiedenste Typen der Navigation, sowie vollständig unterschiedliche grafische Erscheinungen bereiten dem unerfahrenen Nutzer oft große Einstiegsschwierigkeiten. So wird das ursprünglich leicht nachvollziehbare Hypertext-Prinzip schnell zum Ratespiel.

Jedoch tauchen auch hier immer wieder Elemente aus der physischen Welt auf, die versuchen, die Interaktion kenntlich zu machen: 3D-Buttons, Register, Schatteneffekte und Rollover-Buttons sind dabei in vielfältigsten Varianten auszumachen.

Im Gegensatz dazu bereitet der unterschiedliche Einsatz von Textlinks oft größere Schwierigkeiten und man muss teilweise erraten, ob sich hinter einem Wort etwas verbirgt oder nicht. Die Abstraktion des physischen Knopfes führt hier so weit, dass ausschließlich über die Veränderung des Mauszeigers eine Funktion erkannt werden kann.

5. Virtuelle Haptik

haptische Simulation



Die Bedeutung der Maus

Die Maussteuerung, als eines der grundlegenden Elemente der Graphical User Interfaces, besitzt auf Grund ihres Interaktionsprinzips (lineare Umsetzung der User-Handbewegung) bereits haptische Grundzüge und bietet daher eine wesentliche Basis meiner Überlegungen. Die enorme Verbreitung der Maus (im Zusammenhang mit den GUI-Systemen) beweist ihre Funktionalität. Der besonders anschauliche Charakter der auf den Monitor übersetzten, zweidimensionalen Real-Bewegung der Maus, ist im Vergleich zu der komplizierten Befehlseingabe über die Tastatur ein wahrer Segen für den nichtprofessionellen User. Im Vergleich zu Tastaturbefehlen orientiert sich die Maussteuerung an physikalischer Interaktion und kann selbst vom unerfahrenen Benutzer erfolgreich verwendet werden. Der Einfachheit und Magie der Point-and-Click-Handlungen, mit der wir den Computer steuern, liegt unser gut trainiertes physisches Bewegungsrepertoire zu Grunde.

Die nahezu direkte Übertragung der Handbewegungen auf unseren Mauszeiger besitzt den Charakter eines verlängerten Zeigefingers oder eines Stabes, mit dem wir die «entfernten» Objekte des Computers ansteuern. Zwar liegen dabei die Bewegungsebenen (Schreibtisch und Monitor) nicht wie bei einem echten Stock in einer Ebene, aber dafür haben wir freie Sicht auf den Monitor.

Durch die Stock-Metapher lässt sich schon eine erste gravierende Einschränkung feststellen: während wir mit unserem Stock nicht nur agieren, sondern das Berührte dabei auch spüren (Festigkeit, Struktur, etc.), ernüchert uns die Maus, die uns allenfalls die Unebenheiten der Tischoberfläche mitteilt. Das Feedback für diese verlängerte Hand wird ausschließlich über den Bildschirm (und in wenigen Fällen über die Lautsprecher) vermittelt und dies zudem meist äußerst eingeschränkt. Wir können zwar die Bewegung der Maus auf dem Bildschirm verfolgen, erfahren dabei aber nichts über die «berührten» Daten.

Ein zweites wesentliches Problem in diesem Zusammenhang scheint mir die sterile Linearität zu sein, mit der sich der Mauszeiger durch die Datenwelt bewegt. Er kennt keine Grenzen außer denen des Monitors und kommt damit überall schnell und unbeschwert hin. Keine Hindernisse (die uns vielleicht einen Weg weisen könnten), keine Verzögerungen und keine spürbaren Reaktionen beeinflussen die Bewegungen.

Kühn streift der Benutzer beim Eintritt in die Datenwelt die physikalischen Gesetze von sich ab, um damit zwar große Freiheit zu gewinnen, gleichzeitig aber auch ein gutes Stück seines Interaktions-Potentials zu verlieren.

5. Virtuelle Haptik

haptische Simulation

Eigenschaften der «virtuellen Hand»

Wenn wir die Eigenschaften des Mauszeigers mit denen seines menschlichen Pendanten vergleichen, lassen sich einige frappierende Unterschiede feststellen, die möglicherweise Grundlage für neue Überlegungen darstellen können.

Bewegung:

Der Mauszeiger übernimmt lediglich die 2-Dimensionale Bewegung der menschlichen Hand. Er schwebt auf oberster Ebene frei auf der Fläche des Monitors herum und ist nur durch dessen Maße begrenzt. Der Zeiger kommt dadurch ohne den geringsten Aufwand in sämtliche Ecken des Bildschirms. Dabei besitzt er immer die gleiche Ausrichtung und kann sich weder neigen noch drehen.



Aussehen

Der Mauszeiger hat den Großteil seiner Zeit die Form eines Pfeils. Er hat fast immer (bis auf wenige, benutzerdefinierte Ausnahmen) die gleiche Größe, diese ist im Vergleich zu unserer Hand sehr klein (oder sehr weit entfernt). Der Zeiger ist immer zweidimensional, selbst wenn er durch 3D-Effekte manchmal dreidimensional aussieht.



Die Mauszeiger verschiedener Benutzer sehen alle gleich aus, egal ob alt, jung, schwarz, weiß, dick oder dünn. Dabei ist er immer frisch, sauber, starr, gesund, niemals müde und braucht nicht die geringste Pflege (keine Fingernägel).

Funktion:

Der Zeiger kann seine Form und meist gleichzeitig seine Funktion verändern und wird dadurch zum Multi-Tool, das verschiedene Aufgaben mühelos bewältigen kann. Er hat dabei oft für gleiche Funktionen unterschiedliche Zustände (und umgekehrt); Beispiel *Aktion ausführen*: Hyperlink = Hand; Programmfunktion = Pfeil



Der Mauszeiger kann maximal 3 bis 4 verschiedene Funktionen ausführen und braucht oft Nachhilfe durch die Tastatur.

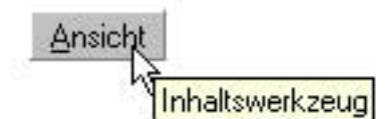
Interaktion:

Der Zeiger ist teilweise «berührungssensitiv» und verändert dabei sich selbst, oder das überfahrene Objekt. Dabei bemerkt er jedoch meist nicht, ob er gedrückt hat /etwas berührt hat, oder nicht.

Er kann mit dem selben Aufwand sowohl große, wie auch kleine Daten-mengen (Objekte, Symbole, etc.) hin- und her bewegen.

Beizeiten erscheint über ihm ein Schildchen, das dem Benutzer etwas mitteilt.

Der Mauszeiger kann, so sehr er sich auch anstrengt, offensichtlich nichts kaputtmachen oder Spuren hinterlassen.



Der ein oder andere Aspekt dieser Auflistung mag auf den ersten Blick irrelevant klingen, dennoch wäre es wünschenswert, in den oft sehr komplexen Situationen unseres alltäglichen Umgangs mit Daten die wohltrainierten Fähigkeiten unserer Hand zu Hilfe nehmen zu können:

5. Virtuelle Haptik

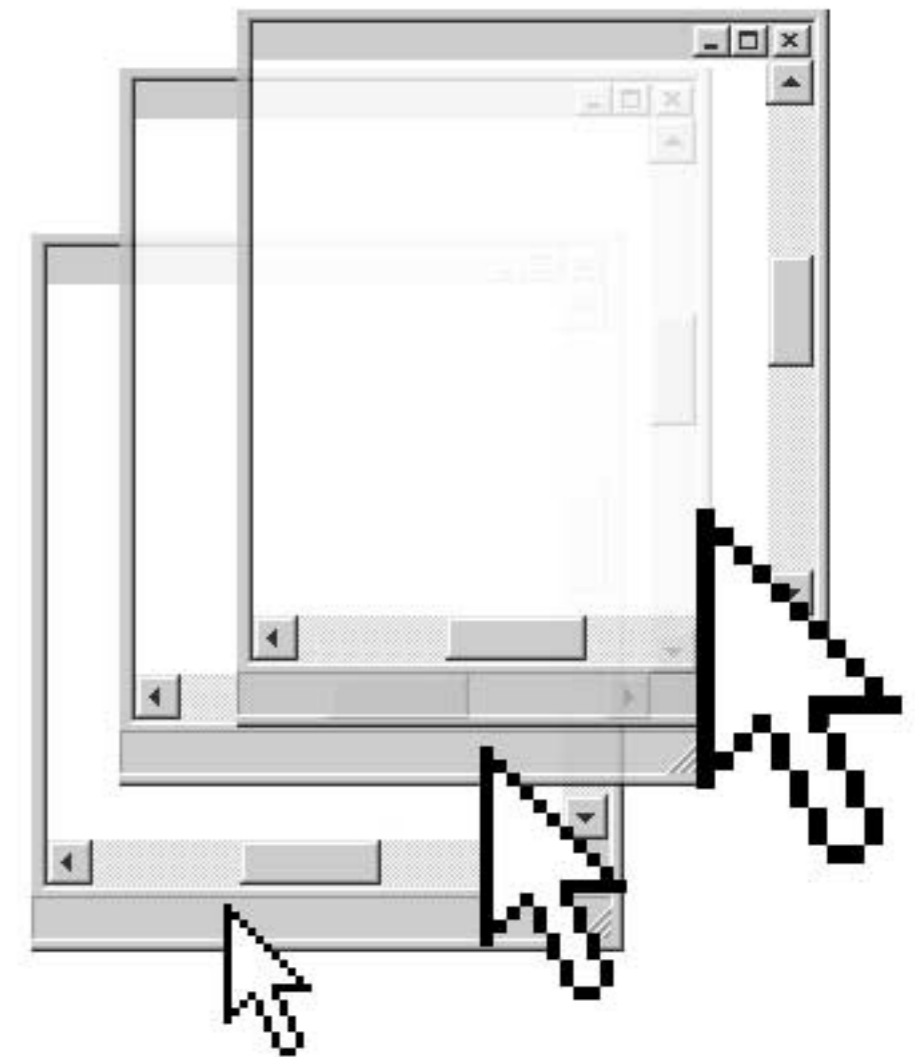
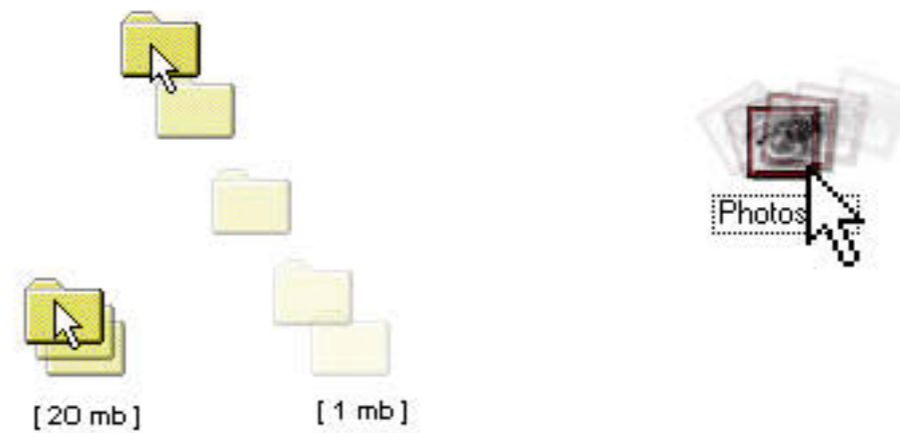
haptische Simulation

Wie wäre es wohl, wenn wir die Verzeichnisse auf unseren Rechnern aufgrund ihres Gewichtes sofort als leer oder voll erkennen könnten? Oder wenn deren berührte Oberfläche uns etwas über ihr Alter und ihre Abnutzung verraten würde?¹⁴ Wenn statt der fahlgrauen und glatten Bedienoberfläche Strukturen erfahrbar gemacht würden, die uns beim Berühren (mouseover) ihres Materials verraten, zu welchem Programm oder Programmteil sie gehören?

Ein Hyperlink, über den wir mit der Maus fahren, könnte über seine Bewegung, Vibration, oder seine Materialität etwas über die folgende Seite mitteilen: deren Inhaltmenge beispielsweise. Was wäre, wenn die scheinbare Tiefe, die uns mit überlappenden Fenstern, Ebenen und Schaltflächen vorgetäuscht wird, durch die Tiefe der Maus sofort erkennbar wäre? Wenn durch die Griffigkeit der Materialien selbst die kleinsten Symbole oder Dateien nicht mehr «aus der Maus» gleiten würden?

Schonen wir uns nicht danach, dem Programm einen ordentlichen Klaps zu verpassen, wenn es gerade wieder nicht so funktioniert wie es soll? Andersherum könnte sich ein Programmsymbol durch sein taktileres Verhalten, Vibration zum Beispiel, darauf freuen, endlich einmal wieder benutzt zu werden. Ein digital fühlbares Stück Holz oder ein paar Daunenfedern, die wir mit unserer Hand durchwühlen können, wären eine erfreulich sinnliche Begegnung. Können Sie sich vorstellen, eine Webseite zu «stupsen», statt sich nur durchzuklicken?

Trotz mancher Übertreibung lassen sich zum Teil durchaus funktionale wie emotionale Anregungen finden. Was bleibt, ist lediglich die Frage, wie derartige Visionen ohne allzu übertriebenen Aufwand tatsächlich umgesetzt werden können. Dass hierfür bereits ein interessanter Weg offen steht, zeigen die folgenden Ausführungen.



5. Virtuelle Haptik

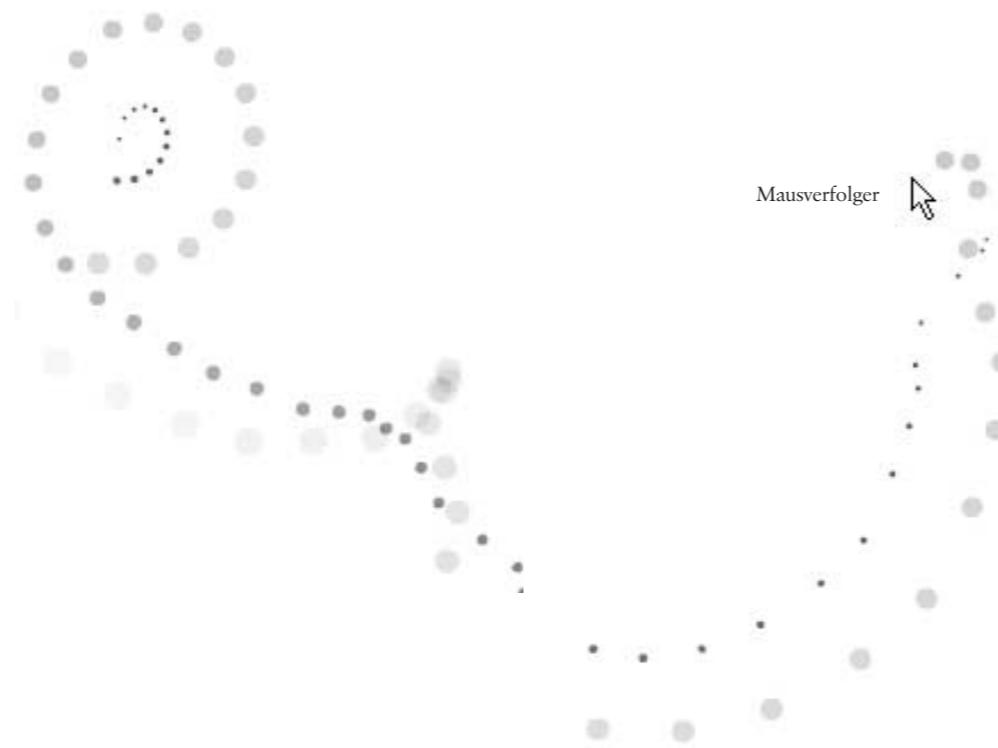
haptische Simulation

Möglichkeiten der Umsetzung

Durch den großen Erfolg und die weite Verbreitung des Animations- und Interaktions-Programms Macromedia Flash¹⁵ (seit ca. 1996) eröffnen sich erweiterte Möglichkeiten, vor allem Internet-Inhalte dynamisch zu gestalten. Damit ist es möglich, sowohl lineare Animation, als auch animierte Interaktionselemente in die Gestaltung von Web-Inhalten mit einfließen zu lassen. Großer Beliebtheit erfreuen sich vor allem animierte Schaltflächen, die sehr differenziert einzelne Interaktionsabläufe visuell sowie akustisch zu kommentieren vermögen. Zudem werden durch eine äußerst leistungsfähige Programmiersprache (Actionscript) auch komplexere Navigationselemente möglich, die das Potential der Mausebewegung weiter ausnutzen und über das «Point-and-Click» Prinzip hinausgehen. So tauchen beispielsweise 3D-Navigationsauf, die sich durch Mausebewegungen - vergleichbar mit natürlicher Bewegung - hin- und herziehen lassen, dynamische Fenster und Leisten, die sich wie in Windows (leider meist nur als banale Kopie) verschieben, übereinander stellen oder verkleinern und vergrößern lassen. Immer häufiger tauchen in letzter Zeit Interaktionselemente auf, die auf den Regeln unserer physikalischen Welt (z.B. Elastizität oder Beschleunigung) basieren.

Ein vielgesehener Effekt, der daraus hervorgeht, ist der *Mausverfolger*. Dies sind meist mehrere animierte Objekte, die dem Weg der Maus folgen und nach ihren einprogrammierten Verhaltensweisen verschiedenen physikalischen Regeln gehorchen. Als bisher funktionsloser Effekt schafft der Mausverfolger es dennoch, die Ladezeiten auf spielerische Art und Weise zu versüßen. Der User hat dabei oft das Gefühl, als hingen ein oder mehrere Objekte an der Maus, die sich durch seine Bewegungen steuern ließen. Die Faszination an dieser natürlichen Interaktivität hat eine regelrechte Welle von vergleichbaren Interaktionen ausgelöst.

Verschiedenste dreidimensionale Objekte und Menüsteuerungen, abprallende und anziehende Objekte, mausgesteuerte Effekte, die Objekte nach physikalischen Gesetzen bewegen, tauchen - meist als Experiment - in einschlägigen Newsgroups und Foren auf. Vielfach werden dabei Programmiercodes oder Anleitungen zum Download bereitgestellt und verbreitet. Durch diese offene Verbreitung wird es, auch für eine große Zahl von Designern zunehmend einfacher, realistische und physikalische Bewegungen und Interaktionen einzusetzen. Damit ergibt sich eine interessante Basis zum verbreiteten Einsatz virtueller, haptischer



Interaktion.

Regeln der Simulation

Hier taucht nun die Frage auf, nach welchen Prinzipien oder Regeln diese meist experimentellen Ansätze in anwendbare haptische Interaktionen umgesetzt werden können. Es muss mit den Mitteln der dynamischen visuellen und akustischen Interaktions-Simulation eine Situation des Tastvorgangs erzeugt werden, in der der User mit Hilfe von Tastbegleitreizen ein Tastempfinden assoziiert. Dabei müssen visuelle und akustische Reize so eindeutig und konsensfähig angelegt sein, dass der Nutzer die Situation ohne Schwierigkeiten als Tastsituation identifiziert und sie mit realen Tasterlebnissen in Verbindung bringen kann. Nun ist es in den wenigsten Fällen weder machbar noch sinnvoll oder erwünscht, die Begebenheiten der Realität einfach zu kopieren. Hier sollte genügen, die Begleitreize über eine semiotische visuelle und akustische Sprache zu vermitteln. Die Tasterlebnisse sollten dabei auf das wesentliche und prägende reduziert, und als Essenz dynamisch wiedergegeben werden. Dazu werden Metaphern benötigt, die sowohl natürliche Bewegungen, Geräusche als auch visuelle Erscheinungen zu einem erkennbaren Grad wiedergeben und vermitteln können.

Oftmals helfen einfache Überlegungen, inwieweit ein bestimmtes Tasterlebnis reduziert werden kann, um trotzdem noch als solches erkennbar zu bleiben. Die verbleibenden Attribute können dann assoziativ ins Visuelle/ Akustische übertragen werden: Weichheit als sanfte Bewegung, hart als optischer Kontrast oder kurzer und heller Berührungston, warm mit roter Farbe, rau durch visuelle Struktur, und so weiter.

Kinästhetische Vorgänge lassen sich vor allem über dynamische Bewegung vermitteln: Elastizität, Beschleunigung, Bewegungsverhalten von Objekten. Veränderungen des Mauszeigers wie Größe, Bewegung oder Form können eine reale physische Beeinflussung unserer Hand simulieren.

Nach erfolgreicher Anwendung könnte aufgrund verschiedener Regeln eine Rhetorik herausgebildet werden, die auf bestimmte Phänomene angewendet werden kann. Hierfür habe ich versucht, mögliche Parameter aufzulisten und auf die tastbaren Dimensionen anzuwenden:

5. Virtuelle Haptik

haptische Simulation

Einsetzbare Parameter assoziativer Haptik:

Akustisch:

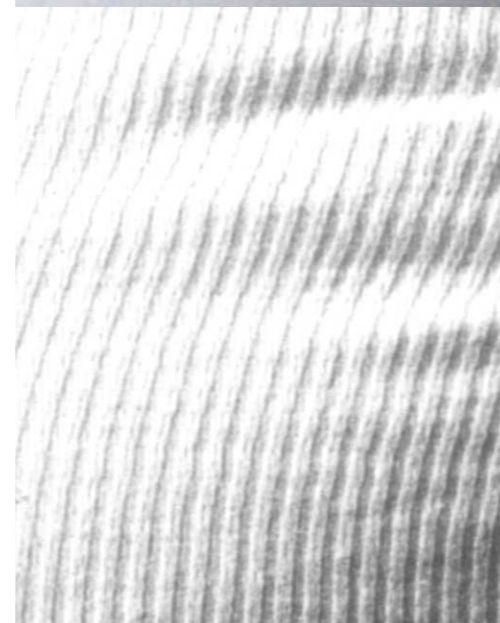
- realistische Geräusche
- Atmosphäre
- assoziative Geräusche
- Tempo/ Länge/ Modulation

Visuell:

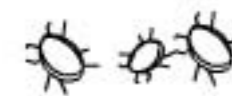
- realistische Darstellung
- assoziative/ metaphorische Darstellung
- Atmosphäre
- Zusatzeffekte (z.B. Wassertröpfchen)
- Farbe
- Struktur
- 3D/ Licht und Schatten

Dynamische Bewegung:

- realistische/ assoziative Bewegungen
- Tempo/ Länge/ Modulation
- Verzögerung/ Beschleunigung
- Gravitation/ Elastizität/ etc.
- Vibration



Dimension	Zustände	Möglichkeiten der Simulation
Gestalt	- geschmeidig - kantig	- visuell: durch Umriss, 3D - Mausbewegung: von sanft bis ruckelig - Betonung der Kontur bei Mouseover - Reaktion des Objekts - akustisch: sanft bis holperig
Oberflächen-Struktur	- glatt - rauh - hakelig	- visuelle Struktur - akustisch: realistisches Geräusch bei Mouseover - glatte oder verzögerte Mausbewegung - visuelle Zusatzeffekte: kriselige Pixel, sanfte Schatten, 3D - bewegter Mausschatten
Temperatur	- warm - kalt - mild	- visuelle Assoziation: rot=warm, blau=kalt »Farbtemperatur - visuelle Zusatzeffekte: Dampf, Eis, etc. - akustische Assoziation: «klirrende Kälte», «wohlig Wärme»
Feuchtigkeit	- trocken - feucht - glitschig	- akustisch: realistisches Geräusch, Atmosphäre - visuelle Zusatzeffekte: Tropfen, Ringe, Spur, Glanz - «glitschige» Objektbewegung
Mächtigkeit	- groß - klein - fein strukturiert - massiv	- akustische Assoziation: dunkel= groß/mächtig, hell= klein/fein - visuelle Darstellung, 3D - Größenänderung des Mauszeigers - Beweglichkeit des Objekts - Verzögerung bei Drag&Drop
Härte Steifigkeit	- hart - weich - biegsam - elastisch	- akustische Assoziation: kurzes/langes Geräusch; Modulation - visuelle Zusatzeffekte: sanft/langsam=weich, hart/schnell=hart - realistische Geräusche: «Boing» - dynamische Größenänderung des Mauszeigers - natürliche Objektbewegung
Masse Gewicht	- schwer - leicht - sehr leicht	- verzögerte/beschleunigte Objektbewegung (Drag&Drop) - visuell/akustisch: dunkel/hell - Gravitation
Fähigkeit zur Beweglichkeit	- beweglich - fixiert - klebrig	- Beweglichkeit: Drag&Drop/durch Anstossen - akustische Assoziation: Modulation bei Bewegung - stehender/hängender Mauszeiger
Beweglichkeit Ruhe	- vibrierend - beweglich - starr	- visuelle Zusatzeffekte: Vibration, Wabern, Wellen - akustische Assoziation/natürliche Geräusche
Materialbeschaffenheit	- holzartig - metallig - wollig	- charakteristische Materialgeräusche bei Mouseover/MouseDown - visuelle Struktur - Veränderung des Mauszeigers - visuelle Zusatzeffekte



Überlegungen

Zur Unterstützung meiner Ausführungen und zur anschaulichen Umsetzung der Theorie dient neben verschiedenen Experimenten ein exemplarisches Interface-Beispiel, das nachfolgend erklärt und näher beschrieben wird. Damit soll auch die Frage aufgeworfen werden, ob diese Art der simulativen Haptik eine ernstzunehmende Möglichkeit bieten kann, um den im digitalen Chaos verlorenen Tastsinn wiederzubeleben, und ob der große Aufwand einer intensiven sensorischen Interaktivität gerechtfertigt und benötigt ist.

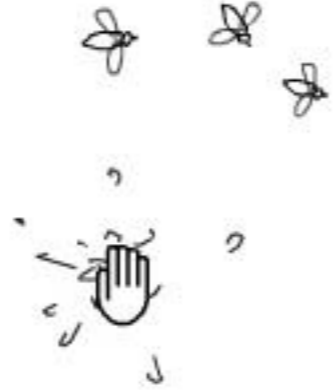
In diesem Zuge musste bedacht werden, welche Art von Anschauungsbeispiel in Kombination mit den theoretischen Überlegungen die Zielsetzung am wirkungsvollsten darstellt. Grundsätzlich stellten sich mir folgende drei Alternativen: ein konkretes Anwendungsbeispiel mit funktionaler Gewichtung (auf der Basis bestehender GUI-Systeme), eine aufklärende Präsentation, oder drittens, eine emotional ausgerichtete, spielerische Annäherung an das Thema. Da auf den ersten Blick alle drei Alternativen in Frage kamen, möchte ich meine Entscheidung für eine spielerische Form der Annäherung kurz begründen:

Zum einen bleibt durch einen spielerischen Ansatz die Möglichkeit zusätzlicher Experimente und spontaner Änderungen offen (was bei der komplizierten Flash-Umsetzung durchaus von Vorteil sein kann). Falls ich damit ins Stocken geraten sollte, kann ohne weiteres eine neue Richtung eingeschlagen werden. Zum Anderen besteht damit die Möglichkeit, ein breiteres Interesse zu wecken, als dies bei einer nüchternen Umsetzung der Fall wäre. Das gewinnt insofern an Bedeutung, da mein Interesse sich besonders auf Anregungen oder weitere Experimente stützt. Falls die Umsetzung der simulativen Haptik nicht den erhofften Effekt erzielen kann, ist zumindest ein unterhaltsames Spiel entstanden, das nicht zwangsläufig in den Schubladen verloren gehen muss.

Zwar mag dieser Ansatz weniger anschaulich und konkret sein, allerdings hat er ohnehin nicht den Anspruch, sofort anwendbar zu sein oder auf Funktionalität zu bestehen. Es erschien mir sinnvoll, mich lieber grundsätzlich und experimentell mit diesem, noch ungefestigten Thema auseinander zu setzen - auch um es zuerst einmal auf seine Anwendbarkeit zu prüfen.

6. «touchablez» - ein exemplarisches Interface





6. «touchablez» – ein exemplarisches Interface

«touchablez» – das Spiel

Das Grundprinzip des Spiels basiert auf einer linearen Abfolge von fünf Levels, die erreicht werden, nachdem eine Aufgabe gelöst wird, die nur unter Anwendung haptischer Interaktion gelöst werden kann. Der Spieler nimmt die abstrakte Position eines virtuellen Kammerjägers ein und muss auf unterschiedliche Art und Weise versuchen, verschiedene Schädlinge zu bekämpfen. Das Interface selbst wird dadurch zum zentralen Spielinhalt.

Umsetzung

Das Spiel wurde ausschließlich mit Macromedia Flash (Ver. 5) erstellt, und verwendet Sounds, die teilweise mit SoundForge 4.5. aufgenommen und modifiziert wurden.

Die sehr leistungsfähige und komplexe Programmiersprache (*Actionscript*) ermöglicht die Erstellung umfangreicher Eigenschaften, mathematischer Funktionen und Abläufe, die hochinteraktive und nichtlineare Animationen ermöglichen. (Diese Komplexität trug zum Teil dazu bei, dass ich bei der Umsetzung einiger Ideen an die Grenzen meiner Programmier-Fähigkeiten gelangte, und erhebliche Kompromisse eingehen musste.)

Bei den Schädlingen handelt es sich meist um zufallsgesteuerte Objekte, die auf Berührung oder auf andere Objekte reagieren. Die Maus wurde durch eine dynamische Hand ersetzt, die verschiedene Fähigkeiten besitzt (Rotation, versch. Funktionen, verzögerte Bewegung, etc.). Die optische Erscheinung ist bewusst simpel gehalten, um nicht vom haptischen Geschehen abzulenken, und um die Wirksamkeit der assoziativen Reize unter Beweis zu stellen. Um den Spielcharakter aufrecht zu erhalten, wurden, statt der üblichen digitalen Sterilität und Perfektion zeichnerische Elemente verwendet. Die akustische Atmosphäre wurde dem jeweiligen Level angepasst.

Der Spieler soll sich während und durch dieses Spiel mit Interaktionsweisen auseinandersetzen, die mit natürlicher, haptischer Interaktion vergleichbar sind und in dieser Art und Weise bisher nicht in digitalen Anwendungen auftauchen. Dadurch soll er für die Thematik des virtuellen Tastens sensibilisiert und angeregt werden.

Das Spiel ist zusätzlich in eine Web-Seite (www.touchablez.de) eingebettet, die das Thema der virtuellen Haptik kurz erläutert und weiterführende Informationen, sowie die verschiedenen Vorab-Experimente bereitstellt.

Für mich selbst war die Entwicklung dieses Spiels eine Herausforderung, meine Überlegungen präsentations- und demonstrationsreif in eine funktionsfähige Anwendung umzusetzen. Mir fällt es aufgrund meiner intensiven Auseinandersetzung schwer, die tatsächliche sensorische Qualität der einzelnen Interfaces zu beurteilen. Jedoch bin ich davon überzeugt, dass, erst recht bei weiter verbesserter Leistungsfähigkeit von Rechnern und Datenverbindungen, das sterile Verhältnis zwischen Mensch und Computer, ob haptisch oder nicht, durch eine intensivere Interaktivität erweitert werden kann.

«Das einzig traurige an ihr ist, dass man sie nicht anfassen kann.»



7. Abschließende Bemerkungen

Obwohl der Tastsinn in computerbasierten Medien durch die Forschungen und Anwendungen mit Hilfe des Force-Feedback und taktilen Displays inzwischen zunehmend an Bedeutung gewonnen hat, scheint er für die breite Anwendung in meinen Augen noch lange nicht reif zu sein. Die Diskrepanz zwischen Nützlichkeit und Preis, sowie zwischen Begehrlichkeit und tatsächlicher Funktion sind allem Anschein nach noch um einiges zu hoch. Auch wenn eine physikalische Interaktion in einigen Anwendungsbereichen sinnvoll erscheint, oder schon Fuß gefasst hat, muss der Privat-Nutzer auf eine effiziente Weiterentwicklung der Hard-ware sowie ein Einlenken der Software-Industrie hoffen, um auf seine «sensorischen Kosten» zu kommen. Das Potential einer haptischen Inter-aktion ist jedenfalls deutlich erkennbar.

Möglicherweise als eine Art «Ersatzbefriedigung» kann in diesem Zuge mein Versuch gelten, mit Hilfe von gegebenen Mitteln der Interaktion, Maus auf der einen, sowie akustisches und visuelles Feedback auf der anderen Seite, die Schwächen (oder vielmehr die Stärken) der Tastempfindungen zu nutzen, um zumindest die Simulation einer Berührung in die Interaktion mit einzubinden. Falls es gelingt, mit meiner Arbeit weiterführende Experimente oder Anwendungen anzuregen, hätte sich der Aufwand aus meiner Sicht gelohnt.

Ob nun physisch, oder nur simuliert - der Tastsinn, der uns den größten Teil unserer Zeit fast unbemerkt und so selbstverständlich begleitet, scheint langsam wieder aus seiner Höhle hervorzukriechen um die schöne neue Welt in Angriff zu nehmen. Bleibt also zu hoffen, dass er neben Augen und Ohren seinen ihm gebührenden Platz wieder einnimmt.

©Ralf Bähren, März 2001

8. Anhang

Anmerkungen

- 1 Vgl. Böhme, Hartmut: «Der Tastsinn im Gefüge der Sinne. Anthropologische und historische Ansichten vorsprachlicher Aisthesis», in «Tasten», S. 206
- 2 Vgl. Kerckhove, Derrick de: «Propriodezeption und Autonomation», in «Tasten», S. 345
- 3, 4 Vgl. Busch, Bernd: «Gedanken beim Umblättern», in : «Tasten», S.30
- 5 Den Ausführungen liegt eine Internet-Recherche, sowie ein Besuch im Darmstädter Institut für grafische Datenverarbeitung (IGD; ein Ableger des Fraunhofer Instituts) zugrunde.
- 6 z.B.: «Design Principles for tactile Interaction»; «Phantom-based interaction with virtual Objects», Publikationen des Touchlab (MIT)
- 7 Jamie Osborne, aus «Logitech gets touchie-feelie with new mouse»
- 8 Vgl. Genter, Don and Nielsen, Jacob: «The Anti-Mac Interface»
- 9 Aus: Bild der Wissenschaft 2/ 2000: «Bitte mit Gefühl»
- 10 Vgl. Katz, David: «der Aufbau der Tastwelt», S. 77
- 11 Vgl. Korte, Barbara: «Berührung durch Text: zur Semiotik der Berührung in der Literatur», in «Tasten», S.126
- 12 Vgl. Katz, David: «der Aufbau der Tastwelt», S.44
- 13 Vgl. Hoffman, David C.: «Visuelle Intelligenz», S.221 - 234
- 14 Vgl. Leu, Claudia: «Digitale Patina»
- 15 <http://www.macromedia.com/software/flash/trial/>
- 16 Vgl. Cakir, Ahmet E.: «Ein Sinn verliert seinen Sinn und findet ihn wieder. Der Tastsinn im Spiegel des Technikwandels», in «Tasten», S. 268

Literatur

1. «Der Aufbau der Tastwelt»: David Katz, Leipzig 1925
2. «Die erfundene Wirklichkeit»: Paul Watzlawick [Hrsg.], München 1981
3. «Die ferne Haut»: Florian Felix Wey, Berlin 1999
4. «Digitale Patina»: Claudia Leu (Diplomarbeit, FH Köln, 199?)
5. «Force and TouchFeedback for Virtual Environments», Grigore C. Burdea
6. «Logos der Materie»: Ernst Bloch, Frankfurt am Main 2000
7. «Philosophie des Menschlichen Bewusstseins»: Daniel C. Dennet, Hamburg, 1994
8. «Visuelle Intelligenz»: Donald D.Hoffman, Stuttgart 2000
9. «Sinn-Salabim»: Ackermann, Urfer, Müller, Zürich 1993
10. «Tangible Bits»: Nicholas Negroponte, in «Wired», May 1997
11. «Tasten»: Uta Brandes [Hrsg.], Göttingen 1996
12. «Touch versus Vision: Ästhetik neuer Technologien»: Derrick de Kerckhove, in:
«Die Aktualität des Ästhetischen», Wolfgang Welsch, München 1993
13. «Wahrnehmungspsychologie»: E. Bruce Goldstein, Heidelberg 1997

Internet-Quellen

1. «Haptic Interactions in the Real and Virtual Worlds»: Mandayam A. Srinivasan (MIT), <http://touchlab.mit.edu/publications/>
2. «Phantom-Based Haptic Interaction with Virtual Objects»: J.Kenneth Salisbury and Mandayam A. Srinivasan, <http://touchlab.mit.edu/publications/>
3. «Bitte mit Gefühl»: Bild der Wissenschaft 2/ 2000, <http://touchlab.mit.ed/news/BDW/BDW.htm>
4. «The Anti-Mac Interface»: Don Genter and Jacob Nielsen, <http://www.acm.org/cacm/AUG96/antimac.htm>
5. «Logitech gets touchie-feelie with new mouse»: Rachel Konrad, http://news.cnet.com/news/0-1006-200-2555759.html?pt.yfin.cat_fin.txt.ne

Internet-Links

Haptic Pages

Institut für Grafische Datenverarbeitung (IGD) Darmstadt
<http://www.igd.fhg.de/igd-a4/index.html>

Haptics Community Web Page
<http://haptic.mech.northwestern.edu/intro/gallery/>

Rudgers Univerity
<http://ur.rutgers.edu/news/science/stimulate.html>

Linkliste zum Thema Tastsinn
<http://www.tastsinn.de>

Tangible Media Group (MIT)
<http://tangible.mit.edu>

Touchlab des MIT
<http://touchlab.mit.edu>

University of North Carolina
<http://www.cs.unc.edu/Research/ProjectIndex/HumanMachine.html>

Homepage von Prof. Rainer Zwisler
<http://www.zwisler.de>

Firmen

Philips Design
<http://design.philips.com>

Immersion Corporation
<http://www.immersion.com>

Logitech
<http://www.logitech.com>

SenseAble Technologies Inc.
<http://www.sensable.com/>

Virtual Technologies Inc.
<http://www.virtex.com>

Flash Foren (Downloads, Tutorials, Experimente)

<http://www.flashforum.de>

<http://www.flashkit.com>

<http://www.were-here.com>