

Martin Grunwald

Der Tastsinn im Griff der Technikwissenschaften? Herausforderungen und Grenzen aktueller Haptikforschung

Haptik – die wissenschaftliche Lehre vom Tastsinn – untersucht sowohl im tierischen als auch im humanen System die biologischen und psychologischen Grundlagen sowie praktische Anwendungsgebiete der Tastwahrnehmung. Dieses grundsätzlich interdisziplinäre Vorhaben begann im deutschsprachigen Raum Anfang des 19. Jahrhunderts mit den systematischen Studien des Physiologen E. H. Weber. Seit jenen Anfängen widmen sich diesem größten und sowohl für Menschen und Tier wichtigsten Sinnessystem verschiedene Wissenschaftsdisziplinen. Arbeitsteilig analysieren Physiologen, Anatomen und Biologen die Elementarstrukturen der dem Tastsinnessystem zu Grunde liegenden rezeptiven Strukturen. In den verzweigten Bereichen der Hirnforschung – wie der Neurophysiologie, Neuroanatomie und Neuropsychologie – werden die Grundlagen der rezeptiven Signalweiterleitung und Signalverarbeitung im zentralen sowie peripheren Nervensystem untersucht. Verschiedene Bereiche der biologisch und experimentell arbeitenden Psychologie sowie der klinischen Psychologie verfolgen in ihren Analysen die Aufklärung perzeptiv-kognitiver und sozialer Prozesse, die im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Tastsinnesreizen stehen. All diesen Bemühungen ist gemeinsam, dass sie dazu beitragen wollen, die überaus komplexe Natur des Tastsinnes und seiner Funktionen zu verstehen und in verschiedenen Kontexten nutzbar zu machen. Im folgenden Beitrag soll auf diesen Aspekt der Nutzbarmachung besonders im Bereich technisch-praktischer Anwendungen eingegangen werden. Es wird auf Entwicklungen und Zielvorstellungen hingewiesen, die sich aus der aktuellen Technikentwicklung ergeben, und es sollen die daraus resultierenden produktiven und kritischen Potentiale diskutiert werden.

Zum besseren Verständnis dieser Darlegungen werden in kurzer Form die biologischen und psychologischen Grundlagen des Tastsinnessystems und der grundlegende Charakter der aus diesem System resultierenden Wahrnehmungsdimensionen erläutert. Im Anschluss daran wird aufgezeigt, welche zum Teil lebensbedrohlichen Folgen die Vernachlässigung der Haptik bei der funktionellen Auslegung technischer Systeme für den Menschen haben kann. Historische und aktuelle Beispiele werden genutzt. Weitgehend etablierte Anwendungsgebiete der Tastsinnesforschung beschrieben – die als Haptik-Design bezeichnet werden – sowie Anwendungen im Bereich der Orientierungshilfen von Blinden und Sehschwachen. Daran anschließend werden die Grundzüge einer neuen technologischen Entwicklung vorgestellt (,virtuelle Haptik') sowie deren geplante bzw. bislang realisierte Anwendungen. Damit inhaltlich eng verbunden sind die nachfolgenden Darlegungen aktueller Entwicklungen im Bereich der Neurorehabilitation und Neurosimulation von Tastsinnesreizen.

Der Beitrag wird den Thesen folgen, dass

- die Integration von Gesetzmäßigkeiten der Tastsinneswahrnehmung in technische Systeme – zum Nutzen des Menschen – notwendig und sinnvoll ist, dass zu dieser Entwicklung aber noch viele Prozess- und Erkenntnisschritte innerhalb der Biologie und der Technikwissenschaften notwendig sind.
- die außerordentliche Komplexität des Tastsinnessystems und unsere methodische Begrenztheit die Systemkenntnis sowie die technischen Integrationsschritte gleichzeitig maßgeblich beeinträchtigen wird, so dass Kompromisslösungen unausweichlich sein werden.
- sich dennoch das Bemühen um eine technisch-praktische Simulation und Integration der sensorischen Prinzipien des Tastsinnes stetig in die Nähe einer relevanten Abbildung biologischer in technische Systeme entwickeln wird. Innerhalb dieser Entwicklung wird sich das Verhältnis zwischen Mensch und Maschine auf grundlegende Weise verändern, da das Prinzip des aktiven und passiven Fühlens nicht mehr ein Privileg biologischer Systeme bleiben wird. Im Kern dieser Entwicklung sind positive aber auch mögliche negative Wirkungen zu prognostizieren, wobei wir bereits heute – ohne materielles Substrat – besonders über die letztgenannten Wirkungen entscheiden sollten, ob wir diesen Effekten nicht aktiv entgegenwirken müssen.

Begriffsklärung

Da im Weiteren eine begriffliche Unterscheidung zwischen *haptischer* und *taktile* Wahrnehmung genutzt wird, soll zunächst auf die wesentlichen Aspekte dieser Begriffe eingegangen werden.

Wenn auch nicht konsequent, setzt sich dennoch in der psychologischen Fachliteratur der letzten Jahre zunehmend eine begriffliche Unterscheidung durch, die auf die Stellung des Subjekts zum Reiz bzw. zum Reizobjekt verweist. Danach werden Wahrnehmungsinhalte, die auf eine Stimulation des Körpers (Haut, Gelenk usw.) folgen als *taktile Reize* bzw. *taktile Wahrnehmungen* bezeichnet. Das wesentliche Kennzeichen ist hierbei, dass das wahrnehmende Subjekt keine aktiven Bewegungen in Relation zum Stimulus ausführt. Das Subjekt ist somit in Relation zur Stimulation ‚passiv‘. Derartige Stimulationsbedingungen sind z.B. dann gegeben, wenn eine klassische Zwei-Punkt-Schwelle (E. H. Weber) mit einem so genannten Tastzirkel ermittelt wird. Der Versuchsleiter setzt dabei entweder zwei abgestumpfte Zirkelspitzen gleichzeitig (simultan) oder nacheinander (sukzessiv) auf die Haut der Versuchsperson auf; diese muß bei geschlossenen Augen aussagen, ob jeweils zwei getrennte Hautpunkte berührt werden. Je geringer der Abstand zwischen beiden Zirkelspitzen wird, umso schwieriger wird es für die Versuchsperson, beide Zirkelspitzen als voneinander getrennt wahrzunehmen. Am kritischen Punkt dieses Versuchsschemas kann die Versuchsperson auf Grund des limitierten räumlichen Auflösungsvermögens der Hautrezeptoren beide Spitzen nur noch als einen einzigen Reizpunkt wahrnehmen. Während der Dauer des Versuchs finden keine aktiven Explorationsvorgänge bzw. explorative Bewegungen durch die Versuchsperson statt.

Im anderen Fall werden der Versuchsperson ebenfalls Zwei-Punkt-Reize präsentiert, jedoch hat die Versuchsperson hierbei die Möglichkeit, die Reizstruktur durch aktive Bewegungen zu erkunden. Hand-, Finger-, Arm-, grundsätzlich alle Körperbewegungen sind möglich; bedingt durch die aktive Stellung des Subjektes zur Reizquelle werden entsprechende Wahrnehmungen als *haptische Wahrnehmungen* und die dazugehörigen Reize – einschließlich der Informationen, die durch die Eigenbewegungen des Körpers generiert werden – als *haptische Reize* bezeichnet. Auf

diese Weise – beispielsweise durch die Fingerkuppen des gesunden Menschen – können in der Umwelt noch Oberflächendifferenzen von 4 µm wahrgenommen werden. Die Schwellenwerte für passiv vermittelte taktile Reize liegen dabei wesentlich höher, d.h. die Präzision der haptischen Wahrnehmung ist weitaus größer als die der taktilen Wahrnehmung.

An beiden Beispielen wird deutlich, dass eine begriffliche Unterscheidung nicht nur aus erkenntnistheoretischen Erwägungen sinnvoll ist, sondern auch aus phänomenologischer Sicht. Zudem kann deutlich werden, dass das Tastsinnessystem als dominantes Sinnessystem des Menschen über diese Eigenschaftsdimension – aktiv vs. passiv – verfügt. Damit ergibt sich auch aus methodischer Sicht eine zentrale Frage, welchem Aspekt der Tastsinneswahrnehmung man sich zuwendet. Retrospektiv lässt sich bis zum Beginn des Zweiten Weltkrieges ein ausgewogenes Verhältnis der Forschungsaktivitäten zwischen taktiler und haptischer Wahrnehmung feststellen. Die eher physiologisch, einzelreizorientierten Forschungen von Max von Frey (1896, 1912, 1929) stehen beispielhaft den komplexen haptischen Reizstrukturen gegenüber, die von David Katz (1925) oder Emil von Skramlik (1937) verwendet wurden.

Seit längerer Zeit hat sich jedoch dieses Verhältnis zu Ungunsten der haptischen Wahrnehmung verschoben. Den derzeit größten Anteil der Tastsinnesforschung nehmen Untersuchungen ein, die sich der Analyse von einfachen taktilen Einzelreizen zuwenden. Die quantitative Dominanz dieser Forschungsaktivitäten kann aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich menschliches Handeln schließlich immer in *aktiven* Momenten äußert und die Realität einer taktilen Reizstruktur praktisch nur im Labor konstruiert wird. So wertvoll die Resultate der Tastsinnesforschung zur taktilen Reizverarbeitung auch im Einzelfall sind, so dezidiert muß darauf hingewiesen werden, dass im Sinne einer verbesserten ökologischen Validität der Untersuchungsbedingungen, die Analyse von haptischen Wahrnehmungsprozessen angestrebt werden müssen. Und sofern es hilfreich ist, müssen hierzu natürlich auch Basisdaten der taktilen Reizverarbeitung generiert und rezipiert werden. Das diskursive Argument der Notwendigkeit von Elementaranalysen im Bereich der taktilen Wahrnehmung darf nicht dazu führen, dass das Tastsinnessystem auf die Verarbeitung taktiler, passiver Reizstrukturen reduziert wird. Wenn auch die Psychologie hoffentlich von solchen Schlußfolgerungen weit entfernt ist, muß doch für einige Vertreter der Psychologie und Physiologie beklagt werden, dass sich eine verzerrte und reduzierte Perspektive auf die Dimensionen des Tastsinnes entwickelt hat – wonach der Tastsinn im wesentlichen nur Berührungs- und Temperatureize verarbeitet und die aktiven Momente ein Teilgebiet der Motorik darstellen. Diese eher lehrbuchgeprägte Trennung zwischen Motorik und Sensorik scheint zumindest einigen Kollegen bei der Betrachtung des menschlichen Tastsinnes leider besonders attraktiv nutzbar zu sein. Der Autor dieses Beitrages spricht sich dagegen für eine integrative Analyse der Tastwahrnehmungsprozesse aus, die einschließt, dass die an der Tastwahrnehmung beteiligten sensorischen und motorischen Prozesse *zwei einander direkt abhängige Prozesse* darstellen, die sinnvoller Weise – sofern man haptische Wahrnehmungsprozesse untersuchen will – nicht getrennt werden können.

Phylogenetische und ontogenetische Stellung des Tastsinnessystems im System der Sinne

Das Interesse E. H. Webers an der Erforschung des menschlichen Tastsinns war nicht nur durch die gute methodische Zugänglichkeit motiviert. Vielmehr sah er darin eine Möglichkeit, Erkenntnisse abzuleiten, die „sich nachher auf den Gesichtssinn und auf andere Sinne“ anwenden lassen (E. H. Weber 1851, S. 3). Praktische Erwägungen und die Hoffnung auf die Entdeckung grundlegender Wahrnehmungsprinzipien standen somit im Vordergrund der experimentellen Studien von

Weber. Anscheinend völlig frei von den philosophischen Grundsatzdiskussionen der Renaissance und der Aufklärung über die vermeintlich höhere oder niedere Stellung des Tastsinns beispielsweise gegenüber der des Sehsinns, steht für Weber der Tastsinn gleichsam als Modell für unser gesamtes Wahrnehmungssystem. Dieser grundsätzliche Gedanke ist in der Folgezeit durch die psychologische Forschung nicht weiter entwickelt und ausgebaut worden. Die explizit gegenüberstellenden Untersuchungen durch Wilhelm Wundt und dessen Nachfolger, die auch einem ‚Leistungsvergleich‘ zwischen visus und tactus dienten, sind möglicherweise dafür verantwortlich, dass der von E. H. Weber postulierte Modellcharakter des Tastsinnessystems in der psychologischen Forschung nicht weiter verfolgt wurde.

Dabei kann dem Weberschen Ansatz gerade auch vor dem Hintergrund heutiger Erkenntnisse eine nachvollziehbare Logik entnommen werden. Denn sowohl aus ontogenetischer als auch aus phylogenetischer Perspektive stellt das Tastsinnessystem – von den einfachsten Formen bis hin zu den komplexesten – innerhalb der verschiedenen Wahrnehmungssysteme eine Besonderheit dar. So ist es eine in der Biologie vielfach beschriebene und bestaunte Tatsache, dass einzellige Organismen chemische und haptische Reize für die Bewältigung ihrer Anpassungsleistungen adäquat verarbeiten können. Bereits Ernst Haeckel und seine Zeitgenossen (z.B. Max Verworn 1889, 1892) beschreiben elementare Lernleistungen von einzelligen Organismen, die über keine einzige Nervenzelle verfügen. Diese großartigen Elementarleistungen der einzelligen Organismen haben Ernst Haeckel zu Recht ermuntert, auf einer Tagung vom 22. März 1878 die Forderung an die Psychologie zu stellen, das ‚Seelenleben‘ dieser einfachsten Organismenformen zu erkunden (Haeckel 1909). Und in der gleichen Abhandlung hebt Haeckel das Gesetz vom „Ursprung aller Sinne aus der Haut“ (Haeckel 1909, S. 13) hervor.

Mehr als hundert Jahre nach dieser Tagung ist die Forderung von Haeckel auf Seiten der Psychologie noch immer nicht eingelöst – auch wenn sich derzeit namhafte Physiker wie R. Penrose mit dem Problem der Informationsverarbeitung bei einzelligen Organismen beschäftigen (Penrose 2002) und Nakagaki (2000), Tero (2008) in eindrucksvollen Experimenten bestätigen konnten, dass selbst Amöben in einem Nahrungslabyrinth nach mehreren Durchläufen den kürzeren Weg zur Nahrungsquelle wählen.

Doch nicht nur den Elementarprinzipien der Reizverarbeitung einzelliger Lebewesen wird innerhalb der Psychologie wenig bis gar keine Aufmerksamkeit geschenkt, sondern auch die phylogenetische und ontogenetische Sonderstellung der Haut bei der Entwicklung der verschiedenen Sinnessysteme hat in aktuelle psychologische Perspektiven kaum oder gar nicht Einzug gehalten. Dabei ist allen einzelligen Lebewesen gemeinsam, dass sie sich auf der Basis verschiedener Fibrillentypen in den ihnen gemäßen wässrigen Umgebungsbedingungen bewegen können. Solche Bewegungen dienen der Nahrungssuche und auch der Umsetzung von Fluchtreaktionen (!). Dieses Verhalten setzt nicht nur ein internes Abbild zur Erhaltung der eigenen Organismusstruktur voraus, sondern es müssen auch Bewegungs- und Berührungsreize des eigenen Organismus relevant verarbeitet werden. Diese Verarbeitungsmechanismen müssen als elementare Basis den wesentlichen Unterschied zwischen *eigener Struktur und äußerer Umgebung* erfassen. Im anderen Fall könnten die Organismen nicht unterscheiden, was zu ihrer eigenen Organismusstruktur gehört und würden sich gegebenenfalls selbst als Nahrungsquelle bestimmen. Dass dies nicht der Fall ist, sollte uns zeigen, dass körperbezogene haptische Reize, die infolge von aktiven Bewegungen im Raum erfolgen, nicht erst bei höheren Organismen verarbeitet werden, sondern bereits in einzelligen Systemen. Weiterhin belegen diese Beobachtungen, dass einzellige Organismen etwas Ähnliches generieren, das wir beim Menschen als ‚Körperschema‘ bezeichnen: ein internes, neuronales Abbild der eigenen Körpergrenzen – der räumlichen Ausdehnung des eigenen Organismus.

Der Autor sieht in diesen Leistungen ein evolutionäres, auf phylogenetischer Ebene verwirklichtes Grundprinzip der Biologie, das jeder sich selbst bewegende Organismus auf elementarer Stufe Körper- und Bewegungsreize verarbeiten kann. Diese Form der Tastsinnesreizverarbeitung, wie bei Einzellern zu beobachten, ermöglicht die Analyse von physischen Reizen, welche direkt auf den Körper einwirken (taktile Reize) sowie in Kombination mit dem eigenen Bewegungsapparat (haptische Reize) die zielgerichtete Fortbewegung im Raum. Damit sind alle für einen bewegungsfähigen einzelligen Organismus nötigen Voraussetzungen geschaffen, die Relation zwischen Innen (Organismus) und Außen (physikalische Außenwelt) auf eine bis heute nicht bekannte Weise zu kodieren. Die Fähigkeit, körpereigene und Tastsinnesreize zu verarbeiten, findet sich im gesamten Tierreich, wobei sich eine Vielzahl spezialisierter Höchstleistungen aufführen ließe. Diese übertreffen in der Regel bei Weitem die Tastsinnesleistungen des Menschen und belegen, dass sich über die Phylogenese der Organismen die Tastsinnesfähigkeit als Basisleistung erhalten und jeweils artspezifisch entwickelt hat (Smith 2000). Zudem stellen die Druck- und Mechanorezeptoren das sensorische Grundgerüst für die Entwicklung des auditiven und vestibulären Systems dar.

Wie in der Phylogenese spielt auch in der Ontogenese des Menschen der Tastsinn, die Fähigkeit zur aktiven und passiven Rezeption von Tast- und Berührungsreizen in Relation zu den körpereigenen Bewegungen, eine entscheidende Rolle. Nach dem bisher Dargestellten muß es nicht verwundern, dass die erste Sensitivitätsreaktion eines Fötus auf externe Reize für Druckreize beobachtet wurde. Druckreize, die pränatal im Lippenbereich des Fötus appliziert wurden, führten bereits in der 8. Schwangerschaftswoche, bei einer Körpergröße von ca. 2,5 cm, zu heftigen Ganzkörperbewegungen des Ungeborenen. Die Sensitivität auf externe Druckreize verändert sich in den folgenden Entwicklungswochen und breitet sich über den gesamten Körper des Fötus aus. Im gleichen Maße entwickelt sich die Fähigkeit zur koordinierten Bewegung des gesamten Körpers. Die Reifungsentwicklung des Fötus innerhalb des Mutterleibes erreicht in der 12.-13. Schwangerschaftswoche einen derartig hohen Stand, dass man zielgerichtete Greifbewegungen der Hände um die Nabelschnur und schließlich die Nuckelbewegungen am eigenen Daumen mittels Ultraschalluntersuchungen beobachten kann (Krens & Krens 2006, Hepper 2008). Hierbei muß beachtet werden, dass all diese Aktivitäten unter völligem Ausschluß visueller Informationen stattfinden. Das Ungeborene entwickelt demnach lange bevor die Reifung im Mutterleib durch die Geburt beendet wird ein reichhaltiges und sehr komplexes Bewegungsrepertoire, das ihm ermöglicht, explorativ haptische Informationen – auch über den eigenen Körper – zu verarbeiten. Neben den akustischen und olfaktorischen Informationen, die nachweislich auch nachgeburtlich dem Neugeborenen zur Verhaltensregulation zur Verfügung stehen, ist davon auszugehen, dass die Tast-Körpererfahrungen eine basale neuronale Matrix im Gehirn des Neugeborenen hinterläßt, die ein zentraler Bezugspunkt für alle anderen, später ausreifenden sensorischen Systeme sein muß. Wie beim Einzeller sollte auch hier gelten, dass die innerorganismische Kodierung der körpereigenen Grenzen und der physikalischen Außenwelt über die basalen Funktionen des Tastsinnessystems generiert werden. Mit dieser grundsätzlichen Verortung des Organismus im Raum wird nicht nur seine eigene Position in der physikalischen Welt definiert, sondern es wird überdies ein sensorisch-kognitiver Bezugspunkt bereitgestellt, auf den sich alle nachfolgend entwickelten Sinnessysteme beziehen können und müssen. Denn kein akustischer oder olfaktorischer Reiz würde ‚an sich‘ für den Organismus von Bedeutung sein, solange dieser nicht eine Relation zu sich selbst und der physikalischen Außenwelt erarbeitet hat. Erst mit diesem Schritt wird die nachfolgende sensorische Zergliederung externer Reize durch die Ausbildung verschiedener Sensorsysteme für den Organismus sinnvoll. Nach dieser Annahme ist die zeitversetzte Entwicklung der Sinnessysteme innerhalb der menschlichen Ontogenese ein notwendiger Schritt und die Sonderstellung des Tastsinnessystems eine im wahren Sinne des Wortes natürliche Notwendigkeit.

Auch vor diesem Hintergrund wird verständlich, weshalb in der nachgeburtlichen Entwicklung der Tastsinn und die aktive Exploration der Umwelt eine hochdominante Form des Umwelterkennens beim Neugeborenen darstellt. Entwicklungspsychologen haben diesen Umstand schon lange und ausführlich dokumentiert. Der eigene Körper sowie alle physikalischen Gegebenheiten der äußeren Welt, einschließlich die Körper der sozialen Bezugspersonen, sind intensiver Gegenstand des haptischen Erkundungsverhaltens von Kleinkindern (Damon 2006, Kiese-Himmel 2008).

Doch nicht nur die Bindung des Umwelterkennens ist elementar mit der explorativen Natur des Tastsinnes verbunden, sondern die Fähigkeit zur Verarbeitung taktiler, passiver Berührungsreize stellt für den Neugeborenen gleichsam ein ‚Lebensmittel der besonderen Art‘ dar. Wie aus zahlreichen Human- und Tierstudien bekannt ist, folgen Reifungsprozesse des Gehirns nur, wenn der jeweilige Organismus eine hinreichende, adäquate taktile und sozialvermittelte Stimulation seines Körpers erfährt. Fehlt dieser Stimulus oder ist er inadäquat im Sinne von Gewalterfahrungen, dann folgt mit naturgesetzlicher Sicherheit eine fehlerhafte Hirnreifung mit pathologischen Folgen für das soziale Verhalten und höhere kognitive Prozesse, oder – im extremen Fall – kann jene Mangelstimulation zum Tod des Organismus führen (Essman 1971, Prescott 1971, Zubek 1979, Bryan & Riesen 1989, Blum 2002).

Auch wenn diese Zusammenhänge relativ lange auf ihre gesellschaftliche und fachliche Akzeptanz warten mußten, steht heute außer Zweifel, dass eine gesunde psychische Entwicklung und eine angemessene Reifung des neuronalen Systems direkt mit der sozial vermittelten körperlichen Interaktion und der daraus resultierenden haptischen und taktilen Stimulation verbunden ist (Damon 2006). Die besondere Stellung dieser Stimulationsform gegenüber allen anderen Sinnessystemen wird insbesondere in jenen Fällen deutlich, wo die Betroffenen nachgeburtlich aufgrund angeborener Blindheit keine visuellen Reize verarbeiten können. Wenn auch die Erarbeitung der physikalischen Eigenschaften der äußeren Welt für geburtsblinde Menschen gewisse Probleme und zeitliche Verzögerungen mit sich bringen, kann bei ausreichender sozialer Einbindung und Stimulation ein adäquates Abbild der physikalischen Außenwelt – mit entsprechenden Einschränkungen – durch die Betroffenen erarbeitet werden. Diese vielen und ausführlich beschriebenen Leistungen der Geburtsblinden, sind dabei nicht nur ein Hinweis auf die enormen Leistungsbereiche des Tastsinnes, sondern sie verweisen auf einen noch viel bedeutenderen Aspekt: auf die direkte Beteiligung des Tastsinnessystems bei der Entwicklung von Bewußtseinsprozessen. Die vielfach beschriebenen Beispiele von Blinden und taubblinden Menschen belegen eindrucksvoll, dass visuelle und akustische Informationsverarbeitung nicht notwendige Bedingungen für die Ausbildung menschlichen (Selbst-)Bewußtseins darstellen. Die Verortung des eigenen Körpers und der eigenen Person im physikalischen und im ‚sozialen Raum‘ ist nicht von der Bereitstellung visueller Informationen abhängig. Die als höchste Form bezeichnete Leistung des menschlichen Gehirns – Bewußtsein zu generieren – ist, folgt man diesen Beispielen, nicht an die Ausbildung des visuellen oder auditorischen Systems gebunden. Sowenig wie sich menschliches Bewußtsein ohne das Tastsinnesystem entwickeln kann, so ist bislang auch kein Mensch lebendig geboren worden, der nicht über ein funktionierendes Tastsinnessystem verfügen würde. Und ebenso unmöglich ist – ohne zu sterben – alle Funktionsbereiche des Tastsinnes durch Verletzung oder Erkrankung einzubüßen. Jedes andere Sinnessystem kann bei Geburt vollständig fehlen oder im Verlauf des Lebens durch verschiedene Umstände nicht mehr zur Verfügung stehen. Für das Tastsinnessystem des Menschen, mit seinen vielfältigen Subdimensionen, gibt es kein adäquates Parallelsystem, so dass eine Nichtausbildung oder der vollständige Verlust des gesamten Systems mit den biologischen Grundprinzipien des Lebens nicht zu vereinbaren ist.

Anatomische und neurophysiologische Basisparameter

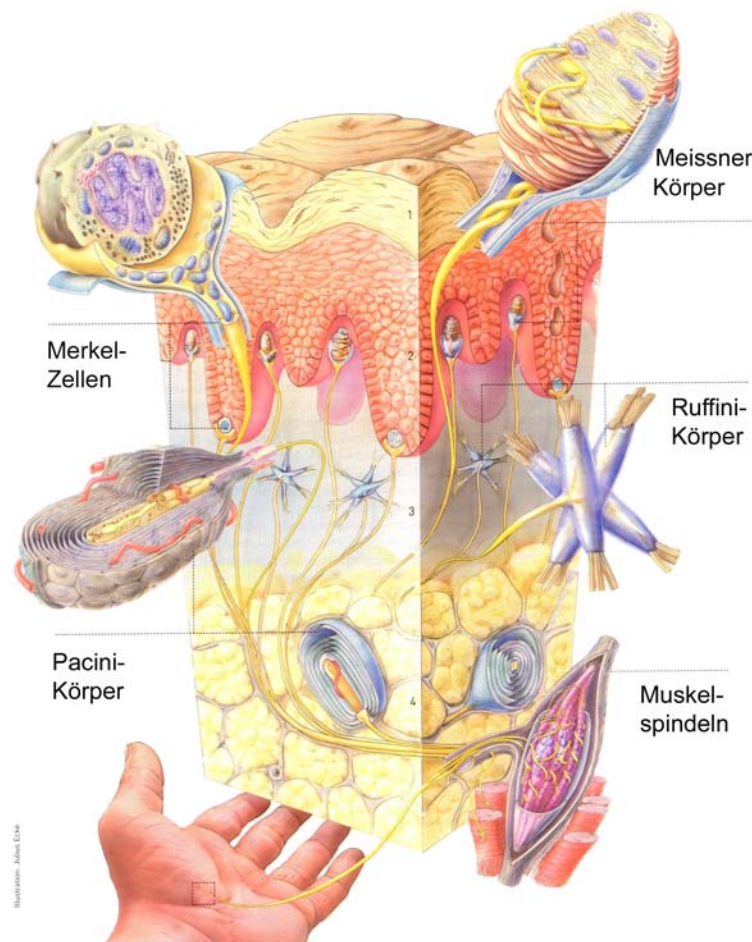


Abb. 1: Schematische Darstellung wichtiger Rezeptoren der Haut, der Muskeln und Sehnen (aus: Halata & Baumann: Anatomy of receptors. In: Grunwald, M. (Ed.) 2008, mit freundlicher Genehmigung des Birkhäuser Verlages)

Soweit heute bekannt, ist eine zentrale biologische Grundlage des Tastsinnessystems des Menschen das Vorhandensein unterschiedlicher Typen von Sensoreinheiten, die sich mit unterschiedlicher Verteilungsdichte innerhalb des Körpers befinden. Dieses Rezeptorengeflecht befindet sich in mehreren Schichten und Ebenen in unserem Körper; die Anzahl aller Tastsinnesrezeptoren wird auf 6-10 Millionen geschätzt.¹ Zum Vergleich: Die Anzahl der Rezeptoren auf der Retina des menschlichen Auges beträgt ca. 5 Millionen. Obwohl die Forschung auf diesem Gebiet bei weitem noch nicht vollständige Klarheit erarbeitet hat, ist derzeit davon auszugehen, dass sich Tastsinnesrezeptoren in der menschlichen Haut, in den Gelenken, den Muskeln und den Sehnen befinden. Dabei ist die mikroskopische Struktur der Rezeptoren ausgesprochen vielfältig und differenziert. Sie reicht von freien Nervenendigungen bis hin zu kompliziert gebauten Sensorkörperchen (siehe Abbildung 1). Ebenso differenziert sind deren Funktionen. So reagieren einige Rezeptoren nur auf kurzzeitige Druckreize, andere nur auf lang andauernde. Schnell wechselnde Reize, wie sie bei Vi-

1 Da bisher nur Untersuchungen zur Anzahl der Tastsinnesrezeptoren in einzelnen Körperteilen vorliegen, kann eine exakte Angabe über die im menschlichen Körper insgesamt vorhandenen Tastsinnrezeptoren noch nicht erfolgen.

brationen auftreten, werden ebenso nur von darauf spezialisierten Rezeptoren registriert. Dehnungsrezeptoren, die sich in jedem Haarschaft befinden sowie in Sehnen und Muskeln registrieren feinste Spannungsänderungen der jeweils zugehörigen Einheit. Die hohe Sensibilität dieser Rezeptoren macht so selbst kleinste Krümmungen eines einzelnen Haares für uns spürbar. Die verschiedenen Rezeptoren unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Struktur und Funktion, sondern auch ihrer Dimension. Die Größten werden als *Vater-Pacini-Körperchen* bezeichnet und können bis zu 4 mm lang sein. Sie sind in den unteren Schichten der Haut, an Muskeln und Sehnen und an den verschiedensten Stellen des Körpers in unterschiedlicher Anzahl zu finden (siehe Abbildung 1).

Diese Rezeptoren sind auf die Aufnahme schnell wechselnder Reizen spezialisiert und werden daher auch als Vibrationsrezeptoren bezeichnet. Sie sind in der Lage, Reize zwischen 40 Hz und 1000 Hz aufnehmen. Ohne sie wären wir nicht in der Lage, Vibrationsinformationen unserer Umgebung, die durchaus sicherheitsrelevant sein können, wahrzunehmen. Denn, dass manchmal Gefahrensituationen weder visuell noch akustisch erfassbar sind, zeigen verschiedene Situationen z.B. im Autoverkehr. So führt ein ‚platter‘ Reifen u.a. zu charakteristischen Vibrationen, die sich über die gesamte Karosserie ausbreiten und auch am Lenkrad haptisch wahrnehmbar werden. Die in solchen Fällen vertraute Grundvibration des Fahrzeuges wird verändert und kann als Warnsignal interpretiert werden. Die praktisch-stille Zuverlässigkeit der Vibrationsrezeptoren zeigt auch ihre kommerzielle Nutzung im Bereich der Handy-Manie. Mitfühlende Zeitgenossen verzichten auf lärmenden Glockenschlag ihres Mobiltelefons und nutzen stattdessen die ‚Vibratorfunktion‘. Denn sofern das Gerät die Hautoberfläche berührt, genügen kleinste Reizamplituden, um die Aufmerksamkeit auf einen ankommenden Telefonruf zu lenken.

Wesentlich kleiner als die genannten Vibrationsrezeptoren, aber darum nicht weniger wichtig, sind die so genannten *Meissnerschen Körperchen*. Diese sind nur ca. 40 µm breit und ca. 100 µm lang und liegen dicht unterhalb der Haut. Kein anderer bekannter Typ von Tastsinnesrezeptoren liegt näher an der Körperoberfläche. Auch der Bau dieses Rezeptors ist ein kleines Wunderwerk (siehe Abbildung 1). Eingewebt, wie die Knoten in einem Fischernetz, spannen diese Rezeptoren ein sehr dichtes Empfängernetz, das auf mechanischen Hautdruck spezialisiert ist. Feinste Berührungen der Haut, die mit dem Auge nicht mehr wahrnehmbar sind, werden durch diese Rezeptoren registriert. Wie auch bei anderen Rezeptoren, ist deren Verteilungsdichte von der jeweiligen Körperregion abhängig. So erstaunt nicht, dass auf einen Quadratmillimeter (!) der Fingerhaut eines erwachsenen Menschen bis zu 24 Meissnersche Körperchen gezählt wurden. Die Finger und Hände – in älteren Arbeiten auch als die ‚Organe des Tastsinnes‘ bezeichnet, haben bei der Verarbeitung haptischer Reize eine prominente Funktion. Die hohen Freiheitsgrade der gesamten Hand, die durch die Fingergelenke und das Handgelenk in Kombination mit Ellenbogen- und Schultergelenk erreicht werden, sind hierfür nur ein Grund. Die manipulative Kompetenz der menschlichen Hand basiert somit auch auf einer sehr hohen räumlichen Auflösung von Druckreizen, die u.a. zur sicheren Erkundung von Oberflächeneigenschaften unerlässlich ist. Spätestens dann, wenn wir den Anfang eines Klebebandes auf einer dieser ‚praktischen‘ Rollen suchen, wird diese Aussage verständlich.

Ein weiterer und zentraler Rezeptortyp des Tastsinnessystems wird als *Ruffinische Körperchen* bezeichnet und ist vorwiegend im Bindegewebe der Gelenkkapseln lokalisiert. Der Aufbau dieser Rezeptoren ist überaus kompliziert. Er besteht aus drei Zylindern, die in der Mitte eine Art Knoten bilden. Durch diese Zylinder verlaufen Faserbündel welche am Bindegewebe des Gelenks aber auch an den Gelenksehnen oder Muskeln anhaften. Wird nun das Gelenk bewegt, werden die Fasern der Zylinder gestreckt oder gestaucht und das Gehirn erhält Signale, dass sich die Gelenkstel-

lung verändert hat. Mit einiger Konzentration ist es deshalb auch möglich, mit dicken Schuhsohlen das Gaspedal adäquat zu bedienen, denn die Winkelstellung des Fußes kann durch die Ruffinischen Körperchen sehr genau wahrgenommen werden.

Wir können uns auf das unbemerkte Wirken des Tastsinnes und seiner integrierten Rezeptoren sicher verlassen, so dass nicht nur die äußere Welt erkundbar wird sondern auch unser eigener Körper in seiner dreidimensionalen Perspektive bei allen Handlungen ‚mitgerechnet‘ wird. Dieses ‚Mitrechnen‘ des Tastsinnes, wo und auf welche Weise sich unser Körper im Raum befindet, ist u.a. die Voraussetzung dafür, dass wir ohne visuellen Eindruck eine Treppe nach oben oder unten steigen können. Im Sekundenbruchteil erfasst der Tastsinn die reale Höhe der ersten Treppenstufen, sowie deren Tiefe. Dabei werden parallel sowohl die Informationen der Haut-, Sehnen- und Gelenkrezeptoren verarbeitet. Ebenso reagieren hochsensible Dehnungsrezeptoren in den Muskeln auf die Spannungsänderungen während der Tastbewegungen mit dem Fuß. Diese Rezeptoren werden als Muskelspindeln bezeichnet und stellen ein feines Geflecht aus sensiblen Fasern dar, das die Muskulatur durchzieht. Verändert sich die Spannung des Muskels, z.B. bei größerer Kraftanstrengung, so senden die beteiligten Muskelspindeln Signale an das Gehirn. Aber auch im umgekehrten Fall sind die Muskelspindeln von Bedeutung. Dann nämlich, wenn der Muskel eine bestimmte Spannung erreichen soll, liefern diese Rezeptoren die nötigen Informationen über den erreichten Spannungszustand. Nur so ist es möglich, die Muskelspannung je nach Anforderung richtig zu dosieren und das ist auch beim Treppensteigen von Bedeutung. Denn so schnell wie die haptischen Erfahrungen der ersten Treppenstufe verarbeitet werden, so schnell wird der ganze Körper und der notwendige Bewegungsablauf für das Treppensteigen auf die Startparameter eingestellt. Die nachfolgenden Bewegungen des Treppensteigens verlaufen daher in der Regel fehlerlos und ohne bewusste Aufmerksamkeitszuwendung. Fuß, Knie und nachfolgende Körperbereiche werden auf die notwendigen Sollwerte der erwarteten Treppenstufen justiert, so dass das Bein nicht zu hoch und auch nicht zu tief angehoben wird. Lediglich dann, wenn nur eine einzige Stufe um wenige Millimeter in ihrer Höhe oder Tiefe von allen anderen abweicht ist das Stolpern vorprogrammiert. Dann nämlich stimmen die Sollwerte des Tastsinnes nicht mehr mit der Realität überein und die Umwelt muss neu, in diesem Fall mit den Füßen, erkundet werden. Dieses ‚Treppen-Beispiel‘ soll verdeutlichen, dass bei haptischer Wahrnehmung ein abhängiges und hochkomplexes Zusammenspiel aus sensorischen und motorischen Informationen stattfindet. Wie und auf welche Weise diese großen Informationsmengen letztlich im Gehirn zu einer bewussten oder nicht bewussten haptischen Wahrnehmung verarbeitet werden, ist eine wichtige Fragestellung, die lange noch nicht gelöst wurde.

Einigkeit scheint darüber zu bestehen, dass die während eines Tastvorganges – taktil oder haptisch – in den Rezeptoren generierten elektrischen Potentiale über verschiedene Schaltstellen im Rückenmark tiefere und höhere Regionen des zentralen Nervensystems erreichen. Dort erfahren die Signale Bewertungen und die konkrete Wahrnehmungsstruktur wird ausgebildet. Grundsätzlich ist dieser Wahrnehmungsprozess als ein aktives Geschehen zu verstehen, das von vielfältigen individuellen Bedingungen abhängig ist. Davon nicht unabhängig deuten eine Vielzahl von neurophysiologischen Befunden darauf hin, dass der parietale Kortex eine entscheidende integrative Funktion bei der Verarbeitung von Tastsinnesreizen ausübt. Diese Hirnregion fasst offenbar die Millionen Einzelinformationen der Tastsinnesrezeptoren im Bruchteil einer Sekunde zu einem inneren Abbild zusammen. Wird dieser Kortexbereich durch eine Verletzung geschädigt, sind die betroffenen Menschen nicht mehr in der Lage, Alltagsgegenstände bei geschlossenen Augen, nur durch Tastwahrnehmung, zu erkennen. Diese Beeinträchtigung im Bereich der haptischen Wahrnehmung wird als Astereognosie (Kolb 1993) bezeichnet. Andere Störungen der haptischen

Wahrnehmung treten auch bei einer Reihe von Entwicklungsstörungen in der Kindheit auf oder sind z.B. bei Patienten mit Magersucht zu beobachten (Grunwald et al. 1999b, 2001b, 2001d, 2001e, 2004).

Doch damit haptische oder taktile Wahrnehmungen entstehen können, sind nicht nur die integrativen Funktionen des parietalen Kortex erforderlich, sondern auch andere wichtige Funktionsbereiche unserer psychischen Aktivität. So beeinflussen Gedächtnis-, Lern-, Aufmerksamkeits- und Motivationsprozesse die Qualität und den Umfang des Wahrnehmungsgeschehens in erheblichem Maße. Die Analyse der hirnelektrischen Aktivität während einfacher Wahrnehmungsaufgaben ist eine Möglichkeit, die Prozesse der Tastwahrnehmung zu untersuchen. Doch ein Blick auf die Hirnaktivität eines Menschen – während er bei geschlossenen Augen einen Alltagsgegenstand erkennen soll – zeigt, dass nicht eine einzelne Hirnregion, sondern das gesamte Gehirn aktiviert ist (Grunwald et al. 1999a, 2001a, 2001f). Insofern ist es ausgesprochen schwierig, anhand bildgebender funktioneller Parameter der Hirnaktivität auf die der haptischen Wahrnehmung zu Grunde liegenden neurophysiologischen Prozesse zu schließen. Dennoch helfen diese bescheidenen Einblicke, eine ungefähre Vorstellung von den komplexen Aktivierungsdimensionen des gesamten Gehirns während der Tastwahrnehmung zu vermitteln. Noch befinden sich diese Untersuchungen in den Anfängen.

Unterschätzte Haptik in technisch-praktischen Systemen

Die Beachtung haptischer Wahrnehmungsprinzipien bei der Gestaltung technischer Systeme ist ein Erfordernis, daß sich auch aus den zum Teil bitteren Lehren der Vergangenheit ableitet. An wenigen Beispielen soll illustriert werden, welche Handhabungs- und Benutzungsfehler durch fehlerhafte Konstruktionen provoziert werden können.

So bekamen US-amerikanische Piloten Anfang der 40er Jahre verheerende Auswirkungen der Ignoranz gegenüber dem Tastsinn zu spüren: Weil in einigen Flugzeugtypen die Steuerhebel für das Fahrwerk und die Landeklappen nicht nur zu dicht benachbart angeordnet, sondern zugleich weder visuell noch mittels des Tastsinnes zu unterscheiden waren, traten häufig Fehlhandlungen in der Lande- oder Startphase auf; die Piloten verwechselten die Funktionszuordnung der beiden Hebel – oft mit tödlichen Folgen. Nachdem diese Konstruktionsfehler erkannt wurden, erhielten die Hebel unterschiedlich gestaltete Handknäufe. Das zuvor anscheinend nebensächliche Detail – zentrale Steuereinheiten in hohem Maße haptisch voneinander zu unterscheiden – ist späterhin und heute als ‚shape coding‘ weitestgehend zum industriellen Standard geworden. Doch bis dahin war – und ist bisweilen noch immer – ein weiter Weg.

Das belegen Beispiele ‚moderner‘ Cockpitkonstruktionen, bei der auf das konventionelle Steuerhorn in der Mittelachse des Piloten zugunsten eines seitlich zur Mittelachse angebrachten so genannten Sidesticks verzichtet wurde. Kann das klassische Steuerhorn in kritischen Flugsituationen mit beiden Händen gefasst und bedient werden (siehe Abbildung 2a), so ist der Gebrauch des Sidesticks – insbesondere für dominante Rechtshänder, wenn sie auf der linken Kapitänsseite sitzen – nicht unproblematisch (siehe Abbildung 2b). Denn auch für den Fall, das vom Flugkapitän eine längere Trainingsphase zur linkshändigen Sidesticksteuerung absolviert wurde, müssen bei einem Rechtshänder für die motorischen Steuerbefehle mehr neuronale Ressourcen organisiert und verbraucht werden, als bei einem dominanten Linkshänder. In problemlosen Flugsituationen – mithin bei mäßigem Einstrom externer Informationen – genügt die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Gehirns, um einem dominant rechtshändigen Flugkapitän durch die linkshändige Sidesticksteue-

rung keine Probleme zu bereiten. In einer kritischen Flugsituation jedoch, bei der innerhalb kürzester Zeit lebenswichtige sowie extrem hohe Informationsraten das visuelle und auditive System erreichen, muß ein rechtshändiger Kapitän zusätzlich neuronale Ressourcen für die linkshändige Steuerung mobilisieren. Den motorischen Handlungen am Sidestick müssen also Aufmerksamkeitsressourcen zur Verfügung gestellt werden – zu Lasten anderer perzeptiv-kognitiver Prozesse. Da aber nur 5 % der Menschen dominante Linkshänder sind, erhebt sich die Frage, wie man zu einer solchen Anordnung der Sidesticks kommen konnte! Zumal hinreichend bekannt ist, dass Händigkeit ein grundlegendes biologisches Phänomen ist, dass auch durch übermäßiges Trainieren nicht ‚umgepolt‘ werden kann. Insofern enthält die hier beschriebene Konstruktion der Flugzeugsteuerung, die auch bei Passagierflugzeugen Anwendung gefunden hat, ein kaum zu rechtfertigendes Gefahrenpotential.



Abb. 2a: Cockpit mit Steuerhornanordnung



Abb. 2b: Cockpit mit Sidestickanordnung



Abb. 3: Photolampen mit vergleichbaren technischen Eigenschaften, jedoch unterschiedlichem Haptik-Design und daher unterschiedlichem Verkaufserfolg

Ein anderes, zunächst trivial erscheinendes Beispiel neueren Datums zeugt gleichfalls von der Ignoranz gegenüber haptischen Produkteigenschaften. So mußte ein Hersteller von Photolampen (siehe Abbildung 3, links) erkennen, dass seine Produkte gegenüber denen eines anderen Herstellers (siehe Abbildung 3, rechts) erhebliche Verkaufsdefizite aufwiesen, obwohl in beiden Fällen vergleichbar stabile Materialien u.a. für die Halterungselemente verarbeitet wurden. Letztlich erwies sich ein Ausrichten des Endprodukts allein auf technische Merkmale unter Vernachlässigung

einer adäquaten ‚Handhabung‘ gegenüber dem Endprodukt als wesentlicher Mangel. – Offensichtlich werden auf rein technischer Ebene im Allgemeinen keine Kaufentscheidungen getroffen, ein auch und insbesondere PKW-Produzenten und -Händlern bekannter Sachverhalt.

Standard Anwendung – Haptik-Design und Orientierungshilfen

Die Anwender und nutzerorientierte Gestaltung von Industrieprodukten hat sich bis in die achtziger Jahre des 20. Jahrhunderts fast ausschließlich an visuellen Effekten orientiert. Aspekte der Handhabung, der Ergonomie spielten eher eine untergeordnete Rolle. Nach den Erfahrungen des Autors zweifelten anscheinend die Automobilbauer als erste große Industriegruppe an der weltweit praktizierten platonischen Dominanz des visuellen Eindrucks. Eher intuitiv und nicht wissenschaftlich fundiert erkannte man, dass sich Kaufentscheidungen neben vielen anderen Einflüssen vor allem auch durch die haptischen Eigenschaften der Produkte positiv oder negativ beeinflussen lassen. Zudem verstand man die ‚haptische Differenz‘ zwischen den verschiedenen Anbieterprodukten als probates Mittel, Märkte zu erweitern bzw. zu erhalten. In der Folgezeit wurden und werden deshalb erhebliche Anstrengungen unternommen, die Wirkungsrichtungen der haptischen Eigenschaften von Materialien, die vor allem im Innenraum von Automobilen verarbeitet werden, zu untersuchen. Was Ende der Achtziger Jahre in der Automobilindustrie noch Seltenheitswert hatte und häufig auch von erheblichen internen Auseinandersetzungen begleitet war, ist heute Routine und Standard der Entwicklungsabteilungen weltweit geworden. Beinahe jeder Automobilhersteller führt in seinen Reihen eigene Haptik-Labs oder so genannte Sensor-Labs, die sich mit der optimalen haptischen, akustischen oder auch optischen Gestaltung von Einzelteilen oder Gesamtkonfigurationen beschäftigen. Die mit erstaunlichen Etats versehenen Laboratorien schaffen auf diese Weise nicht nur eine neue Qualität der erfahrbaren Materialeigenschaften, sondern generieren auch neue Wissens Elemente, die in ihren Details jedoch nicht öffentlich bekannt werden. Die Zielrichtungen dieser Forschungen, die wir mit dem Begriff ‚Haptik-Design‘ bezeichnet haben (Grunwald 2001g), reichen von Maßnahmen zur Verbesserung der Oberflächen-Haptik bis hin zur Analyse von kultur-, geschlechts- und altersabhängiger Effekte, die bei der Beurteilung haptischer Gestaltungs- und Produktmerkmale von Bedeutung sind. Und so sehr sich in diesem Feld das Haptik-Design etabliert hat, ebenso sicher findet man heute in jeder Beschreibung von neuen Automobilmarken den medial vermittelten Hinweis auf die außerordentliche Güte der ‚Materialhaptik‘.

Doch Haptik-Design, die zielgerichtete gestalterische Umsetzung von grundlegenden Wirkungsaspekten der haptischen Wahrnehmung zur Optimierung von Bedien- und Steuereigenschaften, ist schon längst kein Privileg mehr allein der Automobilindustrie. In fast jedem Industriebereich wird heute auf die wissenschaftliche Analyse haptischer Produkteigenschaften geachtet und nicht unwesentliche Teile der globalen Marktdifferenzen sind diesen Eigenschaften geschuldet. Beispielfähig sollen Industriebereiche genannt werden, in denen Haptikforschung heute zum Standard der Forschungs- und Entwicklungsabteilungen gehören: Nahrungsmittelindustrie, Papierindustrie, Textilindustrie, Kosmetikindustrie, Kommunikationsindustrie, Verpackungsindustrie, Flugzeugindustrie, Militärindustrie.

Neben der funktionalen Verbesserung von Produkten des täglichen oder des besonderen Bedarfs wird der so genannten ‚haptischen Markenbildung‘ besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Ziel dieser speziellen Bemühungen ist, haptische Gedächtnisinhalte mit bestimmten Markenprodukten zu verknüpfen, so dass sich mit den Erfahrungen der praktischen Handhabung eine relevante Kon-

figuration der Materialhaptik im Gedächtnis der Verbraucher etabliert. In vielen Produktbereichen haben diese Bemühungen längst den Verbraucher erreicht, ohne dass dieser ahnt, dass sich hinter den haptischen Qualitäten eine nichtöffentliche Marketingstrategie verbirgt. Spätestens hier soll deutlich werden, daß im Zeitalter des ‚Neuromarketing‘ die wissenschaftliche Analyse haptischer Wahrnehmungsprozesse im Rahmen von Produktnutzung und Produktbewertung mehr und mehr zum Standardrepertoire moderner Marketing- und industrieller Entwicklungsforschung geworden ist. Wenn sich auch die akademische Psychologie heute der Tastsinnesforschung eher zögernd nähert, zeigen die genannten Industriebereiche keinerlei Berührungsängste bei der Nutzung und Manipulation dieses komplexen und zugleich elementaren Sinnessystems.

Beinahe schon klassisch zu nennende Einsatzgebiete für haptische Orientierungshilfen werden für Blinde und Sehschwache angeboten (Übersicht bei Heller & Schiff 1991, Heller 2000). Ebenso werden vibrotaktile Displays zur Übertragung von Sprachsignalen für taube Menschen (Grunwald 2008) oder zur Orientierung von Kampfschwimmern genutzt (Van Erp et al. 2005, od. US Patent 5973441).

Robotik und virtuelle Haptik

Unbeeindruckt von der Größe und Komplexität des Tastsinnessystems sind Robotik und virtuelle Haptik Forschungs- und Anwendungsbereiche, die in den bisherigen Erörterungen und auch im öffentlichen Bewußtsein kaum reflektiert werden. Dabei sind es die vielfältigen Teilbereiche der Robotik und virtuellen Haptik, die heute ohne Zweifel den weltweit größten Anteil an der aktuellen – wenn auch technisch orientierten – Tastsinnesforschung darstellen. Eine Gegenüberstellung der weltweit tätigen Anzahl von Arbeitsgruppen dieser Fachgebiete mit den klassisch psychologisch-psychophysiologisch orientierten ergab, daß heute ca. 60 % der ‚Haptikforscher‘ in den genannten Bereichen arbeiten. Dabei ist ein nach oben offener Trend zu beobachten. Die Faszination des Tastsinnessystems für die Robotik und virtuelle Haptik ist dabei eine notwendige Folge der technischen Entwicklung. Nachdem adäquate Sensor-, Abbildungs- und Simulationssysteme für die visuelle und auditive Modalität entwickelt wurden, war es eine elementare Forderung der Ingenieurwissenschaften, nun auch die Robotiksysteme mit einer adäquaten sensorischen und motorischen Ausstattung zu versehen, die sich am Vorbild des menschlichen oder tierischen Tastsinnessystems orientieren sollte. Iwata (2008) beschreibt sehr eindrucksvoll die bisherigen Entwicklungsschritte innerhalb der Robotik und der virtuellen Haptik bei der technischen Implementierung haptischer Interfaces.

Der Umfang und die verschieden genutzten technisch-methodischen Ansätze sind ausgesprochen groß, so dass eine gesonderte Monographie notwendig wäre, um dieses Feld adäquat darzustellen. Deshalb sollen hier nur kurz die wesentlichen Aspekte einiger aktueller Entwicklungen skizziert werden: Im Teilgebiet der autonomen Roboter wird sicher eines der anspruchsvollsten Ziele verfolgt. Nicht nur das diese Systeme autonom und aufgabenadäquat zu einer visuellen und akustischen Umweltkodierung fähig sein sollen, sondern erklärtes Ziel der verschiedenen Entwicklergruppen ist die Etablierung eines technisch vermittelten Tastsinnessystems, das spezifische Beiträge zur Raumerkennung und zur optimierten Bewegungssteuerung eines autonomen Systems liefern soll (siehe die Entwicklungen der Takao Someya Group).

Als Vorbild für derartige Entwicklungen dient das menschliche Rezeptorsystem, aber auch die Schnurhaare der Ratte sollen – wie zum Beispiel im EU-Projekt BIOTACT – als Modell genutzt werden. Die engen Beziehungen solcher Projekte zur Bionik sind offensichtlich. Doch mit der Re-

produktion und technischen Umwandlung der sensorischen Prinzipien einzelner Rezeptoren allein wird dieses Vorhaben nicht gelingen können. Jedes biologische Tastsinnessystem arbeitet, wie oben bereits dargestellt, sowohl als sensibles (taktiles) als auch als aktives (haptisches) System. Und diese Systemebenen sind hochredundant auf der Rezeptorebene und auf neuronalen Ebene der Verarbeitung ausgelegt. Zudem muß davon ausgegangen werden, das beide Systemebenen in sinnvoller Weise stets parallel arbeiten. Insofern ist die alleinige technische Auslegung von ‚Tast- bzw. Berührungssensibilität‘ autonomer Robotersysteme nur die Implementation *einer Dimension* des biologischen Tastsinnessystems, mit den Folge einer erheblichen Funktions- und Verarbeitungseinschränkung des technischen Systems.

Neben der Robotik entwickelt sich in rasantem Tempo ein weiterer technischer Anwendungsbe- reich der Tastsinnesforschung, der als *virtuelle Haptik* zeichnet wird. Dieser schon zur eigenständigen Technologie entwickelte Begriff vereint unterschiedliche Versuche, haptische Wahrneh- mungen durch geeignete externe, virtuelle Stimulatoren zu erzeugen. Die Bandbreite reicht von Aktoren, die direkt auf die menschliche Haut/Gelenk/Muskulatur einwirken und hierdurch hap- tische Empfindungen von virtuellen Objektberührungen auslösen (z.B. ‚Phantom‘ der Firma Sen- sable) bis hin zu neuesten Entwicklungen der Gruppe um Takayuki Iwamoto in Japan, die durch ein strukturiertes Ultraschallfeld Druckreize auf die menschliche Hautoberfläche ausüben. Die Vielzahl solcher virtuellen Systeme koppeln die haptischen Eindrücke der Reizgeber mit op- tischen und akustischen Signalen, so dass erstaunliche Wahrnehmungseffekte erzielt werden kön- nen. Die relative Präzision dieser Systeme wird insbesondere bei virtuellen chirurgischen Train- ingssystemen deutlich. Der Operateur kann mit Hilfe solcher Systeme aus realen 3D-Datensätzen sowohl visuell als auch haptisch die einzelnen Schritte der bevorstehenden Operation trainieren. Besonders bei schwierigen Hirnoperationen oder auch bei der Ausbildung angehender Chirurgen werden solche Trainingssysteme weltweit eingesetzt. Die realen chirurgischen Instrumente sind dabei mit einer mechanisch-elektronischen Vorrichtung verbunden, die entsprechende haptische Eindrücke durch Vibrations- und Kraftmomente simuliert. Die zeitgleiche Genierung der op- tischen Bewegungsdaten in einer virtuellen Gewebe- und Organszenerie komplettiert die hap- tische Simulation. Weitere Einsatzgebiete der virtuellen Haptik werden beispielhaft in Grunwald (2008) vorgestellt.

Sensomotorische Rehabilitation

Die aktuellen und zukünftigen Grenzen solcher Simulationssysteme sind relativ und ergeben sich prinzipiell aufgrund der mechanisch-elektrischen Komponenten, die für die direkte mechanische Übertragung der Reizkonfigurationen z.B. auf das Hand-Finger-System notwendig sind. Diese könnten jedoch zukünftig u.a. durch steuerbare Polymere wesentlich verkleinert und damit opti- maler gestaltet werden. Grundsätzlich wird dieser Technologiebereich noch lange nicht erschöpft sein, vielmehr stehen – wie am Beispiel der Ultraschallapplikation bereits sichtbar wird – der Per- fektionierung haptisch virtueller Szenarien nur unterlassene Versuche neuen technischer Umset- zungen im Wege. Ebenso lassen verschiedene militärische Anwendungsbereiche der virtuellen Haptik vermuten, dass die Richtung und die Dynamik der zukünftigen Entwicklungen längst nicht abzusehen ist.

Die in der virtuellen Haptik derzeit praktizierte direkte Kopplungsabhängigkeit zwischen phy- sischer Stimulation des Menschen und den dafür notwendigen elektromechanischen Komponen- ten ist jedoch schon heute einige Forschern ein Dorn im Auge. Denn die technischen Beschrän- kungen sind derzeit noch hinreichend groß, so dass in einigen Laboratorien schon lange die Vision

einer direkten neuronalen Kopplung zwischen dem neuronalen System des Menschen und externer sensorischer Informationen diskutiert und untersucht wird. Im Rahmen dieser Vision sollte es möglich sein, daß haptische Eindrücke der Außenwelt auf adäquate Weise codiert und als elektrisches Reizmuster dem neuronalen System des Menschen durch direkte Hirnstimulation übertragen wird. Im Ergebnis solcher neuronal-virtuellen Stimulation sollte der auf diese Weise stimulierte Mensch haptische Wahrnehmungen generieren, die einer natürlichen haptischen Stimulation durch eine reale physische Umwelt gleicht. Die Forschung ist auf diesem Gebiet erst am Anfang, aber es zeigen sich bereits Entwicklungslinien, die den Beobachter aufmerken lassen.

Ein relativ großes Anwendungsgebiet der Haptikforschung hat sich in den letzten Jahren innerhalb der Rehabilitation, insbesondere der Arm- und Beinprothetik entwickelt. Ziel solcher Entwicklungen ist es z.B. mittels geeigneter elektrischer Reizung der Stumpfreionen und der Analyse von Muskelpotentialen der jeweiligen Gliedmaße, eine effektive Steuerung elektromechanischer Prothesen durch den jeweiligen Träger zu erreichen (Zhou et al. 2007). Je nach Funktionsumfang soll es dem Träger dadurch möglich werden, gezielte Prothesenbewegungen auszuführen. Da bei den älteren Modellen solcher Prothesen keinerlei sensorischen Informationen über Druck, Kraft und Temperatur der Protheseneinheit weitergeleitet wurden, konnten derartige Systeme nur unter vollständiger visueller Kontrolle durch den Träger adäquat genutzt werden. Neuere Entwicklungen zielen darauf ab, innerhalb der Prothesen verschiedene technische Sensoren zu integrieren, die ebendiese Qualitäten in geeignete elektrische Signale transformieren, die wiederum an die Stumpfregion als elektrisches oder vibrotaktiler Reizmuster weitergeleitet werden. Auf diese Weise soll es dem Prothesenträger möglich sein, sensorische Qualitäten des Tastsinnes auch mittels einer Prothese wahrnehmen zu können. Besonders relevant werden diese Funktionalitäten, wenn es sich um Handprothesen handelt. Hier ist ein dringendes Erfordernis, dass der Prothesenträger nicht nur fein abgestimmte Fingerbewegungen initiiert, sondern auch über die Kontaktqualitäten dieser Prothesenelemente informiert wird. Die plausiblen Ziele dieser aktuellen Forschungen stoßen jedoch an reale Grenzen, die derzeit durch den Grad der möglichen Miniatursierung, das Materialgewicht und die menschliche Recodierungsfähigkeit elektrischer Signale an der Stumpfregion bestimmt werden. Schon im Hinblick auf die natürlichen Größenverhältnisse der biologischen Sensoren des Tastsinnessystems (s.o.), ihrer funktionalen Komplexität und Verteilungsdichte wird verständlich, dass bis zur Entwicklung biologisch adäquater Prothesen noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten sein wird.

Die soeben beschriebenen Rehabilitationsanwendungen setzen Probanden voraus, deren organisierende Struktur soweit unversehrt ist, dass diese aktiv explorierend und agierend in der Umwelt tätig sein können. In Fällen, bei denen die physische Struktur des Menschen unbeschädigt, die neuronale Ansteuerung der Extremitäten jedoch nicht möglich ist – zum Beispiel durch Verletzungen des Rückenmarks (Lähmung) – werden an die Rehabilitationstechnik andere als die o.g. Anforderungen gestellt. Hier ist es das Ziel, dem Betroffenen technische Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, so dass er möglichst ohne fremde Hilfe handlungsfähig wird. So werden in verschiedenen Hilfssystemen Minimalbewegungen (Finger, Lippe usw.) genutzt, um beispielsweise externe Robotereinheiten oder auch Rollstühle anzusteuern. Hierfür ist aber notwendig, dass der betroffene Mensch zu differenzierten Feinbewegungen in der Lage ist und, dass das motorische Spektrum hinreichend differenziert ist, um eine externe Systemsteuerung umsetzen zu können. Fehlen die genannten Voraussetzungen, ist der Betroffene auf die Hilfe einer anderen Person angewiesen.

Auch vor diesem Hintergrund wird seit einiger Zeit der Frage nachgegangen, ob und wie sich externe technische Systeme allein durch die Recodierung hirnelektrischer Signale steuern lassen. So-

wohl beim Menschen (Leigh et al. 2006) als auch am Tiermodell des Affen (Lebedev & Nicolelis 2006, Jarosiewicz et al. 2008) ist es gelungen, externe technische Systeme mittels Recodierung neuronaler Aktivitäten zu steuern. Der Grundgedanke ist hierbei, dass beim unversehrten Schädel hirnelektrische Signale von der Schädeloberfläche registriert werden und in einer on-line Prozedur die relevanten motorischen Signalanteile herausgefiltert und zur Ansteuerung der externen Einheit an diese übertragen werden. Diese eindrucksvollen und in jeder Hinsicht hilfreichen Entwicklungen lassen aber nahezu gesetzmäßig erwarten, dass auch hier die vorgenannten Entwicklungslinien einer haptisch sensiblen technischen Einheit über kurz oder lang die Entwicklungsziele bestimmen werden. Denn so sehr es auch ein Erfolg für z.B. gelähmte Menschen ist, durch die Bedienung technischer Systeme aktive und direkte Unterstützung zu erfahren, so natürlich ist auch die Forderung und der Wunsch, dass diese Systeme ein ‚fühlbares‘ Feedback generieren, das durch den Anwender wahrgenommen werden kann.

Gefährlich attraktiv könnten solche Szenarien zum Beispiel im Kontext militärischer Anwendungen sein. Denn die Fernsteuerung, z.B. von unbemannten Flugobjekten, ist ohne adäquates haptisches Feedback über längere Zeiträume nicht stabil und fehlertolerant zu gewährleisten. Das steuernde Personal verliert – wegen des fehlenden physischen Kontakts zum technischen System – den Bezug zum millionenteuren Gerät, das sich u.U. hunderte von Kilometern entfernt befindet. Ein haptisches Feedback über konventionelle virtuell-haptische Stimulatoren ist hilfreich, jedoch nicht optimal. Eine direkte neuronale Stimulation, mit dem Ergebnis, dass das steuernde Personal zum Beispiel Flugbewegungen des technischen Systems in gewissen Grenzen mit ‚eigenen‘ körperlichen Wahrnehmungen in Zusammenhang bringt, hätte zweifelsohne Vorteile hinsichtlich einer verbesserten Aufmerksamkeit und des stabileren Steuerverhaltens der Pilotencrew. Derartige Ideen sind heute noch nicht zu verifizieren. Umso bedenklicher ist jedoch, dass solch fundamentale Szenarien durchaus in Fachkreisen diskutiert werden. Ob hierfür die filmischen Phantasien von ‚Matrix‘ Pate standen oder umgekehrt, ist nicht zu entscheiden. Unabhängig von dieser eher akademischen Fragestellung sollten sich alle Beteiligten fragen, ob hier der Nährboden für inhumane Szenarien bereitet wird und ob dies als Ziel einer zukunftsorientierten, neurophysiologisch ausgerichteten Haptikforschung gelten darf.

Trotz oder gerade wegen der bisher ergebnisreichen Entwicklungen ist zu erwarten, dass die Ingenieurwissenschaften im Bereich der Robotik und virtuellen Haptik erkennen werden, dass die Entwicklung adäquater technischer Sensor- und Aktorsysteme letztlich eine noch bessere Kenntnis der biologischen Grundlagen des natürlichen Systems erfordert. Insofern müssen Natur-, Technik- und Humanwissenschaften viel stärker als bisher kooperativ miteinander vernetzt werden. Denn die Humanwissenschaften sind methodentechnisch bei der Erforschung des Tastsinnesystems auf neue Sensorsysteme angewiesen, mit deren Hilfe neue Einsichten in die Funktionsprinzipien der Tastsinnesverarbeitung gewonnen werden können. Von der Implementation neuer Sensor- und Messtechnik in den Bereich der experimentellen Tastsinnesforschung wird nach Ansicht des Autors der Fortschritt innerhalb dieses Forschungsgebietes abhängig sein. Wie eng die methodentechnischen Abhängigkeiten sind, soll kurz an einem noch nicht publizierten Forschungsgegenstand erläutert werden: Die exakte Aufzeichnung komplexer 10-Fingerbewegungen während einer haptischen Objektexploration ist bislang nur auf optischem Wege oder mit Hilfe von Bewegungssensoren möglich, die eine geringe Genauigkeit aufweisen. Auf Grund der geringen zeitlichen und räumlichen Auflösung sind deshalb bisher detaillierte Einblicke in die komplexe 10-Finger-Explorationsdynamik nur eingeschränkt möglich.

Mit einer relativ einfachen, jedoch hochsensiblen Messtechnik, die Veränderungen eines Magnetfeldes im Bereich von Mikrometern registrieren kann, konnte der Autor im Jahr 2001 feststellen,

dass die haptische Objektexploration von motorischen Ruhephasen („explorative stops“) der Hände und Finger begleitet wird, die eine durchschnittliche Dauer von ca. 30-100 ms aufweisen. In diesem Zeitbereich war eine vollständige motorische Statik des gesamten Finger-Hand-Komplexes messbar. Durch nachfolgende Experimente am Massachusetts Institute of Technology (MIT) konnten wir weiterhin nachweisen, dass diese Ruhephasen in Relation zur Komplexität und Bekanntheit der Stimuli stehen. Neben einer Reihe weiterer Detailbefunde zeigen die Versuchsergebnisse vor allem den direkten Zusammenhang zwischen der möglichen Beobachtungsperspektive und der verwendeten Meßtechnik. Mit den bisher verwendeten Untersuchungsverfahren konnte die experimentell variierte Beobachtung der Explorationspausen nicht gemacht werden, da hierfür eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung des Untersuchungsverfahrens nötig ist. Der von uns verwendete meßtechnische Ansatz gestattete es, die Bewegungsamplituden eines 10-Finger-Handsystems vor allem zeitlich hochauflösend zu registrieren und machte die o.g. Beobachtung überhaupt erst möglich.

In Anlehnung an dieses Beispiel ist der Autor davon überzeugt, dass viele der heute noch offenen Fragen zur Tastsinnesforschung zukünftig nur durch eine detaillierte Analyse der Mikrostrukturen des haptischen Explorationsprozesses zu beantworten sind. Und diese Entwicklung kann nur vorgebracht werden, wenn neue und hochsensible Sensorsysteme in die aktuelle Haptikforschung Einzug halten. Human-, Natur- und Technikwissenschaften sind demnach gerade bei der Erforschung des Tastsinnessystems in besonderer Weise aufeinander angewiesen. Denn so sehr die Humanwissenschaften neue Meßsysteme und Analysemethoden in der Forschung integrieren müssen, so sehr benötigen die Bereiche Robotik und virtuelle Haptik stabileres Wissen über die natürlichen Verhältnisse des Tastsinnessystems und seiner neuronalen und biophysikalischen Verarbeitungsprinzipien. Die hierzu nötige Grundlagenforschung befindet sich jedoch – bei allem erkennbaren Fortschritt – erst am Anfang. Somit ist dringend zu hoffen, dass sich die Prognose von E. H. Weber über die nötige Zusammenarbeit von Physiologen, Psychologen und Physikern nicht nur weiterhin produktiv bestätigt, sondern dass sich die Haptik als interdisziplinäres Forschungsgebiet der Human- und Technikwissenschaften etabliert.

Literatur

- Blum, D. (2002): Harry Harlow: Love at Goon Park: Harry Harlow and the Science of Affection. Perseus Publishing
- Bryan, G.K., Riesen, A.H. (1989): Deprived Somatosensory-Motor Experience in Stumptailed Monkey Neocortex: Dendritic Spine Density and Dendritic Branching of Layer IIIB Pyramidal Cells. *The Journal of Comparative Neurology* 286: 208-217
- Damon, W. (Ed.) (2006): Handbook of Child Psychology. Wiley
- Dessoir, M. (1892): Über den Hautsinn. *Arch. f. Anat. u. Physiol., Physiol. Abt.*, 175–339.
- Van Erp, J.B.F., Van Veen, H.A.H.C., Jansen, C., Dobbins, T. (2005): Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt. *ACM Trans. Appl. Percept.* 2(2) 106–117
- Essman, W.B. (1971): Neurochemical changes associated with isolation and environmental stimulation. *Biological Psychiatry*, 3: 141
- Frey, M. v. (1929): Physiologie der Haut. In: Handbuch der Haut- und Geschlechtskrankheiten. Jadassohn, Josef (Hrsg.) ; Bd. 1T. Springer: Berlin

- Frey, M. v. (1896): Untersuchungen über die Sinnesfunctionen der menschlichen Haut. *Abhandl. d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss. Math.-phys. Cl.*; Hirzel: Leipzig
- Frey, M. v. (1912): Die Wirkung einfacher Druckempfindungen aufeinander. *Verhandlungen der physik.-med. Gesellschaft zu Würzburg* ; N.F., 41,3, S. 39-43, Kabitzsch, Würzburg
- Grunwald, M., Weiss, T., Krause, W., Beyer, L., Rost, R., Gutberlet, I., Gertz, H.J. (1999a): Power of theta waves in the EEG of human subjects increases during recall of haptic information, *Neurosci. Lett.*, 260, 189-192
- Grunwald, M., Ettrich, C., Assmann, B., Dähne, A., Krause, W., Beyer, L., Rost, R. & Gertz, H.J. (1999b): Haptische Wahrnehmung und EEG Veränderungen bei Anorexia nervosa. *Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie*, 27(4), 241-250
- Grunwald, M., Weiss, T., Krause, W., Beyer, L., Rost, R., Gutberlet, I. & Gertz, H.J. (2001a). Theta power in the EEG of humans during ongoing processing in a haptic object recognition tasks. *Cognitive Brain Research*, 11, 33-37
- Grunwald, M., Ettrich, C., Assmann, B., Dähne, A., Krause, W., Busse, F. & Gertz, H.J. (2001b): Deficits in haptic perception and right parietal theta-power changes in patients with anorexia nervosa before and after weight gain. *International Journal of Eating Disorders*, 29, 417-428
- Grunwald, M. & Krause, F. (2001c): Begriffsbestimmungen zwischen Psychologie und Physiologie. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.), *Der bewegte Sinn - Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung* (S.1-14). Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag
- Grunwald, M., Ettrich, C., Krause, W., Assmann, B., Dähne, A., Weiss, T. & Gertz, H.J. (2001d): Haptic perception in anorexia nervosa before and after weight gain. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 23, 520-529
- Grunwald, M. (2001e): Störung der haptischen Wahrnehmung bei Anorexia nervosa. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.), *Der bewegte Sinn - Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung* (S. 135-150). Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag
- Grunwald, M. (2001f): Änderungen der hirnelektrischen Aktivität bei haptischer Reizverarbeitung. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.), *Der bewegte Sinn - Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung* (S.61-76). Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag
- Grunwald, M. & Krause, F. (2001g): Haptik-Design im Fahrzeugbau. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.), *Der bewegte Sinn - Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung* (S. 171-176). Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag
- Grunwald, M., Ettrich, C., Busse, F., Assmann, B., Dähne, A. & Gertz, H.J. (2002): Angle Paradigm: A New Method to Measure Right Parietal Dysfunction in Anorexia Nervosa. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 17, 485-496
- Grunwald, M. (Ed.) (2008): *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Berlin, Basel, New York: Birkhäuser Verlag
- Grunwald, M., John, M. (2008): German pioneers of research into human haptic perception. In: M. Grunwald (Ed) *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser 2008, S. 15-39
- Grunwald, M., Weiss, T., Assmann, B. & Ettrich, C. (2004): Stable Asymmetric Interhemispheric Theta Power in Patients with Anorexia Nervosa during Haptic Perception even after Weight

- Gain: A Longitudinal Study. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(5), 608-620
- Grunwald, M., Weiss, T. (2005): Inducing sensory stimulation in treatment of anorexia nervosa. *Quarterly Journal of Medicine*, 98, 379-380
- Haeckel, E. (1909): *Zellseelen und Seelenzellen*. Leipzig: Alfred Kröner Verlag
- Heller, M. A. (2000): *Touch, Representation, and Blindness*. Oxford University Press
- Heller, M.A., Schiff, W. (Eds.)(1991): *The psychology of touch*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum
- Hepper, P.G. (2008): Haptic perception in the human foetus. In: M. Grunwald (Ed) *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 149-154
- Iwata, I. (2008): History of haptic interface. In: Martin Grunwald (Ed.) *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Berlin, Basel, New York: Birkhäuser Verlag, 355- 361
- Jarosiewicz B, Chase SM, Fraser GW, Velliste M, Kass RE, Schwartz AB. (2008): Functional network reorganization during learning in a brain-computer interface paradigm. *Proc Natl Acad Sci USA* 9;105(49):19486-91
- Katz, D. (1925): *Der Aufbau der Tastwelt*. Leipzig: Verlag von J. A. Barth
- Kiese-Himmel, C. (2008): haptic perception in infancy and first acquisition of object words: Developmental and clinical approach. In: M. Grunwald (Ed) *Human Haptic Perception – Basics and Applications*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 321-333
- Krens, I., Krens H. (Hrsg.) (2006): *Das Pränatale Kind: Grundlagen einer vorgeburtlichen Psychologie*. Vandenhoeck & Ruprecht
- Lebedev MA, Nicolelis MA.(2006): Brain-machine interfaces: past, present and future. *Trends Neurosci.* 29(9): 536-46
- Leigh R. Hochberg, Mijail D. Serruya, Gerhard M. Friehs, Jon A. Mukand, Maryam Saleh, Abraham H. Caplan, Almut Branner, David Chen, Richard D. Penn and John P. Donoghue (2006): Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature* 442, 164-171.
- Nakagaki, T., Yamada, H., Tóth, A. (2000): Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature*. 28;407 (6803): 470
- Penrose, R. (2002): *Das Große, das Kleine und der menschliche Geist*. Spektrum - Akademischer Verlag
- Prescott, J.W. (1971): Early somatosensory deprivation as an ontogenetic process in the abnormal development of the brain and behavior. In: I.E. Goldsmith and J. Moor-Jankowski (Eds). *Medical Primatology*. S. Karger, Basel, New York
- Skramlik, E. von (1937): *Psychophysiologie der Tastsinne*. Bd. 1 u. II. *Archiv für die gesamte Psychologie*: 4. Ergänzungsband, Leipzig: Akad. Verlags-Gesellschaft
- Smith, C.U.M. (2000): *Biology of Sensory Systems*. Wiley
- Tero, A., Yumiki, K., Kobayashi, R., Saigusa, T., Nakagaki, T. (2008): Flow-network adaptation in *Physarum amoebae*. *Theory Biosci.* 127(2): 89-94

- Verworn, M. (1889): Psychophysiologische Protistenstudien. Jena: Fischer
- Verworn, M. (1892): Die Bewegung der lebendigen Substanz. Jena: Fischer
- Weber, E.H. (1834): De pulsu, resortione, auditu et tactu annotatines anatomicae et physiologicae. Leipzig, Köhler
- Weber, E.H. (1835): Über den Tastsinn. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin*, p. 152-160
- Weber, E.H. (1851): Die Lehre vom Tastsinn und Gemeingefühl – auf Versuche gegründet. Braunschweig: Verlag Friedrich Vieweg und Sohn. translated 1978: The sense of touch London: Academic Press
- Zubek, J. (Ed.) (1969): Sensory deprivation: Fifteen years of research. Appleton Century Crofts
- Zhou P, Lowery MM, Englehart KB, Huang H, Li G, Hargrove L, Dewald JP, Kuiken TA. (2007): Decoding a new neural machine interface for control of artificial limbs. *J. Neurophysiol.* 98(5): 2974-82

[09.01.09]

Anschrift des Autors:

PD Dr. Martin Grunwald
Universität Leipzig
Paul-Flechsig-Institut für Hirnforschung, Haptik-Forschungslabor
Johannisallee 34
D – 04103 Leipzig
www.haptik-labor.de
mgrun@medizin.uni-leipzig.de