

1. Einleitung

1.1 Räumliche Wahrnehmung

Eine einheitliche räumliche Repräsentation unserer Umwelt in ihrer Dreidimensionalität und Bewegung hängt von der Integration der Information verschiedener Sinnessysteme ab.

Insbesondere propriozeptive Afferenzen der Halsmuskelspindeln spielen bei der Wahrnehmung der Stellung des Kopfes in Bezug auf den Raum eine wichtige Rolle. Im Rezeptororgan des vestibulären Systems dienen die labyrinthären Bogengänge als primäre Detektoren für Winkelbeschleunigungen, während von den Otholithenorganen die Übermittlung von Linearbeschleunigungsreizen ausgeht. Das visuelle System liefert mittels retinotoper Abbildungen Informationen über den visuellen Raum.

Hier wird deutlich, dass es mehrerer differenter sensorischer Einflüsse bedarf, um sich als Mensch ein Bild über die auf den Körper bezogene „egozentrische“ (Brandt und Dieterich, 1999) und die auf die Umgebung bezogene „exozentrische“ (Brandt und Dieterich, 1999) Position im Raum zu machen.

Die folgenden Abschnitte sollen eine Einführung in die psychophysikalischen Hintergründe der Bewegungswahrnehmung bei Vibration der Nackenmuskulatur, deren klinische Bedeutung und über den derzeitigen Forschungsstand multisensorischer Areale bei Mensch und Tier liefern.

1.2 Psychophysik bei illusionärer Bewegungswahrnehmung durch Vibration der Nackenmuskulatur

Anfang der siebziger Jahre stellten Goodwin und McCloskey fest, dass die Vibration von Muskeln oder Muskelsehnen die propriozeptive Wahrnehmung verändern und beim Menschen Bewegungsillusionen induzieren kann (Goodwin et al., 1972; Mc Closkey, 1973). Goodwin und seine Kollegen zeigten, dass die vibratorische Stimulation der Bizepsehne zu einer scheinbaren Extension des Ellbogens führen kann (Goodwin et al., 1972). Diese Bewegungsillusion beinhaltet sowohl eine scheinbar veränderte Armposition, als auch das Gefühl einer kontinuierlichen Bewegung (Mc Closkey, 1973). Vibration der posterioren Nackenmuskeln kann beim Menschen ebenfalls illusionäre Bewegungswahrnehmungen des eigenen Körpers, sowie illusionäre Bewegung von visuell fixierten Blickpunkten auslösen (Taylor und Mc Closkey, 1991; Biguer et al., 1988). Dabei zeigt sich die Bewegungsillusion in ihrer Richtung konsistent aber von

kleinerem Ausschlag als die visuelle Illusion (Taylor und Mc Closkey, 1991). Durch die Vibration der Muskelspindeln erhalten die Ia-Afferenzen die Information, es habe eine Muskelsehnenverlängerung stattgefunden (Karnath, 1995). Im Gehirn wird diese scheinbare Verlängerung der Muskelsehnen entweder als Drehung des Kopfes zur anderen Seite oder als Drehung des Rumpfes im Verhältnis zum stationären Kopf zur anderen Seite interpretiert (Lackner und Levine 1979; Biguer et al., 1986). So wird die an sich weniger wahrgenommene Seite wieder mehr in die Körperwahrnehmung mit einbezogen. Wie sich in der Studie von Biguer und seinen Kollegen zeigte, erscheint eine illusionäre Bewegungswahrnehmung insbesondere entgegen der Zugrichtung des stimulierten Muskels aufzutreten (Biguer et al., 1988).

Lennerstrand und seine Kollegen stellten fest, dass vibratorische Stimulation der Nackenmuskeln sowohl visuelle Bewegungsillusionen, als auch Augenbewegungen induzieren können (Lennerstrand et al., 1996). Vibration von Nackenmuskeln kann kurze Phasen von horizontalen Augenbewegungen unterbrochen durch einen kurzen Nystagmus hervorrufen (Popov et al., 1999). Dieses Phänomen könnte zwar die visuelle Bewegungswahrnehmung erklären, aber nicht die subjektive Abweichung aus der Körpermitte (Karnath et al., 2002). Dies spricht dafür, dass hier eher kortikale Mechanismen als Verarbeitungsprozesse im Bereich des Hirnstammes eine hauptsächliche Rolle spielen (Karnath et al., 2002).

1.3 Klinischer Bezug

Klinische Beispiele für den Zusammenfluss und das Interagieren differenter sensorischer Einflüsse, liefern Untersuchungen bei Neglectpatienten. In Studien von Karnath und seinen Kollegen wurden Patienten mit rechts-parietaler Läsion und einem nach links bestehendem Neglect aufgefordert, einen Laserpunkt in die subjektiv empfundene Mitte des eigenen Körpers zu bringen (Karnath et al., 1995). Die Patienten, welche unter keinerlei visuellen Ausfällen litten, lokalisierten diesen Punkt um 15° nach rechts verschoben. Es ließen sich bei diesen Patienten keinerlei Defekte weder im vestibulären noch im propriozeptiven System feststellen. Vibration der Nackenmuskulatur erwies sich als eine gute nicht-invasive Methode räumlichen Neglect symptomatisch zu behandeln und ist zudem unabhängig von der Kooperation des Patienten (Johannsen et al., 2003). Man geht davon aus, dass bei Patienten mit räumlichem Neglect die Integration verschiedener Sinnesmodalitäten zu einer gemeinsamen Raumrepräsentation gestört ist (Karnath et al., 2004). Diese kortikalen

Vernetzungsstrukturen bilden damit eine Art inneres Bild für den eigenen Körper und dessen Raumwahrnehmung (Karnath et al., 1994; Bottini et al., 2001).

Es kann durch den Ausfall eines dieser Systeme zu einer Verschiebung des Aufmerksamkeitsraumes kommen (Han und Lennestrand 1999, Karnath, 2001). Durch Stimulation mittels anderer Modalität kann es zu einer temporären Kompensation der betroffenen Seite kommen. Sowohl vibratorische Stimulation der Halsmuskulatur als auch kalorisch vestibuläre Stimulation führten bei Patienten mit Neglect zu einer deutlichen temporären Verbesserung der um die sagittale Körperachse verschobenen körperlichen Selbstwahrnehmung, sowie zu einer teilweisen Rückbildung des kontralateral zur Läsion vorhandenen sensiblen Hemineglect (Karnath et al. 1993; Vallar et al. 1990). Bottini und Mitarbeiter konnten bei einem Patienten mit rechtscerebraler Läsion mittels vestibulärer Stimulation Störungen im Bereich der taktilen Wahrnehmung verbessern. Im PET stellten sich bei taktiler Berührung und vestibulärer Stimulation gesunder Probanden überlappende Hirnareale im Bereich der Insel, des Putamens, innerhalb von SII, des prämotorischen Kortex und des supramarginalen Gyrus dar, wohingegen bei dem Patienten mit Berührungsempfindungsstörungen Regionen wie das Putamen und die Insel ausgespart wurden, bei Kombination beider Stimuli aber auch hier eine Mitaktivierung erfolgte (Bottini et al., 1995). Es wird davon ausgegangen, dass eine Abnahme der Neglectsymptomatik bei kontralateral zur Läsion durchgeführter Vibration der Nackenmuskulatur nicht auf allgemeine sensomotorische Stimulation, sondern durch Aktivierung afferenter Ia Fasern und deren spezifische Rolle bei der Repräsentation von räumlicher Selbstwahrnehmung zu erklären ist (Schindler et al., 2002; Karnath et al., 1995). Es scheint, dass die bei Vibration vorgetäuschte cerebral eingehende Information der Muskelsehnenverlängerung, wie sie bei wirklicher Drehung des Halses stattfindet, einen Neglect, also ein Defizit der gerichteten räumlichen Aufmerksamkeit kompensieren kann (Karnath et al., 1993).

1.4 Der Somatosensorische Kortex

Der somatosensorische Kortex gliedert sich in einen primären und einen sekundären somatosensorischen Kortex (Penfield und Rasmussen, 1950; Mountcastle, 1980).

Der primär somatosensorische Kortex (SI), welcher Anteile des Sulcus centralis, des Gyrus postcentralis und den anterioren Teil des Parietallappens einnimmt, wird in differente zytoarchitektonische Areale unterteilt. Nach der Klassifikation von Brodmann

und Vogt und Vogt werden diese von anterior nach posterior als Area 3a, 3b, 1 und 2 bezeichnet (Brodmann, 1903; Vogt und Vogt, 1919). 1966 wurde Area 3a erstmals von Oscarsson und Rosèn als „Zone“ (Oscarsson und Rosen, 1966) identifiziert, die hauptsächlich Afferenzen aus la Nervenfasern von Muskelspindeln erhält. Jedoch war dabei nicht klar, ob Area 3a allein ein kortikales Areal darstellt, ob sie eine Komponente des sensorischen oder eher des motorischen Kortex oder eine Übergangszone zwischen sensorischem und motorischem Kortex darstellt. Ein ähnlich lokalisiertes Areal konnten Hassler und Muhs-Clement bei Katzen identifizieren (Hassler und Muhs, 1959). Jones und Porter nannten dieses Areal bis zu den ersten mikrostrukturellen Versuchen „transition zone“ (Jones und Porter, 1980). Brodmann beschrieb 1903 das Gebiet des cerebralen Kortex um den Boden des menschlichen Sulcus centralis folgendermassen: „die Grenze zwischen den beiden Centren (Area 4 und 3) wird, abgesehen von einer kurzen, die Vermischung beider Strukturtypen zeigenden Übergangszone, im allgemeinen durch den Sulcus centralis gebildet“ (Brodmann 1903). Die Lehrer Brodmanns, Cécile und Oscar Vogt bezeichneten das in der Tiefe des Sulcus centralis befindliche Gebiet als „Area 3a“ (Vogt und Vogt, 1919). Es herrschten zwei oppositionelle Meinungen in Bezug auf anatomisch verlaufende Grenzen innerhalb des somatosensorischen Kortex: Vogt und seine Kollegen sprachen von haarscharfen Grenzen, Bailey und von Bonin dagegen von mehr oder weniger homogenen Übergängen innerhalb der Areale (Vogt und Vogt, 1919; Bonin und Bailey, 1947). Bildgebungsstudien mit Positronenemissionstomographie (PET) (Young et al., 2003; Bodegard et al., 2000) und funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) (Francis et al., 2000; Moore et al., 2000) zeigen eine ähnliche Organisation des menschlichen primären somatosensorischen Kortex. Geyer und Kollegen untersuchten bei postmortalen Hirnschnitten die topographische Variabilität der Zytoarchitektur durch Fusion histologischer Daten mit anatomischen MR-scans (Geyer et al., 2000). Die Zytoarchitektur von Area 3a, 3b und 1 wurde in einem standardisierten anatomischen Format eines computerisierten Hirnatlas dargestellt. Hier zeigte sich eine grosse Variabilität innerhalb der einzelnen Gehirne bezüglich der Ausdehnung der jeweiligen Areale (Geyer et al., 2000; Geyer et al., 1999). In über 50% der Gehirne befanden sich Area 3a, 3b und 1 in der Tiefe des Sulcus centralis, seinem hinteren aufsteigenden Anteil und im oberen Anteil des Gyrus postcentralis. Generell scheint eine Aussage über mikrostrukturell-funktionelle Korrelationen einzelner Areale bei ausschließlich makrostruktureller Analyse nur eingeschränkt möglich, denn gerade in

mikrostrukturellen Darstellungen wird klar, dass definierte interareale Grenzen nicht immer mit makroskopischen Strukturen des humanen Kortex übereinstimmen (Geyer et al., 2000; Roland und Zilles, 1994; Roland et al., 1997).

Die einzelnen Areale innerhalb von SI werden durch unterschiedliche Stimulationsmodalitäten aktiviert. Bei oberflächlicher Hautstimulation ließ sich mittels Einzelzelleableitungen elektrophysiologische Aktivität innerhalb von Area 3b und 1 ableiten (Krubitzer und Calford, 1992). Dagegen zeigen Area 3a und zum Teil auch Area 2 bei propriozeptiver Stimulation im fMRT ein positives BOLD-Signal (Moore et al., 2000). Area 3a wird funktionell dem propriozeptiven System zugeordnet, welches über periphere Rezeptororgane wie die Muskelspindeln, Gelenke und die Haut Informationen über die Stellung des Körpers im Raum erhält. Über den Funiculus posterior und den lateralen ventroposterioren Thalamus werden diese Informationen in den somatosensorischen Kortex weitergeleitet. Area 2 wird in der Literatur eine integrative Funktion zugeschrieben, da hier Informationsfluss von Area 3a verarbeitet und weitergeleitet wird (Pons und Kaas, 1986; Linda et al., 1993). Eine detaillierte Darstellung der Organisation von Area 3a gelang Krubitzer und Mitarbeitern mittels Einzelzelleableitungen beim Affen (Krubitzer et al., 2004). Bei genauer Aufschlüsselung ließ sich innerhalb von Area 3a eine bis auf den Schwanz und die Genitalien der Affen komplette Repräsentation der kontralateralen Körperhälfte darstellen. Die topographische Organisation von Area 3a stellte sich jedoch nicht annähernd so präzise wie in Area 3b dar. Nur ein kleiner Teil der Impulse der Propriozeption gelangt zum Bewusstsein. Der grösste Teil verläuft in Regelkreisen, die u.a. der Willkürmotorik dienen und als Haltereфлекse der Schwerkraft der Erde entgegenwirken.

Zur Untersuchung möglicher Frequenzspezifitäten innerhalb des primären somatosensorischen Kortex wurden Untersuchungen im fMRT durchgeführt.

G. Harrington entwarf einen piezokeramischen Schwinger zur somatosensorischen Fingerstimulation im fMRT (Harrington et al., 2000). Bei acht gesunden Probanden erfolgte die Stimulation mittels verschiedener Frequenzen an den Fingerspitzen (Harrington und Downs, 2001). Dabei bestätigte sich die Hypothese, dass die vibrationssensiblen Rezeptoren der Haut (Meissner Körperchen und Pacini Körperchen) durch verschiedene Frequenzen aktivierbar sind. Meissner Körperchen, welche insbesondere für das Tast- und Schmerzempfinden zuständig sind, reagierten mit Aktivierung bei einer Stimulation von 10 bis 50 Hz. Pacini Körperchen dagegen befinden sich in der tieferen Dermis und im subcutanen Bindegewebe. Sie sind

überwiegend vibrationssensibel und reagierten mit Aktivierung bei einer Frequenz von 60-300 Hz. Sie zeigen im Gegensatz zu den Meissnerschen Tastkörperchen grosse rezeptive Felder, aber eine wesentlich geringere Dichte. Harrington bezeichnete die Stimulation innerhalb niedrigerer Frequenzen (5-40 Hz) als „flutter“ (Harrington et al., 2001). Stimulationsfrequenzen zwischen 60-300Hz wurden „Vibration“ genannt und von den Probanden auch als vibratorische Stimulation empfunden. Eine ähnliche Studie von Francis et al. zeigte bei vibratorischer Stimulation der Finger im funktionellen MRT ebenfalls eine Aktivierung im kontralateralen SII bei höheren Frequenzen, jedoch eine Signalabnahme innerhalb von SI (Francis et al., 2000).

Eine schematische Darstellung des primär somatosensorischen Kortex, sowie die mikrostrukturelle Organisation von Area 3a soll in den folgenden beiden Abbildungen (Abb.1.1 und Abb.1.2) gezeigt werden.

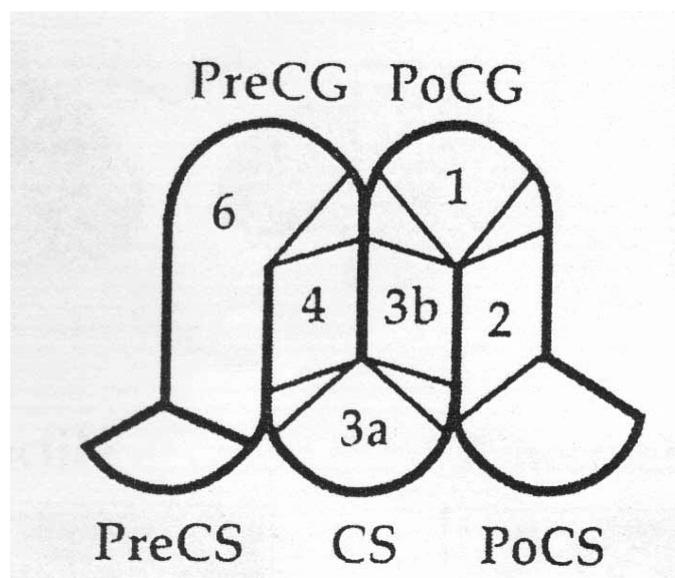


Abb.1.1 Die Abbildung zeigt eine schematische Darstellung des primären somatosensorischen Kortex und angrenzender Areale des motorischen Kortex. Area 3a befindet sich in der Tiefe des Sulcus centralis. PreCS = Sulcus präcentralis, CS = Sulcus centralis, PoCS = Sulcus postcentralis (Moore et al., 2000)

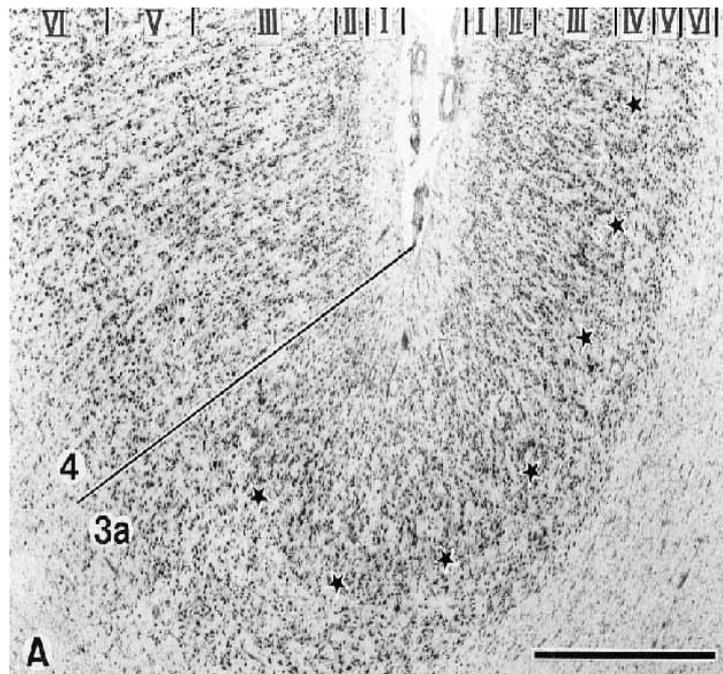


Abb.1.2 Diese Abbildung stellt die mikrostrukturelle Organisation von Areas 3a des primären somatosensorischen Kortex dar (Geyer et al., 1999). Die mit den Sternchen gekennzeichnete Zellschicht stellt die für Area 3a typischen Riesenpyramidenzellen dar.

Trotz umfangreicher Forschung existiert im Vergleich zu SI nur relativ wenig detailliertes Wissen bezüglich der exakten räumlichen Ausdehnung, der strukturellen Organisation und Funktion des menschlichen sekundär somatosensorischen Kortex (SII). SII ist insbesondere in Aufgaben und Verarbeitungsprozesse von taktilen Informationen zur Objektwahrnehmung, bei passiven Bewegungen, illusionären Bewegungen und bei kombinierten motorisch sensiblen Abläufen involviert. Die Existenz eines sekundären somatosensorischen Kortex wurde erstmals von Adrian basierend auf Forschungsergebnissen bei Katzen beschrieben (Adrian 1940; Adrian, 1941). Während Adrian diese Tatsache als spezielle Eigenschaft des Kortex der Katze interpretierte, konnten Woolsey und Kollegen zeigen, dass SII auch bei Affen und anderen Tieren existiert (Woolsey, 1943; Woolsey und Fairman, 1946). Im Gehirn des Affen stellte sich SII im Bereich des oberen Endes des Sulcus lateralis in der Region des parietalen Operculums dar. Beim Menschen schlugen erstmals Penfield und seine Kollegen die Existenz von SII im parietalen Operculum vor (Penfield und Rasmussen, 1950). Die Ergebnisse basierten auf intraoperativen Stimulationsexperimenten an Patienten mit epileptischem Anfallsleiden. Während der nachfolgenden Jahrzehnte wurde das parietale Operculum mittels elektrophysiologischer (Krubitzer et al., 2004) und auch

anatomischer Techniken (Burton und Fabri, 1995) intensiv erforscht, wodurch detailliertere Beschreibungen von SII ermöglicht wurden.

Ergebnisse nicht invasiver Bildgebungsstudien unterstützen die Existenz eines humanen SII und dessen Lokalisation im Bereich des oberen Endes des Sulcus lateralis, sowie eine somatotopische Organisation von SII (Francis et al., 2000; Disbrow et al., 2000; Ruben et al., 2001). Ruben und seine Mitarbeiter untersuchten an gesunden Probanden mittels fMRT bei elektrischer Stimulation der Finger und des Hallux die somatotopische Organisation von SII. Innerhalb von SII zeigte sich eine kortikale Darstellung beider Finger kontralateral im parietalen Operculum innerhalb des Sulcus lateralis, wohingegen sich der Hallux mehr medial in Fundusnähe des Sulcus lateralis am hinteren Pol der Insula darstellte. Eine ähnliche Somatotopie zeigte sich auch ipsilateral in SII, was bei unilateraler Stimulation auf eine bihemisphärielle Organisation hindeutet. Insgesamt stellte sich die somatotopische Organisation innerhalb von SII weniger scharf als in SI dar, wo beispielsweise eine separate kortikale Repräsentation der beiden Finger erfolgt (Villringer et al., 1998).

Während Whitsel und seine Kollegen davon ausgingen, dass 90% der Neuronen in SII bilateral rezeptive Felder besitzen (Whitsel et al., 1969), stellten Robinson and Burton fest, dass nur ein Drittel der Neurone in SII bilaterale rezeptive Felder aufweisen, insofern ist bei unilateraler Stimulation von einer ipsilateral schwächeren Aktivierung auszugehen (Robinson und Burton, 1980a). Disbrow und ihre Kollegen untersuchten mittels Tracerinjektionen kortikale Verbindungen innerhalb des lateralen Sulcus, zwischen SII, der parietal ventralen Area (PV) und der parietal posterioren Area (PP) (Disbrow et al., 2003).

1.5 Multisensorische kortikale Areale für räumliche Wahrnehmung

Anfang der siebziger Jahre wurden am Affen erste neurowissenschaftliche Experimente durchgeführt, die die Vermutung eines multimodalen Charakters der Bewegungswahrnehmung aufkommen ließen. In Einzelzelleableitungen wiesen Ödkvist und seine Mitarbeiter durch elektrische Stimulation des Nervus vestibularis Antworten innerhalb der Armrepräsentation von Area 3a nach (Ödkvist et al., 1974). Area 3a war, wie zuvor erwähnt, als somatosensorisches Projektionsfeld von

Muskelspindelafferenzen beschrieben worden (Schwarz et al., 1973; Jones und Porter 1980).

Ödkvist und seine Kollegen wiesen bilaterale Aktivierungen, jedoch mit höherer Amplitude des abgeleiteten Signals kontralateral nach (Ödkvist et al., 1974). Bei sehr starker Stimulation ließen sich ebenfalls Potentiale in auditorischen und facialem Arealen nachweisen. Die Ableitungen zeigten Aktivierungen im Bereich des vorderen Anteils des Sulcus centralis. Hier befindet sich Area 3a. Diese Studie bewies die Existenz von vestibulär kortikalen Projektionen zu Area 3a und zeigte bereits, dass zur Raumwahrnehmung erforderliche sensorische Informationen möglicherweise multisensorisch integriert werden.

Bezüglich der Detektion multimodaler Areale, die an der räumlichen Wahrnehmung beteiligt sind, führten Guldin und Grüsser an unterschiedlichen Affenspezies Untersuchungen mittels Einzelzelleableitungen und Tracerinjektionen durch. Guldin und Grüsser erzeugten durch vestibulärer Stimulation bei 30-50% der untersuchten Neurone innerhalb von Area 3aNv Aktivierungen (Guldin et al., 1992; Guldin und Grüsser, 1998). Sie wiesen Neuronen mit Antwort auf vestibuläre Stimulation in der Repräsentation des Nackens in Area 3a nach und nannten dieses Areal „3a-neck-vestibular-region“ (Area 3aNv) (Guldin et al., 1992; Guldin und Grüsser, 1998). Die zytoarchitektonische Analyse von Area 3aNv zeigte, dass sich dieses Areal innerhalb von Area 3a befindet und sich bis in Area 4 des motorischen Kortex ausdehnt. Die von Guldin und Grüsser beschriebene Area 3aNv entspricht vermutlich nicht dem von Ödkvist beschriebenen Hand- oder Armareal. Entsprechend bezeichneten Guldin und Grüsser das von Ödkvist beschriebene Areal als „3a-hand-vestibular-region“ (Guldin und Grüsser, 1998).

Guldin und Grüsser stellten mittels retrograder Tracermethoden beim Affen neuronale Verbindungen zwischen Area 3aNv und einem retroinsulären in der Tiefe des Sulcus lateralis befindlichen Areales dar (Guldin et al., 1992). Dieses Areal wurde mittels Einzelzelleableitungen als Kernregion eines multimodalen Netzwerkes für Bewegungskontrolle identifiziert und parietoinsulärer vestibulärer Kortex (PIVC) genannt (Grüsser et al., 1990a; Grüsser et al., 1990b). Mittels Einzelzelleableitungen beim Affen zeigte sich, dass 50% der in PIVC befindlichen Neurone auf vestibuläre Stimulation mit einer Aktivierungsantwort reagieren, die restlichen 50% der dort befindlichen Neurone antworteten mit Aktivierungen auf somatosensorische, optokinetische und visuelle Stimulation (Guldin und Grüsser, 1998). Als weitere Projektionen zu PIVC konnten Verbindungen von Area 7, 3a, 2v, sowie indirekte Verbindungen mit der visual posterior

sylvian Area (VPS) und der medial superior temporal Area (MST) nachgewiesen werden (Guldin und Grüsser, 1998). Visuelle, vestibuläre und propriozeptive Afferenzen mit Projektion auf gemeinsame kortikale Zentren konnten ebenfalls in Area 2v des intraparietalen Sulcus (Büttner und Buettner, 1978), in Area 7 des unteren Parietallappens (Andersen et al., 1997), in VPS der temporo-parietalen Übergangszone (Guldin und Grüsser, 1998), sowie im MST (Bremmer et al., 1999) beobachtet werden. Dieses kortikale Netzwerk, welches vestibuläre Informationen über Bewegungen und Position des Kopfes im Raumes verarbeitet, wurde von Guldin und seinen Kollegen als „inner vestibular circuit“ (Guldin et al., 1992) bezeichnet und beinhaltet die Areale PIVC, 3aV, sowie Teilgebiete von Area 2 und 7. Dieses Netzwerk wiederum erhält, wie bereits oben erwähnt, Informationen von anderen kortikalen sensorischen Systemen. In Abb.1.3 werden die bei verschiedenen Affenspezies gefundenen multimodalen Areale zusammenfassend dargestellt.

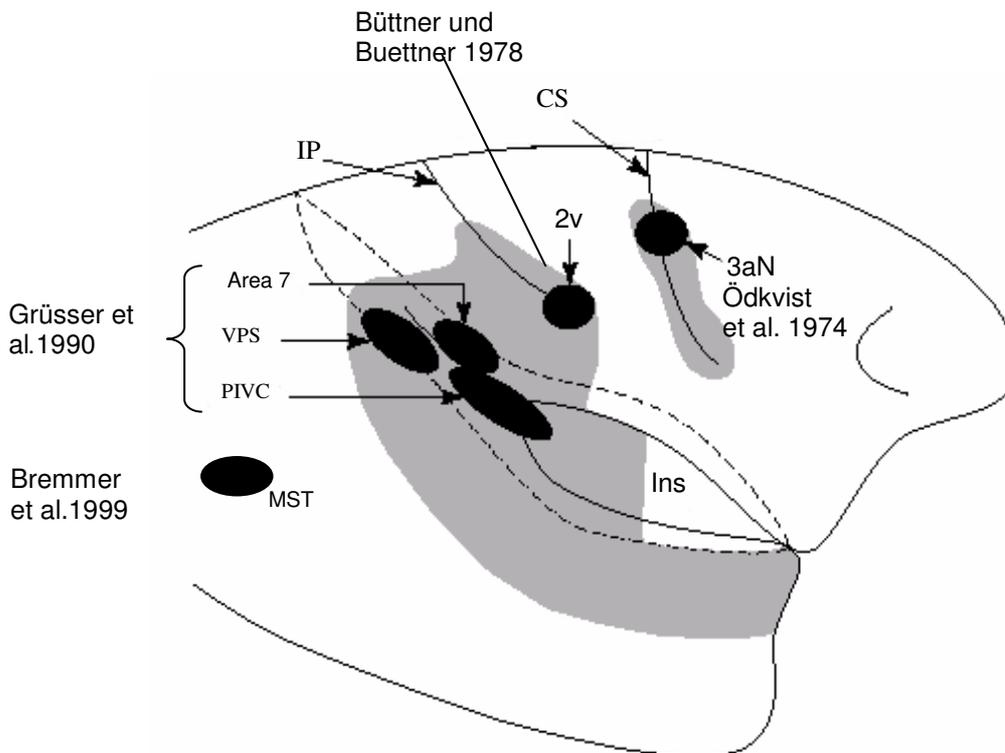


Abb1.3: Dargestellt ist die laterale rechte Oberfläche eines schematischen Primatenkortex (modifiziert nach Guldin und Grüsser), bei dem der Sulcus lateralis sylvii aufgefaltet ist. Die grau schattierte Fläche schließt alle Areale ein, die bisher beim Menschen oder Affen als vestibulär bezeichnet wurden. In Area 3aN, 2v und PIVC ließen sich bei propriozeptiver Stimulation Aktivierungen nachweisen. Area 3aN wurde von Guldin und Grüsser in eine „3a-hand-vestibular-region“ und eine „3a-neck-vestibular-region“ unterteilt (Guldin und Grüsser, 1998). CS = Sulcus centralis; IP=Sulcus intraparietalis; Ins = Insel, PIVC = Pariteo-insulär-vestibulärer-Kortex, VPS = visuell posterior sylvian area, MST = medial superior temporal area, Area 7

In Analogie zu den tierexperimentellen Daten gelang es bisher beim Menschen in Ansätzen die Hypothese eines humanen menschlichen Netzwerkes für räumliche Wahrnehmung in Ansätzen zu bestätigen.

In einer PET-studie untersuchten Bottini und Mitarbeiter Blutflußänderungen bei vestibulär-kalorischer Reizung und propriozeptiver Stimulation (vibratorische Stimulation der Nackenmuskulatur) (Bottini et al., 2001). Die Stimulation erfolgte jedoch in unterschiedlichen Probandenkollektiven und kann somit nicht als wirkliche multimodale Studie beschrieben werden. Die dabei identifizierten vestibulär- somatosensorischen Hirnregionen umfassten neben der Insel, SII, SI sowie die temporo-parietale

Übergangszone. Allerdings muss eingeschränkt hinzugefügt werden, dass in dieser Studie eine statistisch inkorrekte Konjunktionsanalyse verwandt wurde, so dass in der Konjunktion sich mehr Areale als aktiviert zeigten, als in den jeweiligen Einzelauswertungen von vestibulärer und vibratorischer Stimulation (Nichols et al., 2005).

Abb.1.4 stellt die Ergebnisse dieser beschriebenen Studie dar.

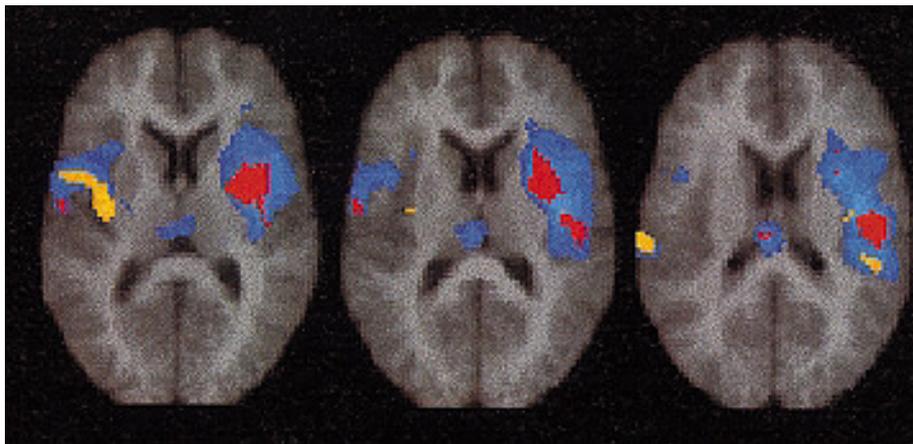


Abb.1.4 Hirnregionen die bei propriozeptiver Stimulation der Nackenmuskulatur und kalorisch vestibulärer Stimulation einen Anstieg des rCBF zeigten (Messung mit H_2-O^{15} -PET). Alle dargestellten Regionen sprachen auf den somatosensorischen Reiz an. In den blauen Arealen aktivierte die vestibuläre Stimulation nicht signifikant stärker als die somatosensorische. Gelb symbolisiert einen signifikant größeren Einfluss der vestibulären Stimulation. In den roten Regionen war der Anteil beider Modalitäten an der Aktivierung etwa gleich groß (Bottini et al., 2001).

Fasold konnte mittels kalorisch vestibulärer und visueller Bewegungsstimulation im fMRT jeweils deutliche Analogien zu den erwähnten tierexperimentellen Ergebnissen nachweisen (Fasold et al., 2002; Fasold, 2005). Es zeigten sich BOLD-Signalanstiege im Bereich von Area 3a in der Tiefe des Sulcus centralis, im Bereich des Sulcus lateralis des humanen PIVC, in Area 2v und MT/MST. Insgesamt stellte sich eine rechtsseitige Dominanz der Aktivierungen dar.

1.6 Problemstellung

Räumliche Wahrnehmung und die interne Repräsentation von Körperposition und Körperbewegung im umgebenden Raum erfordert die Integration mehrerer Sinnesmodalitäten. Ein wesentlicher Anteil dabei ist die Berechnung der Stellung des Kopfes im Verhältnis zum Rumpf, die über die multisensorische Integration von propriozeptiven Afferenzen der Halsmuskulatur erfolgt. Eine Hand- oder Blickbewegung beispielsweise zu einem visuellen Ziel erfordert die Verrechnung der retinalen Ziellokalisierung mit Informationen über Augen- und Kopfstellung, um die Position des Ziels in Bezug auf die eigene Körperposition zu bestimmen. Es ist dabei anzunehmen, dass die Integration der verschiedenen sensorischen Informationsflüsse ähnlich den aus tierexperimentellen Daten abgeleiteten Modellen (Guldin und Grüsser, 1992) in einem Netzwerk multisensorischer kortikaler Areale, die auch vestibuläre und visuelle Afferenzen haben, erfolgt. Daraus leiten sich die folgenden Problemstellungen ab:

- welche kortikalen Areale sind im Menschen an der Informationsverarbeitung von propriozeptiven Signalen der Kopfstellung aus der Hals- und Nackenmuskulatur beteiligt?
- werden diese Signale nicht nur in bekannten primär und sekundär somatosensorischen Arealen, sondern darüber hinausgehend in Arealen, die relevant für räumliche Wahrnehmung und Körperposition sind, verarbeitet?
- wie ist der Bezug der Areale, die durch propriozeptive Stimulation der Nackenmuskulatur erregt werden zu Arealen, die kortikal vestibuläre und visuelle Informationen verarbeiten?