



Martin Grunwald

Haptikforschung im Griff der Human- und Technikwissenschaften

Historische Aspekte und Begriffsbestimmungen

Die Anfänge der experimentellen, wissenschaftlichen Psychologie wurden zu Beginn des 19. Jahrhunderts wesentlich durch Ernst Heinrich Weber geprägt. E.H.Weber (1795-1878), Mediziner und Physiologe in Leipzig, erkannte als erster und mithilfe systematischer Untersuchungen, dass das System des Menschen, welches in seinen vielfältigen Eigenschaftsdimensionen zusammenfassend als Tastsinn bezeichnet wird, ein wichtiger und essentieller Gegenstand der wissenschaftlichen Analyse sein muß. In seiner 1834 vorgelegten Dissertationsschrift „De pulsu, resortione, auditu et tactu annotatines anatomicae et physiologicae“ und in späteren Arbeiten, dokumentiert er eindrucksvoll, die psychophysiologischen Leistungsbereiche des menschlichen Tastsinns. Seine umfangreichen Arbeiten zur Psychophysiologie des Tastsinns, insbesondere die Untersuchungen zur Zwei-Punkt-Diskrimination, sind noch heute genutzte experimentelle Paradigmen in der Psychophysiologie. Besonders wesentlich ist seine Beobachtung, dass die Leistungsfähigkeit dieses Sinnessystems durch die Aspekte aktiv vs. passiv unterschieden werden müssen. Dabei entdeckte er, dass ein durch das Subjekt aktiv durchgeführter Explorationsprozess zu deutlich besseren Erkennensleistungen führt, im Vergleich zu einer passiven Präsentation, bei der das wahrnehmende Subjekt keine aktiven Explorationsbewegungen, z. B. der Finger, durchführt. Neben vielen anderen psychophysiologischen Teilaspekten der Tastsinneswahrnehmung, die ausführlich in seiner Arbeit von 1851 beschrieben werden, finden sich schon bei E.H.Weber eindrucksvolle Beobachtungen der klinisch-pathologischen Veränderungen der Tastwahrnehmung bei neurologischen und psychiatrischen Patienten.

Zahlreiche von ihm angeregte Fragestellungen wurden erst viele Jahrzehnte später wieder aufgegriffen. So beschreibt er beispielsweise das Auftreten von Empfindungstäuschungen nach Amputation von Gliedmaßen und einige Folgen von Erkrankungen des Gehirns und des Rückenmarks auf die Leistungen des Tastsinns, insbesondere die Entstehung von Halluzinationen. Ausführlich widmet er sich der Frage, in welcher Weise Aufmerksamkeitsprozesse die Wahrnehmung von Tastreizen verändert (E.H.Weber 1851; 100ff), und das elementare Gedächtnisleistungen nötig und möglich sind, um zwei zeitlich aufeinanderfolgende Reize überhaupt vergleichen zu können (E.H.Weber 1851; 40, 86). Und in ähnlicher Weise widmet er sich auch der Frage, von welchen Aspekten die Selbstberührung des eigenen Körpers abhängig ist.

Vertreter verschiedener Fachdisziplinen, Zeitgenossen und nachfolgende Generationen von Wissenschaftlern, die sich mit der Erforschung des Tastsinns und der anderen Sinnessysteme beschäftigten, wurden durch E. H. Weber maßgeblich beeinflusst. Von Wilhelm Wundt wurde ihm der Ti-

tel „Vater der experimentellen Psychologie“ zugeschrieben, aber auch Anatomen und Physiologen reklamierten Webers Arbeiten als Meilensteine für ihr Fach (Hoffman 2001). Dass er diese interdisziplinäre und starke Wirkung seiner Arbeiten durchaus im Blick hatte, kann ein programmatisches Zitat aus einer Arbeit von 1835 belegen: „Die Lehre von den Sinnen ist ein Punkt, in welchem einmal in Zukunft die Forschungen der Physiologen, der Psychologen und der Physiker zusammenstossen müssen.“ (E.H.Weber 1835; 152).

Namhafte Zeitgenossen und wissenschaftliche Nachfolger E.H. Webers, insbesondere deutsche Physiologen und Psychologen, widmeten sich bis zum Beginn des zweiten Weltkrieges intensiv der psychophysiologischen Analyse des menschlichen Tastsinns. Hierzu zählen bekannte Forscherpersönlichkeiten wie Max von Frey, Max Dessoir, Geza Révész und David Katz. Aber auch heute weniger oder gar nicht bekannte Forscher wie E. von Skramlik, J. N. Czermak, L. A. H. von Strümpell, O. Funke, G. Meissner, T. Hausmann, P. Mahner, A. Goldscheider, G.A. Brecher, O. F. Scheuer und R. Hippus trugen mit ihren Arbeiten zur Entwicklung des Fachgebietes innerhalb der Psychologie und Physiologie bei (s. Grunwald 2001c, Grunwald & John 2008).

Leider erfolgte bislang keine systematische und vollständige Aufarbeitung der deutschsprachigen Tastsinnesforschung vor dem zweiten Weltkrieg. Diese Reflektion ist jedoch dringend notwendig, wenn man den Einfluß der wissenschaftlichen Tastsinnesforschung innerhalb der Psychologie und Physiologie, den veränderten Stellenwert dieses Forschungsgebietes nach dem zweiten Weltkrieg und die internationale Entwicklung des Fachgebietes verstehen will. Eine systematische Aufarbeitung ist auch darum dringend geboten, da unter den veränderten Bedingungen der Nachkriegszeit und dem wachsenden US-amerikanischen Einfluß in der heutigen Psychologie die historischen Zusammenhänge hinsichtlich der Entwicklung der Tastsinnesforschung nicht oder nicht richtig dargestellt werden. So wird beispielweise die Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Tastprozeduren dezidiert dem amerikanischen Wahrnehmungspsychologen Gibson (1962) zugeordnet. Und beinahe vollständig in Vergessenheit geraten ist der Ursprung einer wichtigen Begriffsbildung für die Tastsinnesforschung, die auf den deutschen Psychologen Max Dessoir zurückgeht. Dieser empfahl, alle wissenschaftlichen Bemühungen zur Aufklärung der menschlichen Tastwahrnehmung, in Anlehnung an die Begriffe „Optik“ und „Akustik“, mit dem Begriff „Haptik“ zu bezeichnen (Max Dessoir 1892).

Die heute noch fehlende historische Aufarbeitung der deutschsprachigen Tastsinnesforschung, aber auch der geringe Status dieser Forschung innerhalb der Psychologie sind für diesen Missstand verantwortlich. Es ist in der Folgezeit zu hoffen, dass sich zu dieser Problematik besonders in der Psychologie ein Bewußtseinswandel vollzieht, der anerkennt, dass die Anfänge der wissenschaftlichen Psychologie ausgesprochen eng mit der Erforschung des Tastsinnes verbunden sind und das dessen Erforschung eine in Deutschland wenig beachtete Tradition besitzt, deren man sich aktiv erinnern und die produktiv fortgesetzt werden sollte.

Da im nachfolgenden Beitrag explizit eine begriffliche Unterscheidung zwischen haptischer und taktiler Wahrnehmung genutzt wird, soll hier kurz auf die wesentlichen Aspekte dieser Begriffe eingegangen werden. Wenn auch nicht konsequent, so setzt sich dennoch zunehmend in der psychologischen Fachliteratur der letzten Jahre eine begriffliche Unterscheidung innerhalb der Tastsinnesforschung durch, die auf die Stellung des Subjekts zum Reiz bzw. zum Reizobjekt verweist. Danach werden Wahrnehmungsinhalte, die auf eine Stimulation des Körpers (Haut, Gelenk ect.) 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 zum

Beispiel dann gegeben, wenn eine klassische Zwei-Punkt-Schwelle (E.H. Weber) mit einem sog. Tastzirkel ermittelt wird. Der Versuchsleiter setzt hierbei zwei abgestumpfte Zirkelspitzen gleichzeitig (simultan) oder nacheinander (sukzessiv) auf die Haut der Versuchsperson auf und diese muß bei geschlossenen Augen ermitteln, ob zwei getrennte Hautpunkte berührt werden. Je geringer der Abstand der beiden Zirkelspitzen zueinander wird, umso schwieriger wird es für die Versuchsperson, beide Zirkelspitzen getrennt wahrzunehmen. Am kritischen Schwellenpunkt dieses Paradigmas (wenn die Zirkelspitzen nur wenige Millimeter Abstand aufweisen) kann die Versuchsperson aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung der Hautrezeptoren nur noch die Wahrnehmung eines einzigen Reizpunktes generieren. Während des gesamten Versuches dieser Art finden keine aktiven Explorationsvorgänge bzw. explorative Bewegungen durch die Versuchsperson statt. Im anderen Fall werden der Versuchsperson ebenfalls Zwei-Punkt-Reize präsentiert, jedoch hat hier die Versuchsperson die Möglichkeit durch aktive Bewegungen die Reizstruktur zu erkunden. Hand, Finger, Arm – grundsätzlich alle Körperbewegungen sind möglich, und bedingt durch den Aspekt der aktiven Stellung des Subjektes zur Reizquelle werden entsprechende Wahrnehmungen als *haptische Wahrnehmungen* und die dazugehörigen Reize – einschließlich derjenigen Informationen, die durch die Körpereigenbewegungen generiert werden – als *haptische Reize* bezeichnet. Oberflächenunterschiede in der Umwelt, die 4µm betragen, können auf diese aktive Weise bzw. durch die Fingerkuppen des gesunden Menschen wahrgenommen werden. Die Schwellenwerte für passiv vermittelte taktile Reize liegen dabei wesentlich höher, d.h., die Präzision der haptischen Wahrnehmung ist weitaus besser als die der taktilen Wahrnehmung.

An diesem Beispiel wird deutlich, das die begriffliche Unterscheidung nicht nur aus erkenntnistheoretischen Erwägungen sinnvoll ist, sondern auch aus phänomenologischer Sicht. Zudem kann deutlich werden, dass das Tastsinnessystem des Menschen über diese Eigenschaftsdimension – aktiv vs. passiv – verfügt. Und damit ergibt sich auch aus methodischer Sicht eine zentrale Frage, welchem Aspekt der Tastsinneswahrnehmung man sich zuwendet. Bis zu Beginn des II. Weltkrieges kann man nachträglich ein relativ ausgewogenes Verhältnis der Forschungsaktivitäten zwischen taktiler und haptischer Wahrnehmung feststellen. Die eher physiologisch, einzelreizorientierten Forschungen von Max von Frey stehen beispielhaft den komplexen haptischen Reizstrukturen gegenüber, die von David Katz (1925) oder Emil von Skramlik (1937) verwendet wurden.

Doch nach dem II. Weltkrieg hat sich dieses methodische Verhältnis zu Ungunsten der haptischen Wahrnehmung verschoben. Den aktuell größten Anteil der Tastsinnesforschung nehmen Untersuchungen ein, die sich der Analyse von einfachen, taktilen Einzelreizen zuwenden. Die quantitative Dominanz dieser Forschungsbemühungen 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 werden kann. So wertvoll die Resultate der Tastsinnesforschung zur taktilen Reizverarbeitung auch im Einzelfall sind, so dezidiert muß dennoch darauf hingewiesen werden, dass im Sinne einer verbesserten ökologischen Validität der Untersuchungsbedingungen, die Analyse von haptischen Wahrnehmungsprozessen angezielt werden sollte. 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, so muß doch für einige Vertreter der Physiologie beklagt werden, dass sich eine verzerrte und reduzierte Perspektive auf die Dimensionen des Tastsinns entwickelt hat; wonach der Tastsinn im wesentlichen nur Berührungs- und Temperaturreize verarbeitet und die aktiven Momente ein Teilgebiet der Motorik darstellen. Diese eher lehrbuchgeprägte Trennungslogik zwischen Motorik und Sensorik scheint zumindest einigen Kollegen

leider besonders attraktiv nutzbar bei der Betrachtung des menschlichen Tastsinnes zu sein.

Der Autor 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 Prozessschritte darstellen, die sinnvollerweise – sofern man haptische Wahrnehmungsprozesse untersuchen will - nicht getrennt werden können.

Ontogenetische und phylogenetische Perspektiven des Tastsinnessystems

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, 3). Praktische Erwägungen und die Hoffnung auf die Entdeckung grundlegender Wahrnehmungsprinzipien standen somit im Vordergrund der experimentellen Studien von E.H.Weber. Scheinbar völlig frei von den philosophischen Grundsatzdiskussionen der Renaissance und der Aufklärung über die vermeintlich höhere oder niedere Stellung des Tastsinns zum Beispiel gegenüber des Sehsinns, steht für E.H.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 W. 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, eine Besonderheit innerhalb der verschiedenen Wahrnehmungssysteme dar. So ist es eine vielfach in der Biologie beschriebene und bestaunte Tatsache, daß einzellige Organismen chemische und haptische Reize adäquat für die Bewältigung ihrer Anpassungsleistungen verarbeiten können. Bereits Ernst Haeckel und seine Zeitgenossen (z.B. Max Verworn 1889, 1892) beschreiben elementare Lernleistungen von einzelligen Organismen, die wohlgerne über keine einzige Nervenzelle verfügen. Diese großartigen Elementarleistungen der einzelligen Organismen haben zu recht Ernst Haeckel 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 E. 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 solche namhaften Physiker wie R. Penrose mit dem Problem der Informationsverarbeitung bei einzelligen Organismen beschäftigen (Penrose 2002) oder Nakagaki (2000), Tero (2008) in eindrucksvollen Experimenten bestätigen konnte, daß selbst Amöben nach gewissen Durchläufen in einem Nahrungslabyrinth irgendwann 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 Sinnesysteme hat kaum oder gar nicht in aktuelle psychologische Perspektiven Einzug gehalten.

Dabei ist allen einzelligen Lebewesen gemeinsam, daß sie sich auf der Basis verschiedener Fibrillentypen in den ihnen gemäßen wässrigen Umgebungsbedingungen bewegen können. Diese Be-

wegungen 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, daß wir beim Menschen als „Körperschema“ bezeichnen: ein internes Abbild der eigenen Körpergrenzen – der räumlichen Ausdehnung des eigenen Organismus.

Der Autor sieht in diesen Leistungen ein evolutionäres und auf phylogenetischer Ebene verwirklichtes Grundprinzip der Biologie, daß jeder sich selbst bewegend Organismus auf elementarer Stufe Körper- und Bewegungsreize verarbeiten kann. Diese Form der Tastsinnesreizverarbeitung, wie wir sie bei Einzellern beobachten können, ermöglicht die Analyse von physischen Reizen, welche direkt auf den Körper einwirken (taktile Reize) und 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 uns 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, das sich über die Phylogenese der Organismen die Tastsinnesfähigkeit als Basisleistung erhalten und jeweils Art spezifisch 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 Körper eigenbewegungen, eine entscheidende Rolle. Nach dem bisher Dargestellten muß es beinahe 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 ca. Körpergröße von 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 Fetus aus. Im gleichen Maße entwickelt sich die Fähigkeit zur koordinierten Bewegung des gesamten Körpers. Die Reifungsentwicklung des Fetus 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 bedacht 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 es 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 wahrsten 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 sehr 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 Humanen- 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, so 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 physikali-

schen Raum 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 Tastsinnesystem verfügen würde. Und ebenso ist es nicht möglich – 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 Tastsinnesystem 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 vereinbar ist.

Elektrophysiologische Korrelate der haptischen Informationsverarbeitung

Nach diesen Darlegungen ist es beinahe folgerichtig, daß es für die psychologische Forschung hinreichend viele Gründe gab und gibt, die bio-psychischen Grundlagen der menschlichen Tastwahrnehmung zu untersuchen. Die Gegenstände dieser Forschung gehen dabei selbstredend über jene der biologischen und physiologisch orientierten Psychologie weit hinaus. Aufgrund des universellen Charakters und der stetigen Beteiligung von Tastwahrnehmungen im Alltagsleben ist es sicher berechtigt, anzunehmen, daß jeder Fachbereich der Psychologie – sofern er hierfür die nötige Offenheit zeigt – Teilaspekte und Handlungswirkungen der Tastsinneswahrnehmung zum adäquaten Gegenstand von Forschungsbemühungen machen kann. Mehr noch. Es stellt sich für den Autor eine dringende Notwendigkeit dar, mehr als bisher, die vielfältigen Funktionen der Tastsinneswahrnehmung für den Aufbau komplexer perzeptiv-kognitiver Konstrukte und deren grundsätzliche Bedeutung für menschliche Informationsverarbeitungsprozesse experimentalpsychologisch zu untersuchen. Hierbei sollte, wie schon vorab angesprochen, die wissenschaftliche Analyse aktiver Explorations- und Erkenntnisprozesse im Vordergrund der Forschungsbemühungen stehen. Und ein abschließlicher Rückzug auf methodisch- und publikationssicheres Terrain, wie er bisher mit Einzelreiz-Paradigmen zur taktilen Reizverarbeitung überproportional umgesetzt wird, sollte vermieden werden. Dass diese inhaltliche und methodische Forderung schon in den verschiedenen Gebieten der Psychologie umgesetzt wird, zeigen aktuelle nationale und internationale Arbeiten zur Tastsinnesforschung, die der Autor als Herausgeber in dem Band „Human Haptic Perception – Basics and Applications“ (Grunwald 2008) zusammenfassen konnte.

Einen eigenen experimentellen Beitrag in dieser Richtung sollten erste Studien zu hirnelektrischen Korrelaten bei der haptischen Verarbeitung unbekannter Stimuli erbringen, die der Autor als Promotionsstudent ab 1993 an der Friedrich-Schiller-Universität Jena unter Betreuung von Professor Werner Krause (Psychologisches Institut) und Professor Lothar Beyer (Neurophysiologischen Institut) durchführte. Ein Ziel dieser Studien bestand darin, aufzuklären, welche hirnelektrischen Veränderungen beobachtbar sind, wenn Probanden bisher unbekannte, abstrakte haptische Stimuli durch aktive Fingerexploration unter Ausschluß visueller Informationen erkennen müssen. Bis zum damaligen Zeitpunkt beschränkte sich die wissenschaftliche Literatur auf Berichte, die die hirnelektrischen Veränderungen bei kurzzeitigen, wiederholten taktilen Reizen beschrieb. Welche EEG-Aktivität bei aktiver, haptischer Exploration zu beobachten ist, war nicht untersucht. In diese globale Fragestellung waren weitere Hypothesen eingebettet, die sich auf bereits etablierte Modelle der Informationsverarbeitung, insbesondere auf die Analyse von Arbeitsgedächtnisprozessen innerhalb der visuellen und akustischen Modalität bezogen. Danach ist bekannt, daß Kurzzeitspeicherprozes-

sen nur limitierte neuronale Ressourcen zur Verfügung stehen und das unterschiedliche Beanspruchungen des Kurzzeitspeichers bei Nutzung der visuellen oder akustischen Modalität, von abhängigen Veränderungen langsamer spektraler EEG-Aktivitäten (Theta-Frequenz 4-8Hz) begleitet werden (Mecklinger 1992, Klimesch et al. 1997). Dieser Zusammenhang wird u.a. mit der Annahme erklärt, dass die frontal generierte Theta-Aktivität selektive Aufmerksamkeitsprozesse und Beanspruchungsprozesse des Kurzzeitgedächtnisses repräsentiert. Die Spezifik der genannten Theta-Veränderungen als psychophysiologisches Korrelat im Rahmen von Aufmerksamkeits- und Gedächtnisprozessen wird durch das Wirken eines hippocampal-kortikalen Netzwerkes angenommen.

Bei geringerer Auslastung des Kurzzeitspeichers konnten geringere spektrale Leistungswerte der Theta-Aktivität im Vergleich zu starker Auslastung des Kurzzeitspeichers beobachtet werden. Mit unseren Experimenten sollte nachgewiesen werden, daß das hirnelektrische Korrelat der Theta-Modulation bei Kurzzeitspeicherprozessen auch bei haptischer Reizverarbeitung und damit als modalitätsunabhängiger Effekt auftritt.

Zur Untersuchung beider Fragestellungen wurde ein Paradigma entwickelt, daß auf der sukzessiven Präsentation von unbekanntem Tiefenreliefstimuli mit unterschiedlicher Stimuluskomplexität basierte (s. Abbildung 1). Um eine theoriebasierte Komplexitätsstufung der Reize zu erreichen, wurde der Versuch unternommen, den Informationsgehalt der Struktur der Tiefenreliefmuster mittels Algorithmen der strukturellen Informationstheorie zu ermitteln (Leeuwenberg 1968, Klix 1993, Krause 2000). Jedoch insbesondere bei den komplexeren Stimuli der Untersuchungsserie konnten keine adäquaten Strukturmaße ermittelt werden. Die geringe Anwendungsgüte der strukturellen Informationstheorie (SI) auf die verwendeten haptischen Stimuli ist sicher darauf zurückzuführen, dass bisher nur relativ einfache Stimuli mit der SI bestimmt wurden und die vorliegenden Erfahrungen ausschließlich auf der Nutzung visueller Stimuli beruhen. Für eine adäquate Beschreibung der im Paradigma genutzten haptischen Stimuli wäre demnach noch eine Prüfung der Modalitätsunabhängigkeit der SI zu prüfen. Beide Aspekte, Komplexität der Stimuli und visuelle Modalitätsspezifität der bisherigen Anwendungen der SI lassen eine Erweiterung der SI als notwendige Forderung erscheinen.

Aus den genannten Gründen folgte die auswertungsbezogene Stufung des Stimulusmaterials auf der Basis der durchschnittlichen Erkennungszeit, die als grobes Maß für die Komplexität des Stimulus genutzt wurde. Der nachfolgend genutzte Term „Stimuluskomplexität“ bezieht sich somit auf die durchschnittlich benötigte Explorations- und Erkennungszeit.

Diese Gruppenbezogene Auswertung war praktikabel; sie eliminierte jedoch auch die individuellen Variationen der Explorationszeiten pro Stimulus, die zum Teil erheblich voneinander abwichen. Gerade für differentialpsychologische Analysen sollte diesem Aspekt in der Zukunft wesentlich mehr Beachtung geschenkt werden. Sowohl D. Katz (1925) als auch Emil von Skramlik (1937) haben schon vor langer Zeit auf die starken interindividuellen Schwankungen bei haptischen Wahrnehmungsprozessen hingewiesen.

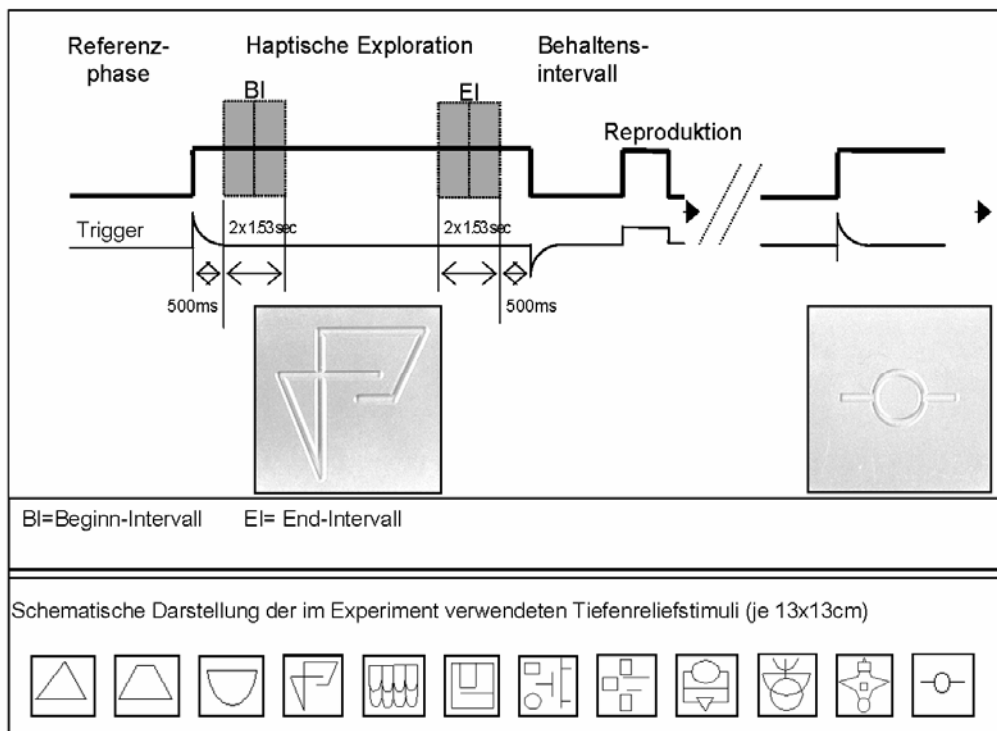


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs und der EEG-Segmentauswahl zu Beginn (BI) und zum Abschluß (EI) der Exploration bezüglich eines haptischen Stimuli.

Der schematische und prinzipielle Versuchsablauf wird in Abbildung 1 dargestellt. Während der Explorationsphase waren die Augen der Probanden geschlossen; sie durften während der zeichnerischen Reproduktion der erkannten Stimulusstruktur geöffnet werden. Die Stimuluspräsentation erfolgte zufällig. Nach frei gewählter Explorationszeit wurden die Probanden vor der zeichnerischen Widergabe gebeten, den Stimulusinhalt noch 10 Sekunden präsent zu halten (retention intervall). Die digitale Aufzeichnung des 19kanaligen EEG erfolgte während der gesamten Untersuchungszeit, einschließlich einer vorausgehenden Ruhe-Referenzphase (baseline).

Der Vergleich der spektralen EEG-Leistung zwischen der haptischen Anforderung und der Ruhe-Referenz in den Frequenzbereichen Theta (4-8Hz), Alpha (8-13Hz), Beta 1 (13-18Hz) und Beta2 (18-24Hz) zeigte eine starke und global über dem Kortex verteilte Aktivitätsänderung. Daraus ist zu schlussfolgern, dass während haptischer Explorationsanforderungen - mit dem expliziten Ziel der Stimuluserkennung - ein großes und kein singular lokalisiertes kortikales Netzwerk angeregt wird. Detailanalysen haben nachträglich ergeben, dass offenbar zentrale, parietale und okzipitale Kortexgebiete in besonderer Weise aktiviert werden.

Die regressionsanalytische Betrachtung zeigte, daß zwischen den Variablen Explorationszeit und mittlere z-transformierte Theta-Leistung der Behaltensphase (retention intervall), für die frontalen Elektroden Fp1, Fp2, F3, F7, F8, Fz, und zentrale Elektrode C3 ein signifikant linearer Zusammenhang nur für die Theta-Aktivität beobachtet werden konnte. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Theta-Leistung - in Abhängigkeit von der benötigten Erkennungszeit - für unterschiedlich komplexe haptischen Stimuli innerhalb derjenigen Versuchsphase, die nicht durch aktives Explorationsverhalten gekennzeichnet ist. Denn zusätzliche haptische oder visuelle Informationen über den Stimulus konnten während dieser Versuchsphase nicht aufgenommen werden. Weiterhin erfolgten in diese Phase keine Hand- oder Fingerbewegungen. Somit können die beobachteten Theta-Effekte nicht auf motorische Steuer- und Regelprozesse zurückgeführt werden. Vielmehr ist anzunehmen, daß während der Behaltensphase das Explorationsergebnis - d.h., die mentale Repräsentation der

Stimulusstruktur - für die nachfolgende zeichnerische Reproduktion aktiv im Arbeitsspeicher gehalten und das Ausmaß der Theta-Aktivität innerhalb der Behaltensphase vom Umfang dieser Speicherprozesse bestimmt wurde. Diese Annahmen erfolgen vor dem Hintergrund, daß sich mit zunehmendem Umfang der Stimulusmerkmale bzw. der Stimulusstruktur der Verarbeitungsaufwand erhöht, der einerseits von einem erhöhten Zeitaufwand für die haptische Exploration und andererseits von einer zunehmenden Beanspruchung des Arbeitsspeichers während der Behaltensphase begleitet wurde. Die Annahme einer abhängigen Beziehung der Theta-Leistung aufgrund von aktiven Speicherprozessen vor der zeichnerischen Wiedergabe wird durch die Beobachtung unterstützt, daß die Theta-Leistung während der haptischen Exploration über dem gesamten Kortex in Relation zur Ruhe-Baseline abnimmt (s.o.). Hinsichtlich der funktionellen Charakterisierung der Theta-Aktivität unterstützen somit die Ergebnisse die Annahme, daß die kortikale Theta-Aktivität unabhängig (!) von der jeweiligen Stimulusmodalität und konkreten perzeptiv-kognitiven Beanspruchungen im Rahmen handlungsrelevanter Gedächtnisaktivierung auftritt und mit dem Umfang der Stimulusinformationen kovariiert. Untersuchungsdesign und Ergebnisse sind ausführlich in Grunwald et al. (1999a), Grunwald (2001f) dargestellt.

Dynamik der elektrophysiologischen Korrelate der haptischen Informationsverarbeitung

Bislang wurde bei der Analyse hirnelektrischer Potentialänderungen während haptischer Wahrnehmungsprozesse der zeitliche Verlauf, die Dynamik der kortikalen Aktivitätsänderungen nicht berücksichtigt. Durch die Zusammenfassung der EEG-Daten aus den entsprechenden Versuchsphasen sind nur Aussagen über mittlere Aktivitätszustände möglich. Zeitliche Verlaufsänderungen der EEG-Parameter und deren Zuordnung zu Teilprozessen der haptischen Wahrnehmung können auf dieser Ebene nicht erfolgen. Doch in besonderer Weise ist diese Betrachtung von Bedeutung. Denn nur wenn es gelingt, dynamische Veränderungen des EEG-Signals Teilprozessen der Wahrnehmung zuzuordnen, ist eine Diskussion über die zugrundeliegenden psychophysiologischen Mechanismen und deren physiologische Korrelate sinnvoll. Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage, ob sich unterschiedliche Beanspruchungsprozesse im Verlauf der haptischen Exploration in Veränderungen von EEG-Parametern widerspiegeln und wie können diese Veränderungen nachgewiesen werden? Oder anders gefragt; kann die von einigen Autoren formulierte serielle Informationsverarbeitung während haptischer Wahrnehmung durch die Charakterisierung von Verlaufsänderungen des EEG während unterschiedlicher Phasen haptischer Explorationsanforderungen belegt werden? Für die eigenen Untersuchungen ließ sich daher die Hypothese ableiten, daß sich die kortikale Aktivierung zu *Beginn* der Exploration deutlich von der kurz vor *Abschluß* unterscheiden sollte. Wenn dem Wahrnehmungsprozess in unserem Experiment eine sukzessive Informationsverarbeitung zugrunde liegen sollte, dann müßte sich u.a. der unterschiedliche Bedarf an Speicherressourcen über den zeitlichen Verlauf in Veränderungen der spektralen Theta-Leistung widerspiegeln. Aus den vorausgehenden Ergebnissen zur Theta-Leistung während der Behaltensphase folgt, daß zu Beginn der Exploration und unabhängig von der Komplexität der Stimuli die Theta-Leistung deutlich unterhalb der Ruhe-Baseline generiert werden sollte. Die Theta-Leistung kurz vor Beendigung der Exploration sollte dagegen in Abhängigkeit von der Stimuluskomplexität im Vergleich zur Ruhe-Baseline erhöht sein.

Um diese Annahmen zu prüfen wurden im Rahmen der o.g. Untersuchung jeweils zwei Artefaktfreie EEG-Segmente 500ms nach Beginn (BI) der Explorationsbewegungen und 500ms vor Beendigung (EI) der Exploration ausgewählt und die spektrale Leistung für die o.g. Frequenzbereiche berechnet. Das Schema der Datenerhebung verdeutlicht Abbildung 1.

Die Analyse der EEG-Daten ergab, daß zu Beginn der haptischen Exploration direkt proportio-

nale Beziehung zwischen der zu diesem Zeitpunkt generierten Theta-Leistung und der Stimuluskomplexität bestand. Das kortikale Aktivierungsniveau zu Beginn der Exploration wird somit charakterisiert durch eine deutliche Abnahme der spektralen Theta-Leistung gegenüber der Ruhe-Baseline, die nicht mit der Stimuluskomplexität korrespondiert. Es ist anzunehmen, daß diese Verhältnisse einen Zustand höchster Aufmerksamkeitsfokussierung auf den zu explorierenden Stimulus repräsentieren und dass hierbei noch keine Differenzierung des Stimulusmaterials erfolgte. Anders formuliert: zu Beginn der Exploration haben die Probanden noch keine relevanten, die Komplexität der Stimulusstruktur betreffenden Informationen verarbeiten können, so dass zu diesem Zeitpunkt auch noch keine differentielle Ressourcenbeanspruchung erfolgen konnte.

Dieser Zustand ändert sich drastisch kurz vor Abschluß der Exploration. Die Probanden haben zu diesem Zeitpunkt die Stimulusstruktur vollständig erkannt, das Ergebnis der Objekterkennung ist im Arbeitsgedächtnis gespeichert. Wie erwartet variiert hierbei die Theta-Leistung in deutlicher Abhängigkeit von der Explorationszeit. D.h., je größer die zu speichernde Informationsmenge ist, desto höher ist die Theta-Leistung in dieser Untersuchungsphase. Das folgende Schema (Abbildung 2) stellt die bisherigen Ergebnisse zur Theta-Leistung bei haptischer Exploration unterschiedliche komplexer Stimuli vereinfachend dar. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse erfolgte unter (Grunwald et al. 1999a, Grunwald et al. 2001a, Grunwald 2001f).

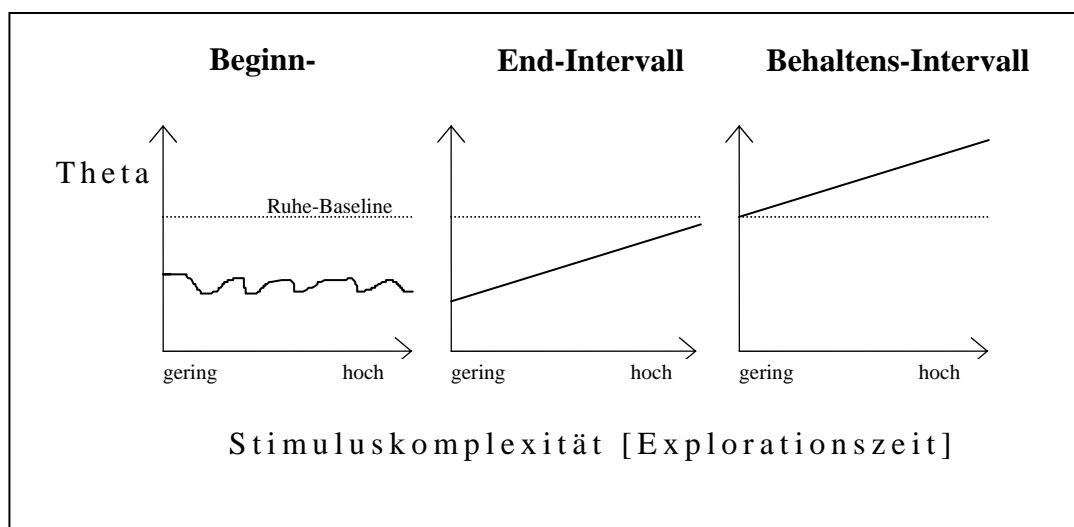


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Theta-Leistung während der Ruhe-Baseline, zu Beginn und kurz vor Abschluß der haptischen Exploration sowie während des Behaltensintervalls bei unterschiedlich komplexen Stimuli.

Beziehungen zwischen Körperschemarepräsentation und haptischer Wahrnehmung – Gestörte haptische Wahrnehmung bei Patienten mit Anorexia nervosa –

Die o.g. Studien wurden mit zahlreichen Studenten durchgeführt, die beinahe ohne Ausnahme, die präsentierten Stimuli adäquat erkannten und zeichnerisch reproduzierten.

Nur eine von ca. 40 Probanden zeigte zu unserer Überraschung, dass sie die Anforderungen überhaupt nicht bewältigte. Die Reproduktionen zeigten erhebliche Abweichungen von der Stimulusstruktur und ihre Explorationszeiten lagen weit über dem Durchschnitt. Die Probandin war eine intelligente Studentin im dritten Studienjahr; zeigte gute Leistungen und war in keiner Weise neurologisch auffällig. Sie war jedoch extrem dünn und zeigte eine veränderte Hautstruktur. Diesen un-

erwarteten und mit dem vorhanden neurologisch-psychiatrischen Wissen nicht erklärbar Einzelbefund wollten wir aufklären und so folgten eine Reihe von theoretischen Überlegungen und experimentellen Studien, die in das Feld der klinisch-experimentellen Psychologie führten. Der lange und komplizierte heuristische Prozess kann hier nicht Gegenstand der Erörterung sein, aber in seinen Folgen ist er eine notwendige Konsequenz, aus den Grundlagenstudien klinisch-anwendungsbezogene abzuleiten.

Anorexia nervosa (AN) ist eine der schwersten psychischen Störungen überhaupt. Diese Erkrankung betrifft vor allem junge Mädchen und ca. 10-15 % sterben im Verlauf der Erkrankung an den körperlichen Folgen (Birmingham 2005). Die Erkrankung beginnt oft in der Pubertät und in der Regel zeigen die Patienten trotz extremen Untergewichts keine Krankheitseinsicht. Die Ursachen für die Entstehung der Anorexia nervosa sind bis heute nicht vollständig aufgeklärt. Übereinstimmend werden multifaktorielle Bedingungen für die Entstehung der AN angenommen; neben psychischen und sozialen Faktoren werden auch genetische, und pathophysiologische Prozesse diskutiert. Übereinstimmend wird beobachtet, dass AN-Patienten ihre eigenen Körpermaße in der Regel dramatisch überschätzen. Diese Störung der Körpereigenwahrnehmung wird *Körperschemastörung* (body schema disturbance) bezeichnet. Ebenso ist das Körperbild, die verbalisierbaren Einstellungen und Vorstellungen vom eigenen Körper bei dieser Patientengruppe schwer gestört. Charakteristisch ist, dass auch nach vielen therapeutischen Interventionen, beide Störungsformen oft unverändert bleiben und mit einer ungünstigen klinischen Prognose korrespondieren.

Weil die Körperbild- und Körperschemastörung bei Anorexia nervosa sehr kritische Faktoren darstellen und bislang die Ursachen dieser Störungen nicht vollständig geklärt sind, sowie effektive Therapieansätze zur Behandlung dieser Störungen fehlen, sollte diesem Aspekt der Erkrankung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, ob es Zusammenhänge zwischen der Körperschemastörung und der haptischen Wahrnehmung bei Anorexia nervosa gibt. Es werden experimentelle und neurophysiologische Daten diskutiert und zum Abschluß wird ein Behandlungsversuch mit dem Ziel der Reorganisation des Körperschemas vorgestellt.

Die wissenschaftlichen Versuche, die mentale Repräsentation, die bewusste und unbewusste Abbildung und Wahrnehmung des eigenen Körpers zu erfassen, besitzen eine lange Tradition. Im Verlauf dieser Entwicklung, an der verschiedene Wissenschaftsdisziplinen beteiligt sind, haben sich unterschiedliche Konzepte und damit auch eine Vielzahl von Begriffen gebildet, die nicht einheitlich genutzt werden. Dies gilt besonders für die Begriffe „Körperschema“ und „Körperbild“, die sowohl im englischen als auch im deutschen Sprachraum unterschiedliche genutzt werden. Eine vollständige begriffshistorische Analyse kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Hierzu siehe Röhrich et al. (2005).

Der deutsche Physiologe Hermann Munk (1839-1912) vermutete als Erster, daß unser Körper als mentale Repräsentation im Gehirn, speziell im parietalen Kortex, abgebildet ist (Munk 1890). 1908 berichtet der Psychiater und Neurologe Arnold Pick (1851-1924) von neurodegenerativen Erkrankungen, bei denen die Patienten nicht in der Lage sind, nach Aufforderung auf bestimmte eigene Körperteile zu zeigen. Pick vermutete, dass die Körperrepräsentation bei diesen Patienten gestört ist [Pick 1908, 1922).

Head und Holmes (1911-1912) führten den Begriff „body schema“ ein. Sie gingen davon aus “that any sensory inputs generated a constantly changing postural model of one’s own body, which actively monitors body posture and movements”. Paul Ferdinand Schilder (1886 -1940) übernimmt den Begriff von Head and Holmes und somit erscheint im deutschen Sprachgebrauch der Begriff „Körperschema“ (Schilder 1923). Jedoch nutzt Schilder für die mentale Repräsentation des eigenen

Körpers auch den Begriff „Körperbild“ (body image) synonym zum Begriff „Körperschema“ (body schema). Unklar wird von beiden Wissenschaftlern angegeben, ob es sich bei den Begriffen um Prozesse handelt, die dem Bewusstsein zugänglich sind oder nicht.

Nachfolgende Wissenschaftler aus den Bereichen der Psychologie, Philosophie, Medizin und der Hirnforschung führen weitere Begriffe in die Diskussion um das mentale Abbild des Körpers ein: body concept, body experience, body perception, body image schema ect. Die erhebliche Konfusion der Begriffe hat erst in den letzten Jahren dazu geführt, dass man sich fächerübergreifend um eine einheitliche Terminologie bemüht. Vor diesem Hintergrund kann man in Anlehnung an H.B.Coslett (1998) den Begriff Körperschema nutzen, um eine abstrakte, in Echtzeit generierte interne Repräsentation des eigenen Körpers im Raum zu bezeichnen, die durch verschiedene sensorische Einflüsse gespeist wird (Muskeln, Gelenke, Sehnen, Haut, Vestibulärapparat, visuelles und akustisches System). Die Repräsentation ist danach ein dreidimensionales, dynamisches Abbild des Körpers im Raum und seiner biomechanischen, motorischen Eigenschaften und Leistungsbereiche.

Dagegen bezeichnet der Begriff „Körperbild“ die bewußtseinsfähige Repräsentation des Körpers und der individuellen Einstellungen zum Körper.

Beide Terme unterscheiden sich somit wesentlich durch die inhaltliche Bestimmung dessen, was sie bezeichnen sollen. Entsprechend unterschiedlich ist somit auch der methodisch mögliche Zugang zur wissenschaftlichen Untersuchung entsprechender Störungen. So ist es im Fall der Analyse von Körperbildstörungen möglich, sprachliche Urteile der Patienten zu nutzen. Patienten können im Rahmen von Fragebogenuntersuchung oder mittels visueller Projektionsverfahren einschätzen, welche Einstellungen sie gegenüber ihres Körpers besitzen und ob sie positive oder negative Gefühle mit ihrem Körper assoziieren. Auf diese Weise können ebenso Einschätzungen der eigenen räumlichen Körperdimensionen erfasst werden.

Die Analyse von Körperschemastörungen ist dagegen weitaus schwieriger, da dieses Konzept den internen mentalen Aspekt der Körperrepräsentation bezeichnet und dieser nicht dem Bewusstsein der untersuchten Person zugänglich ist. Dementsprechend besitzen wir keine Möglichkeit der direkten sprachlichen Kodierung von Körperschemaprozessen, sondern wir müssen aufgrund von Handlungs- und Wahrnehmungsveränderungen auf mögliche zugrundeliegende Störungen des Körperschemas schließen.

Besonders umfangreiche Studien liegen hierzu aus dem Bereich der Neurologie vor. Insbesondere bei Schädigungen des inferior parietalen Kortex wurden Körperschemastörungen unterschiedlicher Ausprägung beobachtet (Haggard 2005). Die Wahrnehmungs- und Verhaltensstörungen unterscheiden sich je nachdem, welche Seite des parietalen Kortex geschädigt wurde. So zeigen Neglect-Patienten mit einer Läsion des rechten Parietalkortex eine vollständige Vernachlässigung ihrer linken Körperhälfte (kontralateraler Neglect). Sie nehmen, z. B., ihren linken Arm nicht wahr und rasieren sich auch nur die rechte Gesichtshälfte. Nicht nur die Extremitäten der linken Körperseite werden von diesen Patienten nicht wahrgenommen, sondern auch alle Gegenstände außerhalb ihres Körpers, sofern sie sich in der linken Sehfeldhälfte befinden. So zeichnet ein Neglect-Patient nur die rechte Hälfte des Ziffernblatts einer Uhr; die linke Seite nicht. Taktile Stimulationen auf der linken Körperseite nehmen diese Patienten nicht wahr. Überdies können die Patienten nicht verstehen, weshalb sie sich in medizinischer Behandlung befinden, da sie keine Krankheitseinsicht generieren können (Anosagnosie). Eine Vielzahl von speziellen Funktionsausfällen ist mit entsprechenden links- oder rechtseitigen Läsionen des parietalen Kortex verbunden. Die unterschiedliche Qualität der Körperschemastörungen bei linksseitiger oder rechtsseitiger Schädigung kann nach dem funktionalen Model von Kolb und Wishaw (1993) and Haggard (2003) damit erklärt werden, dass die linke Seite des parietalen Kortex eine abstrakte Repräsentation des Körpers und seiner Raumposition generiert und die rechte Seite die hierfür nötigen multisensorischen Integrationsfunktionen durchführt.

Der rechte parietale Kortex (rPK) erfüllt demnach im Rahmen der Körperschemakodierung diejenige Integration der sensorischen und motorischen Informationen, wie sie auch bei der haptischen Wahrnehmung erforderlich sind. Der rPK kann somit als ein entscheidender Analysator und Integrator bei der Verarbeitung sensorischer und motorischer Informationen verstanden werden. Die Reizverarbeitung im Rahmen der haptischen Wahrnehmung ist demnach unmittelbar an die Verarbeitungs- und Integrationsfunktionen des rPK gebunden. Vor diesem Hintergrund kann auf kortikaler Ebene ein direkter Zusammenhang zwischen der Funktion des rPK und der Körperschemakodierung, sowie der haptischen Wahrnehmung angenommen werden.

Mit Bezug auf diese Zusammenhänge wurde für die eigenen Studien an Patienten mit Anorexia nervosa die Hypothese formuliert, dass bei anorektischen Patienten eine funktionelle Störung rechts-parietaler Kortexgebiete vorliegt, die zu deutlichen Einschränkungen der haptischen Wahrnehmung führt. Eingeschränkte haptische Wahrnehmungsleistungen müssten sich demnach einerseits auf der Verhaltensebene - im Sinne schlechter Reproduktionsleistungen im o.g. Tiefenreliefparadigma - widerspiegeln und andererseits auch in elektrophysiologischen Korrelaten nachzuweisen sein. Eine funktionelle Beeinträchtigung rechts-parietaler Gebiete, die mit einer höheren Ressourcenbeanspruchung korrespondiert, sollte sich in einer deutlich verminderten Theta-Leistung während haptischer Anforderungen zeigen.

Für die Untersuchung der o.g. Hypothesen verwendeten wir das gleiche Paradigma, wie in den vorausgehenden Untersuchungen an gesunden Probanden. Die Analyse der Verhaltensdaten ergab, dass anorektische Patienten zum Teil erhebliche Schwierigkeiten zeigten, die präsentierten Tiefenreliefstimuli adäquat zu reproduzieren (s. Abbildung 3). Diese Beeinträchtigung konnte an der derselben Population auch bei erhöhtem Körpergewicht, ein Jahr nach Entlassung aus der Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie der Universität Leipzig, nachgewiesen werden. Neben der verminderten haptischen Wahrnehmungsleistung zeigten die Patienten eine längere Explorationszeit im Vergleich zur gesunden Kontrollgruppe.

Die Analyse der EEG-Daten ergab, dass im Theta-Frequenzbereich über dem rechten parietalen Kortex sowie über dem frontalen Kortex eine deutliche Aktivitätsdifferenz zwischen der Kontroll- und Patientengruppe während der haptischen Explorationsphase zu beobachten war. Dieser Effekt konnte ebenfalls bei der Wiederholungsuntersuchung nach einem Jahr festgestellt werden (Grunwald et al. 1999b, Grunwald et al. 2001b, Grunwald et al. 2001d, Grunwald et al. 2001e, Grunwald et al. 2002, Grunwald et al. 2004).

A

task	ba	ho	le	les	vez	zie	sch	to	blu	zi	zoe	ke	mei

B

task	kup	kuh	hof	tor	fre	nau	par	soj	sou	lüb	fun	sla	mey

Abbildung 3: Zeichnerische Reproduktionen der haptisch explorierten Tiefenreliefstimuli durch A) Kontrollgruppe, B) Patienten mit Anorexia nervosa.

Damit zeigen beide Analyseebenen, dass mindestens eine funktionelle Beeinträchtigung der Integrationsfunktionen des rechten parietalen Kortex bei anorektischen Patienten angenommen werden kann. Die Untersuchungen können jedoch keinen Aufschluß darüber geben, ob solcherlei Beeinträchtigungen im Verlauf der Erkrankung entstanden sind oder eine ursächliche Bedingung für das Entstehen der Anorexia nervosa darstellen. Für derartige Fragestellungen sind aufwendige Längsschnittuntersuchungen erforderlich.

Haptimeter – Neuropsychologische Erfassung von Körperschemastörungen

Zur Qualifizierung multisensorischer Integrationsstörung bei Patienten mit AN im Rahmen der haptischen Wahrnehmung wurden in den vorausgehenden Studien haptische Erkennungsleistungen anhand von Tiefenreliefs untersucht. Eine wesentliche methodische Einschränkung dieses Verfahrens besteht in dem geringen Skalenniveau der Verhaltensdaten. Die Beurteilung der Qualität der Wahrnehmungsleistungen bzw. deren Einschränkungen basiert auf der subjektiven Einschätzung der zeichnerischen Reproduktionen der Probanden auf der Basis einer vierstufigen Ratingskala durch unabhängige Beurteiler. Weiterhin gestattet diese experimentelle Anforderung nicht die kontrollierte Prüfung hemisphärenspezifischer Belastung bei der Verarbeitung haptischer Reize. Um diese methodischen Einschränkungen des neuropsychologischen Nachweises einer rechts-parietalen Funktionsstörung weitgehend aufzuheben, wurde ein neues experimentelles Paradigma entwickelt (Haptimeter, siehe Abbildung 4). Dieses Paradigma sollte gewährleisten, dass unterschiedliche Qualitäten von Körper-Raum-Lage-Informationen, in einem Aufgabentyp der rechten Hemisphäre und in einem anderen Aufgabentyp der linken Hemisphäre zugeführt werden. Sollte ein Verarbeitungsdefizit des rechten parietalen Kortex bzw. generell der rechten Hemisphäre bestehen, wäre zu erwarten, dass bei rechts-hemispherischer Anforderung die Fehlerrate der anorektischen Patientinnen erhöht ist.

Als Untersuchungsparadigma wurde die Winkelabweichung einer vorgegebenen Winkeleinstellung (Soll-Winkel) in Bezug auf einen zweiten Winkel (Ist-Winkel) genutzt. Die Aufgabe bestand darin, bei geschlossenen Augen und ohne Zeitbegrenzung die Winkeleinstellung des Soll-Winkelschenkels durch explorative Bewegungen einer Hand zu erfassen und an einem zweiten Winkelschenkel aktiv zu reproduzieren. Die Winkelmaße der Soll-Werte wurden 5fach gestuft bei zufälliger Reihenfolge und 2facher Stufung der Aufgabenart (parallele vs. spiegelbildliche Anordnung). Es wurden pro Person jeweils 10 Aufgaben mit Präsentation des Soll-Winkelschenkels auf der rechten Seite der Anordnung (rechte Hand) und 10 Aufgaben mit Präsentation auf der linken Seite (linke Hand) durchgeführt. Die experimentelle Anordnung nutzte digitale Winkelmesser mit 100facher Genauigkeit, um die Differenz zwischen Soll- und Ist-Winkel exakt zu bestimmen. Die Untersuchung wurde mit 16 anorektischen Patienten und einer altersgleichen Kontrollgruppe durchgeführt.

Das wesentlichste Ergebnis dieser Studie ist, dass ein genereller Gruppeneffekt hinsichtlich der Winkeldifferenzen zwischen der Patienten- und Kontrollgruppe zu beobachten war, der allerdings nur durch die Abweichungen bei den rechts-Aufgaben-Typen bestimmt wurde. D.h., die mittlere Abweichung des Ist-Winkels vom voreingestellten Soll-Winkel betrug bei der Patientengruppe über alle Aufgaben 5.13° , die der Kontrollgruppe 4.29° . Eine signifikante Winkelabweichung in Relation zur Kontrollgruppe bezogen auf den Aufgabentyp (rechts/links) zeigte die Patientengruppe jedoch nur für diejenigen Aufgaben, bei denen der Wert des Ist-Winkels mit der rechten Hand an den des Soll-Winkels angepasst werden musste. Die mittleren Winkelabweichungen der Kontrollgruppe betragen bei diesem Aufgabentyp 4.17° , bei der Patientengruppe 5.38° .

Zur Interpretation der Ergebnisse wird das neuropsychologische Verarbeitungsmodell des direkten Informationszugriffs (direct access model) genutzt. Es geht davon aus, dass Informationen in derjenigen Hemisphäre dominant kodiert und verarbeitet werden, in die sie zuerst gelangen. Für die Kodierung der Soll-Werte bei den rechts-Aufgaben bedeutet dies, dass die Soll-Wert-Informationen der linken Hand in der rechten Hemisphäre repräsentiert werden. Gleichzeitig erfolgen im Zusammenspiel zwischen dem rechten sensomotorischen und parietalen Kortex die Vergleichs- und Entscheidungsprozesse hinsichtlich der Informationen des statischen Soll-Wertes und den dynamischen

Einstellwerten der rechten Hand. Innerhalb dieses Aufgabentyps werden somit zwei Prozesse *gleichzeitig* rechtshemisphärisch repräsentiert. Die Anforderungen der rechts-Aufgaben erfordern vom parietalen Kortex die geordnete Analyse sowohl der Soll-Werte als auch der Vergleichsdaten, einschließlich der Entscheidungsprozeduren in funktioneller Kooperation mit dem frontalen Kortex. Werden für diese Teilprozesse aufgrund einer funktionalen Störung im rechten PK nicht genügend Ressourcen bereitgestellt, verläuft die gleichzeitige Kodierung der eintreffenden Winkelinformationen und der nachfolgende Vergleich mit den Soll-Werten fehlerhaft. Die Folge hiervon sind erhebliche Winkeldifferenzen zwischen gefordertem Soll- und erreichtem Einstellwert wie sie bei der anorektischen Patientinnengruppe zu beobachten waren. (Details der Untersuchung sind in Grunwald et al. 2002 dargestellt).



Abbildung 4: Apparatur (Haptimeter) zur Durchführung des Winkel-Paradigma. Elektronischer Winkelmesser (b) und Anzeige (a), Winkelschenkel (c), manuelle digitale Zeitmessung (d). Die Aufgabe der Probanden besteht in der Reproduktion der vorgegebenen Winkelposition ohne visuelle Informationen.

Überschwellige Körpereigenreize zur Reorganisation von Körperschemastörungen

Die o.g. Ergebnisse unterstützen die Annahme, daß bei Anorexia nervosa nicht nur eine Störung des Körperbildes vorliegt, sondern auch eine Störung des Körperschemas. Die auffälligen EEG-Veränderungen über dem rechten parietalen Kortex während haptischer Anforderungen, die schlechten Reproduktionsleistungen und auch die größeren Differenzen im Winkelparadigma deuten darauf hin, dass die multisensorischen Integrationsfunktionen bei Patienten mit Anorexia nervosa gestört sind. Diese Beeinträchtigung ist wahrscheinlich eine direkte Folge einer funktionellen Störung des rechten parietalen Kortex, insbesondere seiner multisensorischen Integrationsfunktionen. Doch auch fronto-kortikale Gebiete können an dieser Integrationsstörung beteiligt sein. Folgt man dieser Hypothese, dann besteht bei Anorexia nervosa eine Körperschemastörung auf der Basis einer rechts-parietalen Funktionsstörung. Bislang ist jedoch unklar, ob dieser Störung eine Folge der Erkrankung oder die Ursache derselben ist.

Als Arbeitshypothese ist denkbar, dass sich das funktionelle Defizit im Verlauf des kindlichen Wachstums entwickelt hat und somit eine Ursache der Entstehung der Anorexia nervosa darstellt. Möglicher Weise besteht ein Zusammenhang zwischen dem Umfang der sozial-körperlichen Stimulation in der frühen Kindheit und der funktionellen Entwicklung der multisensorischen Integration des rechten parietalen Kortex. So können Kontaktmangel als auch Gewalterfahrungen hirnormani-

sche Fehlentwicklungen begünstigen. Dass die Verarbeitung taktiler und haptischer Reize zu relevanten Veränderungen der Körperrepräsentation und des Körperschemas führen, haben verschiedene Studien nachgewiesen (Haggard 2003, Maravita 2004).

Ebenso kann man annehmen, dass bereits vorgeburtliche oder genetische Einflüsse zu dieser Fehlentwicklung geführt haben könnten.

Unabhängig davon, auf welche Weise die beschriebene multisensorischen Integrationsstörungen bei Anorexia nervosa entstehen, ergibt sich zwangsläufig die Frage wie und auf welche Weise das klinische Bild der Körperschemastörung positiv verändert werden kann. Da diese basale Struktur unsere Köpereigenwahrnehmung sprachlichen und kognitiven Aspekten nicht zugänglich ist, so muß eine Interventionsstrategie, die auf die Reorganisation des Körperschemas gerichtet ist, eine andere Form der Stimulation nutzen. Das Ziel dieser Stimulation sollte es sein, eine überschwellige sensorische Stimulation des gesamten Körpers zu erreichen, wobei diese nicht passiv erzeugt wird (z.B. durch Massage), sondern diese Stimulation sollte bewegungsabhängig durch den Patienten selbst generiert werden. Das entscheidende und funktionale Moment ist hierbei die direkte Abhängigkeit der Körperstimulation von den aktiven Körperbewegungen des Patienten. Die überschwellige Körperstimulation soll demnach zeitlich und örtlich mit den Köpereigenbewegungen kohärent sein. Vergleichbar ist diese Form der Stimulation mit dem engen Körperkontakt - wie er zwischen einem Neugeborenen und der Mutter normalerweise besteht.

Um nun eine ähnlich intensive Form der Körperstimulation zu erreichen, nutzten wir in einer Pilotstudie einen konventionellen, maßgeschneiderten, halblangen Neoprenanzug. Die Teilnehmerin an dieser Anwendungsstudie war eine Langzeitpatientin (19 Jahre alt), bei der mehrere klassischen Behandlungsformen der Psychotherapie keinen Erfolg hatten. Die Patientin, zum damaligen Zeitpunkt Studentin, trug den Anzug im normalen Lebenskontext pro Tag jeweils drei mal, je eine Stunde. Die Applikationsphase betrug 15 Wochen. Die gesamte Studienzeit betrug 13 Monate. Im Vorfeld, während der Applikationsphase und nach Abschluß, wurden regelmäßig EEG-Messungen zur Erfassung der Ruheaktivität durchgeführt. Ebenso wurden die Winkeldifferenzen im Winkel-Paradigma regelmäßig ermittelt.

Während der Applikationsphase zeigte sich im Vergleich zur Basisreferenz der Anfangsuntersuchungen, daß sich die rechts-hemisphärische Hirnaktivität im Theta-Band zunehmend verstärkte. Man kann von einer deutlichen Aktivierung der rechts-parietalen Gebiete anhand dieser Daten sprechen. Besonders eindrucksvoll veränderten sich die Winkeldifferenzen im Verlauf der Applikationsphase. Die Differenzen verringerten sich innerhalb der Applikationsphase dramatisch (obgleich die Patientin keinerlei Rückmeldung über ihre Ergebnisse erhielt). Beide Parameter zeigten demnach innerhalb der Tragephase, daß diese Form der besonderen Körperstimulation offenbar dazu beiträgt, die Integrationsfunktionen des rechten-parietalen Kortex anzuregen. Die positiven Veränderungen spiegelten sich auch im Erleben der Patientin wider; die parallelen Tagebuchprotokolle beschreiben zum Beispiel, daß sich die Patientin wohl fühlt, wenn sich ihr Körper nach Nahrungsaufnahme erwärmt. Von einer angezielten Reorganisation des Körperschemas kann jedoch nicht gesprochen werden. Die partiellen Erfolge waren leider nach der Applikationsphase nicht stabil. Regelmäßige Nachuntersuchen ergaben, daß sich die beobachteten Positiveffekte über einen Zeitraum von 6 Monaten nach Beendigung der Tragephase wieder auf das Ausgangsniveau der Voruntersuchung zurück entwickelten. Details der Studie sind in Grunwald & Weiss (2005) dargestellt.

Wie sind die Daten dieser Pilotstudie nun zu bewerten? Auch wenn es sich in diesem Fall nur um eine Patienten handelt, unterstützen die Daten die Annahme, daß mit dieser Stimulationsform ohne Medikation und ohne Nebenwirkungen die Körperschemastörung bei Anorexia nervosa positiv ver-

ändert werden kann. Um stabile Effekte zu erzielen, ist es sicher notwendig, die Körperstimulation bei jüngeren Patienten im Rahmen eines komplexen klinisch-therapeutischen Settings anzuwenden. Erfreulicher weise haben die Kollegen der Kinder- und Jugendpsychiatrie der Charité in Berlin das Stimulationskonzept des Neoprenanzuges in ihr körpertherapeutisches Programm integriert und sie berichten von sehr positiven Effekten, besonders bei jungen Patienten. Welchen Anteil hierbei die Körperstimulation und psychotherapeutischen Interventionen haben werden zukünftige Forschungen noch zeigen müssen. Es ist jedoch zu hoffen, dass sich die klinisch-experimentelle Forschung zukünftig verstärkt mit den verschiedenen sozialen und biologischen Einflußfaktoren auf die Entwicklung des Körperschemas beschäftigen wird. Ohne Zweifel liegt darin ein wesentlicher Schlüssel für das Verständnis der Erkrankungsursachen der Anorexia nervosa und auch anderer psychischer Störungen.

Haptikforschung in angewandten Industriebereichen und Robotik

Nachdem grundlagenorientierte und klinische Aspekte der haptischen Wahrnehmung dargestellt wurden, soll nun im folgenden Abschnitt auf einige neue und ausgesprochen aktive Forschungszweige der angewandten Haptik eingegangen werden, die sich in verschiedenen industriellen Kontexten und praktischen Bezügen innerhalb der letzten Dekaden entwickelt haben.

Die Anwender- und nutzerorientierte Gestaltung von Industrieprodukten hat sich bis in die Achtziger Jahre hinein fast ausschließlich an visuellen Effekten orientiert. Aspekte der Handhabung, der Ergonomie spielten eher eine untergeordnete Rolle. Nach den Erfahrungen des Autors zweifelten wahrscheinlich 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 sie 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 Oberflächenhaptik 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 nur 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. Beispielhaft

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 sogenannten „Haptischen-Markenbildung“ besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Ziel dieser speziellen Bemühungen ist es, haptische Gedächtnisinhalte mit bestimmten Markenprodukten zu verknüpfen, so daß sich mit den Erfahrungen der praktischen Handhabung eine relevante Konfiguration der Materialhaptik im Gedächtnis der Verbraucher etabliert. In vielen Produktbereichen haben diese Bemühungen längst den Verbraucher erreicht, ohne dass er ahnt, dass sich hinter den erfahrenen 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 zögerlich nähert, so zeigen die genannten Industriebereiche keinerlei Berührungsängste bei der Nutzung und Manipulation dieses komplexen und zugleich elementaren Sinnessystems.

Ebenso unbeeindruckt von der Größe und Komplexität des Tastsinnessystems ist ein Forschungs- und Anwendungsbereich, der in den bisherigen Erörterungen und auch im öffentlichen Bewußtsein kaum reflektiert wird. Dabei sind es die vielfältigen Gebiete der Robotik und diejenigen der virtuellen Haptik, die heute ohne Zweifel den weltweit größten Anteil an der aktuellen - wenn auch technisch orientierten - Tastsinnesforschung darstellen. Eine weltweite Gegenüberstellung der Arbeitsgruppenanzahl dieser Fachgebiete mit den klassisch psychologisch-psychophysiologisch orientierten ergab, daß heute ca. 60% der „Haptikforscher“ in den o.g. 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 besondere 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 aktuell die Etablierung eines technisch vermittelten Tastsinnessystems, das spezifische Beiträge zur Raumerkennung und zur optimierten Bewegungssteuerung des autonomen Systems liefern soll (s. 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 Reproduktion und technischen Umwandlung der sensorischen Prinzipien einzelner Rezeptoren allein wird dieses Vorhaben nicht gelingen können. Jedes biologische Tastsinnessystem arbeitet, wie wir be-

reits oben dargestellt haben, 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 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 Anwendungsbereich der Tastsinnesforschung, der als *virtuelle Haptik* zeichnet wird. Dieser schon zur eigenständigen Technologie entwickelte Begriff vereint unterschiedliche Versuche, haptische Wahrnehmungen durch geeignete externe, virtuelle Stimulatoren zu erzeugen. Die Bandbreite reicht von Aktuatoren, die direkt auf die menschliche Haut/Gelenk/ Muskulatur einwirken und hierdurch haptische Empfindung von virtuellen Objektberührungen auslösen (z.B. Phantom der Firma Sensable) 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 optischen und akustischen Signalen, so daß erstaunliche Wahrnehmungseffekte erzielt werden können. Die relative Präzision dieser Systeme wird insbesondere bei virtuellen chirurgischen Trainingssystemen deutlich. Der Operateur kann mithilfe 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 von angehenden Chirurgen werden solche Trainingssysteme weltweit eingesetzt. Die realen chirurgischen Instrumente sind dabei mit einer mechanisch-elektronischen Struktur verbunden, die entsprechende haptische Eindrücke durch Vibrations- und Kraftmomente simuliert. Die zeitgleiche Genierung der optischen Bewegungsdaten in einer virtuellen Gewebe- und Organszenarie komplettiert die haptische Simulation. Weitere Einsatzgebiete der virtuellen Haptik werden beispielhaft in Grunwald (2008) vorgestellt.

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 auf das Hand-Finger-System notwendig sind. Diese könnten jedoch zukünftig z.B. durch steuerbare Polymere wesentlich verkleinert und damit optimaler gestaltet werden. Grundsätzlich wird dieser Technologiebereich noch lange nicht erschöpft sein, sondern, wie am Beispiel der Ultraschallapplikation bereits sichtbar wird, stehen der Perfektionierung haptisch virtueller Szenarien nur unterlassene Versuche neuer technischer Umsetzungen im Wege. Ebenso lassen auch die verschiedenen militärischen Anwendungsbereiche der virtuellen Haptik vermuten, daß die Richtung und die Dynamik der zukünftigen Entwicklungen längst nicht abzusehen ist.

Trotz oder gerade wegen der ergebnisreichen Entwicklungen bisher, ist zu erwarten, das die Ingenieurwissenschaften im Bereich der Robotik und virtuellen Haptik erkennen werden, dass die Entwicklung adäquater technischer Aktor- und Sensorsysteme letztlich eine noch bessere Kenntnis der biologischen Grundlagen des natürlichen Systems erfordert. Insofern müssen Technikwissenschaften und Humanwissenschaften viel stärker als bisher kooperativ miteinander vernetzt werden. Denn die Humanwissenschaften sind methodentechnisch bei der Erforschung des Tastsinnessystems 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 methoden-technischen 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 mithilfe von Bewegungssensoren möglich, die eine geringe Genauigkeit aufweisen. Aufgrund 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 feststellen, daß die haptische Objektexploration von motorischen Ruhephasen (explorative stops) der Hände und Finger begleitet wird, die eine durchschnittliche Dauer von ca. 30-100ms 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 diese Studienergebnisse 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 vorangebracht werden, wenn neue und hochsensible Sensorsysteme in die aktuelle Haptikforschung Einzug halten. Human- und Technikwissenschaften sind demnach gerade bei der Erforschung des Tastsinnessystems in besonderer Weise aufeinander angewiesen. Denn sosehr 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.

Es 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.

Referenzen:

1. Birmingham CL, Su J, Hlynsky JA, Goldner EM, Gao M. (2005): The mortality rate from anorexia nervosa. *International Journal of Eating Disorders*, 38 (2), 143-6.
2. Blum, D. (2002): *Harry Harlow: Love at Goon Park: Harry Harlow and the Science of Affection*. Perseus Publishing.
3. Bryan, G.K., Riesen, A.H. (1989): Deprived Somatosensory-Motor Experience in Stump-tailed Monkey Neocortex: Dendritic Spine Density and Dendritic Branching of Layer IIIB Pyramidal Cells. *The Journal of Comparative Neurology* 286: 208-217.

4. Coslett, H.B. (1998): Evidence for a disturbance of the body schema in neglect. *Brain Cogn.*, 37(3), 527-44.
5. Damon, W. (Ed.) (2006): *Handbook of Child Psychology*. Wiley.
6. Dessoir, M. (1892): Über den Hautsinn. *Arch. f. Anat. u. Physiol., Physiol. Abt.*, 175–339.
7. Essman, W.B. (1971): Neurochemical changes associated with isolation and environmental stimulation. *Biological Psychiatry*, 3: 141.
8. Gibson JJ. (1962). Observations on active touch. *Psych Rev*, 69: 477-491.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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.
19. Grunwald, M. (Ed.) (2008): Human Haptic Perception – Basics and Applications. Berlin, Basel, New York: Birkhäuser Verlag.
20. 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.
21. 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.
22. Grunwald, M., Weiss, T. (2005): Inducing sensory stimulation in treatment of anorexia nervosa. *Quarterly Journal of Medicine*, 98, 379-380.
23. Haeckel, E. (1909): Zellseelen und Seelenzellen. Leipzig: Alfred Kröner Verlag.
24. Haggard P, Wolpert DM (2005) Disorders of Body Schema. In: Higher-Order Motor Disorders, Ed. Freund, Jeannerod, Hallett & Leiguarda, Oxford: University Press.
25. Haggard P, Taylor-Clarke M, Kennett S. (2003): Tactile perception, cortical representation and the bodily self. *Curr Biol*. 4;13(5).
26. Head, H., & Holmes, G. (1911-1912): Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 102–254.
27. Helmholtz, H. von (1879): *Die Tatsachen in der Wahrnehmung*, Berlin: Hirschwald.
28. 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.
29. Hoffmann, Ch. (2001): Haut und Zirkel. Ein Entstehungsherd. Ernst Heinrich Webers Untersuchung „Über den Tastsinn“ In: Hagner, M. (Hg.) *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*. Frankfurt/M., Fischer. 191-226.
30. 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.
31. Katz, D. (1925): *Der Aufbau der Tastwelt*. Leipzig: Verlag von J. A. Barth.
32. 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.
33. Klimesch, W., Doppelmayr, M., Schimke, H. and Ripper, B. (1997) Theta synchronization and alpha desynchronization in a memory task. *Psychophysiology*. 34, 169-176.

34. Klix, F. (1993): *Erwachendes Denken*. Heidelberg: Spektrum Wissenschaftsverlag 1993.
35. Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (2003): *Fundamentals of Human Neuropsychology*. New York: Oxford.
36. Krause, W. (2000): *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Hogrefe Verlag.
37. Krens, I., Krens H. (Hrsg.) (2006): *Das Pränatale Kind: Grundlagen einer vorgeburtlichen Psychologie*. Vandenhoeck & Ruprecht 2006.
38. Leeuwenberg, E. (1968): *Structural Information of Visual Patterns*. Prais: Mouton Co.
39. Maravita, A., Iriki, A. (2004): Tools for the body (schema). *Trends Cogn Sci* 8(2):79-86.
40. Mecklinger, A. (1992): *Gedächtnissuchprozesse - eine Analyse ereigniskorrelierter Potentiale und der EEG-Spontanaktivität*. Weinheim: Psychologie Verlags-Union.
41. Munk, H. (1890): *Über die Functionen der gross Hirnrinde*, 2 Aufl. Berlin: Aug. Hirschwald.
42. Nakagaki, T., Yamada, H., Tóth, A. (2000): Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature*, 28;407 (6803):470.
43. Penrose, R. (2002): *Das Große, das Kleine und der menschliche Geist*. Spektrum - Akademischer Verlag.
44. Pick, A. (1908): *Über Störungen der Orientierung am eigenen Körper*. In: Pich A (Hrsg): *Arbeiten aus der deutschen psychiatrischen Klinik in Prag*. Berlin: Karger, 1-19.
45. Pick, A. (1922): *Störung der Orientierung am eigenen Körper*. *Psychologische Forschung*, 1,303–318.
46. 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.
47. Röhrich F, Seidler KP, Joraschky P, Borkenhagen A, Lausberg H, Lemche E, Loew T, Porsch U, Schreiber-Willnow K, Tritt K. (2005): *Konsensuspapier zur terminologischen Abgrenzung von Teilaspekten des Körpererlebens in Forschung und Praxis*. *Psychother Psychosom Med Psychol.*, 55(3-4), 183-90.
48. Schilder, P.F. (1923): *Das Körperschema*. Springer, Berlin.
49. Skramlik, E. von (1937): *Psychophysiologie der Tastsinne*. Bd. 1 u. II. *Archiv für die gesamte Psychologie*: 4. Ergänzungsband, Leipzig: Akad. Verlags-Gesellschaft.
50. Smith, C.U.M. (2000): *Biology of Sensory Systems*. Wiley.

51. Tero, A., Yumiki, K., Kobayashi, R., Saigusa, T., Nakagaki, T. (2008): Flow-network adaptation in *Physarum amoebae*. *Theory Biosci.* 127(2):89-94.
52. Verworn, M. (1889): *Psychophysiologische Protistenstudien*. Jena: Fischer.
53. Verworn, M. (1892): *Die Bewegung der lebendigen Substanz*. Jena: Fischer.
54. Weber, E.H. (1834): *De pulsu, resortione, auditu et tactu annotatines anatomicae et physiologicae*. Leipzig, Köhler.
55. Weber, E.H. (1835): Über den Tastsinn. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin*, p. 152-160.
56. 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.
57. Zubek, J. (Ed.) (1969): *Sensory deprivation: Fifteen years of research*. Appleton Century Crofts.

Adresse des Verfassers:

PD Dr. Martin Grunwald, Universität Leipzig, Paul-Flechsig-Institut für Hirnforschung, Haptik-Forschungslabor, Johannisallee 34, 04103 Leipzig
E-Mail: mgrun@medizin.uni-leipzig.de/ Web-Site: www.haptik-labor.de