

Digitale Bilder: Körpervisualisierungen durch bildgebende Verfahren in der Medizin

Britta Schinzel

**In Coy (Hrsg.): Bilder als technisch-wissenschaftliche Medien,
Workshop der Alcatel-Stiftung und des Helmholtzzentrums der HU Berlin**

Abstract:

Erst mit der Renaissance und ihrer der Zuwendung zu Humanismus und rationaler Welterfassung wurden Sektionen und Abbildungen des Körper-Inneren erlaubt, konnte der forschende Mensch sich selbst betrachten. Doch das Innere eines lebendigen Menschen (mit Ausnahme der Körperhöhlen) war vor der Erfindung der Röntgenstrahlen nur mittels invasiver Eingriffe zugänglich. Die neuen Möglichkeiten zur „optischen Invasion“ in den lebendigen menschlichen Körper überwinden scheinbar die Begrenzungen des Blickes durch Haut, Knochen und vor gelagerte Organe.

Zunächst sollen kurz medizintechnische Visualisierungsprozesse, die vor allem für die Darstellung von Hirnbildern verwendbar sind, auf physikalischer, physiologischer und informatischer Ebene dargestellt werden, wonach ein paar Bemerkungen über die Bildlichkeit so hergestellter Bilder angebracht sind. Im Anschluss daran soll ihre Wirkmacht sowohl im Erkenntnisprozess als auch gesellschaftlich und kulturell für die Konstitution von Menschen- und Körperbild, insbesondere auf unsere Vorstellungen des Denkens problematisiert werden.

I Technische Verfahren zum Blick in den Körper

Bei bildgebenden Verfahren zur Untersuchung der inneren Struktur von Objekten werden akustische (Ultraschall) oder elektromagnetische Wellen (CT, PET, SPECT, MRI) verwendet, die sich im untersuchten Gebiet ausbreiten, absorbiert/durchgelassen oder an Grenzflächen (z.B. Organoberflächen im Körper) gestreut werden. Die gestreuten wie die durchgelassenen Wellen werden außerhalb des Körperfeldes an der Wand des Tomographen durch Detektoren gemessen. Die so gewonnenen Daten repräsentieren dann die Dichte und/oder andere Eigenschaften von Geweben im Körperinneren.

Von den vielen unterschiedlichen Verfahren, wie (3D-) Ultraschall, Computertomographie (CT), Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT), Magnetresonanz Imaging (MRI), Positronen-Emissionstomografie (PET), Magnet-Encephalographie (MEG), je für verschiedene Zwecke geeignet, soll hier das funktionelle Magnetresonanz Imaging (fMRI) herausgegriffen werden, da es (mit PET) insbesondere zur Visualisierung kognitiver Leistungen verwendet wird. Diese Methoden sind – anders als die Absorptionen liefernde Röntgenfotografie – alle keine abbildenden sondern bildgebende Verfahren, d.h. sie sind Visualisierungen von auf komplizierten Wegen hergestellten Daten und aus ihnen kompliziert errechneten Konstrukten. Die erstaunliche Darstellung von Hirnaktivierung mittels fMRI kann leicht darüber hinwegtäuschen, dass eine lange Kette von Datenbearbeitungs- und Auswertungsschritten erforderlich ist, um diese Bilder aus den gemessenen Daten herauszuholen, oder besser, zu konstruieren. Allein die anfängliche Datengewinnung folgt aus einem komplizierten Frage-Antwortspiel zwischen der Aufnahme, i.e. dem Mediziner, der mit der Einstellung der Parameter spielt, dem Aufnahmegerät und dem menschlichen Gewebe. Bei den Datenmanipulationen handelt es sich weitgehend nicht um feste deterministische Algorithmen – sie wären dem lebenden Menschen und dem lebenden Gewebe nicht

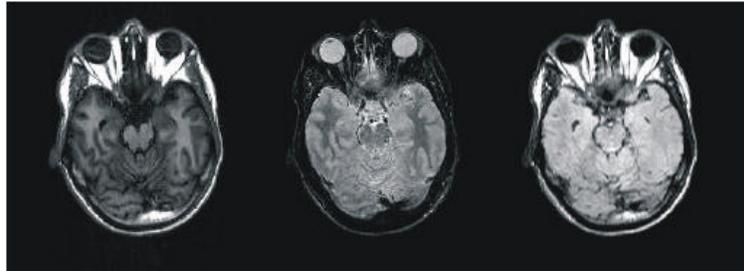
gewachsen, sondern um interaktive parametrisierbare Kaskaden von Datenbearbeitungen. Da die Daten nicht von selbst sprechen, müssen Annahmen über das Verhalten des Gewebes einbezogen werden, d.h. eine Reihe von Modellen gehen ein. Sie betreffen Annahmen über die „Normalität von Gewebe“, mathematischen und statistische Modelle, aber auch informatische Modelle.

Das MRI misst die Resonanzfrequenz der Kernspine von Wasserstoffatomen des Körpers, welche mit Radiowellen angeregt werden. Die Wechselwirkungen der angeregten Spins mit ihrer Umgebung können durch Variation der Aufnahmezeitpunkte als Kontraste darstellbar gemacht werden. Informationen, die so über unterschiedliche Parameter gewonnen werden können, reichen von Gewebsfunktionen, wie Festigkeit und Ordnung des Gewebes im molekularen Maßstab, über Messgrößen für die durch die Zellmikrostruktur gegebene mikroskopische Beweglichkeit, unterschiedliche chemische Zusammensetzungen, molekulare Verteilungen magnetischer Stoffe wie z.B. des Hämoglobins, Stofftransporte von der zellulären Ebene bis hin zum Blutfluss in Gefäßen (siehe Hennig, 2001, dessen Darstellung ich im Folgenden stark gekürzt reproduziere).

Die Beobachtung der Hirnaktivierung mittels fMRI (wie auch von PET) beruht auf einem indirekten Effekt, der Kopplung zwischen neuronaler Aktivität und dem lokalen Blutfluss. Diese „hämodynamische Kopplung“ geht davon aus, dass neuronale Aktivität einen erhöhten Energiebedarf mit sich bringt, der sich ausschließlich über die Umsetzung von Glukose mittels Sauerstoff (oxidative Glykolyse) decken lässt. Gemäß der gängigen Hypothese besteht ein Flaschenhals im Transport des Sauerstoffs aus den Kapillaren zu den Neuronen, wo dieser gebraucht wird. Daher wird in Folge einer neuronalen Aktivierung lokal die Blutzufuhr erhöht, gepuffert, um mehr Sauerstoff ins Gewebe zu pressen und damit einer Unterversorgung vorzubeugen. Die Aktivierungsänderung führt so zu einer Verschiebung des Gleichgewichts zwischen sauerstoffreichem und sauerstoffarmem Blut – es wird sauerstoffreiches Blut überkompensiert, was mittels MRI beobachtet werden kann. Das deoxydierte Hämoglobin besitzt durch seinen Eisenkern ein starkes magnetisches Moment, welches bei Anbindung von Sauerstoff gelöscht wird. Nach einer Idee von Ogawa (1990, Columbia Univ.) lassen sich mittels spezieller MRT-Aufnahmetechniken solche lokalen mikroskopischen Wechselwirkungen mit dem Magnetfeld bei Aktivierung (sauerstoffreiches Blut, arterielle Gefäße) gegenüber dem Ruhezustand (sauerstoffarmes Blut) durch Signalerhöhung sichtbar machen. Jedoch ist die Messung des lokalen Suszeptibilitätseffekts zu wenig trennscharf, die fMRI nicht empfindlich genug, die sehr kleinen Magnetfelder der Neuronenströme zu messen, oder die neuronalen Metabolismen direkt zu beobachten. Erst durch eine Vielzahl von Aufnahmen und mehrfache Veränderung der Aktivierungsbedingungen im Wechsel von Aktivierung und Ruhezustand im 10-20 Sekunden-Abstand können statistisch verwertbare Daten aufgenommen werden. Das fMRI beruht daher meist auf einer sequentiellen Wiederholung immer derselben Aufnahme unter Variation eines zu bestimmenden Parameters. Einzelsignalaufnahmen werden nur selten verwendet, v.a. für Reize, die sich nicht leicht wiederholen lassen. Der dynamisch veränderliche Parameter kann dabei im Durchfluss eines Kontrastmittels zur Messung der Perfusion bestehen oder in der kortikalen Aktivierung durch Präsentation eines Stimulus wie Licht, Denksportaufgaben oder Berührungsreize.

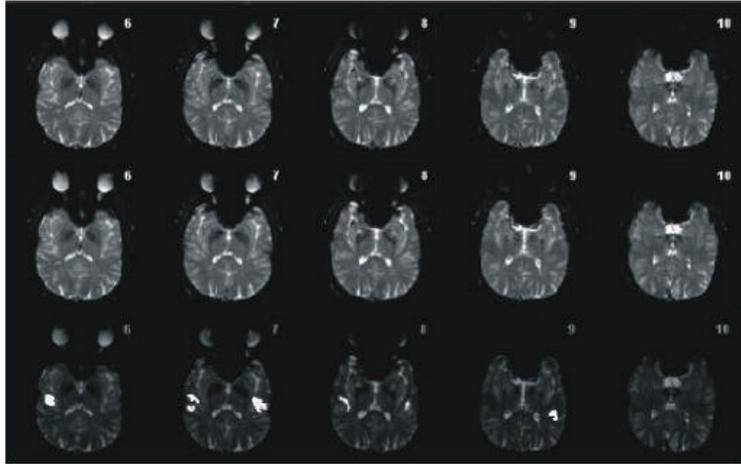
Die so erzeugte Datenmenge kann leicht ein Gigabyte pro Untersuchung übersteigen. Für solche Datenmengen und Zahl der Einzelbilder ist es nicht nur ausgeschlossen, die aufgenommenen Daten per Hand zu sichten, auch die im Bereich weniger Prozente liegenden Unterschiede im Bildvergleich sind vom Menschen kaum wahrnehmbar. Auch bei der Zusammensetzung der Schichtbilder in Filme bei der sehr viel schärferen Wahrnehmung unseres visuellen Systems für Bewegung kann nur ein Bruchteil der in den Daten

vorhandenen Information wahrgenommen werden. Daher sind effiziente Algorithmen als Auswertungsinstrumente zur Komplexitätsbewältigung essentiell notwendig, um den eigentlichen Informationsgehalt aus den aufgenommenen Zeitreihendaten zu extrahieren. Die Komplexität konstituiert sich aber nicht nur aus der schieren Datenflut, sondern auch aus der Menge von unterschiedlichen Faktoren, die die Daten- und Bildgenerierung sowohl ermöglichen als auch stören, auf den Ebenen der Physiologie, der Aufnahme-modalitäten, der Datenaufbereitung und der Bildkonstruktion. Die Unzahl möglicher physiologischer Prozesse beispielsweise, die zeitlich veränderliche Signale erzeugen, können – zufällig oder nicht – eine gewisse Korrelation mit den aktivierungsbedingten Effekten aufweisen und müssen von echten Aktivierungseffekten differenziert werden. Solche zusätzlichen Effekte, wie beispielsweise periodische Signalveränderungen durch pulsatilem Blutfluss oder auch atmungsbedingte Effekte werden in die Modellierung der Daten mit aufgenommen.



Vielfalt der Kontraste der MRT anhand einer horizontalen (transversalen) Schicht durch den Kopf in Höhe der Augen (oben). Obwohl die 3 Bilder identische Schichten repräsentieren, zeigen die dargestellten Bildinhalte erhebliche Unterschiede. So sind graue und weiße Gehirnschichten im linken und mittleren Bild gegensätzlich dargestellt, im mittleren Bild fehlt das Signal von Fett an der Oberfläche sowie in der Orbita hinter den Augen.
Quelle: Hennig 2001

Die Datenanalyse besteht aus Datenaufarbeitung, d.h. nach Analyse eventueller Unvollkommenheiten während der Aufnahme, der entsprechenden Korrektur; der Aktivierungsanalyse, d.h. der Berechnung aktivierungsbedingter Effekte aus den sequentiellen korrigierten Daten über entsprechende Methoden der Zeitreihenanalyse; der Visualisierung der so als aktiviert erkannten Areale und schließlich der Kombination mit anderen Messungen und gegebenenfalls weiteren Daten zur Gruppenanalyse (siehe auch Hennig 2001). Da also die Daten nicht von alleine sprechen bzw. visualisieren, müssen Annahmen über das Verhalten des Gewebes einbezogen werden, d.h. eine Reihe von Modell getriebenen Algorithmen sind nötig. Die dabei herangezogenen Modelle sind medizinischer, statistischer, mathematischer und informatischer Natur. Sie betreffen Annahmen oder Kenntnisse über die Normalität des mikrostrukturellen Verhaltens von Gewebe im Magnetfeld in Wechselwirkung mit der Aufnahmesequenz, mathematische Modelle zur Rekonstruktion von Gebieten und deren Abgrenzung, Modelle über die Eigenschaften von Bildern für die Visualisierung, etc.



Schichten einer Aufnahme bei akustischer Stimulation in Ruhe (oben) und während Aktivierung (Mitte). Die aktivierungsbedingten Effekte sind im direkten Vergleich nicht wahrnehmbar, die aktivierten Areale werden erst durch statistische Analyse sichtbar (unten).
Quelle: Hennig 2001

Bildgenerierung aus Intensitäts wertbildern

Im MRI gemessenen Daten wird eine direkte 3D-Ortsinformation beigegeben, sodass eine Gebietsrekonstruktion via Rückberechnung der Wellengleichungen aus den Daten wie für CT-Bilder nicht nötig ist. Dennoch liefern auch die örtlich verteilt angeordneten Daten, die die Aktivierung repräsentieren, noch keine verwertbaren Bilder. Weder sind die Grenzen anatomischer oder physiologischer Strukturen erkennbar, noch können pathologische Strukturen klar erkannt werden. Es sind eine Reihe weiterer algorithmischer und interaktiver Schritte notwendig, um die als aktiviert erkannten Areale dann entweder als Farb-overlay zu einem anatomischen Bild zusammenzufügen oder in ein schematisches Gehirn einzeichnen zu können.

Die Hauptprobleme bei der Bildgenerierung sind (nach Hennig 2001), dass auch sehr gute (f)MRT-Bilder immer rauschbehaftet sind, das Rauschen aus lebendem Gewebe aber nicht einfach eine Datenunschärfe ist, sondern selbst eine Struktur besitzt; dass (f)MRT-Bilder auf Grund des Magnetverfahrens mehr oder weniger inhomogen ausgeleuchtet sind, wobei die ausleuchtungsbedingten Unterschiede größer sein können als gewebsbedingte Kontraste; dass die Kontrastunterschiede zwischen gesundem und pathologischem Gewebe oft sehr subtil sind; dass die Unterschiede der Signalintensitäten ein und desselben Gewebes bereits bei gesundem Gewebe erheblich sein können, interindividuelle Unterschiede in pathologischen Befunden z.B. bei einem bestimmten Tumortyp jedoch oft noch wesentlich größer. Während menschliche Betrachter lokale und regionale Information mit dem Gesamtkontext und dem Wissen über die Anatomie verbinden können, ist diese kontingente Erfassung, auch modellgetrieben, kaum algorithmisierbar. Nimmt man die beträchtlichen interindividuellen Unterschiede der einzelnen Messparameter hinzu, so leuchtet unmittelbar ein, dass der Mensch unverzichtbarer Bestandteil eines integrierten Konzeptes der Bildgenerierung und Erkennung ist, denn er muss aufgrund seiner Erfahrung Informationen als relevant erkennen,

Informationen aus unterschiedlichsten Ebenen und Kategorien miteinander verbinden und Entscheidungen treffen.

Für die Visualisierung werden die Bilder zunächst „geputzt“, das heißt es werden Gauß-, Fast-Fourier- Transformationen und andere Filter (vgl. Jähne 1997) zur Elimination von Unschärfe, Rauschen und Schmutz angewendet. Auch sehr gute Datenaufnahmen sind immer rauschbehaftet, und zwar sowohl von der Aufnahmetechnik her als auch aus dem Gewebe, und diese Effekte überlagern sich und können sich vermischen. Das Rauschen aus lebendem Gewebe aber ist nicht einfach eine Datenunschärfe, sondern besitzt selbst eine Struktur. MRT -Datenaufnahmen sind auf Grund des Magnetverfahrens auch mehr oder weniger inhomogen ausgeleuchtet, und die ausleuchtungsbedingten Unterschiede können größer sein als gewebsbedingte Kontraste. Die automatische Elimination von Rauschen und „unpassenden“ Bildpunkten läuft Gefahr, überlagerte Effekte nicht zu differenzieren, und somit wesentliche Bildinhalte zu eliminieren oder zu glätten oder umgekehrt unphysiologische Effekte als wesentlich herauszuholen. Es ist daher immer nötig, auch das kundige menschliche Auge mit zu bemühen.

Die im Anschluss getätigte Segmentierung, i.e. Gebietstrennung unterschiedlicher Organe und Organbereiche grenzt zusammengehörige Strukturen, z. B. bestimmte Hirnwindungen, Gefäße oder auch Tumore, von anderen Strukturen ab. Sie erfolgt häufig über Änderungen der Grauwerte zwischen Strukturen, die zu Kanten verdünnt werden, so dass einstellbare Grauwert-homogene Flächen entstehen. Die homogenen Strukturen können dann auch farblich voneinander abgesetzt werden. Unterschiedliche Texturen können mit einer ganzen Reihe unterschiedlicher Ansätze bearbeitet werden. Rein auf den Vergleich der Grauwerte der einzelnen Pixel basierende Algorithmen können dabei mit einem gewissen Erfolg eingesetzt werden. Im Bereich der Neurologie betrifft dies vor allem die für viele Anwendungen wichtige Segmentierung zwischen grauer und weißer Gehirnmasse mit nachfolgender Identifizierung und Zuordnung der unterschiedlichen neuroanatomischen Areale. Zur Grobklassifizierung der Areale gibt es eine Reihe von in der Praxis erprobten Ansätzen mit deren Hilfe sich aus Bilddaten mit unterschiedlichen selektiven Kontrasten die anatomischen Grundstrukturen (subkutanes Fett, Schädelknochen, Liquorräume, graue und weiße Gehirnmasse, Gefäße) voneinander trennen lassen.

Vor allem für subtile Unterscheidungen, z.B. die Herausarbeitung einzelner Subsysteme des Gehirns, führen solche Ansätze allerdings nicht zum Ziel, da die Grenze zu benachbarten Hirnarealen eher konzeptionell und virtuell ist und sich nicht notwendigerweise in entsprechenden Kontrastunterschieden widerspiegelt. Daher werden auch für solche Problemstellungen zunehmend interaktive und modellbasierte Ansätze verwendet, welche unter Zuhilfenahme sämtlicher verfügbarer Informationen, insbesondere der räumlichen und strukturellen Bezüge der zu segmentierenden Einheiten im Gesamtgehirn sowie unter Berücksichtigung von Grundannahmen über die Form des gesuchten Objektes, eine Segmentierung versuchen. Während eine kundige Neuroradiologin aus Bildern unterschiedlichster Qualität und Kontraste beispielsweise den Hippokampus zu identifizieren und abzugrenzen in der Lage ist, lässt sich dies nur partiell und unter sehr scharfen Nebenbedingungen bezüglich der Datenqualität automatisieren.

Die dann folgende 3D- Konstruktion aus digitalen 2D-Bildern verwendet Rendering-Verfahren der Oberflächen- und Ganzkörpertriangulation, welche den virtuellen Körper aufspannen. Die so berechneten Datensätze einer dreidimensionalen Bildstruktur sind zur Bildgebung der Oberflächen- und der Tiefenstrukturen, für Transformationen, Schnitte, Drehungen, auch von Ausschnitten geeignet, und sie erlauben den Anschluss weiterer

Visualisierungstechniken, wie Färbung, Animation oder Rotation, bis zur interaktiven Computergrafik mit der Möglichkeit, bestimmte Hirnteile aufzuklappen oder auszufahren.

Probleme und notwendige Interaktivität

Die Hauptprobleme bei der Bearbeitung und Interpretation von MRT-Aufnahmen sind nach Hennig (2001), dass die Kontrastunterschiede zwischen gesundem und pathologischem Gewebe oft sehr subtil sind und sie gegen durch die Aufnahmetechnik bedingte Kontraste schwer, jedenfalls nicht automatisierbar, zu differenzieren sind und dass die Unterschiede der Signalintensitäten ein und desselben Gewebes bereits bei gesundem Gewebe erheblich sein können, interindividuelle Unterschiede in pathologischen Befunden z.B. bei einem bestimmten Tumortyp jedoch oft noch wesentlich größer. Da der kundige Mensch lokale und regionale Information mit dem Gesamtkontext und dem vorhandenen Wissen über die Anatomie kombinieren und Wissen unterschiedlichster Kategorien gegeneinander abwägen kann, bleibt er unverzichtbarer Bestandteil eines integrierten interaktiven Konzeptes, um aus der Vielzahl der vorliegenden Informationen aufgrund seiner Erfahrung die relevanten zu erkennen und richtige Entscheidungen zu treffen.

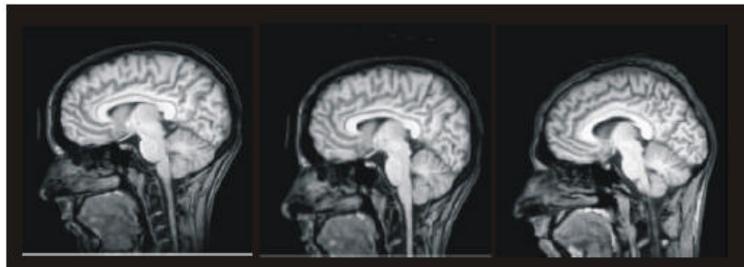
Referenzsysteme und Standardisierung

Nicht nur wegen der schwierigen Unterscheidbarkeit von anatomischen Gebieten und der interindividuellen Variabilität bei der Segmentierung, sondern auch zur Vorbereitung von chirurgischen Eingriffen, ist oft der Vergleich mit Referenzsystemen notwendig. Dafür bedient man sich häufig eines Hirnatlas, mit dessen Hilfe dann automatisch und/oder vorzugsweise interaktiv „matching“ betrieben wird. Wieder gibt es unterschiedliche Methoden, die vergleichende Gebietsbestimmung vorzunehmen: landmarkenorientiert, volumentreu oder durch lineare, affine oder nicht lineare Transformationen.

Die neuroanatomische Zuordnung der gefundenen aktivierten Areale folgt jedoch je nach Fachgebiet unterschiedlichen Referenzsystemen. In der Neuropathologie, auf mikroskopischer Ebene, ist die Klassifikation nach Brodmann üblich, in welcher der Kortex entsprechend der unterschiedlichen Typen seines histologischen Aufbaus kartographiert wird. In der Neurologie wird eine Klassifizierung entsprechend der den einzelnen Arealen zugeordneten Funktionen vorgenommen. Die Neuroradiologie hält sich zur Beschreibung der Lokalisation von Befunden an die topographische Zuordnung der einzelnen Sulci (Falten) und Gyri (Wölbungen) der Gehirnoberfläche. Alle diese Referenzsysteme zeigen im interindividuellen Vergleich erhebliche Unterschiede und lassen sich nicht kompatibel übersetzen. So zeigen die Brodmann'schen Areale in vielen Bereichen keine erkennbare systematische Zuordnung zu einzelnen Sulci und Gyri und überschreiten diese. Die funktionelle Kartographierung hält sich jedoch meist an die Neuroanatomie, weshalb eine Zuordnung funktioneller Areale zu Brodmann Arealen inkonsistent wird.

Die Zuordnung funktioneller Areale zur Anatomie ist überdies aufgrund der Variabilität sehr problematisch. Zwar erscheinen der visuelle oder der primäre motorische Kortex zumindest in ihrer groben Zuordnung reproduzierbar und es gelingt hier eine Abbildung der Funktionen in topologisch zusammenhängende Gebiete, weshalb die Zuordnung zu einzelnen Körperregionen gut untersucht und kartographiert ist. Für andere Funktionen wie Sprache, Gedächtnis, sensorische Empfindungen etc. wurden einige regionale Zuordnungen, aber keine zusammenhängenden Gebiete gefunden. Diese (partielle) Korrespondenz zwischen Funktion und Anatomie führte zur Schaffung eines Standardsystems der funktionellen Neuroanatomie auf der Basis eines standardisierten Gehirns: Talairachs 1967 publiziertes Koordinatensystem auf der Basis eines repräsentativen (weiblichen) Gehirns. Die drastisch verbesserte räumliche

Auflösung der fMRT im Millimeterbereich machte bald andere Standardsysteme, wie gemittelte Hirnatlanten notwendig, um die durch erhebliche und nichtlinear transformierbare interindividuelle Unterschiede und Abweichungen bedingten Differenzen zwischen gemessenen Daten und dem Standardsystem vergleichbar und behandelbar zu machen. Doch leiden gerade auch die Mittelungsverfahren unter denselben Problemen wie das Matching: große interindividuelle und Plastizitätsbedingte Unterschiede machen die Wahl zwischen automatischen Mittelungsalgorithmen, wie solchen auf volumentreuen, linearen oder nicht linearen Transformationen beruhenden, gegenüber landmarkenorientierten schwer, und führen alle nicht zu befriedigenden Ergebnissen. Die zunehmende Genauigkeit/Granularität der fMRT-Darstellungen mit zum Teil millimetergenauen funktionellen Zuordnungen lässt sich jedoch mit keinem der standardisierten Systeme angemessen repräsentieren. Noch schwieriger erscheint die Standardisierung der Relation zwischen funktioneller Anatomie und kortikaler Histologie, beispielsweise im visuellen Kortex, welche zudem weder mit der individuellen Anatomie noch mit funktionellen Kartographierungen korrespondiert. Der Zusammenhang zwischen histologischem Aufbau des Kortex und der makroskopischen Anatomie, sowie beider mit der Funktion bleibt ungeklärt.



Sagittale Schicht aus dem Gehirn eines Probanden vor (links) und nach (mitte) Transformation in Talairach-Koordinaten. Der Vergleich mit einem entsprechenden Bild eines anderen Probanden im Talairac h-System (rechts) zeigt die erheblichen Unterschiede zwischen den Gehirnen nach einfacher linearer Transformation.
Quelle: Hennig 2001

Eine Abbildung der fMRT auf ein neuroanatomisches Referenzsystem ist, beispielsweise für einen Gruppenvergleich häufig notwendig. Dieses Mapping erfolgt im allgemeinen anhand eines während der Sitzung aufgenommenen hoch aufgelösten Datensatzes mit einer Messtechnik, welche einen sehr guten Kontrast zwischen grauer und weißer Gehirns substanz bietet und aus welchem sich als erster Schritt der Zuordnung der Kortex heraussegmentieren lässt. Der so ermittelte Kortex wird dann mittels linearer Transformation in den drei Raumrichtungen auf einen Standarddatensatz abgebildet. Fehler durch nicht-lineare Unterschiede werden dabei in Kauf genommen, da die verfügbaren Programme zur nichtlinearen Korrektur sehr rechenintensiv und ebenfalls fehleranfällig sind. Wie bereits an anderer Stelle, sind deshalb auch hier Eingriffe der Radiologen bzw. Anatomen in die Referenzierung durch interaktive Programme nötig und möglich

Die verschiedenen Verfahren zum Blick in den Körper sind von sich ausgetüftelten Effekten verdankenden kompliziert hergestellten Daten, auf langen, kontingenten, komplexen Wegen errechnete Datenkonstrukte und deren Visualisierungen. Die neuen Verfahren haben zu ungeahnten Diagnose- und Forschungsmöglichkeiten, auch abgeleiteter Natur geführt. Sie haben die Datenmengen, insbesondere die aufwändigen Bilddatenmengen potenziert, welche weiter zur Berechnung abgeleiteter Daten und der Integration mit weiteren abgeleiteten

Datenmengen verwendet werden, u.s.w., womit jeweils auch neue Forschungsfelder eröffnet werden.

Die optische Invasion in den menschlichen Körper wird jedoch mit verschiedenen Problemkomplexen erkaufte: Die bildgebenden Verfahren arbeiten mit riesigen Datenmengen und führen höchst komplexe Transformationsalgorithmen zum Segmentieren, Glätten, Entschmutzen u.s.w. durch, die das Material auch fehldeuten können. Die zunehmende Entfernung des Bildes von dem Abzubildenden, d.h. der abstrakte Charakter solcher über komplizierte Prozesse hergestellten Bilder, erhöhen mit jedem Abstraktionsschritt, jedem Ableitungsschritt und jedem Integrationsschritt die Fehleranfälligkeit, d.h. die Möglichkeit von Bild-Artefakten, die keine physiologischen Entsprechungen haben. Auf dem Konstruktionsweg vom Körper bis zum Hirnbild müssen also eine Reihe von Entscheidungen getroffen werden, z. B. erhöht sich mit stärkerem Magnetfeld einerseits die Auflösung, andererseits aber auch die Gefahr von Artefakten, und die Einstellung der Relaxationszeit (zeitliche Komponente zu Messung der Kernspinreaktion) bestimmt, welches Gewebe hervorgehoben wird.

In paradoxer Umkehrung dieser Tatsachen suggerieren die Darstellungen und weitere bildgebende Prozesse, die nicht nur auf Reproduktion sondern auch Verarbeitung, Interpretation und folgender Erzeugung basieren, einen objektiven Blick auf den Körper. Ja, Atlanten und Kartographierungen des Körpers, obgleich durch kontingente Mittelungen von Hirnbildern größter Varianz hergestellt, sind die Manifestationen wissenschaftlicher Objektivität geworden. Sie repräsentieren so einen „Standardkörper“, dessen normbildende Eigenschaften fragwürdig sind. Denn es gehen immer schon und je komplizierter und abgeleiteter desto mehr Elemente ein, die für das „lebendige Original“ nicht konstitutiv sind. Welche Konstrukte nun eingehen, ist nicht nur „technisch“ bedingt sondern auch zufällig, kulturell, individuell, jedenfalls kontingent, beginnend mit der Anwendung und der Auswahl technischer Mittel, wie hier bildverarbeitenden Methoden und Visualisierungstechniken und endend mit dem notwendigen Einsatz von Modellen, wie über das Rauschen des Gewebes, die Bildgüte, Artefakte, oder strukturelle Zusammenhänge. Dass diese Konstrukte Komplexität reduzieren, verstärkt die Gefahr von Reduktionismus, Einseitigkeiten und inadäquater Normierung, aber auch der durch Bilder leicht insinuierten Naturalisierung von in Wahrheit kontingenten körperlichen Gegebenheiten, die zu Verdinglichung und Essentialismus führen können (Schmitz 2001, Schinzel 2002).

II. Epistemische Wende von Text zum Bild

Bilder und Symbole sind seit Beginn unserer Kultur Erkenntnisträger. Die zu Beginn der Neuzeit entstehende textuelle Wissenschaft kämpfte zunächst gegen die bildverhafteten Ideologien. Doch dieses Verhältnis zwischen Texten und Bildern hat sich seit dem 18. Jhd. und insbesondere durch die Verwendung des Computers als bildgebendes Medium stark verändert. Ivan Illich stellt das nochmals für die rezente Entwicklung fest „in the last twenty years, the eyes have become the key point of informational interface between systems.“ Unsere heutige Wissenschaft muss mit der wachsenden Partikularisierung, Differenzierung und Komplexität ihrer Erkenntnisse umgehen. Bildliche Verständigungsmittel können Abstraktes, Komplexes leichter bzw. oft überhaupt erst dem Menschen erfassbar machen, auch wenn dies mit einem Verlust an begrifflicher Präzision erkaufte werden muss. Eine Sorte von Messungen, die sich gar nicht mehr anders kognitiv erfassen lassen als durch Verbildlichungen sind die Daten, welche in der Medizin durch Techniken wie CT, MRI, fMRI, etc. gewonnen werden. Die Informatik kehrt dabei ihre eigene Entwicklung gerade um

(siehe auch Heintz 1995): die Vertreibung der Anschauung aus der Mathematik durch die Formalisierung (als Gegenbegriff zur Anschauung), der die Informatik ihre Entstehung verdankt, hat aufgrund der durch sie selbst betriebenen Beschleunigung und Komplexitätserhöhung umgekehrt die bildliche Darstellung in die Wissenschaft zurückgebracht: die Visualisierung von Dynamik und Komplexität zur Adaption an die kognitiven Möglichkeiten des Menschen. Die gegenwärtige Re-Visualisierung naturwissenschaftlicher und medizin-technischer (und auch mathematischer) Ergebnisse hat ihre Ursache in der kognitiv unfassbaren Komplexität der produzierten Datenmengen, die einer Rückholung in die Anschauung bedürfen. Diese Visualisierungstendenzen bedeuten allerdings nicht unbedingt eine Rückkehr der Anschauung des *Natürlichen*, sondern einer visuellen Perzeption von Virtuellem, von kompliziert konstruierten Artefakten, deren Korrespondenz mit dem Gegebenen, wie etwa bei MRI und fMRI, nur mehr auf Plausibilitätserwägungen beruht und (im vorliegenden Fall noch) nicht auf empirischer Evidenz (Hennig 2001).

Die Zunahme bildlicher Repräsentationen gegenüber textuellen zeigt einen Trend epistemischer Veränderungen in den Wissenschaften, der also zunehmend durch die Informationstechnik verstärkt wird. Auch die Verarbeitung und Vergegenständlichung von komplexen Daten zeigen diese paradigmatischen Veränderungen. Zwar besteht auf der materiellen Repräsentationsebene kein Unterschied zwischen Daten, Typographie oder Bildelementen, es handelt sich jedes Mal um analoge Signale, für die Maschine semantisch nicht unterscheidbar. Für den Menschen jedoch erscheinen die Daten als Zeichen, als Zahlen, Buchstaben, komplexer strukturierte Daten. Bei den Komponentendaten eines Bildes tritt die Symboleigenschaft gegenüber der Gesamtbedeutung der Bildfläche zurück. Was also macht den Unterschied zwischen typographischen gegenüber bildlichen Zeichen aus? Ein Differenzierungsmittel kann z.B. der Ort sein, wo für Menschen Bedeutung erscheint, auf atomarer Zeichenebene oder auf holistischer Ebene. Mitchell sieht im „pictorial turn“ (in Ablösung von Rorty's „linguistic turn“¹) ebenfalls ein Zurückholen holistischer Mittel in Abwendung vom Semiotischen. Sowie vormalis die Sprache figuriert nun das Bild als eine Art Modell oder Figur für andere Dinge - und als ungelöstes Problem, denn wir wissen immer noch nicht, was ein Bild ist und in welchem Verhältnis es zur Sprache steht, noch wie Bilder sich auf Beobachter und die Welt auswirken.

Dazu zunächst ein kurzer Blick auf Charles S. Peirce's (1894) semiotische Theorie der Zeichen und ihre Funktionen. Ein Zeichen wird als eine Relation mit drei Komponenten beschrieben, dem Mittel der Beschreibung (Signifikant), dem beschriebenen Objekt (Signifikat) und der Interpretation dieser Beschreibung (Interpretant). Peirce unterscheidet drei Arten von Zeichen, die ersten zwei davon in nur zwei Komponenten-Relationen, uneigentliche Zeichen: “There are three kinds of signs. Firstly, there are *likenesses*, or icons; which serve to convey ideas of the things they represent simply by imitating them. Secondly, there are *indications*, or indices; which show something about things, on account of their being physically connected with them. Such is a guidepost, which points down the road to be taken, or a relative pronoun, which is placed just after the name of the thing intended to be denoted, or a vocative exclamation, as "Hi! there," which acts upon the nerves of the person addressed and forces his attention. Thirdly, there are *symbols*, or general signs, which have

¹ Die Philosophiegeschichte lässt sich als eine Abfolge von Denk-Paradigmen auffassen. Richard Rorty hat dafür den Begriff „turns“ („Wendungen“) geprägt und der letzten dieser Wendungen in der Philosophiegeschichte den Namen „linguistic turn“ gegeben. Zusammenfassend gesagt, gehen seit dem „linguistic turn“ die Philosophie und die Humanwissenschaften davon aus, daß die Gesellschaft genauso wie die Natur und ihre Repräsentationen Texte bzw. Diskurse sind.

become associated with their meanings by usage. Such are most words, and phrases, and speeches, and books, and libraries.”

Der Computer ist in der Lage, Signale, Daten, vom Menschen als Zeichen, Sprache, Bilder usw. interpretiert, bearbeiten zu können. Während also für den menschlichen Gebrauch des Computers der Bearbeitungsmodus von Zeichen im Vordergrund steht, muss der Computer selbst als indexikalische (Kausalrelation mit dem Bezeichneten, ohne Interpretanten)², nicht als semiotische Maschine (Nake 1993) angesehen werden. Denn die Peircesche Semiotik reflektiert mit ihrer pragmatischen Orientierung die soziale Dimension der Zeichenprozesse, wovon Computer aber durch ihren konstitutionellen Solipsismus ausgeschlossen sind. Das Interpretieren des kausalen Zusammenhangs zwischen Input und Output des Computers bleibt einem menschlichen Interpretieren überlassen. Der Computer arbeitet ja nicht mit Modellen oder Bildern und auch nicht mit Zeichen, sondern mit Signalen ohne Symbolwert, wir Menschen interpretieren diese nur als Zeichen, für Zahlen etwa. Der Fähigkeit zu berechnen liegt wiederum eine physikalische Konstanz, Kausalität, im Chip oder Transistor zugrunde, wie es der Basis der entarteten indexikalischen Zeichenrelation entspricht. Das Problem bei der Betrachtung der Informatik als „technischer Semiotik“ scheint zu sein, dass man (heute sowohl auf philosophischer wie auf neuropsychologischer Basis) die Konstitution von Selbstbewusstsein nur in Zusammenhang mit Sozialität begreifen kann, und dass die Peirce'sche Semiotik die soziale Dimension der Zeichenprozesse reflektiert.

Auch für (ja immer diskret aus Raumdaten zusammengesetzte) Computer-Bilder ist der Peirce'sche Zeichenbegriff anwendbar, er trifft jedoch nicht die Differenzierung zwischen Bild und Text. Die Einzelzeichen, Pixel oder Voxel, aus denen ein Computerbild zusammengesetzt ist, sind in dem Sinne entartet, als sie nicht einzeln sinnvoll zu interpretieren sind - denn als etwa Grauwert, also eigentlich nur für das Objekt „Datum in Pixelform“ selbst stehen. Und doch konstituieren die im gesamten Zusammenspiel räumlich strukturierten Daten, also etwa Grauwerte, für Menschen interpretierbare Bedeutungen. Hier scheinen raumzeitliche, konnotative Aspekte, etwa die Bedeutungsrelation zwischen Pixel/Voxel und Gesamtbild, wichtiger (Flusser 1992).

Während also Zahlen und Schrift, Symbole überhaupt, syntaktisch und semantisch klar definierbar sind, trifft ein Gleiches für Visiotype (Pörksen 1997) (Bilder, Tabellen, Kurven, Visualisierungen) nicht zu. Die Frage, was eigentlich ein Bild sei, ist schwieriger, als zunächst vermutet wird, und eine einfache, weitgehend akzeptierte Definition gibt es nicht. Die verbreitetste Auffassung - sowohl im Alltag wie auch in traditionellen philosophischen Bildtheorien - geht davon aus, dass das Spezifische eines Bildes entweder auf der Ähnlichkeit von Bild und abgebildeten Gegenstand oder auf der Mitwirkung von realen Gegenständen bei der Bildentstehung beruht. Diese Ähnlichkeits- und Kausaltheorien bieten jedoch keine befriedigende Erklärung der bildlichen Darstellung (Steinbrenner 1997). Flusser (1983, 1992, 1995) gibt Beschreibungen von Bildern als „bedeutende Flächen“, die zwischen der Welt und dem Menschen vermitteln. Die Bedeutung der Bilder liegt auf der Oberfläche und lässt sich mit nur einem Blick erfassen. Der Versuch, bei der Betrachtung eines Bildes seine Bedeutung zu „vertiefen“, bringt zum einen die betrachtende Person, zum anderen die (zeitliche, d.h. nach und nach vergegenwärtige) Struktur des Bildes mit ins Spiel. Schweift der Blick über das Bild (Flusser nennt dieses optische Abtasten „Scanning“), um seine Bedeutung zu vertiefen, setzt sich die gewonnene Bildbedeutung aus der Bildstruktur und der

² "An *index* is a sign which would, at once, lose the character which makes it a sign if its object were removed, but would not lose that character if there were no interpretant. Such, for instance, is a piece of mould with a bullet-hole in it as sign of a shot; for without the shot there would have been no hole; but there is a hole there, whether anybody has the sense to attribute it to a shot or not." ('Dictionary of Philosophy & Psychology' vol. 2, CP 2.304, 1902).

Betrachterintention zusammen. Bilder sind nicht - wie z.B. Zahlen - denotative Symbolkomplexe, sondern konnotative: d.h. sie bieten Raum für Interpretationen. Während der Blick über die Bildfläche schweift, erfasst er ein Bildelement nach dem anderen und stellt bedeutungsvolle Beziehungen zwischen diesen her. In dem so entstehenden Bedeutungskomplex verleihen sich die Elemente wechselseitig Bedeutung. Die „vertiefte“, „gelesene“ Bedeutung des Bildes ist raum-zeitlich strukturiert, jedoch anders als die Bedeutung von linearen Texten. Auch Flusser sieht schon die Möglichkeiten der Konstruktion digitaler Bilder: „Die neuen Bilder (...) versuchen, den Betrachter zu hintergehen, und zwar auf doppelte Weise. Erstens vertuschen sie, dass sie Komputationen von Punkten sind, und geben vor, die gleiche Bedeutung wie die herkömmlichen Bilder zu haben; und zweitens, auf einem höheren Betrugsniveau geben sie ihren Ursprung aus Punkten scheinbar zu, aber nur, um sich als `bessere` Bilder anzubieten, indem sie vorgeben, einen Umstand nicht symbolisch, wie es die herkömmlichen Bilder tun, sondern `objektiv`, Punkt für Punkt, zu bedeuten.“ ...“ doch bedeuten die technischen Bilder jene klaren und distinkten Begriffe, die den Punkten entsprechen, aus denen sie zusammengesetzt sind. Die technischen Bilder deuten `mit dem Finger` auf das Programm im Apparat, das sie erzeugt hat, und nicht auf die Welt dort draußen. Sie sind Vorstellungen von Begriffen, dem kalkulierenden Denken und nicht der konkreten Welt zugewandte Flächen. Sie sind aus der Abstraktion in Richtung des Konkreten herausgehobene, abstrahierte Flächen. Die sie erzeugende Geste geht in eine den traditionellen Bildern gegenläufige Richtung.“ (Flusser 1995 S. 48f., 50)

Die technischen Bilder „be-deuten“ also nicht die konkrete, uns umgebene Welt oder Teile davon, sondern beziehen sich auf ein abstraktes Begriffsuniversum. Sie sind exakte und „treue“ Bilder - nur sind sie ihren Programmen treu, nicht ihrem vorgeblich abgebildeten Objekt. Sie bedeuten dieses Objekt nur, insoweit die Begriffe, die ins Programm eingeflossen sind, dieses Objekt bedeuten, und diese Begriffe sind eine weitgehende Abstraktion vom konkreten Objekt. Doch die Wirkung der synthetischen Bilder ist, dass - obwohl der Weg ihrer Entstehung über die Abstraktion, die begriffliche Erfassung, umgesetzt in einen digitalen Code, führt - das Bild, das Modell sich dann konkret erleben lässt. Diese Bilder verweisen auf konkrete Dinge oder Phänomene nur auf dem Umweg über Begriffe, welche in ihnen programmiert sind. Sie sind der Versuch einer Konkretion von Abstraktionen. Technische Bilder sind deshalb schwer zu entziffern. Sie geben sich den Anschein - doch dies ist irreführend - gar nicht entziffert werden zu müssen. Ihre Bedeutung scheint automatisch und damit offensichtlich zu sein: ein automatisches Abbild ähnlich dem Fingerabdruck, bei dem die Bedeutung (Finger) die Ursache und das Bild (Abdruck) die Folge ist. Die bedeutete Welt der technischen Bilder scheint die Ursache der technischen Bilder zu sein; beide scheinen auf derselben Wirklichkeitsebene zu liegen. Technische Bilder sind - ob ihres unsymbolischen, objektiven Charakters - weniger als Bilder, mehr als Fenster in die Welt zu betrachten. Das führt zu einer Kritiklosigkeit gegenüber den technischen Bildern, die gefährlich ist, weil ihre Objektivität eine Täuschung ist. (Flusser 1983)

III. Der gesunde und der kranke Geist im Bild

Der Auszug des Geistes aus den textbasierten Geisteswissenschaften in die bildvermittelten Lebenswissenschaften verdankt sich größtenteils dem Sog der bildlichen Unmittelbarkeit gegenüber den sich langsamer und schwieriger erschließenden textuellen Medien (L. Jäger, 2004, mündliche Kommunikation). Dazu tragen die heutige Vorstellung der Lokalisation des Geistes im Gehirn ebenso bei wie die medizinischen bildgebenden Verfahren, insbesondere die Hirnbilder durch fMRI oder PET. Computerwerbungen, wie „Der Arzt kann jetzt sehen, wie Sie denken“ unterstreichen diese Episteme und sie geben kund, dass die reinen objektiven

naturwissenschaftlich-technischen Methoden ohne die Intervention menschlicher Sensoren die natürlichen Phänomene selbst sprechen lassen. Doch verdeckt die Kombination objektiver Methoden sowohl eine Reihe von Vorannahmen als auch die subjektiven oder historisch kontingenten Entscheidungen, die eben in Auswahl und Kombination von objektiven Teilmethoden eingehen. "Modern objectivity mixes rather than integrates disparate components, which are historically and conceptually distinct." (Daston/Galison 1992), und: "Each of the several components of objectivity opposes a distinct form of subjectivity; each is defined by censuring some (by no means all) aspects of the personal. The history of the various forms of objectivity might be told as how, why, and when various forms of subjectivity came to be seen as dangerously subjective." (ebd.)

Hier gehen Kontingenzen und historisch-kulturelle Vorannahmen in das scheinbar neutrale und objektive technische Visualisierungsverfahren ein. Weitere werden diesen bei der Erstellung von Karten und Standardgehirnen überlagert. Gleichgültig ob diese durch Anpassung an ein ausgewähltes kartographiertes Gehirn, wie den Talairach-Atlas oder durch Mittelungen aus vielen Gehirnen entstehen, immer erhebt sich das Problem der Wahl einer adäquaten Transformation/Mittelung, das nächste der extrem großen interindividuellen Unterschiede der Gehirne, die statistische Normierungen aufgrund der Größe der Varianz nicht zulassen, und schließlich das der großen Plastizität des Gehirns auch einer Person, welches abhängig von Erfahrungen, Alter, Gewicht, ja hormoneller Aktivität und Zyklus variable Ausprägungen erwirbt. Jede Hirnaufnahme gibt zudem immer nur eine Momentaufnahme wieder (vgl. Schmitz 2003a/b). Doch die Hirnatlanten, die mit Hilfe mathematischer und statistischer Modelle und computergraphischer Techniken erzeugt werden, stellen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Betont wird durch Hirnatlanten ein statisches Bild in seiner Struktur und Funktion als Ursache für Denken und Verhalten, wodurch die Erfahrungsabhängigkeit und zeitliche Dynamik der Hirnplastizität im Bild verloren geht. Nicht nur gemittelte, sondern auch die im Folgenden beschriebenen Wahrscheinlichkeits- oder Variabilitätsatlanten bergen die Gefahr von Normierungen, Übergeneralisierungen und Standardisierungen (vgl. Schinzel 2003a), da durch das digitale Hirnbild die theoretische Komplexität nicht hinreichend wiedergegeben wird, da bestimmte Bedingungskonstellationen nicht visualisiert werden und die Montage von hervorgehobenen Hirnarealen u.a. systematisch rückgekoppelte Prozesse unterschlägt. Die Bildlichkeit im Rahmen der Hirnvisualisierungen repräsentiert vornehmlich jene wissenschaftlichen Konzepte, die biologische Determination und Lokalisation darstellen. Die Berufung der bildgebenden Verfahren auf eine technisch-naturwissenschaftliche Objektivität birgt die Gefahr, mittels ihrer Bildlichkeit Wahrheitseffekte der ihnen zugrunde liegenden Theorie in den Erkenntnisprozess zu implementieren. (vgl. Schmitz 2003a, 2004) zu beeinflussen. Fraglich bleibt, wie die Individualität, die enorme Dynamik der Hirnplastizität (vgl. z.B. Boniface/Ziemann 2003 zur erfahrungsbedingten Plastizität) und ihre zeitlichen Charakteristika überhaupt verbildert werden könnten. Durch ihre begrenzte räumliche Logik stoßen Bilder des denkenden Gehirns und die Wahrnehmbarkeit von Unterschieden darin an Komplexitätsgrenzen.

Theoretische und kulturelle Vorannahmen können auch im Konstruktionsprozess von Karten des Gehirns im Human Brain Project³ beobachtet werden. Diese will mit Hilfe bildgebender Verfahren Hirnerkrankungen, wie Schizophrenie, Morbus Parkinson, endogene Depression oder Alzheimer frühzeitig zu erkennen und zu behandeln helfen. Masanneck (2001) und Schmitz (2003) haben herausgearbeitet, wie sich in diesem Projekt kulturelle Definitionen des gesunden/kranken Geistes mit der Existenz-Setzung in hirnanatomischen Ursachen

³ Gründungsdaten, Finanzierung und Webseiten: National Institute of Mental Health, <http://www.nimh.nih.gov/neuroinformatics/index.cfm>, das Konsortium des HBP, <http://www.hbp.usc.edu/>, das California Institute of Technology, <http://www.gg.caltech.edu/hbp/>.

vermischen. Die Diagnose oder Vorhersage einer Hirnerkrankung etwa erfordert die Differenzierung zwischen pathologischem und gesundem Gehirn. Für den digitalen Schizophrenie-Atlas wurden zunächst die Gehirne von Kontrollpersonen mit denen von Schizophrenen verglichen, um auf dieser Datengrundlage einen krankheitsspezifischen Hirnatlas zu erstellen (Narr et al. 2001). Zum Vergleich der relationalen Hirnunterschiede, beispielsweise der Größe und Ausdehnung von bestimmten Hirnarealen, müssen zunächst die individuell unterschiedlich großen Gehirne vergleichbar „gemacht“ werden. Dies erfolgt durch die Transformation in ein vergleichbares Koordinatenschema, das Standardgehirn.⁴ Im nächsten Schritt der Atlantenherstellung wird ein Maß „normaler“ gegenüber „krankhafter“ Variabilität der Hirnregionen errechnet. Diese wird in wahrrscheinlichkeitsbasierten bzw. Variabilitäts-Atlanten durch Farbunterschiede verbildlicht.⁵ In einem dritten Schritt werden die Abweichungen einer neuen Struktur von der normalen Variabilität berechnet. So genannte „warp“-Algorithmen (Berechnungen der Änderungen der Transformationsdistanzen in den 3 Raumrichtungen) repräsentieren die jeweiligen Abweichungen in Tensoren und stellen ein eigenes Forschungsfeld dar (Toga/Thompson 1998). Für bestimmte Krankheiten, wie Alzheimer und Schizophrenie, bei denen sich offenbar charakteristische Veränderungen in den MRI-Bildern zeigen, zeigen entsprechende Krankheitsatlanten eingefärbt bestimmte Regionen der Hirnrinde, die beispielsweise bei schizophrenen PatientInnen eine höhere Variabilität der Strukturen aufweisen.⁶ In Zukunft sollen diese Atlanten dazu dienen, „neue“ Gehirne als gesund oder pathologisch zu identifizieren, d. h. eventuelle PatientInnen aufgrund ihrer Gehirnbilder als krank oder Krankheits-gefährdet zu diagnostizieren und für eine mögliche Behandlung zu empfehlen. So eindrucksvoll die Verbildung des kranken Gehirns in Atlanten erscheinen, bergen sie doch eine Reihe von praktisch und therapeutisch relevanten Folgen (Schmitz 2003a, Schmitz 2004): sie setzen eine generische Visibilität der entsprechenden Krankheiten voraus und können so ein Ursache-Wirkungsverhältnis verändern oder gar umkehren, zulasten aller unsichtbaren psychosozialen Aspekte und evtl. Ursachen solcher Erkrankungen.⁷ Auch verstärken sie zusätzlich Lokalisationstheorien zulasten vernetzter Theorien und deterministische zulasten von Plastizitätskonzepten des Gehirns.

Bei der Messung neuronaler Aktivität bei der Ausführung mentaler Prozesse durch fMRI ist bis heute nicht eindeutig geklärt, welche physiologischen Vorgänge eigentlich gemessen bzw. durch farbige Kontrastierungen in einem anatomischen Hirnbild visualisiert werden (vgl. Toga/Mazziotta 1996). Für die Kognitionswissenschaften ist dennoch das fMRI neben den Augenbewegungsstudien die Methode der Wahl. Dafür müssen jedoch ausgeklügelte Versuchsanordnungen getroffen werden, um die mentale Fragestellung von unabsichtlichen Nebeneffekten zu differenzieren. Dennoch sind überlagerte Aktivitäten meist nicht unterscheidbar. Daher wird beispielsweise mit der Subtraktionsmethode versucht, den eigentlich zu beobachtenden Effekt dadurch zu isolieren, dass die Aktivierung bei einem spezifischen Test (z. B. auditive Spracherkennung) von allgemeiner Aktivierung (z. B. Tonhöhenenerkennung) abgezogen wird. Aber man weiß nicht, ob durch die Subtraktion nicht

⁴ Heute wird in der Hirnbildgebung intensiv das Problem diskutiert, wie die methodisch unterschiedlich erstellten Hirnbilder für die vergleichende Analyse standardisiert werden können (vgl. Schmitz 2001).

⁵ Das Laboratory of Neuroimaging an der University of California hat sich auf solche Atlanten spezialisiert, <http://www.loni.ucla.edu>.

⁶ Bilder des „Population-Based Schizophrenia Brain Atlas“ unter: http://www.loni.ucla.edu/~thompson/SZ/schizo_atlas.html.

⁷ So stellt Masanek (2001) heraus, dass die Nutzung statistischer Verfahren nicht verhindert, dass die ursprüngliche Gruppierung für den Standardatlas, der Grundlage für alle weiteren Ein- oder Ausgrenzungen sein soll, auf angenommenen Definitionen von „Krankheit“ versus „Gesundheit“ beruht, die immer auch kulturelle Setzungen beinhalten. Denn der Hirnatlas inkorporiert ein Set an Gehirnen für die Krankheitspopulation, die zunächst aufgrund gesellschaftlicher Krankheitsdefinitionen ausgewählt wurden.

auch Aktivierungsareale „verloren“ gehen, die zwar nicht ausschließlich für die fokussierte Aufgabe verantwortlich sind, jedoch im Gesamt-Netzwerk der Verarbeitung notwendig sind (u. a. Roland/Zilles 1998). Als Ergebnis der Subtraktion wird eine Abgrenzung von aktiven Hirnarealen dargestellt, die eine Lokalisationsthese unterstützt, obgleich andererseits das Paradigma der Vernetztheit aller, aber besonders kognitiver mentaler Hirnaktivitäten generell gesichert ist. Die Logik der (menschlichen Wahrnehmung zur) Erschließung bildlicher Darstellungen unterstützt jedoch qua erfassbarer Bildselektion lokalisationstheoretische Darstellungen und damit methodenparadigmatisch ebensolche Annahmen zur Funktionsweise des Gehirns. Die neuen Hirnbilder visualisieren also einseitig bestimmte neurowissenschaftlichen Konzepte und schließen andere aus, insbesondere Vernetzungsparadigmen, einfach weil sie nicht so gut visualisierbar sind.

Dennoch ist davon auszugehen, dass von Programmen wie dem Human Brain Project HBP, die Standardisierungen des Normalkörpers über Bild gebende Verfahren zum Ziel haben, Normalisierungstendenzen und -versuche ausgehen. Sie setzen über Karten und das Mapping auf Karten neue Normen, von Gesundheit, Krankheit oder Therapiebedürftigkeit. Solche Standardisierungen von Normalität sind immer gefährlich, wie sich in der Geschichte bestimmter Normalismen gezeigt hat. Stephen Jay Gould (1988) zeigt wie sich die Vermessungen des Gehirns und die mentalen IQ-Tests über die Verdinglichung, d.h. Essentialisierung mentaler Phänomene problematische Vererbungstheorien und rassische Ausgrenzungen begünstigten. Auch Jürgen Link (1992, 1996) beschreibt beispielsweise die Vorbereitung nationalsozialistischer Gedankenguts durch die Hygiene des 19. Jahrhunderts, die u.a. Normalitätsdiskurse in Gang setzte. Sie brachte nicht nur lächerliche Blüten wie die der Jaeger'schen Normalkleidung hervor, sondern auch ein Konzept von Volksgesundheit, das zur Ausgrenzung von Abweichungen, des Anderen und somit zum Antisemitismus beitrug. Auch heute werden unter den Vorzeichen der Bekämpfung von Krankheiten Normalitätsuntersuchungen per Bild gebender Verfahren, beispielsweise von ethnischen Bevölkerungsgruppen durchgeführt. Sie stehen zudem im Kontext anderer Normalisierungstendenzen, wie der Selektion genetisch gesunden Erbguts, der Genmanipulation, zunächst am Tier, nach dem Fallen weiterer Schranken auch am Menschen, dem Versuch der genterapeutischen Ausmerzungen von Krankheiten, u.s.w. Versicherungen wünschen seit Langem die Planung des gesunden Menschen. Wie wird der aussehen sollen, d.h. welche Bilder des Gesunden werden gewollt sein, welchen Standardkörper wird er annehmen sollen, und wer wird das sein?

IV. Neue Bildlichkeit und ihre Wahrnehmung

Die Visualisierung des menschlichen Gehirnes und der 'darin vorgehenden' Denkprozesse erfolgt nicht nur vor dem Hintergrund der physikalisch-technischen Darstellungsbedingungen, sondern auch historisch und kulturell bedingt er Wahrnehmungsformen. Schon in Cassirers (1925) und in Panofskys (1927) Analysen zur historischen Entwicklung des Raumverständnisses zeigten diese Parallelen zwischen ästhetischem Raum, dem theoretischen und dem Wahrnehmungsraum.⁸ Wir lernen wahrzunehmen, so beschreiben Segall et al. (1964) diesen passiv-aktiven Vorgang der Erschließung von Bedeutungen. Natürlich hat die Digitalisierung, insbesondere die wissenschaftlichen Bilder, eine umwälzende Bedeutung für die visuelle Kultur (Mitchell 1992), die er sogar als Epoche des "age of electrobricolage" herausstellt, weil sich nun neue Möglichkeiten der Verbildung mit Veränderungen des menschlichen Blicks verbinden, wie die Dynamisierung digitaler

⁸ Illich (o. J.: 2) bezeichnet dieses historische Feld als das der „Opsis“, um gegenüber der 'Optik' die menschliche Aktivität zu betonen.

(Bild)Daten durch bewegte (sequentielle) Bilder, fly-throughs, aber sogar direkte Aufnahmen und Wiedergaben von Bewegung aus dem Körperinneren (in Ultraschall und fMRI), die beliebige Gestaltbarkeit, Kombinierbarkeit und Veränderbarkeit solcher digitalen Bilder existieren, aber auch ihre interaktive Gestaltbarkeit bei der Erzeugung und späteren Nutzung.

Gleichzeitig tragen die wissenschaftlichen Bilder die Aura der Objektivität, nicht nur wegen der zu ihrer Herstellung herangezogenen „objektiven“ Verfahren, Messungen und Berechnungen aus Physik, Technik, Mathematik und Informatik, sondern auch deshalb, weil sie scheinbar die „Sprache der Phänomene selbst“ sprechen lassen (Daston/Galison 1992). Dies indem sie die Stelle des menschlichen Beobachters auflösen, weil sie Sachverhalte so abbilden, wie sie auch mit beliebigen Sehhilfen vom menschlichen Auge nie gesehen werden könnten. Damit wird trotz ihres „Phänomenbezugs“ gleichzeitig der ontologische Status solcher Bilder problematisch.

Aber in diesen bildgebenden Verfahren ist nicht nur die Zeichenhaftigkeit der Indexikalität gewichen, sondern auch die Indexikalität ist nur mehr zwischen der physikalischen Anordnung und dem in ihr eingebetteten Menschen bis hin zur Datenaufnahme kausal eng gekoppelt, in allen späteren Schritten weicht die natürlich-technisch verursachte Kopplung einer kontingenten Konstruktion: Entscheidungsprozesse gehen in Auswahl, Kombination und Anschlussbedingungen, sowie die Modellgetriebenheit entsprechender Algorithmen ein, die Visualisierung der parametrisierten Daten ist in der Wahl der Farben, Einheiten und Formen wahrnehmungspsychologisch getrieben. Auch die fertigen Bilder sind leicht zu gestalten und zu manipulieren. Die digitalen Erfassungs-, Speicherungs- und Bearbeitungsmechanismen, man denke beispielsweise an das elektronische Skalpell, dehnen die Möglichkeiten und Grenzen digitaler Objektivität bis hin zur Auflösung der Indexikalität, der kausalen Verbindung zwischen lebendigem Objekt und seiner Visualisierung aus.⁹ So erhebt sich für die Visualisierung invisibler Größen bei den bildgebenden Verfahren der Medizin die Frage nach der Art der Beziehung zum „Natürlichen“. Der Weltbezug, den medizintechnische Bilder vermitteln, ist eng verknüpft mit dem Problem der „digitalen Objektivität“.

Tatsächlich gehen von Seiten der die Bilder herstellenden MedizinerInnen und TechnikerInnen mit all den aus Wissen, Empirie und wissenschaftskulturellen Hintergründen eingehenden Modellen in die konstruierten Ansichten Sinn erzeugende Narrative einher, die an wissenschaftliche und nicht wissenschaftliche Wahrnehmungsgewohnheiten anschließen. So werden beispielsweise auch für Hirnbilder Zentral- oder Kavalierspersion auf dem zweidimensionalen Bildschirm eingenommen.

Doch auch von Seiten der NutzerInnen kommen, meist unbewusste, Erfahrungen und Gewohnheiten in der Wahrnehmung des Dargestellten zur Anwendung. Was beispielsweise Max Imdahl (1994) für Plastiken bemerkt, dass der Verweisungszusammenhang bei dreidimensionalen gegenüber zweidimensionalen (synchronen) Bildern unterschiedlich verfasst ist, gilt auch hier wegen der Sequentialität der Betrachtung kann die Einheit des – obgleich auf dem Bildschirm anwesenden – Gegenstandes nur im Bewusstsein der BetrachterInnen hergestellt werden. Umgekehrt sind die heutigen NutzerInnen durch ihren allgemeinen Medienkonsum zunehmend an 'unnatürliche' Perspektiven, Einstellungen, Plansequenzen und räumliche Montagen sowie an Dehnungen, Kontraktionen und Brechungen der linearen Zeit gewöhnt, wodurch die Einsicht in die intentionale Gemachtheit

⁹ Für Crary (1996) allerdings beginnt die „Loslösung des Auges aus dem Netzwerk der Referentialität“ durch technische Virtualisierungen von Bildern Anfang des 19. Jahrhunderts schon vor der Erfindung der Photographie durch die Camera obscura.

dieser Bilder verbreitet ist.¹⁰ Für medizintechnische Bilder allerdings hängt die Unterstellung der Objektivität der Bilder stark vom Kenntnisstand, der sie nutzenden MedizinerInnen oder PatientInnen und vom Verwendungszusammenhang ab. Die sehr unterschiedlichen Adressierungen und Adressaten (Fachleute, Geldgeber, Laien; vgl. z.B. Jaeger 2003, oder für juristische Auseinandersetzungen; vgl. z.B. Golan 2002; Guggerli 1999).

und die ebenfalls höchst unterschiedlichen Funktionen der Bildgebung, beispielsweise zur Operationsvorbereitung, für die viel stringenter an die Bilder gekoppelte Röntgentherapie, oder zur Erklärung für PatientInnen, denen schöne bunte Bilder zur Vermittlung von Informationen über ihre mögliche Krankheit geboten werden¹¹, bestimmen in nicht unerheblichem Masse, wie der Körper, oder das denkende Gehirn, und was von ihm dargestellt wird. Dass dabei an spezifische Vorbilder angeschlossen wird, um (die Illusion von) Ähnlichkeit und damit Objektivität und Referentialität zu erzeugen, steht außer Frage. Aber das Problem erhebt sich, wie im Rahmen der wissenschaftlichen Diskurse die Verbindlichkeit von Konventionen der Interpretationen dieser Bilder gesichert wird. Auch hier sind sicherlich verschiedene Wissenschaften und Verwendungszusammenhänge zu unterscheiden. Den Annahmen der Kognitionswissenschaften, Kognitionen durch gemittelte fMRI-Bilder visualisieren zu können, steht die vergleichsweise wenig interpretierende Interventionsmedizin gegenüber, die sich Hilfen in Suchprozessen nach pathologischem Gewebe verspricht und weniger von realistischen Abbildungen als von Unterstützung der auch von anderen Befunden geleiteten Imagination ausgeht. Der Verweis auf den Normalisierungsdiskurs (siehe Kap III) zeigt die Problematik einer Visualisierung des Mentalen, noch dazu einer Visualisierung, deren Angemessenheit und Adäquatheit äußerst zweifelhaft ist.

Literatur:

Boniface, Siman & Ziemann, Uls (2003): Plasticity in the Human nervous system. Cambridge Univ. Press.

Bredenkamp, Horst (2003): Artikel Bildwissenschaft, in: Pfisterer, Ulrich (Hrsg.), Metzlers Lexikon Kunstwissenschaft. Ideen, Methoden, Begriffe, Stuttgart, Weimar 2003, S.56-58.

Bredenkamp, Horst; Fischel, Angela; Schneider, Birgit; Werner, Gabriele (2003): Bildwelten des Wissens, in: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik Bilder in Prozessen (1/1), S. 9-20, <http://www2.rz.hu-berlin.de/kulturtechnik/img/dtb/bildwelten.pdf>.

Cassirer, Ernst (1925): Philosophie der symbolischen Formen II. Das mythische Denken, Berlin.

Crary, Jonathan (1996): Techniken des Betrachters. Sehen und Moderne im 19. Jahrhundert, Dresden: Verlag der Kunst.

Crary, Jonathan; Kwinter, Sanford (1992): Incorporations, New York.

¹⁰ Zur graduellen Unterscheidung von kausaler und intentionaler Bildproduktion vgl. Mitchell 1992: 29ff. "Potentially, a digital 'photograph' stands at any point along the spectrum ..."

¹¹ Die Behauptung von Bredenkamp e.a. (2003) eines "Disjunktionsprinzips der naturwissenschaftlichen Darstellung ...: Je natürlicher ein Gegenstand in der Wiedergabe erscheint, desto stärker wurde sein Bild konstruiert." bezieht sich wohl auf solche Verwendungszusammenhänge.

Crary, Jonathan; Baumgärtel, Tilman (1997): Computer mit eingebauter Melancholie. Ein Gespräch mit dem amerikanischen Kunsthistoriker Jonathan Crary, in: telepolis (23.01.1997), <http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/co/2106/1.html>.

Daston, Lorraine; Galison, Peter (1992): The Image of Objectivity, in: Representations Nr. 40, pp. 81-128.

Flusser, Vilém: Für eine Philosophie der Fotografie, Göttingen 1983;

Flusser, Vilém: Die Schrift. Hat Schreiben Zukunft? Frankfurt a.M. 1992.

Flusser, Vilém: Lob der Oberflächlichkeit. Für eine Phänomenologie der Medien, 2., durchgeseh. Aufl., Mannheim 1995.

Golan, Tal (2002): Sichtbarkeit und Macht. Maschinen als Augenzeugen, in: Geimer, Peter (Hg.): Ordnungen der Sichtbarkeit, Frankfurt/M.: Suhrkamp, S. 171-210.

Gould, Steven Jay: Der falsch vermessene Mensch; Suhrkamp, Frankfurt/M., 1981

Gugerli, David (1998): Die Automatisierung des ärztlichen Blicks. (Post)moderne Visualisierungstechniken am menschlichen Körper. Antrittsvorlesung ETH Zürich.
http://www.tg.ethz.ch/dokumente/pdf_Preprints/Preprint4.pdf, letzter Zugriff am 12.06.2003.

Gugerli, David (1999): Soziotechnische Evidenzen. Der ‚pictural turn‘ als Chance für die Geschichtswissenschaft, in: Traverse „Wissenschaft, die Bilder schafft“, Nr. 3, S. 131-159, http://www.tg.ethz.ch/dokumente/pdf_files/Evidenzen.pdf

Gugerli, David (2002): Ganz normale Bilder. Historische Beiträge zur visuellen Herstellung von Selbstverständlichkeit, Zürich: Chronos.

Heintz, Bettina: Zeichen, die Bilder schaffen; in: Johanna Hofbauer, Gerald Prabitz, Josef Wallmannsberger (Hrg.): Bilder, Symbole, Metaphern. Visualisierung und Informierung in der Moderne, Wien 1995, S. 47-81

Hennig, Jürgen: Chancen und Probleme bildgebender Verfahren für die Neurologie; in Schinzel (ed.): Interdisziplinäre Informatik: Neue Möglichkeiten und Probleme für die Darstellung komplexer Strukturen am Beispiel neurobiologischen Wissens; Freiburger Universitätsblätter, 3, 2001, Rombach, Freiburg.

Huerta, M.F.; Koslow, H.; Leshner, A.I.(1993): The Human Brain Project: An international Resource; TINS; 16: 52-56

Illich, Ivan (o.J.): The Scopic Past and the Ethics of the Gaze. A plea for the historical study of ocular perception, <http://www.pudel.uni-bremen.de/subjects/entkoerperung/SCOPICPU.PDF>.

Imdahl, Max (1994): Ikonik. Bilder und ihre Anschauung, in: Boehm, Gottfried (Hg.): Was ist ein Bild?. München.

Jaeger, Ludwig (2003): Die Verfahren der Medien: Transkribieren - Adressieren – Lokalisieren, in: Fohrmann, J., Schüttelz, E. (Hg.): Die Kommunikation der Medien. Tübingen: Niemeyer.

Jähne, Bernd: Digitale Bildverarbeitung, 4. Aufl., Heidelberg: Springer 1997.

Link, Jürgen (1992): Normalismus. Konturen eines Konzepts, in: kultuRRvolution, Nr. 27, S. 50-70.

Link, Jürgen (1997): Versuch über den Normalismus Westdeutscher Verlag, Opladen.

Masannek, Carmen: Das Human Brain Project- Hirnforschung im 21. Jahrhundert; in Schinzel (ed.): Interdisziplinäre Informatik: Neue Möglichkeiten und Probleme für die Darstellung komplexer Strukturen am Beispiel neurobiologischen Wissens; Freiburger Universitätsblätter, 3, 2001, Rombach, Freiburg.

Mitchell, W.J.T.: Der Pictorial Turn, in: Kravagna, Christian (Hrsg.): Privileg Blick. Kritik der visuellen Kultur, Berlin 1997, S. 15-40

Mitchell, William J. (1990) Was ist ein Bild?, in: Bohn, Volker (Hg.): Bildlichkeit. Internationale Beiträge zur Poetik, Frankfurt/M.: Suhrkamp.

Mitchell, William J. (1992): The Reconfigured Eye. Visual Truth in the Post-Photographic Era. Cambridge.

Nake, Frieder: Von der Interaktion. Über den instrumentalen und den medialen Charakter des Computers. In: ders. (Hg.): Die erträgliche Leichtigkeit der Zeichen. Ästhetik Semi otik Informatik. Agis Verlag Baden-Baden 1993, S. 165-189.

Narr, Katherine L., Thompson, Paul M. et. al. (2001). 3D Mapping of Gyral Shape and Cortical Surface Asymmetries in Schizophrenia: Gender Effects, Am. J. Psychiatry, 158(2), 244-255.

Ogawa 1990

Panofsky, Erwin (1927): Die Perspektive als 'Symbolische Form', in: Vorträge der Bibliothek Warburg 1924-1925, S. 258-330.

Peirce, Charles S. (1932): Elements of Logic. Collected Papers II, Cambridge, Ma.: Harvard University Press.

Peirce: <http://www.helsinki.fi/science/commens/die>
<http://santana.uni-muenster.de/Linguistik/user/steiner/semindex/peirce.html> ,
<http://www.iupui.edu/%7Epeirce/web/ep/ep2/ep2book/ch02/ep2ch2.htm>

Pörksen, U.: Weltmarkt der Bilder. Eine Philosophie der Visiotype; Klett-Cotta, Stuttgart, 1997.

Roland, Per; Zilles, Karl (1996): The developing European Computerized Human Brain Database for all imaging modalities. NeuroImage Bd. 4, 39-47.

Rorty, Richard M. (1992): The Linguistic Turn. Essays in Philosophical Method. Chicago: University of Chicago Press (zuerst: 1967).

Schinzel, B.: Körperbilder in der Biomedizin; in Frei Gerlach, F., et al (Hrsg.): Körperkonzepte; Münster/New York/München/Berlin: Waxmann 2003.

Schinzel, B.: Informatik im Kontext der Genderforschung in Technik und Naturwissenschaft; FIFF-Kommunikation 4, Dezember 2001, S 19-28.

Schinzel, B. (ed.): Interdisziplinäre Informatik: Neue Möglichkeiten und Probleme für die Darstellung und Integration komplexer Strukturen in verschiedenen Feldern der Neurologie; Freiburger Universitätsblätter Heft 149, 3. Heft, 2001; 180 S; Rombach, Freiburg.

Schmitz, Sigrid: Informationssysteme zu neurobiologischem Wissen – Chancen und Grenzen; in Schinzel (ed.): Interdisziplinäre Informatik: Neue Möglichkeiten und Probleme für die Darstellung komplexer Strukturen am Beispiel neurobiologischen Wissens; Freiburger Universitätsblätter, 3, 2001, Rombach, Freiburg.

Schmitz, S.: Das Projekt ‚GERDA‘: Informationstechnische Darstellung, kritische Reflexion und Dekonstruktion in der Hirnforschung. In: FIFF-Kommunikation 3/01, 2001a; S 36-41

- Schmitz, S.; Schinzel, B (2001): GERDA: A brain research information system for reviewing and deconstructing gender differences. Proc. of Symposium „The Nature of Gender – the Gender of Nature“. ZfF, Universität Kiel: Westdeutscher Verlag.
- Schmitz, Sigrid (2002): Hirnforschung und Geschlecht. Eine kritische Analyse im Rahmen der Genderforschung in den Naturwissenschaften, in: Bauer, Ingrid; Neissl, Julia (Hg.): Gender Studies - Denkachsen und Perspektiven der Geschlechterforschung. Innsbruck / Wien / München, S. 109-126.
- Schmitz, Sigrid (2003a): Neue Körper, neue Normen? Der veränderte Blick durch biomedizinische Körperbilder, in: Weber, Jutta; Bath, Corinna (Hg.): Turbulente Körper und soziale Maschinen. Feministische Studien zur Technowissenschaftskultur. Studien interdisziplinäre Geschlechterforschung 7. Opladen: Leske & Budrich, S. 217-237.
- Schmitz, Sigrid (2003b): Vom kleinen Unterschied. Das Magazin 14/2. S. 28-31.
- Schmitz, Sigrid (2004): Körperlichkeit in Zeiten der Virtualität; to be published in Schmitz, Schinzel (Hrsg.): Grenzgänge; Ulrike Helmer Verlag 2004
- Segall, Marshall H.; Campbell, Donald Thomas; Herskovits, Melville J. (1964): The influence of culture on visual perception. An advanced study in psychology and anthropology, Indianapolis: Bobbs-Merrill.
- Singer, Wolf : Ein neues Menschenbild? Suhrkamp, 2003 .
- Snyder, Joel (1998): Visualization and Visibility, in: Jones, Caroline; Galison, Peter (Eds.): Picturing Science - Producing Art, New York & London, pp. 379-397.
- Steinbrenner, Jakob; Winko, Ulrich (Hg.) (1997): Bilder in der Philosophie und in anderen Künsten und Wissenschaften, Schöning, Paderborn.
- Thompson PM, Woods RP, Mega MS, Toga AW (2000b) Mathematical /Computational Challenges in Creating Deformable and Probabilistic Atlases of the Human Brain. Human Brain Mapping 9: 81-92.
- Toga, Arthur W.; Mazziotta, John C. (Eds.) (1996): Brain mapping: The methods, San Diego: Academic Press.
- Toga, Arthur W.; Thompson, Paul M. (1998): An Introduction to Brain Warping, in: Toga, Arthur W. (Ed.): Brain Warping, San Diego: Academic Press, pp.1-26.
- Treichler, Paula A.; Cartwright, Lisa; Penley, Constance (1998): The Visible Woman. Imaging Technologies, Gender, and Science, New York.